



Hochschule für Forstwirtschaft
Rottenburg

Hochschule für Angewandte Wissenschaften

BACHELORARBEIT

Im Studiengang
B.Sc. Forstwirtschaft

Ein Vergleich der Effektivität von Gießsäcken
und Gießrändern als Bewässerungssysteme
für Berg-Ahorn-Jungbäume (*Acer pseudoplatanus*)
in der Tübinger Steinlachallee
unter Zuhilfenahme digitaler Messdaten

Fabian Frank

Allgemeine Angaben

Verfasser: Fabian Frank
Schwabenbergstraße 143
70184 Stuttgart
Studiengang B.Sc. Forstwirtschaft
Matrikelnummer: 201726

Erstprüfer: Prof. Dr. Dirk Wolff
Professur für Waldarbeit und Forsttechnik
Hochschule für Forstwirtschaft Rottenburg

Zweitprüferin: Ruth Morell
Institut für Arboristik
Neckarhalde 84
72108 Rottenburg am Neckar

Hochschule: Hochschule für Forstwirtschaft Rottenburg
Schadenweilerhof
72108 Rottenburg am Neckar

Copyright

© 2024

D-72108 Rottenburg am Neckar

Alle Rechte, insbesondere das Recht der Vervielfältigung, Verbreitung und Übersetzung vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf in irgendeiner Form ohne schriftliche Genehmigung reproduziert oder über elektronische Systeme verbreitet werden. Die Genehmigung ist bei der HFR einzuholen. Bei gesperrten Arbeiten ist jegliche Art der Weiterverbreitung verboten.

Hinweis zur gendergerechten Sprache

Zur besseren Lesbarkeit wird in dieser Arbeit die Sprachform des generischen Maskulinums verwendet. Die Verwendung der männlichen Form ist geschlechtsneutral und ohne Ausgrenzung etwaiger Personengruppen zu verstehen. Es wird generell ein diskriminierungsfreier Ansatz verfolgt.

Vorwort

In dieser Bachelorarbeit sollte ein aktuelles Thema behandelt werden. Bereits auf den Augsburger Baumpflegetagen 2023 hatten Themen wie Baumbewässerung und Schwammstädte einen großen Raum eingenommen und spätestens seit die Aufnahmen für diese Bachelorarbeit in Tübingen auf großes mediales Interesse von Presse, Fernsehen und Radio gestoßen sind, wurde klar, welche Aktualität diese Thematik inne hat und dass die zunehmenden Herausforderungen für Bäume in der Stadt auch in der Mitte der Gesellschaft im Bewusstsein angekommen sind.

Danksagung

Persönlichen Dank möchte ich an alle richten, die mich bei der Erstellung dieser Bachelorarbeit unterstützt haben.

Allen voran an meine Bachelorarbeitsbetreuerin Ruth Morell, mit der ich ununterbrochen Rücksprache halten konnte und die diese Bachelorarbeit erst ermöglichte.

Weiterhin gilt mein Dank den Mitarbeitern Marvin König und Gerhard Waringer der Stadtgärtnerei Tübingen, die mich von Anfang an vollumfänglich unterstützten, Material zur Verfügung stellten und die logistische Herausforderung der Bewässerung bewältigten.

Ich möchte mich bei Herrn Dr.-Ing. Lothar Wessolly bedanken, der mir mit seinem breit gefächerten Wissen und seiner Erfahrung zur Seite stand.

Außerdem bedanke ich mich bei der Firma Treesense GmbH, die mir ihre Software kostenfrei zur Verfügung gestellt hat.

Ganz besonderer Dank gilt Holger und Annette Gaiser, die mir freundlicherweise spontan einen Stromanschluss für den Aufbau des Gateways auf ihrer Terrasse zur Verfügung stellten.

Für das aufmerksame Korrekturlesen bedanke ich mich herzlichst bei Henrike Hönerloh und Leo Poker.

Zuletzt gilt mein besonderer Dank meinen Eltern, die mich durch das gesamte Studium begleitet und immerfort unterstützt haben.

Ich widme diese Arbeit meinem Großvater, der selbst immer gerne Forstwirtschaft studiert hätte.

Inhaltsverzeichnis

Allgemeine Angaben	I
Hinweis zur gendergerechten Sprache.....	II
Vorwort.....	III
Danksagung.....	III
Inhaltsverzeichnis.....	IV
Abbildungsverzeichnis.....	VI
Tabellenverzeichnis.....	VI
Zusammenfassung.....	VIII
Abstract.....	VIII
1 Einleitung.....	1
1.1 Zielsetzung der Arbeit	2
2 Stand des Wissens	3
2.1 Berg-Ahorn	3
2.1.1 Bedeutung und Eignung als Stadt- und Straßenbaum	3
2.2 Baumbiologische Hintergründe.....	4
2.2.1 Photosynthese.....	4
2.2.2 Wasserhaushalt.....	5
2.2.3 Wasserverfügbarkeit auf einem Standort	6
2.2.4 Trockenstress	7
2.3 FLL-Richtlinien.....	8
2.3.1 Gießempfehlungen	9
2.4 Gießsysteme	11
2.4.1 Gießsäcke	11
2.4.2 Gießränder	11
2.4.3 Einsatzmöglichkeiten und Einsatzgrenzen.....	11
3 Material und Methoden	13
3.1 Untersuchungsbäume.....	13
3.1.1 Vorüberlegungen	13
3.1.2 Ausgangslage.....	13
3.2 Eingesetzte Gießsysteme.....	14
3.2.1 arboGreenWell™ Gießrand.....	14
3.2.2 baumbad Premium Bewässerungsbeutel 75l.....	15
3.3 Eingesetzte Sensorik.....	15
3.3.1 Treesense und Kronensensor.....	15
3.3.2 Bodenfeuchtesensor.....	16
3.3.3 LoRaWAN.....	17
3.4 Versuchsaufbau.....	17
3.4.1 Gießstrategie Tübingen – generelles Vorgehen	17

3.4.2	Gießstrategie Tübingen – versuchsbezogene Abwandlung.....	17
3.5	Versuchsdurchführung.....	18
3.5.1	Sensoreinbau	18
3.5.2	Bewässerungsdurchgänge	20
3.5.3	Ausbau	20
3.6	Statistische Auswertung.....	21
4	Ergebnisse.....	22
4.1	Augenscheinliche Ergebnisse.....	22
4.2	Deskriptive Datenauswertung.....	22
4.3	Analytische Datenauswertung	25
4.3.1	Varianzvergleich	25
4.3.2	Zweiseitiger t-Test für unabhängige Stichproben des temperaturbereinigten Widerstands.....	26
4.3.3	Zweiseitiger t-Test für unabhängige Stichproben des Feuchtigkeitsgehalts...	27
4.3.4	Konfidenzintervalle	29
4.3.5	Nötiger Stichprobenumfang für signifikante Unterschiede der Gießsysteme.	29
5	Diskussion	33
5.1	Diskussion des Materials	33
5.1.1	Untersuchungsbäume.....	33
5.1.2	Eingesetzte Gießsysteme.....	33
5.1.3	Eingesetzte Sensorik.....	33
5.2	Diskussion der Methoden	34
5.2.1	Allgemeiner Versuchsaufbau	34
5.2.2	Impedanzmessung	35
5.2.3	Bodenfeuchtigkeitsmessung	35
5.2.4	Trockenstressspitzen.....	36
5.2.5	Statistische Auswertung.....	36
5.3	Diskussion der Ergebnisse	37
5.3.1	Gemessene Daten.....	37
5.3.2	Statistische Ergebnisse	37
6	Folgerungen	39
6.1	Hinsichtlich der Zielsetzung der Arbeit.....	39
6.2	Ausblick und Horizonterweiterung.....	39
6.3	Hinsichtlich weiterer Untersuchungen auf diesem Gebiet	40
6.4	Fazit	40
	Literaturverzeichnis	41
	Eidesstattliche Erklärung.....	45
	Anhang.....	46

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersichtskarte der Untersuchungsbäume an der Steinlachallee	13
Abbildung 2 arboGreenWell™ Gießrand 67cm.....	14
Abbildung 3: baumbad Premium Bewässerungsbeutel 75l.....	15
Abbildung 4: Kronensensor „Treesense Pulse R“.....	16
Abbildung 5: Bodenfeuchtesensor „Dragino LSE01“	16
Abbildung 6: eingebohrte Elektroden	18
Abbildung 7: fertig installierter und einsatzbereiter Kronensensor mit Funkeinheit	18
Abbildung 8: Abstand vom Stamm zum Installationsrohr für den Bodensensor	19
Abbildung 9: Bodenfeuchtesensor LSE01 mit verbundener Gewindestange als Einbauhilfe	19
Abbildung 10: fertig installierter und einsatzbereiter Bodenfeuchtesensor mit Funkeinheit	19
Abbildung 11: Bewässerung mithilfe des arboGreenWell™ Gießrands.....	20
Abbildung 12: Bewässerung mithilfe des baumbad Premium Bewässerungsbeutel 75l....	20
Abbildung 13: Vitalität der Bäume nach Abschluss der Untersuchungen.....	22
Abbildung 14: Abdruck des Fixierungsgummis	22
Abbildung 15: Bohrungslöcher nach Abbau der Sensorik.....	22
Abbildung 16: Diagramm der Konfidenzintervalle über Stichprobenanzahl (n) sowie Schnittpunkt der Grenzen (rot markiert) auf Datengrundlage des ersten Durchgangs.....	30
Abbildung 17: Diagramm der Konfidenzintervalle über Stichprobenanzahl (n) sowie Schnittpunkt der Grenzen (rot markiert) auf Datengrundlage des zweiten Durchgangs.....	31
Abbildung 18: Diagramm der Konfidenzintervalle über Stichprobenanzahl (n) auf Datengrundlage beider Durchgänge	32
Abbildung 19: mit Umgebungssubstrat verstopftes PVC-Rohr	36
Abbildung 20: unzureichend fixierte Gewindestange	36

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Wassermenge in Liter/Durchgang je Stammumfang und nutzbarer Feldkapazität	9
Tabelle 2: Gießempfehlungen in Liter/Woche je Stammumfang nach Lorenz von Ehren- Pflanzschule	10
Tabelle 3: Ausgangslage der untersuchten Berg-Ahorn-Bäume.....	14
Tabelle 4: Arithmetische Mittelwerte und prozentuale Unterschiede von gemessenem Widerstand, temperaturbereinigtem Widerstand und Feuchtigkeitsgehalt je Gießsystem in Durchgang 1	23

Tabelle 5: Arithmetische Mittelwerte und prozentuale Unterschiede von gemessenem Widerstand, temperaturbereinigtem Widerstand und Feuchtigkeitsgehalt je Gießsystem in Durchgang 2	24
Tabelle 6: Mittlerer prozentualer Unterschied von gemessenem Widerstand, temperaturbereinigtem Widerstand und Feuchtigkeitsgehalt je Gießsystem über beide Durchgänge sowie absolute Unterschiede zwischen den beiden Gießsystemen (in Prozentpunkten absolut)	24
Tabelle 7: Ergebnisse des Varianzvergleichs (F-Test) für die Daten des temperaturbereinigten Widerstands	25
Tabelle 8: Ergebnisse des Varianzvergleichs (F-Test) für die Daten des Feuchtigkeitsgehalts	26
Tabelle 9: Ergebnisse des zweiseitigen t-Tests für unabhängige Stichproben für Durchgang 1	26
Tabelle 10: Ergebnisse des zweiseitigen t-Tests für unabhängige Stichproben für Durchgang 2	27
Tabelle 11: Ergebnisse des zweiseitigen t-Tests für unabhängige Stichproben für beide Durchgänge	27
Tabelle 12: Ergebnisse des zweiseitigen t-Tests für unabhängige Stichproben für Durchgang 1	28
Tabelle 13: Ergebnisse des zweiseitigen t-Tests für unabhängige Stichproben für Durchgang 2	28
Tabelle 14: Ergebnisse des zweiseitigen t-Tests für unabhängige Stichproben für beide Durchgänge	28
Tabelle 15: Berechnung der unteren und oberen Grenzen der Konfidenzintervalle mit einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$ für Durchgang 1 und 2 sowie beide Durchgänge kombiniert	29
Tabelle 16: Ermittlung des benötigten Stichprobenumfangs (n) anhand der Konfidenzintervalle für einen statistisch signifikanten Unterschied der beiden Gießsysteme auf Datengrundlage des ersten Durchgangs	29
Tabelle 17: Ermittlung des benötigten Stichprobenumfangs (n) anhand der Konfidenzintervalle für einen statistisch signifikanten Unterschied der beiden Gießsysteme auf Datengrundlage des zweiten Durchgangs	30
Tabelle 18: Ermittlung des benötigten Stichprobenumfangs (n) anhand der Konfidenzintervalle für einen statistisch signifikanten Unterschied der beiden Gießsysteme auf Datengrundlage beider Durchgänge	31

Zusammenfassung

Für das Wachsen eines Baumes ist eine ausreichende Wasserversorgung essenziell. Insbesondere im innerstädtischen Bereich ist diese unter anderem aufgrund von Bodenverdichtungen, Bodenversiegelungen, erhöhtem Strahlungshaushalt und höherer Transpiration nicht immer gewährleistet. Verstärkt wird diese Problematik durch den Klimawandel. Vor allem Jungbäume nach der Pflanzung können sich selbst oft nicht ausreichend versorgen. Aus diesem Grund benötigen sie für den richtigen Anwuchserfolg Unterstützung durch zusätzliche Bewässerung. Als technische Hilfsmittel kommen hierbei immer häufiger Gießsäcke und Gießränder zum Einsatz. Während die Gießsäcke das Wasser kontinuierlich über mehrere Stunden abgeben, sickert das Gießwasser bei den Gießrändern zügig genau über dem Wurzelballen in den Boden. Unter Zuhilfenahme von moderner Sensorik sollten mögliche Unterschiede in der Wirkungsweise und damit der Effektivität der Gießsysteme festgestellt werden. Dafür wurden im Sommer 2023 sechs Jungbäume der Art *Acer pseudoplatanus* (Berg-Ahorn) mit widerstandsmessenden Kronensensoren der Firma Treesense GmbH ausgestattet. Der elektrische Widerstand und der daraus errechnete Feuchtigkeitsgehalt wurden als Maß für den Trockenstress angenommen. Die Datenerhebung erfolgte in zwei Gießdurchgängen. Als quantifizierendes Maß der Wirksamkeit wurden die Unterschiede der Mittelwerte der untersuchten Variablen im Zeitraum vor und nach dem Gießen herangezogen. Wirksamkeitsunterschiede konnten über beide Durchgänge gemittelt statistisch nicht belegt werden. Allerdings wurde deutlich, dass beide untersuchten Systeme in der Lage waren, die Bäume ausreichend mit Wasser zu versorgen und den Trockenstress zu reduzieren.

Abstract

A sufficient water supply is essential for a tree to grow normally. This is not always guaranteed in urban areas due to soil compaction, soil sealing, increased radiation levels and higher transpiration. These problems are exacerbated by climate change. Young trees in particular are often unable to provide themselves with sufficient nutrients after planting. For this reason, they need support in the form of additional irrigation in order to grow properly. Watering bags and watering edges are increasingly being used as technical aids. While the watering bags release the water continuously over several hours, the watering edges allow the water to seep quickly into the soil right above the root ball. With the aid of modern sensor technology, possible differences in the mode of action and thus the effectiveness of the watering systems were to be determined. To this end, six young trees of the species sycamore (*Acer pseudoplatanus*) were equipped with resistance-measuring crown sensors from Treesense GmbH in the summer of 2023. The electrical resistance and the moisture content calculated from it were taken as a measure of drought stress. The data was collected in two watering cycles. The differences in the mean values of the analysed variables in the period before and after watering were used as a quantifying measure of effectiveness. Differences in efficacy could not be statistically proven when averaged over both runs. However, it was clear that both systems analysed were able to supply the trees with sufficient water and reduce drought stress.

1 Einleitung

Bäume spielen im städtischen Raum eine entscheidende Rolle, da sie eine Vielzahl wichtiger Funktionen erfüllen. Neben städtebaulichen Faktoren, wie der generellen Gestaltung und Strukturierung des städtischen Raums oder dem Sicht- und Lärmschutz sind insbesondere die ökologischen Funktionen bedeutend. Stadtbäume können durch die Kühlung und Beschattung von Oberflächen, die Reduzierung von Feinstaub, die Absenkung von Windgeschwindigkeiten und die Bindung von CO₂ das Klein- und Lokalklima verbessern. Darüber hinaus tragen sie zu einer Verbesserung des Bodenluft- und -wasserhaushalts sowie der Luftfeuchtigkeit bei. Zusätzlich kann Niederschlagswasser durch die Baumscheibe¹ zurückgehalten und kontinuierlicher dem Boden zur Verfügung gestellt werden. Hänge und Böschungen werden durch das Wurzelwerk zusammengehalten und vor möglicher Erosion geschützt. Nicht zu vernachlässigen sind auch die zahlreichen Lebensräume für eine Vielzahl von Lebewesen, die Bäume in der Stadt bieten. (FLL e.V. 2022a)

Gleichzeitig wirken in der Stadt besondere Belastungsfaktoren auf die Bäume ein. Dazu zählen Bodenverdichtung und -versiegelung, höhere Temperaturen als im Umland, Salzeintrag, Schadstoffbelastung, Sauerstoff- und Wassermangel und notwendige vorschriftsgemäße Schnittmaßnahmen. (Roloff 2013)

Darüber hinaus werden die Bäume durch die im Klimawandel ausbleibenden Sommerniederschläge zusätzlich gestresst. Die stärker werdende Trockenheit und Hitze sind insbesondere für Jungbäume zusätzliche Faktoren, die sich negativ auf die Gesundheit und das Wachstum auswirken. (Roloff et al. 2013) Zwar wird sich die Niederschlagsmenge im Jahresmittel nicht bedeutend ändern, jedoch findet eine Verlagerung in Richtung des Winterhalbjahrs und damit außerhalb der Vegetationsperiode statt. Zudem finden die Sommerniederschläge immer häufiger als Starkregenereignisse statt, welche der Boden - insbesondere auf versiegelten Flächen in der Stadt - nicht ausreichend infiltrieren kann. Ein Großteil des Wassers gelangt durch einen hohen Oberflächenabfluss direkt ins Abwassersystem. (Fischer 2021)

Aus diesem Grund bedarf es vor allem unmittelbar nach der Pflanzung von Bäumen der Unterstützung durch Bewässerung. Hierbei ist zu beachten, dass der Wassermangel nur eine Ursache für Vitalitätsverluste oder gar das Absterben von Stadtbäumen ist. Nach Roberts et al. 2006 (Weltecke 2020) handelt es sich allerdings um die wichtigste Ursache, die zudem auch noch eine der wenigen durch den Menschen beeinflussbare Ursache ist. (Roth-Kleyer 2016) Für immerhin etwa 80% der Wachstumsvariabilität in verschiedenen Jahren ist die Wasserverfügbarkeit verantwortlich. (Fischer 2021)

In den FLL²-Empfehlungen für Baumpflanzungen – Teil 1 wird zur Bewässerung in den ersten fünf Standjahren nach der Pflanzung geraten. Dies muss gemäß Landschaftsbau-Fachnorm DIN 18915 und DIN 18916, die unter anderem die Ausführung von Boden- und Pflanzarbeiten regeln, zumindest durch eine Gießmulde mit einem aus Erde aufgeschüttetem Gießrand gewährleistet werden. (FLL e.V. 2022a)

Immer häufiger finden auch technische Gießsysteme wie Gießsäcke und Kunststoff-Gießränder Anwendung. Sie versprechen eine Optimierung des Wassermanagements, wodurch nicht nur Bäume geschützt werden können, sondern auch die immer knapper werdende Ressource Wasser zielgerichteter eingesetzt werden kann. (Weltecke 2020)

¹ Standraum eines Baums in der Stadt

² Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V.

