

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg  
Naturwissenschaftliche Fakultät



# **Verbesserung der Infiltrationsfähigkeit verdichteter urbaner Böden durch Bodenbelüftung**

## **Masterarbeit**

Vorgelegt von Elias Börner

aus den Geowissenschaften

Matrikelnummer: 22800054

Betreuer: Prof. PhD Johannes Barth

Bearbeitungszeit: 01.04.2025 – 14.10.2025

## **Danksagung**

An dieser Stelle bedanke ich mich recht herzlich bei all denjenigen, die mich während der Anfertigung dieser Masterarbeit unterstützt und dieses Projekt erst möglich gemacht haben.

Mein Dank gebührt zuerst Herrn Prof. PhD Johannes A.C. Barth für die Betreuung, Themenfindung und Begutachtung dieser Masterarbeit. Ich bedanke mich herzlich für die Gedankenanstöße, die konstruktive Kritik und die Gespräche.

Ein großes Dankeschön gebührt besonders Herrn Andreas Brehm von der Firma VOGT Baugeräte GmbH für die Planung und Themenfindung im Vorfeld, für die Bereitstellung der Gerätschaften, sowie für die große Unterstützung bei der Durchführung der praktischen Versuche. Zudem bedanke ich mich auch recht herzlich bei Herrn Josia Völkel von der Firma VOGT Baugeräte GmbH für die Planung und die Hilfe bei der Durchführung der praktischen Versuche, sowie die generelle tatkräftige Unterstützung.

Ich bedanke mich vielmals bei den Herren Detlef Post, Karl Pessler, Oliver Rendl, Claus Heuermann, Ralf Lohr, Thomas Maier, David Bertermann und Oliver Lang, für die Bereitstellung der Testflächen, für die langwierige Planung und Organisation, für die intensive Bewässerung der Flächen und den Ansprechkontakt während der Durchführung der Tests.

Ein Dank gebührt auch Frau Dr. Anna-Neva Visser und Herrn Prof. Dr. Gabriele Chiogna für die Unterstützung und den Kontakt während des Projekts.

Elias Börner

Fürth, 30.09.2025

# Inhaltsverzeichnis

|                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abbildungsverzeichnis .....                                                   | 1  |
| Tabellenverzeichnis .....                                                     | 2  |
| Formeln .....                                                                 | 2  |
| <b>1. Kurfassung</b> .....                                                    | 3  |
| 1.1 Abstrakt.....                                                             | 3  |
| 1.2 Abstract (engl.).....                                                     | 4  |
| <b>2. Einleitung</b> .....                                                    | 5  |
| 2.1 Bodenverdichtung und dessen Auswirkungen.....                             | 5  |
| 2.2 Bodenversiegelung in Deutschland .....                                    | 6  |
| 2.3 Bodenversiegelung in Europa .....                                         | 8  |
| 2.4 Bodenverbesserungsmaßnahmen.....                                          | 9  |
| 2.4.1 Mechanische Tiefenlockerung.....                                        | 9  |
| 2.4.2 Aerifizierung.....                                                      | 9  |
| 2.4.3 Biologische Bodenauflockerung.....                                      | 9  |
| 2.4.4 Chemische Verdichtungsreduktion.....                                    | 10 |
| 2.4.5 Bodenbelüftung per Druckluftinjektion.....                              | 10 |
| <b>3. Methodik</b> .....                                                      | 12 |
| 3.1 Testgebiete .....                                                         | 12 |
| 3.1.1 Weidenberg (Bayreuth).....                                              | 12 |
| 3.1.2 Stadtpark Fürth .....                                                   | 13 |
| 3.1.3 Nürnberg Platnersberg.....                                              | 14 |
| 3.1.4 Erlangen Schlossgarten und Südgelände der FAU Erlangen-Nürnberg .....   | 15 |
| 3.1.5 Eichenhain Fürth.....                                                   | 17 |
| 3.1.6 Bayreuth Hofgarten.....                                                 | 18 |
| 3.2 Bodenbelüftung .....                                                      | 19 |
| 3.3 Bestimmung der Infiltration mit dem Doppelring-Infiltrometer .....        | 21 |
| 3.4 Erstellung des Bodenprofils mit der Pürckhauer-Handsondierung .....       | 23 |
| 3.5 Bestimmung des Organik Anteils durch Glühverlust (Loss on Ignition) ..... | 24 |
| <b>4. Ergebnisse</b> .....                                                    | 25 |
| 4.1 Testdurchlauf in Weidenberg (Bayreuth) .....                              | 25 |
| 4.1.1 Bodenprofil.....                                                        | 25 |
| 4.1.2 Infiltration .....                                                      | 25 |
| 4.1.3 Glühverlust (LOI).....                                                  | 27 |
| 4.2 Testdurchlauf am Nürnberger Platnersberg.....                             | 27 |
| 4.2.1 Bodenprofil.....                                                        | 27 |
| 4.2.2 Infiltration .....                                                      | 27 |
| 4.2.3 Glühverlust (LOI).....                                                  | 30 |

|                                                                          |           |
|--------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.3 Testdurchlauf im Fürther Stadtpark .....                             | 31        |
| 4.3.1 Bodenprofil.....                                                   | 31        |
| 4.3.2 Infiltration .....                                                 | 31        |
| 4.3.3 Glühverlust (LOI).....                                             | 33        |
| 4.4 Testdurchlauf am Südgelände der FAU Erlangen-Nürnberg .....          | 34        |
| 4.4.1 Bodenprofil.....                                                   | 34        |
| 4.4.2 Infiltration (Geo-Injektion).....                                  | 34        |
| 4.4.3 Glühverlust (LOI).....                                             | 37        |
| 4.4.4 Infiltration (VOGT-Lanze) .....                                    | 37        |
| 4.5 Testdurchlauf im Schlossgarten von Erlangen .....                    | 40        |
| 4.5.1 Bodenprofil.....                                                   | 40        |
| 4.5.2 Infiltration .....                                                 | 41        |
| 4.5.3 Glühverlust (LOI).....                                             | 43        |
| 4.6 Testdurchlauf auf der Grünfläche Eichenhain in Fürth.....            | 44        |
| 4.6.1 Bodenprofil.....                                                   | 44        |
| 4.6.2 Infiltration .....                                                 | 44        |
| 4.6.3 Glühverlust (LOI).....                                             | 45        |
| 4.7 Doppeltestdurchlauf im Bayreuther Hofgarten.....                     | 45        |
| 4.7.1 Bodenprofil.....                                                   | 45        |
| 4.7.2 Infiltration .....                                                 | 46        |
| 4.7.3 Glühverlust (LOI).....                                             | 49        |
| <b>5. Diskussion .....</b>                                               | <b>49</b> |
| 5.1 Messbare Effekte der Bodenbelüftung auf die Infiltrationsraten.....  | 49        |
| 5.2 Analyse der Profile, Infiltrationsmessungen und Glühverluste .....   | 50        |
| 5.2.1 Weidenberg .....                                                   | 50        |
| 5.2.2 Nürnberg Platnersberg.....                                         | 51        |
| 5.2.3 Stadtpark Fürth .....                                              | 52        |
| 5.2.4 Südgeländer der FAU-Erlangen .....                                 | 54        |
| 5.2.4.1 Geo-Injektion.....                                               | 54        |
| 5.2.4.2 VOGT-Lanze .....                                                 | 56        |
| 5.2.5 Schlossgarten Erlangen.....                                        | 57        |
| 5.2.6 Eichenhain Fürth.....                                              | 58        |
| 5.2.7 Hofgarten Bayreuth.....                                            | 59        |
| 5.2.7.1 Messstelle 1 (M1) .....                                          | 59        |
| 5.2.7.1 Messstelle 2 (M2) .....                                          | 60        |
| 5.3 Fazit der Wirkung der Bodenbelüftung auf die Infiltrationsraten..... | 61        |
| 5.4 Auswirkung der Bodenbelüftung auf das Bodenleben (Edaphon) .....     | 62        |
| 5.4.1 Kurzfristige Effekte auf das Edaphon .....                         | 62        |
| 5.5.2 Langfristige Effekte auf das Edaphon.....                          | 63        |

|                                                                              |           |
|------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 5.6 Effekte der Druckluftinjektion auf die Flora in verdichteten Böden ..... | 64        |
| 5.7 Auswirkungen der Bodenbelüftung auf die Grundwasserneubildung .....      | 66        |
| 5.8 Geeignete Bodenfeuchte für die Druckluftinjektion .....                  | 67        |
| 5.9 Langlebigkeit der hochdruckinduzierten Effekte .....                     | 68        |
| 5.10 Zuschlagsstoffe .....                                                   | 69        |
| 5.10.1 Poröse Zuschlagsstoffe.....                                           | 69        |
| 5.10.2 Organische Zusatzmaterialien.....                                     | 71        |
| 5.11 Mögliche Risiken für Leitungen und Wurzeln .....                        | 73        |
| 5.12 Aktuelle Anwendung und Verbreitung der Injektionstechnik .....          | 73        |
| <b>6. Schlussfolgerung</b> .....                                             | <b>75</b> |
| Eidesstattliche Erklärung.....                                               | 77        |
| <b>7. Literaturverzeichnis</b> .....                                         | <b>78</b> |
| <b>8. Appendix</b> .....                                                     | <b>86</b> |

## Abbildungsverzeichnis

|                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abbildung 1: Prozentuale Veränderung versiegelter und unversiegelter SuV-Flächen ..... | 7  |
| Abbildung 2: Prozentuale Zunahme von versiegelten SuV-Flächen .....                    | 8  |
| Abbildung 3: Topographische Karte (1:10.000) .....                                     | 12 |
| Abbildung 4: Topographische Karte Fürth (1:10.000) .....                               | 13 |
| Abbildung 5: Testgebiet im Stadtpark Fürth .....                                       | 13 |
| Abbildung 6: Topographische Karte Nürnberg-Erlenstegen (1:10.000) .....                | 14 |
| Abbildung 7: Testgebiet am Platnersberg Nürnberg .....                                 | 14 |
| Abbildung 8: Topographische Karte Erlangen Innenstadt (1:5.000) .....                  | 15 |
| Abbildung 9: Topographische Karte Südgelände der FAU-Erlangen (1:5.000) .....          | 15 |
| Abbildung 10: Teststelle Schlossgarten Erlangen .....                                  | 16 |
| Abbildung 11: Teststelle Südgelände der FAU-Erlangen .....                             | 16 |
| Abbildung 12: Topographische Karte Fürth (1:10.000) .....                              | 17 |
| Abbildung 13: Topographische Karte Bayreuth (1:5.000) .....                            | 18 |
| Abbildung 14: Teststelle im Bayreuther Hofgarten .....                                 | 18 |
| Abbildung 15: Schematische Grafik einer Bodenbelüftung .....                           | 19 |
| Abbildung 16: Aufbau der VOGT-Lanze .....                                              | 21 |
| Abbildung 17: Schemazeichnung der Versuchsaufbauten von Test 1-3 .....                 | 22 |
| Abbildung 18: Das eingebrachte Doppelring-Infiltrometer .....                          | 22 |
| Abbildung 19: Pürckhauer-Hohlmeißel .....                                              | 23 |
| Abbildung 20: Infiltrationsraten Weidenberg .....                                      | 26 |
| Abbildung 21: Wasserstände Nürnberg Platnersberg .....                                 | 28 |
| Abbildung 22: Infiltrationsraten Platnersberg .....                                    | 30 |
| Abbildung 23: Wasserstände Stadtpark Fürth .....                                       | 32 |
| Abbildung 24: Infiltrationsraten Stadtpark Fürth .....                                 | 33 |
| Abbildung 25: Wasserstände Südgelände FAU-Erlangen (Geo-Injektion) .....               | 35 |
| Abbildung 26: Infiltrationsraten Südgelände FAU-Erlangen (Geo-Injektion) .....         | 36 |
| Abbildung 27: Versuchsaufbau der Testreihe mit der VOGT-Lanze .....                    | 38 |
| Abbildung 28: Wasserstände Südgelände FAU-Erlangen (VOGT-Lanze) .....                  | 39 |
| Abbildung 29: Infiltrationsraten Südgelände FAU-Erlangen (VOGT-Lanze) .....            | 40 |
| Abbildung 30: Wasserstände Schlossgarten Erlangen .....                                | 42 |
| Abbildung 31: Infiltrationsraten Schlossgarten Erlangen .....                          | 43 |
| Abbildung 32: Wasserstände M1 Bayreuther Hofgarten .....                               | 46 |
| Abbildung 33: Wasserstände M2 Bayreuther Hofgarten .....                               | 47 |
| Abbildung 34: Infiltrationsraten M1 Bayreuther Hofgarten .....                         | 48 |
| Abbildung 35: Infiltrationsraten M2 Bayreuther Hofgarten .....                         | 48 |

## Tabellenverzeichnis

|                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabelle 1: Testreihe in Weidenberg. Wasserstände und Infiltrationsraten .....        | 26 |
| Tabelle 2: Wasserstände Platnersberg Nürnberg.....                                   | 28 |
| Tabelle 3: Infiltrationsraten Platnersberg Nürnberg .....                            | 29 |
| Tabelle 4: Wasserstände Stadtpark Fürth .....                                        | 31 |
| Tabelle 5: Infiltrationsraten Stadtpark Fürth .....                                  | 32 |
| Tabelle 6: Wasserstände Südgelände FAU-Erlangen (Geo-Injektion).....                 | 34 |
| Tabelle 7: Infiltrationsraten Südgelände FAU-Erlangen (Geo-Injektion) .....          | 36 |
| Tabelle 8: Wasserstände Südgelände FAU-Erlangen (VOGT-Lanze) .....                   | 38 |
| Tabelle 9: Infiltrationsraten Südgelände FAU-Erlangen (VOGT-Lanze) .....             | 39 |
| Tabelle 10: Wasserstände Schlossgarten Erlangen.....                                 | 41 |
| Tabelle 11: Infiltrationsraten Schlossgarten Erlangen .....                          | 42 |
| Tabelle 12: Wasserstände und Infiltrationsraten Eichenhain Fürth.....                | 44 |
| Tabelle 13: Wasserstände M1+M2 Bayreuth Hofgarten .....                              | 46 |
| Tabelle 14: Infiltrationsraten M1+M2 Bayreuth Hofgarten .....                        | 47 |
| Tabelle 15: Prozentuale Veränderungen der Infiltrationsraten aller Messstellen ..... | 49 |

## Formeln

|                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------|----|
| (1) Infiltrationsrate (mm/h) = $\frac{\Delta h}{\Delta t} \cdot 60$ ..... | 23 |
| (2) Glühverlust: $V_{gl} = \frac{m_d - m_{gl}}{m_d} \cdot 100\%$ .....    | 24 |
| (3) Grundwasserneubildung: $R \approx I - ET - \Delta S - Q_{lat}$ .....  | 66 |

# **1. Kurzfassung**

## **1.1 Abstrakt**

Die Verdichtung urbaner Böden schreitet weiter voran, wodurch diese Böden weniger Wasser aufnehmen können und somit Staunässebildung und Schäden an städtischen Bäumen auftreten können. Daher ist es sinnvoll, eine geeignete Methode zur Auflockerung dieser Verdichtung zu finden.

Das Ziel dieser Masterarbeit ist die Bestimmung des messbaren Effekts der Bodenbelüftung durch Druckluftinjektion auf die Infiltrationsfähigkeit von verdichteten urbanen Böden. Dazu wird folgende Forschungsfrage gestellt: Kann die Infiltrationsrate von verdichteten und infiltrationsschwachen Böden mit Hilfe der Druckluftinjektion wesentlich erhöht werden und man somit Verdichtungserscheinungen wie Staunässe verhindern?

Um dies zu ermitteln, wurden an sechs Standorten in Bayern insgesamt acht Messkampagnen durchgeführt. Diese befanden sich hauptsächlich in städtischen Parks oder an Orten mit einer hochfrequenten Begehung und Befahrung, um eine möglichst große Verdichtung vorzufinden. Dabei wurde die Infiltration vor der Belüftung getestet und anschließend der Boden belüftet, um eine Messung auf dieser Fläche vorzunehmen. In Abständen von 50 und 150 cm zur Belüftungsfläche fanden zusätzlich jeweils zwei weitere Tests statt. Zudem wurde an jedem Standort ein Profil des Bodens erstellt und ein Glühverlust der Bodenprobe zur Bestimmung der vorhandenen Organik durchgeführt. Somit wurde die direkte Wirkung des Verfahrens ermittelt, sowie die effektive Reichweite bestimmt und das Profil des Bodens berücksichtigt.

Die Auswertung zeigte eine besonders hohe Steigerung der Infiltration auf stark verdichteten Böden. Hier konnten die Raten im Vergleich zur unbehandelten Messung um 200-1500% zunehmen. Liegt dagegen eine hydraulisch abdichtende Schicht im Boden vor, konnten die Raten um 60-200% deutlich erhöht werden. Auf bereits stark durchlässigen Böden konnte die Rate um 30-60% gesteigert werden. Dies zeigt, dass die Bodenbelüftung bei steigender Verdichtung und stark gesenkter Infiltrationsleistung am effektivsten wirkte. Die Messungen abseits der Belüftungsflächen ergaben eine effektive Reichweite von ca. 50 cm um das Injektionsloch herum. Ein Folgetest zeigte acht Wochen nach der Belüftung noch deutlich gesteigerte Infiltrationsraten von +700% gegenüber dem Vorversuch, jedoch nahm die ursprüngliche Infiltrationssteigerung in diesen acht Wochen aufgrund von erneuter Trittdichtung bereits um 50% ab.

Testdurchläufe in größeren Zeitabständen könnten die mögliche Langzeitwirkung der Bodenlockerung quantifizieren und beurteilen.



## 1.2 Abstract (engl.)

The compaction of urban soils continues to progress, reducing their ability to absorb water and leading to waterlogging and damage to urban trees. It therefore makes sense to find a suitable method for loosening this compaction.

The aim of this thesis is to determine the measurable effect of soil aeration through compressed air injection on the infiltration capacity of compacted urban soils. To this end, the following research question is posed: Can the infiltration rate of compacted and low infiltration soils be significantly increased with the help of compressed air injection, thereby preventing compaction phenomena such as waterlogging?

To determine this, a total of eight measurement campaigns were carried out at six locations in Bavaria. These were mainly located in urban parks or in places with high foot and vehicle traffic in order to find the greatest possible compaction. Infiltration was tested before aeration. The soil was then aerated in order to take a measurement on this area. Two additional tests were carried out at intervals of 50 and 150 cm from the aeration area. In addition, a soil profile was created at each location and a loss on ignition test was carried out on the soil sample to determine the organic content. This allowed the direct effect of the process to be determined, the effective range to be established, and the soil profile to be taken into account.

