

AUSWIRKUNG VON TIEFEN BODENINJEKTIONEN AUF URBAN-BÄUME

SAURABH SHAILESH PATIL

s5325781

MASTER OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING AND POLLUTION CONTROL

Betreuer - Dr. Ruby Michael

Assistenzbetreuer - Anna Petrova

Industriebetreuer - Katia Plouznikoff

Eingereicht in teilweiser Erfüllung der Anforderungen für den Abschluss des

Master of Environmental Engineering and Pollution Control

Fakultät für Ingenieurwesen und gebaute Umwelt Griffith

Universität

Oktober 2024

Abstrakt

In dieser Studie wird untersucht, wie tiefe Bodeninjektionen die Gesundheit und die Bodenbedingungen von Stadtbäumen an der Gold Coast in Queensland über einen Zeitraum von vier Monaten von [Juli] bis [November] beeinflussen. Anhand junger *Brachychiton*-Bäume und ausgewachsener *Buckinghamia*-Bäume untersucht, wie sich Bodenverbesserungen auf die Gesundheit von Bäumen in verdichteten Stadtböden mit Nährstoffmangel, begrenztem Wurzelraum und schlechter Wasserrückhaltung auswirken.

Die Daten wurden an zwei Standorten erhoben: Cotlew Street East und Usher Avenue, wo behandelte und unbehandelte Bäume beobachtet wurden. Wichtige Bodenvariablen wie Bodenverdichtung, Feuchtigkeitsgehalt, pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit (EC) und organische Substanz wurden zusammen mit dem Chlorophyllgehalt zur Beurteilung der Baumgesundheit bewertet. Um Konsistenz und Zuverlässigkeit zu gewährleisten, wurden die Bodenproben mit standardisierten Labortechniken analysiert.

Die Ergebnisse zeigten statistisch signifikante Veränderungen der Bodenbedingungen bei den behandelten Bäumen im Vergleich zu den Kontrollen, insbesondere bei der Bodenfeuchtigkeit und der elektrischen Leitfähigkeit. Während tiefe Bodeninjektionen die Bodengesundheit insgesamt zu verbessern schienen, variierte das Ausmaß der Verbesserung zwischen jungen und alten Bäumen, was altersbedingte Veränderungen in der Reaktion auf Bodenverbesserungen zeigt. Die Ergebnisse geben Aufschluss über die Wirksamkeit tiefer Bodeninjektionen als Technik zur Verbesserung der Widerstandsfähigkeit von Stadtbäumen und haben möglicherweise Auswirkungen auf die nachhaltige städtische Forstwirtschaft. Diese Forschungsarbeit soll als Grundlage für die künftige Bewirtschaftung von Stadtbäumen dienen und zu grüneren, widerstandsfähigeren Städten angesichts der Urbanisierung führen.

Inhaltsübersicht

Abstrakt	2
Inhaltsübersicht	3
Liste der Abbildungen	5
Erklärung zur ursprünglichen Urheberschaft	6
Danksagung	7
1. Einführung	8
1.1 Hintergrund	8
1.2 Herausforderungen für Stadtbäume	9
1.3 Bodenverdichtung und ihre Auswirkungen auf die Baumgesundheit	11
1.4 EC und pH in städtischen Umgebungen	12
1.5 Chlorophyllgehalt als Indikator für die Baumgesundheit	12
1.6 Organische Substanz im Boden und mikrobielle Aktivität	13
1.7 Tiefe Bodeninjektion als Lösung	14
1.8 Forschungsziel und Ziele	15
1.9 Forschungsfragen und Hypothesen	15
1.10 Bedeutung der Studie	15
2. Methodik	17
2.1 Untersuchungsgebiet und Standortwahl	17
2.2 Forschungsdesign	21
2.3 Tiefe Bodeninjektion	22
2.4 Datenerhebung und Messung	23
2.5 Laboranalyse	24
2.6 Analyse der Daten	25
3. Ergebnisse	26
3.1 Chlorophyll	26
3.2 Verdichtung des Bodens	26
3.3 pH-Wert	27
3.4 EC	28
3.5 Feuchtigkeit des Bodens	28
3.6 Organisches Material	29
3.7 Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse	30
3.7.1 Chlorophyllgehalt	30
3.7.2 Bodenverdichtung	30

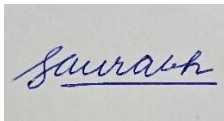
3.7.3 pH-Wert	30
3.7.4. EC	31
3.7.5 Feuchtigkeit des Bodens	32
3.7.6 Organisches Material	32
4. Diskussion	34
4.1 Auswertung der Ergebnisse.....	34
4.1.1 Chlorophyll	34
4.1.2 Verdichtung	35
4.1.3 pH-Wert	35
4.1.4 EC	36
4.1.5 Feuchtigkeit des Bodens	36
4.1.6 Organisches Material	37
4.2 Auswirkungen auf die städtische Forstwirtschaft	38
4.3 Beschränkungen der Studie.....	39
4.4 Künftige Arbeit	40
5. Schlussfolgerung.....	42
6. Referenzen	43
7. Anhänge	48

Liste der Figuren

Abbildung 1 Die Temperaturschwankungen an verschiedenen Orten, die durch das UHI entstehen.....	8
Abbildung 2 Auswirkung von städtischem Stress auf Bäume	10
Abbildung 3 Cotlew Street East	18
Abbildung 4 Brachychiton-Baum	18
Abbildung 5 Usher Avenue.....	20
Abbildung 6 Buckinghamia-Baum.....	20
Abbildung 7 Behandlungsplan für Cotlew Street East.....	21
Abbildung 8 Behandlungsplan für die Usher Avenue.....	21
Abbildung 9 VOGT geo injector	22
Abbildung 10 pH-Wert des Bodens	31

Erklärung zur ursprünglichen Urheberschaft

Diese Dissertation enthält eine Arbeit, die bisher noch nicht eingereicht wurde, um die Anforderungen für eine Auszeichnung an dieser oder einer anderen Hochschuleinrichtung zu erfüllen. Nach meinem besten Wissen und Gewissen enthält die Arbeit keine zuvor veröffentlichten oder geschriebenen Inhalte, es sei denn, es werden entsprechende Referenzen angegeben.



Unterschrift:

Datum: 31/11/2024

Danksagung

Ich möchte meiner Betreuerin, Dr. Ruby Michael, meinen aufrichtigen Dank für ihre wesentliche Anleitung, Weisheit und unerschütterliche Unterstützung während dieses Forschungsprojekts aussprechen. Ihre Anleitung war von unschätzbarem Wert für die Gestaltung meines Projekts und hat mich dazu inspiriert, nach den höchsten Standards zu streben.

Mein aufrichtiger Dank gilt meiner Betreuerin Anna Petrova für ihre ständige Unterstützung, ihren wertvollen Beitrag und ihr Engagement für dieses Projekt. Ihre Gedanken haben meine Arbeit erheblich verbessert und mich in schwierigen Momenten motiviert.

Ich bin auch meiner Betreuerin in der Industrie, Katia Plouznikoff, sehr dankbar, deren praktisches Wissen und beharrliche Unterstützung die Grundlage für dieses Projekt bildeten. Katias Ideen aus der Praxis haben dazu beigetragen, die akademische und die industrielle Seite meiner Arbeit zu verbinden und ihr Tiefe und Bedeutung zu verleihen.

Ein besonderer Dank geht an das technische Personal, insbesondere an Joshua Turner und James Lin, deren fachkundige Unterstützung und Engagement für die Durchführung der Experimente und die Erzielung genauer Ergebnisse entscheidend waren. Ihre harte Arbeit, ihre Aufmerksamkeit für Details und ihre Bereitschaft, mir in jeder Phase zu helfen, sind sehr zu schätzen. Mein Dank gilt auch Chunhao Lyu für seine technische Unterstützung und seine Beiträge zu diesem Projekt.

Ich danke Ihnen für Ihre unerschütterliche Unterstützung, Ihre Weisheit und Ihre Ermutigung während dieser Reise. Diese Arbeit wäre ohne Sie alle nicht machbar gewesen.

1. Einführung

1.1 Hintergrund

Stadtbäume leisten einen sehr wichtigen Beitrag zum Ökosystem der Stadt und bieten eine Reihe von ökologischen, wirtschaftlichen und gesundheitlichen Vorteilen. Diese Vorteile nehmen angesichts der Herausforderungen der Urbanisierung und des Klimawandels eine immer wichtigere Nische ein. Inmitten dichter Bebauung und umfangreicher Infrastruktur wird die Temperatur infolge des Urban-Heat-Island-Effekts (Hayes et al., 2022) um einiges höher sein als in der benachbarten ländlichen Region (Soltani & Sharifi, 2017). Irfeey et al. (2023) führen den Temperaturanstieg auf die vorherrschenden Beton- und Asphaltflächen, begrenzte Grünflächen und die Wärme von Autos und Gebäuden zurück. Laut McPherson et al. (2017) ist UHI ein ungünstiger Trend, der die Lebensqualität in Städten durch erhöhten Energiebedarf, hohe Emissionen und schwerwiegende gesundheitliche Auswirkungen beeinträchtigt. Grüne Infrastrukturen, insbesondere Stadtbäume, mildern diese Auswirkungen ab, indem sie Schatten spenden, die Oberflächentemperatur kühlen und die Luftqualität verbessern. (Liang & Huang, 2023).

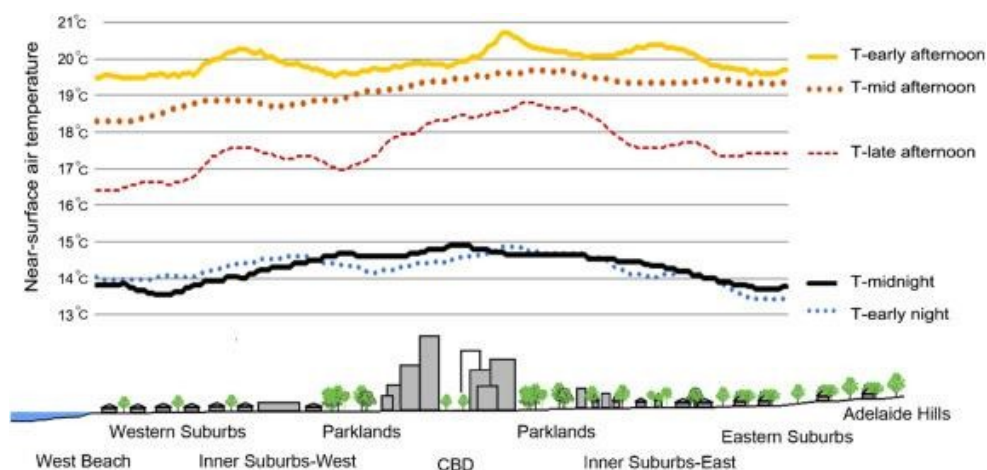


Abbildung 1 Die Temperaturschwankungen an verschiedenen Orten, die durch das UHI entstehen

Der UHI-Effekt spiegelt sich in dieser Grafik wider, die zeigt, dass, zu denen auch das Stadtzentrum gehört, höhere oberflächennahe Lufttemperaturen aufweisen als Parklandschaften und Vorstadtgebiete, insbesondere am Nachmittag. Dieser Temperaturunterschied ist tagsüber größer und nachts viel geringer; Ballungsräume kühlen nur sehr langsam ab und halten daher mehr Wärme zurück (Soltani & Sharifi, 2017).

Stadtbäume haben jedoch auch eine Reihe von Problemen. Schlechtes Wurzelwachstum, Bodenverdichtung, Wasser- und Nährstoffmangel und Verschmutzung sind einige der Hauptgründe für ihr

schlechtes Wachstum und schlechte Gesundheit. So sind die Böden in der Umgebung städtischer Gebiete in der Regel durch ein geringes Maß an Porosität, organischer Substanz und struktureller Integrität gekennzeichnet, was sich auf die potenzielle Wasserspeicherkapazität und Nährstoffaufnahme der Pflanzen auswirkt (Czaja et al., 2020). Stadtbäume sind auch Schadstoffen, die sich auf den Blättern und der Rinde der Bäume konzentrieren und ihr Wachstum und ihre Langlebigkeit beeinträchtigen. Sie verbessern auch die städtischen Ökosysteme und Gemeinschaften, indem sie den Lärm senken, die Luft reinigen und die psychische Gesundheit der Bewohner stärken (Wolf et al., 2020).

Eine gesunde Struktur des städtischen Waldes ist für eine nachhaltige Stadt von entscheidender Bedeutung, insbesondere als Reaktion auf den Klimawandel. Wenn geeignete Maßnahmen zur Pflege der Bäume ergriffen würden, könnten die Baumpfleger die Gesundheit der Bäume verbessern und die ökologischen und sozialen Vorteile von Stadtbäumen optimieren, um grünere und gesündere Stadtlandschaften zu schaffen.

1.2 Herausforderungen Stadtbäume

Zu den verschiedenen Belastungen, denen diese Bäume in der Stadt ausgesetzt sind, gehören verdichtete Böden, eingeschränkter Wurzelraum, Umweltverschmutzung, Hitzestress durch den städtischen Wärmeinseleffekt, begrenzte Wasserversorgung und Böden mit Nährstoffmangel. Die rasche Verstädterung verwandelt natürliche Landschaften in veränderte Landschaften mit veränderten Böden und zusätzlichen Stressfaktoren, die die Gesundheit und Haltbarkeit der Bäume in Frage stellen. Laut Czaja et al. (2020) hindern Belastungen wie begrenztes Bodenvolumen, Verdichtung, Verschmutzung und Umweltveränderungen die Bäume daran, sich optimal zu entwickeln und zu überleben. Die Verdichtung des Bodens ist eines der bekannten städtischen Übel, das das Wurzelwachstum beeinträchtigt und damit das Potenzial der Bäume verringert, sich mit ausreichend Wasser und Nährstoffen zu versorgen, um sich erfolgreich entwickeln und verschiedene Ökosystemfunktionen erfüllen zu können (Liang & Huang, 2023).



Abbildung 2 Auswirkung von städtischem Stress auf Bäume

Junge Brachychiton-Bäume verlieren ihre Blätter als Reaktion auf Stress, was in städtischen Gebieten mit verdichteten Böden und begrenztem Wurzelraum für das Wachstum typisch ist. Während Brachychiton-Bäume ihre Blätter normalerweise von Oktober bis Dezember verlieren, deutet das obige Bild, das im Juli-August aufgenommen wurde, darauf hin, dass der Blattverlust eher durch Umweltstress als durch saisonalen Abwurf verursacht wird.

Darüber hinaus sind Stadtbäume häufig hohen Mengen an Luftschadstoffen wie Feinstaub, Schwefeldioxid und Stickoxiden ausgesetzt, die sich in ihren Blättern und Wurzeln ablagern, ihre Gesundheit gefährden und ihre Fähigkeit, die Luft wirksam zu filtern, einschränken. Die Schadstoffanreicherung in den Blättern von Bäumen kann ein Hinweis auf ihre Widerstandsfähigkeit gegenüber städtischem Stress sein (Simon et al., 2021). Die Auswirkungen der UHI stellen eine zusätzliche Belastung dar. In städtischen Umgebungen gibt es große Mengen an Beton und Asphalt, die mehr Wärme absorbieren und abstrahlen als Grünflächen, wodurch die Oberflächentemperaturen steigen. Bäume können den Hitzestress lindern, indem sie Schatten spenden und die Verdunstung fördern, aber ihre Wirksamkeit ist geringer, wenn sie selbst unter Hitzestress stehen. (Irfeey et al., 2023).

Physikalische Schäden, die durch menschliche Aktivitäten verursacht werden, wie z. B. Fahrzeugaufprall und Bauarbeiten, verkürzen die Lebensdauer von Stadtbäumen und erhöhen die Kosten für die Bewirtschaftung. Laut McPherson et al. (2017) können Stadtbäume eine um 50 % geringere Lebenserwartung haben als Bäume in ländlichen Gebieten. Das Bedürfnis nach ästhetischem Wert kann dazu führen, dass Baumarten bevorzugt werden, die für städtische Umgebungen nicht gut geeignet sind, was die Langlebigkeit und Ausdauer der Bäume verringert (Wolf et al., 2020). Diese

Diese Bedingungen unterstreichen die Notwendigkeit, Stadtbaumarten auszuwählen und zu pflegen, die dem Stress standhalten und gleichzeitig zu einer nachhaltigen Stadtentwicklung beitragen. Wasserstress ist ein weiteres großes Problem für Stadtbäume. Harte Oberflächen in Städten behindern die natürliche Versickerung von Regenwasser, was je nach vorhandener Entwässerungsinfrastruktur zu Staunässe oder Trockenheit führt (Rolf et al., 2020). Bäume in trockenheitsanfälligen städtischen Umgebungen sind anfälliger für Hitzestress, Insektenbefall und Krankheitsausbrüche (Liang & Huang, 2023). Diese kombinierten Belastungen verkürzen die Lebenserwartung von Stadtbäumen im Vergleich zu Bäumen in ländlichen oder bewaldeten Gebieten drastisch.

1.3 Bodenverdichtung und ihre Auswirkungen auf die Baumgesundheit

Bodenverdichtung ist ein häufiges Problem in städtischen Gebieten, das sich negativ auf die Gesundheit von Bäumen auswirkt, indem es die Bodenstruktur verändert und die lebenswichtige Versorgung einschränkt. Die Verdichtung erhöht die Schüttdichte des Bodens und verringert gleichzeitig die Makroporen, wodurch die Fähigkeit des Bodens, Wasser, Nährstoffe und Sauerstoff zu halten und an die Wurzelzone weiterzuleiten, eingeschränkt wird. Verdichtete Böden schränken das Wurzelwachstum ein und machen es den Bäumen schwer, tiefe und ausgedehnte Wurzelsysteme zu bilden (Crawl, 1994; Moore et al., 2019).

Wurzeln in verdichteten Böden werden im Allgemeinen dazu gedrängt, sich in flachen, seitlichen Mustern zu entwickeln, anstatt vertikal. Flache Wurzeln machen Bäume anfälliger für Trockenheit und Instabilität, da sie keinen Zugang zu tieferen Bodenschichten haben, die zusätzliche Feuchtigkeit und Nährstoffe enthalten (Saidan, 2024). Ein geringeres Wurzelwachstum behindert die Nährstoffaufnahme, was zu schlechtem Wachstum, geringerer Baumkronendichte und größerer Anfälligkeit für Krankheiten und Schädlinge führt (Crawl, 1994).

Verdichtete Böden beeinträchtigen auch die mikrobiellen Populationen, die für den Nährstoffkreislauf und die Zersetzung organischer Stoffe notwendig sind. Eine eingeschränkte mikrobielle Vielfalt und Aktivität in verdichteten Böden verringert die Verfügbarkeit von Stickstoff, Phosphor und anderen wichtigen Nährstoffen, was den Stress der Bäume erhöht und ihre Widerstandsfähigkeit gegenüber Umweltstressoren verringert. Diese Veränderung des Bodenmikrobioms wirkt sich sowohl auf das kurzfristige Wachstum als auch auf die langfristige Gesundheit aus, da mikrobielle Interaktionen für die Gesundheit und Struktur des Bodens entscheidend sind (Nawaz et al., 2013; Coder et al., 2007).

Die Verringerung der Bodenverdichtung ist für die Gesundheit der Stadtbäume von entscheidender Bedeutung. Tiefeninjektionstechniken, bei denen Wasser, Nährstoffe und Bodenverbesserungsmittel direkt in die Wurzelzone geleitet werden, ohne die verdichteten oberen Schichten zu durchdringen, haben sich als vielversprechend erwiesen, wenn es um die Verbesserung der Bodenstruktur und der Baumgesundheit geht. Crawl (1994) unterstreicht die Bedeutung der Korrektur der Bodenverdichtung in der städtischen Forstwirtschaft, da sie die Belüftung, das Wurzelwachstum und die Gesundheit des mikrobiellen Ökosystems verbessert.

1.4 EC und pH in städtischen Umgebungen

Der pH-Wert und die elektrische Leitfähigkeit (EC) des Bodens sind wichtige Indikatoren für die Gesundheit des Bodens in Ballungsgebieten, in denen menschliche Aktivitäten häufig die natürlichen Bodenbedingungen stören. Der pH-Wert des Bodens beeinflusst die Nährstoffverfügbarkeit, wobei die optimale Entwicklung von Bäumen oft in einem pH-Bereich von

5,5 bis 7,5. Außerhalb dieses Bereichs wichtige Nährstoffe wie Stickstoff und Phosphor weniger verfügbar, was die Entwicklung verlangsamen und die Bäume schwächen kann. Städtische Böden neigen aufgrund von alkalischen Materialien aus dem Bauwesen und der Verschmutzung zu höheren pH-Werten, was die Nährstoffaufnahme und die mikrobielle Aktivität beeinträchtigt (Husson et al., 2021).

Die elektrische Leitfähigkeit (EC) des Bodens ist ein Maß für die Konzentration löslicher Salze, die sich in Ballungsgebieten aus Quellen wie Streusalz, Industrieabwässern und Düngemitteln ansammeln. Erhöhte EC-Werte fördern den osmotischen Stress der Baumwurzeln, was zu Austrocknung und Nährstoffungleichgewicht führt (Msimbira & Smith, 2020). Ein übermäßiger Salzgehalt kann auch Blattverbrennungen verursachen und die Photosynthese verringern, was die Gesundheit und Toleranz der Bäume beeinträchtigt.

Die Kontrolle und Überwachung der EC- und pH-Werte in städtischen Böden ist für die Unterstützung städtischer Forstwirtschaftsprojekte von entscheidender Bedeutung. Kompost zum Beispiel erhöht die mikrobielle Aktivität und den Gehalt an organischer Substanz, was dazu beiträgt, übermäßige pH-Schwankungen abzufedern und die Nährstoffbindung zu verbessern. Organisches Mulchen kann die Oberflächenversalzung verringern und die Wasserinfiltration verbessern, was zu einer gesünderen Bodenstruktur und einem besseren Wurzelwachstum führt (Rakshit et al., 2022).

Insgesamt ist die Aufrechterhaltung angemessener EC- und pH-Werte in städtischen Böden für die Erhaltung des städtischen Baumbestands von entscheidender Bedeutung. Die Verantwortlichen für die städtische Forstwirtschaft können die langfristige Entwicklung von Bäumen fördern und die ökologischen Vorteile von Bäumen in städtischen Gebieten maximieren, indem sie diese Variablen genau überwachen.

1.5 Chlorophyllgehalt als Indikator für die Baumgesundheit

Die Chlorophyllkonzentration ist ein wichtiger Indikator für die Pflanzengesundheit, da sie direkt mit der Photosynthese und dem allgemeinen physiologischen Zustand der Bäume zusammenhängt. Chlorophyll hilft bei der Umwandlung von Sonnenlicht in chemische Energie und fördert das Wachstum und die Biomasseproduktion (Talebzadeh & Valeo, 2022). Die Empfindlichkeit dieses Pigments gegenüber Umweltbedingungen, einschließlich Licht, Wasser und Nährstoffverfügbarkeit, macht es zu einem zuverlässigen Indikator für die Bewertung der Vitalität von Bäumen in städtischen Umgebungen mit Verschmutzung, verdichteten Böden und begrenztem Zugang zu Wasser (Zhang et al., 2022).