1.1 Zielsetzung der Arbeit

Im Rahmen der Bachelorarbeit sollen mögliche Wirksamkeitsunterschiede von zwei Gießsystemen für junge Stadtbäume festgestellt werden. Mithilfe von moderner Sensortechnik soll die Abnahme des elektrischen Widerstandes als Maß für den Wassergehalt respektive Trockenstress in den untersuchten Berg-Ahorn-Jungbäumen nach entsprechendem Einsatz von Gießsäcken und Gießrändern verglichen und auf statistisch signifikante Unterschiede untersucht werden.

2 Stand des Wissens

2.1 Berg-Ahorn

Der Berg-Ahorn (*Acer pseudoplatanus* L.) ist eine in ganz Mittel- und Nordeuropa vorkommende Laubbaumart. Er ist dort insbesondere in den höheren Lagen der meisten Mittel- und Hochgebirge (in den Zentralalpen bis 2.000 m ü.NN. (Ruge 2022)) beheimatet, wenngleich sich sein Verbreitungsgebiet mitunter auch bis in tiefere Lagen erstreckt. (Forster et al. 2019)

Es handelt sich um eine typische Halbschattbaumart³, deren Lichtbedürfnis mit zunehmendem Alter allerdings stark zunimmt. Erkennbar ist der Berg-Ahorn an seiner graubraunen, anfänglich glatten, im höheren Alter schuppig-plattigen Borke und seinen großen, dunkelgrünen und stumpf gelappten Blättern. (Ruge 2022)

Die Baumart ist in subatlantischen bis submediterranen Klimaregionen vorzufinden und hat eine große Klimaamplitude vorzuweisen. Die Jahresmitteltemperatur sollte zwischen 0 und 15 °C liegen, allerdings können auch einzelne Temperaturextreme von bis zu -35 °C ertragen werden. Der jährliche Niederschlag sollte nicht unter 500 mm liegen, insbesondere Trockengebiete werden gemieden. (Ruge 2022) Als Gebirgsbaumart hat der Berg-Ahorn sein Optimum in ausreichend warmen, luftfeuchten Lagen mit kühlen, niederschlagsreichen Sommern und ist daher ein typischer Vertreter des Berg-Mischwalds. (Forster et al. 2019)

Er stellt hohe Ansprüche an die Wasserversorgung und verlangt außerdem eine gute Nährstoff- und Basenversorgung. Insbesondere mit Trockenheit und stark wasserbeeinflussten Standorten kommt der Berg-Ahorn schlecht zurecht. (Forster et al. 2019)

Die Baumart wurde weit über das natürliche Verbreitungsgebiet hinaus kultiviert und ist auch im städtischen Bereich anzutreffen. (Aas 2009)

2.1.1 Bedeutung und Eignung als Stadt- und Straßenbaum

Der Berg-Ahorn ist ein bedeutsamer Stadtbaum und insbesondere als Park- und Alleebaum beliebt. (Schutzgemeinschaft Deutscher Wald e.V. 2022) Seine Bedeutung wird durch eine Vielzahl von jährlichen Pflanzungen im städtischen Bereich unterstrichen. (Schönfeld 2015) In den Stadtbezirken Berlins sind Bäume der Gattung *Acer*⁴ mit rund 20% nach den *Tilia*-Arten (Linden) beispielsweise die zweithäufigsten Stadtbaumarten. (Senatsverwaltung für Mobilität, Verkehr, Klimaschutz und Umwelt Berlin 2022)

Allerdings sollte der Berg-Ahorn aufgrund seiner Herkunft und seiner Standortansprüche in der Stadt nicht an heiße und trockene Standorte gepflanzt werden. (Schönfeld 2015)

Die Deutsche Gartenamtsleiterkonferenz e.V. (GALK e.V.) bietet mit ihrer 2012 neu erschienenen und regelmäßig aktualisierten Straßenbaumliste eine für deutsche Städte generalisierte Pflanzempfehlung an. Ziel sei es, eine „fachlich richtige Auswahl und Verwendung der Baumarten zu fördern“. (GALK e.V. 2021) Darin werden alle für städtebauliche Zwecke infrage kommenden Bäume entsprechend ihrer Eigenschaften und vor allem auch entsprechend der Verwendbarkeit im städtischen Straßenraum bewertet. Alle Berg-Ahorn-Sorten - mit Ausnahme der Sorte „*Acer pseudoplatanus* `Bruchem`“ - werden für den Straßenraum als „nicht geeignet“⁵ eingestuft. (GALK e.V. 2023)

³ mittlere Schattentoleranz; „Fähigkeit als Jungwuchs Schatten zu ertragen“ (vgl. Forster et al. 2019)

⁴ umfasst alle in der Stadt vorkommenden Ahorn-Arten; neben Berg-Ahorn überwiegend Spitz-Ahorn

⁵ „Verwendung im Straßenraum nur ausnahmsweise möglich“ (GALK e.V. 2021)

Hauptursächlich hierfür ist die Streusalzempfindlichkeit der Ahorn-Art. Weiter schließen häufig verdichtete und versiegelte Standräume die Verwendung des Berg-Ahorn in Straßennähe aus. (GALK e.V. 2023)

An geeigneten Standorten in der Stadt, wie beispielsweise großflächigen Grün- oder Parkanlagen, ist der Berg-Ahorn hingegen gut geeignet. Vorteilhaft ist hier beispielsweise eine geringe Neigung zur Zwieselbildung, was den Bedarf für Erziehungs- und Aufbauschnitte minimiert. (GALK e.V. 2023) Hinzu kommt ein gutes Abschottungsverhalten⁶, was den Berg-Ahorn unter anderem zu einer stabilen, sicheren und langlebigen Baumart macht. (Ruge 2022, 2023)

2.2 Baumbiologische Hintergründe

2.2.1 Photosynthese

Bei der Photosynthese (syn. 'Assimilation') handelt es sich „nach Menge und Bedeutung um den wichtigsten biologischen Prozess auf der Erde“ (Ruge 2023). Auf seine hochkomplexen Abläufe geht das meiste irdische Leben zurück. (Ruge 2023) Dabei wird Lichtenergie unter Verbrauch von Wasser (H₂O) und der Nutzung von in der Umgebungsluft vorhandenen Kohlenstoffdioxid (CO₂) in energiereichen Kohlenstoffverbindungen gespeichert. Dieser Prozess läuft dabei nur ab, wenn günstige Bedingungen hinsichtlich Licht, Wasser, Nährstoffen, CO₂ und Wärme vorliegen. (Roloff 2019)

Das Sonnenlicht als Energiequelle wird von den grünen Pflanzenteilen – spezieller von den in den Chloroplasten vorkommenden Chlorophyllkörnern – absorbiert. Mit Hilfe dieser Energie wird CO₂ und H₂O in Glucose (C₆H₁₂O₆) umgewandelt. Bei diesem Prozess wird neben Wasser (H₂O) vor allem auch Sauerstoff (O₂) freigesetzt. (Ruge 2023)

Die Reaktionsgleichung lautet: $6 \text{CO}_2 + 12 \text{H}_2\text{O} \xrightarrow{\text{Energie}} \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6 \text{O}_2 + 6 \text{H}_2\text{O}$

Der Prozess läuft in zwei Teilschritten ab. Im ersten lichtabhängigen Abschnitt wird unter Wassereinfluss eine energiereiche Verbindung hergestellt. Hierbei wird das Wassermolekül gespalten, wodurch Wasserstoff (H₂) freigesetzt wird. Gleichzeitig wird Sauerstoff in die Atmosphäre abgegeben. In einem zweiten, lichtunabhängigen Teilschritt wird der freigesetzte Wasserstoff auf das über die Stomata⁷ aufgenommene Kohlendioxid übertragen. Durch eine Reihe von chemischen Reaktionen wird ein stabiles und energiereiches Zuckermolekül ('Assimilat'), die Glucose (C₆H₁₂O₆), aufgebaut. (Roloff 2019) In Form von Assimilatstärke werden die Glucosemoleküle kurzzeitig in den Chloroplasten zwischengespeichert und in der darauffolgenden Nacht – rückgewandelt in die Transportform Glucose – an Orte des Verbrauchs transportiert. Die Glucosemoleküle dienen als primärer Baustoff für pflanzliche Zellstrukturen (Wachstumsprozesse) sowie den Stoffwechsel (Atmung⁸) oder können in Form von Stärke eingelagert werden. (Ruge 2023)

⁶ Fähigkeit des Baumes auf Verletzungen und das Eindringen von Pathogenen zu reagieren (Wessolly und Erb 2014); i.d.R. durch Abkapselung des betroffenen Gewebes (Kompartimentierung); vgl. CODIT-Modell

⁷ Spaltöffnungen in der unteren Epidermis des Blatts oder der Nadel, die den Gasaustausch (insb. CO₂-Aufnahme) und die Abgabe von Wasserdampf an die Atmosphäre (Transpiration) regulieren (Ruge 2023)

⁸ syn. 'Dissimilation'; der Photosynthese gegenläufiger Prozess, bei dem die zuvor aufgebauten Zuckermoleküle zur Nutzbarmachung der enthaltenen Energie zerlegt werden; im Gegensatz zur Photosynthese findet sie auch nachts und im Winter statt

Generell unterscheidet man bei der Photosynthese nach C₃- und C₄-Pflanzen. Während bei C₄-Pflanzen die Aufnahme von CO₂ und der Einbau des darin enthaltenen Kohlenstoffs (C) in das Zuckermolekül zeitlich und räumlich getrennt sind und diese Pflanzen daher auch bei nahezu geschlossenen Stomata assimilieren können, sind C₃-Pflanzen nur bei geöffneten Spaltöffnungen in der Lage, Photosynthese effektiv zu betreiben. Das in die Pflanze diffundierte CO₂ wird unmittelbar verbraucht. Assimilation und Transpiration⁹ (siehe hierzu 2.2.2) sind bei C₃-Pflanzen, zu welchen fast ausnahmslos alle heimischen Baumarten zählen, untrennbar gekoppelt. (Ruge 2023)

2.2.2 Wasserhaushalt

Wasser hat im Baum viele Funktionen. Es bildet den größten Teil des lebenden Gewebes, hält dort das Zellwachstum und den Turgor¹⁰ aufrecht, dient als Lösungsmittel, Medium für chemische Reaktionen, Transportmittel für Nährsalze und ist Ausgangsstoff für die Photosynthese. (Rust 2019b)

Für die Photosynthese selbst ist allerdings nur ein sehr geringer Anteil (ca. 1%) des im Baum vorkommenden Wassers nötig. (Ruge 2023) Viel bedeutsamer ist der Teil, der indirekt - als Milieu für Stoffwechselforgänge oder durch Transpiration - im Zusammenhang mit der Photosynthese verbraucht wird. Um einen reibungslosen Ablauf zu gewährleisten, müssen die Spaltöffnungen für die CO₂-Aufnahme geöffnet sein. Dies bedingt eine konstante Wasserabgabe, die Transpiration. Pflanzen transpirieren aufgrund des Wasserpotenzialgefälles zwischen Blattinterzellularluft und der umgebenden Atmosphärenluft. Die relative Luftfeuchtigkeit im Blatt liegt bei ca. 99%, die der Atmosphärenluft bei etwa 50%. Diese Differenz (Wasserpotenzialgefälle) ist treibende Kraft der Transpiration. Dies geschieht fast ohne Energieverbrauch der Pflanze, sorgt allerdings bei geöffneten Stomata für eine stetige Wasserabgabe. Je größer das Wasserpotenzialgefälle (Wassersättigungsdefizit), desto höher ist die Transpirationsleistung. Beeinflusst wird dieses vor allem durch die vorherrschende Temperatur, Licht- und Wärmeverhältnisse sowie den Wind und ist folglich in der Stadt häufig erhöht. (Ruge 2022) Das Verhältnis von aufgenommenem CO₂ zu abgegebenem Wasser liegt bei etwa 1:200. (Rust 2019b)

Um die Wasserabgabe aus den Interzellularen auszugleichen, schließt sich eine Nachdiffusion von Wasser aus den Zellen in die Interzellularluft an. Dies wiederum erhöht die relative Zuckerkonzentration im Zellinneren, weshalb die osmotische Sogkraft der Zellen zunimmt. Das zum Ausgleich dieses Missverhältnisses nötige Wasser wird aus dem Xylem gezogen. Die Transpiration sorgt somit für ein Wasserpotenzialgefälle in der gesamten Pflanze. Dieses Xylemwasserpotenzialgefälle von den Wurzeln zu den Blättern ist damit „Motor“ des Wasserflusses im Baum und bis zu einem gewissen Grad proportional zur Blattfläche. (Ruge 2023)

Charakteristischerweise nimmt die Transpiration morgens mit Beginn der Beleuchtung bis zum Mittag zu und fällt dann bis zum Schließen der Stomata am Abend ab. Bei erhöhtem Wasserverbrauch oder zu geringer Wassernachlieferung kann es zu einer Transpirationsdepression am Mittag kommen, da zum Schutz der Pflanze die Stomata teilweise geschlossen werden. Dadurch wird zwar die Wasserabgabe reduziert, gleichzeitig sinkt aber auch die Photosyntheseleistung. (Ruge 2023)

⁹ Wasserabgabe oberirdischer Pflanzenorgane in Form von Wasserdampf über die Stomata (Ruge 2023)

¹⁰ Zellinnendruck, der für die Form des nicht verholzenden Gewebes verantwortlich ist

In Feldversuchen im Wald wurde über alle Baumarten hinweg eine Transpirationsleistung von etwa 1-2 l/m² Kronenprojektionsfläche pro Tag festgestellt. Belastbare Zahlen für Stadtbäume existieren nicht, es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass die Transpiration aufgrund von vorherrschenden Klima- und Standortsbedingungen in der Stadt um das 2- bis 3-fache höher ist. (Fischer 2021)

Die Wasseraufnahme eines Baumes erfolgt größtenteils über die Wurzelhaare und Mykorrhiza-Verbindungen an den Spitzen der Feinwurzeln und ist im Vergleich zur Transpiration meist zeitlich um einige Stunden nach hinten versetzt. (Ruge 2023)

Das aus dem Boden aufgenommene Wasser wird im Stamm im Xylem transportiert. Dieses Wasserleitsystem setzt sich aus langgestreckten, abgestorbenen Zellen im Splintholz zusammen. Bei Nadelholz kommen hier Tracheiden¹¹, bei Laubholz zusätzlich Tracheen¹² zum Einsatz. Die Durchmesser der Xylemzellen sind limitierendes Maß für die Durchflussgeschwindigkeit des Wassers im Stamm. Während der Wassertransport bei Nadelbäumen mit einem Tracheidendurchmesser von maximal 0,03 mm mit höchstens 2 m/h erfolgt, sind die Geschwindigkeiten beim Laubholz um das bis zu 20-fache höher. Die Durchmesser der Wasserleitzellen bei zerstreutporigen Laubbäumen liegen bei maximal 0,06 mm. Aufgrund von Tracheendurchmessern von bis zu 0,2 mm bei zerstreutporigen Laubbäumen ergeben sich hier die höchsten Flussgeschwindigkeiten von etwa 40 m/h. (Rust 2019b)

2.2.3 Wasserverfügbarkeit auf einem Standort

Die Wasserverfügbarkeit des Bodens hängt maßgeblich von der Bodenart, dem durchwurzelbaren Bodenvolumen und dem Niederschlag ab. Allerdings ist dieses Bodenwasser nicht immer pflanzenverfügbar. Nach einem Wassereintrag, beispielsweise durch Niederschläge, bleibt nur ein Teil des Wassers, das so genannte Haftwasser, im Boden. Andere Teile fließen als Sickerwasser seitlich oder ins Grundwasser ab. Der für die Pflanzen nutzbare Anteil des Haftwassers wird durch die nutzbare Feldkapazität¹³ (nFK) beschrieben. Sie ist Maß der pflanzenverfügbaren Bodenwassermenge und bestimmt unter anderem die Trockenstressanfälligkeit eines Baums auf einem Standort. Der nicht pflanzenverfügbare Teil des Haftwassers wird als „Totwasser“ bezeichnet. (Weltecke 2020)

Wie viel Wasser pflanzenverfügbar, also von den Wurzeln erreich- und aufnehmbar ist, ist vor allem abhängig von der Korngrößenverteilung, darüber hinaus von Faktoren wie der Lagerungsdichte, dem Skelettanteil, dem Anteil organischer Substanzen sowie der Tiefe der Durchwurzelbarkeit. (Rust 2019b) Diese Faktoren bestimmen maßgeblich die Wasserspannung¹⁴ (pF-Wert¹⁵) des Bodens, welche Aussagen darüber zulässt, wie stark das Wasser im Boden gebunden ist bzw. welche Saugspannung ein Baum aufbringen muss, um das Wasser aus dem Boden zu ziehen. (Weltecke 2020)

¹¹ vergleichsweise kurze (≤ 5 mm), an den Enden spitz zulaufende und über Hoftüpfel verbundene Zellen; dienen dem Wassertransport und der Festigung; vor allem im Nadelholz, nur teilweise im Laubholz vorkommend (Ruge 2023)

¹² fusionierte Einzelzellen, die spezialisierte Wasserleitgefäße bilden; dtl. länger als Tracheiden (bis zu 4,60 m); ausschließlich im Laubholz vorkommend (Ruge 2023)

¹³ syn. Nutzwasserkapazität; gibt in Vol-% an, wie viel Wasser im Verhältnis zum Bodenvolumen aufgenommen werden kann

¹⁴ hydraulischer Widerstand des Bodens

¹⁵ dekadischer Logarithmus; gibt aufzubringende Saugspannung (gemessen in hPa) an

Aufgrund der natürlichen Adsorptions¹⁶- und Kohäsionskräfte¹⁷ gilt der Grundsatz: „Je enger eine Pore im Boden ist, desto fester ist das Wasser darin gebunden.“ Entsprechend der Korngrößenzusammensetzung (Bodenart) und der damit verbundenen vorherrschenden Porengröße setzt sich also das Verhältnis von Bodenwassergehalt und nFK zusammen. (Weltecke 2020)

Pauschalisiert ist die nFK bei Böden mittlerer Korngröße, beispielsweise schluffigen Lehmböden, am höchsten, bei Sanden am niedrigsten. Das für Bäume nutzbare Wasser befindet sich in den Bodenporen mit einer Größe zwischen 0,0002 mm und 0,05 mm. Unter 0,0002 mm Porengröße (pF-Wert $\geq 4,2$) ist das Wasser zu stark gebunden, über 0,05 mm (pF-Wert 1,8) reichen die Kapillarkräfte¹⁸ der Poren nicht mehr aus, das Wasser entgegen der Schwerkraft im Boden zu halten. (Geologischer Dienst NRW 2023)

Mit zunehmender Trockenheit steigt die Wasserspannung des Bodens exponentiell an, da zunächst die groben Poren und erst dann die engeren Poren entwässert werden. Übersteigt die Wasserspannung einen baumspezifischen Grenzwert, reicht die Saugspannung des Baums nicht mehr aus, um das Wasser aus diesen Poren zu ziehen und eine ausreichende Wasserversorgung kann nicht gewährleistet werden. (Weltecke 2020)

2.2.4 Trockenstress

Stress (wörtl. ‚Zwangslage‘ oder ‚Bedrängnis‘) beschreibt Belastungssituationen, die in einem Organismus Abweichungen vom Normalverhalten auslösen. Häufig wird aber auch der Zustand, der sich unter der Belastungssituation in der Pflanze einstellt, synonym als Stress bezeichnet. (Rust 2019a)

Ein Umweltfaktor wird dann zum Stressor, wenn seine Dosis nicht im Optimalbereich liegt, also eine individuelle Optimaldosis über- oder unterschreitet. In der Stadt werden häufig Trockenheit, Sauerstoffmangel oder Salzeintrag zu Stressoren. Da Pflanzen aufgrund ihrer Ortsgebundenheit dieser Situation nicht ausweichen können, zeigen sie Stressreaktionen. (Rust 2019a)