The evaluation showed a particularly high increase in infiltration on heavily compacted soils. Here, the rates increased by 200-1500% compared to the untreated measurement. If, on the other hand, there is a hydraulically sealing layer in the soil, the rates could be significantly increased by 60-200%. On soils that were already highly permeable, the rate could be increased by 30-60%. This shows that soil aeration was most effective with increasing compaction and on soils with greatly reduced infiltration capacity. Measurements taken away from the aeration areas showed an effective range of approximately 50 cm around the injection hole. A followup test eight weeks after aeration showed significantly increased infiltration rates of +700% compared to the preliminary test, but the original increase in infiltration had already decreased by 50% in these eight weeks due to renewed compaction from foot traffic.

Test runs at longer intervals could quantify and assess the potential longterm effects of soil loosening.

## **2. Einleitung**

### **2.1 Bodenverdichtung und dessen Auswirkungen**

Die Bodenverdichtung ist konkret die Erhöhung der Dichte des Bodens, also die Abnahme des Porenvolumens. Anthropogene Druckausübungen wie zum Beispiel Trittv Verdichtungen, das Befahren der Böden mit schwerem Gerät, oder die gezielte Verdichtung bei der Baugrundvorbereitung führen zu einer Vergrößerung der Dichte des Bodens (Pietsch & Kamieth, 1991). Die dadurch hervorgerufenen Sackungsverdichtungen führen zu einer Absenkung der Höhe und zur Verkleinerung des Volumens des Bodens. Dadurch wird der Luftvolumenanteil verkleinert und der Substanzvolumenanteil erhöht (Bodenverdichtung, 2002). Verdichtete Böden können eine Vielzahl von Problemen hervorrufen, welche in den nächsten Punkten beschrieben werden.

Durch das verminderte Volumen der Poren wird der Wasser- und Lufttransport erheblich behindert. Verdichtete Böden zeigen Infiltrationsraten von  $<1\text{-}5\text{ mm/h}$ . Die Infiltrationsraten werden in stark verdichteten Böden um bis zu 70-90% reduziert (Hamza & Anderson, 2004). Stark verringerte Infiltrationsraten stellen bei Starkregenereignissen eine Gefahr dar, denn das Wasser wird nicht aufgenommen, sondern es fließt oberflächennah ab. Dadurch kann es zu starken Überschwemmungen oder dem Verlust des Bodens kommen (Marahrens, o. D.). Der Oberflächenabfluss kann im Vergleich zu unverdichteten Flächen um den Faktor 3-5 erhöht sein. Kuhnert (2008) kam auf einen Schwellenwertverhalten bei Niederschlagsintensitäten: So wurde bei Mengen von  $10\text{ mm/h}$  auch auf verdichteten Böden der Großteil aufgenommen. Bei Starkregen mit Mengen über  $20\text{ mm/h}$  kam es auf verdichtetem Untergrund direkt zur Abflussbildung, während der unverdichtete Boden weiterhin den Großteil aufnahm. Durch die erhöhte Oberflächenabflussgeschwindigkeit wird zudem die mechanische Abrasion des Bodens verstärkt. So erhöht sich je nach Verdichtungsgrad die Erosionsrate um bis zu 400% gegenüber unverdichteten Böden (Kuhnert, 2008). Langfristig wird durch den Oberflächenabfluss die Grundwasserneubildung gehemmt, die Erosion verstärkt und die Gefahr von lokalen Überschwemmungen erhöht.

Auch auf die Vegetation hat die Bodenverdichtung einen großen negativen Einfluss. Durch die Verdichtung wird das Gesamtporenvolumen reduziert und dadurch die Wasserinfiltration und die Luftzirkulation stark beeinträchtigt (Huang et al., 2006). Ein Sauerstoffmangel in der Rhizosphäre kann zur Wurzelfäulnis, oder zu einer gehemmten Zellatmung und Ansammlung toxischer Stoffwechselprodukte führen, wodurch es zum Wurzelsterben kommen kann (Asif et al., 2023). Der höhere mechanische Widerstand verhindert das effektive Eindringen von Wurzeln, wovon vor allem Feinwurzeln betroffen sind (Unger & Kaspar, 1994).

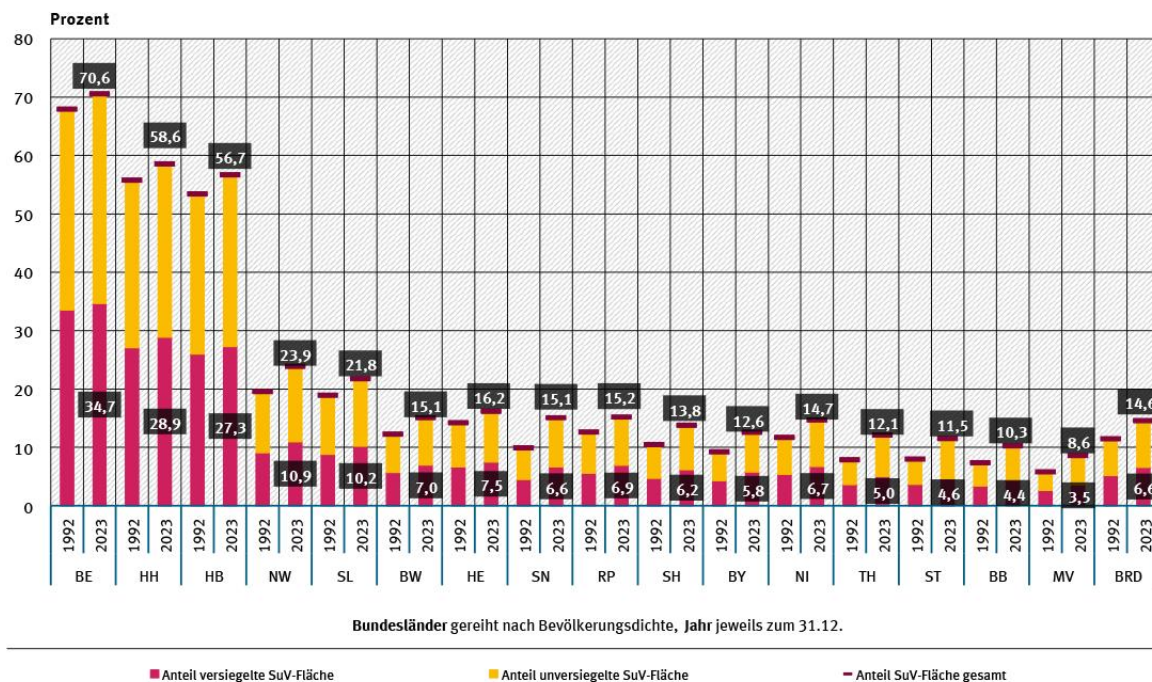
Durch die verkleinerten Infiltrationsraten sind Pflanzen bei Dürren aufgrund von fehlendem Wasser im Boden stärker belastet. Bei langanhaltenden Regenfällen kommt es in verdichteten Böden dagegen stärker zur Bildung von Staunässe, was die Vegetation ebenfalls negativ beeinflusst. In der Ober- und Unterbodenschicht wird die Aufnahme von nötigen Nährstoffen wie Stickstoff, Phosphor und Kalium gehemmt. Die langfristigen Auswirkungen sind ein verlangsamtes Höhen- und Längenwachstum, verkleinerte Kronen mit einer geringeren Blattanzahl und Photosyntheseleistung, stärkere Belastungen bei Dürre oder Überwässerung und letztendlich eine erhöhte Mortalität (Kozlowski, 1999).

Bodenverdichtung kann im Gegensatz zur Bodenversiegelung nur lokal durch Messgrößen wie der Infiltrationsrate, der Lagerungsdichte und den Eindringwiderständen gemessen werden und ist kaum visuell erfassbar, während die Bodenversiegelung durch Bebauungsmaßnahmen ermittelt werden kann. Darum liegen zur Fläche der Bodenverdichtung aktuell nur Schätzungen der Bodenschutz- und Landschaftsverwaltungen vor. Diese schätzen den Anteil der verdichteten Agrarflächen auf ca. 10-20% ein (Marahrens, o. D.). Im Jahr 2024 betrug die Größe der für landwirtschaftliche Zwecke genutzten Fläche in Deutschland ca. 166.000 km<sup>2</sup> (Statistisches Bundesamt, 2024). Damit errechnet sich eine ungefähre Fläche von 16.600 bis 33.200 km<sup>2</sup> an verdichteter Agrarfläche. Neben der Bodenverdichtung auf Agrarflächen tritt diese auch in urbanen Regionen lokal auf. So können Flächen durch intensive Befahrung von Fahrzeugen, oder durch die frequentierte Begehung von Mensch und Tier zunehmend verdichtet werden.

## **2.2 Bodenversiegelung in Deutschland**

Bodenversiegelung ist die absolute Abdichtung der Oberfläche mit nicht permeablen Schichten wie Asphalt und Beton. Die Versiegelung der Böden geht vor allem mit der fortschreitenden Urbanisierung und Ausweitung der Infrastruktur einher. Versiegelte Böden verhindern die Zirkulation von Luft und die Infiltration von Wasser, hemmen damit das Potential für Grundwasserneubildung erheblich und steigern durch den erhöhten Oberflächenabfluss die Hochwassergefahr enorm. Im Jahr 2023 wurden 52.074 Quadratkilometer Fläche von der amtlichen Flächenstatistik als Siedlungs- und Verkehrsfläche ausgewiesen. Von dieser Fläche sind bereits 45% versiegelt (Regionaldatenbank Deutschland, o. D.). Der Anteil der Siedlungs- und Verkehrsflächen an der Gesamtfläche der Bundesrepublik Deutschland betrug 2023 14,6% und der Anteil an versiegelten Flächen 6,57% (Wilke, o. D.).

**Anteil der Siedlungs- und Verkehrsfläche an der Gesamtfläche 2023, davon unversiegelt und versiegelt**  
**Daten für Deutschland insgesamt sowie für die Bundesländer**

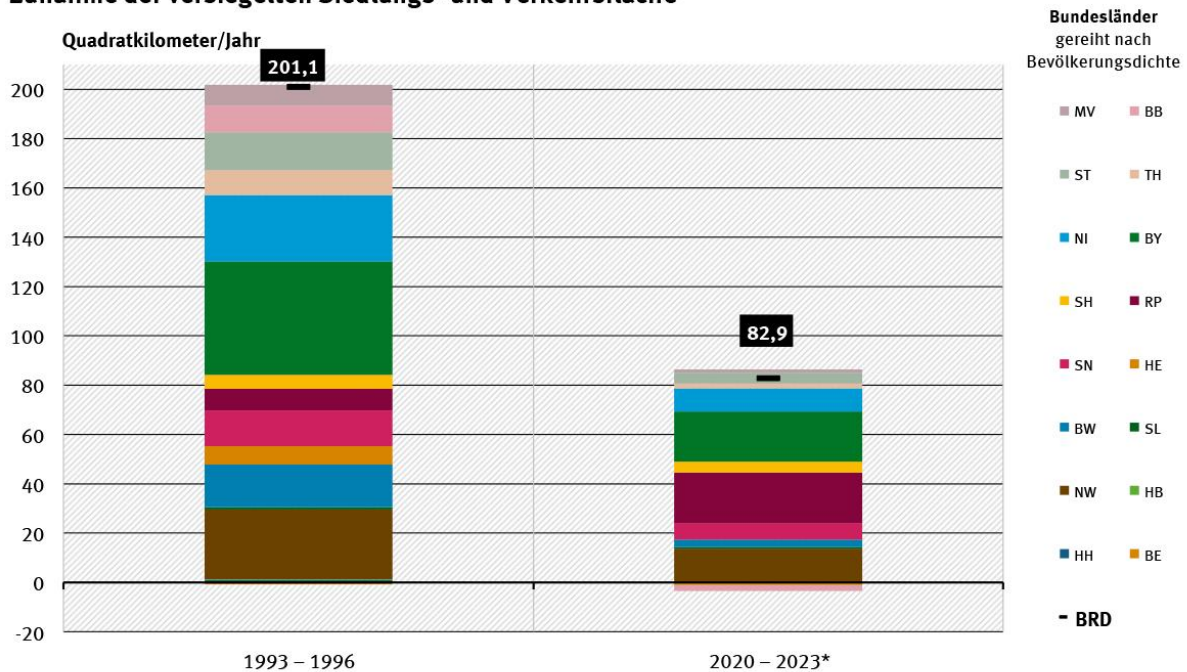


Quelle: Umweltbundesamt, eigene Berechnungen unter Benutzung der Fachserie 3, Reihe 5.1, Bodenfläche nach Art der tatsächlichen Nutzung 2011, Hrsg. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden und Daten aus der Regionalstatistik (für 2023), unter: <https://www.regio>

Abbildung 1: Prozentuale Anteile der versiegelten und unversiegelten Siedlungs- und Verkehrsflächen (SuV) der Bundesländer von 1992 und 2023 (Wilke, o. D.). Versiegelte SuV-Flächen in Rot, unversiegelte SuV-Flächen in Gelb markiert.

Wie man Abbildung 1 entnehmen kann, stieg in jedem Bundesland sowohl der Anteil der versiegelten Siedlungs- und Verkehrsfläche (SuV-Fläche), als auch der unversiegelten SuV-Fläche im Zeitraum von 1992-2023 an. Die Bodenversiegelung hat in Deutschland von 1992 bis 2023 um 5.594 Quadratkilometer zugenommen (Wilke, o. D.). Pro Tag werden ca. 55 Hektar für Siedlungs- und Verkehrsbebauung in Anspruch genommen. Bis 2030 soll dieser Verbrauch auf unter 30 Hektar pro Tag gesenkt werden (Heinrich-Böll-Stiftung et al., 2024). Die jährliche Zunahme der versiegelten SuV-Flächen hat im Vergleich zur Mitte der 1990er Jahre deutlich abgenommen. So stieg die versiegelte Fläche um 201,1 km<sup>2</sup> pro Jahr im Zeitraum von 1993-1996 an. Dagegen wuchs sie um nur 82,9km<sup>2</sup> von 2020-2023 (Wilke, o. D.).

## Zunahme der versiegelten Siedlungs- und Verkehrsfläche



\* Dargestellt sind alle Bundesländer.

Quelle: Umweltbundesamt, eigene Berechnungen unter Benutzung der Fachserie 3, Reihe 5.1, Bodenfläche nach Art der tatsächlichen Nutzung 2011, Hrsg. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden und Daten der Umweltökonomischen Gesamtrechnung der Länder (2023)

Abbildung 2: Übersicht der Zunahme von versiegelten Siedlungs- und Verkehrsflächen in Quadratkilometer pro Jahr der Zeiträume 1993-1996 und 2020-2023 der einzelnen Bundesländer (Wilke, o. D.).

In Abbildung 2 ist der deutliche Trend zu sehen, dass immer weniger neue Fläche zusätzlich versiegelt wird. So ging die Zunahme von neuer versiegelter Fläche vom Zeitraum 2020-2023 im Vergleich zum Zeitraum 1993-1996 um ca. 58,8% zurück.

## 2.3 Bodenversiegelung in Europa

Die gesamte Fläche der Bodenversiegelung in Europa betrug im Jahr 2024 rund 175.664 km<sup>2</sup>. Im Zeitraum von 2015-2018 stieg diese Fläche um ca. 1.297 km<sup>2</sup> an. Dies entspricht einem Anstieg von 0,7% (Sannier et al., 2024).

## **2.4 Bodenverbesserungsmaßnahmen**

### **2.4.1 Mechanische Tiefenlockerung**

Bei der mechanischen Tiefenlockerung wird der Unterboden in Tiefen von 30-60 cm mit einem Tiefenmeißel aufgebrochen um die Porenvolumenanteile zu vergrößern, das Eindringen von Wurzeln in den Boden zu erleichtern, die Infiltrationsfähigkeit zu erhöhen und die Luftzirkulation zu verbessern. Dabei wird der Boden vertikal und horizontal aufgerissen aber nicht gewendet. Nachhaltig ist dieser Eingriff nur bei geeigneter Bodenfeuchte von mäßiger Trockenheit und bei nachfolgender Stabilisierung durch tiefwurzelnende Pflanzen (Blume et al., 2010).

### **2.4.2 Aerifizierung**

Unter Aerifizierung versteht man das mechanische Vorgehen, bei dem mit Hohlzinken kleine Bodenkerne (auch „Cores“ genannt) aus dem zu verbessernden Boden genommen werden, um diesen zu lockern und zu belüften. Hierbei soll die Makroporosität erhöht, sowie die Infiltration und der Gasaustausch verbessert werden (Asady & Smucker, 1989). Die erhöhten Schüttdichten von verdichteten Böden schränken die Sauerstoffdiffusion ein und führen zu Wurzelstress, anaeroben Bedingungen und somit zu einem reduzierten Pflanzenwachstum (Asady & Smucker, 1989). Die durch Aerifizierung entstehenden vertikalen Makroporen verbessern die Sauerstoffversorgung im Wurzelbereich und die Infiltrationsfähigkeit deutlich und regen gleichzeitig durch die steigende Durchwurzelbarkeit des Bodens das Wurzelwachstum an (Weil & Brady, 2016).

### **2.4.3 Biologische Bodenauflockerung**

Biologische Maßnahmen können langfristig dabei helfen Verdichtungen aufzulockern und die Bodenstruktur zu regenerieren. Der gezielte Einsatz von tiefwurzelnenden Pflanzenarten wie z.B. Ölrettich und Lupine erzeugt durch ihre tief in den Unterboden eindringenden Pfahlwurzeln biologische Makroporen, welche von nachfolgenden Pflanzenwurzeln ebenfalls genutzt werden können (Chen & Weil, 2010). Diese biologisch geformten Makroporen verbessern die Durchwurzelbarkeit und die Wasserinfiltration (Williams & Weil, 2004). Das Einbringen von organischer Substanz wie Kompost und Mulch verbessert die Krümelstruktur, fördert die Bodenaggregation und erhöht den Anteil der stabilen Makroporen (Lal, 2009). Böden mit hohem Humusanteil sind weniger Scherfest und leichter durchwurzelbar. Dies kann Verdichtungen effektiv entgegenwirken. Neben tiefwurzelnenden Pflanzen und organischer Substanz nehmen auch Bodenorganismen eine zentrale Rolle in der biologischen Bodenauflockerung ein. So können Organismen durch ihre Grabungen die Entstehung von vertikalen, stabilen Poren fördern.

Dadurch wird die Infiltrationsfähigkeit des Bodens verbessert und die mechanische Widerstandskraft gegen das Wachstum von Wurzeln verringert. Die gebildeten Poren durch Grabungen fungieren zudem als Lüftungskanäle. Sie erhöhen die Rate des Gasaustausches und erzeugen aerobe Bedingungen. Eine große Regenwurmpopulation führt nachweislich zu einer starken Reduktion der Bodendichte und zu einer vergrößerten Infiltrationsleistung (Edwards & Bohlen, 1996). Des Weiteren bilden mikrobielle Prozesse, welche von organischer Substanz angeregt werden, stabile Bodenaggregate durch Bindemittel wie Polysaccharide. Pilze und Bakterien tragen somit indirekt zur Permeabilitätssteigerung und Auflockerung bei (Bender et al., 2016).