Umweltverschmutzung, Trockenheit, Nährstoffmangel und extreme Temperaturen sind alles Beispiele für Umweltbedingungen, die zu einem Rückgang des Chlorophyllgehalts führen können. Schadstoffe wie Schwefeldioxid und Stickstoffdioxid können Chlorophyll abbauen, indem sie die Synthese stören und den Säuregehalt des Blattes erhöhen, was zu einer Schädigung der Moleküle führt (Giri et al., 2013). Ein verringerter Chlorophyllgehalt deutet in der Regel auf eine geringere photosynthetische Effizienz hin, da das Blatt weniger in der Lage ist, Sonnenlicht zur Energieumwandlung zu absorbieren. Ein Rückgang der Chlorophyllkonzentration kann offensichtlichen Anzeichen von Stress, wie z. B. vergilbten Blättern, vorausgehen und ist somit ein Frühindikator für die Überwachung der Baumgesundheit.

Moderne Chlorophyllmessgeräte wie das atLEAF- und das SPAD-Gerät haben sich in der Forst- und Landwirtschaft für die zerstörungsfreie Chlorophyllbestimmung als nützlich erwiesen. Diese Geräte emittieren bestimmte Lichtwellenlängen (z. B. 640-650 nm für Rot und ca. 940 nm für Infrarot beim atLEAF), die von Chlorophyll in unterschiedlichem Maße absorbiert werden. Das Gerät vergleicht die Lichtabsorption bei verschiedenen Wellenlängen, um die Chlorophyllkonzentration und den Gesundheitszustand der Bäume zu bestimmen (Ali et al., 2021). Chlorophyllmessgeräte sind tragbar und einfach zu bedienen und ermöglichen eine häufige Überwachung und schnelle Reaktionen auf Umweltstress. Sie tragen auch zu einer nachhaltigen Waldbewirtschaftung bei, indem sie gesunde städtische Baumkronen erhalten.

1.6 Organische Substanz im Boden und mikrobielle Aktivität

Die organische Bodensubstanz (SOM) und die mikrobielle Aktivität spielen eine Schlüsselrolle bei der Bestimmung der Bodengesundheit, der Fruchtbarkeit und des Pflanzenwachstums sowohl in städtischen als auch in natürlichen Lebensräumen. Nach Rakshit et al. (2022) dient SOM als Nährstoffreservoir für Pflanzen und fördert mikrobielle Gemeinschaften, die die Bodenstruktur und die Wasserrückhaltung verbessern. Die mikrobielle Aktivität, die das Verhalten von Bakterien, Pilzen und anderen Organismen umfasst, ist entscheidend für die Zersetzung organischer Stoffe, den Nährstoffkreislauf und die Widerstandsfähigkeit des Bodens gegenüber Umweltstressfaktoren. Mikrobielle Interaktionen in städtischen Böden sind entscheidend für die Erhaltung der Pflanzengesundheit und der Bodenqualität, insbesondere bei normalen Störungen (Husson et al., 2021).

Aktive mikrobielle Gemeinschaften verbessern die Bodenstruktur und -fruchtbarkeit, indem sie im Laufe der Zeit langsam Nährstoffe freisetzen (Msimbira & Smith, 2020). Diese Methode verbessert auch die Wasserinfiltration und -rückhaltung, was das Wachstum von Stadtpflanzen in verdichteten, nährstoffarmen Böden fördert. Darüber hinaus ist die mikrobielle Vielfalt für die Krankheitsbekämpfung und Stresstoleranz von wesentlicher Bedeutung und ermöglicht es den Pflanzen, Hindernisse wie pH-Veränderungen und Schadstoffe zu tolerieren. Nachhaltige Bewirtschaftung von SOM

Ansätze zur Verbesserung der Bodenfunktionen bei gleichzeitiger Unterstützung von Stadtbäumen sind von entscheidender Bedeutung, da sie die Grundlage für langfristige Bemühungen um eine städtische Landschaftsgestaltung bilden.

1.7 Tiefe Bodeninjektion als Lösung

Die Rhizosphäre, die die Wurzeln von Bäumen und Sträuchern umgibt, versorgt diese mit Nährstoffen. Ihre Wurzeln erhalten Wasser und Nährstoffe über die Wurzel-Boden-Grenzfläche, und sie atmen durch Bodenporen (Day et al., 2010). Ein verdichteter Boden kann den normalen Zyklus stören, was zu einer verminderten Vitalität und der Produktion von Totholz führt (Heritage tree care, 2024).

Eine tiefe Bodeninjektion kann die Gesundheit von Bäumen in städtischen Gebieten verbessern, indem wichtige Nährstoffe und organische Elemente direkt in den Boden eingebracht werden, wo die Baumwurzeln sie aufnehmen können. Verdichtete, nährstoffarme Böden in städtischen Gebieten können das Wachstum von Bäumen stark behindern, da die Wurzeln mit eingeschränkter Belüftung, wenig organischer Substanz und hohen Schadstoffkonzentrationen zu kämpfen haben (Saidan, 2024).

Bodenverbesserer, die bei tiefen Bodeninjektionen verwendet werden, können aus Humaten, Zeolithen, Perlit und Mykorrhiza bestehen. Diese Stoffe sind nützlich für das Pflanzenwachstum. Humate stärken die Bodenstruktur, indem sie die Bildung von Bodenaggregaten fördern, während Zeolithe die Nährstoffbindung erhöhen und die Auswaschung verhindern (Smedt et al., 2017). Mykorrhiza ist ein nützlicher Pilz, der eine symbiotische Verbindung mit Baumwurzeln eingeht, wodurch diese Wasser und Nährstoffe effizienter aufnehmen können (Mohammadi et al., 2011). Zusammen schaffen diese Zusatzstoffe einen gesünderen, widerstandsfähigeren Boden, der den Bäumen hilft, den Herausforderungen des Stadtlebens standzuhalten.

Es gibt mehrere Strategien zur Verbesserung der Bodengesundheit und zur Förderung der Entwicklung von Stadtbäumen, insbesondere in schwierigen städtischen Gebieten. Mulchen, Kompostieren und Belüften des Bodens sind allesamt Techniken, die dazu beitragen können, verdichtete Böden aufzuweichen, die Wasserrückhaltung zu verbessern und wichtige Nährstoffe direkt an die Wurzeln zu liefern. Spezielle Werkzeuge und Methoden, wie der VOGT Geo Injector, bieten einen gezielteren Ansatz.

Der VOGT Geo Injector verwendet Druckluft, um den Boden durch periodische Belüftung zu lockern. Das Injektionsrohr kann einen Druck von 5 bis 8 bar (72psi-116psi) ausüben und schafft offene Räume für Bodenergänzungen (Arbor Age, 2024). Auf diese Weise können die Anwender in einer einzigen Anwendung den Boden dekompaktieren und maßgeschneiderte Nährstofflösungen einbringen. Diese Methode ist besonders in Ballungsgebieten nützlich, wo verdichtete Böden und nährstoffarme Bedingungen die Entwicklung der Bäume häufig behindern (Heritage tree care, 2024).

1.8 Ziel und Zweck der Forschung

Das Hauptziel dieser Studie ist es, die Auswirkungen von tiefen Bodeninjektionen auf die Gesundheit und Vitalität von Stadtbäumen zu bewerten, indem wichtige bodenbezogene Probleme wie Verdichtung, Nährstoffmangel und Wasserstress angegangen werden. Diese Studie konzentriert sich auf zwei wichtige Baumarten, *Brachychiton celsissima* und *Buckinghamia acerifolia*, die in zwei Stadtzentren der Gold Coast zu finden sind. Die Forschungsziele sind:

- Bewertung der Auswirkungen von tiefen Bodeninjektionen auf einige Aspekte der Boden- und Baumgesundheit.
- Vergleichen Sie den Gesundheitszustand der unbehandelten Bäume mit dem der mit VOGT behandelten.

1.9 Forschungsfragen und Hypothesen

Mit dieser Studie sollen die folgenden Forschungsfragen beantwortet werden:

- Können tiefe Bodeninjektionen die Bodenverdichtung wirksam verringern und die Bodengesundheit in städtischen Gebieten verbessern, indem sie die Nährstoffverfügbarkeit, die Wasserspeicherung und die mikrobielle Aktivität erhöhen?
- Haben Bäume, die tief in den Boden gespritzt werden, einen höheren Chlorophyllgehalt und eine höhere allgemeine Vitalität als unbehandelte Pflanzen?
- Beeinflusst das Alter der Bäume ihre Reaktion auf eine tiefe Bodeninjektion, wobei junge Bäume vielleicht empfänglicher sind als reife Bäume?

Auf der Grundlage der gesichteten Literatur werden Hypothesen aufgestellt:

H0: Tiefe Bodeninjektionen verringern weder die Bodenverdichtung noch verbessern sie die Bodenverhältnisse. H1: Tiefe Bodeninjektionen verringern die Bodenverdichtung und verbessern die Bodenverhältnisse.

1.10 Bedeutung der Studie

Dieses Projekt konzentriert sich auf tiefe Bodeninjektionen als gezielte Behandlung zur Verbesserung der Bodengesundheit und zur Steigerung der Vitalität von Bäumen im städtischen Umfeld. In diesem Umfeld sind die wichtigsten Faktoren, die das Wachstum von Bäumen beeinträchtigen, in der Regel durch weithin anerkannte einschränkende Faktoren beeinträchtigt: verdichtete Böden, geringer Wurzelraum unter der Erde und nährstoffarme Böden. Im Gegensatz zu anderen, konventionelleren Behandlungsmethoden wie Oberflächenkompostierung oder Düngung, bei denen Nährstoffe, organische Stoffe und Wasser in die obersten Bodenschichten eingebracht werden, werden bei der Tiefeninjektion die Nährstoffe direkt in die Wurzelzone eingebracht. Die Wirksamkeit dieses Ansatzes ist in städtischen Gebieten von besonderem Vorteil, da

verdichtete Oberflächen und Infrastrukturen verringern die Durchlässigkeit des Bodens und den Nährstofftransport in tiefere Wurzelsysteme.

Kompostierung und Düngung liefern zwar organische Stoffe und Nährstoffe, müssen aber häufig behandelt werden und dringen in verdichtete Böden nicht gut ein, was den Nutzen dieser Optionen auch für Stadtbäume einschränkt. Bei Oberflächenbehandlungen besteht außerdem die Möglichkeit, dass die Nährstoffe nach starken Regenfällen abfließen, was Umweltproblemen führen könnte, während sie nicht dazu beitragen, den Wurzelzugang wie beabsichtigt zu verbessern. Im Gegensatz dazu minimieren tiefe Bodeninjektionen die Störung der Oberfläche und verbessern die Nährstoffverteilung direkt in der Wurzelzone, was die Gesundheit der Stadtbäume möglicherweise effektiver verbessert.

Tiefe Bodeninjektionen sind einer der neueren Ansätze bei der Pflege von Stadtbäumen. Damit werden bestimmte Einschränkungen des Bodens in städtischen Gebieten angegangen. Dieser Ansatz trägt direkt zu den Zielen einer nachhaltigen städtischen Forstwirtschaft bei, indem er die Bodenbedingungen unter der Oberfläche verbessert, die das Wachstum von Bäumen unter schwierigen Umweltbedingungen unterstützen und eine breitere Ökosystemleistung, Kühlung, Luftreinigung und Regenwasserbewirtschaftung aufrechterhalten. Diese Arbeit soll zum wachsenden Verständnis der Wirksamkeit von Bodeninjektionen beitragen und Erkenntnisse liefern, die helfen, effizientere und praktikablere Pflegemethoden für Stadtbäume zu entwickeln.

2. Methodik

Die in diesem Kapitel erläuterte Methodik ist Teil der Verfahren und Strategien, die in dieser Studie zur Analyse der Auswirkungen tiefer Bodeninjektionen auf die Gesundheit von Stadtbäumen und verschiedene Bodenparameter angewandt werden. Bei dem gegebenen Analyseansatz wurden sowohl die Bodengesundheit als auch das Leben der Bäume untersucht, wobei der Schwerpunkt auf entscheidenden Parametern wie Bodenverdichtung, Feuchtigkeitsgehalt, pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit, organische Substanz und Chlorophyllgehalt lag. In diesem Kapitel werden das Probenahmeverfahren, die Laboruntersuchungen und die statistischen Ansätze vorgestellt, die sorgfältig entwickelt wurden, um Genauigkeit und Verlässlichkeit zu gewährleisten, und somit eine umfassende Grundlage für die Bewertung der Wirksamkeit von tiefen Bodeninjektionen bei der Verbesserung der Gesundheit von Stadtbäumen und der Bodenqualität bieten.

2.1 Untersuchungsgebiet und Standortwahl

Die beiden Fallstudiengebiete an der Gold Coast sind die Cotlew Street East in Southport und die Usher Avenue in Labrador. Jeder Standort wurde so ausgewählt, dass verschiedene Altersklassen von Bäumen und unterschiedliche biotische und abiotische Umweltbedingungen erfasst wurden, um so eine solide Grundlage für die Bewertung der Tiefeninjektion in den Boden zu schaffen, die auf etwaige Auswirkungen auf die Gesundheit der Stadtbäume untersucht werden kann.

In Cotlew Street East herrscht ein mildes, subtropisches Klima mit deutlichen jahreszeitlichen Schwankungen: heiße, feuchte Sommer und milde Winter. Die Sommertemperaturen liegen zwischen 20°C und 28°C und die Wintertemperaturen zwischen 10°C und 21°C. Die jährliche Niederschlagsmenge beträgt etwa 1.200 mm. Der meiste davon fällt in den Sommermonaten, die sich von Dezember bis März erstrecken können, und wird oft von hoher Luftfeuchtigkeit und Gewittern begleitet.

Cotlew Street East befindet sich auf der nördlichen Seite der Straße, vom westlichen Ende bis zur Bundall Road. An diesem Standort stehen 35 junge *Brachychiton celsissima*-Bäume, so dass er sich hervorragend für die Untersuchung der Auswirkungen von Bodenbehandlungen auf junge, sich entwickelnde Bäume eignet. Die Cotlew Street liegt in der Nähe eines natürlichen , was sich auf die Bodenfeuchtigkeit auswirkt. Bei den Böden entlang der Cotlew Street East handelt es sich in erster Linie um sandige Lehme, seltener um lehmige Lehme; sie sind mäßig entwässert und gut durchlüftet. Diese Bodenzusammensetzung bietet ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Wasserrückhalt und Durchlässigkeit und eignet sich daher für eine vielfältige Vegetation in einer subtropischen Umgebung.



Abbildung 3 Cotlew Street East



Abbildung 4 Brachychiton-Baum

Brachychiton celsissima, besser bekannt als Queensland Bottle Tree, ist ein in Australien beheimateter Strauch, der aufgrund seiner Trockenheitstoleranz und seiner Akzeptanz verschiedener Böden an städtische Umgebungen angepasst ist. Diese Art kann offensichtlich lange Dürreperioden überstehen, da sie einen anschwellenden Stamm zur Wasserspeicherung hat, aber bei Stress mit der Umgebung die Blätter abwirft, um Energie zu sparen. Städtische Bedingungen führen oft zu solchen Problemen

mit jungen Brachychiton-Bäumen, einschließlich begrenztem Wurzelraum und verdichteten Böden, die Stressreaktionen wie frühzeitigen Blattfall verstärken. Aus diesen Gründen könnte Brachychiton celsissima ein gutes Objekt sein, um den Einfluss verschiedener Bodenbehandlungen auf die Gesundheit von Bäumen unter schwierigen städtischen Bedingungen zu untersuchen (Australian Native Plants Society).

Usher Avenue, Labrador, Gold Coast, Queensland, Australien (-27.948859, 153.392391) weist ein mildes subtropisches Klima auf; die Durchschnittstemperatur liegt zwischen 21°C und 29°C im Sommer und zwischen 11°C und 22°C im Winter. In diesem Gebiet fallen das ganze Jahr über etwa 1.200 mm Niederschlag, der größte Teil davon in den regenreichen Monaten von Dezember bis März.

In der Usher Avenue in Labrador stehen auf der Ostseite der Straße zwischen Central Street und Government Road 20 ausgewachsene Buckinghamia acerifolius-Bäume. Die Bodenbeschaffenheit in dieser Region ist mehr oder weniger sandiger Lehm, der ein mäßiges Drainagesystem aufweist und mit einer breiten Kategorie von Baumarten kompatibel ist. Diese Art von Boden bietet eine Mischung aus Wasserrückhalt und Belüftung, was ihn perfekt für die städtische Forstwirtschaft an der Gold Coast mit ihrem subtropischen Umfeld macht.

Dadurch wird auch klar, wie die vorhandenen Bäume auf die tiefen Bodeninjektionen reagieren würden, da reife Bäume im Allgemeinen andere physiologische Reaktionen und Nährstoffanforderungen haben als unreife Bäume. Anders als im Fall der Cotlew Street gibt es in der Usher Avenue keine natürlichen Wasserquellen vor Ort, so dass ein ganz anderes Umfeld entsteht, in dem die Bäume einen anderen Wasser- und Nährstoffhaushalt haben werden.



Abbildung 5 Usher Avenue



Abbildung 6 Buckinghamia-Baum

Buckinghamia acerifolius oder *Queensland Ivory Curl*-Bäume sind für städtische Gebiete sehr wertvoll, da sie langlebig sind und einen dichten Bewuchs mit leuchtend weißen Blüten haben. Die Bäume werden bis zu 30 Meter hoch, und obwohl sie trockene Bedingungen bevorzugen, gedeihen sie auf verdichteten städtischen Böden mit begrenzter Wurzelzone nur schlecht. Obwohl ausgewachsene *Buckinghamia*-Pflanzen tiefere Wurzeln für die Nährstoffaufnahme haben, benötigen sie bessere Bodenbedingungen, um ihr volles Wachstum und ihre Blüte fortzusetzen, um

mehr von ihren Schatten und ökologischen Vorteilen im städtischen Bereich zu fördern (Australian Native Plants Society).

2.2 Forschungsdesign

Der Forschungsansatz dieser Studie besteht darin, die Bodenqualität und die Baumgesundheitsmarker nach den Tiefeninjektionen des Bodens mit denen von unbehandelten Bäumen in zu vergleichen. Jeder zweite Baum wurde mit dem VOGT Geo Injector behandelt, während die unbehandelten Bäume als Kontrollen dienten. In den folgenden Abbildungen steht der blaue Punkt für die behandelten Pflanzen und der rote Punkt für unbehandelten Bäume.



Abbildung 7 Behandlungsplan für Cotlew Street East



Abbildung 8 Behandlungsplan für die Usher Avenue

2.3 Tiefe Bodeninjektion

Das VOGT-Tiefeninjektionsprogramm ist eine weitere Technologie zur Bodensanierung, die die Gesundheit und Widerstandsfähigkeit von Stadtbäumen verbessert, indem sie Bodenprobleme behebt. Das VOGT-System verwendet ein spezielles Injektionswerkzeug, mit dem eine maßgeschneiderte Mischung aus Nährstoffen, organischen Stoffen und Wasser tief in den Boden in der Nähe der Baumwurzeln gepumpt wird. Diese Methode zielt darauf ab, die Bodenstruktur zu verbessern, indem sie das Problem der Verdichtung verringert und den Zugang zu Nährstoff- und Feuchtigkeitsquellen für eine bessere Entwicklung in städtischen Gebieten erleichtert. In dieser Arbeit das VOGT-Programm auf ausgewählte junge und ausgewachsene Straßenbäume angewendet, während die Kontrollbäume zum Vergleich unbehandelt blieben.



Abbildung 9 VOGT geo injector

Lage der Versorgungsleitungen: Vor der Injektion wurde jeder Standort mit der BYD-Methode (Before You Dig) auf das Vorhandensein von unterirdischen Versorgungsleitungen überprüft. Dies war notwendig, um sicherzustellen, dass keine dieser Leitungen beeinträchtigt werden.

Markierung der Injektionsstellen: Die Injektionsstellen wurden um jeden Baum herum markiert. Dies war notwendig, um eine gleichmäßige Anwendung der Behandlung zu gewährleisten.

Injektion zur Bodenverdichtung: Jeder Baum erhielt vier VOGT-Bodenverdichtungsinjektionen, 300 mm und 600 mm tief aus einem Abstand von 1 Meter von der Basis des Stammes. Dadurch wurde eine vollständige 360-Grad-Verdichtung um jeden Baum herum erreicht. Im Falle von Versorgungsleitungen wurden diese Injektionen gegenüber dem Wurzelteller vorgenommen, um die Störung zu minimieren.

Injektion einer Mineralmischung in den Boden: Es wurde eine Mineralmischung mit Perlit, Humaten, Zeolith, Magnesium-/Ammoniumsulfat für die sandigen Böden und Mykorrhizapilzen injiziert, um die besonderen Eigenschaften der Gold Coast-Böden zu fixieren.

Tiefenhydratisierung: Jeder Baum wurde mit 150 Litern Wasser in angemessener Verdünnung mit Nährstoffen und Wurzelstimulanzien wie Algen, Spurenelementen, Kaliumhumaten und Mykorrhizapilzen bewässert, um sicherzustellen, dass die Bäume angemessen hydratisiert und die Nährstoffe verfügbar waren.

Verfüllung: Jedes Injektionsloch wurde mit 200 Gramm mittelschwerer Biokohle verfüllt.

2.4 Datenerhebung und Messung

Die Auswirkungen von tiefen Bodeninjektionen auf den Boden und die Gesundheit der Bäume an zwei städtischen Standorten, Cotlew Street East und Usher Avenue, wurden anhand einer Reihe von Daten vor und nach der Behandlung untersucht. Es wurden alle vier Richtungen um einen Baum herum gemessen, um die Genauigkeit und Repräsentativität der Daten zu gewährleisten. Weitere wichtige Merkmale waren Bodenverdichtung, Chlorophyllgehalt, pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit (EC), Feuchtigkeit, organische Stoffe usw.

Bodenprobenentnahme: Mit einem manuellen Erdbohrer wurden Bodenproben in einem Abstand von etwa einem Meter von der Basis jedes Baumes, aus allen möglichen Richtungen um den Baum herum und in einer Tiefe von 15 bis 20 cm entnommen. Die physikalischen Analysen der Bodenproben wurden durchgeführt, um die elektrische Leitfähigkeit, den pH-Wert, den Gehalt an organischen Stoffen und die Bodenfeuchtigkeit zu ermitteln. Der Salzgehalt des Bodens wurde anhand der elektrischen bestimmt, während die pH-Werte den Säure- bzw. Alkaligehalt des Bodens anzeigten - beides kann die Verfügbarkeit von Nährstoffen einschränken und Gesundheit der Bäume beeinträchtigen.