Diese können unterschiedliche Folgen nach sich ziehen. Anfänglich kommt es in der Alarmphase zu einer „Destabilisierung der normalen Lebenstätigkeit“. (Rust 2019a) Je nach Art und Dauer der Belastungssituation folgt daraufhin im besten Fall die Widerstandsphase, in der der Organismus Abwehrmaßnahmen ergreift und sich gegen die Stresssituation abhärtet. Ist die Belastung jedoch zu stark oder hält zu lange an, überfordert dies die Anpassungsfähigkeit des Organismus und es kommt zu Funktionsausfällen oder im Extremfall zum Absterben. (Rust 2019a)

Weltweit einer der bedeutsamsten Stressoren ist die Trockenheit. Sie führt zum einen zu einer direkten Schädigung der Pflanze, z.B. durch vermindertes Zellwachstum, eine reduzierte Zellwandsynthese oder durch die Störung der Photosynthese. Zum anderen schädigt sie indirekt, da die Anfälligkeit für andere Schadfaktoren wie beispielsweise Insekten und Pathogene steigt. (Rust 2019a; Kehr 2020)

Eine genaue Einschätzung, wann Wassermangel zu einem Stressor für einen Baum wird, ist kaum möglich. In der Fachliteratur wird pauschal davon ausgegangen, dass Trockenstress bei den meisten heimischen Baumarten einsetzt, wenn 60% des nutzbaren Bodenwassers verbraucht sind. (Weltecke 2020)

¹⁶ Bindungskräfte zwischen Wasser und der Oberfläche fester Bodenpartikel

¹⁷ Bindungskräfte zwischen Wassermolekülen

¹⁸ Kraft, die Wasser in dünnen Kapillaren entgegen der Schwerkraft nach oben steigen lässt

Die Reaktionen der Pflanzen darauf können von kurz-, mittel- und langfristiger Dauer sein. Kurzfristig nimmt die hydraulische Leitfähigkeit bzw. das Wasserpotenzial des Bodens durch zunehmende Trockenheit ab. Um eine weitere Wasseraufnahme zu gewährleisten, muss folgend auch das Xylemwasserpotenzial in der Pflanze absinken. Dieses darf allerdings nicht unter einen artspezifischen Schwellenwert fallen, da es ansonsten im Extremfall zu einem Gaseintritt (Embolie) in die Wasserleitgefäße und damit zum Abriss des Wasserfadens kommen kann, welcher anschließend nicht mehr aufgebaut werden kann. (Wessolly und Erb 2014) Erleiden die Bäume diese Gefäßverluste bereits zu Beginn der Vegetationszeit, können die Einbußen der Stoffwechsellistung kaum ausgeglichen werden. Es kommt mittel- bis langfristig zum Absterben von Wurzeln und Kronenteilen, zudem wird das Verhyllen am Ende der Vegetationsperiode gestört. Die dann dauerhaft unverschlossenen Gefäße bilden auch Jahre später noch rasche Ausbreitungsstrukturen für Hyphen im Falle einer Pilzinfektion. (Fischer 2021)

Zum Schutz vor einer solchen Embolie wird die Transpirationsleistung durch die Schließung der Spaltöffnungen reduziert. Dadurch kann der Baum allerdings auch kein CO₂ mehr aufnehmen, was zur Folge hat, dass die Photosyntheseleistung herabgesetzt wird und der Baum in einen Hungerzustand verfällt. Hinzu kommt, dass der Wasserverlust durch das Schließen der Spaltöffnungen nicht zu 100% gestoppt werden kann, weshalb es bei langanhaltender Trockenheit mittelfristig zu Blattschäden (Welkeerscheinungen, Einrollen der Blätter und zum Teil zu irreversiblen Blatt- oder Zweigabwurf) kommen kann. (Rust 2019a)

Aus der mittelfristigen Blattflächenreduktion ergeben sich langfristig ein verringertes Längen- und Dickenwachstum. Zudem kann der Trockenstress zur Ausbildung von Kurztrieben führen. Diese besitzen eine schlechtere Wasserleitfähigkeit als Langtriebe, weshalb das Trockenstressrisiko in den Folgejahren der Trockenheit erhöht ist. Insgesamt kann die Mortalität in Folgen von Trockenjahren dadurch ansteigen. (Rust 2019a)

2.3 FLL-Richtlinien

Die Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. (FLL), ein 1975 gegründetes Wissenschaftsnetzwerk, gibt regelmäßig Regelwerke, Richtlinien, Empfehlungen und Fachberichte für die grüne Branche heraus. Diese werden in Expertengremien am technisch-wissenschaftlich aktuellen Stand entwickelt und aktualisiert, um Regeln für eine fachgerechte Praxis zu liefern. Die Regelwerke sind nicht generell rechtsbindend, werden als „Stand der Technik“ allerdings im Normalfall als Basis für Verträge und Vorschriften genutzt. Die Regelwerke basieren dabei immer auf den gültigen Gesetzesgrundlagen und beziehen aktuelle Normen (DIN) mit ein, in der Absicht, die Praxisarbeit wissenschaftlich sinnvoll und nach aktuellen rechtlichen Grundlagen korrekt ausführen zu können. (FLL e.V. und DIN e.V. 2022)

Die Bewässerung von Jungbäumen wird gemeinsam mit deren Pflanzung unter anderem durch die Normen DIN 18915 „Vegetationstechnik im Landschaftsbau – Bodenarbeiten“, DIN 18916 „Vegetationstechnik im Landschaftsbau – Pflanzen und Pflanzarbeiten“ sowie DIN 18919 „Vegetationstechnik im Landschaftsbau – Instandhaltungsleistungen für die Entwicklung und Unterhaltung von Vegetation (Entwicklungs- und Unterhaltungspflege)“ geregelt. Ergänzend hierzu wurde von der FLL eine zweiteilige Empfehlung für Baumpflanzungen herausgegeben. Ziel ist es, die wichtigen Funktionen der Stadtbäume langfristig zu sichern. Da nur vitale und gesunde Bäume alle Funktionen erfüllen können, ist es wichtig, eine richtigen Behandlung bereits vor, während und nach der Pflanzung zu gewährleisten. (FLL e.V. 2022a)

Teil 1 befasst sich mit der „Planung, Pflanzarbeit, Pflege“, Teil 2 ergänzt die Empfehlung durch „Standortvorbereitungen für Baumpflanzungen; Pflanzgruben und Wurzelraumerweiterung, Bauweisen und Substrate“. (FLL e.V. 2022b)

2.3.1 Gießempfehlungen

Der Wasserbedarf eines Baumes hängt grundsätzlich von vielen baum-, standorts- und witterungsspezifischen Faktoren ab (vgl. 2.2.2). Hierzu zählen neben Baumart, Alter, Vitalitätszustand, Blattmasse und klimatischen Faktoren wie Strahlungsintensität, Temperatur, Windstärke und Luftfeuchtigkeit insbesondere der Zeitpunkt im Jahresrhythmus, da das Wachstum in der Vegetationsperiode und der Wasserbedarf korrelieren (vgl. 2.2.1). (Weltecke 2020)

Hierzu gibt es in der Literatur verschiedene Gießempfehlungen:

Die Empfehlungen der Forschungsgesellschaft FLL beziehen sich grundlegend auf die Inhalte der DIN 18916:2016-06 und DIN 18919:2016-12. Diese stecken allerdings nur einen groben Rahmen für die Bewässerung von Jungbäumen ab. Zum einen wird auf die ordnungsgemäße Anlage von Gießrändern bei der Pflanzung, zum anderen auf die Bewässerung im Rahmen der Fertigstellungspflege verwiesen. Bei den Gießrändern ist zu beachten, dass die Innenseite des Rands über dem äußeren Rand des Pflanzballens liegt. In Hangebereichen sind darüber hinaus möglicherweise zusätzliche Maßnahmen erforderlich. Diese werden hier nicht weiter spezifiziert. Im Zuge der Fertigstellungspflege sei bei ausbleibenden Niederschlägen in ausreichender Menge und wirksamer Verteilung in Abhängigkeit von Bepflanzung und Standort zu wässern. (DIN-Normenausschuss Bauwesen 2022a, 2022b)

Die Wassermengen je Bewässerungsdurchgang setzen sich wie folgt zusammen:

Tabelle 1

Wassermenge in Liter/Durchgang je Stammumfang und nutzbarer Feldkapazität

Stammumfang	nFK2¹⁹ (Sand, lehmiger Sand)	nFK3 (sandiger Lehm, Lehm, Ton)
10-18 cm	80	120
20-25 cm	100	150
40-50 cm	200	300

Die Empfehlungen der FLL konkretisieren die Vorgaben der DIN. In Teil 1 der Empfehlungen für Baumpflanzungen nimmt die FLL für das Gießen von Jungbäumen Unterteilungen in das Anwässern bei Pflanzung, die Fertigstellungs²⁰- sowie die Entwicklungspflege²¹ vor.

Bei der Pflanzung sind die Bäume durchdringend zu wässern und Gießmulden anzulegen, die für die Zeitdauer der Fertigstellungs- und Entwicklungspflege bestehen können. Zu beachten ist, dass die Mulde für die Entwicklungspflege erweitert werden sollte, da die Wurzeln aus dem Ballen herauswachsen. Entsprechend den Normen muss die Innenseite der Gießmulde über dem äußeren Rand des Ballens liegen. So soll das Gießwasser in Richtung des Pflanzballens und damit den Wurzeln geleitet werden und nicht ungenutzt im angrenzenden Substrat, welches häufig eine höhere Wasserdurchlässigkeit als der Ballen hat, versickern. (FLL e.V. 2022a)

¹⁹ nach DIN 4220

²⁰ „dient der Erzielung des abnahmefähigen Zustandes einer Neupflanzung“ (DIN 18916)

²¹ „dient der Erzielung des funktionsfähigen Zustandes einer Neupflanzung. Sie schließt an die Fertigstellungspflege an“ (DIN 18919)

In der sich anschließenden Fertigstellungspflege sollte die neu gepflanzten Bäume regelmäßig gewässert werden, um sie ausreichend mit Wasser zu versorgen. Unabhängig von den natürlichen Niederschlägen sieht die FLL eine durchdringende Bewässerung im ersten Standjahr in den Monaten von April bis September von zwei Mal im Monat, in Trockenperioden auch häufiger, vor. Richtwerte, angelehnt an die DIN-Vorgaben, sind hier je nach Baumart und Bodenbeschaffenheit 75-100 Liter je Bewässerungsdurchgang bei einem Stammumfang von 20-25cm. Durch Bohrstockproben kann die vom Wasser durchdrungene Bodentiefe ermittelt werden. (FLL e.V. 2022a)

Für die Entwicklungspflege empfiehlt die FLL ein regelmäßiges Bewässern in den ersten fünf Standjahren. Erst dann sei ein genügendes Wurzelwerk in ausreichender Tiefe ausgebildet, um Trockenperioden überstehen zu können. In der Vegetationsperiode von April bis September sollte bei anhaltender Trockenheit (≥ 10 Tage ohne Niederschlag) bereits vor dem Beginn von Welkeerscheinungen, bei erhöhten Temperaturen und bei ersten Anzeichen von erschlaffenden Blättern gewässert werden. (FLL e.V. 2022a) Der Wasserbedarf ist dabei abhängig von der Wasserspeicherfähigkeit des Bodens bzw. Substrats, der Baumgröße, Baumart und den Klimafaktoren Sonneneinstrahlung, Temperatur, Wind und Niederschlag. Die Empfehlungen zur auszubringenden Wassermenge sind identisch zur Fertigstellungspflege. Jährlich sollte bedarfsabhängig ca. 8-16 Mal bewässert werden. (FLL e.V. 2022a)

Detailliertere Empfehlungen hinsichtlich der Bewässerung von Jungbäumen sind auch im Handbuch der Baumstatik und Baumkontrolle von Lothar Wessolly und Martin Erb zu finden. Hierbei wird eine Bewässerung lediglich für die ersten beiden Standjahre vorgesehen. Im ersten Standjahr sollten Jungbäume in der Vegetationsperiode bei einer Niederschlagsmenge von unter 15mm pro Woche wöchentlich einmal mit 50-100 Litern je Durchgang bewässert werden. In Hitzeperioden oder bei empfindlichen Baumarten wird eine Bewässerung zwei Mal pro Woche empfohlen. Im darauffolgenden Standjahr soll die Bewässerung halbiert werden. Bei entsprechenden Witterungsverhältnissen also einmal alle zwei Wochen bzw. in Hitzeperioden und bei empfindlichen Baumarten wöchentlich. Die Wassergabe mit 50-100 Litern je Durchgang bleibt aber erhalten. (Wessolly und Erb 2014)

Andere Wassermengenempfehlungen sind bei der Lorenz von Ehren-Pflanzschule zu finden. Diese empfiehlt folgende wöchentliche Bewässerung:

Tabelle 2

Gießempfehlungen in Liter/Woche je Stammumfang nach Lorenz von Ehren-Pflanzschule (Schellhase 2023)

Stammumfang in cm	Liter/Woche
16-18	150
20-25	250
30-35	350
40-45	600
40-60	1000
70-80	1500

2.4 Gießsysteme

Für die Bewässerung von Jungbäumen stehen neben den herkömmlichen, aus Oberboden aufgeschütteten Gießrändern oder -mulden mittlerweile auch technische Gießsysteme zur Verfügung. Im Folgenden werden die beiden nach Wessolly (2023) bei Jungbäumen und Neupflanzungen am häufigsten eingesetzten Varianten vorgestellt.

2.4.1 Gießsäcke

Von verschiedenen Herstellern werden Bewässerungssäcke zur Befestigung am Baum angeboten. Die meisten dieser Säcke fassen etwa 70-80 Liter und geben das Wasser in der Regel durch zwei kleine Löcher auf der Unterseite langsam ausperlend über mehrere Stunden ab, um den Wurzelbereich der Bäume kontinuierlich zu durchfeuchten. Durch das Kombinieren mehrerer Säcke können auch dickere Bäume bewässert und höhere Bewässerungsmengen erreicht werden. Zudem können die Säcke beispielsweise am stützenden Dreibein oder anderen Pfählen im Wurzelbereich angebracht werden und so den Bewässerungsbereich vergrößern. Der Gießaufwand ist im Vergleich zu Gießmulden oder Gießrändern (vgl. 2.4.2) aufgrund der kleinen Einfüllöffnungen etwas erhöht. (Schneidewind 2020) Darüber hinaus zeigt sich in der Praxisanwendung, dass die kleinen Löcher auf der Unterseite der Säcke beispielsweise durch Algenbildung verschlammten und sich zusetzen können, wodurch eine geregelte Bewässerung nicht mehr garantiert wird. (König und Waringer 2023) Außerdem ist zu vermuten, dass die Säcke bei Regenfällen wie ein Art Regenschirm wirken, wodurch das Regenwasser eher vom Baum weggeleitet wird, als dass dieses in Stammrichtung und damit in Richtung des Wurzelballens fließt. (Wessolly 2023) Besteht kein Bedarf (mehr) für die Säcke – dies gilt auch für den Herbst und Winter - sollten diese abgenommen werden, da das dahinter entstehende Kleinklima die Entstehung von Rindenschäden und Pilzen begünstigen kann. (Schneidewind 2020)

2.4.2 Gießränder

Bei künstlichen Gießrändern (hier synonym auch Gießring) handelt es sich um Gießhilfen aus witterungsbeständigen Kunststoffen (i.d.R. PVC²² oder PE²³). Sie ersetzen die herkömmlichen Gießränder aus Oberboden funktionell. Sie sollen das Wasser zielgerichteter über dem Wurzelballen halten, indem sie den Wasserverlust zur Seite mindern. Zudem gewährleisten sie im Gegensatz zu den aus Oberboden angehäuften Gießrändern eine gleichmäßige Randhöhe. Sie werden in Form von Meterware auf Rollen oder als Einzelsysteme angeboten. Die Wassergabe erfolgt hier im Vergleich zu Gießsäcken in deutlich kürzerer Zeit. Das Fassungsvermögen ist abhängig von Durchmesser und Randhöhe der Gießränder. Zu beachten ist, dass der Gießrand abdichtend in die Oberfläche vertieft eingebaut werden muss, da es andernfalls zu einem Unterspülen des Rands und damit zu einem seitlichen Wasserverlust kommen kann. (Schneidewind 2020) Im Vergleich zu Gießsäcken können die Ränder ganzjährig installiert bleiben. (Deutsche Gartenamtsleiterkonferenz - Arbeitskreis "Stadtbäume" April 2021)

2.4.3 Einsatzmöglichkeiten und Einsatzgrenzen

Die vorgestellten Bewässerungssysteme sind vornehmlich für den Einsatz bei der anfänglichen Jungbaumbewässerung bestimmt. Da die Bewässerung nur einen begrenzten Radius um den Baumstamm abdeckt, sollte sie mit diesen Hilfsmitteln nur in den ersten zwei bis maximal drei Standjahren erfolgen. Die Wurzeln erschließen in dieser Zeit natürlicherweise einen größeren Bereich. Versuche hierzu haben gezeigt, dass einige Bäume ihren Wurzelraum nach dem ersten Standjahr bereits verdoppelt hatten. (Wessolly 2023)

²² Polyvinylchlorid

²³ Polyethylen

Wird die Bewässerung zu lange im stammnahen Bereich gehalten, kann dies dazu führen, dass Feinwurzeln in einem größeren Umkreis nicht ausreichend wasserversorgt werden und sich kein stabiler Wurzelraum entwickeln kann. (Deutsche Gartenamtsleiterkonferenz - Arbeitskreis "Stadt bäume" April 2021)

Müssen Bäume auch nach den ersten Standjahren bewässert werden, sollte darauf geachtet werden, die Bewässerung vom Stamm wegzuführen und vor allem im Feinwurzelbereich zu bewässern. Spätestens ab dem dritten Standjahr sollte die Auswurzelungszone mit in die Bewässerung integriert werden, ab dem vierten Standjahr dann eine ausschließliche Bewässerung der Baumscheibe ohne Wurzelballen erfolgen. (Masson und Pommnitz 2023)

Die beiden Systeme vereint der Vorteil eines reduzierten Wassereinsatzes. Für gewöhnlich kommt es beim Bewässern über aufgeschüttete Gießränder zu einem seitlichen Wasserabfluss. (Wessolly 2023) Diese Wasserverluste werden durch die technischen Hilfsmittel reduziert, weshalb für dieselbe wurzelraumerschließende Wassermenge ein geringerer Wassereinsatz notwendig ist. (Schneidewind 2020)

Die Nachhaltigkeit erhöht sich je nach System und Material zudem auch durch mögliche Wiederverwendungen. Insbesondere Gießränder im Steckverfahren und robuste Gie ßsäcke lassen sich häufig für mehrere Einsätze nutzen. (Schneidewind 2020; arboa e.K. tree safety 2024)

Begrenzt werden die Einsatzmöglichkeiten neben der Standzeit der zu bewässernden Bäume häufig auch durch Standortfaktoren. Insbesondere die Topographie spielt eine wichtige Rolle. Vor allem die Anwendung von Gießrändern ist mit zunehmendem Gefälle immer schwieriger umsetzbar. (Wieland 2023) Zudem neigen innerstädtische Standorte zu vermehrtem Vandalismus sowie Mäh- und Anfahrschäden. (Schneidewind 2020)

Die Deutsche Gartenamtsleiterkonferenz (GALK e.V.) spricht sich für eine generelle Anwendung von Gießrändern (aufgeschüttet oder künstlich) aus, sofern der Einsatz nicht beispielsweise durch ein Gefälle oder eine zu geringe Baumscheibe verhindert wird. Nur in speziellen Fällen sollten Gie ßsäcke zur Anwendung kommen. Die oberflächliche Tröpfchenbewässerung wird als problematisch gesehen, da sie vor allem bei heißen Temperaturen den Wurzelballen nicht ausreichend durchdringend befeuchten könne. (Deutsche Gartenamtsleiterkonferenz - Arbeitskreis "Stadt bäume" April 2021)

3 Material und Methoden

3.1 Untersuchungsbäume

3.1.1 Vorüberlegungen

Für die Auswahl des Versuchsgebiets war insbesondere eine Homogenität der Versuchsbäume von Bedeutung. Ziel war es frisch gepflanzte oder noch zu pflanzende Bäume derselben Baumart an einem Standort zu finden.