#### **2.4.4 Chemische Verdichtungsreduktion**

Auch chemische Methoden zur Auflockerung und Verbesserung der Bodenstruktur können gezielt eingesetzt werden, um die Dispergierung zu verhindern und die Aggregatbildung anzuregen. So werden Calciumsalze, meist Calciumsulfat ( $\text{CaSO}_4$ ), in den Boden eingebracht. Calciumsulfat verbessert effektiv die Struktur von Böden mit hohem Natriumgehalt (sodische Millieus), da die Natriumionen durch Calcium substituiert werden und dieser Ionenaustausch die Quellung und Dispergierung verringert (Sumner, 1993). Die Verbesserung im Porengefüge erhöht die Infiltrationsrate, sowie die Luftzirkulation in verdichteten Böden. Organische Säuren und huminstoffhaltige Substrate finden ebenfalls Anwendung in der chemischen Auflockerung. Sie werden als chemische Chelatoren genutzt, welche die Mobilisierung von Nährstoffen fördern und die Kationenaustauschkapazität (CEC) verbessern. Huminstoffe sind zudem förderlich auf die mikrobielle Aktivität und unterstützen so zusätzlich die biologische Auflockerung und Steuerung des Bodens (Stevenson, 1994). Auch eine pH-Steigerung durch das Einbringen von Kalk ( $\text{CaCO}_3$ ) erzeugt auf versauerten Böden einen positiven Effekt für die Bodenstrukturstabilisierung. Die pH-Anhebung verbessert die Nährstoffverfügbarkeit und Aufnahmefähigkeit von Mikroorganismen und steigert somit die mikrobielle Aktivität. Dadurch wird, wie in Kapitel 2.4.3 beschrieben, der Anteil an Makroporen vergrößert und die Entwicklung von stabilen Krümelstrukturen gesteuert (Haynes & Naidu, 1998).

#### **2.4.5 Bodenbelüftung per Druckluftinjektion**

Mit diesem Verfahren wird unter Drücken von bis zu 10-12 bar komprimierte Luft in den Boden injiziert. Durch die hohen Scherkräfte wird der Boden in situ aufgelockert, wobei Wurzeln weitestgehend unbeschädigt bleiben. Die dabei entstehenden sekundären Porenräume und Lüftungskanäle steigern die Luft- und Wasserzirkulation im Boden deutlich und verringern die Schüttdichte.

Wie bereits Costello & Jones im Jahre 2003 schrieben, verschiebt die Druckluftinjektion vor allem in den oberen 30-50 cm des Bodens die Porenvolumenverteilung zugunsten der Makroporen und steigert somit die Permeabilität und die Wurzelatmung. Der Vorteil dieses Verfahrens liegt in der Erhaltung der Bodenstruktur, bei der die verdichteten Schichten durchdrungen und geöffnet werden (Costello & Jones, 2003). Das Gleichzeitige Einbringen von porösem Granulat wie dem Kieselgur Terramol bietet neben der mechanischen Auflockerung auch den Vorteil der nachhaltigen Stabilisierung der Bodenstruktur. Die Luft- und Wasserpermeabilität kann durch das Granulat, bei gleichzeitiger Drainage durch die Wasserspeicherung, erhöht werden. Zusätzlich können auch organische Verbesserungssubstrate wie Biochar, Komposte oder huminstoffhaltige Granulate eingesetzt werden. Diese sollen dort die Bodenporosität und die Wasserspeicherkapazität erhöhen (Lehmann & Joseph, 2015). Tonminerale wie Zeolith und Vermiculit können gezielt eingesetzt werden, um die Kationenaustauschkapazität zu erhöhen (Glaser et al., 2002). Dies verbessert die Nährstoffverfügbarkeit und reduziert deren Auswaschung, stabilisiert den pH-Wert des Bodens und stimuliert damit das Pflanzenwachstum (Lal & Shukla, 2004). Die beschriebenen Bodenzusatzstoffe können direkt mit der Luftdruckinjektion in den Boden eingeleitet werden und anschließend in das entstandene, vertikale Lüftungsloch verfüllt werden, um dieses zu schließen. Mehr zu den Zusatzstoffen siehe 5.10.

Die Bodenbelüftung per Druckluftinjektion kombiniert mit der Einbringung des Granulats Terramol ist die zentrale Bodenverbesserungsmaßnahme, welche in den Versuchskampagnen dieser Arbeit angewandt wurde. In den folgenden Kapiteln wird das Verfahren präziser erläutert und begleitende Infiltrationsmessungen vorgestellt.

Dadurch soll die Forschungsfrage dieses Projekts beantwortet werden, ob die Infiltrationsrate von verdichteten und infiltrationsschwachen Böden mit Hilfe der Druckluftinjektion deutlich erhöht werden kann und man somit Verdichtungserscheinungen wie Staunässe verhindern kann.

Des Weiteren findet in der Diskussion ein Exkurs über die auftretenden Begleiteffekte der Bodenbelüftung auf die Flora und Fauna im Boden statt, sowie über mögliche Auswirkungen auf die Grundwasserneubildung.



### 3. Methodik

Um die Forschungsfrage dieser Arbeit zu beantworten, wurden mehrere Feldversuche an verschiedenen Standorten in Franken durchgeführt. Diese Feldversuche setzen sich jeweils aus vier Versickerungstests, der Erstellung eines 100 cm Profils durch eine Handsondierung und der Bestimmung des Organik Anteils des Bodens durch den Glühverlust zusammen. Die Standorte der Tests sind jeweils aufgrund von maschineller Befahrung, absichtlicher Verdichtung, oder durch intensive Begehung vermutlich stark verdichtete Flächen. Durch Infiltrationsmessungen vor und nach der Bodenbelüftung soll sich die Auswirkung der Druckluftinjektion auf die Infiltrationsleistung der geschädigten Böden zeigen.

#### 3.1 Testgebiete

##### 3.1.1 Weidenberg (Bayreuth)

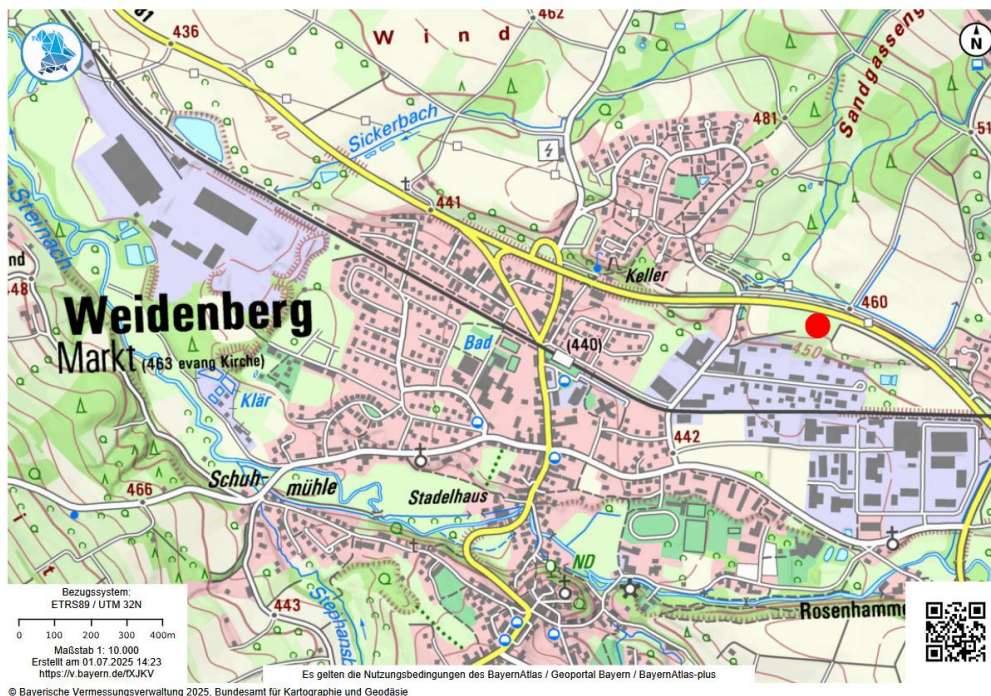


Abbildung 3: Topographische Karte von Weidenberg bei Bayreuth mit dem rot markiertem Testgebiet. Maßstab: 1:10.000. (Bayerische Vermessungsverwaltung, 2025).

In Weidenberg wurden an den Koordinaten  $49^{\circ}56'38.7''\text{N}$   $11^{\circ}43'56.3''\text{E}$  ein Kontrolltest vor der Bodenbelüftung und drei Tests nach der Bodenbelüftung in gewählten Abständen durchgeführt. Mit der Pürckhauer-Handsondierung wurde zusätzlich ein Profil des lokalen Bodens im Testgebiet aufgenommen und ausgewertet. Des Weiteren wurde eine Probe des Bodens genommen und im Labor anhand des Glühverlusts auf seinen Organik Anteil untersucht. Die genauen Vorgehensweisen werden in den Kapiteln 3.2 bis 3.5 beschrieben.

### 3.1.2 Stadtpark Fürth

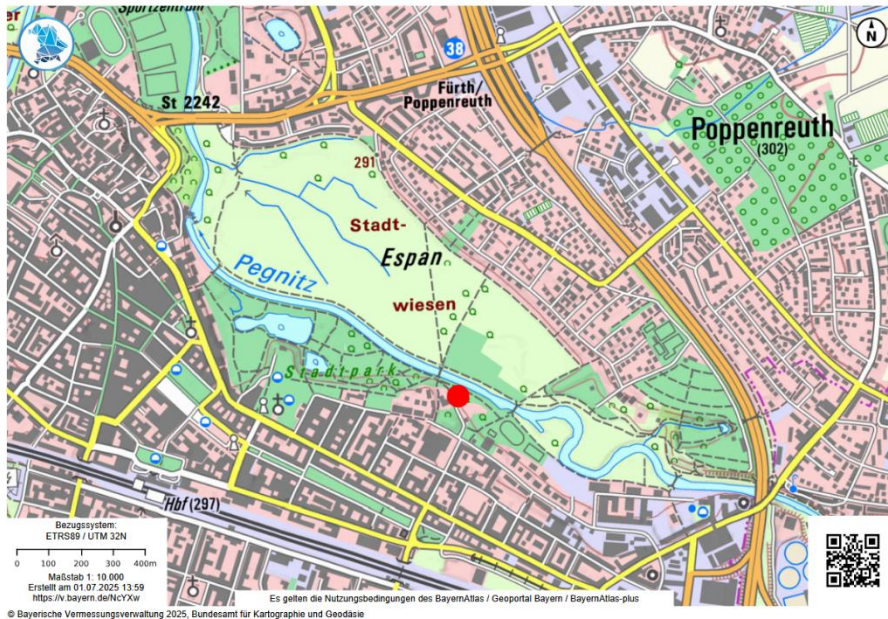


Abbildung 4: Topographische Karte von Fürth mit dem rot markiertem Testgebiet im Stadtpark. Maßstab: 1:10.000. (Bayerische Vermessungsverwaltung, 2025)

Im Fürther Stadtpark wurden an den Koordinaten  $49^{\circ}28'20.5''\text{N}$   $11^{\circ}00'11.1''\text{E}$  ebenfalls vier Versickerungstest nach dem in 3.1.1 beschriebenen Muster verrichtet. Auch in dieser Testreihe wurde die Handsondierung zur Erstellung des Profils genutzt und der Glühverlust zur Bestimmung des Organik Anteils durchgeführt.



Abbildung 5: Testgebiet im Fürther Stadtpark.



### 3.1.3 Nürnberg Platnersberg

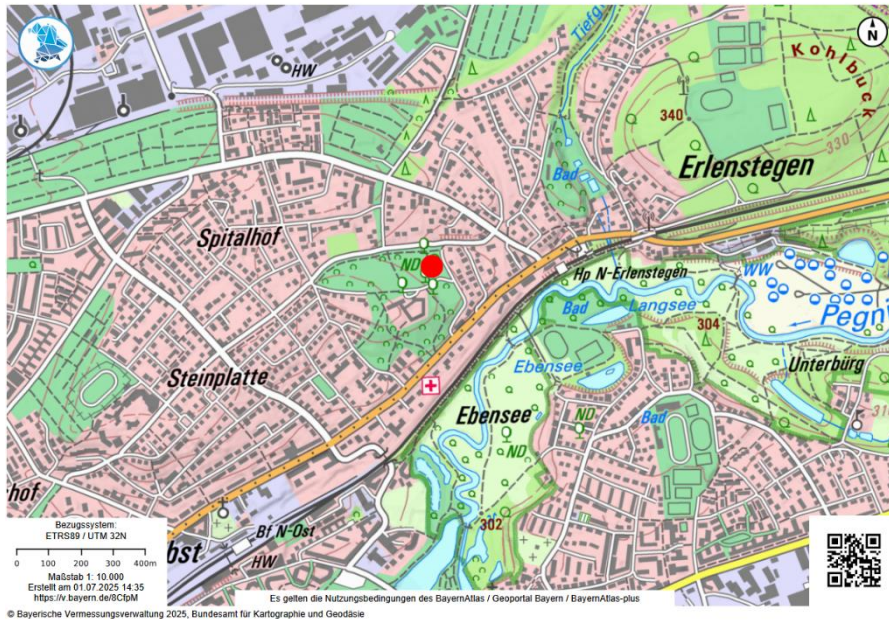


Abbildung 6: Topographische Karte von Nürnberg Erlenstegen mit dem rot markiertem Testgebiet am Platnersberg. Maßstab: 1:10.000. (Bayerische Vermessungsverwaltung, 2025)

Am Platnersberg im Nürnberger Stadtteil Erlenstegen wurden an den Koordinaten  $49^{\circ}28'18.5''\text{N}$   $11^{\circ}07'48.6''\text{E}$  vier Versickerungstests durchgeführt, sowie ein Profil mit Hilfe der Handsondierung erstellt und der Organik Anteil des Bodens anhand des Glühverlusts ermittelt.



Abbildung 7: Testgebiet am Nürnberger Platnersberg.



### 3.1.4 Erlangen Schlossgarten und Südgelände der FAU-Erlangen-Nürnberg

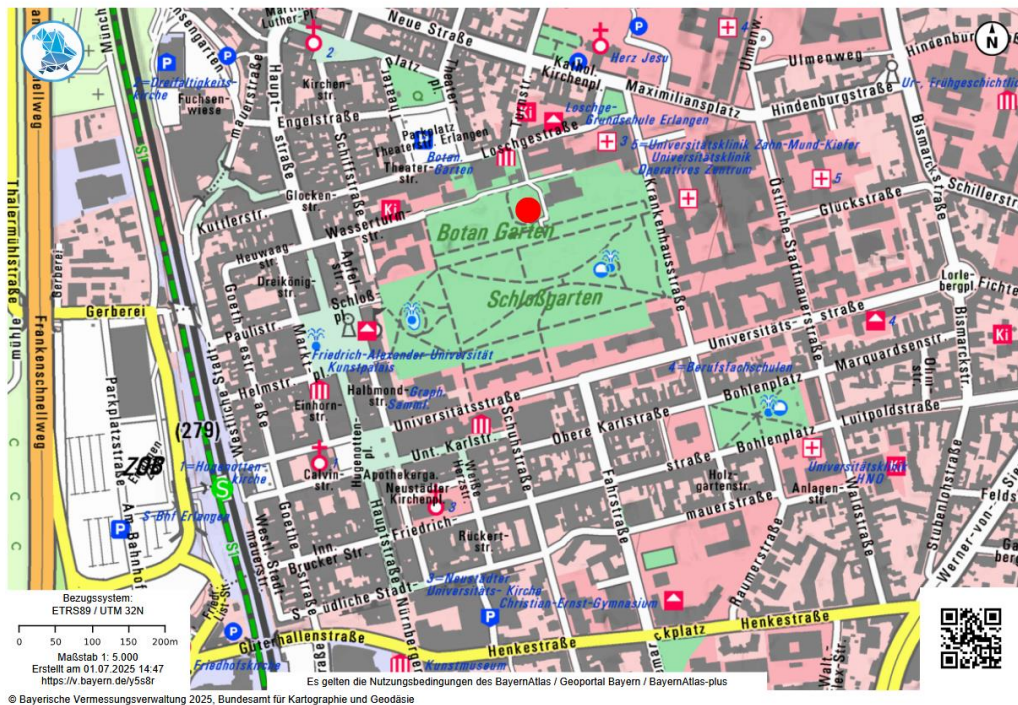


Abbildung 8: Topographische Karte der Erlanger Innenstadt mit dem rot markiertem Testgebiet im Schlossgarten. Maßstab: 1:5.000. (Bayerische Vermessungsverwaltung, 2025)

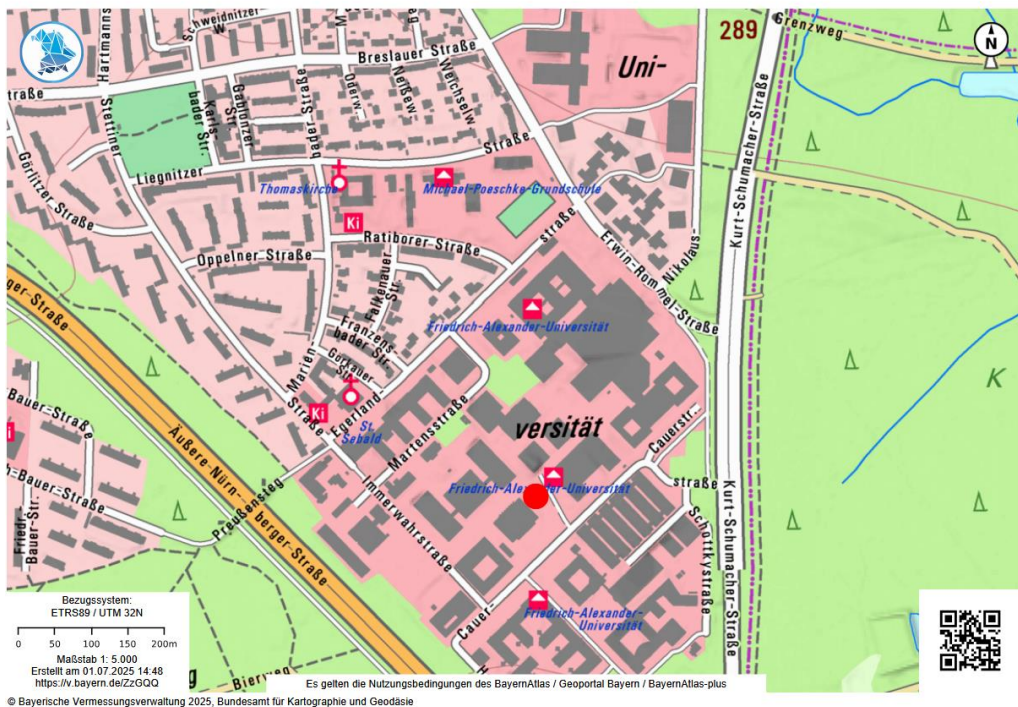


Abbildung 9: Topographische Karte des Südgeländes der FAU in Erlangen mit dem rot markiertem Testgebiet. Maßstab: 1:5.000. (Bayerische Vermessungsverwaltung, 2025)

In Erlangen wurden auf der Messstelle im Schlossgarten an den Koordinaten 49°35'57.2"N 11°00'27.2"E und der Messstelle im Südgelände der FAU bei 49°34'22.2"N 11°01'40.6"E jeweils die Versickerungstests, die Handsondierung und die Bestimmung des Organik Anteil des Bodens durchgeführt. Am Schlossgarten wurde zudem ein Folgeversickerungstest acht Wochen nach der Bodenbelüftung aufgenommen, um die Langzeitwirkung zu ermitteln. Zusätzlich wurde am Südgelände der FAU in Erlangen eine weitere Testreihe der Infiltrationsmessung vollzogen. Bei dieser wurde der Boden nicht wie bei allen anderen Teststellen mit der Geo-Injektion belüftet, sondern ein dichteres Raster mit der VOGT-Lanze erstellt. Der genaue Versuchsaufbau und dessen Ergebnisse werden in Kapitel 4.4.4 genauer beschrieben.