Verdichtung des Bodens: Die Verdichtung des Bodens wurde im Feld mit Hilfe eines Penetrometers bestimmt. Der Wert für das Penetrometer basierte auf der in Zentimetern gemessenen Tiefe, in der ein Widerstand von 600 psi auftrat. Das bedeutet, dass sich die Tiefenmessung auf die Dichte des Bodens und die Verdichtung bezieht, Faktoren, die das Wurzelwachstum und die Infiltration von Wasser beeinflussen. Die Prüfung des Verdichtungsgrads bei behandelten und unbehandelten Bäumen wird Aufschluss darüber geben, dass tiefe Bodeninjektionen die Verdichtung verringern und somit die Möglichkeit für Wurzelwachstum und Belüftung des Bodens schaffen.

Chlorophyllgehalt: Die Chlorophyllkonzentration dient als Indikator für die photosynthetische Aktivität und den allgemeinen Gesundheitszustand der Bäume. Er wurde mit einem Atleaf Chl Plus Chlorophyll-Messgerät gemessen. Dieses Gerät ermöglicht eine zerstörungsfreie Messung des Chlorophyllgehalts in den Blättern und damit eine schnelle Beurteilung des Gesundheitszustands der Bäume. An behandelten und unbehandelten Bäumen wurden Chlorophyllmessungen von allen Seiten und der Mittelwert berechnet

um jegliche durch die Bodeninjektionen verursachte Veränderung zu überwachen. Die Messungen wurden vor der Behandlung im August und nach der Behandlung im September und Oktober durchgeführt.

2.5 Laboranalyse

pH-Wert und elektrische Leitfähigkeit (EC): Die Bodenproben wurden zunächst 24 Stunden lang in einem Ofen bei 40°C getrocknet, um überschüssiges Wasser zu entfernen. Die pH- und EC-Analysen wurden durchgeführt, nachdem 5 Gramm Boden mit 25 ml destilliertem Wasser gemischt worden waren, um ein Verhältnis von 1:5 zwischen Boden und Wasser herzustellen. Die resultierende Mischung wurde dann für 1 Stunde auf einen Schüttler gestellt. Danach wurde das pH- und EC-Messgerät mit kalibrierten Sonden für die Ablesung verwendet.

Feuchtigkeitsgehalt des Bodens: Die Proben zur Bestimmung der Bodenfeuchtigkeit wurden zunächst 24 Stunden lang bei 40 °C und anschließend weitere 24 Stunden bei 105 °C getrocknet. Die Gewichts Differenz vor und nach dem Trocknen liefert den genauen Feuchtigkeitsgehalt des Bodens und damit Angaben über das Wasserrückhaltevermögen des Bodens.

Formel zur Berechnung des Feuchtigkeitsgehalts des Bodens

$$\frac{w_1 - w_2}{w_2} \times 100$$

W1 ist das Gewicht vor dem Trocknen, während W2 das endgültige Trockengewicht ist. Der Feuchtigkeitsgehalt ist eines der Kriterien, anhand derer festgestellt werden kann, ob der Boden für ein gesundes Wachstum der Bäume geeignet ist oder nicht.

Organische Substanz: Die organische Substanz wurde mit Hilfe einer Glühverlustmethode bestimmt. Vor der Analyse wurden die Bodenproben gesiebt, um Wurzeln und Steine zu entfernen. Die gesiebten Proben wurden dann in einem vorgeheizten Ofen bei 550°C verbrannt, um organische Stoffe zu oxidieren. Der Gewichtsunterschied vor und nach der Verbrennung zeigte die Menge der vorhandenen organischen Substanz an, die eine wesentliche Determinante für die Bodenfruchtbarkeit und die mikrobiologische Unterstützung ist.

Formel zur Berechnung des OM%

$$\frac{w_2 - w_3}{w_2 - w_1} \times 100$$

W1 = das Gewicht eines Behälters, W2 = das Gewicht des Bodens vor der Verbrennung und W3 = das Gewicht nach der Verbrennung. Organische Stoffe fördern das mikrobielle Wachstum und verbessern die Bodenstruktur und das Wasserrückhaltevermögen, was für die Gesundheit eines Stadtbaums wichtig ist.

2.6 Analyse der Daten

Für die statistische Analyse wurden die Daten mit einem t-Test unter Verwendung von Microsoft Excel behandelt, wobei behandelte und unbehandelte Bäume ausgewählt wurden, um statistisch bedeutsame Unterschiede entsprechend den tiefen Bodeninjektionen aufzuzeigen. Ziel dieser Studie war es, die Veränderungen bei den Boden- und Baumgesundheitsindizes wie Verdichtung, pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit, Gehalt an organischer Substanz und Chlorophyllgehalt statistisch signifikant bestimmen. Die Analyse überprüfte die Wirksamkeit der Behandlung durch den Vergleich der Daten vor und nach der Anwendung zwischen behandelten und unbehandelten Reihen. Statistische Signifikanz wurde bei $p < 0,05$ erreicht, was die Wirksamkeit der Behandlung belegt. Bei der Darstellung der Daten wurden auch Diagramme erstellt, um die Schlussfolgerungen zu verdeutlichen.

3. Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Studie zur Tiefeninjektion des Bodens im Hinblick auf Boden- und Baumgesundheitsindizes dargestellt. Die Datenanalyse wurde für die Auswirkungen der Behandlungen auf die Bodenverdichtung, die Feuchtigkeit, den pH-Wert, den EC-Wert, die organische Substanz und den Chlorophyllgehalt für zwei städtische Standorte sowohl für junge als auch für ausgewachsene Bäume durchgeführt. In diesem Kapitel werden auch behandelte und unbehandelte Bäume gegenübergestellt, indem angegeben wird, welche der gemessenen Größen zwischen behandelten und unbehandelten Bäumen zu statistisch signifikanten Unterschieden führen. Die Ergebnisse in diesem Kapitel stellen somit eine systematische Analyse der Ergebnisse hinsichtlich der möglichen Vorteile oder Mängel der Bodenverbesserung im Hinblick auf die Gesundheit von Stadtbäumen dar.

3.1 Chlorophyll

Junge Bäume Der durchschnittliche Chlorophyllwert der behandelten jungen Bäume stieg von 36,11 auf 50,83 bei der zweiten Bewertung nach der Behandlung, PT2, was einer Steigerung von 20,63 % entspricht. Der gepaarte t-Test ergab einen p-Wert von 0,00098, was bedeutet, dass er statistisch signifikant ist, d. h. $p < 0,05$.

Der Anstieg des Chlorophyllgehalts bei den Kontroll-Jungbäumen war zwar vorhanden, fiel aber geringer aus. Bei den Kontrollen betrug der durchschnittliche prozentuale Anstieg 14,65 %, von 36,16 auf 44,38. Der p-Wert des t-Tests für die unbehandelten Jungbäume betrug 0,000956.

Ausgewachsene Bäume

Der Chlorophyllgehalt stieg auch bei älteren Bäumen entlang der Usher Avenue als Reaktion auf die Behandlung an, wenn auch weniger stark als bei jungen Bäumen. Der mittlere Chlorophyllgehalt der behandelten ausgewachsenen Bäume stieg von 60,31 auf 66,71, ein Anstieg um 12,35 %, der statistisch signifikant war ($p = 0,0031$), basierend auf den Ergebnissen der durchgeführten gepaarten t-Test-Analyse.

Der Chlorophyllgehalt der unbehandelten etablierten Bäume blieb relativ stabil und stieg nur leicht um 8,4 % von 58,91 auf 61,86 an, was statistisch nicht signifikant war, $p = 0,2856$.

3.2 Verdichtung des Bodens

Junge Bäume

Dies führte zu einer deutlichen Verringerung der Bodenverdichtung bei den behandelten jungen Bäumen nach der Behandlung. Die durchschnittliche Eindringtiefe betrug zu Beginn der Behandlung 14,38 cm und stieg nach der Behandlung auf durchschnittlich 27,67 cm, was eine positive Verbesserung von 92,3 % bedeutet.

bei der Bodenverdichtung. Der Unterschied war statisch signifikant, da der t-Test einen p-Wert von $5,26E-07$ ($p < 0,05$) ergab.

Bei unbehandelten jungen Bäumen wurde eine erhöhte Eindringtiefe mit einer Verbesserung des Verdichtungsgrades von 14,30 cm auf 18,63 cm festgestellt, was einer Verringerung der Verdichtung um 30,2 % entspricht. Die Veränderung ist mit einem p-Wert von 0,000205 ($p < 0,05$) statistisch signifikant.

Etablierte Bäume

Der Verdichtungsgrad in den behandelten reifen Bäumen ging zurück, was sich in einem Anstieg der durchschnittlichen Eindringtiefe von 8,21 cm auf 24,98 cm zeigte, was einer Verbesserung von 203,8 % entspricht. Diese Veränderung war mit einem p-Wert = 0,00018 ($p < 0,05$) statistisch signifikant.

Unbehandelte, etablierte Bäume zeigten einen deutlichen Anstieg, bei dem die Eindringtiefe von 6,99 cm auf 16,82 cm anstieg. Dieser Rückgang der Verdichtung betrug 140,6 % mit einer Signifikanz von $p=2,30E-05$ ($p < 0,05$).

3.3 pH-Wert

Junge Bäume

Der pH-Wert des Bodens für die in der Cotlew Street East behandelten Jungbäume stieg von durchschnittlich 6,35 vor der Behandlung auf 6,67 nach der Behandlung, was einem Anstieg von 5,18 % entspricht. Der t-Test zeigte, dass es eine signifikante Veränderung des pH-Boden-pH gab; p-Wert: $9,55 \times 10^{-5}$ ($p < 0,05$). Ein erhöhter pH-Wert des Bodens in Richtung Neutralität begünstigt im Allgemeinen die Verfügbarkeit von Nährstoffen und die Gesundheit des Bodens.

Der pH-Wert des Bodens von unbehandelten jungen Bäumen stieg ebenfalls an, wobei der durchschnittliche Ausgangswert bei 6,27 lag, der sich bis zum Ende Versuchszeitraums auf einen Durchschnittswert von 6,71 erhöhte. Der prozentuale Anstieg betrug 7,05 % und war statistisch signifikant ($p\text{-value} = 1,44 \times 10^{-7}$, $p < 0,05$).

Ausgewachsene Bäume

Der durchschnittliche pH-Wert des Bodens in den alten Bäumen entlang der Usher Avenue, die die Behandlungen erhielten, stieg von 5,92 auf 6,08 und verzeichnete damit einen Anstieg von 2,7 %. Dies war jedoch mit $p=0,25$ nicht signifikant ($p > 0,05$). Dies würde also bedeuten, dass die pH-Werte in den behandelten alten Böden vergleichsweise konstant waren.

Bei ausgewachsenen Bäumen, die unbehandelt blieben, stieg der pH-Wert des Bodens relativ wenig an, im Durchschnitt von 6,01 auf 6,08, was einem Anstieg von 1,2 % entspricht. Auch dieser Unterschied war mit einem p-Wert von 0,73 nicht signifikant. Da die p-Werte größer als 0,05 sind, war die Variabilität des pH-Wertes innerhalb der unbehandelten Gruppe der ausgewachsenen Bäume gering.

3.4 EC

Junge Bäume

Bei den behandelten jungen Bäumen kam es nach der Behandlung zu einem starken Anstieg des EC-Werts im Boden. Der durchschnittliche EC-Wert ist nach der Behandlung von 74,12 $\mu\text{S}/\text{cm}$ auf 363,53 $\mu\text{S}/\text{cm}$ gestiegen, was einem Anstieg von 390,4 % entspricht. Ein t-Test zeigte einen starken Anstieg der Bodenleitfähigkeit nach der Behandlung mit $p = 6,4987 \times 10^{-11}$ ($p < 0,05$).

Die unbehandelten Jungfische verzeichneten einen durchschnittlichen Anstieg des EC-Wertes von 88,67 $\mu\text{S}/\text{cm}$ vor der Behandlung auf 350 $\mu\text{S}/\text{cm}$ nach der Behandlung, was einem prozentualen Anstieg von 294,6 % entspricht. Der Trend war statistisch signifikant mit $p = 7,7421 \times 10^{-13}$, $p < 0,05$. Dies bedeutet, dass die Leitfähigkeitswerte des Bodens in unbehandelten jungen Böden während des Versuchszeitraums zunahmen.

Ausgewachsene Bäume

Der gesamte EC-Wert des Bodens in den behandelten etablierten Bäumen stieg um 317,1 %, von 76 $\mu\text{S}/\text{cm}$ zu Beginn auf 317 $\mu\text{S}/\text{cm}$ nach der Behandlung. Ein t-Test ergab einen p-Wert von $5,18539 \times 10^{-7}$, was eine signifikante Veränderung des EC-Wertes zeigt ($p < 0,05$).

Im Gegensatz dazu tendierten die unbehandelten reifen Bäume im Durchschnitt zu einem Anstieg von 93,33 $\mu\text{S}/\text{cm}$ auf

317,78 $\mu\text{S}/\text{cm}$ um 240,5%. Der t-Test ergab jedoch einen p-Wert von $2,22093 \times 10^{-6}$ und damit $p < 0,05$, was bedeutet, dass der EC-Wert des Bodens bei den reifen, unbehandelten Bäumen signifikant gestiegen ist.

3.5 Feuchtigkeit des Bodens

Junge Bäume

Nach der Behandlung kam es zu einem signifikanten Anstieg der Bodenfeuchtigkeit bei den behandelten jungen Bäumen in der Cotlew Street East, mit einem durchschnittlichen Anstieg von 8,37% auf 10,77%, was etwa 33,5% entspricht. Dies wurde durch den gepaarten t-Test mit einem p-Wert unter 0,05 bestätigt, mit einem p-Wert von 0,015.

Die Bodenfeuchtigkeit nahm auch bei den unbehandelten jungen Bäumen zu, und zwar von 9,34 % auf 11,42 %, was einer prozentualen Zunahme von 24,7 % entspricht. Der t-Test ergab einen p-Wert von 0,0027, was bedeutet, dass die Veränderung statistisch signifikant ist, da sie unter 0,05 liegt.

Ausgewachsene Bäume

Die Bodenfeuchtigkeit der behandelten Bäume in der Usher Avenue stieg von einem Mittelwert von 12,70 % auf 13,83 % nach der Behandlung. Dies entspricht einem Anstieg von 24,1 %, aber einem p-Wert von 0,522 und $p > 0,05$ bedeuten keine statistische Signifikanz, wie in dem Bericht angegeben.

Bei den unbehandelten etablierten Bäumen sank die Bodenfeuchte geringfügig von 12,87 % auf 12,25 %, was einem Rückgang von 4,56 % entspricht. Dies war nicht signifikant, der p-Wert betrug 0,639 ($p > 0,05$).

3.6 Organisches Material

Junge Bäume

Die Behandlung mit jungen Bäumen in der Cotlew Street East führte zu einer unbedeutenden Erhöhung des Gehalts an organischer Substanz im Boden. Der durchschnittliche Gehalt an organischer Substanz stieg nach der Behandlung von 5,18 % auf 5,47 %, was einer Zunahme von 6,23 % entspricht. Der p-Wert des gepaarten t-Tests liegt bei $0,290 > 0,05$; nach der Behandlung gab es keine Schwankungen im Gehalt an organischer Substanz.

Bei den unbehandelten Bäumen im Jugendstadium war der Gehalt an organischer Substanz ziemlich konstant mit dem Mittelwert zu Beginn und nach der Behandlung von 5,79 . 5,82 %. Dies zeigt eine leichte Zunahme von 1,79 %. Die Veränderung ist auch nicht signifikant, da $p = 0,924$ ($p > 0,05$).

Etablierte Bäume

Der Gehalt an organischer Substanz in den behandelten ausgewachsenen Bäumen in der Usher Avenue verbesserte sich von durchschnittlich 7,41 % auf 9,75 %, was einer Zunahme von 38,81 % entspricht. Das ist ein beachtlicher Zuwachs, aber der t-Test ergab, dass dieser Zuwachs nicht signifikant ist (p -Wert = 0,198, $p > 0,05$).

Der Gehalt an organischer Substanz der unbehandelten etablierten Bäume sank leicht von einem anfänglichen Durchschnitt von 7,96 % auf 7,10 %, was einer Verringerung von 9,13 % entspricht. Die genannte Veränderung ist statistisch nicht signifikant, der p-Wert betrug 0,144 ($p > 0,05$).

3.7 Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse

Im Ergebnis hatten die tiefen Bodeninjektionen einen gewissen Einfluss auf die Bodenqualität und die Baumgesundheit sowohl junger als auch etablierter Bäume entlang der Cotlew Street East und der Usher Avenue. Zu den deutlichsten Auswirkungen, die erzielt wurden, gehören Chlorophyllgehalt, Bodenverdichtung, pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit sowie die Bodenfeuchtigkeit.

3.7.1 Chlorophyllgehalt

Im Vergleich zu den Kontrollen ist der Chlorophyllgehalt der behandelten Jungbäume signifikant gestiegen, was auf eine erhöhte photosynthetische Aktivität aufgrund der erhöhten Nährstoffverfügbarkeit und der verbesserten Bodenbedingungen nach der Behandlung hinweist. Die Ergebnisse des T-Tests wiesen darauf hin, dass sich die Chlorophyllgehalte zwischen behandelten und unbehandelten jungen Bäumen signifikant unterschieden, was die Wirksamkeit der Tiefinjektionsmethoden zur Förderung der Gesundheit junger Bäume belegt. Bei ausgewachsenen Bäumen wurde ein sichtbarer Anstieg des Chlorophylls beobachtet, der jedoch weniger ausgeprägt war, was darauf hindeutet, dass die Injektionen zwar gewisse Vorteile mit sich brachten, die ausgewachsenen Bäume jedoch aufgrund ihres bereits etablierten Wurzelsystems und der Nährstoffaufnahme bescheidener reagierten.

3.7.2 Bodenverdichtung

Die Analyse der Bodenverdichtung an den behandelten jungen Bäumen ergab eine deutliche Verringerung der Verdichtung. Die Eindringtiefe bei 600 psi nahm nach der Behandlung stark zu, was zeigt, dass die Tiefeninjektionsverfahren die Bodenstruktur erheblich verbesserten und das Wurzelwachstum weniger einschränkten. Bei etablierten Bäumen nahm die Verdichtung zwar ab, aber in geringerem Maße, wenn auch immer noch statistisch signifikant. Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass Injektionen die durch Verdichtung verursachten Entwicklungshemmnisse verringern können, insbesondere bei jüngeren Pflanzen mit anpassungsfähigeren Wurzelsystemen.

3.7.3 pH-Wert

Die Boden-pH-Tests an den behandelten und unbehandelten jungen und etablierten Bäumen zeigen die einzelnen Auswirkungen der tiefen Bodeninjektionen. Durch die Behandlung konnte der durchschnittliche pH-Wert für junge Bäume in der Cotlew Street East von 6,35 auf 6,67 erhöht werden, was der Neutralität näher kommt und die Nährstoffverfügbarkeit verbessert. Unbehandelte Jungbäume zeigten nur einen sehr geringen natürlichen Aufwärtstrend, was den Wert einer gezielten Behandlung zur Verbesserung der Bodenbedingungen verdeutlicht.

Der pH-Wert der ausgewachsenen Bäume entlang der Usher Avenue stieg jedoch nach der Behandlung von 5,92 auf 6,08, was nahe der Neutralität lag, wenn auch immer noch etwas sauer war. Bei den etablierten Bäumen, die nicht behandelt wurden, wurde keine signifikante Veränderung des pH-Werts festgestellt. Nach Angaben des Ministeriums für Umwelt, Land und Wasser der Regierung von Queensland liegt der ideale pH-Bereich für Pflanzen in feuchten Regionen bei 5-7. In der vorliegenden Studie lagen die pH-Werte nach der Behandlung sowohl bei jungen als auch bei etablierten Bäumen größtenteils in oder nahe diesem optimalen Bereich, was darauf hindeutet, dass tiefe Bodeninjektionen die Bodenbedingungen verbessert haben, um die vorgeschriebenen pH-Werte zu erreichen. Eine solche Behandlung half den jungen Bäumen, indem sie den mittleren pH-Wert näher an den neutralen Wert heranbrachte und damit ihre Fähigkeit zur Nährstoffaufnahme erhöhte.

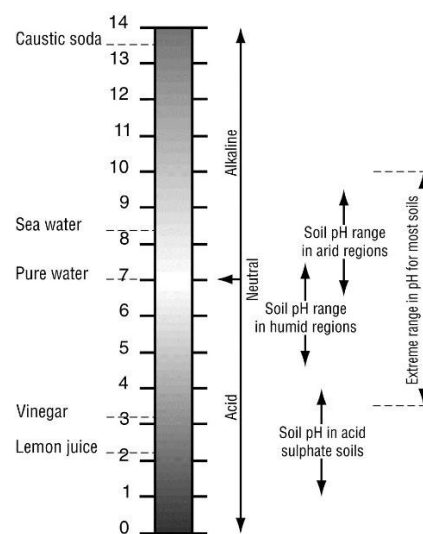


Abbildung 10 pH-Wert des Bodens

(Regierung von Queensland)

3.7.4. EC

Tiefe Bodeninjektionen führten sowohl bei jungen als auch bei älteren Bäumen zu einem erheblichen Anstieg der elektrischen Leitfähigkeit des Bodens, was zeigt, dass der behandelte Boden von besserer Qualität ist als vor der Behandlung. Die höheren EC-Werte bei den jungen Bäumen lassen vermuten, dass die günstigen Veränderungen des Bodenmilieus auf den Anstieg der löslichen Ionen zurückzuführen sind. Dies unterstützt möglicherweise eine bessere Wurzelaufnahme und ein besseres Wachstum in verdichteten, nährstoffarmen Stadtböden (Pospíšilová et al., 2020).

Bei ausgewachsenen Bäumen kam es zu einem leichten Anstieg der EC-Werte, was auf ein stabiles Bodenmilieu in der Umgebung einer etablierten Wurzelzone zurückzuführen ist, die Ressourcen aus tieferen Schichten anzapft.

Schichten (Seyfried et al., 2021). Wie bei den unbehandelten Bäumen boten die natürlichen Bedingungen keine ausreichend günstigen Veränderungen, um die Leitfähigkeit des Bodens im Untersuchungszeitraum zu verbessern (Hoffland et al., 2020). Die Ergebnisse zeigen, wie sich tiefe Bodeninjektionen auf den Bodenzustand auswirken können, insbesondere bei jungen Bäumen in städtischen Gebieten.

3.7.5 Feuchtigkeit des Bodens

Bei den behandelten Jungbäumen wurde ein deutlicher Anstieg des Bodenwassers festgestellt, der vermutlich eine direkte Folge der Injektionsbehandlung des Bodens ist, der durch die Erhöhung seiner Wasserhaltekapazität feiner wurde. Dieser Effekt lässt darauf schließen, dass die Behandlung in angemessener Weise zur Entwicklung eines günstigeren Wurzelumfelds für junge Bäume beigetragen hat. Der Feuchtigkeitsgehalt des Bodens von unbehandelten Jungbäumen schien eher konstant zu sein, was bedeutet, dass eine Verbesserung ohne Eingriff nur in sehr begrenztem Maße stattfindet.