Auf Grundlage der aktuellen Pflanzliste der Stadtgärtnerei Tübingen (Stand Mai 2023; vgl. Anhang) wurde eine Versuchsanlage mit sechs Berg-Ahornen an der Steinlachallee geplant. Andere Standorte konnten aufgrund zu geringer Baumpflanzungen oder zu unterschiedlicher Standortgegebenheiten nicht ausgewählt werden.

3.1.2 Ausgangslage

Die sechs Berg-Ahorne wurden am 09.05.2023 als Ersatz und Ergänzung ausgefallener Bäume in der Steinlachallee bzw. Fürststraße gepflanzt. Die beiden Straßen liegen west- und ostseitig der Steinlach im Tübinger Süden. Fünf der untersuchten Bäume stehen an der Fürststraße ostseitig der Steinlach, ein weiterer (Ahorn 6) auf der Seite der Steinlachallee (vgl. Abb. 1).

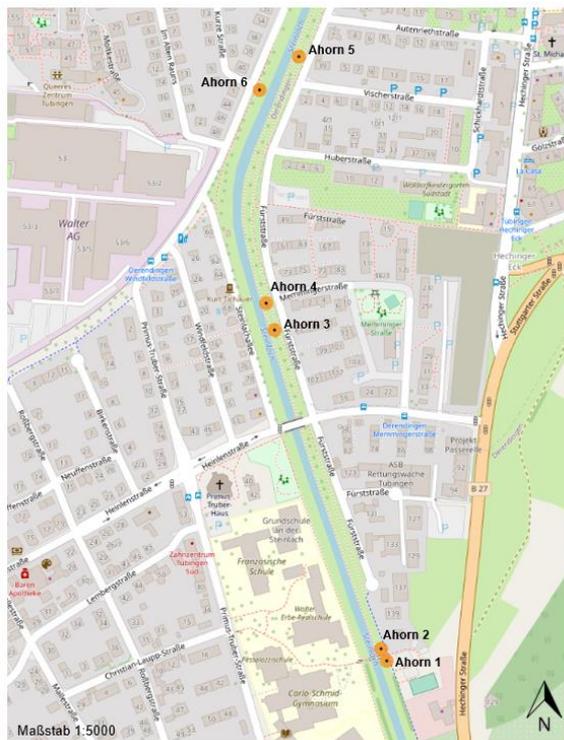


Abbildung 1: Übersichtskarte der Untersuchungsbäume an der Steinlachallee
Darstellung: QGIS; Kartengrundlage: OSM

Bei den gepflanzten Bäumen handelt es sich um Bäume der Baumschule Hortense Pflanzenvertriebs GmbH mit Sitz in Pfullingen. Die Bäume wurden als Containerware mit einem Stammumfang zwischen 18 und 20 cm geliefert. Das seitens der Baumschule eingesetzte Substrat besteht aus einem grobfaserigen Torfgemisch mit zusätzlicher Bevorratung von Spurenelementen. Dadurch sollen die Jungbäume optimal mit Wasser und Nährstoffen versorgt werden. Die Wasserkapazität des Substrates liegt bei 65-75%. (vgl. Anhang)

Folgende Parameter konnten aufgenommen werden:

Tabelle 3

Ausgangslage der untersuchten Berg-Ahorn-Bäume

	Höhe	Umfang (1m Höhe)	Kronen- durchmesser	Höhe Kronenbasis	Vitalitätsstufe nach Roloff
Baum 1	6,20 m	20,3 cm	2,70 m	2,30 m	VS0 ²⁴
Baum 2	7,00 m	20,5 cm	2,20 m	2,55 m	VS0
Baum 3	5,60 m	22,2 cm	2,30 m	2,30 m	VS0
Baum 4	6,30 m	19,8 cm	2,50 m	2,35 m	VS0
Baum 5	6,40 m	20,2 cm	2,10 m	2,40 m	VS0
Baum 6	6,40 m	21,3 cm	2,40 m	2,30 m	VS0

3.2 Eingesetzte Gießsysteme

Die eingesetzten Gießsysteme wurden von der Stadtgärtnerei Tübingen zur Verfügung gestellt und differenzieren sich in die folgend vorgestellten Untersuchungsobjekte.

3.2.1 arboGreenWell™ Gießrand

Beim „arboGreenWell™ Gießrand“ handelt es sich um das bei Neupflanzungen in Tübingen standardmäßig eingesetzte Gießsystem. Der Gießrand besteht aus einem dreiteiligen Stecksystem aus recyceltem Polypropylen (PP) und hat bei einem Durchmesser von 67cm nach Einbau ein Fassungsvermögen von etwa 55 Litern. Abdichtend um den Stamm wird zusätzlich eine Kokosmatte gelegt, die der Oberflächen austrocknung entgegenwirken und zudem Gras und Unkräuter im Wachstum hindern soll. Der fachgemäße Einbau des Gießrands wird durch eine grobe Zahnung auf der Randunterseite vereinfacht. Das hier verwendete größere Modell dient für Bäume mit einem Ballendurchmesser bis etwa 60cm. (arboa e.K. tree safety 2024)

Ein Bewässerungsrand dieser Größe wird bei Arboa (ohne Staffelpreise) für 47,36€ vertrieben.



Abbildung 2 arboGreenWell™ Gießrand 67cm

Bildquelle: https://shop.arboa.com/product_info.php?info=p51_arbogreenwell----giessrand-gross----67-cm-mit-kokosscheibe.html

²⁴ Langtriebe mit arttypischer Seitenastverzweigung, gesundes Laub

3.2.2 baumbad Premium Bewässerungsbeutel 75l

Der „baumbad Premium Bewässerungsbeutel 75l“ besteht aus witterungsbeständigem PVC-Material. Der Gießsack wird mit einem Füllvolumen von 75l angegeben, die Entleerungszeit soll ca. 7 Stunden dauern. Der Beutel wird um den Stamm gelegt und mittels eines Reißverschlusses fixiert. (baumbad.de 2024)

Die Kosten für einen Bewässerungssack (ohne Staffelpreise) belaufen sich für Privatpersonen im Hersteller-Onlineshop auf 15,99€.



Abbildung 3: baumbad Premium Bewässerungsbeutel 75l

Bildquelle:

<https://baumbad.de/collections/shop/products/baumbad-premium-bewasserungsbeutel-75l-zur-langzeit-baum-bewasserung>

3.3 Eingesetzte Sensorik

3.3.1 Treesense und Kronensensor

Bei der Treesense GmbH handelt es sich um ein Start-Up-Unternehmen aus München, das als Ableger des Lehrstuhls für Biomedizinische Elektronik an der Technischen Universität München hervorgegangen ist. Das Unternehmen hat sich zum Ziel gesetzt, die Bewässerungsstrukturen in Städten mit Hilfe von smarten Geräten des IoT (Internet of Things) zu vernetzen und zu verbessern. (Foderá et al. 2024)

Hierfür wurden Sensoren entwickelt, die den Wasserhaushalt von Bäumen mittels Impedanzmessung (elektrischer Widerstand) überwachen (vgl. Abb. 4). Die aufgenommenen Daten werden anschließend mit einer eigenen Software ausgewertet, die Dringlichkeit von Bewässerungen ermittelt und Gießempfehlungen ausgesprochen. Die Idee ist es einzelne, repräsentative „Zeigerbäume“ beispielsweise in städtischen Grünanlagen oder in Alleen mit dieser Sensorik auszustatten und darüber einen Überblick über den gesamten Baumbestand einer Fläche zu erhalten. Man verspricht sich dadurch einen ressourcensparenden und zielgerichteten Einsatz von Wasser, ein verbessertes Baummonitoring, geringere Ausfälle von städtischen Bäumen und nicht zuletzt eine Zeitersparnis. (Foderá et al. 2024)

Die Funktionsweise der Kronensensoren basiert auf der sich je nach Wassergehalt ändernden elektrischen Leitfähigkeit im Xylem des Baumes. Quantifizierbar ist diese durch die Messung der vorherrschenden Impedanz. Je feuchter das Xylem, desto höher ist die elektrische Leitfähigkeit bzw. desto geringer die messbare Impedanz. (Chandiwala 2022)



Abbildung 4: Kronensensor „Treesense Pulse R“

Bildquelle:

<https://www.treesense.net/home/pulse/>

Die Sensoren werden in die Krone des Baumes eingebaut und messen mit Hilfe von zwei externen Elektroden (Schrauben) in einem regelmäßigen Abstand von 15 min die absoluten Widerstandswerte (in $k\Omega$) im Xylem. (Chandiwala 2022) Die aufgenommenen Daten werden von einem LoRaWAN-Gateway (vgl. 3.3.3) gesammelt und über eine Cloud online zur Verfügung gestellt. Über eine von Treesense entwickelte Software kann die Auswertung der Datensätze vorgenommen werden. (Spielvogel und Kübler 2023)

Elektrisch leitfähig wird das Xylemwasser erst durch die über die Wurzeln aufgenommenen Nährsalze, welche im Wasser gelöst als Ionen vorliegen.

Einfluss auf den elektrischen Widerstand hat neben dem Wassergehalt auch die Temperatur. Je höher die Temperatur, desto schneller und stärker bewegen sich die Ionen im Xylemwasser. Dadurch steigt die elektrische Leitfähigkeit. Nimmt die Ionenbewegung aufgrund von sinkenden Temperaturen ab, so erhöht sich der elektrische Widerstand trotz gleichbleibendem Wassergehalts. (Jócsák et al. 2019) (Yue et al. 2018)

Der in die Software eingebettete Algorithmus kann diesen Temperatureinfluss rechnerisch kompensieren. Dabei wird der temperaturbereinigte Widerstand auf eine „Optimaltemperatur“ von 20°C bezogen. Zusätzlich wird der Feuchtigkeitsgehalt (Holzfeuchte²⁵) des Baumes berechnet. (Spielvogel und Kübler 2023) Aus diesem Grund tauchen in den Ergebnissen neben dem gemessenen Widerstand auch zwei weitere Variablen auf.

Für eine praxisorientierte und anwendungsfreundliche Handhabung werden die aufgearbeiteten Daten auf der Website vereinfacht dargestellt. Mittels einer internen Ampelabstufung wird der Baumzustand und somit die Bewässerungsdringlichkeit visualisiert. (Spielvogel und Kübler 2023)

3.3.2 Bodenfeuchtesensor

Bei den eingesetzten Bodenfeuchtesensoren handelt es sich um Sensoren des Typs „Dragino LSE01“, die ebenfalls in das verwendete LoRaWAN-System integriert werden können. Diese Sensoren arbeiten nach der FDR-Methodik (Frequency Domain Reflectometrie). (Dragino Technology Co. 2023) Hierbei wird der Wassergehalt des Bodens (in Vol.-%) indirekt durch die Messung der relativen Dielektrizitätszahl²⁶ ermittelt. Es wird sich zu Nutze gemacht, dass die relative Dielektrizitätszahl von Wasser mit einem Wert von ~ 80 höher ist als die der Bodenfeststoffe (relative Dielektrizitätszahl ~ 4) und der Bodenluft (relative Dielektrizitätszahl ~ 1). (Thon et al. 2023)



Abbildung 5: Bodenfeuchtesensor „Dragino LSE01“

Bildquelle:

<https://www.dragino.com/products/lo-ra-lorawan-end-node/item/159->

Um die Genauigkeit der Berechnung der Bodenfeuchtigkeit zu erhöhen werden neben der relativen Dielektrizitätszahl auch die Einflussgrößen elektrische Leitfähigkeit und Temperatur erfasst und anschließend rechnerisch kompensiert. (Dragino Technology Co. 2023)

²⁵ Holzfeuchte in %; Verhältnis von im Holz enthaltener Wassermasse zur Trockenmasse des Holzes

²⁶ Maß der Speicherefähigkeit von elektrischen Feldern; Bezugsgröße Vakuum (Dielektrizitätszahl 0)

3.3.3 LoRaWAN

„Long Range Wide Area Network“ – kurz LoRaWAN – ist eine Funk-Technologie, die speziell für die effiziente Übertragung kleiner Datenmengen über große Distanzen entwickelt wurde. Die Arbeitsweise ähnelt der von WLAN, jedoch ermöglicht LoRaWAN eine größere Reichweite. Dabei wird ein zentraler Router, auch als Gateway bezeichnet, verwendet, um die Daten von den umliegenden Sensoren zu sammeln und sie anschließend ins Internet weiterzuleiten. (Foderá et al. 2023)

3.4 Versuchsaufbau

Für den Versuch wurden je drei Bäume mit Gießsäcken (Baum 1, 3 und 5) und drei Bäume mit Gießrändern (Baum 2, 4 und 6) versehen. Jeder Baum wurde zusätzlich mit je einem Kronensensor und einem Bodenfeuchtesensor ausgestattet. Die Aufnahmen erfolgten über einen Zeitraum von etwa zwei Monaten (05.06.2023 bis 01.08.2023). Hierfür wurde die Gießstrategie entsprechend 3.4.2 abgewandelt und die Widerstandswerte im Xylem sowie die Bodenfeuchtigkeit ununterbrochen im 15 min Takt gemessen.

3.4.1 Gießstrategie Tübingen – generelles Vorgehen

Generell hat Tübingen eine sehr konsequente und regelmäßige Gießstrategie. Im Sommer sind eigens für die Baumbewässerungen zwei Mitarbeitende zuständig. Dadurch kann gewährleistet werden, dass Bäume – immer entsprechend des Bedarfs je nach Witterungsverhältnissen – alle drei bis maximal vier Tage gegossen werden können. Das entspricht in Trockenperioden einer wöchentlichen Taktung von etwa 2 Wässerungen pro Baum und Woche.

3.4.2 Gießstrategie Tübingen – versuchsbezogene Abwandlung

Um möglichst aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten, wurde die Gießstrategie für die Untersuchungsbäume entsprechend abgeändert. Das regelmäßige Gießen wurde ausgesetzt und die Bäume so künstlich in einen Trockenstresszustand versetzt. Erst nach einsetzenden Vitalitätsverlusten wie Welkeerscheinungen u.ä. wurden die Bäume entsprechend der Herstellerangaben der einzelnen Gießsysteme bewässert.

3.5 Versuchsdurchführung

3.5.1 Sensoreinbau

Der Kronensensor-Einbau erfolgte bei allen sechs Untersuchungsbäumen am 05.06.2023. Für die Sensorplatzierung wurde jeweils ein mittelstarker Ast von ca. zwei bis drei Zentimetern Dicke in der Krone, um Vandalismus vorzubeugen möglichst außerhalb der Reichhöhe von Menschen, ausgewählt. In einem ersten Schritt wurde eine Bohrschablone angebracht, durch welche mittels eines dünnen Bohrers zwei Löcher im vorgegebenen Abstand in den Ast gebohrt werden konnten.



Abbildung 6: eingebohrte Elektroden
Bildquelle: eigene Aufnahme (05.06.2023)



Abbildung 7: fertig installierter und einsatz-
bereiter Kronensensor mit Funkeinheit
Bildquelle: eigene Aufnahme (05.06.2023)

In einem zweiten Schritt wurden zwei als Elektroden dienende Schrauben am Ast installiert (Abb. 6). Folgend konnte die Sensoreinheit aktiviert und angebracht werden (Abb. 7). Die Sensoreinheit begann sofort mit der Datenaufnahme, durch das normale Abschottungsverhalten der Bäume veränderten sich diese anfänglich aber noch stark.

Neben den Kronensensoren wurde jeder Baum zusätzlich mit einem Bodenfeuchtesensor ausgestattet. Ziel war es, Feuchtigkeitsschwankungen im Wurzelballen, ausgelöst durch Bewässerungsvorgänge oder Niederschlagsereignisse, zu dokumentieren. Da die Bäume bereits etwa einen Monat zuvor gepflanzt wurden und die Möglichkeit des Sensoreinbaus im Zuge der Pflanzung somit ausschied, mussten die Sensoren nachträglich in den Boden eingebracht werden.

Mithilfe eines händischen Erdbohrers wurde jeweils nordseitig des Baums ein Zugang zum unteren Ende des Wurzelballens geschaffen. Entsprechend den Technischen Lieferbedingungen für Baumschulpflanzen der FLL e.V. sollten Bäume mit einem Stammumfang von 18-20cm eine Mindestballengröße von 50cm vorweisen. (FLL e.V. 2022c) Um eine Bewässerung bis in die Tiefe des Wurzelballens zu überprüfen, wurde der Bodenfeuchtesensor daher mittig in einer Tiefe von etwa 45cm angebracht. Nach vorheriger Berechnung ergab sich daraus ein Abstand von Bohrloch zu Stamm von etwa 65cm (Abb. 8).

Um den Zugang für den Ein- und Ausbau des Bodenfeuchtesensors offen zu halten, wurde ein 1 Meter langes PVC-Rohr in das zuvor gebohrte Loch geschoben.

Die Bodensensoren wurden für den Einbau mit einer Gewindestange versehen, mithilfe welcher die Sensorik durch das PVC-Rohr in den Wurzelballen geschoben werden konnte (Abb. 9). Diese blieb die gesamte Untersuchungszeit am Sensor befestigt, um diesen nach Beendigung der Aufnahmen wieder ausbauen zu können. Um einen abschirmenden Einfluss des Rohrs zu verhindern, wurde das Rohr nach Einbau des Sensors einige cm aus dem Boden gezogen.

Die Sendereinheit wurde oberirdisch an einem Pfahl befestigt. Dieser diente weiterhin als Befestigung für ein kleines Hinweisschild. Darüber hinaus wurde der oberirdische Teil des PVC-Rohrs zur besseren Sichtbarkeit orange eingefärbt (Abb. 10).

Für die Datenübermittlung wurde ein LoRaWAN-Gateway auf der Terrasse eines Wohnhauses im nahen Umfeld der Versuchsbäume installiert.



Abbildung 8: Abstand vom Stamm zum Installationsrohr für den Bodensensor
Bildquelle: eigene Aufnahme (06.06.2023)



Abbildung 9: Bodenfeuchtesensor LSE01 mit verbundener Gewindestange als Einbauhilfe
Bildquelle: eigene Aufnahme (06.06.2023)



Abbildung 10: fertig installierter und einsatzbereiter Bodenfeuchtesensor mit Funkeinheit
Bildquelle: eigene Aufnahme (06.06.2023)

3.5.2 Bewässerungsdurchgänge

Wie in 3.4.2 beschrieben, wurde der „normale“ Gießrhythmus für den Untersuchungszeitraum an den zu untersuchenden Bäumen ausgesetzt. Es erfolgten insgesamt zwei Gießdurchgänge. Die Stadtgärtnerei stellte hierfür die technischen Mittel. Mit Hilfe eines Gießwagens wurden die Bäume gemäß den Herstellerangaben der einzelnen Gießsysteme gewässert.



Abbildung 11: Bewässerung mithilfe des arboGreenWell™ Gießbrands
Bildquelle: eigene Aufnahme (19.06.2023)



Abbildung 12: Bewässerung mithilfe des baumbad Premium Bewässerungsbeutel 75l
Bildquelle: eigene Aufnahme (19.06.2023)

Bewässerungsdurchgang 1 erfolgte am 19.06.2023, also 14 Tage nach Einbau der Kronensensoren. Bewässerungsdurchgang 2 erfolgte am 06.07.2023.