Abbildung 10: Teststelle im Erlanger Schlossgarten

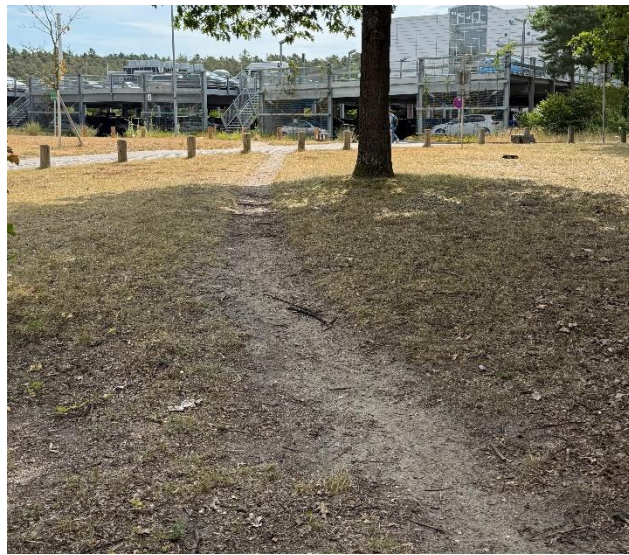


Abbildung 11: Teststelle am Südgelände der FAU-Erlangen



### 3.1.5 Eichenhain Fürth

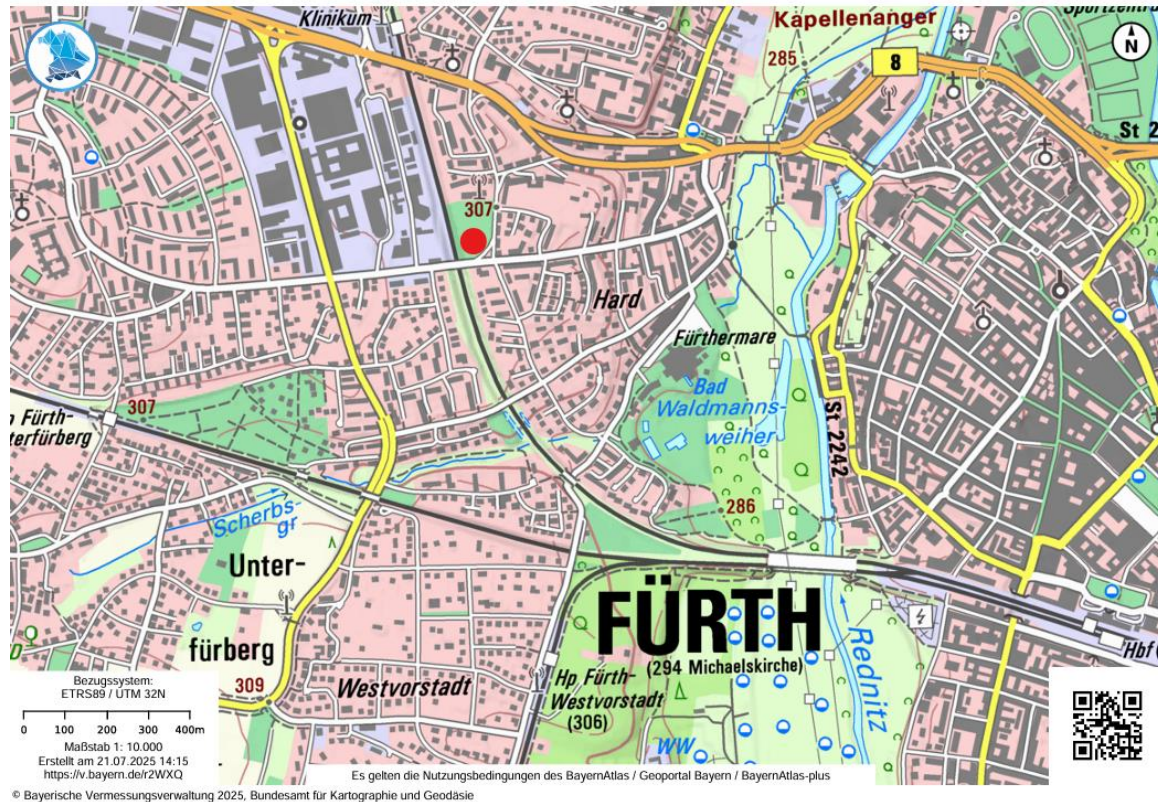


Abbildung 12: Topographische Karte von Fürth mit dem rot markiertem Testgebiet im Stadtpark. Maßstab: 1:10.000. (Bayerische Vermessungsverwaltung, 2025)

In Fürth wurde neben der Testreihe im Stadtpark auch eine Testkampagne in der Grünanlage Eichenhain verwirklicht. An den Koordinaten 49°28'43.4"N 10°58'09.8" wurde ein Versickerungskontrolltest vor der Belüftung durchgeführt, ein Profil aufgenommen und der Organikanteil des Bodens mit dem Glühverlust bestimmt.



### 3.1.6 Bayreuth Hofgarten

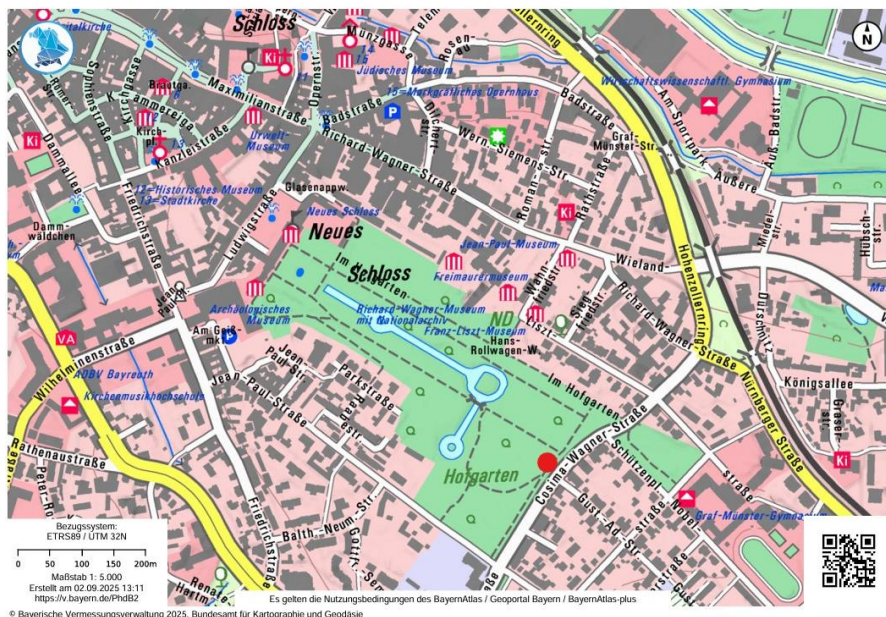


Abbildung 13: Topographische Karte von Bayreuth mit dem rot markiertem Testgebiet im Hofgarten. Maßstab: 1:5.000. (Bayerische Vermessungsverwaltung, 2025)

An den Koordinaten 49°56'16.2"N 11°34'49.9"E wurden zwei Testkampagnen mit den jeweiligen Versickerungstests durchgeführt. Zudem wurde jeweils ein Bodenprofil aufgenommen und ein Glühverlust der Bodenprobe bestimmt.



Abbildung 14: Teststelle im Bayreuther Hofgarten.

Alle Teststandorte wurden ausgewählt, da diese durch sehr frequentierte öffentliche Trittbefahrung oder durch maschinelles Befahren stark verdichtet sein könnten. Diese Verdichtung konnte an einigen Standorten visuell im Vorfeld durch die fehlende Grasnarbe oder bereits anstehende Staunässe wahrgenommen werden. Somit wurden die Belüftungsmaßnahmen und die Infiltrationsmessungen hauptsächlich auf durch Mensch und Maschine geschaffenen Verdichtungspfaden in öffentlichen Parks durchgeführt. Um eine möglichst effektive Bodenbelüftung zu gewährleisten wurden alle Flächen vor den Maßnahmen über mehrere Tage hinweg mit jeweils ca. 500 Litern pro Tag bewässert und es wurde sich über mögliche vorhandene Leitungen informiert. An jedem Standort wurde ein Kompressor benötigt, welcher mindestens 2.500 L/min unter 8 bar Druck erzeugen kann. Dieser kann in einem Transporter oder als Anhänger transportiert werden. Zudem wurden für jede Testreihe 900 Liter Wasser für die Versickerungstests bereitgestellt. Ca. 50 kg Terramol standen für jede Testreihe zur Verfügung.

### 3.2 Bodenbelüftung

Durch die Bodenbelüftung wird die Infiltrationsfähigkeit des Bodens erhöht, die Luftzirkulation verbessert und bei Bedarf zusätzliche Bodenhilfsstoffe wie zum Beispiel Dünger, Wasserspeicher oder Mykorrhiza wurzelnah eingebracht. Für die Versuche wurde ein VOGT GeoInjector maxi, ein Gerät zur Bodenbelüftung und Einbringung von Bodenhilfsstoffen der Firma VOGT Baugeräte GmbH aus 95466 Weidenberg verwendet. Dieses Gerät ermöglicht es mit einem VOGT TurboSpaten“ (ein Druckluftbetriebener Presslufthammer) eine Lanze in den zu lockernden Boden einzutreiben und anschließend Druckluft mit 5,0-8,0 bar in den Boden einzuleiten. Für dieses Verfahren ist es wichtig im Vorfeld die Tiefe der zu durchdringenden Sperrschicht, bzw. die Tiefe der Aufzubrechenden Verdichtung zu bestimmen und eine entsprechende Lanzenlänge zu wählen. Üblich sind hier Lanzen mit einer Länge von 30-200 cm. Für diese Arbeit wurde bis 90 cm Tiefe belüftet.



Abbildung 15: Schematische Grafik einer Bodenbelüftung und dem Aufbau des Bodeninjektors (Maschine für Bodenbelüftung | VOGT Baugeräte GmbH, o. D.).



Durch eine ventilgesteuerte Auslösung ermöglicht es der VOGT GeoInjector maxi die Druckluft dosiert oder direkt abzugeben. Als Druckluftversorgung ist ein Kompressor für Bodeninjektion mit entsprechender Luftaufbereitung, Bio-Öl und einer Förderleistung von mind. 2.500 Litern pro Minute erforderlich.

Durch den 20 Liter fassenden Vorratsbehälter kann neben der Belüftung auch Granulat von maximal 3-4 mm Korngröße in den gelockerten Boden eingebracht werden. Bei einer Betätigung der Pneumatischen Steuerung von zwei Sekunden Dauer werden ca. 600 ml Granulat eingebracht. Wegen den guten stofflichen Eigenschaften wird hierfür überwiegend gebrannter Algen-Kieselgur verwendet. Für die Versuche wurde „Terramol“ das gebrannte Algen-Kieselgur-Granulat der Firma Terra Fit verwendet. Trotz des nachteiligen großen Feinanteils wurde dieses aufgrund der guten Verfügbarkeit zum Zeitpunkt der Versuche genutzt.

Am Südgelände der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg wurden am selben Standort zwei Testdurchläufe durchgeführt. Aufgrund des sandigen, nicht bindigen Bodens und der Trockenheit wurde hier zudem testweise eine Bodenbelüftung mit der „Vogt Lanze VL 3,5“ durchgeführt um mögliche Vorteile dieser Methode bei diesen Bodenverhältnissen aufzuzeigen.

Die „VOGT Lanze VL 3,5“ findet ihre Anwendung hauptsächlich bei der zerstörungsfreien Freilegung von Gas-, Strom- und Wasserleitungen mit Druckluft. Durch eine spezielle funkenfreie Düse wird die Druckluft von 7,0-10,0 bar (102-145 psi) auf die zweifache Schallgeschwindigkeit beschleunigt. Eine optimale Abstimmung auf die entsprechende Luftleistung des Kompressors (ab 2,35 m<sup>3</sup>/min bis 12 m<sup>3</sup>/min) wird durch den Tausch der Düse erzielt. Die „Vogt Lanze VL 3,5“ ermöglicht es auch Druckluft in den Boden einzubringen und dabei die Kapillaren zu weiten. Somit kann dieses wurzelschonende Verfahren auch gezielt genutzt werden um Staunässe vorzubeugen und somit das Wurzelwachstum zu fördern.

Zur Erstellung eines Lüftungsloches für die Bodenbelüftung wurde die Lanze bei konstanter Luftabgabe bis zu einer Tiefe von 100 cm vorgearbeitet. Anschließend wurden die Löcher mit Terramol verfüllt. Durch den modularen Aufbau kann die „VOGT Lanze VL 3,5“ mithilfe von Stahlrohrerweiterung bis zu einer Strahlrohrlänge von 10 Metern erweitert werden (Druckluftlanze | VOGT Baugeräte GmbH, o. D.).

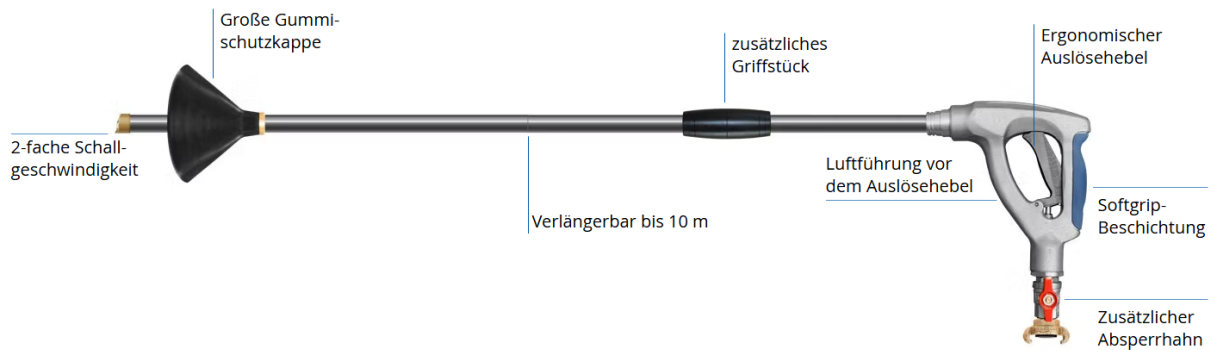


Abbildung 16: Aufbau der VOGT Lanze (Druckluftlanze | VOGT Baugeräte GmbH, o. D.).

### 3.3 Bestimmung der Infiltration mit dem Doppelring-Infiltrometer

Die Infiltrationsfähigkeit des Bodens wurde mit einem Doppelring-Infiltrometer bestimmt. Hiermit wurden die Infiltrationstraten vor und nach der Bodenbelüftung gemessen. Das Doppelring-Infiltrometer besteht aus zwei metallischen Ringen. Der innere Ring hat einen Durchmesser von 30 cm, der äußere Ring 60 cm. Dazu gibt es ein Schlagkreuz, um die beiden Ringe gleichmäßig und in Waage in den Boden einzubringen und eine Messbrücke, in die ein Schwimmer gesteckt wird. Optional kann zusätzlich ein Zollstock in den inneren Ring angebracht werden, mit welchem man den absoluten Wasserstand ablesen kann.

Die Grasnarbe wurde vor dem Test entfernt, da das Wasser bevorzugt an den Wurzelkanälen einsickert und die Vegetation ein unsauberes Eindringen der Ringe hervorrufen kann (Duran, o. D.). Beide Ringe wurden anschließend mit dem Schlagkreuz ca. 10 cm tief gleichmäßig in den Boden eingeschlagen. Der äußere Ring vermeidet lateralen Wasserfluss und stellt somit sicher, dass im inneren Ring nur die vertikale Infiltration gemessen wird. Dies erhöht die Präzision und Aussagekraft des Versuchs. Nachdem innerer und äußerer Ring in den Boden eingebracht wurden, werden diese gleichmäßig mit Wasser auf den gleichen Füllstand befüllt. Der Wasserstand in den beiden Ringen wurde auf eine selbst definierte, absolute Starthöhe (Bsp.: 16 cm) im inneren Ring befüllt. Sobald dieser definierte Wasserstand erreicht wurde begann die Messung.

Pro Standort wurden vier Tests (0;1;2;3) realisiert. Gemessen wurde im Test 0 zuerst die Infiltrationsrate des Bodens vor der Bodenbelüftung. Anschließend wurde ein Quadrat von jeweils 100 cm Kantenlänge ausgemessen und an den vier Eckpunkten belüftet. Im inneren dieses belüfteten Quadrats wurde Test 1 durchgeführt. Damit ist Test 1 der einzige Durchlauf, welcher sich vollständig innerhalb der belüfteten Fläche befindet und somit ist dieser von größter Bedeutung. Test 1 wird in jeder graphischen Abbildung in der Farbe Rot dargestellt.

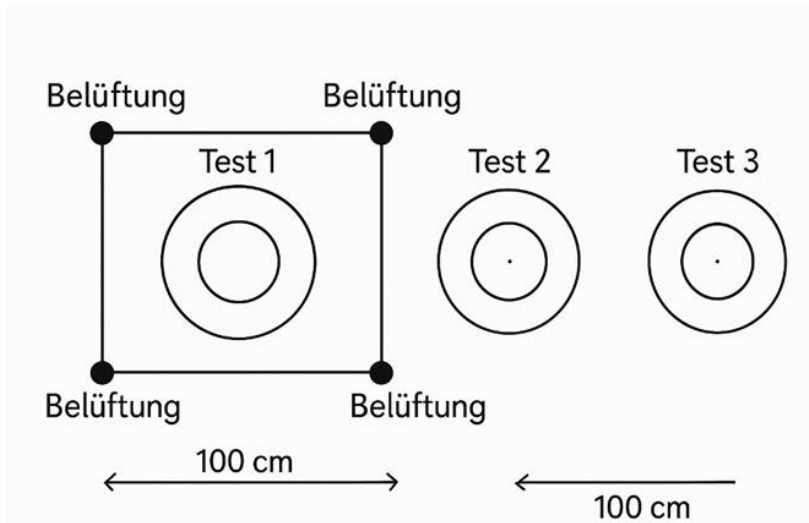


Abbildung 17: Schemazeichnung der Versuchsaufbauten von Test 1-3 nach der Bodenbelüftung durch Geo-Injektion. Nur Test 1 befindet sich komplett innerhalb der Belüftungsfläche.