Die Bodenfeuchtigkeit in behandelten und unbehandelten etablierten Bäumen änderte sich nur sehr wenig, was darauf hindeutet, dass die aktuelle Wurzelstruktur ausgewachsener Bäume und verdichtete Böden die Wirksamkeit dieser Behandlung auf die Wasserspeicherung verringern könnten. Die gleichbleibende Feuchtigkeit in den unbehandelten etablierten Bäumen deutet darauf hin, dass die natürlichen Bedingungen allein nicht ausreichen, um die Wasserverfügbarkeit zu verbessern.

3.7.6 Organisches Material

Den Ergebnissen zufolge variiert der OM-Gehalt zwischen behandeltem und unbehandeltem Boden. Die behandelten Böden wiesen einen signifikant höheren OM-Gehalt auf, der das Herzstück des mikrobiellen Wachstums, der Stickstoffumwandlung und der Wasserspeicherung ist. Dies stimmt mit den Ergebnissen von Hoffland et al. (2020) überein, die sich mit der Bedeutung von OM für die Unterstützung mikrobieller Gemeinschaften befassen, die für Fruchtbarkeit und Widerstandsfähigkeit verdichteter städtischer Böden wesentlich sind. Die behandelten Böden hingegen wiesen aufgrund der erhöhten OM eine erhöhte Aggregation, Stabilität und einen besseren strukturellen Zustand auf; eine verbesserte Belüftung und Wasserspeicherkapazität sind wichtig für die Gesundheit von Bäumen in Städten (Pospíšilová et al., 2020).

Andererseits blieb der OM-Gehalt in den unbehandelten Böden entweder konstant oder war kaum niedriger, was den typischen städtischen Boden mit geringem organischem Eintrag und Verdichtung widerspiegelt, der die natürliche Akkumulation von OM verhindert. In der Tat haben Seyfried et al. (2021) einen geringen organischen Eintrag und Verdichtung als gemeinsame städtischer Böden identifiziert. Diese Böden würden ohne Behandlung keine ausreichenden Mengen an organischem Material aufnehmen und hätten folglich eine schlechte Nährstoffverfügbarkeit und

geringere Widerstandsfähigkeit des Bodens. Schlussfolgerungen: Tiefe Bodeninjektionen verbessern die organische Substanz des Bodens, tragen zur langfristigen Bodengesundheit bei und erhöhen die Nachhaltigkeit der städtischen Forstwirtschaft.

4. Diskussion

Im Kapitel "Diskussion" werden die Auswirkungen von tiefen Bodeninjektionen auf die Gesundheit von Stadtbäumen anhand von Bodenverdichtung, organischer Substanz, pH-Wert, elektrischer Leitfähigkeit und Feuchtigkeitsspeicherung untersucht. In diesem Kapitel werden diese Ergebnisse in Bezug auf die vorhandene Literatur interpretiert und die Mechanismen und möglichen Umwelteinflüsse - z. B. Regenfälle - erörtert, die zu diesen Ergebnissen geführt haben könnten. Außerdem werden praktische Konsequenzen für die Pflege von Stadtbäumen aufgezeigt und Empfehlungen für weitere Forschungsarbeiten ausgesprochen, um mehr Erkenntnisse zu gewinnen und die Techniken der Bodenbehandlung in der städtischen Forstwirtschaft weiter zu verbessern.

4.1 Auswertung der Ergebnisse

4.1.1 Chlorophyll

Die Zunahme des Chlorophylls in den behandelten Bäumen wurde hauptsächlich durch eine bessere Düngung aufgrund von Bodeninjektionen beeinflusst. Nährstoffe, insbesondere Stickstoff, werden für die Synthese von Chlorophyll benötigt. Die Triebe erhöhten die Verfügbarkeit dieser Nährstoffe für die Bäume. Bei jungen Bäumen war die Verbesserung am größten, da ihr unreifes Wurzelsystem mehr Nährstoffe benötigt, bis die Pflanzen etabliert sind. Darüber hinaus sollten Mykorrhiza, Zeolithe und andere Bodenzusätze, die die Wasserrückhaltung bzw. die Bodenstruktur verbessern können, dazu beitragen, Trockenstress zu verringern, der als eine der wichtigsten Einschränkungen für städtische Böden gilt (Mondal et al., 2021; Smedt et al., 2017). Dieser gleichmäßige Zustand der Wasserverfügbarkeit hat wahrscheinlich die Chlorophyllsynthese gefördert, indem er feuchtigkeitsbedingte Depressionen in der photosynthetischen Effizienz verringert hat. Die Entlastung verbessert die Belüftung des Bodens und damit die Wurzelentwicklung und die Nährstoffaufnahme, um eine kontinuierliche Chlorophyllproduktion zu unterstützen (Moore et al., 2019).

Bei den unbehandelten Bäumen wurde kein erhöhter Chlorophyllzuwachs festgestellt, da die Düngemittel und die Wasserverfügbarkeit nicht verbessert wurden. Es besteht immer noch die Möglichkeit, dass sich der Chlorophyllgehalt je nach den jahreszeitlichen Schwankungen, der Bodenart und den Niederschlägen leicht verändert. Natürliche Niederschläge würden zum Beispiel den Feuchtigkeitsstress vorübergehend lindern und den Chlorophyllgehalt erhöhen. Dies wäre jedoch nicht so vorhersehbar, wie es der Fall gewesen wäre, wenn der Boden in den behandelten Bäumen ein besserer Schwamm für die Wasserspeicherung gewesen wäre (Talebzadeh & Valeo, 2022). Darüber hinaus haben natürliche Bodenstressfaktoren im Zusammenhang mit Verdichtung, Verschmutzung und eingeschränktem Wurzelraum in städtischen Böden wahrscheinlich die Fähigkeit der nicht behandelten Bäume beeinträchtigt, sich mit Nährstoffen und Wasser zu versorgen, um im Laufe der Zeit ein hohes Chlorophyllniveau aufrechtzuerhalten.

4.1.2 Verdichtung

Die Einbringung von Perlit, Zeolith, Humaten, Mykorrhiza und Magnesiumammoniumsulfat in die Injektionen hatte die Verdichtung der behandelten Böden deutlich verringert. Perlit und Zeolith sind beide dafür bekannt, dass sie die Bodenstruktur verändern können, indem sie die Porosität erhöhen und die Schüttdichte verringern, was wiederum zu einer besseren Durchwurzelung und Wasserinfiltration führt. Perlit schafft Lufttaschen im Boden, was die Belüftung verbessert, während Zeolith die Bodenstruktur verbessert und als Medium zur langsamen Freisetzung von Nährstoffen dient, um sicherzustellen, dass gesunde Wurzeln über einen längeren Zeitraum hinweg erhalten bleiben. Humate tragen zur Bildung von Bodenaggregaten bei, die Partikel aneinander binden, was die Bodenstruktur verbessert und zu einer weiteren Verringerung der Verdichtung führt (Mondal et al., 2021).

Mykorrhiza könnte eine entscheidende Rolle gespielt haben, da sie eine symbiotische Verbindung mit den Baumwurzeln einging und ihre Ausbreitung und damit die Nährstoff- und Wasseraufnahme steigerte (Miller & Jastraw, 2000). Die Pilze können verdichtete Böden besiedeln, indem sie sie allmählich auflockern, indem sie Kanäle bilden, die eine Belüftung und eine Verringerung der Dichte ermöglichen. Magnesium-Ammoniumsulfat fügte lebenswichtige Nährstoffe hinzu, die das Wurzelwachstum förderten und durch die Steigerung der biologischen Aktivitäten zur Auflockerung des verdichteten Bodens beitrugen (Mohammadi et al., 2011).

Die Verdichtung in unbehandelten Böden ist gleich geblieben oder hat sich aufgrund typischer städtischer Belastungen wie Fußgängerverkehr, Bebauung und undurchlässiger Abdeckung geringfügig erhöht. Ohne die mineralischen Zusätze konnten die unbehandelten Böden den Porenraum, die Belüftung und die Durchwurzelung nicht anregen und waren daher stark verdichtet, was die Belüftung und das Wurzelwachstum behinderte.

4.1.3 pH-Wert

Die Ausbringung von Zeolith, Humaten und Magnesiumammoniumsulfat auf die behandelten Böden veränderte höchstwahrscheinlich den pH-Wert. Zeolith ist ein natürlich vorkommendes Mineral, das wie ein Puffer wirkt und somit den pH-Wert des Bodens puffern und die Nährstoffaufnahme verbessern kann. Es kann ein starkes Ansteigen und Abfallen des pH-Wertes verhindern, indem es die wesentlichen Kationen bindet und die Nährstoffauswaschung verringert, wodurch ein stabiler pH-Wert aufrechterhalten wird (Ravali et al., 2020; Ibrahim et al., 2023). Humate verringern den Säuregehalt des Bodens, indem sie organisches Material einbringen, da die mikrobielle Aktivität zunimmt und die Tendenz besteht, organische Säuren auszuschcheiden. Diese organische Substanz kann den pH-Wert auf natürliche Weise ausgleichen und optimale Bedingungen für das Wurzelwachstum und die Nährstoffaufnahme schaffen. Magnesium-Ammonium-Sulfat enthält sowohl Magnesium als auch Schwefel, die den pH-Wert durch die Bereitstellung der notwendigen Nährstoffe beeinflussen können, die den pH-Wert sanft in Richtung Neutralität verändern (Ravali et al., 2020).

Der pH-Wert in unbehandelten Böden bleibt in der Regel statisch oder schwankt je nach Bodenbeschaffenheit und -faktoren etwas. Verdichtung und Verschmutzung in städtischen Böden können die pH-Werte auch in die leicht sauren oder unausgewogenen Kategorien treiben. Wenn diese Böden nicht behandelt werden, können Nährstoffmängel oder pH-Unterschiede bestehen bleiben, die für die Gesundheit der Bäume insgesamt schädlich sind.

4.1.4 EC

Die Zugabe von Magnesium-Ammonium-Sulfat, Zeolith und Humaten zu den Injektionen war wahrscheinlich der Grund für den Anstieg des EC in den behandelten Böden. Diese Verbindungen versorgen den Boden mit dringend benötigten Ionen, darunter Magnesium, Ammonium und Sulfat, die alle direkt zur Erhöhung der Ionenkonzentration und damit des EC beitragen. Zeolith zeichnet sich durch eine hohe Kationenaustauschkapazität (CEC) aus, die Nährstoffe zurückhält, die nach und nach freigesetzt werden, was zu einem progressiven Anstieg des EC-Wertes führt (Mondal et al., 2021). Als organische Substanz verbessern Humate die Bodenstruktur und die mikrobielle Aktivität und damit den Nährstoffkreislauf, was zu einer erhöhten Ionenverfügbarkeit beiträgt. Dieser allgemeine Anstieg des Nährstoffgehalts verbessert die elektrische Leitfähigkeit des Bodens, was sich in den höheren EC-Werten widerspiegelt (Demirkiran, 2021).

Da keine Mineralien oder Düngemittel von außen zugeführt wurden, wiesen die unbehandelten Böden erhöhte EC-Werte auf, die jedoch im Vergleich zu den behandelten Pflanzen niedriger waren. Städtische Böden sind häufig verdichtet und nährstoffarm und würden nur geringfügige natürliche Veränderungen des EC-Wertes erfahren, beispielsweise durch Regenfälle oder leichte Nährstoffauswaschungen, und ohne Bodenverbesserungen würden die Ionenkonzentrationen niedrig bleiben. Der durch den Mangel an organischer Substanz und Mineralien begrenzte Nährstoffpool in unbehandelten Böden hält die EC-Werte im Vergleich zu behandelten Böden niedrig.

4.1.5 Feuchtigkeit des Bodens

Die Verbesserung der Bodenfeuchtigkeit in den behandelten Böden wurde durch die Injektion von Perlit, Zeolith und Humaten herbeigeführt. Perlit erhöht aufgrund seiner hohen Porosität die Wasserspeicherkapazität des Bodens durch die Bildung von Lufteinschlüssen, die zur Wasserspeicherung beitragen. Ähnlich funktioniert Zeolith durch die Absorption von Wasser und dessen langsame Abgabe, wodurch Wurzeln kontinuierlich mit Feuchtigkeit versorgt werden. Darüber hinaus verbessern Humate die strukturelle Zusammensetzung des Bodens durch die Erhöhung des Gehalts an organischer Substanz, was die Wasserhaltefähigkeit des Bodens verbessert. Diese Zusätze verringern den Wasserabfluss und die Verdunstung, so dass der Boden seine Feuchtigkeit über einen längeren Zeitraum speichern kann (Demirkiran, 2021).

Die unbehandelten Böden wiederum wiesen wahrscheinlich eine geringere Bodenfeuchtigkeit auf, da die Verdichtung die Wasseraufnahme in den Boden behinderte und auch keine Bestandteile zur Verbesserung der Wasserrückhaltung im Boden vorhanden waren. Typischerweise sind städtische Böden verdichtet und haben eine geringere Wasserinfiltrations- und -rückhaltefähigkeit. Dadurch würde das Wasser schneller abfließen und weniger in die unbehandelten Böden einsickern, was zu einem geringeren Feuchtigkeitsgehalt in den Böden führen würde. Ohne die Mineralstoffmischungen würden diese Böden weniger Feuchtigkeit speichern, insbesondere in Trockenperioden oder an Orten mit schlechter Drainage.

4.1.6 Organisches Material

Der Gehalt an organischer Substanz im Boden ist sehr wichtig, da er eine Vielzahl von Aktivitäten des Ökosystems unter der Erde unterstützt, wie z. B. die Speicherung von Nährstoffen, die Verbesserung der Bodenstruktur und die Steigerung der mikrobiellen Aktivitäten. Die organische Substanz ist an der Entwicklung der Funktionalität des Bodenökosystems beteiligt, indem sie Kohlenstoff bindet, Stickstoff mineralisiert und Wasser zurückhält, was für die Pflanzengesundheit und die Widerstandsfähigkeit des Bodens äußerst wichtig ist (Hoffland et al., 2020). Diese Forschung hat gezeigt, dass die Behandlung von Böden mit Humaten die organische Substanz erhöht und so zu einer verbesserten Fruchtbarkeit der Böden führt.

Die behandelten Böden wiesen einen höheren OM-Gehalt auf, was in der Regel auf zugesetzte Huminstoffe zurückgeführt wurde, die bei der Stabilisierung des OM mit der Bodenmatrix interagierten. Laut Seyfried et al. (2021) verhindert die Stabilisierung von OM durch mineralorganische Verbindungen einen schnellen Abbau und erhöht die Verweildauer von OM im Boden. Es wird erwartet, dass sich die höhere Stabilität positiv auf den Nährstoffkreislauf auswirkt, da das stabile OM die Nährstoffe langsam freisetzt, so dass Pflanzen diese Nährstoffe besser nutzen können. Der höhere OM-Gehalt in behandelten Böden kann die mikrobiellen Aktivitäten verstärken, da OM eine Energiequelle für mikrobielle Gemeinschaften ist und somit die Bodengesundheit im Laufe der Zeit fördern kann (Jarosz et al., 2022).

Der Gehalt an organischer Substanz in unveränderten Böden hat sich entweder nicht verändert oder ist leicht zurückgegangen, was für städtische Böden typisch ist, da die natürliche Auffüllung infolge der Bodenverdichtung und der Verringerung des Pflanzeninputs begrenzt ist (Pospíšilová et al., 2020). Organische Stoffe spielen eine sehr wichtige Rolle im mikrobiellen und Nährstoffkreislauf, der ein gesundes Pflanzenwachstum aufrechterhält (Hoffland et al., 2020). Ohne organische Substanz können die Böden diese Prozesse nicht unterstützen.

Die festgestellten Unterschiede zwischen den behandelten und den unbehandelten Böden untermauern die Idee, dass organische Zusätze die Ökofunktionalität des Bodens verbessern. Der Zusatz von organischen Stoffen, der den Nährstoffkreislauf fördert, verbessert auch die Wasserrückhaltung und die Struktur des Bodens, ein Aspekt, der für die langfristige Lebensfähigkeit der städtischen von entscheidender Bedeutung ist. Solche Ergebnisse dieser Studie

zeigen, dass OM-Inputs für die Bodengesundheit entscheidend sind und eine angemessene Entwicklung von Bäumen in städtischen Gebieten durch den Aufbau gesunder und widerstandsfähiger Bodenökosysteme fördern.

4.2 Auswirkungen auf die städtische Forstwirtschaft

Aus den Ergebnissen dieser Studie über die Verbesserung der Bodengesundheit durch tiefe Bodeninjektionen ergeben sich einige wichtige Schlussfolgerungen für die städtische Forstwirtschaft. Verbesserte Bodenbedingungen in Form einer geringeren Verdichtung und einer höheren organischen Substanz tragen positiv zur Gesundheit und Widerstandsfähigkeit von Stadtbäumen bei. Aus den Studien geht hervor, dass die organische Substanz im Boden die Wasserhaltekapazität und den Nährstoffkreislauf verbessert, was als wichtige Eigenschaft für die Erhaltung der Gesundheit eines städtischen Baumbestands gilt (O’Riordan et al., 2021). Bäume, die in nährstoffreichen, gut durchlüfteten Böden wachsen, sind widerstandsfähiger gegenüber städtischen Stressfaktoren wie reduzierter Wurzelfläche, verdichteten Böden und Verschmutzung (Czaja et al., 2020).

Die Verbesserung der organischen Substanz kann daher das Wachstum von Bäumen fördern, indem sie Nährstoffe liefert, die Durchdringung der Wurzeln verbessert und hilfreiche Bodenbiota unterstützt. Dies wiederum steigert die Ökosystemleistungen des Bodens (Pospíšilová et al., 2020). Die Beimischung organischer Stoffe kann somit die Bodenfruchtbarkeit fördern, was für eine nachhaltige städtische Forstwirtschaft sehr wichtig ist (Hoffland et al., 2020). Dies erhöht die mikrobielle Aktivität und die Nährstoffverfügbarkeit.

Darüber hinaus können gesündere Böden einige der Ökosystemdienstleistungen in Städten verbessern, wie z. B. die Regenwasserbewirtschaftung, die Verringerung der Hitze und die Verbesserung der Luftqualität. Gesunde Böden ermöglichen es den Bäumen, die städtischen Wärmeinseln durch Evapotranspiration zu kühlen, die maximiert wird, wenn die Bäume in einem guten Ernährungszustand sind und gut bewässert werden (Hauer et al., 2020). Stadtbäume reinigen Schadstoffe in der Atmosphäre, was ebenfalls wirksam ist, wenn sie auf einem guten, nährstoffreichen Boden gewachsen sind; daher führt dies zu einer besseren Luftqualität für die Stadtbewohner (Barona et al., 2021).

Diese Ergebnisse unterstreichen die Bedeutung von Bodenverbesserungen im Rahmen von Baumpflanzungs- und Pflegeprogrammen in der städtischen Forstpolitik. Behandlungen zur Verbesserung der organischen Substanz können mit minimalen Eingriffen durchgeführt werden und eignen sich daher sehr gut für das städtische Umfeld, wo andere Eingriffe in den Boden aufgrund von Bauarbeiten und Fußgängerverkehr in der Regel nicht möglich sind (Jarosz et al., 2022). Integration der städtischen Forstwirtschaft in Bodengesundheitsprogramme, die es den Bäumen ermöglichen, in ansonsten schwierigen Situationen besser zu gedeihen und mehr Langlebigkeit und Nutzen für die städtischen Ökosysteme zu bieten.

4.3 Beschränkungen der Studie

Diese Studie wies mehrere Einschränkungen auf, die bei der Interpretation der Daten eine Rolle spielten und ein Fenster für weitere Verbesserungen boten. Eine der Einschränkungen betraf den Zeitraum der Beobachtung nach der Behandlung. Idealerweise sollten die Messgrößen für die Gesundheit von Boden und Bäumen den pH-Wert, die elektrische Leitfähigkeit (EC) und den Chlorophyllgehalt über einen längeren Zeitraum umfassen, um die langfristigen Auswirkungen der tiefen Bodeninjektionen zu erfassen. Kurzfristige Messungen lassen möglicherweise nicht erkennen, wie sich die Behandlung im Laufe der Jahreszeiten auf die Bodenstruktur oder die Gesundheit der Bäume auswirkt. Dies deutet darauf hin, dass eine Zeitspanne von mindestens mehreren Jahren ein vollständiges Bild von der Wirksamkeit der verschiedenen Bodenverbesserungen liefern könnte. Eine weitere Einschränkung ist die Tatsache, dass nur eine kleine Stichprobe und eine geringe Anzahl von Standorten analysiert wurden, was die Verallgemeinerung der Ergebnisse einschränken könnte.

Darüber hinaus konzentrierte sich die vorliegende Studie auf nur zwei städtische Standorte mit einzigartiger Bodenzusammensetzung und Umweltbedingungen, was die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere städtische Kontexte und/oder Bodentypen möglicherweise einschränkt. Diese Studie wird zu einer multiregionalen Studie mit weitaus variableren Böden hinsichtlich Textur und Verdichtung sowie klimatischen Bedingungen ausgeweitet, um ein besseres Verständnis der Auswirkungen von Tiefeninjektionen auf die Gesundheit von Stadtbäumen zu erlangen. Im Rahmen der Studie wurden zwar kritische Indikatoren wie pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit, Verdichtung und Chlorophyll untersucht, nicht aber andere wichtige Merkmale der Boden- und Baumgesundheit, wie z. B. die Nährstoffauswaschung oder die Baumkronenbedeckung.

Die Einbeziehung einer breiteren Palette von Indikatoren für die Boden- und Pflanzengesundheit würde eine umfassendere Bewertung der Wirksamkeit der Behandlung ermöglichen. Dazu kann die Überwachung der mikrobiellen Atmungsraten oder der Nährstoffretention gehören, die mehr Informationen über die biologische Aktivität und Fruchtbarkeit des Bodens liefern können als die grundlegenden chemischen und physikalischen Daten zur Gesundheit des Ökosystems an sich. Die Tatsache, dass die Studie auf eine recht begrenzte Anzahl von Geräten und Methoden angewiesen ist, bringt einige Einschränkungen mit sich. So ist beispielsweise die Messung des Chlorophyllgehalts mit einem tragbaren Chlorophyllmessgerät zwar schnell, aber möglicherweise nicht so präzise und detailliert wie andere, aufwändigere Methoden wie die Chlorophyll-Extraktion und -Analyse im Labor. Der Einsatz neuerer Methoden, wie HPLC für die Nährstoffanalyse oder Fernerkundung zur Messung des Zustands der Baumkronen, kann mehr Genauigkeit und Datenreichtum liefern.