3.5.3 Ausbau

Der Ausbau der Messinstrumente erfolgte zeitlich versetzt. Da bereits während der Aufnahmen festgestellt wurde, dass die Daten der Bodenfeuchtesensoren nicht vergleichbar sind, wurden die ersten Bodensensoren bereits am 05.07. abgebaut. Lediglich ein Sensor (Baum 5) wurde für Gießnachweise im Boden belassen (vgl. 5.2.3)

Der Ausbau der Kronensensoren, des letzten Bodenfeuchtesensors sowie des Gateways erfolgte nach Abschluss der Aufnahmen am 01.08.2023.

3.6 Statistische Auswertung

Die aufgenommenen Daten wurden über die Treesense-Cloud als Excel-Sheets abgerufen und für die weitere Verarbeitung vorbereitet. Bei der statistischen Auswertung wurde ausschließlich mit Excel und dem integrierten Add-In „Datenanalyse“ gearbeitet.

Zur Untersuchung des Bewässerungserfolgs waren jeweils die drei Tage vor Bewässerung und die drei Tage nach Bewässerung von Interesse und wurden daher rechnerisch durch das arithmetische Mittel zusammengefasst. Hierdurch sollten etwaige kurzfristige Witterungseinflüsse möglichst ausgeglichen werden. Der Betrachtungszeitraum vor und nach dem Gießen wurde auf jeweils drei Tage begrenzt, um die tatsächlichen Bewässerungswirkungen darstellen zu können.

Zur Bestimmung von Wirksamkeitsunterschieden können die absolut aufgenommenen Werte allerdings nicht herangezogen werden. Aus diesem Grund wurden die relativen Unterschiede der zuvor gebildeten arithmetischen Mittelwerte berechnet.

Auf deren Grundlage konnten statistische Untersuchungen hinsichtlich der Fragestellung der Bachelorarbeit und entsprechend der Hypothesen durchgeführt werden.

Zur vergleichenden Analyse der beiden Gießsysteme wurde ein Mittelwertvergleich (Student's t-Test) für zwei unabhängige Stichproben durchgeführt. Dabei handelt es sich um einen Hypothesentest, der zu Aussagen hinsichtlich statistisch signifikanter Unterschiede in den Grundgesamtheiten der beiden Gießsysteme führt. Zur Erfüllung der Voraussetzungen musste im Vorhinein ein Levene-Test (F-Test) durchgeführt werden. Alle anderen Voraussetzungen wie die Unabhängigkeit der Stichproben, eine Intervallskalierung der Variablen sowie eine Normalverteilung konnten als gegeben angenommen werden. (Scheuber 2020)

Im Anschluss an den t-Test wurden die Konfidenzintervalle mit einem Signifikanzniveau $\alpha = 0,05$ (5%) für den temperaturbedingten Widerstand bestimmt. Diese lassen Aussagen über den wahren Mittelwert einer Grundgesamtheit zu. Fortführend wurden diese für jeden Durchgang in der Annahme von größer werdende Stichprobenumfängen berechnet. (Scheuber 2020)

4 Ergebnisse

4.1 Augenscheinliche Ergebnisse

Im Anschluss an die Untersuchungen wurden die anfangs aufgenommenen Parameter aufgrund kaum zu erwartender Wachstumsveränderungen nicht wiederholt aufgenommen. Allerdings wurde sich ein allgemeiner Überblick über die Vitalität verschafft. Alle Bäume konnte in einem gleichbleibenden guten Vitalzustand (Vitalitätsstufe 0 nach Roloff) an die Stadt übergeben werden und haben sich augenscheinlich von den zwischenzeitlichen Vitalitätsverlusten erholt.

Kleinere Rückstände der montierten Messgeräte konnten wahrgenommen werden. Hierbei handelte es sich allen voran um die Bohrungen für die Sensoren, teilweise konnten auch Abdrücke der Fixierungsgummis an der Borke ausgemacht werden. (siehe Abbildungen)



Abbildung 13: Vitalität der Bäume nach Abschluss der Untersuchungen (hier Baum 3)
Bildquelle: eigene Aufnahme (01.08.2023)



Abbildung 14: Abdruck des Fixierungsgummis
Bildquelle: eigene Aufnahme (01.08.2023)



Abbildung 15: Bohrungs Löcher nach Abbau der Sensorik
Bildquelle: eigene Aufnahme (01.08.2023)

4.2 Deskriptive Datenauswertung

Die durch die Sensoren aufgenommenen und durch die Treesense-Software aufbereiteten Daten für Widerstand, temperaturbereinigten Widerstand und Feuchtigkeitsgehalt liegen als absolute Werte über den gesamten Versuchszeitraum vor.

Tabelle 4 zeigt die Mittelwerte des gemessenen Widerstands, des rechnerisch temperaturbereinigten Widerstands und des Feuchtigkeitsgehalts der einzelnen Bäume im Zeitraum von drei Tagen vor und drei Tagen nach der Bewässerung (vgl. 3.6). Die absoluten Mittelwerte der Zeiträume werden für die weitere Auswertung in relative Zusammenhänge gestellt. Diese werden bei den beiden Widerstandsdaten als Widerstandsabnahme in % ausgedrückt, bei den Feuchtigkeitsdaten handelt es sich um eine prozentuale Zunahme. In einem zweiten Schritt wurden die ermittelten prozentualen Unterschiede der einzelnen Bäume nochmals gemittelt, um den mittleren prozentualen Unterschied je Geißsystem festzustellen.

Tabelle 4

*Arithmetische Mittelwerte und prozentuale Unterschiede von gemessenem Widerstand, temperaturbereinigtem Widerstand und Feuchtigkeitsgehalt je Gießsystem in **Durchgang 1***

Durchgang 1 (Gießtag 19.06.2023)	Gießsack			Gießrand		
	Baum 1	Baum 3	Baum 5	Baum 2	Baum 4	Baum 6
Mittelwert gemessener Widerstand (16.-18.06.)	36,244	27,055	26,967	27,859	24,609	35,980
Mittelwert gemessener Widerstand (20.-22.06.)	16,956	11,896	11,658	15,320	13,602	12,553
prozentualer Unterschied (Widerstandsabnahme um x %)	53,22%	56,03%	56,77%	45,01%	44,73%	65,11%
mittlerer prozentualer Unterschied je Gießsystem	55,34%			51,62%		
Mittelwert temperaturbereinigter Widerstand (16.-18.06.)	42,163	33,361	33,200	31,304	28,692	43,120
Mittelwert temperaturbereinigter Widerstand (20.-22.06.)	21,788	15,458	14,961	19,797	17,821	16,032
prozentualer Unterschied (Widerstandsabnahme in x %)	48,32%	53,66%	54,94%	36,76%	37,89%	62,82%
mittlerer prozentualer Unterschied je Gießsystem	52,31%			45,82%		
Mittelwert Feuchtigkeitsgehalt (16.-18.06.)	60,187	64,720	64,037	65,351	67,032	59,376
Mittelwert Feuchtigkeitsgehalt (20.-22.06.)	72,841	83,954	85,875	75,837	79,099	83,642
prozentualer Unterschied (Feuchtigkeitszunahme um x %)	21,02%	29,72%	34,10%	16,04%	18,00%	40,87%
mittlerer prozentualer Unterschied je Gießsystem	28,28%			24,97%		

Anmerkung: elektrischer Widerstand in kΩ; Feuchtigkeitsgehalt in %

Zu sehen ist, dass sich der mittlere gemessene Widerstand je Gießsystem im ersten Durchgang bei beiden Gießsystemen mehr als halbiert. Die Widerstandsabnahme bei den mit Gießsäcken ausgestatteten Bäumen betrug im Mittel 55,34%. Bei den Bäumen, welche mithilfe von Gießrändern bewässert wurden, sank der gemessene Widerstand im Mittel um 51,62%. Die Abnahme des temperaturbereinigten Widerstands fiel bei beiden Gießsystemen etwas geringer aus. Der mittlere prozentuale Unterschied beim Gießsack betrug 52,31%, der des Gießrands 45,82%. Generell ist festzustellen, dass die relativen Unterschiede im ersten Gießdurchgang bei den Gießsäcken größer ausfielen als die der Gießränder. Auch die Feuchtigkeit nahm beim Gießsack im Mittel um 28,28% zu, beim Gießrand lag die Feuchtigkeitszunahme bei 24,97%.

Tabelle 5

*Arithmetische Mittelwerte und prozentuale Unterschiede von gemessenem Widerstand, temperaturbereinigtem Widerstand und Feuchtigkeitsgehalt je Gießsystem in **Durchgang 2***

Durchgang 2 (Gießtag 06.07.2023)	Gießsack			Gießrand		
	Baum 1	Baum 3	Baum 5	Baum 2	Baum 4	Baum 6
Mittelwert gemessener Widerstand (03.-05.07.)	18,617	13,273	13,037	20,959	13,381	15,381
Mittelwert gemessener Widerstand (07.-09.07.)	10,662	9,879	7,597	13,210	8,414	7,864
prozentualer Unterschied (Widerstandsabnahme um x %)	42,73%	25,57%	41,73%	36,97%	37,12%	48,87%
mittlerer prozentualer Unterschied je Gießsystem	36,68%			40,99%		
Mittelwert temperaturbereinigter Widerstand (03.-05.07.)	20,078	14,837	14,180	23,877	14,801	16,961
Mittelwert temperaturbereinigter Widerstand (07.-09.07.)	12,259	12,309	9,282	16,003	10,199	9,464
prozentualer Unterschied (Widerstandsabnahme in x %)	38,94%	17,04%	34,54%	32,98%	31,09%	44,20%
mittlerer prozentualer Unterschied je Gießsystem	30,17%			36,09%		
Mittelwert Feuchtigkeitsgehalt (03.-05.07.)	75,923	86,444	87,603	71,284	86,662	81,221
Mittelwert Feuchtigkeitsgehalt (07.-09.07.)	91,762	91,239	99,180	83,243	96,978	98,426
prozentualer Unterschied (Feuchtigkeitszunahme um x %)	20,86%	5,55%	13,22%	16,78%	11,90%	21,18%
mittlerer prozentualer Unterschied je Gießsystem	13,21%			16,62%		

Anmerkung: elektrischer Widerstand in kΩ; Feuchtigkeitsgehalt in %

Tabelle 5 zeigt die Mittelwerte derselben Bäume in einer Wiederholung im Zeitraum vom 03.07.2023 bis 09.07.2023. Auffällig ist, dass im Gegensatz zum ersten Durchgang die relativen Unterschiede der mit Gießrändern bestückten Bäume (Bäume 2, 4 und 6) im zweiten Durchgang höher ausfielen als die der durch Gießsäcke bewässerten Untersuchungsbäume. Des Weiteren fielen die prozentualen Unterschiede im Vergleich zu Durchgang 1 deutlich geringer aus. Der prozentuale Unterschied der Werte vor und nach dem Gießdurchgang lag bei keinem der untersuchten Bäume bei über 50%. Die größte Abnahme des gemessenen Widerstands konnte bei Baum 6 mit 48,87% festgestellt werden. Im Mittel lag der prozentuale Unterschied des gemessenen Widerstands im zweiten Durchgang beim Gießsack bei 36,68%, beim Gießrand bei 40,99%. Der mittlere prozentuale Unterschied des temperaturbereinigten Widerstands betrug beim Gießsystem Gießsack 30,17%, beim verglichenen System lag er bei 36,09%. Die Feuchtigkeitszunahme lag gemittelt bei 13,21% bei den Bäumen 1, 3 und 5 und bei 16,62% bei den Bäumen 2,4 und 6.

Fasst man die beiden Durchgänge zusammen, ergeben sich die in Tabelle 6 dargestellten Werte.

Tabelle 6

Mittlerer prozentualer Unterschied von gemessenem Widerstand, temperaturbereinigtem Widerstand und Feuchtigkeitsgehalt je Gießsystem über beide Durchgänge sowie absolute Unterschiede zwischen den beiden Gießsystemen (in Prozentpunkten absolut)

beide Durchgänge	Gießsack	Gießrand	Unterschiede
Mittlerer prozentualer Unterschied je Gießsystem für Variable			
gemessener Widerstand	46,01%	46,30%	0,29%
temperaturbereinigter Widerstand	41,24%	40,96%	0,28%
Feuchtigkeitsgehalt	20,75%	20,80%	0,05%

Es wird deutlich, dass die Abnahmen der Widerstandswerte und die Zunahme der Feuchtigkeit über beide Durchgänge hinweg bei beiden Gießsystemen in einem ähnlichen Bereich liegen. Die Unterschiedsspanne der prozentualen Ab- und Zunahmen in beiden Durchgängen kombiniert zwischen Gießsack und Gießrand reicht von 0,05% beim Feuchtigkeitsgehalt bis maximal 0,29% beim tatsächlich gemessenen Widerstand.

4.3 Analytische Datenauswertung

Genauer beleuchtet werden im Folgenden der temperaturbereinigte Widerstand und der daraus von Treesense abgeleitete Feuchtigkeitsgehalt.

4.3.1 Varianzvergleich

Für den Vergleich der Varianzen wurde ein F-Test angewandt. Es handelt sich um einen Hypothesentest mit folgenden zu überprüfenden Hypothesen:

Null-Hypothese H0: Die Varianzen unterscheiden sich

und

Alternativhypothese H1: Die Varianzen unterscheiden sich nicht

H0 ist dabei abzulehnen, wenn $F\text{-Wert} > \text{kritischer F-Wert}$

Für die Daten des temperaturbereinigten Widerstands ergeben sich nach Varianzvergleich folgende Ergebnisse:

Tabelle 7

Ergebnisse des Varianzvergleichs (F-Test) für die Daten des temperaturbereinigten Widerstands

	F-Wert	kritischer F-Wert	Ergebnis
Durchgang 1	0,057	0,053	F-Wert > kritischer F-Wert; H0 ist abzulehnen; unterschiedliche Varianzen
Durchgang 2	2,673	19,0	F-Wert < kritischer F-Wert; H0 kann nicht abgelehnt werden; gleiche Varianzen
beide Durchgänge	1,519	5,050	F-Wert < kritischer F-Wert; H0 kann nicht abgelehnt werden; gleiche Varianzen

Für die Daten des Feuchtigkeitsgehalts ergeben sich nach Varianzvergleich folgende Ergebnisse:

Tabelle 8

Ergebnisse des Varianzvergleichs (F-Test) für die Daten des Feuchtigkeitsgehalts

	F-Wert	kritischer F-Wert	Ergebnis
Durchgang 1	0,233	0,053	F-Wert > kritischer F-Wert; H0 ist abzulehnen;
Durchgang 2	2,721	19,0	unterschiedliche Varianzen F-Wert < kritischer F-Wert; H0 kann nicht abgelehnt werden;
beide Durchgänge	1,034	5,050	gleiche Varianzen F-Wert < kritischer F-Wert; H0 kann nicht abgelehnt werden; gleiche Varianzen

4.3.2 Zweiseitiger t-Test für unabhängige Stichproben des temperaturbereinigten Widerstands

Die folgende Auswertung soll überprüfen, ob es zwischen den Mittelwerten der Widerstandsabnahmen der beiden Gießsysteme statistisch signifikante Unterschiede gibt. Hierfür wurde entsprechend der statistischen Methodik (vgl. 3.6) ein Student's t-Test durchgeführt. Es handelt sich um einen Hypothesentest mit folgenden zu überprüfenden Hypothesen:

Null-Hypothese H0: Widerstandsabnahme der Gießmethoden unterscheiden sich statistisch nicht signifikant

und

Alternativhypothese H1: Widerstandsabnahme der Gießmethoden unterscheiden sich statistisch signifikant

H0 ist dabei abzulehnen, wenn $p \leq 0,05$ oder wenn Wert der t-Statistik > kritischer t-Wert

Auf Grundlage eines zweiseitigen t-Tests für unabhängige Stichproben ergeben sich für die Daten des **temperaturbereinigten Widerstands** folgende Ergebnisse:

Tabelle 9

Ergebnisse des zweiseitigen t-Tests für unabhängige Stichproben für Durchgang 1

t-Test für die Mittelwertgleichheit Durchgang 1	
t-Statistik	0,742
kritischer t-Wert bei zweiseitigem t-Test	4,303
p-Wert zweiseitig	0,535

Unter der Annahme unterschiedlicher Varianzen

$p > 0,05$ und t-Statistik < kritischer t-Wert; H0 kann nicht abgelehnt werden

Es besteht **kein statistisch signifikanter Unterschied**.

Tabelle 10

Ergebnisse des zweiseitigen t-Tests für unabhängige Stichproben für Durchgang 2

t-Test für die Mittelwertgleichheit Durchgang 2	
t-Statistik	-0,754
kritischer t-Wert bei zweiseitigem t-Test	2,776
p-Wert zweiseitig	0,493

Unter der Annahme gleicher Varianzen

$p > 0,05$ und t-Statistik < kritischer t-Wert; H_0 kann nicht abgelehnt werden

Es besteht **kein statistisch signifikanter Unterschied**.

Tabelle 11

Ergebnisse des zweiseitigen t-Tests für unabhängige Stichproben für beide Durchgänge

t-Test für die Mittelwertgleichheit beide Durchgänge	
t-Statistik	0,038
kritischer t-Wert bei zweiseitigem t-Test	2,228
p-Wert zweiseitig	0,971

Unter der Annahme gleicher Varianzen

$p > 0,05$ und t-Statistik < kritischer t-Wert; H_0 kann nicht abgelehnt werden

Es besteht **kein statistisch signifikanter Unterschied**.

4.3.3 Zweiseitiger t-Test für unabhängige Stichproben des Feuchtigkeitsgehalts

Null-Hypothese H_0 : Feuchtigkeitszunahme der Gießmethoden unterscheiden sich statistisch nicht signifikant

und

Alternativhypothese H_1 : Feuchtigkeitszunahme der Gießmethoden unterscheiden sich statistisch signifikant

H_0 ist dabei abzulehnen, wenn $p \leq 0,05$ oder wenn Wert der t-Statistik > kritischer t-Wert

Auf Grundlage eines zweiseitigen t-Tests für unabhängige Stichproben ergeben sich für die Daten des **Feuchtigkeitsgehalts** folgende Ergebnisse:

Tabelle 12

Ergebnisse des zweiseitigen t-Tests für unabhängige Stichproben für Durchgang 1

t-Test für die Mittelwertgleichheit Durchgang 1	
t-Statistik	0,374
kritischer t-Wert bei zweiseitigem t-Test	3,182
p-Wert zweiseitig	0,733

Unter der Annahme unterschiedlicher Varianzen

$p > 0,05$ und t-Statistik < kritischer t-Wert; H0 kann nicht abgelehnt werden

Es besteht **kein statistisch signifikanter Unterschied**.

Tabelle 13

Ergebnisse des zweiseitigen t-Tests für unabhängige Stichproben für Durchgang 2

t-Test für die Mittelwertgleichheit Durchgang 2	
t-Statistik	-0,66
kritischer t-Wert bei zweiseitigem t-Test	2,776
p-Wert zweiseitig	0,545

Unter der Annahme gleicher Varianzen

$p > 0,05$ und t-Statistik < kritischer t-Wert; H0 kann nicht abgelehnt werden

Es besteht **kein statistisch signifikanter Unterschied**.

Tabelle 14

Ergebnisse des zweiseitigen t-Tests für unabhängige Stichproben für beide Durchgänge

t-Test für die Mittelwertgleichheit beide Durchgänge	
t-Statistik	-0,009
kritischer t-Wert bei zweiseitigem t-Test	2,228
p-Wert zweiseitig	0,993

Unter der Annahme gleicher Varianzen

$p > 0,05$ und t-Statistik < kritischer t-Wert; H0 kann nicht abgelehnt werden

Es besteht **kein statistisch signifikanter Unterschied**.