Vom Mittelpunkt von Test 1 aus wurde Test 2 genau 100 cm entfernt vollzogen. Damit befindet sich der Mittelpunkt von Test 2 genau 50 cm außerhalb der Belüftungsfläche. Test 3 wurde weitere 100 cm vom Mittelpunkt von Test 2 durchgeführt. Der Mittelpunkt von Test 3 befindet sich also 150 cm entfernt von der Belüftungsfläche. Die Abstände von Test 2 und 3 zum belüfteten Quadrat sollen die effektive Reichweite der Bodenbelüftung nachweisen.



Abbildung 18: Das eingebrachte Doppelring-Infiltrometer mit Schwimmer und Zollstock. Beide Ringe mit gleichem Füllstand.

Gemessen wurde der absolute Wasserstand im inneren Ring in cm durch den Zollstock und die zunehmende Absenkung in cm durch den Schwimmer in Zeitintervallen von z.B. 30, 60, oder 120 Sekunden. Es wurde solange gemessen, bis sich über einige Zeitintervalle hinweg die Infiltrationsrate nicht verändert hat. Somit wurde sichergestellt, dass die stationäre Infiltration, bzw. die maximale konstante Infiltration des Bodens erreicht wurde. Die Infiltrationsrate errechnet sich aus der Änderung der Wasserhöhe pro Zeitintervall mit folgender Formel:

$$\text{Infiltrationsrate (mm/h)} = \frac{\Delta h}{\Delta t} \cdot 60 \quad (1)$$

- $\Delta h$ : Änderung der Wasserhöhe im inneren Ring [mm]
- $\Delta t$ : Zeitintervall [min]
- 60: Umrechnungsfaktor von Minuten auf Stunden

Beispielrechnung: 5 mm Absenkung in 10 Minuten:

$$\rightarrow \text{Infiltrationsrate (mm/h)} = \frac{\Delta h}{\Delta t} \cdot 60 = \frac{5 \text{ mm}}{10 \text{ min}} \cdot 60 = 30 \text{ mm/h}$$

### 3.4 Erstellung des Bodenprofils mit der Pürckhauer-Handsondierung

Die Pürckhauer-Handsondierung ist die Entnahme einer Bodenprobe mit Hilfe eines 100 cm langen Hohlmeißels. Dieser hat einen Durchmesser von 2,5 cm, wobei der Hohlraum einen Durchmesser von 1,7 cm aufweist. Mit einem Hammer kann der Hohlmeißel durch Schläge auf den Schlagkopf in das Erdreich getrieben werden. Durch seitlich anbringbare Griffe kann er anschließend herausgezogen werden.



Abbildung 19: Pürckhauer-Hohlmeißel mit sichtbarem Hohlraum für das Bodenprofil.



Mit dieser Methode lassen sich relativ schnell und kostengünstig Aussagen über den Bodenaufbau, die Zusammensetzung und die Schichtenverteilung treffen. Dazu wurden im Testgebiet jeweils einige Sondierungen genommen und nach Hartmann et al. (2024) ausgewertet. Die maximale Tiefe betrug dabei 100 cm. Die Profile und die Schichtenverteilungen sollen in Kombination mit den Infiltrationstests den Boden charakterisieren und weitere Aussagen und Interpretationen ermöglichen.

### **3.5 Bestimmung des Organik Anteils durch Glühverlust; Loss on Ignition (LOI)**

Von jeder Testfläche wurde eine Probe des Bodens genommen und diese auf seinen Glühverlust getestet. Dabei ist die Probe das gesamte 100 cm Profil aus der Pürckhauersondierung und damit der Durchschnitt dieses Profils. Der Glühverlust bestimmt die Gewichtsveränderung einer Probe durch Glühen bei Temperaturen von 550°C im Muffelofen. Der organische Anteil (Humusgehalt) verflüchtigt sich und kann durch die Gewichts Differenz nachgewiesen werden. Der Organikanteil im Boden setzt sich aus allen pflanzlichen und tierischen Rückständen, sowie deren weiteren Umwandlungsprodukten zusammen (Amelung et al., 2018). Da der Humusgehalt entscheidend für die Speicherung von Nährstoffen und Wasser im Boden ist, spielt die Identifizierung des Anteils in den jeweiligen Testgebieten eine große Rolle, um präzisere Aussagen über die Wasserspeicherfähigkeit und Retention der Böden treffen zu können. Die Proben wurden dabei folgendermaßen auf den Glühverlust vorbereitet: Die Proben wurden für 48 Stunden im Trockenschrank „DRY-Line“ der Marke VWR bei 105°C getrocknet und zum Abkühlen in den Exsikkator gestellt. Dies stellt sicher, dass die Probe keinen Wasseranteil mehr enthält, welcher die Gewichts Differenz fälschlicherweise vergrößern könnte. Die Probe wurde anschließend im Muffelofen „Elektro Therm“ der Marke Linn bei 550°C für vier Stunden geglüht, abgekühlt und erneut im Exsikkator gewogen. Mit folgender Formel lässt sich der Glühverlust [%] bestimmen:

$$\rightarrow \text{Glühverlust: } V_{gl} = \frac{m_d - m_{gl}}{m_d} \cdot 100\% \quad (2)$$

- $m_d$  = Masse trocken [g]
- $m_{gl}$  = Masse nach dem Glühen [g]

Die Böden werden folgendermaßen anhand ihres prozentualen Glühverlusts (LOI) kategorisiert (Bojko & Kabala, 2014):

0-2% LOI: sehr humusarme Böden

2-8% LOI: mineralisch geprägte Böden mit steigender Humusmenge

>8% LOI: deutlich humushaltige Böden

>30% LOI: Torfböden und organische Böden

## **4. Ergebnisse**

### **4.1 Testdurchlauf in Weidenberg (Bayreuth)**

#### **4.1.1 Bodenprofil**

Auf einer Tiefe von 0-20 cm befand sich der Ah-Horizont, der humose Oberboden. Dieser war dunkelbraun, humos und bindig mit hohem Schluff- und Tonanteil. Auch mittlerer Lehm und Sand war in dieser Schicht vorhanden.

Von 20 bis 30 cm stand der Bv-Horizont an, der Unterbodenhorizont mit Verlehmung und Verbraunung. Diese Schicht ist kompakter und dunkler, mit mehr Feinanteil. Tonig-lehmig bis schluffig-lehmig bei geringeren Sandanteilen. Diese Schicht ist bindiger und dichter als der Ah-Horizont.

Ab 30 cm Tiefe bis zum Ende des Profils in 50 cm Tiefe wird die Schicht grobkörniger und sandig-lehmig bei geringerer Bindigkeit.

#### **4.1.2 Infiltration**

Am 17.06.2025 erfolgte die Testreihe in Weidenberg bei Bayreuth. Zuerst wurde die Infiltrationsrate des unbearbeiteten Bodens, vor der Bodenbelüftung, getestet. Dieser Test wird „Test 0“ genannt. Hierzu wurde die Grasnarbe entfernt, das Doppelring-Infiltrometer sachgemäß in den Boden eingesetzt und beide Ringe gleichmäßig mit Wasser auf die gleiche Füllhöhe befüllt. Nach Beendigung des Testdurchlaufs auf unbearbeitetem Boden folgten drei Tests nach der Bodenbelüftung und Auflockerung (Test 1;2;3). Hierzu wurden vier Punkte zur Bodenbelüftung festgelegt. Diese befinden sich an den Eckpunkten eines Quadratmeters. Im Mittelpunkt dieses belüfteten Vierecks wurde das Doppelring-Infiltrometer eingesetzt, dieser Durchlauf heißt „Test 1“. Wie auch in allen folgenden graphischen Abbildungen wird Test 1 auch in dieser Versuchsreihe in der Farbe Rot dargestellt, da er gegenüber dem Kontrolltest (schwarz) von größter Relevanz und Aussagekraft ist.

Tabelle 1: Testreihe in Weidenberg. Übersicht der Wasserstände WS [cm] und der dazugehörigen Infiltrationsraten (Inf.) in mm/h von Test 0 (unbelüftet), Test 1, Test 2 und Test 3. Die gelben Flächen zeigen die inkonstanten Raten, die grünen Flächen die konstanten Raten.

| Zeit [min] | WS Test 0 [cm] | Inf. Test 0 [mm/h] | WS Test 1 [cm] | Inf. Test 1 [mm/h] | WS Test 2 [cm] | Inf. Test 2 [mm/h] | WS Test 3 [cm] | Inf. Test 3 [mm/h] |
|------------|----------------|--------------------|----------------|--------------------|----------------|--------------------|----------------|--------------------|
| 0          | 16             | 30                 | 16             | 150                | 16             | 90                 | 16             | 150                |
| 2          | 15,9           | 60                 | 15,5           | 150                | 15,7           | 120                | 15,5           | 120                |
| 4          | 15,7           | 60                 | 15             | 120                | 15,3           | 120                | 15,1           | 90                 |
| 6          | 15,5           | 60                 | 14,6           | 150                | 14,9           | 120                | 14,8           | 120                |
| 8          | 15,3           | 90                 | 14,1           | 120                | 14,5           | 90                 | 14,4           | 120                |
| 10         | 15             | 60                 | 13,7           | 120                | 14,2           | 90                 | 14             | 120                |
| 12         | 14,8           | 60                 | 13,3           | 120                | 13,9           | 90                 | 13,6           | 120                |
| 14         | 14,6           | 60                 | 12,9           | 120                | 13,6           | 90                 | 13,3           | 90                 |
| 16         | 14,4           | 60                 | 12,5           | 120                | 13,3           | 90                 | 13             | 90                 |
| 18         | 14,2           | 60                 | 12,1           | 120                | 13             | 90                 | 12,7           | 90                 |
| 20         | 14             | 60                 | 11,7           | 120                | 12,7           | 90                 | 12,5           | 60                 |
| 25         | 13,5           | 60                 | 10,7           | 120                | 11,95          | 90                 | 12             | 60                 |
| 30         | 13             | 60                 | 9,7            | 120                | 11,2           | 90                 | 11,5           | 48                 |
| 35         | 12,5           | 60                 | 8,7            | 120                | 10,45          | 90                 | 11,1           | 48                 |
| 40         | 12,1           | 48                 | 7,7            | 120                | 9,7            | 90                 | 10,7           | 48                 |
| 45         | 11,7           | 48                 | 6,7            | 120                | 8,95           | 90                 | 10,3           | 48                 |

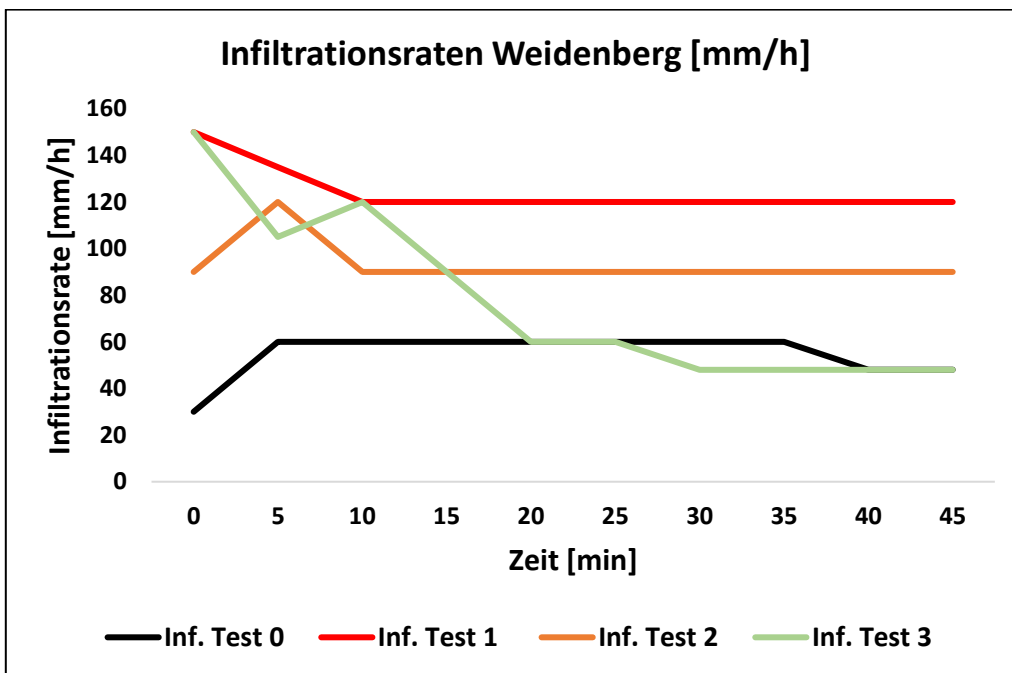


Abbildung 20: Graphische Darstellung der Infiltrationsraten (Inf.) [mm/h] der einzelnen Testdurchläufe in Weidenberg vom 17.06.2025.

Die konstante Infiltrationsrate des unbearbeiteten Bodens von Test 0 erreichte 48 mm/h. Durch die Bodenbelüftung im Quadrat konnte diese Rate von Test 1 (rot) auf 120 mm/h erhöht werden, dies entspricht einer Steigerung der Infiltration um 150%.

Test 2 konnte 50 cm vom belüfteten Quadrat entfernt mit seiner konstanten Rate von 90 mm/h eine um 87,5% vergrößerte Infiltration aufweisen. Test 3 dagegen, 150 cm von den Belüftungen entfernt, zeigte größere Raten in der inkonstanten Phase, viel in der konstanten Phase aber auf das Niveau des unbearbeiteten Bodens mit 48 mm/h zurück. Die Infiltration konnte nahe der Bodenbelüftung also massiv gesteigert werden, nimmt in 50 cm Abstand zum Raster bereits etwas ab und zeigt in größeren Abständen von ca. 150 cm keine Veränderung mehr an. Test 1 und 2 zeigen außerdem deutlich kürzere inkonstanten Phasen an. Statt 35 Minuten von Test 0 sind es in Test 1 und 2 acht Minuten. Die konstanten, maximalen Infiltrationsraten konnten hier wesentlich schneller erreicht werden als vor der Bodenverbesserung.

#### **4.1.3 Glühverlust (LOI)**

Aus der getrockneten Probe mit 10,000g wurden nach dem vierstündigen Glühen 9,352g. Der Glühverlust beträgt damit 6,48% und ist in dieser Arbeit der größte.

### **4.2 Testdurchlauf am Nürnberger Platnersberg**

#### **4.2.1 Bodenprofil**

In den Tiefen von 0-20 cm stand der dunkelbraune und krümelige Ah-Horizont an. Dieser war feinkörniger, lehmiger Sand mit Humusanteilen. Deutlich durchwurzelt bei mittlerer Bindigkeit.

Der Bv-Horizont lag in Tiefen von 20-40 cm. Homogeneres braun, weniger Humus und kaum Durchwurzlung. Feinkörniger Sand.

Der Übergang vom Bv- zum C-Horizont befand sich in 40-60 cm Tiefe. Hellbraun bis beige, mittelsandig, locker mit einigen größeren Körnern. Wenig bindend und homogen bei keiner Restorganik.

Der C-Horizont nahm die Tiefe von 60-100 cm ein. Sehr heller, gelblicher und grobkörniger Sand, homogen und sehr locker. Reine Sandmatrix ohne Feinanteile.

#### **4.2.2 Infiltration**

Am Nürnberger Platnersberg wurde am Mittwoch, dem 02.07.2025, nach dem gleichen Prinzip wie in Kapitel 3.3 beschrieben getestet. Die einzelnen Testdurchläufe tragen auch hier dieselben Namen (Test 0-3). Folgende Wasserstände und Infiltrationsraten wurden dabei gemessen:



Tabelle 2: Übersicht der Wasserstände der einzelnen Tests [cm] vom Platnersberg in Nürnberg.

| Zeit [min] | Test 0 [cm] | Test 1 [cm] | Test 2 [cm] | Test 3 [cm]               |
|------------|-------------|-------------|-------------|---------------------------|
| 00:00      | 16,0        | 16,0        | 16,0        | 16,0                      |
| 02:00      | 15,1        | 15,3        | 15,4        | 14,8                      |
| 04:00      | 14,3        | 14,5        | 15,0        | 13,2                      |
| 06:00      | 13,5        | 13,9        | 14,6        | 12,0                      |
| 08:00      | 12,7        | 13,4        | 14,2        | 10,8                      |
| 10:00      | 11,9        | 12,6        | 13,8        | 9,6                       |
| 12:00      | 11,1        | 11,9        | 13,4        | 8,4                       |
| 14:00      | 10,3        | 11,2        | 13,0        | 7,2 (auf 16,0 Aufgefüllt) |
| 16:00      | 9,6         | 10,6        | 12,7        | 14,8                      |
| 18:00      | 8,9         | 9,9         | 12,4        | 13,6                      |
| 20:00      | 8,2         | 9,3         | 12,1        | 12,4                      |
| 22:00      | 7,5         | 8,7         | 11,8        | 11,2                      |
| 24:00      | 6,8         | 8,0         | 11,5        | 10,0                      |
| 26:00      | 6,1         | 7,2         | 11,2        | 8,8                       |
| 28:00      | 5,4         | 6,3         | 10,9        | 7,6                       |
| 30:00      | 4,7         | 5,4         | 10,6        | 6,4                       |
| 32:00      | 4,0         | 4,5         | 10,3        | 5,2                       |
| 34:00      | 3,3         | 3,6         | 10,0        | 4,0                       |
| 36:00      | 2,6         | 2,7         | 9,7         | 2,8                       |
| 38:00      | 1,9         | 1,8         | 9,4         | 1,6                       |
| 40:00      | 1,2         | 0,9         | 9,1         | 0,4                       |

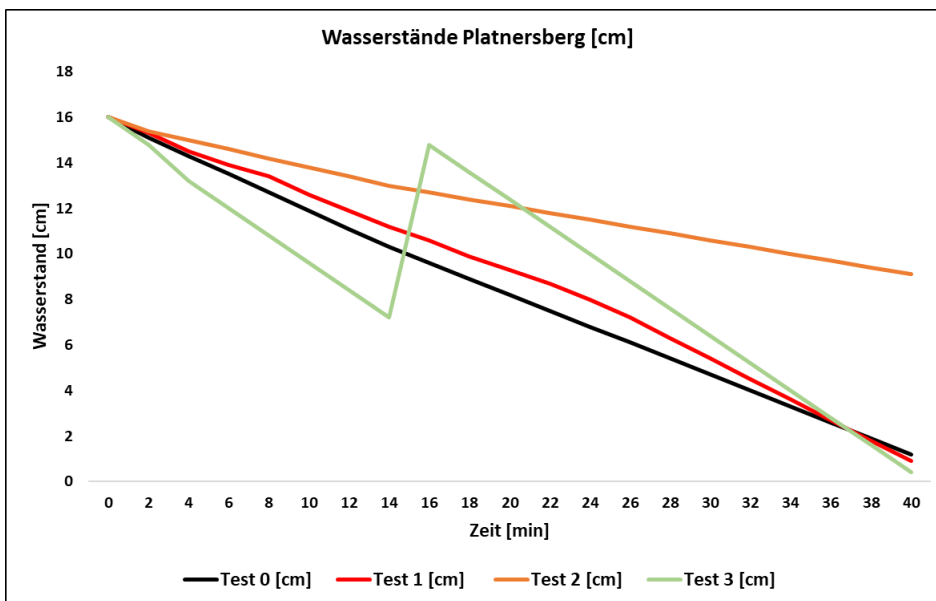


Abbildung 21: Graphische Darstellung der Wasserstände [cm] der einzelnen Testdurchläufe am Nürnberger Platnersberg vom 02.07.2025.