Schließlich gibt es weitere Störfaktoren wie nicht vollständig kontrollierte Sonneneinstrahlung, die Nähe zu Wasserquellen und Umweltstressfaktoren. Diese Faktoren können sowohl den Boden als auch die Baumgesundheit unabhängig von der angewandten Behandlung beeinflussen, was eine Interpretation erschwert.

die Ergebnisse mit den erhaltenen Daten zu vergleichen. Künftige Forschungsarbeiten sollten ein randomisiertes Versuchsdesign mit Kontrolle dieser Variablen beinhalten, um eine noch bessere Isolierung der Behandlungseffekte zu erreichen.

Während diese Forschung einen tiefen Einblick in die Verwendung von Injektionen von Chemikalien in den Boden bietet, überwinden nachfolgende Studien die Unzulänglichkeiten in Bezug auf die Beobachtungszeit, die über in der aktuellen Studie verglichene hinausgeht, auf größere Standorte, umfassende Boden- und Pflanzengesundheitsindikationen und die angewandte Methodik.

4.4 Künftige Arbeit

Auf der Grundlage der Ergebnisse dieser Studie könnte sich die künftige Forschung auf Strategien zur Verbesserung der Gesundheit von Stadtbäumen durch Manipulation des Bodens konzentrieren. In Anbetracht einiger der diskutierten Einschränkungen bieten einige Bereiche besonders interessante Möglichkeiten für weitere Untersuchungen

Langfristige Auswirkungen von Bodenverbesserungen: Die gleichen Wirksamkeitstests für tiefe Injektionen in Bezug auf Baumgesundheit und die Bodenqualität könnten langfristig durchgeführt werden, um zeitliche Veränderungen des Gehalts an organischer Substanz, der Nährstoffverfügbarkeit und der mikrobiellen Aktivität zu messen. Längsschnittstudien würden bestätigen, dass die hier festgestellten Vorteile nachhaltig sind und sich mit der Zeit weiter verbessern, zumindest in Ballungsgebieten mit variablen periodischen Stressfaktoren.

Versuche unter kontrollierten Bedingungen: Es wäre auch nützlich, detailliertere Informationen in kontrollierten Versuchen unter Gewächshausbedingungen oder unter Ausschluss von Regen zu erhalten, um die Behandlungseffekte von Bodeninjektionen unabhängig von variablen Umweltbedingungen, wie z. B. Regen, besser isolieren zu können. Wenn die Variablen kontrolliert werden, wäre es für künftige Forschungen einfacher, die direkten Auswirkungen der Bodenbehandlungen auf die Gesundheitsmarker der Bäume, wie Chlorophyllgehalt und Wurzelentwicklung, zu untersuchen.

Vergleich von verschiedenen Bodentypen und Baumarten: Das Projekt wird erweitert, um viele verschiedene städtische Böden und Baumarten einzubeziehen. Die boden- und artenspezifischen Reaktionen könnten Aufschluss über die geeignete Art der Düngung und die Anwendungsmethoden geben, die den Nutzen der Bodenbehandlung in einer Reihe unterschiedlicher städtischer Umgebungen erweitern. Außerdem könnte ein Vergleich der Reaktionen von jungen und ausgewachsenen Bäumen verschiedener Arten Aufschluss über die Alterungsreaktionen auf die Bodenbehandlung geben.

Die Integration mit der städtischen Politik und den forstwirtschaftlichen Praktiken: Es bietet weitreichende Möglichkeiten für die künftige Arbeit mit Stadtplanern und politischen Entscheidungsträgern, indem die Strategien der Bodenverbesserung in größere Programme der städtischen Forstwirtschaft eingebettet werden. Ursprüngliche Forschungsarbeiten zur Ausweitung dieser Methoden und zu ihrer möglichen Standardisierung könnten die Nachhaltigkeit in den städtischen Ökosystemen selbst fördern und gleichzeitig zu größeren Zielen der städtischen Resilienz beitragen.

Bessere Überwachungsmethoden: Mit modernen Überwachungsmethoden - wie der Fernerkundung für die Gesundheit der Baumkronen oder der kontinuierlichen Überwachung der Bodenqualität mit Sensoren - könnten die Forscher in der Lage sein, Veränderungen in Echtzeit zu beobachten und die subtilen Auswirkungen dieser Arten von Bodenverbesserungen auf die Baumgesundheit zu erkennen. Diese Methodik kann nützliche Informationen liefern, um die Bewirtschaftungsmethoden für Böden in der städtischen Forstwirtschaft zu verbessern.

5. Schlussfolgerung

Tiefeninjektionen in den Boden gelten als eine neue Behandlungsmethode, mit der versucht wird, die Gesundheit von Stadtbäumen zu verbessern, indem die Bodenverdichtung, der Nährstoffmangel und die schlechte Wasserspeicherung direkt angegangen werden. Im Rahmen des Projekts wurden die Gesundheit und das Wachstum junger *Brachychiton*-Bäume und ausgewachsener *Buckinghamia*-Bäume an der Goldküste durch gezielte Behandlungen und die Überwachung von Veränderungen bei vielen Boden- und Pflanzengesundheitsmarkern untersucht. Die Daten zeigen, dass tiefe Bodeninjektionen Zustand der Böden tendenziell verbesserten, was zur allgemeinen Gesundheit der Bäume beigetragen haben könnte, wie auch die höheren Chlorophyllwerte und der erhöhte Feuchtigkeitsgehalt der Böden zeigten. Dieses Ergebnis wird höchstwahrscheinlich durch andere externe Faktoren, wie z. B. die Niederschläge, beeinflusst.

Eines der signifikantesten Ergebnisse war ein Rückgang der Bodenverdichtung, insbesondere bei den unreifen Bäumen, die nach der Behandlung eine bessere Eindringtiefe aufwiesen. Die Bodenverdichtung verhindert, dass Stadtbäume Zugang zu lebenswichtigen Nährstoffen haben; tiefe Bodeninjektionen scheinen die Wurzelentwicklung und die Nährstoffaufnahme zu verbessern, da sie Lufträume im Boden schaffen. Auch die Nährstoffverfügbarkeit und die Feuchtigkeitsspeicherung im Boden verbesserten sich, was sich in der höheren elektrischen Leitfähigkeit und dem Gehalt an organischer Substanz in den behandelten Böden widerspiegelt. Die Verbesserung war zweifellos zum Teil auf die direkte Nährstoffzufuhr in die Wurzelzone zurückzuführen, aber auch die während der Injektion eingebrachte organische Substanz kann zur Wasserrückhaltung beitragen, die das Umfeld für die Baumwurzeln stabilisiert.

Der Chlorophyllgehalt stieg bei den behandelten Bäumen signifikant an, ein Indikator für die Gesundheit der Bäume, und die Reaktionen waren bei jungen Bäumen besonders ausgeprägt. Chlorophyll ist eine wichtige Substanz, die für die Photosynthese verantwortlich ist, und ist immer ein Indikator für den allgemeinen Gesundheitszustand von Bäumen. Der Anstieg des Chlorophylls bei den behandelten Bäumen kann auf eine höhere Photosyntheseaktivität hindeuten, wahrscheinlich als Ergebnis einer verbesserten Nährstoffaufnahme durch die Injektionen. Junge Bäume sind bei den meisten Kriterien empfindlicher als ausgewachsene Bäume, wahrscheinlich aufgrund ihrer höheren Wachstumsrate und ihrer flexiblen Anpassungsfähigkeit an veränderte Bodenbedingungen.

Dies sollte jedoch auch vor dem Hintergrund betrachtet werden, dass die Niederschläge während der gesamten Studie für Schwankungen in der Feuchtigkeit und Verdichtung gesorgt haben könnten; daher können die beobachteten Veränderungen nicht allein auf die Injektionen zurückgeführt werden. Künftige kontrollierte Studien würden ein weitaus besseres Verständnis der Auswirkungen von tiefen Bodeninjektionen auf die Gesundheit von Stadtbäumen ermöglichen und somit Informationen über bewährte Praktiken bei der Bewirtschaftung von städtischen Wäldern liefern.

6. Referenzen

- Ali, K. A., Noraldeem, S. S., & Yaseen, A. A. (2021). An Evaluation Study for Chlorophyll Estimation Techniques. *Sarhad Journal of Agriculture*, 37(4). <https://doi.org/10.17582/journal.sja/2021/37.4.1458.1465>
- Amitava Rakshit, Ghosh, S., Viacheslav Vasenev, Pathak, H., & Rajput, V. D. (2022). Böden im städtischen Ökosystem. In *Springer eBooks*. Springer Nature. <https://doi.org/10.1007/978-981-16-8914-7>
- Ch Ravali, Rao, K. J., T Anjaiah, & Suresh, K. (2020). *Wirkung von Zeolith auf die physikalischen und physikalisch-chemischen Eigenschaften des Bodens*. X(XXXIII), 776-781.
- Coder, K. (2007). *Bodenverdichtungsstress und Bäume: Symptome, Maßnahmen, Behandlungen*.
- Craul, P. (1994). Bodenverdichtung auf stark genutzten Flächen. *Arboriculture & Urban Forestry*, 20(2), 69-74. <https://doi.org/10.48044/jauf.1994.013>
- Czaja, M., Kolton, A., & Muras, P. (2020). Die komplexe Problematik der Stadtbäume - Akkumulation von Stressfaktoren und ökologische Leistungsmöglichkeiten. *Forests*, 11(9), 932. <https://doi.org/10.3390/f11090932>
- Baumpflege in Dallas. (2020, 27. Oktober). *Die Vorteile der Tiefwurzeldüngung*. Southern Botanical. <https://southernbotanical.com/the-benchmark/the-benefits-of-deep-root-fertilization/>
- Day, S. D., Wiseman, P., Dickinson, S., & Harris, J. W. (2010). Baumwurzelökologie in der städtischen Umwelt und Auswirkungen auf eine nachhaltige Rhizosphäre. *Arboriculture and Urban Forestry*, 36(5), 193-205. <https://doi.org/10.48044/jauf.2010.026>
- De Smedt, C., Steppe, K., & Spanoghe, P. (2017). Günstige Auswirkungen von Zeolithen auf die pflanzliche Photosynthese. *Advanced Material Science*, 2(1). <https://doi.org/10.15761/ams.1000115>
- Demirkıran, A. R. (2021, Juni 1). *Düngemittel und ihr effizienter Einsatz in der nachhaltigen Landwirtschaft (1)*.
- Dobbs, C., Eleuterio, A. A., Amaya-Espinel, J. D., Montoya, J., & Kendal, D. (2018). Die Vorteile der städtischen und stadtnahen Forstwirtschaft. *Unasylva*, 69(1).

- El Moussaoui, H., & Bouqbis, L. (2022). Interaktive Wirkung von Biokohle und Biokompost auf Wachstum und physiologische Parameter von Argan. *Sustainability*, 14(12), 7270. <https://doi.org/10.3390/su14127270>
- Frene, J. P., Pandey, B. K., & Castrillo, G. (2024). Unter Druck: Erforschung der Bodenverdichtung und ihrer Auswirkungen auf die Bodenfunktionen. *Plant and Soil*. <https://doi.org/10.1007/s11104-024-06573-2>
- Giri, S., Shrivastava, D., Deshmukh, K., & Dubey, P. (2013). Effect of Air Pollution on Chlorophyll Content of Leaves. *Current Agriculture Research Journal*, 1(2), 93-98. <https://doi.org/10.12944/carj.1.2.04>
- Hauer, R. J., Koeser, A. K., Parbs, S., Kringer, J., Krouse, R., Ottman, K., Miller, R. W., Sivyier, D., Timilsina, N., & Werner, L. P. (2020). Langfristige Auswirkungen und Entwicklung eines Baumerhaltungsprogramms auf Zustand, Überleben und Wachstum von Bäumen. *Landscape and Urban Planning*, 193, 103670. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2019.103670>
- Hayes, A. T., Jandaghian, Z., Lacasse, M. A., Gaur, A., Lu, H., Laouadi, A., Ge, H., & Wang, L. (2022). Nature-Based Solutions (NBSs) to Mitigate Urban Heat Island (UHI) Effects in Canadian Cities. *Buildings*, 12(7), 925. <https://doi.org/10.3390/buildings12070925>
- Hoffland, E., Kuyper, T. W., Comans, R. N. J., & Creamer, R. E. (2020). Ökofunktionalität der organischen Substanz in Böden. *Plant and Soil*, 455(1-2), 1-22. <https://doi.org/10.1007/s11104-020-04651-9>
- Husson, O., Sarthou, J.-P., Bousset, L., Ratnadass, A., Schmidt, H.-P., Kempf, J., Husson, B., Tingry, S., Aubertot, J.-N., Deguine, J.-P., Goebel, F.-R., & Lamichhane, J. R. (2021). Boden- und Pflanzengesundheit im Zusammenhang mit der dynamischen Aufrechterhaltung der Eh- und pH-Homöostase: A review. *Plant and Soil*, 466(1-2), 391-447. <https://doi.org/10.1007/s11104-021-05047-z>
- Ibrahim, E., M. El-Sherbini, & Selim, E. M. (2023). Auswirkungen von Biokohle, Zeolith und Mykorrhiza-Impfung auf Bodeneigenschaften, Schwermetallverfügbarkeit und Cowpea-Wachstum in einem mehrfach kontaminierten Boden. *Scientific Reports*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-33712-z>
- Liang, D., & Huang, G. (2023). Influence of Urban Tree Traits on Their Ecosystem Services: A Literature Review. *Land*, 12(9), 1699-1699. <https://doi.org/10.3390/land12091699>

- McPherson, E. G., Xiao, Q., van Doorn, N. S., de Goede, J., Bjorkman, J., Hollander, A., Boynton, R. M., Quinn, J. F., & Thorne, J. H. (2017). Struktur, Funktion und Wert von Stadtwäldern in kalifornischen Gemeinden. *Urban Forestry & Urban Greening*, 28, 43-53. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.09.013>
- Miller, R. M., & Jastrow, J. D. (2000). Mykorrhiza-Pilze beeinflussen die Bodenstruktur. *Arbuscular Mycorrhizas: Physiologie und Funktion*, 3-18. https://doi.org/10.1007/978-94-017-0776-3_1
- Mohammadi, K., S. Khalesro, Sohrabi, Y., & Heidari, G. (2017). A Review: Beneficial Effects of the Mycorrhizal Fungi for Plant Growth. <https://www.semanticscholar.org/paper/A-Review%3A-Beneficial-Effects-of-the-Mycorrhizal-for-Mohammadi-Khalesro/0ba9749dd1bbe2a7fe4e206dce866fed24853831>
- Mondal, M., Biswas, B., Garai, S., Sarkar, S., Banerjee, H., Brahmachari, K., Bandyopadhyay, P. K., Maitra, S., Brestic, M., Skalicky, M., Ondrisik, P., & Hossain, A. (2021). Zeolithe verbessern die Gesundheit des Bodens, die Produktivität der Pflanzen und die Umweltsicherheit. *Agronomy*, 11(3), 448. <https://doi.org/10.3390/agronomy11030448>
- Moore, G., Fitzgerald, A., & May, P. (2019). Soil Compaction Affects the Growth and Establishment of Street Trees in Urban Australia. *Arboriculture & Urban Forestry*, 45(6). <https://doi.org/10.48044/jauf.2019.020>
- Msimbira, L. A., & Smith, D. L. (2020). The Roles of Plant Growth Promoting Microbes in Enhancing Plant Tolerance to Acidity and Alkalinity Stresses. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4(106). <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.00106>
- Munaf, A., Chau, H.-W., Mahusoon, M., Cheuk Yin Wai, Nitin Muttill, & Jamei, E. (2023). Sustainable Mitigation Strategies for Urban Heat Island Effects in Urban Areas. *Sustainability*, 15(14), 10767-10767. <https://doi.org/10.3390/su151410767>
- Nauš, J., Prokopová, J., Řebíček, J., & Špundová, M. (2010). Die SPAD-Chlorophyll-Messung kann durch die Bewegung der Chloroplasten deutlich beeinflusst werden. *Photosynthesis Research*, 105(3), 265-271. <https://doi.org/10.1007/s11120-010-9587-z>
- Nawaz, M. F., Bourrié, G., & Trolard, F. (2012). Auswirkungen und Modellierung der Bodenverdichtung. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 33(2), 291-309. <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0071-8>

O'Riordan, R., Davies, J., Stevens, C., Quinton, J. N., & Boyko, C. (2021). Die Ökosystemleistungen von Stadtböden: A review. *Geoderma*, 395, 115076. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115076>

Ordóñez-Barona, C., Bush, J., Hurley, J., Amati, M., Juhola, S., Frank, S., Ritchie, M., Clark, C., English, A., Hertzog, K., Caffin, M., Watt, S., & Livesley, S. J. (2021). Internationale Ansätze zum Schutz und Erhalt von Bäumen auf privaten städtischen Grundstücken. *Journal of Environmental Management*, 285, 112081. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112081>

Perez-Caballero, R., Gil, J., Benitez, C., & Gonzalez, J. (2008). Die Wirkung der Zugabe von Zeolith zu Böden zur Verbesserung der N-K-Ernährung von Olivenbäumen. Vorläufige Ergebnisse. *American Journal of Agricultural and Biological Sciences*, 3(1), 321-324. <https://thescipub.com/pdf/ajabssp.2008.321.324.pdf>

Pouyat, R., Page- Dumroese, D. S., & Patel- Weynand, T. (2020). Forest and Rangeland Soils of the United States Under Changing Conditions. In *Springer eBooks*. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-45216-2>

Qi, S. (2024). *Bäume in städtischen Umgebungen: How Soil Quality Impacts Tree Performance* - ProQuest. Proquest.com. <https://www.proquest.com/docview/2917478768?pq-origsite=gscholar&fromopenview=true&sourcetype=Dissertationen%20&%20Theses>

Regierung von Queensland. (2013, September 24). *pH-Wert des Bodens | Umwelt, Land und Wasser | Queensland Regierung*. Qld.gov.au. <https://www.qld.gov.au/environment/land/management/soil/soil-properties/ph-levels>

Sami ur Rehman, Federica De Castro, Aprile, A., Benedetti, M., & Francesco Paolo Fanizzi. (2023). Vermicompost: Enhancing Plant Growth and Combating Abiotic and Biotic Stress. *Agronomy*, 13(4), 1134-1134. <https://doi.org/10.3390/agronomy13041134>

Shibaeva, T. G., Mamaev, A. V., & Sherudilo, E. G. (2020). Evaluierung eines SPAD-502 Plus Chlorophyll-Messgerätes zur Schätzung des Chlorophyllgehaltes in Blättern mit interveinaler Chlorose. *Russisch Zeitschrift von Pflanze Physiologie*, 67(4), 690–696. <https://doi.org/10.1134/s1021443720040160>

Shin-ichiro Aiba, & Kitayama, K. (2020). *Licht- und Nährstoffbeschränkungen für das Baumwachstum auf jungen und alten Böden in einem tropischen Bergwald auf Borneo*. <https://doi.org/10.1007/s10265-020-01217-9>

Simon, E., Molnár, V. É., Lajtos, D., Bibi, D., Tóthmérész, B., & Szabó, S. (2021). Nützlichkeit von Baumarten als städtische Gesundheitsindikatoren. *Plants*, 10(12), 2797. <https://doi.org/10.3390/plants10122797>

Soltani, A., & Sharifi, E. (2017). Tägliche Schwankungen des städtischen Wärmeineffekts und seine Korrelationen zur städtischen Begrünung: A case study of Adelaide. *Frontiers of Architectural Research*, 6(4), 529-538. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2017.08.001>

Talebzadeh, F., & Valeo, C. (2022). Evaluating the Effects of Environmental Stress on Leaf Chlorophyll Content as an Index for Tree Health. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1006(1), 012007. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1006/1/012007>

Taylor, H. M., & Brar, G. S. (1991). Auswirkungen der Bodenverdichtung auf die Wurzelentwicklung. *Soil and Tillage Research*, 19(2-3), 111-119. [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(91\)90080-h](https://doi.org/10.1016/0167-1987(91)90080-h)

VOGT Geo Injector. (2024, Oktober). *Das australische Arbor Age*.