4.3.4 Konfidenzintervalle

Weiterhin wurden die Konfidenzintervalle für den temperaturbedingten Widerstand je Gießsystem berechnet. Es wurden beide Durchgänge sowohl getrennt, wie auch kombiniert untersucht. Hierfür ergeben sich folgende Ergebnisse:

Tabelle 15

Berechnung der unteren und oberen Grenzen der Konfidenzintervalle mit einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$ für Durchgang 1 und 2 sowie beide Durchgänge kombiniert

		Abweichung (\pm) in Prozentpunkten vom arithm. Mittel	Untere Grenze	Obere Grenze
Durchgang 1	Gießsack	8,72%	43,59%	61,02%
	Gießbrand	36,60%	9,23%	82,42%
Durchgang 2	Gießsack	28,79%	1,39%	58,96%
	Gießbrand	17,61%	18,48%	53,70%
beide Durchgänge	Gießsack	15,05%	26,19%	56,29%
	Gießbrand	12,21%	28,75%	53,16%

Anmerkung: Durchgang 1 und 2 n = 3; beide Durchgänge n = 6

Da sich die Konfidenzintervalle überschneiden, können nicht zwei verschiedene Grundgesamtheiten angenommen werden. In anderen Worten, es besteht **kein statistisch signifikanter Unterschied**.

4.3.5 Nötiger Stichprobenumfang für signifikante Unterschiede der Gießsysteme

Um den nötigen Stichprobenumfang für statistisch signifikante Unterschiede der beiden Gießsysteme auf Grundlage der tatsächlich aufgenommenen Daten zu ermitteln, wurden die Konfidenzintervalle entsprechend fortlaufenden Stichprobenumfangs berechnet.

Als Datengrundlage dienen hier die relativen Unterschiede des temperaturbereinigten Widerstands im ersten Durchgang, im zweiten Durchgang und für beide Durchgänge zusammengefasst.

Gesucht wird die Stichprobenanzahl, bei welcher die Konfidenzintervalle der beiden Gießsysteme sich nicht mehr überschneiden.

Es ergeben sich folgende Tabellen und Abbildungen:

Tabelle 16

Ermittlung des benötigten Stichprobenumfangs (n) anhand der Konfidenzintervalle für einen statistisch signifikanten Unterschied der beiden Gießsysteme auf Datengrundlage des ersten Durchgangs

Durchgang 1		Gießsack		Gießbrand	
n	t	untere Grenze	obere Grenze	untere Grenze	obere Grenze
3	4,30265273	43,59%	61,02%	9,23%	82,42%
[...]					
32	2,039513446	51,04%	53,57%	40,51%	51,13%
33	2,03693343	51,06%	53,55%	40,60%	51,05%
34	2,034515297	51,08%	53,53%	40,68%	50,96%

Stichprobenanzahl (n), bei welcher sich die Konfidenzintervalle nicht mehr überschneiden
n=33

Darstellung als Linien-Diagramm:

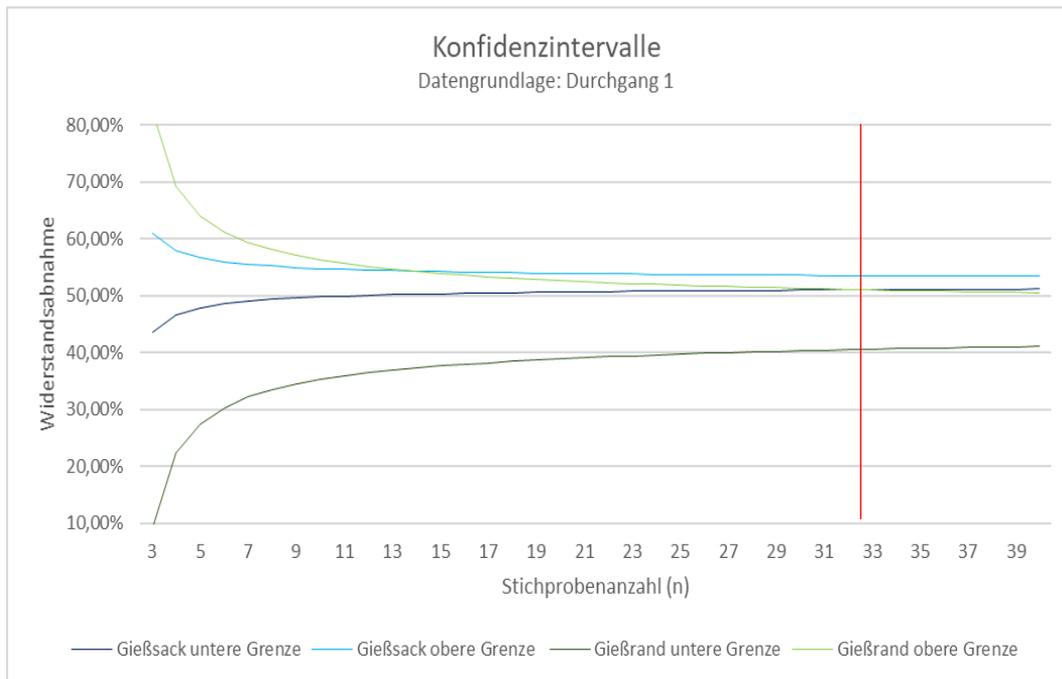


Abbildung 16: Diagramm der Konfidenzintervalle über Stichprobenanzahl (n) sowie Schnittpunkt der Grenzen (rot markiert) auf Datengrundlage des ersten Durchgangs eigene Darstellung

Tabelle 17

Ermittlung des benötigten Stichprobenumfangs (n) anhand der Konfidenzintervalle für einen statistisch signifikanten Unterschied der beiden Gießsysteme auf Datengrundlage des zweiten Durchgangs

Durchgang 2		Gießsack		Gießrand	
n	t	untere Grenze	obere Grenze	untere Grenze	obere Grenze
3	4,30265273	1,39%	58,96%	18,48%	53,70%
[...]					
40	2,02269092	26,47%	33,88%	33,82%	38,36%
41	2,02107539	26,52%	33,83%	33,85%	38,33%
42	2,01954097	26,56%	33,79%	33,88%	38,30%

Stichprobenanzahl (n), bei welcher sich die Konfidenzintervalle nicht mehr überschneiden
n=41

Darstellung als Liniendiagramm:

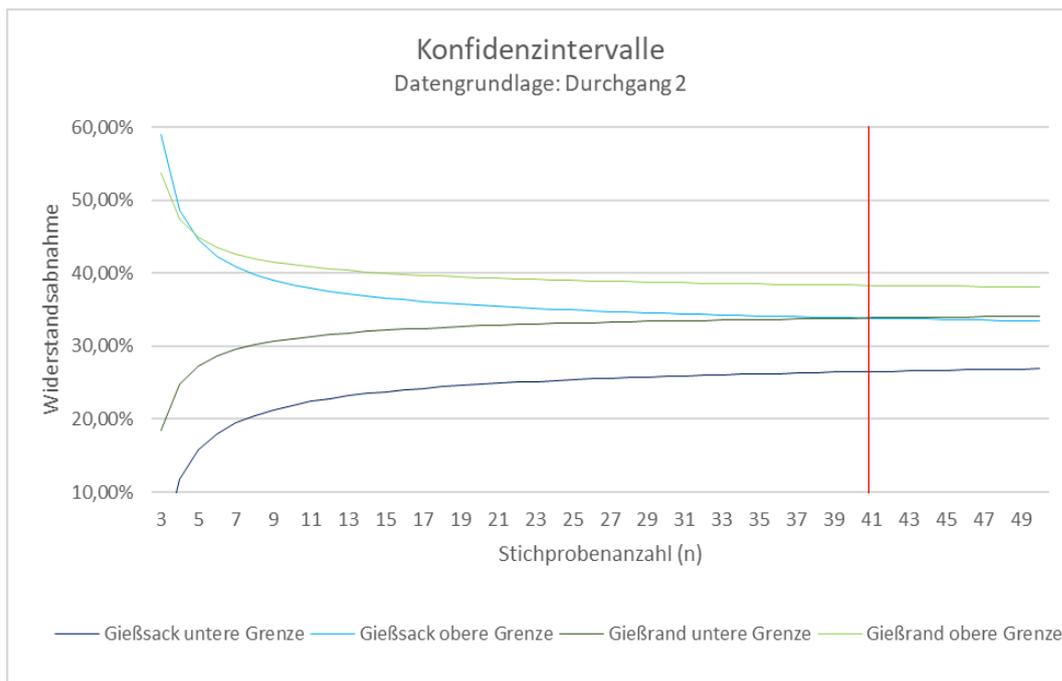


Abbildung 17: Diagramm der Konfidenzintervalle über Stichprobenanzahl (n) sowie Schnittpunkt der Grenzen (rot markiert) auf Datengrundlage des zweiten Durchgangs eigene Darstellung

Tabelle 18

Ermittlung des benötigten Stichprobenumfangs (n) anhand der Konfidenzintervalle für einen statistisch signifikanten Unterschied der beiden Gießsysteme auf Datengrundlage beider Durchgänge

beide Durchgänge		Gießsack		Gießbrand	
n	t	untere Grenze	obere Grenze	untere Grenze	obere Grenze
6	2,570581836	26,19%	56,29%	28,75%	53,16%
[...]					
100	1,984216952	38,40%	44,09%	38,65%	43,26%
[...]					
1.000	1,962341461	40,35%	42,13%	40,23%	41,68%
[...]					
10.000	1,960201264	40,96%	41,52	40,73%	41,18%
[...]					

Auf Grundlage der kombinierten Unterschiede beider Durchgänge kann keine Stichprobenanzahl (n) ausfindig gemacht werden, ab welcher sich die Konfidenzintervalle der beiden untersuchten Gießsysteme nicht mehr überschneiden.

Darstellung als Linien-Diagramm:

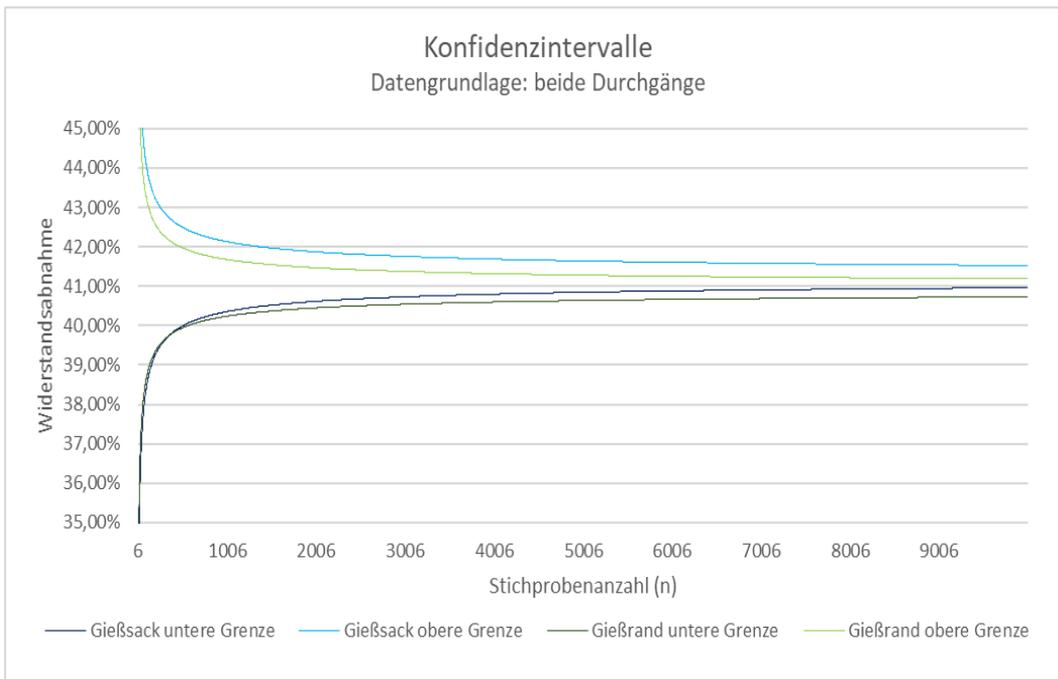


Abbildung 18: Diagramm der Konfidenzintervalle über Stichprobenanzahl (n) auf Datengrundlage beider Durchgänge eigene Darstellung

5 Diskussion

5.1 Diskussion des Materials

5.1.1 Untersuchungsbäume

Begrenzender Faktor der Untersuchungen waren insbesondere die zur Verfügung stehenden Untersuchungsbäume. Um alle weiteren Einflussgrößen zu nivellieren und die Ausgangslage damit konstant zu halten, wurden frisch gepflanzte Bäume der gleichen Baumart, des gleichen Alters und des möglichst gleichen Standorts gesucht. Die gewählten Bäume vereinen diese Anforderungen im Zuständigkeitsbereich der Stadtgärtnerei Tübingen bestmöglich. Es handelt sich um Berg-Ahorne der gleichen Herkunft, des selben Pflanzdatums und eines möglichst ähnlichen Standorts. Ziel war es, die Untersuchungen in Tübingen durchzuführen, da hier die Zusammenarbeit mit der Stadtgärtnerei für wissenschaftliche Zwecke erfahrungsgemäß bestens abläuft. Im Rahmen des Praxisversuchs der Bachelorarbeit hätten keine anderen Bäume in Tübingen ausgewählt werden können.

5.1.2 Eingesetzte Gießsysteme

Die in diesem Versuchsaufbau eingesetzten Gießsysteme wurden ausgewählt, da es sich hierbei um die in Tübingen am häufigsten eingesetzten Gießsysteme bei Neupflanzungen handelt. Laut Gerhard Waringer, dem Baumbbeauftragten der Stadtgärtnerei, habe man erfahrungsgemäß in den letzten Jahren sogar ausschließlich auf künstliche Gießränder gesetzt.

Gleichwohl sollte man nicht aus den Augen verlieren, dass es noch weitere Gießsysteme auf dem Markt gibt. Neben den beiden gängigen Systemen kommen immer wieder auch Baumbewässerungssysteme unterirdischer Bewässerungsringe mit oberflächlichem Einfüllrohr, Tröpfchenbewässerungssysteme, Bewässerungen mittels Wassertanks (z.B. IBC-Container) und nicht zuletzt sogar Baumrigolen²⁷ zum Einsatz. (Fischer 2021; Weltecke 2020) Bei den genannten Systemen liegt der Fokus allerdings auf einer langfristigen Bewässerung beispielsweise für unzureichend wasserversorgte Innenstadtstandorte, zudem sind sie in der Regel nicht so flexibel einsetzbar wie die untersuchten Gießsysteme.

5.1.3 Eingesetzte Sensorik

Die Treesense-Kronensensorik hat ihr ursprüngliches Einsatzgebiet nicht in der Aufnahme wissenschaftlicher Daten, sondern im Bereich der Vernetzung und Digitalisierung von Städten (vgl. 3.3.1). Im Fall der getätigten Untersuchungen wurde sich die Genauigkeit der Messgeräte, die kontinuierliche und ortsungebundene Datenaufnahme sowie die Vernetzung über die Software zunutze gemacht. Die Einzigartigkeit der Treesense-Sensorik und des Treesense-Systems sowie die vergleichsweise einfache Handhabung nach dem Plug&Play-System waren für den Einsatzzweck der Bachelorarbeitsuntersuchungen optimal. Nachteilig sind allerdings hohe Anschaffungskosten sowie die durch die Elektroden herbeigeführten kleinen Verletzungen am Baum. Diese sind aufgrund ihrer Größe jedoch nicht von großer Bedeutung, zudem kann der Berg-Ahorn durch seine gute Kompartimentierung (vgl. 2.1.1) damit problemlos umgehen.

²⁷ System, das Regenwasser oberflächlich abführt und dem Baum zuführt

Direkte Alternativen zu den Kronensensoren von Treesense sind nach aktueller Recherche nicht auf dem Markt vertreten. Bei einer Abänderung der Methodik wäre durchaus der Einsatz anderer Messinstrumente denkbar gewesen (vgl. 5.2.2). Aufgrund der Schwierigkeit der Materialbeschaffung solcher Sensoren wurde aber auf die bereits bestehenden Kontakte zu Treesense zurückgegriffen.

Die Bodenfeuchtesensorik ist durch die FDR-Messmethodik eine moderne Messmethode für die Bodenfeuchtigkeit. Die unzureichenden Daten waren kein technisches, sondern vielmehr ein methodisches Problem (vgl. 5.2.3). Die Sensoren wurden vorwiegend ausgewählt, da sie als LoRaWAN-Sensoren in das System von Treesense integriert werden können. Man sollte allerdings beachten, dass es weitere, teils deutlich genauere Messmethoden auf dem Markt gibt. Zu erwähnen sind hierbei insbesondere Tensiometer und Sensoren, die nach der Gipsblock-Methode²⁸ arbeiten. Tensiometer bestimmen den Wassergehalt des Bodens unter Zuhilfenahme physikalischer Prinzipien. Hierbei wird die Saugspannung ermittelt, die Messung ist dadurch sehr genau und unabhängig von Störfaktoren wie Salzeintrag und Ähnlichem. (Thon et al. 2023) Messgeräte dieser Art finden häufig Anwendung bei sensorgesteuerten Langzeitgießsystemen. (Borgmann gen. Brüser et al. 2017) Im Falle von weiteren Untersuchungen könnte auf diese Sensorik zurückgegriffen werden, allerdings sollte darauf geachtet werden, dass sie in die entsprechende Software integrierbar ist.

5.2 Diskussion der Methoden

5.2.1 Allgemeiner Versuchsaufbau

Da Untersuchungen dieser Art bisher nicht zu recherchieren waren, konnte nicht auf bestehende Versuchsaufbauten zurückgegriffen werden. Lediglich praxisorientierte Vergleiche in der Handhabung und im Aufbau der Systeme auf dem Gelände der Landesanstalt für Landwirtschaft und Gartenbau Sachsen-Anhalt (LLG) in Quedlinburg sind bekannt. (Schneidewind 2020) Aus diesem Grund entstand der Versuchsaufbau in enger Absprache mit allen beteiligten Akteuren. Er wurde insbesondere entsprechend der Einsatzmöglichkeiten der verwendeten Technik angepasst.

Positiv ist anzumerken, dass der Versuch im Praxisbetrieb stattfand. Die Bäume wurden nicht unter künstlichen Bedingungen in Pflanzschulen untersucht, sondern an ihrem festen Standort im städtischen Bereich. Das heißt, sie standen unter dem direkten Einfluss der vorherrschenden Faktoren. Dies erhöhte demnach aber auch den logistischen Aufwand der Stadtgärtnerei. Die Bäume wurden nicht mehr entsprechend der gewöhnlichen Intervalle bewässert, wodurch die normalen Routen des Gießwagens unterbrochen wurden.

Eine weitere Herausforderung ergab sich bei diesem Versuchsaufbau durch die Wetterabhängigkeit. Die Untersuchungen konnten nur in längeren Trockenperioden durchgeführt werden, bei ausreichendem Niederschlag besteht kein Bewässerungsbedarf.

Unter anderem daraus ergab sich eine sehr geringe Wiederholungszahl, die letztendlich einen zu geringen Stichprobenumfang für ausreichende statistische Auswertungen darstellt. Verstärkt wurde diese Problematik im Vorfeld durch Unstimmigkeiten und Verzögerungen bei der Lieferung des benötigten Sensormaterials. Dadurch verringerte sich die Aufnahmezeit erheblich.

²⁸ Der Gips nimmt Bodenfeuchtigkeit auf oder gibt sie in den Boden ab, bis ein Gleichgewicht hergestellt ist; anschließend wird der elektrische Widerstand gemessen; die Methode ist dadurch unabhängig von Störfaktoren wie Salzeintrag u.Ä.