Wie man der Tabelle 2 und der Abbildung 21 entnehmen kann, wies Test 3 den deutlich niedrigsten Wasserstand und die damit verbundene deutlich größte Absenkung auf. So musste zwischenzeitlich bei Minute 14 des Tests zurück auf den Startfüllstand von 16,0 cm aufgefüllt werden.

Die totale Absenkung von Test 3 betrug 24,4 cm in 40 Minuten. Die totalen Absenkungen von Test 0, 1 und 2 betrugen 14,8 cm, 15,1 cm und 6,9 cm. Die Absenkung nach der Bodenbelüftung von Test 1 konnte sich gegenüber der Absenkung ohne Bodenbearbeitung von Test 0 um ca. 2% steigern. Die Absenkung von Test 2, mit 50 cm Abstand zum belüfteten Quadrat, viel dagegen um 53,4% niedriger aus als im Kontrolltest 0. Mit einer Steigerung von 64,9% gegenüber Kontrolltest 0, legte Test 3, mit einem Abstand von 150 cm zum belüfteten Gebiet, am stärksten zu und zeigte die höchsten Infiltrationsraten.

Tabelle 3: Infiltrationsraten [mm/h] der einzelnen Tests vom Nürnberger Platnersberg. Inkonstante Infiltrationsraten in Gelb gekennzeichnet, stationäre Raten in grün.

| Zeit [min] | Inf. Test 0<br>[mm/h] | Inf. Test 1<br>[mm/h] | Inf. Test 2<br>[mm/h] | Inf. Test 3<br>[mm/h] |
|------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 00:00      | 270                   | 210                   | 180                   | 360                   |
| 02:00      | 240                   | 240                   | 120                   | 480                   |
| 04:00      | 240                   | 180                   | 120                   | 360                   |
| 06:00      | 240                   | 150                   | 120                   | 360                   |
| 08:00      | 240                   | 240                   | 120                   | 360                   |
| 10:00      | 240                   | 210                   | 120                   | 360                   |
| 12:00      | 240                   | 210                   | 120                   | 360                   |
| 14:00      | 240                   | 180                   | 90                    | 360                   |
| 16:00      | 210                   | 210                   | 90                    | 360                   |
| 18:00      | 210                   | 210                   | 90                    | 360                   |
| 20:00      | 210                   | 180                   | 90                    | 360                   |
| 22:00      | 210                   | 180                   | 90                    | 360                   |
| 24:00      | 210                   | 210                   | 90                    | 360                   |
| 26:00      | 210                   | 240                   | 90                    | 360                   |
| 28:00      | 210                   | 270                   | 90                    | 360                   |
| 30:00      | 210                   | 270                   | 90                    | 360                   |
| 32:00      | 210                   | 270                   | 90                    | 360                   |
| 34:00      | 210                   | 270                   | 90                    | 360                   |
| 36:00      | 210                   | 270                   | 90                    | 360                   |
| 38:00      | 210                   | 270                   | 90                    | 360                   |
| 40:00      | 210                   | 270                   | 90                    | 360                   |

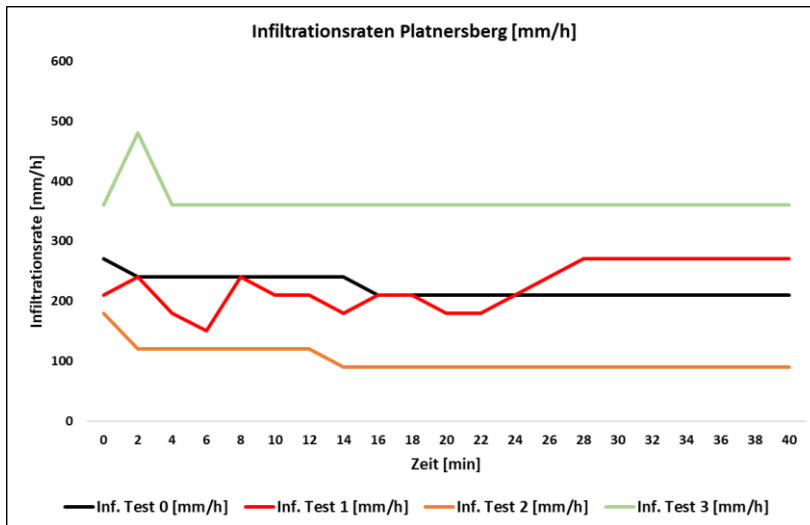


Abbildung 22: Graphische Darstellung der Infiltrationsraten (Inf.) der Tests am Platnersberg [mm/h].

Anhand von Tabelle 3 und Abbildung 22 erkennt man die Steigerung der konstanten Infiltrationsrate von 210 mm/h auf 270 mm/h von Test 0 auf Test 1. Dies entspricht einer prozentualen Steigerung von 28,6%. Test 2 verringerte seine konstante Infiltrationsrate gegenüber Test 0 um 57,1% mit seinen 90 mm/h. Test 3 zeigte den größten Zuwachs gegenüber Test 0 mit einer Steigerung von 71,4%. Gleichzeitig erreichte Test 3 auch die größte konstante Infiltration mit 360 mm/h. Test 1 brauchte zum Erreichen der konstanten Phase mit 28 Minuten am längsten und war den größten Schwankungen der Rate ausgesetzt. Test 0 und Test 2 lagen mit jeweils 16, bzw. 14 Minuten nahe aneinander. Am schnellsten erreichte Test 3 mit nur 4 Minuten die stationäre Phase. Damit erreichte Test 3 nicht nur die höchsten konstanten Raten, sondern benötigte dafür wesentlich weniger Zeit.

#### 4.2.3 Glühverlust (LOI)

Der Glühverlust des Bodenprofils vom Nürnberger Platnersberg beträgt exakt 3,00%. Die getrocknete Probe wog vor dem Glühen 10,000g und nach dem Glühen 9,700g.

## 4.3 Testdurchlauf im Fürther Stadtpark

### 4.3.1 Bodenprofil

Von 0-20 cm Tiefe erstreckte sich der Ah-Horizont. Dieser war dunkelbraun, locker, mit organischem Material und deutlich durchwurzelt. Eine locker gelagerte, sandig-lehmige Schicht.

In Tiefen von 20-40 cm lag der Übergang vom Ah- zum Bv-Horizont. Der Übergang war braun mit weniger Humus und lockerer Struktur. Deutlich weniger Durchwurzlung bei größerem Sandanteil. Zusätzlich gröbere Körner sichtbar.

Der Bv-Horizont lag in Tiefen von 40-60cm. Homogenes braun, sandig und schwach bindig. Größere Körner dominant und kaum organischer Anteil, keine Wurzeln.

Ab 60 cm Tiefe begann der C-Horizont, der Untergrundhorizont, bzw. das Ausgangsmaterial aus dem sich der Boden entwickelte. Dieser war hellbraun bis gelblich, grobkörnig mit hohem Sandanteil. Locker gelagert und wenig bindend, ohne Restorganik. Kein Feinanteil erkennbar. Ab 80 cm reiner Sand, grob bis mittelkörnig und homogen.

### 4.3.2 Infiltration

Im Fürther Stadtpark wurde am Donnerstag, den 03.07.2025 eine Testreihe durchgeführt. Zusätzlich wurde hier ein Test direkt auf einem der belüfteten und verfüllten Löcher durchgeführt.

Tabelle 4: Übersicht der Wasserstände der einzelnen Tests [cm] im Fürther Stadtpark.

| Zeit [min] | Test 0 [cm] | Test 1 [cm] | Test 2 [cm] | Test 3 [cm] | Test 4 [cm] |
|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 00:00      | 20,0        | 20,0        | 20,0        | 20,0        | 20,0        |
| 02:00      | 19,8        | 19,6        | 19,7        | 19,7        | 19,6        |
| 04:00      | 19,6        | 19,2        | 19,5        | 19,5        | 19,2        |
| 06:00      | 19,4        | 18,8        | 19,3        | 19,0        | 18,8        |
| 08:00      | 19,2        | 18,6        | 19,2        | 18,6        | 18,2        |
| 10:00      | 19,0        | 18,1        | 18,9        | 18,2        | 17,6        |
| 12:00      | 18,9        | 17,9        | 18,6        | 17,8        | 17,1        |
| 14:00      | 18,8        | 17,6        | 18,3        | 17,5        | 16,6        |
| 16:00      | 18,7        | 17,3        | 18,0        | 17,2        | 16,2        |
| 18:00      | 18,6        | 17,0        | 17,8        | 16,8        | 15,9        |
| 20:00      | 18,4        | 16,7        | 17,7        | 16,5        | 15,7        |
| 22:00      | 18,3        | 16,4        | 17,6        | 16,3        | 15,4        |
| 24:00      | 18,1        | 16,1        | 17,5        | 16,1        | 15,0        |
| 26:00      | 18,0        | 15,8        | 17,4        | 15,9        | 14,6        |
| 28:00      | 17,9        | 15,5        | 17,3        | 15,7        | 14,2        |
| 30:00      | 17,8        | 15,2        | 17,1        | 15,5        | 13,8        |
| 32:00      | 17,7        | 14,9        | 16,9        | 15,3        | 13,4        |
| 34:00      | 17,6        | 14,6        | 16,7        | 15,1        | 13,0        |
| 36:00      | 17,5        | 14,3        | 16,5        | 14,9        | 12,6        |
| 38:00      | 17,4        | 14,0        | 16,3        | 14,7        | 12,2        |
| 40:00      | 17,3        | 13,7        | 16,1        | 14,5        | 11,8        |

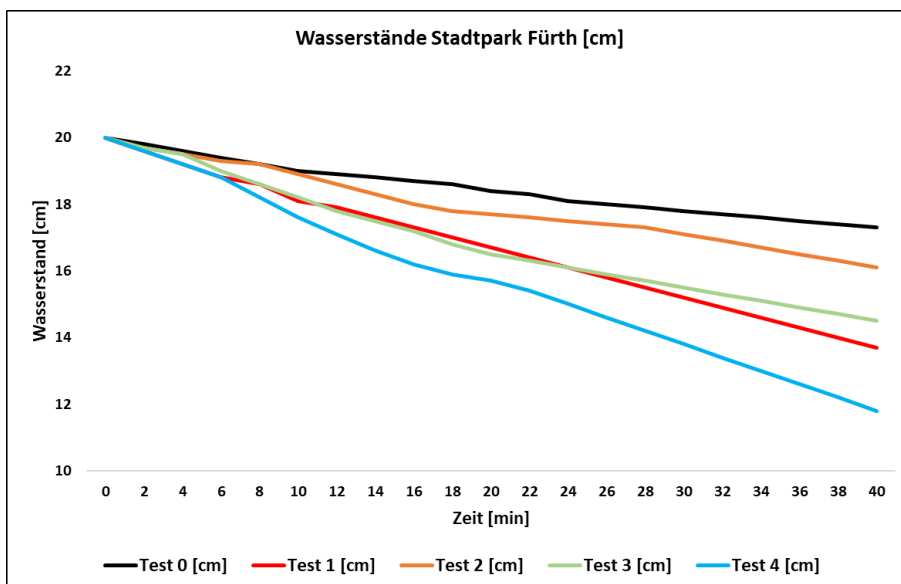


Abbildung 23: Wasserstände [cm] der einzelnen Testdurchläufe im Stadtpark Fürth vom 03.07.2025.

Test 4 wird in Abbildung 23 und 24 in hellblau dargestellt. Der unbearbeitete Boden zeigte durch Test 0 den höchsten Wasserstand nach 40 Minuten und damit die niedrigste Absenkung. So betrug die totale Absenkung von 2,7 cm. Den niedrigsten Wasserstand und die größte Absenkung zeigte Test 4, direkt auf dem Belüftungsloch. Mit einer totalen Absenkung von 8,2 cm konnte die Infiltration dort um 204% im Vergleich zu Test 0 gesteigert werden. Auch Test 1 innerhalb des belüfteten Quadrats zeigte mit einer totalen Absenkung von 6,3 cm eine um 133% vergrößerte Infiltration gegenüber Test 0. Der Bereich von Test 2 vergrößerte seine Infiltration um 44% und erreichte eine Gesamtabsenkung von 3,9 cm. Auch das Gebiet von Test 3 zeigte erhöhte Infiltrationen, mit einer Zunahme von 104% verglichen zu Test 0 und einer totalen Absenkung von 5,5 cm übertrafen die Raten von Test 3 die von Test 2.

Tabelle 5: Infiltrationsraten [mm/h] der einzelnen Tests aus dem Stadtpark Fürth. Inkonstante Infiltrationsraten in Gelb gekennzeichnet, stationäre Raten in grün.

| Zeit [min] | Inf. Test 0 [mm/h] | Inf. Test 1 [mm/h] | Inf. Test 2 [mm/h] | Inf. Test 3 [mm/h] | Inf. Test 4 [mm/h] |
|------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 00:00      | 60                 | 120                | 90                 | 90                 | 120                |
| 02:00      | 60                 | 120                | 60                 | 60                 | 120                |
| 04:00      | 60                 | 120                | 60                 | 150                | 120                |
| 06:00      | 60                 | 60                 | 30                 | 120                | 180                |
| 08:00      | 60                 | 150                | 90                 | 120                | 180                |
| 10:00      | 30                 | 60                 | 90                 | 120                | 150                |
| 12:00      | 30                 | 90                 | 90                 | 90                 | 150                |
| 14:00      | 30                 | 90                 | 90                 | 90                 | 120                |
| 16:00      | 30                 | 90                 | 60                 | 120                | 90                 |
| 18:00      | 60                 | 90                 | 30                 | 90                 | 60                 |
| 20:00      | 60                 | 90                 | 30                 | 60                 | 90                 |
| 22:00      | 60                 | 90                 | 30                 | 60                 | 120                |
| 24:00      | 30                 | 90                 | 30                 | 60                 | 120                |
| 26:00      | 30                 | 90                 | 30                 | 60                 | 120                |



|       |    |    |    |    |     |
|-------|----|----|----|----|-----|
| 28:00 | 30 | 90 | 60 | 60 | 120 |
| 30:00 | 30 | 90 | 60 | 60 | 120 |
| 32:00 | 30 | 90 | 60 | 60 | 120 |
| 34:00 | 30 | 90 | 60 | 60 | 120 |
| 36:00 | 30 | 90 | 60 | 60 | 120 |
| 38:00 | 30 | 90 | 60 | 60 | 120 |
| 40:00 | 30 | 90 | 60 | 60 | 120 |

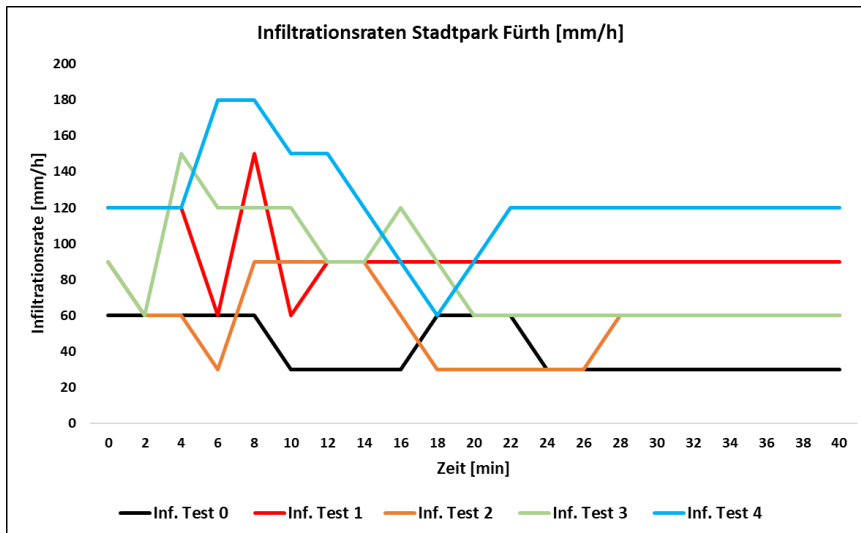


Abbildung 24: Graphische Darstellung der Infiltrationsraten (Inf.) der Tests im Stadtpark Fürth [mm/h].

Test 1 steigerte auf der Belüftungsfläche seine konstante Infiltrationsrate auf 90 mm/h gegenüber der 30 mm/h von Test 0. Dies entspricht einem prozentualen Zuwachs von 200%. Test 2, welcher 50 cm außerhalb der belüfteten Fläche befand, erreichte konstante Raten von 60 mm/h, also einen Zuwachs von 100% im Vergleich zu Test 0. Ebenfalls um 100% zulegen konnte Test 3 gegenüber Test 0. Test 3 befand sich 150 cm von der belüfteten Fläche entfernt und erreichte mit 60 mm/h in der konstanten Phase die gleiche konstante Infiltrationsrate wie Test 2. Den größten Zuwachs im Vergleich zu Test 0 und die größte konstante Rate in dieser Testreihe erzielte Test 4, welcher direkt auf einem der Belüftungslöchern durchgeführt wurde. So wurden hier in der konstanten Phase 120 mm/h gemessen, was einer Steigerung von 300% entspricht. Test 1 erreichte nach 12 Minuten die konstante Infiltration und benötigte damit deutlich weniger Zeit als Test 0, 2, 3 und 4, welche nach jeweils 24, 28, 20 und 22 Minuten die konstante Rate erreichten.

### 4.3.3 Glühverlust (LOI)

Die Probe des Bodenprofils aus dem Fürther Stadtpark wog nach der Trocknung 10,000g und nach dem Glühen 9,775g. Daraus ergibt sich ein prozentualer Glühverlust von 2,25%.

## 4.4 Testdurchlauf am Südgelände der FAU Erlangen-Nürnberg

### 4.4.1 Bodenprofil

Der Ah-Horizont lag in der Tiefe von 0-20 cm und war dunkelbraun, humos durchsetzt und feinkrümelig. Organische Substanz und Durchwurzelung sind deutlich sichtbar sandiger Lehm.