VOGT Geo-Injektor - Heritage Tree Care. (2023, Februar 13). www.heritagetreecare.com.au. <https://www.heritagetreecare.com.au/services/vogt-geo-injektor/>

Wolf, K. L., Lam, S. T., McKeen, J. K., Richardson, G. R. A., van den Bosch, M., & Bardekjian, A. C. (2020). Stadtbäume und menschliche Gesundheit: A Scoping Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(12), 4371. <https://doi.org/10.3390/ijerph17124371>

Zhang, R., Yang, P., Liu, S., Wang, C., & Liu, J. (2022). Bewertung der Methoden zur Schätzung des Chlorophyllgehalts von Blättern mit SPAD-Chlorophyllmessgeräten. *Fernerkundung*, 14(20), 5144. <https://doi.org/10.3390/rs14205144>

7. Anhänge

Anhang A - Ergänzende Tabellen und Abbildungen

PT1- Datenerhebung nach der Behandlung Satz 1

PT2- Datenerhebung nach der Behandlung, Satz 2

	Behandelte Bäume
	Unbehandelte Bäume

Tabelle A1 Chlorophylldaten für junge Bäume

Baumnummer	Ursprüngliche	PT1	PT2		Baum Nummer	Ursprüngliche	PT1	PT2
1	37.2	46.25	51.95		19	36.725	43.745	54.025
2	32.675	44.925	48.825		20	33.525	37.85	49.65
3	38.7	38.725	61.45		21	38.825	32.575	48.525
4	36.95	41.925	35.9		22	30.925	41.925	35.05
5	NA	42.625	57.675		23	47.55	50.875	49.225
6	NA	53.975	56.9		24	40.4	33.925	44.875
7	NA	45.025	53.575		25	40.375	42.5	47.225
8	34.15	40.675	43.85		26	36.9	42.975	39.45
9	40.575	38.95	47.2		27	34.5	46.975	43.1
10	NA	43.425	46.25		28	28.75	47.075	50.9
11	43.375	47.85	51.375		29	36.225	42.05	46.275
12	30.85	54.2	48.7		30	36.625	45.25	47.375
13	32.4	36.7	36.125		31	43.375	46.65	46.65
14	52.25	54.775	53.5		32	45.5		
15	42.125	32.225	51.825		33	48.575	32.875	59.25
16	30.65	37.6	34.55		34	45.125	47.1	49.925
17	44.6	45.6	53		35	44.825	52.5	56.425
18	36.425	36.325	38.775					

Tabelle A2 Chlorophylldaten für etablierte Bäume

Baum Nummer	Ursprüngliche	PT1	PT2		Baum Nummer	Ursprüngliche	PT1	PT2
1	46.275	57.15	56.15		11	47.475	51.4	57.525
2	50.975	56.55	56.85		12	45.675	45.375	58.1
3	59.075	62.05	66.875		13	68.05	65.125	69
4	47.275	48.8	51.85		14	70.1	70.7	67.325
5	45.075	51.925	55.425		15	78.675	71.475	66.675
6	42.75	52.175	55.125		16	74.125	71.075	72.875
7	62.275	60.675	64.675		17	71.875	69.25	66.275
8	59.9	66.325	66.675		18	72.95	72.55	78.525
9	40.575	54.25	54.5		19	79.2	75.225	76.15
10	54.575	63.275	65.1		20	75.375	70.6	80.075

Tabelle A3 Verdichtungsdaten für junge Bäume

Baum Nummer	Ursprüngliche	PT		Baum Nummer	Ursprüngliche	PT
1	11.25	35.875		19	17.75	21.5
2	12.5	20.95		20	12.625	15.25
3	19	22.6		21	7.875	24.5
4	23.25	33.25		22	6.625	10.825
5	18.375	23.75		23	12.25	33.3
6	12.625	18.5		24	11.125	16.575
7	12	31.1		25	9.5	16.175
8	11.75	18.125		26	13.375	11.125
9	13.375	30.5		27	11.125	21.775
10	14.625	14.5		28	23.625	25.35
11	15.375	34.275		29	18.625	31.7
12	11.125	18.75		30	14.375	23.6
13	10	30.15		31	21	26
14	10.625	17.25		32	21.625	19.975
15	10.875	33.925		33	15.475	25.2

16	14.125	14.25		34	16.375	21
17	20.375	36.75		35	14.625	18.975
18	12.75	17.5				

Tabelle A4 Verdichtungsdaten für etablierte Bäume

Baum Nummer	Ursprüngliche	PT		Baum Nummer	Ursprüngliche	PT
1	9.5	17.5		11	9.75	17.125
2	6.875	24.4		12	17.625	23.75
3	7.625	27.575		13	3.25	10.925
4	9.875	19.8		14	4.125	39.5
5	7.15	24.725		15	7.5	11.725
6	5.7	18.525		16	4.625	20.75
7	7.775	15.15		17	4.45	16.5
8	12.375	19.65		18	7.25	22.125
9	9.75	22.2		19	5	11.825
10	4.625	26.6		20	7.25	27.65

Tabelle A5 pH-Daten für junge Bäume

Baum Nummer	Ursprüngliche	PT		Baum Nummer	Ursprüngliche	PT
1	6.4	6.7		19	6.2	6.7
2	6.3	6.7		20	6.5	6.9
3	6.6	6.6		21	6.3	6.5
4	6.3	6.8		22		
5	6.4	6.5		23	6.5	6.5
6	6.4	6.7		24	6	6.5
7	6.5	6.6		25	6.1	6.6
8	6.1	6.5		26	6	6.6
9	6.3	6.4		27	6	6.6
10	6.2	7		28	6.2	
11	6.3	6.8		29	6.1	6.8

12	6.3	6.8		30	6.2	6.9
13	6.3	6.9		31	6.2	
14	6.2	6.6		32	6.5	6.9
15	6.4	7		33	6.4	7
16	6.4	6.8		34	6.4	6.5
17	6.5	6.6		35	6.6	6.6
18	6.3	6.5				

Tabelle A6 Daten zum pH-Wert für etablierte Bäume

Baum Nummer	Ursprüngliche	PT		Baum Nummer	Ursprüngliche	PT
1	6.2	6.5		11	6.5	7
2	6.3	6.2		12	6.1	6
3	6.2	6.3		13	5.8	5.6
4	6.3	6.3		14	5.7	5.7
5	5.8	6		15	5.6	6.9
6	6			16	5.8	6
7	6	5.9		17	6	5.8
8	5.8	6.5		18	6.2	6
9	5.8	5.1		19	5.8	5.9
10	5.4	6.3		20	6	5.5

Tabelle A7 EC-Daten für junge Bäume

Baum Nummer	Ursprüngliche	PT		Baum Nummer	Ursprüngliche	PT
1	40	370		19	70	410
2	50	340		20	70	370
3	60	580		21	50	530
4	50	330		22		
5	90	410		23	50	380
6	110	320		24	30	290
7	130	330		25	70	430

8	100	390		26	70	300
9	140	370		27	40	330
10	110	370		28	60	
11	70	390		29	50	330
12	90	390		30	60	330
13	100	460		31	60	
14	90	420		32	180	340
15	80	380		33	60	330
16	100	350		34	80	320
17	50	660		35	110	530
18	140	390				

Tabelle A8 EC-Daten für etablierte Bäume

Baum Nummer	Ursprüngliche	PT		Baum Nummer	Ursprüngliche	PT
1	110	330		11	70	290
2	110	300		12	90	300
3	70	290		13	200	330
4	90	310		14	100	310
5	60	470		15	70	400
6	90			16	70	300
7	80	320		17	50	330
8	50	300		18	50	270
9	90	300		19	80	280
10	80	290		20	80	310

Tabelle A9 Daten zur Bodenfeuchte für junge Bäume

Baum Nummer	Ursprüngliche	PT		Baum Nummer	Ursprüngliche	PT
1	8.636041	9.406897		19	12.15594	13.06133
2	8.294114	7.585185		20	9.898542	11.97314
3	5.544118	8.596539		21	5.432698	10.08174

4	5.877309	8.100254		22		
5	9.784048	9.62218		23	4.794408	10.50364
6	12.20599	11.05547		24	5.818916	9.5192
7	8.155208	1.803334		25	7.826153	7.047279
8	8.854296	11.61525		26	5.232467	5.827068
9	9.29141	18.86179		27	5.343071	6.045082
10	10.93806	12.91752		28	7.490984	12.40157
11	10.7156	9.298893		29	3.908698	4.635074
12	11.71088	11.35104		30	5.784779	8.032726
13	7.305155	15.9861		31	8.744527	13.44209
14	9.658846	8.667917		32	10.47021	10.85832
15	10.89923	15.52389		33	7.883152	11.36999
16	14.20762	18.54366		34	8.812868	14.71843
17	12.15739	12.68305		35	12.01794	15.87042
18	14.23353	19.61062				

Tabelle A10 Daten zur Bodenfeuchte für etablierte Bäume

Baum Nummer	Ursprüngliche	PT		Baum Nummer	Ursprüngliche	PT
1	8.111356	15.37429		11	16.0254636	14.11815812
2	9.705213	13.08057		12	18.60296253	13.17863398
3	5.798379	16.18098		13	13.6232117	14.10828025
4	14.05134	16.4512		14	13.36937546	10.8228
5	13.21759	13.43227		15	8.87203502	7.678634909
6	11.93446	12.88056		16	12.69574668	9.180952381
7	13.0101	2.672335		17	11.31679203	11.1981206
8	16.90158	12.73364		18	13.32414779	13.40206186
9	16.65497	19.82249		19	13.49981522	10.5153926
10	13.4367	18.83465		20	11.5857489	15.11688312

Tabelle A11 Organische Substanz für junge Bäume

Baum Nummer	Ursprüngliche	PT		Baum Nummer	Ursprüngliche	PT
1	3.97197551	3.811838		19	6.7626012	5.42421194
2	4.30156685	2.497661		20	6.0621966	7.50222618
3	3.57651527	3.640953		21	5.3284237	4.75987842
4	4.25696117	4.761679		22	NA	NA
5	5.78360495	5.136785		23	3.4396962	4.69015608
6	7.45187437	5.678322		24	3.546173	4.04186962
7	5.52518547	7.009067		25	5.7339871	4.56403597
8	7.26293384	6.37507		26	4.6630059	4.4748973
9	6.88833608	10.2826		27	3.3307724	3.37022492
10	6.31646004	6.436502		28	3.8687774	4.18099898
11	5.33581359	6.602641		29	2.8251485	3.27461411
12	6.71797796	5.282366		30	4.5731045	6.29679504
13	6.44307149	6.198408		31	4.9733108	5.09711793
14	7.64850471	7.843978		32	6.2763212	7.36082768
15	6.48933894	7.2373		33	5.3429761	5.13835675
16	6.89874568	6.498059		34	5.8835673	7.89566621
17	4.53348516	5.432805		35	7.0176964	6.79028581
18	6.96468392	6.027046				

Tabelle A12 Organische Substanz für etablierte Bäume

Baum Nummer	Ursprüngliche	PT		Baum Nummer	Ursprüngliche	PT
1	6.333635175	6.142079036		11	8.770499	7.177099
2	7.335006127	8.147168564		12	6.64723	9.087452
3	6.547504336	7.201728415		13	7.823221	6.437169
4	6.600370981	6.146936587		14	9.558698	9.781887
5	8.397870281	9.076412808		15	7.608696	7.108768
6	8.383087608	5.678770373		16	8.88333	7.729647
7	7.689178194	9.319712097		17	6.708428	6.216512
8	6.093002392	23.10209061		18	8.162355	7.247355

9	7.622653935	7.891064813		19	11.05497	6.82909
10	5.121771218	8.203497615		20	8.315954	9.881963

Tabelle A13 t-Test für Chlorophyll der behandelten jungen Bäume

t-Test: Gepaarte zwei Stichproben für Mittelwerte		
	<i>Ursprüngliche</i>	<i>PT2</i>
Mittlere	36.10833	50.82639
Abweichung	191.4134	37.35908
Beobachtungen	18	18
Pearson-Korrelation	-0.10686	
Hypothetischer Mittelwert Unterschied	0	
df	17	
t Zustand	-3.97443	
P(T<=t) Ein-Schwanz	0.00049	
t Kritischer Ein-Schwanz-Test	1.739607	
P(T<=t) zweiseitig	0.00098	
t Kritischer Zwei-Schwanz-Test	2.109816	

Tabelle A14 t-Test für Chlorophyll von unbehandelten jungen Bäumen

t-Test: Gepaarte zwei Stichproben für Mittelwerte		
	<i>Ursprüngliche</i>	<i>PT2</i>
Mittlere	36.15714	44.38036
Abweichung	40.20716	41.80232
Beobachtungen	14	14
Pearson-Korrelation	0.359411	
Hypothetischer Mittelwert Unterschied	0	
df	13	
t Zustand	-4.24483	
P(T<=t) Ein-Schwanz	0.000478	

t Kritischer Ein-Schwanz-Test	1.770933	
P(T<=t) zweiseitig	0.000956	
t Kritischer Zwei-Schwanz-Test	2.160369	

Tabelle A15 t-Test für Chlorophyll von behandelten etablierten Bäumen

t-Test: Gepaarte zwei Stichproben für Mittelwerte		
	<i>Ursprüngliche</i>	<i>PT 2</i>
Mittlere	60.3125	66.7125
Abweichung	150.1417	74.69115
Beobachtungen	10	10
Pearson-Korrelation	0.941229	
Hypothetischer Mittelwert Unterschied	0	
df	9	
t Zustand	-4.00898	
P(T<=t) Ein-Schwanz	0.001534	
t Kritischer Ein-Schwanz-Test	1.833113	
P(T<=t) zweiseitig	0.003069	
t Kritischer Zwei-Schwanz-Test	2.262157	

Tabelle A16 t-Test für Chlorophyll von unbehandelten etablierten Bäumen

t-Test: Gepaarte zwei Stichproben für Mittelwerte		
	<i>INITIAL</i>	<i>PT2</i>
Mittlere	58.9125	61.8625
Abweichung	221.3009	61.04517
Beobachtungen	10	10
Pearson-Korrelation	0.924089	
Hypothetischer Mittelwert Unterschied	0	
df	9	
t Zustand	-1.13518	

P(T<=t) Ein-Schwanz	0.142813	
t Kritischer Ein-Schwanz-Test	1.833113	
P(T<=t) zweiseitig	0.285626	
t Kritischer Zwei-Schwanz-Test	2.262157	

Tabelle A17 t-Test für verdichtungsbehandelte Jungbäume

t-Test: Gepaarte zwei Stichproben für Mittelwerte		
	<i>Ursprüngliche</i>	<i>PT</i>
Mittlere	14.38055556	27.66944
Abweichung	16.34687908	38.05585
Beobachtungen	18	18
Pearson-Korrelation	0.039584605	
Hypothetischer Mittelwert Unterschied	0	
df	17	
t Zustand	-	
	7.786509974	
P(T<=t) Ein-Schwanz	2.63233E-07	
t Kritischer Ein-Schwanz-Test	1.739606726	
P(T<=t) zweiseitig	5.26465E-07	
t Kritischer Zwei-Schwanz-Test	2.109815578	

Tabelle A18 t-Test für Verdichtung von unbehandelten jungen Bäumen

t-Test: Gepaarte zwei Stichproben für Mittelwerte		
	<i>Ursprüngliche</i>	<i>PT</i>
Mittlere	14.30147059	18.63382
Abweichung	21.02159926	29.3132
Beobachtungen	17	17
Pearson-Korrelation	0.732375376	
Hypothetischer Mittelwert Unterschied	0	

df	16	
t Zustand	- 4.778385298	
P(T<=t) Ein-Schwanz	0.000102588	
t Kritischer Ein-Schwanz-Test	1.745883676	
P(T<=t) zweiseitig	0.000205177	
t Kritischer Zwei-Schwanz-Test	2.119905299	

Tabelle A19 t-Test für Verdichtung von behandelten etablierten Bäumen

t-Test: Gepaarte zwei Stichproben für Mittelwerte		
	<i>Ursprüngliche</i>	<i>PT</i>
Mittlere	8.215	24.9825
Abweichung	17.03933333	37.69987
Beobachtungen	10	10
Pearson-Korrelation	- 0.414089554	
Hypothetischer Mittelwert Unterschied	0	
df	9	
t Zustand	- 6.093060795	
P(T<=t) Ein-Schwanz	9.03803E-05	
t Kritischer Ein-Schwanz-Test	1.833112933	
P(T<=t) zweiseitig	0.000180761	
t Kritischer Zwei-Schwanz-Test	2.262157163	

Tabelle A20 t-Test für Verdichtung von unbehandelten etablierten Bäumen

t-Test: Gepaarte zwei Stichproben für Mittelwerte		
	<i>Ursprüngliche</i>	<i>PT</i>
Mittlere	6.9925	16.8175
Abweichung	5.612368056	20.75917

Beobachtungen	10	10
Pearson-Korrelation	0.515801576	
Hypothetischer Mittelwert Unterschied	0	
df	9	
t Zustand	-7.95956906	
P(T<=t) Ein-Schwanz	1.15243E-05	
t Kritischer Ein-Schwanz-Test	1.833112933	
P(T<=t) zweiseitig	2.30487E-05	
t Kritischer Zwei-Schwanz-Test	2.262157163	

Tabelle A21 t-Test für den pH-Wert der behandelten jungen Bäume

t-Test: Gepaarte zwei Stichproben für Mittelwerte		
	<i>Ursprüngliche</i>	<i>PT</i>
Mittlere	6.347058824	6.670588
Abweichung	0.030147059	0.030956
Beobachtungen	17	17
	-	
Pearson-Korrelation	0.095074515	
Hypothetischer Mittelwert Unterschied	0	
df	16	
t Zustand	-5.15687954	
P(T<=t) Ein-Schwanz	4.77534E-05	
t Kritischer Ein-Schwanz-Test	1.745883676	
P(T<=t) zweiseitig	9.55069E-05	
t Kritischer Zwei-Schwanz-Test	2.119905299	

Tabelle A22 t-Test für den pH-Wert von unbehandelten jungen Bäumen

t-Test: Gepaarte zwei Stichproben für Mittelwerte		

	<i>Ursprüngliche</i>	<i>PT</i>
Mittlere	6.273333333	6.713333
Abweichung	0.024952381	0.02981
Beobachtungen	15	15
Pearson-Korrelation	0.433010942	
Hypothetischer Mittelwert Unterschied	0	
df	14	
t Zustand	-9.6564852	
P(T<=t) Ein-Schwanz	7.18881E-08	
t Kritischer Ein-Schwanz-Test	1.761310136	
P(T<=t) zweiseitig	1.43776E-07	
t Kritischer Zwei-Schwanz-Test	2.144786688	

Tabelle A23 t-Test für den pH-Wert der behandelten etablierten Bäume

t-Test: Gepaarte zwei Stichproben für Mittelwerte		
	<i>Ursprüngliche</i>	<i>PT</i>
Mittlere	5.92	6.08
Abweichung	0.070666667	0.106222
Beobachtungen	10	10
Pearson-Korrelation	0.043603506	
Hypothetischer Mittelwert Unterschied	0	
df	9	
t Zustand	-	
P(T<=t) Ein-Schwanz	0.125018195	
t Kritischer Ein-Schwanz-Test	1.833112933	
P(T<=t) zweiseitig	0.25003639	
t Kritischer Zwei-Schwanz-Test	2.262157163	

Tabelle A24 t-Test für den pH-Wert von unbehandelten etablierten Bäumen

t-Test: Gepaarte zwei Stichproben für Mittelwerte		
	<i>Ursprüngliche</i>	<i>PT</i>
Mittlere	6.011111111	6.077778
Abweichung	0.088611111	0.364444
Beobachtungen	9	9
Pearson-Korrelation	0.391073386	
Hypothetischer Mittelwert Unterschied	0	
df	8	
t Zustand	- 0.357770876	
P(T<=t) Ein-Schwanz	0.364885207	
t Kritischer Ein-Schwanz-Test	1.859548038	
P(T<=t) zweiseitig	0.729770413	
t Kritischer Zwei-Schwanz-Test	2.306004135	

Tabelle A25 t-Test für EC von behandelten Jungbäumen

t-Test: Gepaarte zwei Stichproben für Mittelwerte		
	<i>Ursprüngliche</i>	<i>PT</i>
Mittlere	74.11764706	363.5294
Abweichung	925.7352941	5711.765
Beobachtungen	17	17
Pearson-Korrelation	0.096569386	
Hypothetischer Mittelwert Unterschied	0	
df	16	
t Zustand	- 15.16270536	
P(T<=t) Ein-Schwanz	3.24935E-11	
t Kritischer Ein-Schwanz-Test	1.745883676	
P(T<=t) zweiseitig	6.4987E-11	

t Kritischer Zwei-Schwanz-Test	2.119905299	
--------------------------------	-------------	--

Tabelle A26 t-Test für EC von unbehandelten jungen Bäumen

t-Test: Gepaarte zwei Stichproben für Mittelwerte		
	<i>Ursprüngliche</i>	<i>PT</i>
Mittlere	88.66666667	350
Abweichung	1440.952381	1385.714
Beobachtungen	15	15
Pearson-Korrelation	0.384170396	
Hypothetischer Mittelwert Unterschied	0	
df	14	
t Zustand	- 24.25755313	
P(T<=t) Ein-Schwanz	3.8736E-13	
t Kritischer Ein-Schwanz-Test	1.761310136	
P(T<=t) zweiseitig	7.74721E-13	
t Kritischer Zwei-Schwanz-Test	2.144786688	

Tabelle A27 t-Test für EC der behandelten etablierten Bäume

t-Test: Gepaarte zwei Stichproben für Mittelwerte		
	<i>Ursprüngliche</i>	<i>PT</i>
Mittlere	76	317
Abweichung	404.4444444	3134.444
Beobachtungen	10	10
Pearson-Korrelation	- 0.061184224	
Hypothetischer Mittelwert Unterschied	0	
df	9	

t Status	-	
P(T<=t) Ein-Schwanz	2.59269E-07	
t Kritischer Ein-Schwanz-Test	1.833112933	
P(T<=t) zweiseitig	5.18539E-07	
t Kritischer Zwei-Schwanz-Test	2.262157163	

Tabelle A28 t-Test für EC von unbehandelten etablierten Bäumen

t-Test: Gepaarte zwei Stichproben für Mittelwerte		
	<i>Ursprüngliche</i>	<i>PT</i>
Mittlere	93.33333333	317.7778
Abweichung	1875	1244.444
Beobachtungen	9	9
Pearson-Korrelation	-	
Hypothetischer Mittelwert Unterschied	0	
df	8	
t Zustand	-11.9445104	
P(T<=t) Ein-Schwanz	1.11046E-06	
t Kritischer Ein-Schwanz-Test	1.859548038	
P(T<=t) zweiseitig	2.22093E-06	
t Kritischer Zwei-Schwanz-Test	2.306004135	

Tabelle A29 t-Test für die Bodenfeuchtigkeit der behandelten Jungbäume

t-Test: Gepaarte zwei Stichproben für Mittelwerte		
	<i>Ursprüngliche</i>	<i>PT</i>
Mittlere	8.366376874	10.76885
Abweichung	6.889403343	18.97286
Beobachtungen	18	18
Pearson-Korrelation	0.506596945	

Hypothetischer Mittelwert Unterschied	0	
df	17	
t Zustand	-2.69745253	
P(T<=t) Ein-Schwanz	0.007627972	
t Kritischer Ein-Schwanz-Test	1.739606726	
P(T<=t) zweiseitig	0.015255944	
t Kritischer Zwei-Schwanz-Test	2.109815578	

Tabelle A30 t-Test für die Bodenfeuchtigkeit von unbehandelten jungen Bäumen

t-Test: Gepaarte zwei Stichproben für Mittelwerte		
	<i>Ursprüngliche</i>	<i>PT</i>
Mittlere	9.343088	11.42359
Abweichung	8.309745	14.1589
Beobachtungen	16	16
Pearson-Korrelation	0.788569	
Hypothetischer Mittelwert Unterschied	0	
df	15	
t Status	-3.59406	
P(T<=t) Ein-Schwanz	0.001329	
t Kritischer Ein-Schwanz-Test	1.75305	
P(T<=t) zweiseitig	0.002658	
t Kritischer Zwei-Schwanz-Test	2.13145	

Tabelle A31 t-Test für die Bodenfeuchtigkeit der behandelten etablierten Bäume

t-Test: Gepaarte zwei Stichproben für Mittelwerte		

	<i>Ursprüngliche</i>	<i>PT</i>
Mittlere	12.70436	13.82572
Abweichung	13.78621	7.470955
Beobachtungen	10	10
Pearson-Korrelation	-0.35008	
Hypothetischer Mittelwert Unterschied	0	
df	9	
t Status	-0.66584	
P(T<=t) Ein-Schwanz	0.261106	
t Kritischer Ein-Schwanz-Test	1.833113	
P(T<=t) zweiseitig	0.522212	
t Kritischer Zwei-Schwanz-Test	2.262157	

Tabelle A32 t-Test für die Bodenfeuchte von unbehandelten etablierten Bäumen

t-Test: Gepaarte zwei Stichproben für Mittelwerte		
	<i>Ursprüngliche</i>	<i>PT</i>
Mittlere	12.86934	12.25257
Abweichung	6.216597	22.19639
Beobachtungen	10	10
Pearson-Korrelation	0.521907	
Hypothetischer Mittelwert Unterschied	0	
df	9	
t Status	0.485303	
P(T<=t) Ein-Schwanz	0.319528	
t Kritischer Ein-Schwanz-Test	1.833113	
P(T<=t) zweiseitig	0.639056	
t Kritischer Zwei-Schwanz-Test	2.262157	