5.2.2 Impedanzmessung

Es ist schwierig, den Einfluss von Wassermangel und den einsetzenden Trockenstress im Baum in messbaren Daten zu quantifizieren. Eine Näherungsmethode bietet - wie im Zuge dieser Aufnahmen geschehen - die Berechnung des Feuchtigkeitsgehalts über den elektrischen Widerstand. Andere Ansätze versuchen den Wasserverlust respektive den Wasserbedarf mittels Transpirationssmessung oder Saftflussmessung im Stamm zu ermitteln. (Duthweiler et al. 2017) Im Weinbau wird im Moment an Sensoren geforscht, die in der Lage sind, den Turgordruck²⁹ im Blatt zu messen und darüber das Wasserpotenzial der Pflanze zu bestimmen. Auch der Crop Water Stress Index (CWSI) kommt ursprünglich aus dem Einsatzbereich der Landwirtschaft und des Weinbaus. Hierbei werden Einflussgrößen wie Windrichtung und -geschwindigkeit, Luftfeuchte, Temperatur und Nettostrahlung erfasst und unter Verwendung der durch Infrarotaufnahmen ermittelten Oberflächentemperatur der Blätter der pflanzliche Wasserstress bestimmt. (Böttner-Langolf 2020)

Etwas verbreiteter ist die fotooptische Ermittlung von Trockenstress in der Fernerkundung anhand der Datenerhebung von mit Multispektralkameras ausgestatteten Drohnen. Ähnlich wie beim CWSI-Index werden die hier ermittelten NDVI-Indexe³⁰ (Normalized Difference Vegetation Index) mit Hilfe der Infrarotaufnahmen durchgeführt. Sie sind allerdings in der Regel für den Einsatz in größeren Gebieten bestimmt und für den Zweck dieser Bachelorarbeit zu ungenau. Es können damit kaum quantifizierbare Unterschiede vom Zeitraum vor zu dem nach einer Bewässerung festgestellt werden. Verwiesen werden kann hier auf eine neue Untersuchung von Josua Göhring im Rahmen einer Bachelorarbeit an der Hochschule für Forstwirtschaft Rottenburg. (Göhring 2023)

Es ist zu erwähnen, dass die meisten der vorgestellten Bestimmungsmethoden noch in den Anfängen stecken. Die generell begrenzte Auswahl an Sensorik sowie die Festlegung auf die Nutzung des Treesense-Systems machten die Impedanzmessung unausweichlich.

5.2.3 Bodenfeuchtmessung

Wie in 5.1.3. bereits angedeutet, lieferte die Bodenfeuchtigkeitssensorik aufgrund von methodischen Fehlern keine verlässlichen und plausiblen Daten. Idee des Einsatzes der Bodenfeuchtigkeitssensoren war es, mögliche Unterschiede bei der Wasserverteilung in die Bodentiefen zwischen den Bewässerungssystemen darzustellen. Weiterhin hätten mögliche Zusammenhänge zwischen Bodenfeuchtigkeit und der elektrischen Impedanz im Baum festgestellt werden können. Die erhobenen Daten sind allerdings aufgrund zu großer Unregelmäßigkeiten beim Einbau nicht verwendbar. Ein häufiges Problem war, dass die Bodenfeuchtigkeitssensoren nicht richtig im Wurzelballen platziert werden konnten. Der gesamte Einbau hatte dabei mehrere mögliche Fehlerquellen inne. Beispielsweise war das Bohren mit dem händischen Erdbohrer ungeeignet. Zwar konnte bei allen Bäumen wahrgenommen werden, dass Wurzelballensubstrat am Bohrkopf vorzufinden war, dennoch wurde beim vorzeitigen Ausbau der Sensorik festgestellt, dass einige Sensoren nicht in den Wurzelballen eindringen konnten. Ursächlich hierfür war teilweise ein „Pfropfen“ aus pflanzgrubenumgebendem Material, welcher sich beim Einbau des PVC-Rohrs in dessen vorderen Bereich gesetzt hatte und dem anschließend eingeschobenen Feuchtigkeitssensor den Kontakt zum Wurzelballen verwehrte (siehe Abbildung 19). In einem anderen Fall wurde deutlich, dass die Klebeverbindung zwischen Feuchtigkeitssensor und Gewindestange nicht ausreichend war. Beim Einschub durch das Rohr löste sich die Stange mutmaßlich vom Sensor und wurde ohne ausreichenden Sensorkontakt in den Wurzelballen eingedrückt (siehe Abbildung 20). Wie in 3.5.3 beschrieben, wurden die Bodenfeuchtigkeitssensoren aus diesem Grund bereits vorzeitig entfernt und lediglich ein Sensor für den Nachweis von Wässerungen belassen.

²⁹ Blattinnendruck

³⁰ Maß für Trockenstress in den Pflanzen



Abbildung 19: mit Umgebungssubstrat verstopftes PVC-Rohr
Bildquelle: eigene Aufnahme (05.07.2023)



Abbildung 20: unzureichend fixierte Gewindestange
Bildquelle: eigene Aufnahme (05.07.2023)

Verbessert werden könnte die Bodenfeuchtheitsmessung neben anderen Messmethoden (vgl. 5.1.3) allem voran durch einen sachgemäßen Einbau. Stand der Technik sind hierbei Messungen auf verschiedenen Ebenen (in der Regel in 30cm, 60cm und 90cm Tiefe), in welchen die Sensoren für einen sauberen Bodenschluss und damit eine korrekte Messung häufig eingeschlämmt werden. (UMEG 2002; Borgmann gen. Brüser et al. 2017)

5.2.4 Trockenstressspitzen

Ziel war es, mögliche Unterschiede der beiden Gießmethoden möglichst deutlich darzustellen. Aus diesem Grund wurden die Bäume teilweise einer starken Trockenstresssituation ausgesetzt. Dies führte zu langen Perioden zwischen den Gießdurchgängen und minderte den Stichprobenumfang. Zudem erhöhte es das Risiko von Ausfällen der Untersuchungsbäume.

Um praxisnähere Ergebnisse zu erzielen und den Stichprobenumfang zu erhöhen, wäre es daher von Vorteil gewesen, die Untersuchungen strikt nach FLL-Gießempfehlung durchzuführen. Eine andere Möglichkeit, die allerdings nur für Tübingen geltende Ergebnisse geliefert hätte, wäre gewesen, die Untersuchungen während des Regelbetriebs durchzuführen.

5.2.5 Statistische Auswertung

Für die statistischen Auswertungen kam das Datenanalyse-Tool von Excel oder die Software SPSS in Frage. Da die Rohdaten in Excel vorlagen und auch die weitere Datenaufbereitung darin erfolgte, wurde entschieden, die gesamte statistische Auswertung damit vorzunehmen. Dabei war lediglich zu beachten, dass im Vorfeld eines t-Tests in Excel ein Varianzvergleich mittels Levene-Tests (F-Test) erfolgen muss. Bei SPSS ist dieser Schritt in die Auswertung des t-Tests inkludiert.

Die Berechnung der Konfidenzintervalle wäre im Rahmen der Fragestellung nicht nötig gewesen, wurde aber aufgrund der geringen Aussagekraft der wenigen Stichproben als statistisch sinnvoll erachtet.

5.3 Diskussion der Ergebnisse

5.3.1 Gemessene Daten

Es ist bei allen Bäumen nach der Wassergabe ein Rückgang der Widerstandswerte sowie eine Zunahme der Feuchtigkeit im Baum zu verzeichnen. Die Wässerungen wirken also sowohl beim Gießrand wie auch beim Gießsack entsprechend positiv auf den Baum. Bei allen Bäumen fällt dieser Rückgang in einem ähnlichen Umfang aus. Lediglich die Daten von Baum 6 fallen als leicht positive Ausreißer auf. Ursächlich hierfür könnte möglicherweise der Standort sein. Ahorn Nr. 6 steht als einziger Baum westlich der Steinlach und weist aufgrund eines Freistands mutmaßlich höhere Transpirationsleistungen auf.

Es fällt auf, dass die relativen Unterschiede zwischen den Werten vor und nach dem Gießen im ersten Durchgang bei den mit Gießsäcken ausgestatteten Bäumen etwas höher als die Unterschiede der mit Gießrändern bestückten Bäume sind. Im zweiten Durchgang ist dies umgekehrt. Insgesamt sind die absoluten Werte vor der Wässerung im ersten Durchgang höher als die Werte vor dem Wässern im zweiten Durchgang. Könnte man vermuten, dass eine intensive Bewässerung wie durch den Gießrand bei stärkerem Trockenstress schnell Minderung schafft, so ist es wohl die stetige und durchdringende Bewässerung durch Gießsäcke, die die hohen Widerstandswerte nachhaltig absenkt.

Zeitgleich fällt ein Zusammenhang vom relativen Unterschied zum absoluten Ausgangswert der Messungen im Zeitraum vor dem Gießen auf. Allgemein lässt sich sagen, dass der relative Unterschied von vor zu nach dem Gießen höher ausfällt, je höher der absolute Ausgangswert (Trockenstress) ist. Dies verdeutlicht die Dringlichkeit der Wässerung, zeigt aber auch die Effektivität beider Gießsysteme in trockenen Perioden.

Ohne Vergleichswerte aus ähnlichen Erhebungen ist es schwierig, die relativen Unterschiede einzuordnen und einzuschätzen, ob die Reaktionen der Daten für den vorherrschenden Trockenstress angemessen bzw. arttypisch ausfallen.

Gleichwohl kann man davon ausgehen, dass die Daten plausibel sind, denn je höher die absoluten Ausgangswerte, desto größer ist auch der relative Unterschied.

5.3.2 Statistische Ergebnisse

Da der gemessene Widerstand einige unbestimmte Einflussgrößen hat, wurde im weiteren Verlauf ausschließlich auf den berechneten temperaturbereinigten Widerstand sowie den daraus berechneten Feuchtigkeitsgehalt zurückgegriffen. Diese beiden Werte bilden mögliche Unterschiede in der Wirkungsweise der beiden untersuchten Systeme am genauesten ab.

Auf Grundlage des vorausgegangenen F-Tests zur Überprüfung der Varianzgleichheit mussten für den ersten Durchgang unterschiedliche Varianzen angenommen werden. Für Durchgang 2 und die Kombination aus beiden Durchgängen wurden gleiche Varianzen angenommen. Entsprechend der ermittelten Varianzzusammenhänge ergaben sich für alle durchgeführten Mittelwertvergleiche (t-Tests) keine statistisch signifikanten Unterschiede in der Grundgesamtheit. Es ist also davon auszugehen, dass kein Unterschied in der Wirkungsweise der beiden Gießsysteme besteht.

Dies war aufgrund des geringen Stichprobenumfangs zu erwarten. Die statistischen Ergebnisse sind daher als gering aussagekräftig einzuordnen. Auf Grundlage der gewonnenen Daten wurde daraufhin der benötigte Stichprobenumfang entsprechend der Konfidenzintervalle ermittelt.

Konfidenzintervalle bzw. Vertrauensintervalle geben an, dass der wahre Mittelwert einer Grundgesamtheit – in diesem Fall bei einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$ (5%) - mit 95%iger Sicherheit innerhalb der berechneten unteren und oberen Grenze liegt.

Ein statistisch signifikanter Unterschied besteht nur dann, wenn sich die Intervalle nicht überlappen. Ansonsten könnten die beiden wahren Mittelwerte theoretisch gleich sein. (Scheuber 2020)

Mit einer 95%igen Wahrscheinlichkeit hätten sich die Daten mit den Werten des ersten Durchgangs bei einem Stichprobenumfang von 33 und mehr statistisch signifikant unterschieden. Auf Grundlage der Daten des zweiten Durchgangs wäre dies bei 41 und mehr Stichproben der Fall gewesen.

Bewertet man die dazu entstandenen Liniendiagramme, so fällt auf, dass im ersten Durchgang der wahre Mittelwert der Grundgesamtheit der Gießsack-Bäume ab einem Stichprobenumfang von 33 Stichproben mit 95%iger Sicherheit über dem wahren Mittelwert der Grundgesamtheit der mit Gießrändern ausgestatteten Bäume liegen würde. Demnach könnte auf dieser Datengrundlage und mit entsprechend größerem Stichprobenumfang von einer signifikant besseren Wirkungsweise des Gießsacks ausgegangen werden. Demgegenüber fällt das Verhalten der Konfidenzintervalle im zweiten Durchgang allerdings gegensätzlich aus. Hier liegt der wahre Mittelwert der Gießrand-Daten ab einem Stichprobenumfang von 41 mit 95%iger Wahrscheinlichkeit über dem wahren Mittelwert der Gießsack-Wirkung.

Diese Auffälligkeit hebt sich fast vollständig auf, wenn man die beiden Durchgänge nicht getrennt sondern zusammen betrachtet. Bereits bei den relativen Unterschieden der absoluten Werte fällt auf, dass sich die beiden Gießsysteme kaum unterscheiden. Auf das statistische Niveau gehoben wird dies durch den Hypothesentest (t-Test) bestätigt. Die berechneten Konfidenzintervalle unterstreichen das nochmals. Bezieht man das Ganze auf den erweiterten Stichprobenumfang auf Datenbasis der Kombination beider Durchgänge, so fällt auf, dass die beiden Kurven der Vertrauensintervalle ineinander liegen und selbst bei einer Stichprobenanzahl von $n=10000$ kein signifikanter Unterschied erkennbar wäre.

Da eine derartige Stichprobenanzahl fernab jeder Realität ist, kann auf Grundlage der erhobenen Daten davon ausgegangen werden, dass sich die Gießsysteme nicht signifikant in ihrer Wirkungsweise unterscheiden.

6 Folgerungen

6.1 Hinsichtlich der Zielsetzung der Arbeit

Die Auswertungen der Messdaten lassen keine klare Beantwortung der Ausgangsfrage eines Wirksamkeitsunterschieds der beiden untersuchten Gießsysteme zu. Statistisch konnten im untersuchten Aufnahmerahmen keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Systemen festgestellt werden. Sowohl augenscheinlich wie auch mit Messdaten belegbar erfüllen beide Gießsysteme ihren Zweck. Es konnte sogar eine augenscheinliche Revitalisierung der Untersuchungsbäume nach Trockenstressperioden festgestellt werden. Generell gilt, dass jede Art der Bewässerung besser ist als keine Bewässerung.

6.2 Ausblick und Horizonterweiterung

Man sollte jedoch beachten, dass ein pauschales Bewässern die falsche Herangehensweise ist. Vermutlich noch wichtiger als die richtige Bewässerungsmethode ist die bedarfsgerechte Bewässerung. Während der Wassermangel insbesondere im städtischen Bereich mit höheren Temperaturen, geringen Baumscheiben, verdichteten Böden usw. natürlich einen Großteil der Jungbaum-Problematik ausmacht, kann sich eine falsche und übermäßige Bewässerung im schlimmsten Fall auch ins Negative verkehren. Neben der Verminderung der natürlichen Anpassungsfähigkeit von Gehölzen an trockene Standorte (induzierte Resistenz), kann eine unsachgemäße Bewässerung insbesondere bei verdichteten Baumscheiben zu Staunässe und damit langfristig zu Sauerstoffmangel und absterbenden Wurzeln führen. (Borgmann gen. Brüser et al. 2017) Hinzu kommt, dass der Interessenskonflikt um die Ressource Wasser in Zukunft zunehmen wird und genau überlegt werden muss, für welchen Zweck diese eingesetzt werden soll. Ressourcensparende und effiziente Systeme werden zunehmend an Bedeutung gewinnen. (Weltecke 2020)

In Zukunft wird daher der Anteil messunterstützter und sensorgesteuerter Bewässerung zunehmen. Hierbei kann beispielsweise das System von Treesense Pionierarbeit leisten und bei der Vernetzung und dem Aufbau von Smart Cities helfen. Auch andere dynamische Systeme, die vorzugsweise mit Bodenfeuchtesensorik arbeiten, sind bereits auf dem Markt vorhanden. (Borgmann gen. Brüser et al. 2017)

Hinsichtlich des Klimawandels ist zu beachten, dass die Bedeutung der Bewässerung künftig zunehmen und mitverantwortlich für einen stabilen Baumbestand in der Stadt sein wird. Die beiden untersuchten Gießsysteme stellen dabei relativ einfach einsetzbare, aber effektive Systeme dar. Ziel sollte es sein, die Folgen von Trockenstress abzufedern und zu minimieren. Neben den direkten Trockenstressfolgen sind nämlich vor allem auch die sekundären, indirekten Folgen teilweise von langer Dauer. Aufgrund seiner Prädisposition gilt für den Berg-Ahorn beispielsweise unter Trockenstresseinwirkung ein erhöhtes Risiko für den Ausbruch der Rußrindenkrankheit. Neben erhöhter Totholzentwicklung birgt die Pilzerkrankung bei Kontakt vor allem gesundheitliche Gefahren für Menschen und ist daher im städtischen Bereich unbedingt zu vermeiden. (Grüner et al. 2020)

Man sollte sich allerdings bewusst machen, dass die Optimierung der Bewässerung nur eine Maßnahme für städtische Bäume ist und nicht als Lösung aller Probleme zu verstehen ist. Langfristig muss der innerstädtische Baumbestand zusätzlich klimastabil angepasst werden. Dazu gehört neben der Baumartenwahl, bei welcher die laufend aktualisierte Straßenbaumliste der GALK e.V. eine Hilfestellung liefert, auch der innerstädtische strukturelle Umbau in Richtung baumfreundlicheren Standorten, insbesondere durch eine Optimierung der Ausgestaltung unterirdischer Wurzelräume. (Deutsche Gartenamtsleiterkonferenz - Arbeitskreis "Stadt bäume" April 2021)

6.3 Hinsichtlich weiterer Untersuchungen auf diesem Gebiet

Um spezifische Aussagen hinsichtlich von Wirksamkeitsunterschieden der beiden Gießsysteme machen zu können, bedarf es weitaus umfangreicherer Untersuchungen. Bei Praxisversuchen stellt dies allerdings immer eine große Herausforderung dar, da nicht unter Laborbedingungen gearbeitet werden kann.

Es gilt zu beachten, dass die erhobenen Daten ausschließlich für die untersuchten Bäume gültig sind. Die Untersuchungen haben wenig Aussagekraft für andere Kleinstandorte, möglicherweise sogar für andere Baumarten. Weitere Untersuchungen müssten daher in einem viel größeren Rahmen stattfinden und deutlich mehr Variablen wie Standort, Baumart, möglicherweise sogar unterschiedliche Pflanzgutherkünfte und andere Ausprägungen der Gießsysteme abdecken. Ausreichende Stichprobenanzahlen in praxisnahen Untersuchungen zu erhalten, stellt dabei eine große Herausforderung dar.

Sollen dennoch weitere Untersuchungen bezüglich relevanter Wirksamkeitsunterschiede der Gießsysteme angestellt werden, kann die Untersuchungsmethodik ähnlich übernommen werden. Eine mögliche Vereinfachung wäre es, die Untersuchungen in Baumschulen zu verlegen. Der Einsatz des Sensorikmaterials in der Krone konnte positiv bestätigt werden, lediglich beim Einsatz der Bodensensoren sollte möglicherweise auf andere Messtechnik zurückgegriffen werden. Unausweichlich ist dabei ein anderer Einbau der Bodenfeuchtigkeitssensoren. Interessant könnten diese Daten vor allem hinsichtlich von Aussagen über die Wasserverteilung im Boden und mögliche Zusammenhänge von Bodenfeuchte und Trockenstress im Baum sein.

Man sollte insgesamt aber die hohen Kosten für die Sensorik nicht außer Acht lassen. Ob mögliche festzustellende Unterschiede im Verhältnis zu den eingesetzten finanziellen Mitteln stehen, muss im konkreten Fall überprüft werden.