In den Tiefen von 20-40 cm stand der Bv-Horizont mit hellerem braun an. Weniger Humus, körnigere und sandigere Struktur. Locker bei geringer Durchwurzelung.

Ab 40 cm begann der C-Horizont bis zum Ende des Profils in 100 cm Tiefe. Dieser war gelblich bis brauner grobkörniger Sand, homogen, kaum Bindigkeit und keine Organik. Sehr locker und ohne Humusreste.

### 4.4.2 Infiltration (Geo-Injektion)

Am Freitag, den 04.07.2025, wurde am Südgelände der FAU-Erlangen eine Testreihe mit der Bodenbelüftung durch den VOGT GeoInjector Maxi durchgeführt. Die Tests 1-3, nach der Bodenbelüftung, befanden sich auf einem anthropogen geschaffenen Trampelpfad. Test 0 lag neben dem Trampelpfad, um mögliche Verdichtungen auch abseits des Weges zu quantifizieren.

Tabelle 6: Übersicht der Wasserstände der einzelnen Tests [cm] im Südgelände der FAU-Erlangen. Testreihe der Bodenbelüftung durch VOGT GeoInjector Maxi.

| Zeit [min] | Test 0 [cm]                  | Test 1 [cm]                  | Test 2 [cm] | Test 3 [cm] |
|------------|------------------------------|------------------------------|-------------|-------------|
| 00:00      | 16                           | 16                           | 16          | 16          |
| 02:00      | 14,8                         | 14,3                         | 15,4        | 15,3        |
| 04:00      | 13,5                         | 12,6                         | 15          | 14,5        |
| 06:00      | 12,5                         | 11,3                         | 14,5        | 14          |
| 08:00      | 11,3                         | 9,9                          | 14,1        | 13,3        |
| 10:00      | 10,2                         | 8,5<br>(auf 16,0 aufgefüllt) | 13,7        | 12,6        |
| 12:00      | 9,2                          | 14,4                         | 13,3        | 12          |
| 14:00      | 8,3                          | 12,7                         | 12,9        | 11,5        |
| 16:00      | 7,4                          | 11,2                         | 12,5        | 10,9        |
| 18:00      | 6,5<br>(auf 16,0 aufgefüllt) | 9,7                          | 12,1        | 10,3        |
| 20:00      | 15,1                         | 8,2                          | 11,7        | 9,7         |
| 22:00      | 14,1                         | 6,6                          | 11,3        | 9,1         |
| 24:00      | 13,1                         | 5<br>(auf 16,0 aufgefüllt)   | 10,9        | 8,5         |
| 26:00      | 12,1                         | 14,4                         | 10,6        | 7,9         |
| 28:00      | 11,1                         | 12,8                         | 10,2        | 7,3         |
| 30:00      | 10,1                         | 11,2                         | 9,8         | 6,7         |
| 32:00      | 9,1                          | 9,6                          | 9,4         | 6,1         |

|       |     |     |     |     |
|-------|-----|-----|-----|-----|
| 34:00 | 8,1 | 8   | 9   | 5,5 |
| 36:00 | 7,1 | 6,4 | 8,6 | 4,9 |
| 38:00 | 6,1 | 4,8 | 8,2 | 4,3 |
| 40:00 | 5,1 | 3,2 | 7,8 | 3,7 |

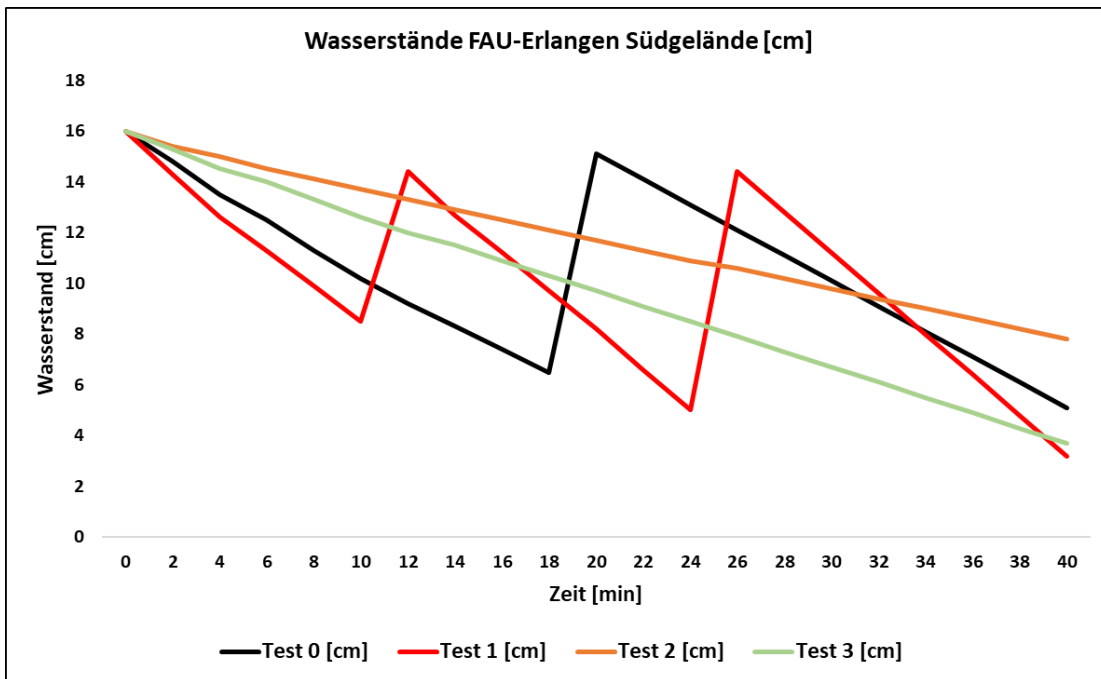


Abbildung 25: Wasserstände [cm] der ersten Testkampagne im Südgelände der FAU-Erlangen vom 04.07.2025.

Der unbelüftete Boden, abseits des Trampelpfads, zeigte innerhalb von 40 Minuten eine Gesamtabsenkung von 20,4 cm. Test 1 auf dem Pfad und innerhalb des bearbeiteten Quadrats erreichte eine Absenkung von 31,3 cm. Dies entspricht einer Zunahme in der Infiltration von 53,4%. Test 2 befand sich 100 cm von Test 1 und dem belüfteten Boden auf dem Trampelpfad entfernt. Dort sank der Wasserstand in 40 Minuten um 8,2 cm. Dies entspricht einer Abnahme von 73,8% gegenüber Test 1. Test 3 lag weitere 100 cm von Test 2 auf dem Weg entfernt und erreichte eine Absenkung von 12,3 cm und damit eine Abnahme von 60,7% im Vergleich zu Test 1. Damit zeigte Test 0 mit seiner Lage abseits des Weges deutlich höhere Infiltrationen als Test 2 und 3, welche sich auf dem Weg befinden. Test 1 konnte durch seine Position im belüfteten Quadrat die größte Infiltration erreichen, trotz seiner Lage auf dem verdichteten Weg.

Tabelle 7: Infiltrationsraten [mm/h] der ersten Testkampagne im Südgelände der FAU-Erlangen. Bodenbelüftung durch VOGT Geoinjector Maxi. Inkonstante Infiltrationsraten in Gelb gekennzeichnet, stationäre Raten in grün.

| Zeit [min] | Inf. Test 0 [mm/h] | Inf. Test 1 [mm/h] | Inf. Test 2 [mm/h] | Inf. Test 3 [mm/h] |
|------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 00:00      | 360                | 510                | 180                | 210                |
| 02:00      | 390                | 510                | 120                | 240                |
| 04:00      | 300                | 390                | 150                | 150                |
| 06:00      | 360                | 420                | 120                | 210                |
| 08:00      | 330                | 420                | 120                | 210                |
| 10:00      | 300                | 480                | 120                | 180                |
| 12:00      | 270                | 510                | 120                | 150                |
| 14:00      | 270                | 450                | 120                | 180                |
| 16:00      | 270                | 450                | 120                | 180                |
| 18:00      | 270                | 450                | 120                | 180                |
| 20:00      | 300                | 480                | 120                | 180                |
| 22:00      | 300                | 480                | 120                | 180                |
| 24:00      | 300                | 480                | 120                | 180                |
| 26:00      | 300                | 480                | 120                | 180                |
| 28:00      | 300                | 480                | 120                | 180                |
| 30:00      | 300                | 480                | 120                | 180                |
| 32:00      | 300                | 480                | 120                | 180                |
| 34:00      | 300                | 480                | 120                | 180                |
| 36:00      | 300                | 480                | 120                | 180                |
| 38:00      | 300                | 480                | 120                | 180                |
| 40:00      | 300                | 480                | 120                | 180                |

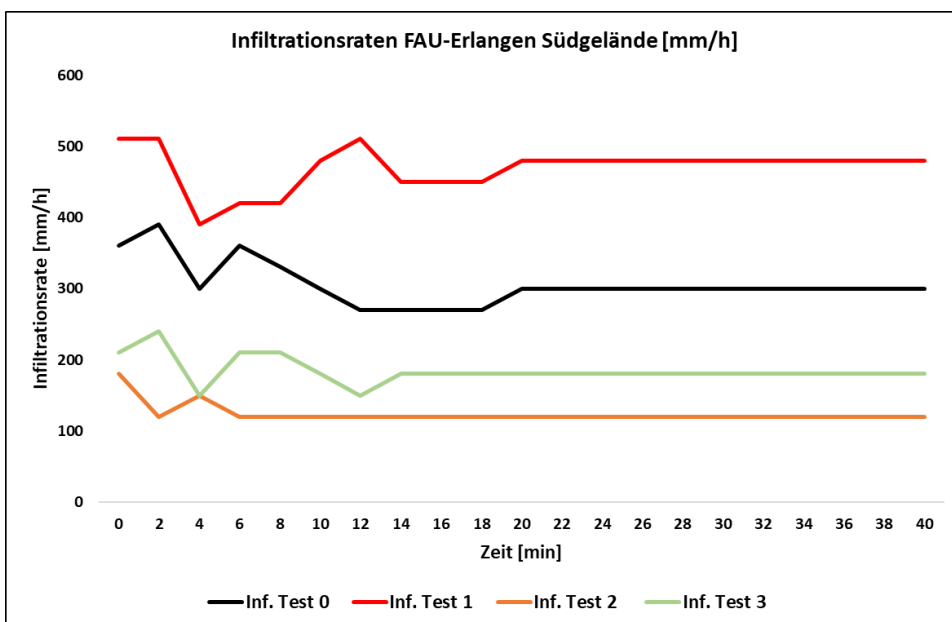


Abbildung 26: Graphische Darstellung der Infiltrationsraten (Inf.) der ersten Testkampagne im Südgeländer der FAU-Erlangen [mm/h].

Test 0 erreichte eine konstante Infiltrationsrate von 300 mm/h nach 20 Minuten Infiltrationszeit. Test 1 benötigte ebenfalls 20 Minuten zum Erreichen der stationären Phase und pendelte sich dort bei 480 mm/h ein. Nach nur sechs Minuten ging Test 2 in die stationäre Phase über mit Werten von 120 mm/h. Test 3 benötigte dann wieder mehr Zeit mit 14 Minuten und erreichte konstante Raten von 180 mm/h. Damit lag die Infiltrationsrate von Test 0 weit über denen von Test 2 und 3, welche sich auf dem verdichteten Trampelpfad befanden. In dem 1 m<sup>2</sup> großem Quadrat, welches jeweils an den vier Eckpunkten belüftet wurde, erreichte Test 1 die höchsten Infiltrationsraten, trotz der lokalen Verdichtung auf dem Weg. Die Raten lagen bei Test 2 um ca. 75% niedriger und die von Test 3 um ca. 62,5% niedriger, im Vergleich zu Test 1.

#### **4.4.3 Glühverlust (LOI)**

Die getrocknete Probe mit 10,000g Gewicht aus dem Bodenprofil des Südgeländes der FAU-Erlangen zeigte nach dem Glühen ein Gewicht von 9,919g und damit einen prozentualen Glühverlust von 0,81%, der niedrigste in der Arbeit.

#### **4.4.4 Infiltration (VOGT-Lanze)**

Am Montag, den 14.07.2025, wurde eine weitere Testreihe auf einem von Menschen gebildeten Trampelpfad vollzogen. Aufgrund der extremen Trockenheit des Standorts, sowie des ausschließlich sandigen Profils der Teststelle wurde neben der Geo-Injektion, die bei allen anderen Test zum Einsatz kommt, auch die Belüftungsmethode mit der VOGT-Lanze getestet. Somit können Vor- und Nachteile, sowie Unterschiede der beiden Verfahren bei solch widrigen Bedingungen aufgezeigt werden. Mit der Lanze wurden auf einer Fläche von 1 m<sup>2</sup> neun Löcher belüftet, während es bei der Geo-Injektion vier sind.



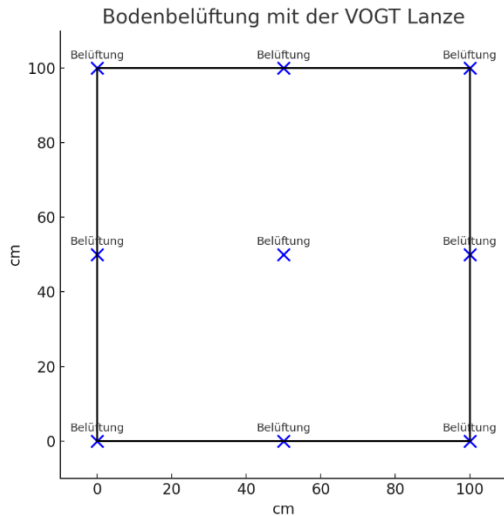


Abbildung 27: Verteilung der Belüftungslöcher auf einem Quadratmeter für die Testreihe mit der VOGT-Lanze am Südgelände der FAU in Erlangen am 14.07.2025.

Die erstellten Löcher mit der Lanze sind breiter und haben einen niedrigeren Wirkungsradius im Untergrund als die Löcher der Geo-Injektion, daher wurden sie deutlich dichter gesetzt. Die beanspruchte Zeit pro erstelltem Loch bei dem Verfahren mit der Lanze war wesentlich kürzer als bei der Geo-Injektion. So wurden für die neun Löcher drei Minuten benötigt, während eine sachgemäße Injektion und Belüftung für ein einziges Loch je nach Dichte, Wassergehalt und Zusammensetzung 1-3 Minuten in Anspruch nehmen konnte.

Auch bei dieser Testreihe ist Test 0 der Kontrolltest, welcher auf unbearbeitetem Boden durchgeführt wurde. Test 1 befand sich im Zentrum des belüfteten Rasters und Test 2 wurde genau 100 cm vom Mittelpunkt von Test 1 positioniert. Aufgrund der geringeren effektiven Reichweite dieses Verfahrens wurde kein dritter Test mit 200 cm Abstand zu Test 1 gemessen.

Tabelle 8: Übersicht der Wasserstände [cm] der zweiten Testkampagne im Südgelände der FAU-Erlangen. Testreihe der Bodenbelüftung mit VOGT-Lanze.

| Zeit [min] | Test 0 [cm] | Test 1 [cm] | Test 2 [cm] |
|------------|-------------|-------------|-------------|
| 00:00      | 17          | 17          | 17          |
| 02:00      | 16,1        | 15          | 15,9        |
| 04:00      | 15,2        | 13,2        | 15          |
| 06:00      | 14,3        | 11,6        | 14,3        |
| 08:00      | 13,5        | 10,4        | 13,6        |
| 10:00      | 12,7        | 9           | 12,8        |
| 12:00      | 11,9        | 7,8         | 12          |
| 14:00      | 11,2        | 6,6         | 11,2        |
| 16:00      | 10,4        | 5,4         | 10,4        |
| 18:00      | 9,6         | 4,2         | 9,6         |
| 20:00      | 8,8         | 3           | 8,8         |

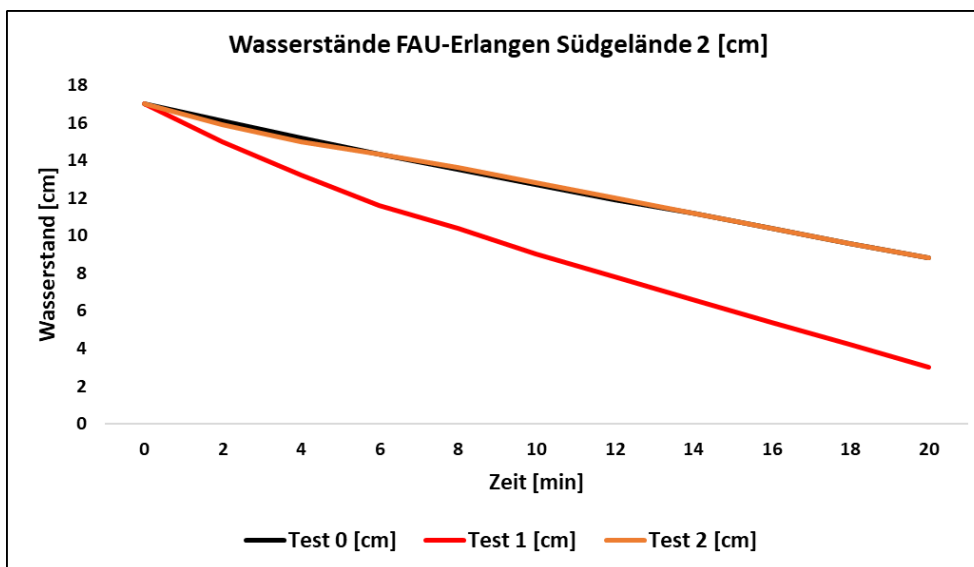


Abbildung 28: Wasserstände [cm] der zweiten Testkampagne im Südgelände der FAU-Erlangen vom 14.07.2025. Bodenbelüftung durch VOGT Lanze.

Test 0 und Test 2 erreichten nach 20 Minuten Absenkung beide den Wasserstand von 8,8 cm und verloren damit insgesamt 8,2 cm. Beide unterschieden sich nur leicht in ihrer inkonstanten Phase und glichen sich ab Minute 14. Test 1 konnte im Raster der Bodenbelüftung seine Absenkung mit 14 cm im Vergleich zu den 8,2 cm von Test 0 und 2 deutlich erhöhen. Die Prozentuale Zunahme der Absenkung nach der Bodenbelüftung durch die VOGT Lanze Beträgt hier 70,1%.