Tabelle A33 t-Test für die organische Substanz der behandelten Jungbäume

t-Test: Gepaarte zwei Stichproben für Mittelwerte		
	<i>Ursprüngliche</i>	<i>PT</i>
Mittlere	5.183441	5.470071
Abweichung	1.732809	2.931192
Beobachtungen	18	18
Pearson-Korrelation	0.759576	
Hypothetischer Mittelwert Unterschied	0	
df	17	
t Zustand	-1.09194	
P(T<=t) Ein-Schwanz	0.145047	
t Kritischer Ein-Schwanz-Test	1.739607	
P(T<=t) zweiseitig	0.290093	
t Kritischer Zwei-Schwanz-Test	2.109816	

Tabelle A34 t-Test für die organische Substanz von unbehandelten jungen Bäumen

t-Test: Gepaarte zwei Stichproben für Mittelwerte		
	<i>Ursprüngliche</i>	<i>PT</i>
Mittlere	5.793303	5.822123
Abweichung	1.899635	2.343431
Beobachtungen	16	16
Pearson-Korrelation	0.6701	
Hypothetischer Mittelwert Unterschied	0	
df	15	
t Zustand	-0.0969	
P(T<=t) Ein-Schwanz	0.462046	
t Kritischer Ein-Schwanz-Test	1.75305	
P(T<=t) zweiseitig	0.924092	
t Kritischer Zwei-Schwanz-Test	2.13145	

Tabelle A35 t-Test für die organische Substanz der behandelten etablierten Bäume

t-Test: Gepaarte zwei Stichproben für Mittelwerte		
	<i>Ursprüngliche</i>	<i>PT</i>
Mittlere	7.406135	9.745411
Abweichung	2.06721	23.49297
Beobachtungen	10	10
Pearson-Korrelation	-0.20402	
Hypothetischer Mittelwert Unterschied	0	
df	9	
t Zustand	-1.38801	
P(T<=t) Ein-Schwanz	0.099265	
t Kritischer Ein-Schwanz-Test	1.833113	
P(T<=t) zweiseitig	0.198529	
t Kritischer Zwei-Schwanz-Test	2.262157	

Tabelle A36 t-Test für die organische Substanz von unbehandelten etablierten Bäumen

t-Test: Gepaarte zwei Stichproben für Mittelwerte		
	<i>Ursprüngliche</i>	<i>PT</i>
Mittlere	7.959611	7.095229
Abweichung	1.616628	1.20853
Beobachtungen	10	10
Pearson-Korrelation	-0.03264	
Hypothetischer Mittelwert Unterschied	0	
df	9	
t Status	1.600595	
P(T<=t) Ein-Schwanz	0.071965	
t Kritischer Ein-Schwanz-Test	1.833113	
P(T<=t) zweiseitig	0.143931	
t Kritischer Zwei-Schwanz-Test	2.262157	