Von Interesse könnten auch vergleichende Untersuchungen der Wurzel ausprägungen in Abhängigkeit vom jeweiligen Gießsystem sein. Die Ausdehnung des Wurzelsystems in die Breite und vor allem in die Tiefe ist weichenstellend für eine ausreichende natürliche Wasserversorgung der Stadtbäume. Entsprechende zu überprüfende Hypothesen könnten auf Grundlage der Empfehlungen der GALK beispielsweise eine oberflächlichere Ausprägung der Wurzeln bei Gießsackbewässerungen im Vergleich zu Gießrandbewässerungen sein. Eine oberflächennahe Ausprägung der Wurzeln kann im städtischen Klima zu einer erhöhten Trockenstressanfälligkeit führen. (Deutsche Gartenamtsleiterkonferenz - Arbeitskreis "Stadtbäume" April 2021)

6.4 Fazit

Auch wenn die Auswertungen der Daten keine hinreichenden Aussagen bezüglich möglicher Wirksamkeitsunterschiede der beiden Gießsysteme zulassen, leistet diese Bachelorarbeit doch Pionierarbeit im Bereich der Erforschung von Bewässerungssystemen. Sie liefert hierbei Grundlagen und erste Erkenntnisse hinsichtlich der Untersuchungsmethodik, an welche weitere Forschungen zur Abmilderung der Klimawandelfolgen für Stadtbäume anknüpfen können.

Literaturverzeichnis

Aas, Gregor (2009): Bergahorn (*Acer pseudoplatanus*). Verwandtschaft, Verbreitung und Biologie. In: *LWF Wissen* (62), S. 7–12. Online verfügbar unter https://www.lwf.bayern.de/mam/cms04/biodiversitaet/dateien/w62_bergahorn-verwandschaft.pdf, zuletzt geprüft am 23.11.2023.

arboa e.K. tree safety (2024): arboGreenWell™ Gießrand. Online verfügbar unter <https://www.arboa.com/de/arbogreenwell>, zuletzt aktualisiert am 08.01.2024, zuletzt geprüft am 08.01.2024.

baumbad.de (2024): baumbad Premium Bewässerungsbeutel 75L zur Langzeit Baumbewässerung. Online verfügbar unter <https://baumbad.de/collections/shop/products/baumbad-premium-bewasserungsbeutel-75l-zur-langzeit-baum-bewasserung>, zuletzt aktualisiert am 08.01.2024, zuletzt geprüft am 08.01.2024.

Borgmann gen. Brüser, Alexander; Balder, Hartmut; Bergemann, Lars (2017): Jungbäume bedarfsgerecht gießen. Wie die richtige Menge ermitteln? In: *ProBaum* (02/2017), S. 11–16.

Böttner-Langolf, Dirk (2020): Weinbau am Steilhang: Sensoren messen Trockenstress, 07.09.2020. Online verfügbar unter <https://www.digitalisierung-landwirtschaft.de/weinbau-am-steilhang-sensoren-messen-trockenstress/>, zuletzt geprüft am 10.01.2024.

Chandiwala, Aastha (2022): Experimental Validation of Temperature Compensation for Pulse Resistance Measurement in Trees. Bachelor-Thesis. Technische Universität, München.

Deutsche Gartenamtsleiterkonferenz - Arbeitskreis " Stadtbäume " (April 2021): Positionspapier - Konsequenzen der Klimaextreme. Wässerungen des öffentlichen Stadtgrüns.

DIN-Normenausschuss Bauwesen (2022a): DIN 18916:2016-06 "Vegetationstechnik im Landschaftsbau - Pflanzen und Pflanzarbeiten". In: FLL e.V. und DIN e.V. (Hg.): Fokus Baum. Von Pflanzengüte bis Pflege und Ausschreibung. 3. Ausg, S. 41–56.

DIN-Normenausschuss Bauwesen (2022b): DIN 18919:2016-12 "Vegetationstechnik im Landschaftsbau - Instandhaltungsleistungen für die Entwicklung und Unterhaltung von Vegetation (Entwicklungs- und Unterhaltungspflege)". In: FLL e.V. und DIN e.V. (Hg.): Fokus Baum. Von Pflanzengüte bis Pflege und Ausschreibung. 3. Ausg, S. 57–70.

Dragino Technology Co. (2023): LSE01 -- LoRaWAN Soil Moisture & EC Sensor. Online verfügbar unter <https://www.dragino.com/products/lora-lorawan-end-node/item/159-lse01.html>, zuletzt aktualisiert am 21.06.2023, zuletzt geprüft am 08.01.2024.

Duthweiler, Swantje; Pauleit, Stephan; Rötzer, Thomas; Moser, Astrid; Rahman, Mohammad; Stratopoulos, Laura; Zölch, Teresa (2017): Untersuchungen zur Trockenheitsverträglichkeit von Stadtbäumen. In: Dirk Dujesiefken (Hg.): Jahrbuch der Baumpflege 2017. Braunschweig: Haymarket Media, S. 137–154.

Fischer, Gernot (2021): Wie Stadtbäume an Wasser kommen. Bewässerungsstrategien für die Praxis. In: *TASPO Garten-Design* (3/2021), S. 40–46.

FLL e.V. (2022a): Empfehlungen für Baumpflanzungen. Teil 1: Planung, Pflanzarbeiten, Pflege. In: FLL e.V. und DIN e.V. (Hg.): Fokus Baum. Von Pflanzengüte bis Pflege und Ausschreibung. 3. Ausg, S. 181–257.

FLL e.V. (2022b): Empfehlungen für Baumpflanzungen. Teil 2: Standortvorbereitungen für Neupflanzungen; Pflanzgruben und Wurzelraumerweiterung, Bauweisen und Substrate. In: FLL e.V. und DIN e.V. (Hg.): Fokus Baum. Von Pflanzengüte bis Pflege und Ausschreibung. 3. Ausg, S. 259–320.

- FLL e.V. (2022c): Technische Lieferbedingungen für Baumschulpflanzen. Gütebestimmungen. In: FLL e.V. und DIN e.V. (Hg.): Fokus Baum. Von Pflanzengüte bis Pflege und Ausschreibung. 3. Ausg, S. 105–179.
- FLL e.V.; DIN e.V. (Hg.) (2022): Fokus Baum. Von Pflanzengüte bis Pflege und Ausschreibung. Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. - FLL. 3. Ausg.
- Foderá, Giancarlo; Kübler, Julius; Babajić, Semir; Spielvogel, Moritz (2023): LoRaWAN - Treesense. Hg. v. Treesense. Online verfügbar unter <https://www.treesense.net/home/lorawan/>, zuletzt aktualisiert am 06.11.2023, zuletzt geprüft am 06.11.2023.
- Foderá, Giancarlo; Kübler, Julius; Babajić, Semir; Spielvogel, Moritz (2024): Treesense – Making Trees Talk. Hg. v. Treesense. Online verfügbar unter <https://www.treesense.net/>, zuletzt aktualisiert am 08.01.2024, zuletzt geprüft am 08.01.2024.
- Forster, Manuela; Falk, Wolfgang; Reger, Dr. Birgit (2019): Praxishilfe Klima - Boden - Baumartenwahl. November 2020. Online verfügbar unter https://www.lwf.bayern.de/mam/cms04/service/dateien/praxishilfe_baumarten_bf.pdf, zuletzt geprüft am 20.11.2023.
- GALK e.V. (2021): Vorbemerkungen zur GALK-Straßenbaumliste. Beurteilung von Baumarten für die Verwendung im städtischen Straßenraum. Hg. v. Deutsche Gartenamtsleiterkonferenz - Arbeitskreis "Stadtbäume". Online verfügbar unter <https://galk.de/component/jdownloads/send/2-ak-stadtbaeume/84-vorbemerkungen-zur-galk-strassenbaumliste>, zuletzt geprüft am 22.11.2023.
- GALK e.V. (2023): GALK-Straßenbaumliste. Beurteilung von Baumarten für die Verwendung im städtischen Straßenraum. Hg. v. Deutsche Gartenamtsleiterkonferenz - Arbeitskreis "Stadtbäume". Online verfügbar unter <https://galk.de/arbeitskreise/stadtbaeume/themenuebersicht/strassenbaumliste/galk-strassenbaumliste>, zuletzt aktualisiert am 20.11.2023, zuletzt geprüft am 20.11.2023.
- Geologischer Dienst NRW (2023): Nutzbare Feldkapazität. Hg. v. Geologischer Dienst Nordrhein-Wesfalen (Landesbetrieb), zuletzt aktualisiert am 15.12.2023.
- Göhring, Josua (2023): Vitalitätsindexe zur Vitalitätsbeurteilung von Stadtbäumen. Bachelorarbeit. Hochschule für Forstwirtschaft, Rottenburg am Neckar.
- Grüner, Jörg; Berens, Axel; Delb, Horst (2020): Die Ahorn-Rußrindenkrankheit in Südwestdeutschland. Gefahren, Prognosen und Empfehlungen. In: *Waldschutz-Info (FVA)* (02/2020), S. 1–8.
- Jócsák, Ildikó; Végvári, György; Vozáry, Eszter (2019): Electrical impedance measurement on plants: a review with some insights to other fields. In: *Theor. Exp. Plant Physiol.* 31 (3), S. 359–375. DOI: 10.1007/s40626-019-00152-y.
- Kehr, Rolf (2020): Mögliche Folgeschäden von Trockenstress an heimischen Laubgehölzen. Einschätzungen aus Anlass der Dürre der Jahre 2018/19. In: Dirk Dujesiefken (Hg.): *Jahrbuch der Baumpflege 2020*. Braunschweig: Haymarket Media, S. 103–120.
- König, Marvin; Waringer, Gerhard (2023): Vorbesprechungen, Vor-Ort-Besichtigungen, Telefonate, 2023 an Fabian Frank.
- Masson, Rüdiger; Pommnitz, Mark (2023): Überwachung der Bodenfeuchte am Baumstandort. In: *AFZ - Der Wald* (16/2023), S. 12–15.
- Roloff, Andreas (2013): Bäume in der Stadt. Besonderheiten, Funktion, Nutzen, Arten, Risiken. Stuttgart: Ulmer, E. Online verfügbar unter <http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:24-epflicht-1395134>.

- Roloff, Andreas (2019): Photosynthese: Grundlagen und Anwendungsaspekte. In: Andreas Roloff (Hg.): Baumpflege. Baumbiologische Grundlagen und Anwendung. 3., erweiterte Auflage. Stuttgart: Verlag Eugen Ulmer, S. 59–65.
- Roloff, Andreas; Grundmann, Britt; Korn, Sandra (2013): Trockenstress-Toleranz bei Stadtbäumen. Anpassungs- und Schutzstrategien / Arteignung. In: Dirk Dujesiefken (Hg.): Jahrbuch der Baumpflege 2013. Braunschweig: Haymarket Media, S. 173–185.
- Roth-Kleyer, Stephan (2016): Bewässerung im Garten- und Landschaftsbau. Stuttgart: Verlag Eugen Ulmer (Fachbibliothek Grün). Online verfügbar unter <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=6968154>.
- Ruge, Stefan (2022): Baumarten Mitteleuropas und die wichtigsten eingeführten Baumarten. Skript. Hochschule für Forstwirtschaft, Rottenburg am Neckar.
- Ruge, Stefan (2023): Botanik und Einführung in die Ökologie. Skript. Hochschule für Forstwirtschaft, Rottenburg am Neckar.
- Rust, Steffen (2019a): Stress bei Bäumen. In: Andreas Roloff (Hg.): Baumpflege. Baumbiologische Grundlagen und Anwendung. 3., erweiterte Auflage. Stuttgart: Verlag Eugen Ulmer, S. 76–85.
- Rust, Steffen (2019b): Wasserhaushalt der Bäume. In: Andreas Roloff (Hg.): Baumpflege. Baumbiologische Grundlagen und Anwendung. 3., erweiterte Auflage. Stuttgart: Verlag Eugen Ulmer, S. 66–76.
- Schellhase, Anna (2023): Boden ist zu trocken. In: *Lorenz von Ehren*, 12.06.2023. Online verfügbar unter <https://www.lve-baumschule.de/wissen/gruene-infos/boden-ist-zu-trocken/>, zuletzt geprüft am 12.01.2024.
- Scheuber, Matthias (2020): Statistik. Skript. Hochschule für Forstwirtschaft, Rottenburg am Neckar.
- Schneidewind, Axel (2020): Vorstellung verschiedener Bewässerungsmethoden für Bäume. In: Dirk Dujesiefken (Hg.): Jahrbuch der Baumpflege 2020. Braunschweig: Haymarket Media, S. 121–132.
- Schönfeld, Dr. Philipp (2015): Der Feldahorn und seine Sorten in der Stadt. In: *LWF Wissen* (77), S. 54–59. Online verfügbar unter https://www.lwf.bayern.de/mam/cms04/boden-klima/dateien/w77_der_feldahorn_und_seine_sorten_in_der_stadt_bf_gesch.pdf, zuletzt geprüft am 22.11.2023.
- Schutzgemeinschaft Deutscher Wald e.V. (2022): Steckbrief Ahorn. In: *Der Wald, seine Bäume und Sträucher*, S. 12–13. Online verfügbar unter https://rp.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/RP-Internet/Freiburg/Abteilung_8/Referat_81/FAZ_Mattenhof/Baumartenbestimmung_-_Steckbriefe/AHORN_SDW-Steckbrief.pdf, zuletzt geprüft am 23.11.2023.
- Senatsverwaltung für Mobilität, Verkehr, Klimaschutz und Umwelt Berlin (2022): Stadtbäume - Bestand nach Hauptbaumgattungen. Bestand nach Gattungen mit einem Anteil von >0,75%. Online verfügbar unter <https://www.berlin.de/sen/uvk/natur-und-gruen/stadtgruen/daten-und-fakten/stadtbaeume/#Hauptbaumgattungen>, zuletzt aktualisiert am 18.10.2023, zuletzt geprüft am 23.11.2023.
- Spielvogel, Moritz; Kübler, Julius (2023): Telefonate und Web-Meetings 22.03.2023; 19.06.2023; 25.09.2023, 25.09.2023 an Fabian Frank.
- Thon, Andreas; Kohl, Kerstin; Schriefer, Lennart; Stein, Simon-Johannes (2023): Im Vergleich: Bodenfeuchtesensoren für Bewässerung. In: *Neue Landschaft: Fachzeitschrift für Garten-, Landschafts-, Spiel- und Sportplatzbau* (5/2023), S. 23–27.
- UMEG (2002): Bodenfeuchtemessung.

Weltecke, Katharina (2020): Bäume richtig wässern mit Blick auf zunehmende Trockenheitsperioden. In: Dirk Dujesiefken (Hg.): Jahrbuch der Baumpflege 2020. Braunschweig: Haymarket Media, S. 195–212.

Wessolly, Lothar (2023): Telefonate und E-Mail-Schriftverkehr, 2023 an Fabian Frank.

Wessolly, Lothar; Erb, Martin (2014): Handbuch der Baumstatik und Baumkontrolle. [Neuausg.]. Berlin, Hannover: Patzer.

Wieland, Lorenz (2023): Wasser aus dem Sack. In: *TASPO Baumzeitung* (03/2023), S. 50–54.

Yue, Xiaoquan; Wang, Lihai; Shi, Xiaolong; Xu, Mingxian; Zhu, Zhiming (2018): Investigations on the Effects of Seasonal Temperature Changes on the Electrical Resistance of Living Trees. In: *Forests* 9 (9), S. 550. DOI: 10.3390/f9090550.

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe.

Fabian Frank

Schwarenbegstraße 143

70184 Stuttgart

Rottenburg am Neckar, den 15.01.2024

Anhang

Pflanzliste der Stadtgärtnerei Tübingen (Stand Mai 2023):

Pflanzliste 2023

	Standort	Baumart	Größe	Stück	Datum
1	Herrenbergerstr.	Acer campestre "Elsrijk"	18-20	3	08.05.23
2	Sportplatz Bismarkstr.	Acer pseudoplatanus	18-20	1	
3	Galgenberg	Acer pseudoplatanus	18-20	2	08.05.23
4	Provence Weg	Juglans regia "Geisenheim"	18-20	2	11.05.23
5	Feuerhügge	Nektarine	Halbst.	1	08.05.23
6	Panzerhalle	Tilia cordata "Greenspire"	18-20	1	11.05.23
7	Philosophenweg 35	Acer platanoides	18-20	1	11.05.23
8	Brunnenstr.	Betula pendula	16-18	1	
9	Hirschau, Hauptstr.	Tilia tomentosa "Brabant"	18-20	1	
10	Wöhrdstr.	Magnolia Kobus	18-20	1	
11	Unterjesingen; Bei den Linden	Tilia cordata "Greenspire"	18-20	2	
12	Stuttgarter Str.	Platanus x acerifolia	18-20	1	11.05.23
13	Bühl Rathaus	Lyquidambar styraciflua	18-20	1	11.05.23
14	Rosa - Luxemburg - Str.	Magnolia x soulangeana	150-175	1	11.05.23
15	Ammergasse	Magnolia Kobus "Isis"	18-20	5	04.05.23
16	Krumme Brücke	Parrotia persica	18-20	2	05.05.23
17	Bühlheim / Spielplatz Pumpstation	Begonia virginica "Geisenheim"	18-20	3	05.05.23
18	Hirschau/Tennisplätze	Ulmus "Sapporo Autumn Gold"	18-20	5	08.05.23
19	Hirschau /Tennisplätze	Acer campestre "Elsrijk"	18-20	3	08.05.23
20	Pfrondorf, Gechtstr.47	Lyquidambar styraciflua	16-18	1	
21	Pfrondorf, Gechtstr.15	Pyrus communis	16-18	1	
22	Stadthalle	Acer pseudo-platanus	18-20	6	08.05.23
23	Nordring / Hartwegstr.	Parrotia persica	18-20	1	11.05.23

Verwendetes Containersubstrat der Baumschule Hortense Pflanzenvertriebs GmbH:



Containersubstrat 2

grob

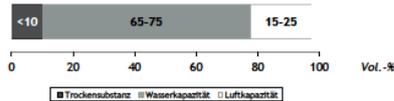
Zusammensetzung: Rez. 250



Struktur:
grobfaserig (0 - 45 mm)

Chemische Eigenschaften:	Nährstoffe:	
(nach VDLUFA)		
pH-Wert (CaCl ₂ , v/v 1:2,5):	5,2	Stickstoff (mg N/l): 210
Salzgehalt (g/l als KCl):	1,5	Phosphor (mg P ₂ O ₅ /l): 150
+ extra Spurenelementdünger		Kalium (mg K ₂ O/l): 270
		Magnesium (mg Mg/l): 100
		mit allen Spurenelementen
		Eisen als EDTA Chelat

Physikalische Eigenschaften:
(nach EN 13 041)



Topfgröße:	Hinweise:	Kulturen:
> 2 L	Strukturstabiles Containersubstrat mit extra Faseranteil und zusätzlicher Bevorratung mit Spurenelementen.	Laubgehölze Koniferen Containerstauden

Gernie weisen wir auch den CO₂-Fußabdruck dieses Produktes aus. Schicken Sie uns eine E-Mail mit Auftrags- und Rezepturnummer an pcf@klasmann-deilmann.com. Mehr unter www.klasmann-deilmann.com/nachhaltigkeit.

Schwerkmetalle gemäß den Richtlinien der Gütegemeinschaft Substrate für Pflanzenbau e.V.
Alle von uns überlassenen Produktinformationen haben wir nach bestem Wissen und Gewissen erstellt. Unsere Informationen erheben daher keinen Anspruch auf Vollständigkeit und Fortdauer bzw. gleichzeitige Richtigkeit. Insbesondere behalten wir uns Änderungen vor. Jegliche Anwendungs- bzw. Gebrauchsanweisungen unsererseits sind als unverbindliche Leitlinien zu verstehen und müssen an die örtlichen und einschlägigen Gegebenheiten angepasst werden. Bitte beachten Sie auch die Hinweise auf dem Lieferzettel.

www.klasmann-deilmann.com

01/2023