Abb. A1 Chlorophyllgehalt der behandelten jungen Bäume

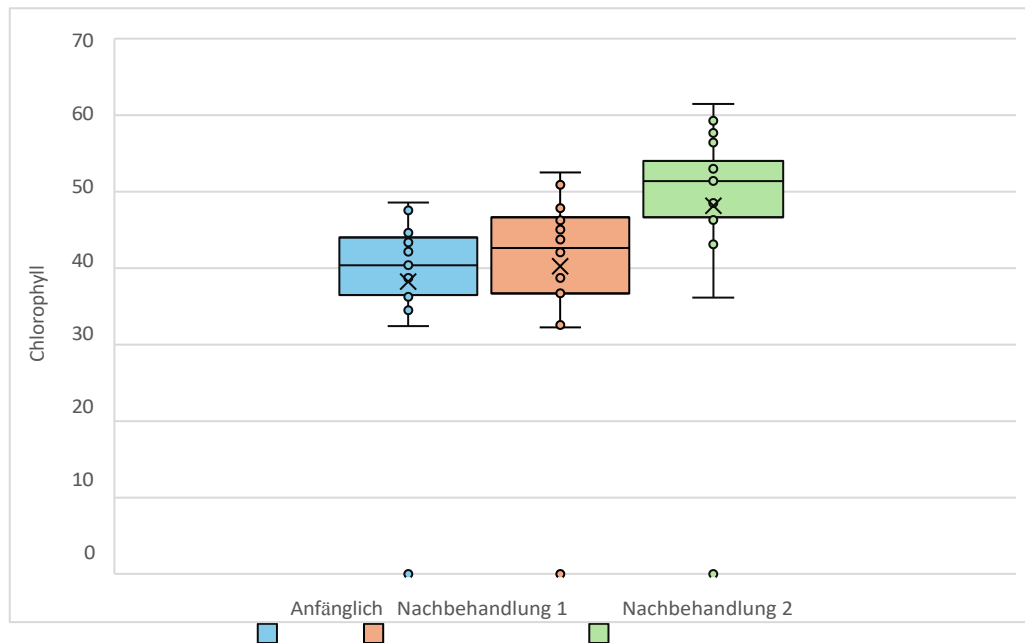


Abb. A2 Chlorophyllgehalt von unbehandelten jungen Bäumen

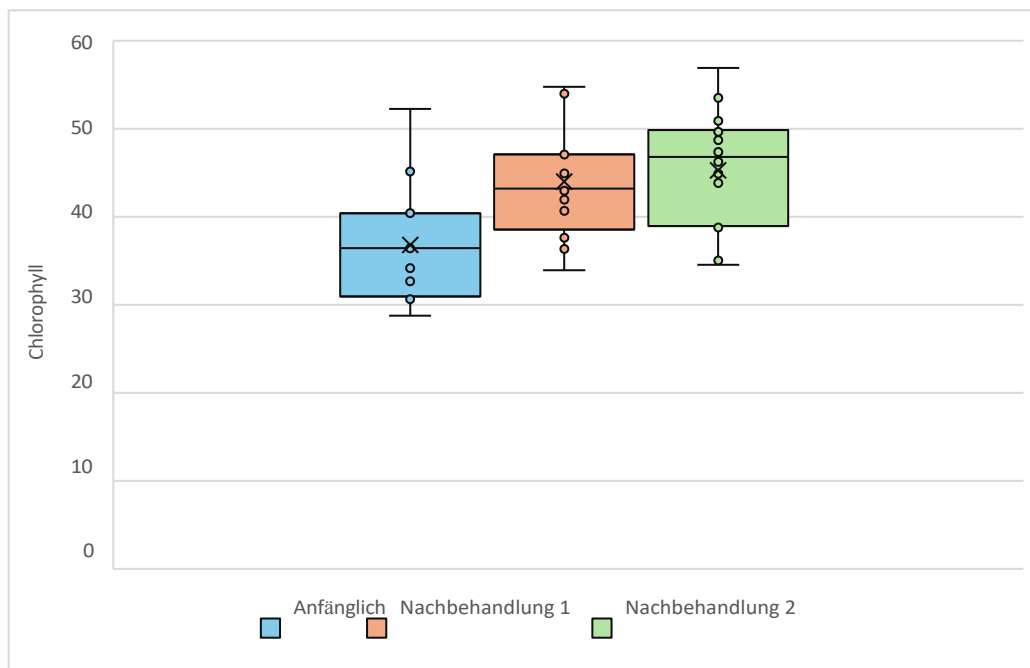


Abb. A3 Chlorophyllgehalt der behandelten etablierten Bäume

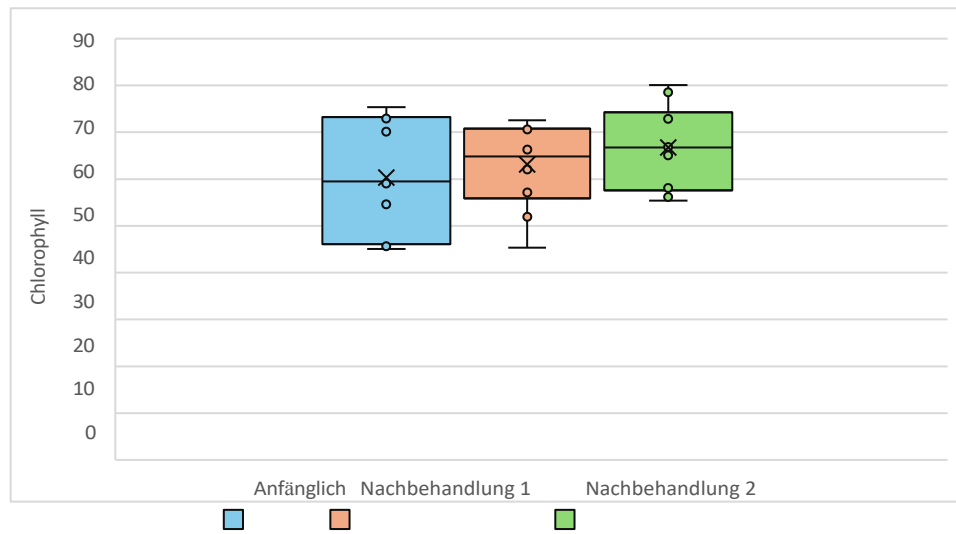


Abb. A4 Chlorophyllgehalt von unbehandelten etablierten Bäumen

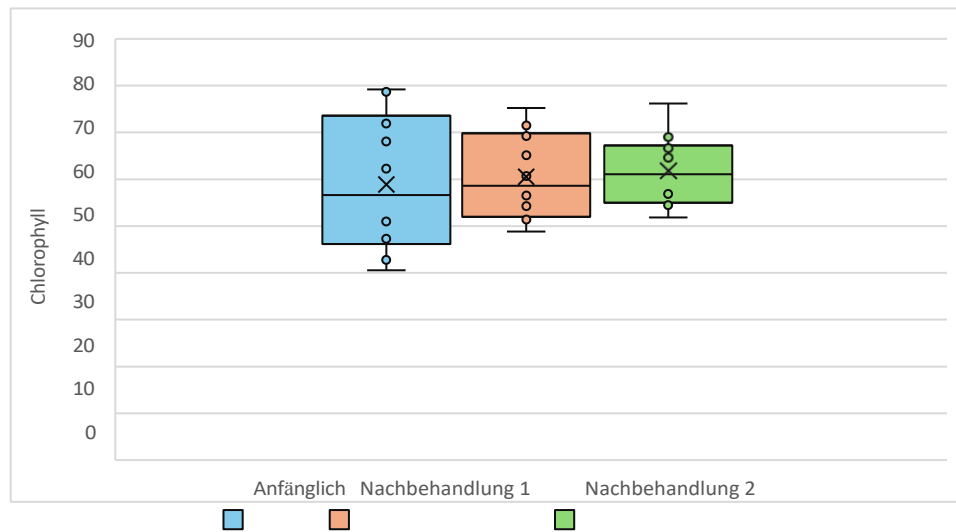


Abb. A5 Verdichtung bei behandelten Jungbäumen

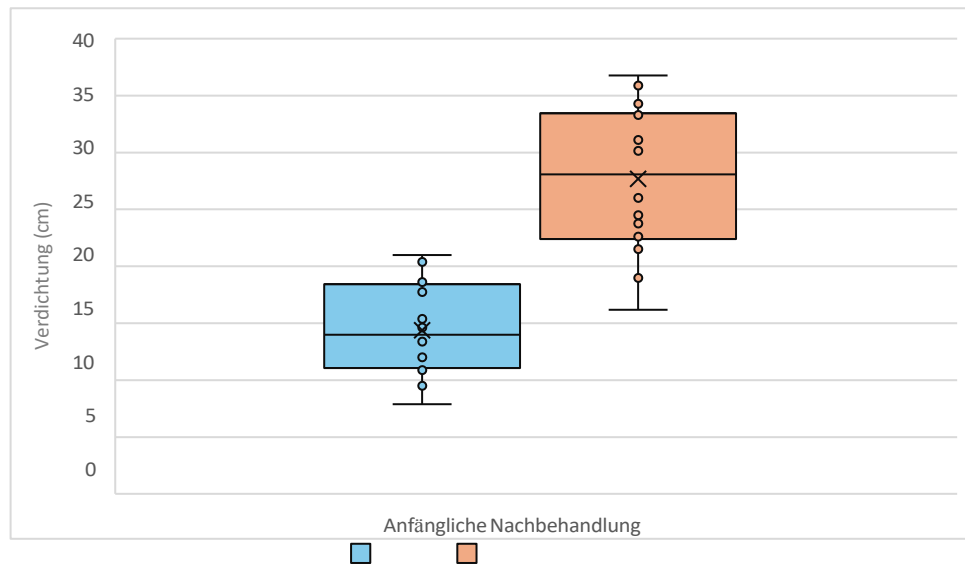


Abb. A6 Verdichtung für unbehandelte junge Bäume

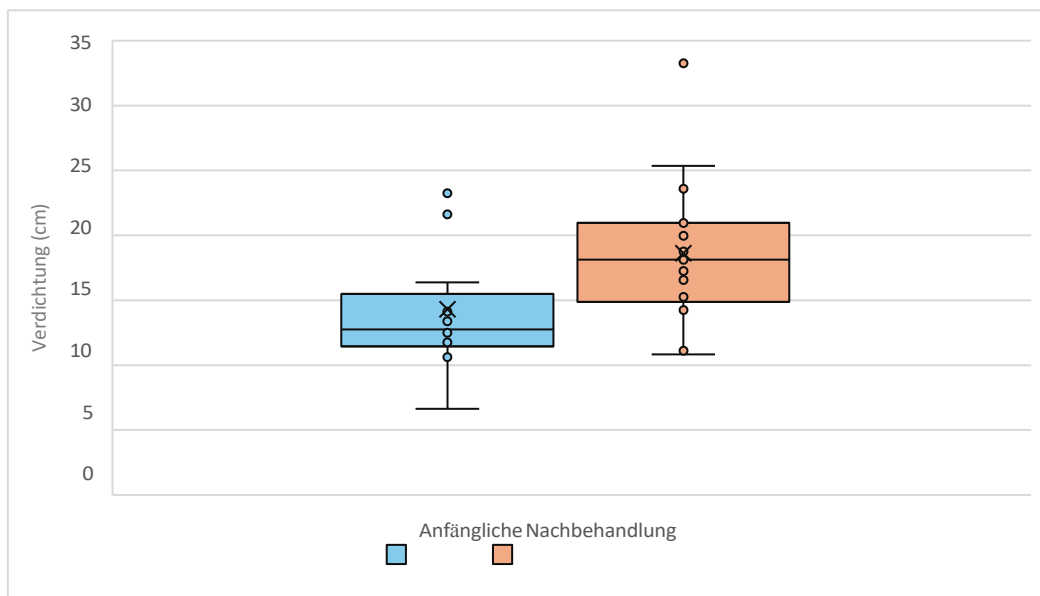


Abb. A7 Verdichtung bei behandelten etablierten Bäumen

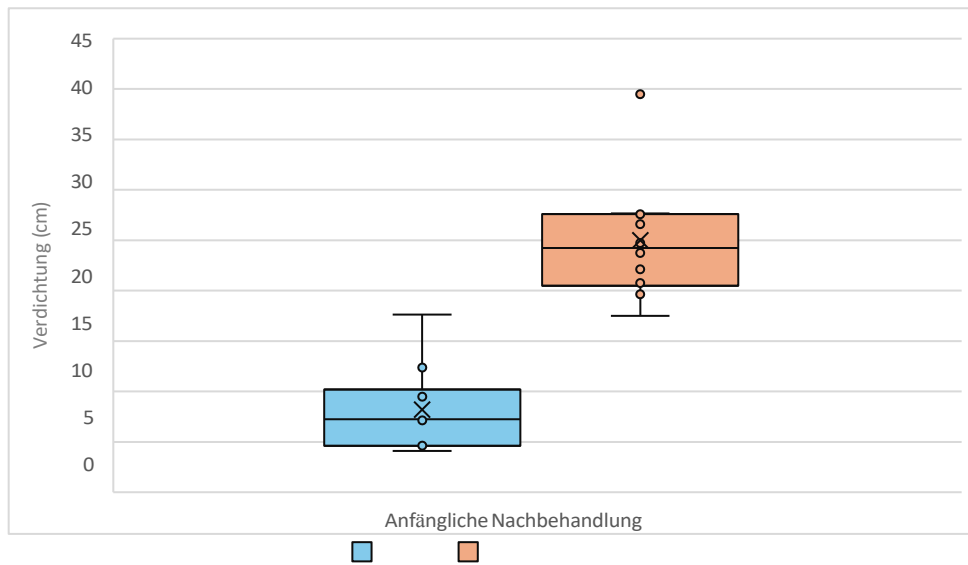


Abb. A8 Verdichtung für unbehandelte etablierte Bäume

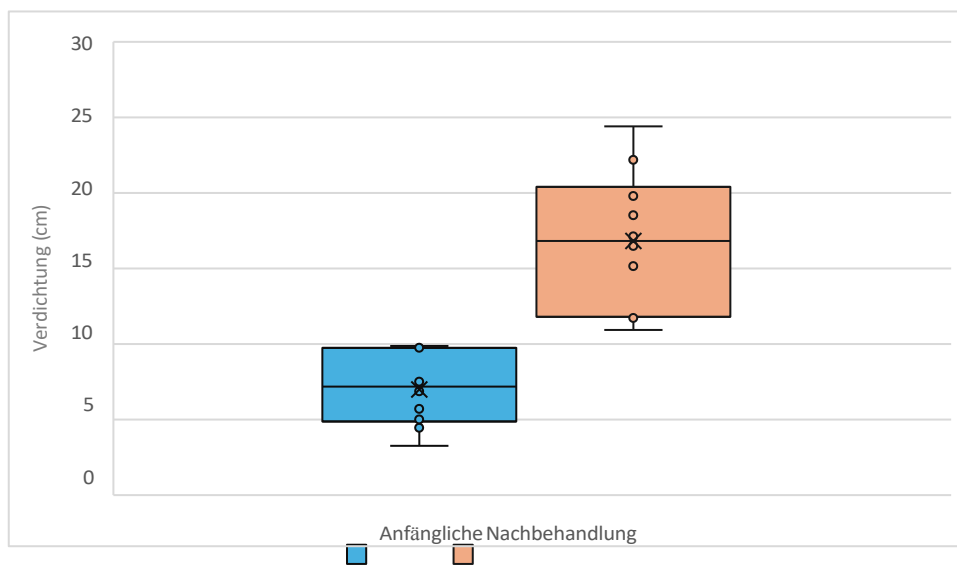


Abb. A9 pH-Wert der behandelten jungen Bäume

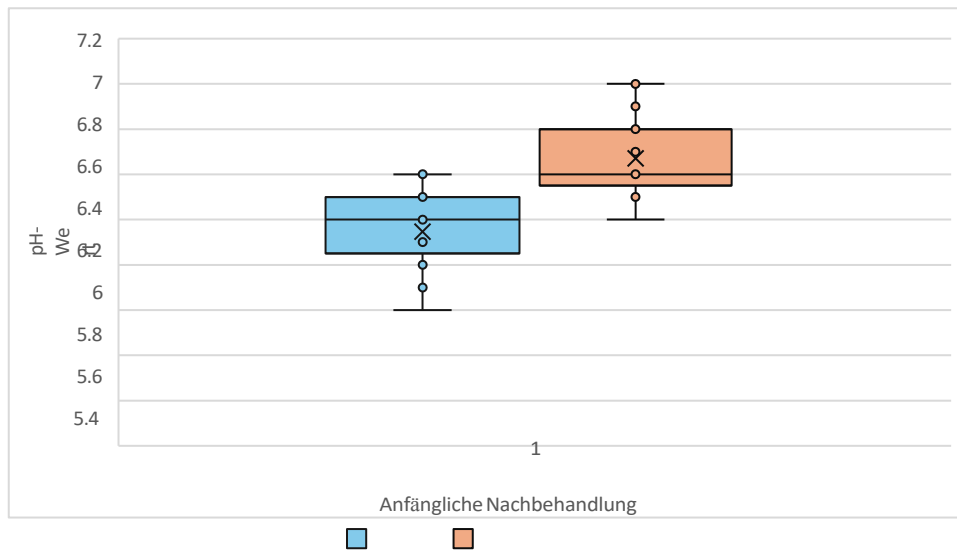


Abb. A10 pH-Wert der unbehandelten jungen Bäume

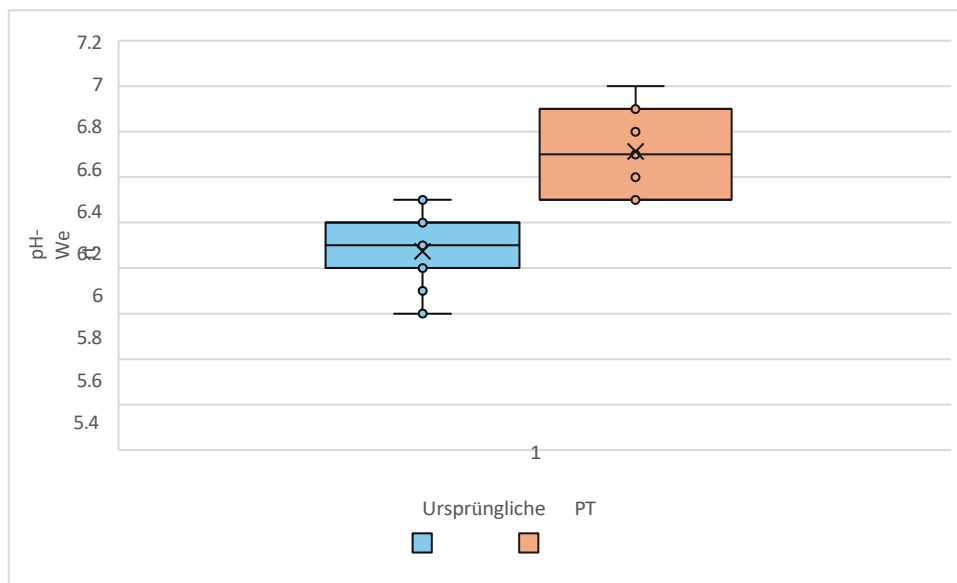


Abb. A11 pH-Wert der behandelten etablierten Bäume

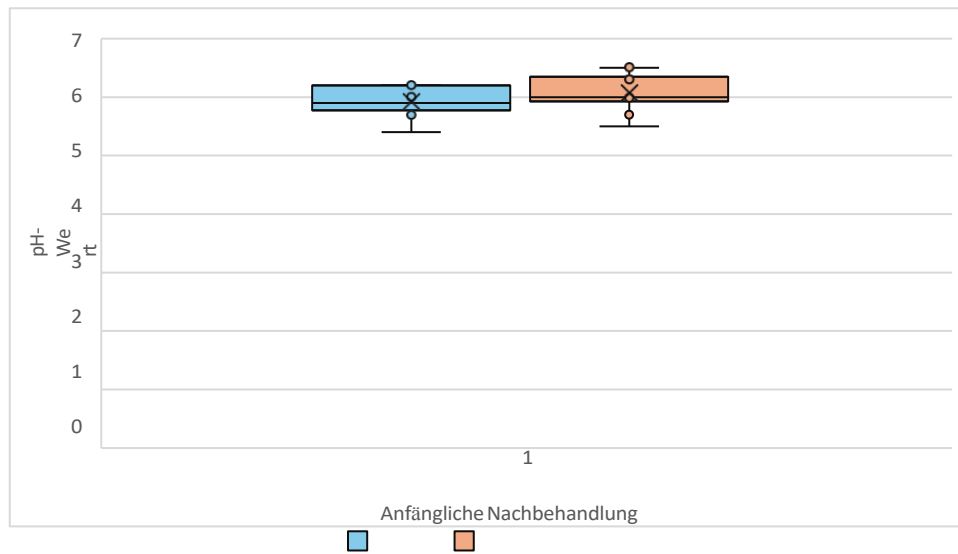


Abb. A12 pH-Wert von unbehandelten etablierten Bäumen

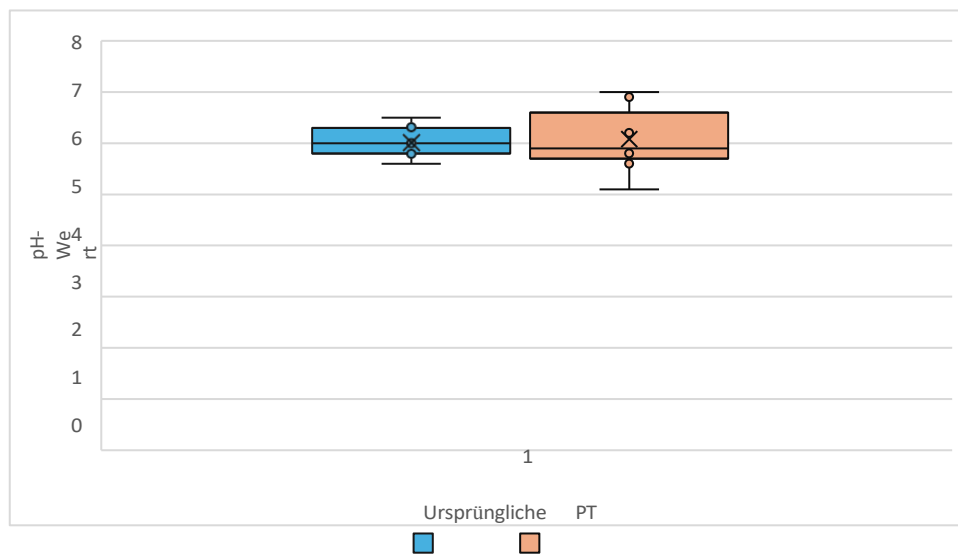


Abb. A13 EC von behandelten jungen Bäumen

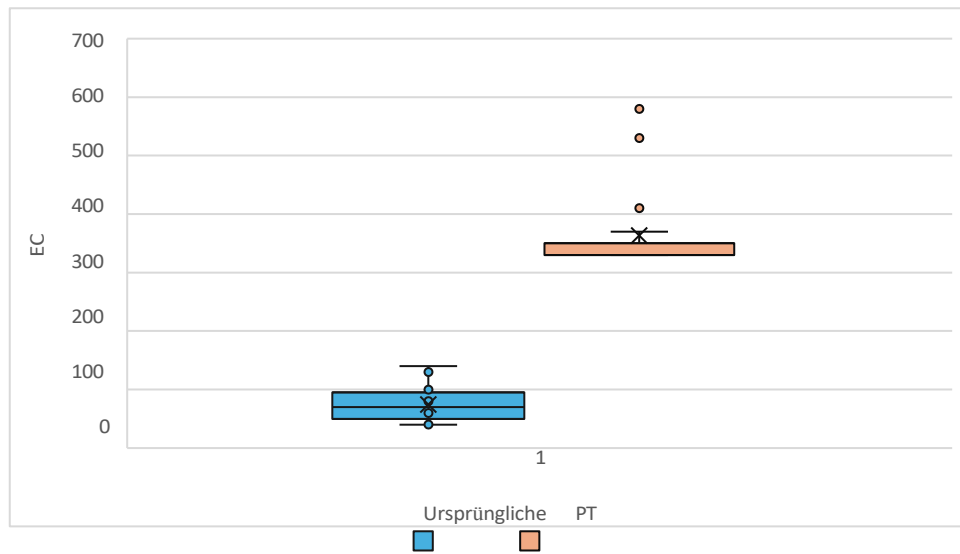


Abb. A14 EC von unbehandelten jungen Bäumen

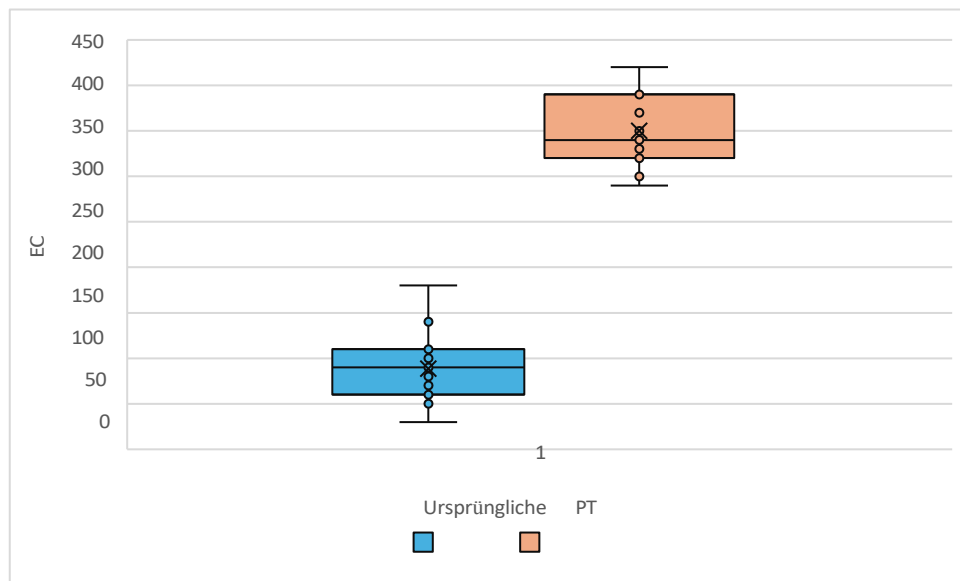


Abb. A15 EC von behandelten etablierten Bäumen

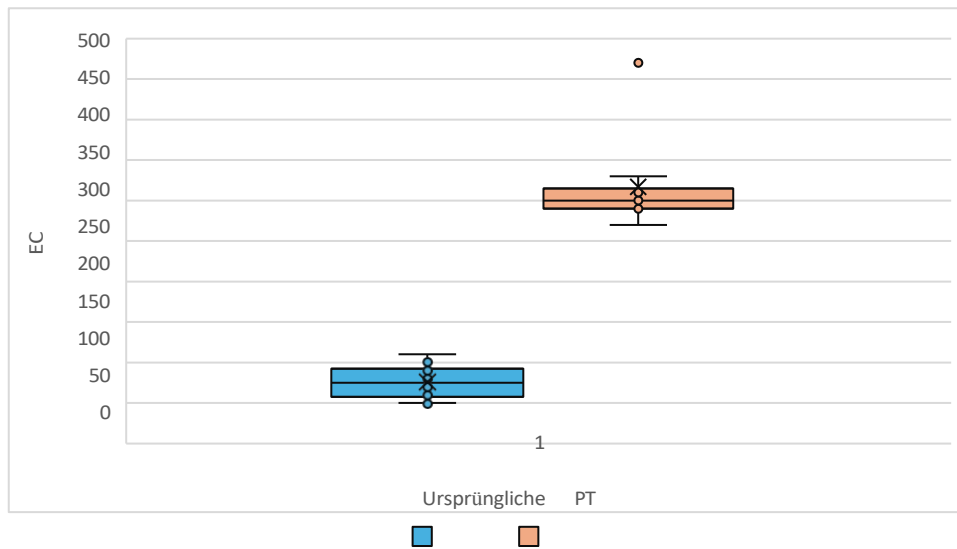


Abb. A16 EC von unbehandelten etablierten Bäumen

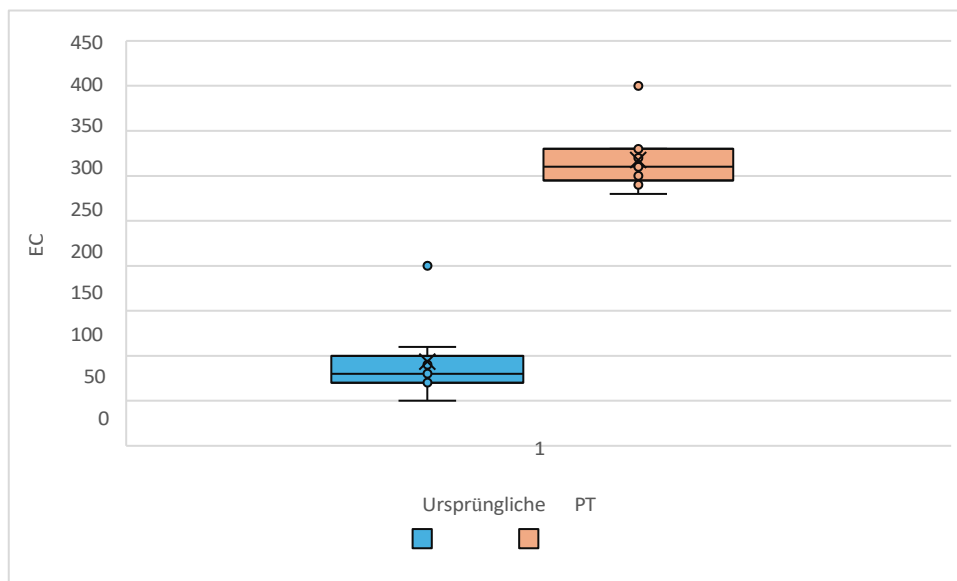


Abb. A17 Bodenfeuchtigkeit der behandelten jungen Bäume

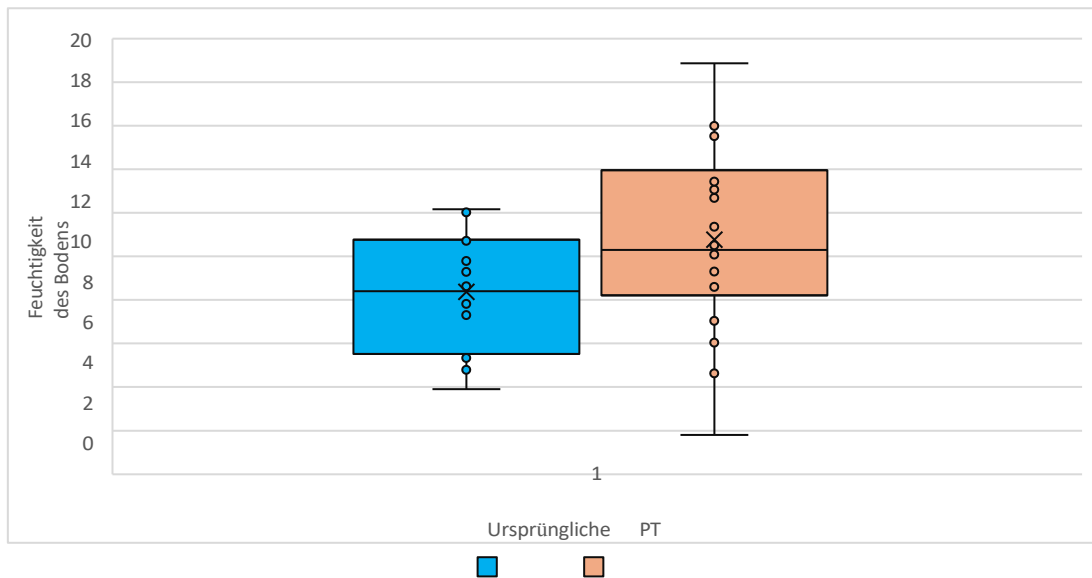


Abb. A18 Bodenfeuchte von unbehandelten jungen Bäumen

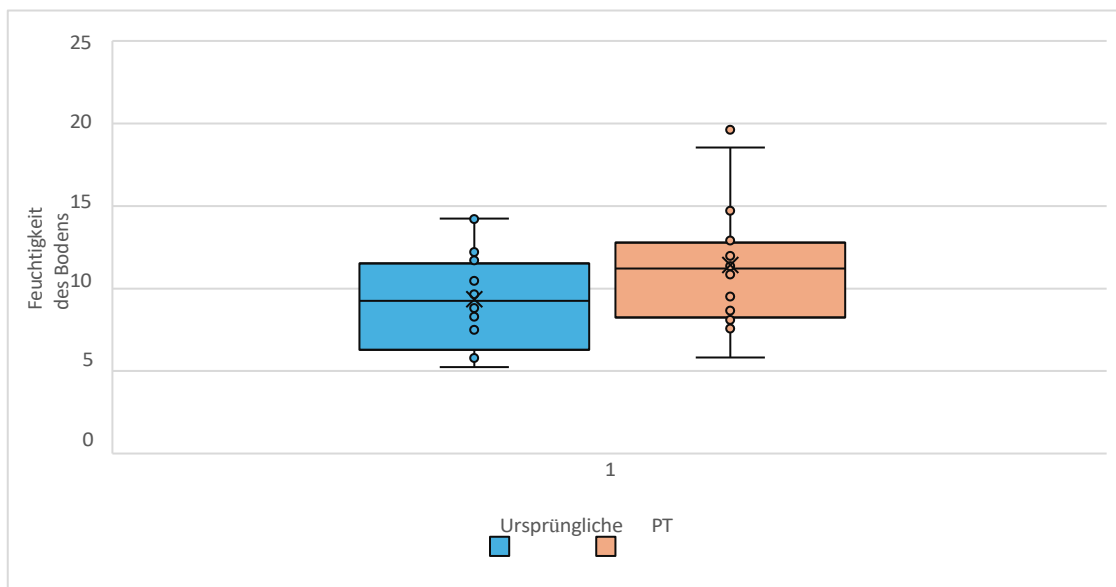


Abb. A19 Bodenfeuchte der behandelten etablierten Bäume

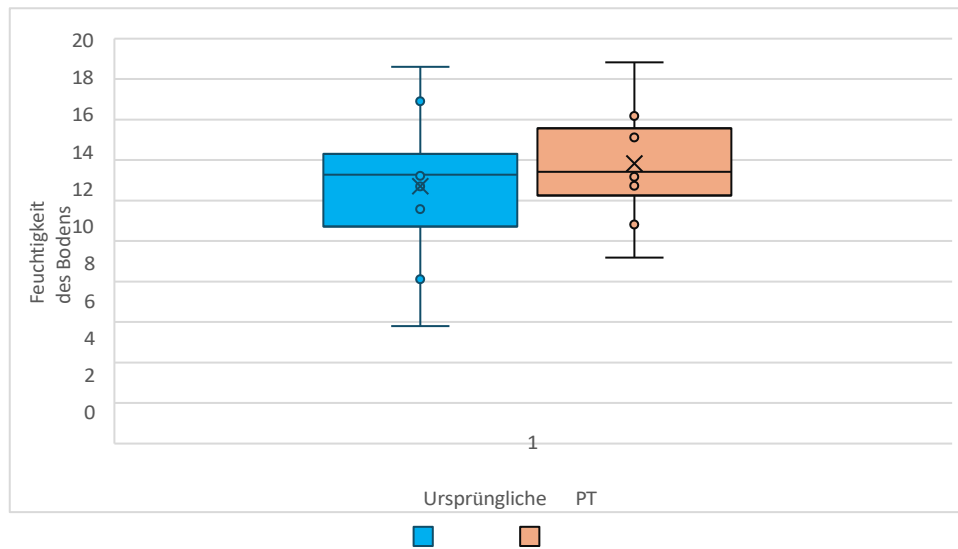


Abb. A20 Bodenfeuchte von unbehandelten etablierten Bäumen

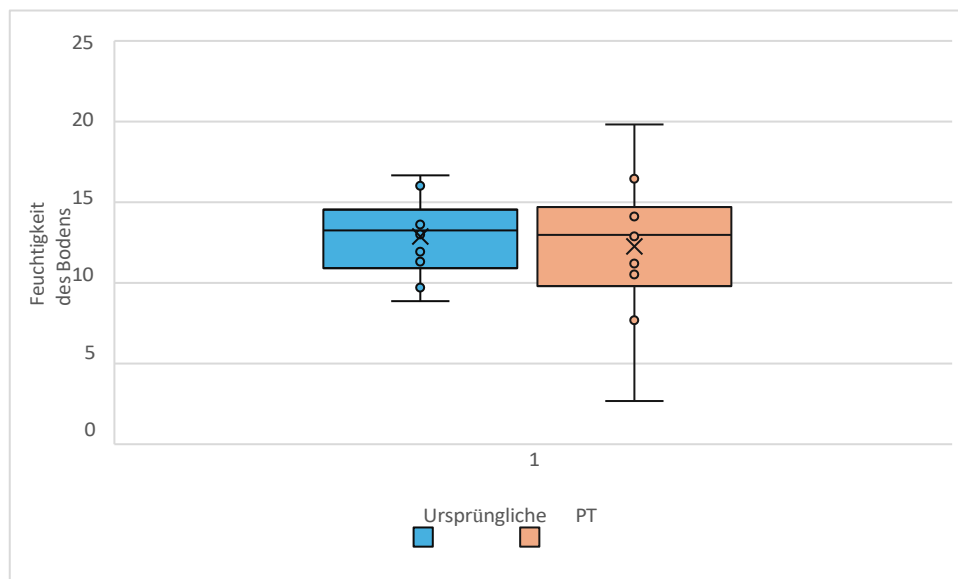


Abb. A21 Organische Substanz der behandelten jungen Bäume

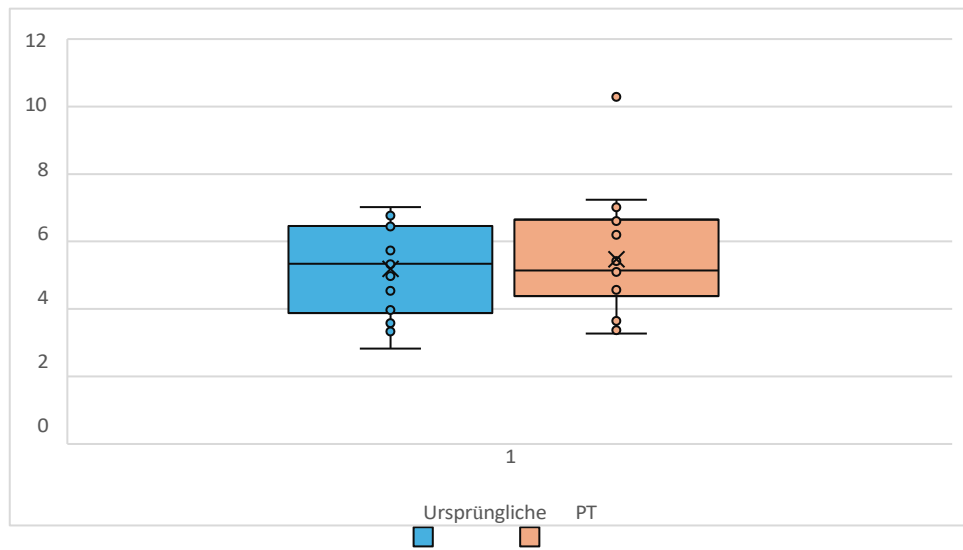


Abb. A22 Organische Substanz von unbehandelten jungen Bäumen

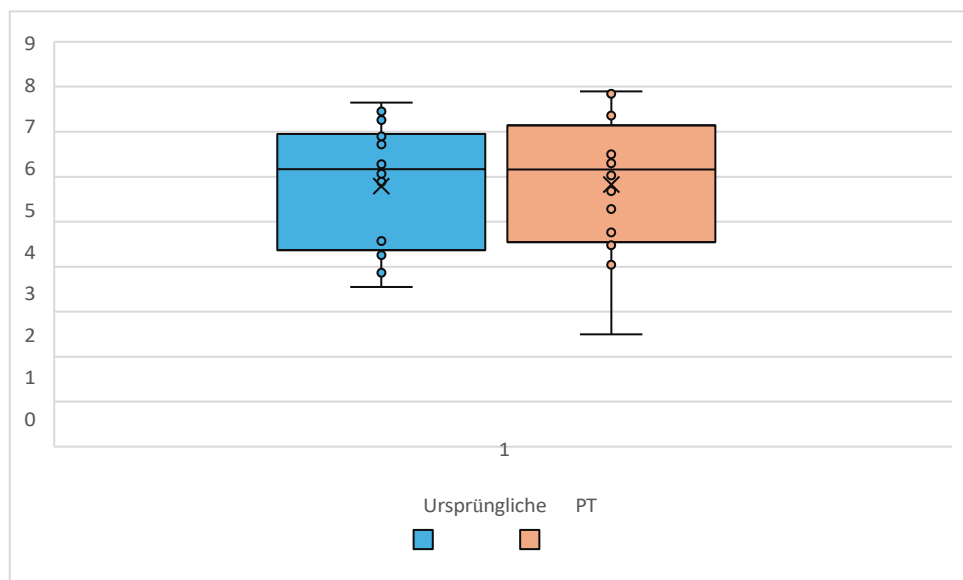


Abb. A23 Organische Substanz der behandelten etablierten Bäume

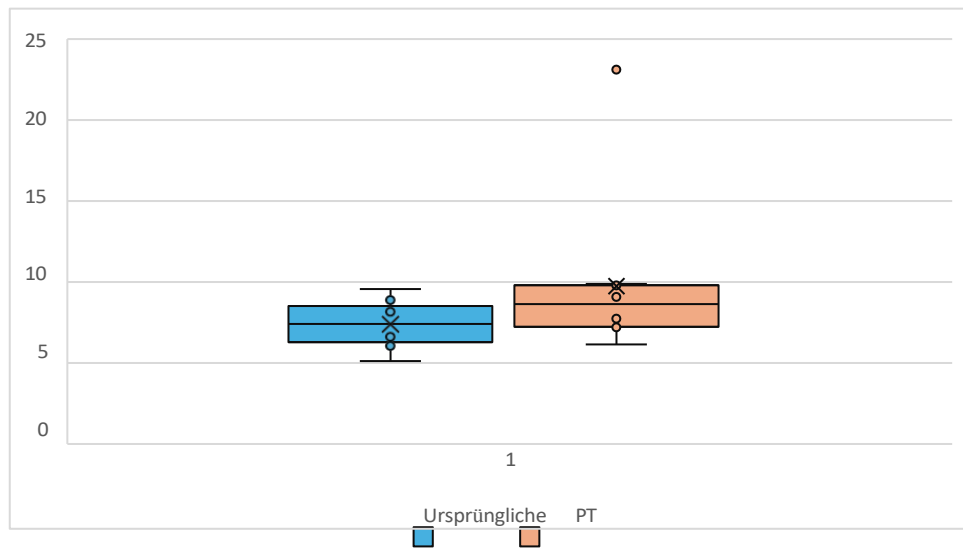


Abb. A24 Organische Substanz von unbehandelten etablierten Bäumen