Tabelle 9: Infiltrationsraten [mm/h] der zweiten Testkampagne im Südgelände der FAU-Erlangen. Bodenbelüftung durch VOGT-Lanze. Inkonstante Infiltrationsraten in Gelb gekennzeichnet, stationäre Raten in grün.

| Zeit [min] | Inf. Test 0 | Inf. Test 1 | Inf. Test 2 |
|------------|-------------|-------------|-------------|
| 00:00      | 270         | 600         | 330         |
| 02:00      | 270         | 540         | 270         |
| 04:00      | 270         | 480         | 210         |
| 06:00      | 240         | 360         | 210         |
| 08:00      | 240         | 420         | 240         |
| 10:00      | 240         | 360         | 240         |
| 12:00      | 240         | 360         | 240         |
| 14:00      | 210         | 360         | 240         |
| 16:00      | 240         | 360         | 240         |
| 18:00      | 240         | 360         | 240         |
| 20:00      | 240         | 360         | 240         |

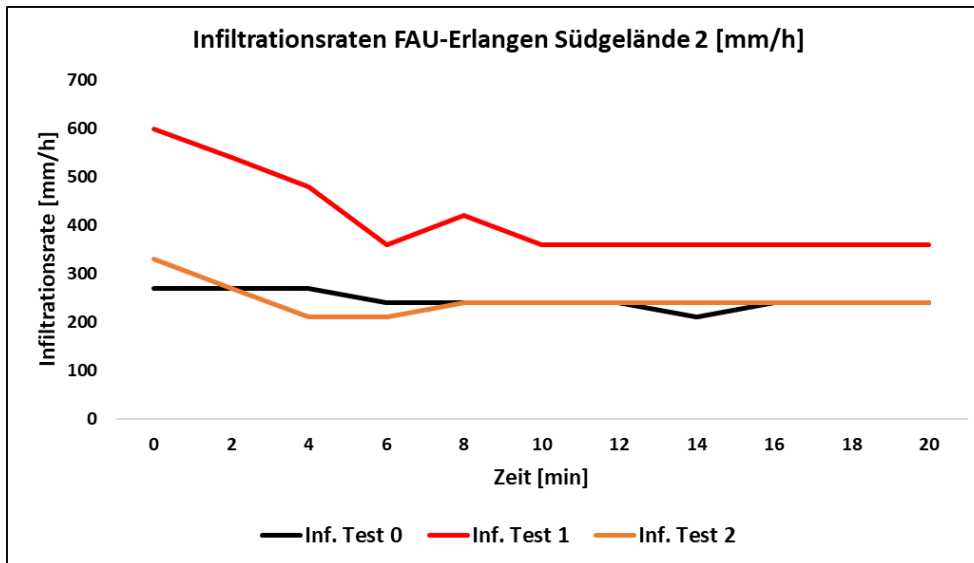


Abbildung 29: Graphische Darstellung der Infiltrationsraten (Inf.) der zweiten Testkampagne im Südgeländer der FAU-Erlangen [mm/h].

Die konstante Infiltrationsrate vom Kontrolltest 0 lag mit 240 mm/h auf dem gleichen Niveau, wie die konstante Rate von Test 2, welcher sich 50 cm vom belüfteten Raster entfernt befand. Beide Tests unterschieden sich nur durch ihre Raten in der inkonstanten Phase, welche bei Test 0 mit 14 Minuten länger andauerte als die von Test 2 mit sechs Minuten. Test 1, auf der quadratischen Fläche mit den neun Belüftungslöchern erreichte nach zehn Minuten die stationäre Phase mit einer konstanten Infiltrationsrate von 360 mm/h. Damit beträgt der Zuwachs auf der bearbeiteten Fläche 50%, trotz der sandigen und trockenen Bedingungen.

## 4.5 Testdurchlauf im Schlossgarten von Erlangen

### 4.5.1 Bodenprofil

In Tiefen von 0-20 cm lag der Ah-Horizont vor, der hier dunkelbraun bis schwarz, deutlich humos durchsetzt und feinkrümelig war. Ein größerer Anteil an Organik und viel Durchwurzelung lagen hier vor. Sandig-lehmige Korngrößen.

Der Übergang vom Ah- zum Bv-Horizont stand in der Tiefe von 20-40 cm an. Dieser war dunkelbraun, körnig bis krümelig, etwas weniger humos, leicht sandig bei mittleren Korngrößen, durchmischt und durchwurzelt.

Von 40-60 cm Tiefe erstreckte sich der Bv-Horizont, der hier ein helleres braun besaß und dabei sandiger und gröber wurde, mit lehmigen Anteilen. Wenig Humus und kaum Durchwurzelung, bei einer lockeren Struktur.

Ab 60 cm lag der C-Horizont bis zum Ende des Profils in 100 cm Tiefe vor. Gelbliches braun bis rötlicher grober Sand, sehr homogen und locker, unverwittert und ohne Humusanteilen.

## 4.5.2 Infiltration

Am Donnerstag, den 10.07.2025, wurde die Versuchsreihe im Erlanger Schlossgarten realisiert. Alle Tests wurden entlang eines sichtbar stark verdichteten, durch hohe Frequentierung in der Begehung geschaffenen, Trampelpfads verrichtet. Zusätzlich wurde auf der Fläche von Test 1 ein Versickerungstest genau acht Wochen später durchgeführt, um den Langzeiteffekt der Bodenbelüftung zu ermitteln. Dieser Test heißt hier Folgetest und wird in den Abbildung 30 und 31 in der Farbe Blau dargestellt.

Tabelle 10: Übersicht der Wasserstände der einzelnen Tests [cm] im Erlanger Schlossgarten.

| Zeit [min] | Test 0 [cm] | Test 1 [cm] | Test 2 [cm] | Test 3 [cm] | Folgetest [cm] |
|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|----------------|
| 00:00      | 18          | 18          | 18          | 18          | 18             |
| 02:00      | 17,9        | 17,6        | 17,9        | 17,9        | 17,8           |
| 04:00      | 17,9        | 17,2        | 17,8        | 17,8        | 17,5           |
| 06:00      | 17,9        | 16,8        | 17,8        | 17,8        | 17,2           |
| 08:00      | 17,9        | 16,3        | 17,7        | 17,7        | 16,9           |
| 10:00      | 17,8        | 15,9        | 17,7        | 17,7        | 16,7           |
| 12:00      | 17,8        | 15,4        | 17,6        | 17,7        | 16,5           |
| 14:00      | 17,8        | 15          | 17,6        | 17,6        | 16,3           |
| 16:00      | 17,8        | 14,6        | 17,5        | 17,6        | 16,1           |
| 18:00      | 17,7        | 14,2        | 17,5        | 17,5        | 15,9           |
| 20:00      | 17,7        | 13,8        | 17,5        | 17,5        | 15,7           |
| 22:00      | 17,7        | 13,4        | 17,4        | 17,5        | 15,5           |
| 24:00      | 17,7        | 13          | 17,4        | 17,4        | 15,3           |
| 26:00      | 17,6        | 12,6        | 17,4        | 17,4        | 15,1           |
| 28:00      | 17,6        | 12,2        | 17,3        | 17,3        | 14,9           |
| 30:00      | 17,6        | 11,8        | 17,3        | 17,3        | 14,7           |
| 32:00      | 17,6        | 11,4        | 17,3        | 17,2        | 14,5           |
| 34:00      | 17,5        | 11          | 17,2        | 17,2        | 14,3           |
| 36:00      | 17,5        | 10,6        | 17,2        | 17,1        | 14,1           |
| 38:00      | 17,5        | 10,2        | 17,2        | 17,1        | 13,9           |
| 40:00      | 17,5        | 9,8         | 17,1        | 17          | 13,7           |

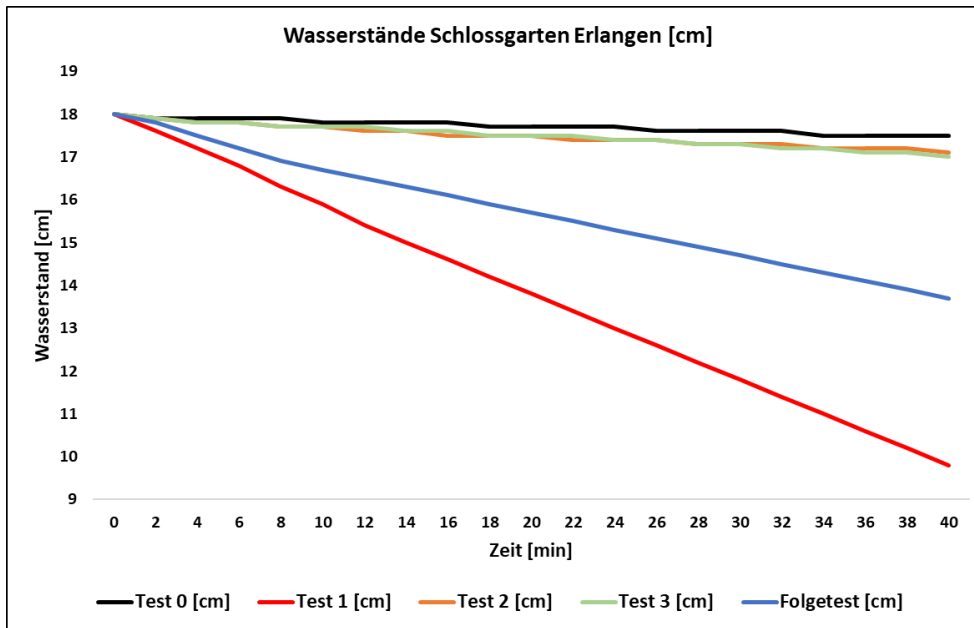


Abbildung 30: Wasserstände [cm] der einzelnen Testdurchläufe im Schlossgarten Erlangen vom 10.07.2025 und des Folgetests.

Test 0 zeigte auf dem stark verdichteten Weg ohne Bodenbelüftung eine sehr geringe Gesamtabsenkung von 0,5 cm innerhalb 40 Minuten. Die Gesamtabsenkung konnte in Test 1, im belüfteten Quadrat, sehr sichtbar auf 8,2 cm in den gleichen 40 Minuten angehoben werden. Dies entspricht einem Zuwachs von 1540%. Test 2, welcher sich 100 cm von Teststelle 1 entfernt befand, erreichte eine Absenkung von 0,9 cm. Im Vergleich zu Test 0 entspricht das einer Zunahme der Absenkung von 80%. Test 3, welcher weitere 100 cm von Test 2 und damit 200 cm von Test 1 entfernt lag, zeigte eine Absenkung von 1,0 cm in 40 Minuten. Der Zuwachs gegenüber Test 0 beträgt damit 100%. Der Zuwachs von Test 1 ist dementsprechend deutlich extremer als der von Test 2 und 3. Der Folgetest (blau) auf der Fläche von Test 1 im belüfteten Raster erreichte acht Wochen später eine Gesamtabsenkung von 4,3 cm. Dies entspricht gegenüber Test 0 eine prozentuale Steigerung um 760% und gegenüber Test 1 einer Abnahme um -47,6%.

Tabelle 11: Infiltrationsraten [mm/h] der einzelnen Tests im Schlossgarten Erlangen. Inkonstante Infiltrationsraten in Gelb gekennzeichnet, stationäre Raten in Grün.

| Zeit [min] | Inf. Test 0 [mm/h] | Inf. Test 1 [mm/h] | Inf. Test 2 [mm/h] | Inf. Test 3 [mm/h] | Inf. Folgetest [mm/h] |
|------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-----------------------|
| 00:00      | 7,5                | 127,5              | 22,5               | 22,5               | 82,5                  |
| 08:00      | 7,5                | 127,5              | 15                 | 7,5                | 60                    |
| 16:00      | 7,5                | 120                | 7,5                | 15                 | 60                    |
| 24:00      | 7,5                | 120                | 7,5                | 15                 | 60                    |
| 32:00      | 7,5                | 120                | 15                 | 15                 | 60                    |
| 40:00      | 7,5                | 120                | 15                 | 15                 | 60                    |

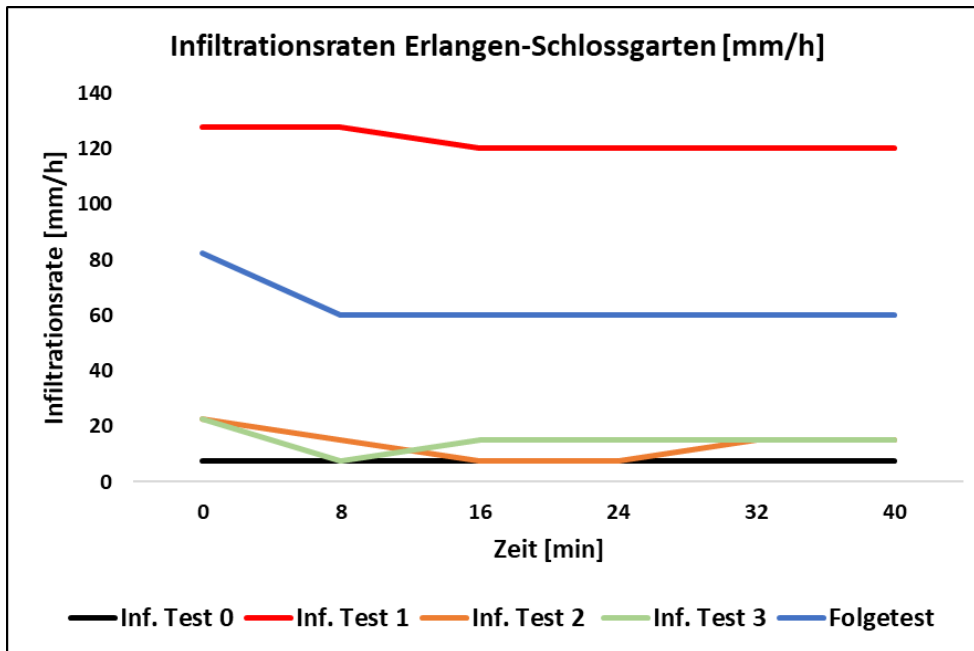


Abbildung 31: Graphische Darstellung der Infiltrationsraten (Inf.) der Tests im Schlossgarten Erlangen [mm/h].

Test 0 zeigt durchgehend sehr niedrige aber konstante Infiltrationsraten von 7,5 mm/h. Test 1 konnte in der belüfteten Fläche mit seiner konstanten Rate von 120 mm/h einen großen Zuwachs von 1500% gegenüber der unbelüfteten Fläche erreichen. Test 2 mit 50 cm Abstand zur belüfteten Fläche und Test 3 mit 150 cm Abstand konnten ihre konstanten Raten gegenüber Test 0 um 100% auf 15 mm/h steigern. Test 2 und 3 unterschieden sich nur in der Länge ihrer inkonstanten Phase, die bei Test 2 24 Minuten und bei Test 3 acht Minuten dauerte. Der Folgetest (blau) erreichte eine konstante Infiltrationsrate von 60 mm/h nach acht Minuten inkonstanter Phase. Somit konnte der Folgetest seine Infiltration gegenüber Test 0 um 700% steigern während sie gegenüber Test 1 um -50% verringert war.

#### 4.5.3 Glühverlust (LOI)

Aus den getrockneten 10,000g wurden nach dem Glühen 9,490g. Der Glühverlust beträgt damit 5,10%.



## 4.6 Testdurchlauf auf der Grünfläche Eichenhain in Fürth

### 4.6.1 Bodenprofil

Aufgrund der extremen Härte und Trockenheit des Bodens konnte das Profil von Hand nur in eine Tiefe bis 50 cm entnommen werden. Hier lag in der Tiefe von 0-15 cm der Ah-Horizont mit einem sehr dunklen braun vor. Humos mit vielen feinen Wurzeln, körnig bis krümelig. Mittel- bis Grobsand dominiert mit Schluffanteilen.

Der Bv-Horizont erstreckte sich in den Tiefen von 15-25 cm und war braun, humusärmer und mineralisch, gröberer, Mittel- bis Grobsand bei weniger Schluffanteilen.

Ab 25 cm Tiefe lag bis zum Ende des Profils auf 50 cm Tiefe der C-Horizont vor. Dieser war hellbraun bis gelblich, sehr homogen und reiner Mittel- bis Grobsand.

### 4.6.2 Infiltration

Auf der Teststelle im Eichenhain in Fürth war es aufgrund zu großer Trockenheit im gesamten Bodenprofil und der gleichzeitigen starken Verdichtung nicht möglich, eine fachgerechte Bodenbelüftung durchzuführen. Der Boden konnte die Energie des Luftdrucks nicht genug absorbieren, sondern reflektierte sie zurück. Die Druckluft trat unter extremer Staubentwicklung direkt aus dem zu belüftenden Loch wieder aus. Eine intensive Bewässerung über Wochen hinweg, oder eine Feuchtperiode wäre nötig gewesen um den Boden bis in tiefe Schichten ausreichend zu befeuchten, damit dieser die Energie ausreichend absorbieren kann (mehr zur geeigneten Bodenfeuchte in Kapitel 5.8). Aus diesem Grund wurde an diesem Standort am 15.07.2025 nur die Infiltrations-Messung auf dem verdichteten, unbelüfteten Boden durchgeführt.

Tabelle 12: Wasserstand [cm] und Infiltrationsrate [mm/h] von Test 0 auf der Grünanlage Eichenhain in Fürth. Inkonstante Infiltrationsraten in Gelb gekennzeichnet, stationäre Raten in grün.

| Zeit [min] | Wasserstand [cm] | Infiltration [mm/h] |
|------------|------------------|---------------------|
| 0          | 20               | 30                  |
| 4          | 19,8             | 30                  |
| 8          | 19,6             | 15                  |
| 12         | 19,5             | 15                  |
| 16         | 19,4             | 15                  |
| 20         | 19,3             | 15                  |
| 24         | 19,2             | 15                  |
| 28         | 19,1             | 15                  |
| 32         | 19               | 15                  |
| 36         | 18,9             | 15                  |
| 40         | 18,8             | 15                  |

Der unbearbeitete Boden zeigte geringe Infiltrationsraten von 15 mm/h in der konstanten Phase und benötigte acht Minuten um diese zu erreichen.

#### **4.6.3 Glühverlust (LOI)**

Die getrocknete Probe mit 10,000g wog nach dem Glühen 9,508g und erreicht somit einen Glühverlust von 4,92%.

### **4.7 Doppeltestdurchlauf im Bayreuther Hofgarten**

#### **4.7.1 Bodenprofil**

Der Ah-Horizont lag in einer Tiefe von 0-10 cm vor. Dieser war hier sehr dunkelbraun bis schwarz, humusreich und feinkörnig, mit hohem organischen Anteil. Überwiegend Schluff, mit feinen Sandanteilen und Ton. Gut durchwurzelt.

Der Übergang vom Ah- zum Bv-Horizont befand sich zwischen 10 und 30 cm Tiefe. Dieser war dunkelbraun, dichter als der Ah-Horizont und weniger humusreich. Dichter, lehmiger Schluff mit beginnender Lessivierung (Tonverlagerung), noch durchwurzelt.

Der Bv-Horizont stand in der Tiefe von 30-55 cm an. Deutlich dichter mit brauner Farbe. Lehmiger bis toniger Unterboden mit wenig Organik. Kaum Wurzeln aber Verdichtung sichtbar. Toniger Lehm.

Der Bt-Horizont (Tonanreicherungshorizont) erstreckte sich in Tiefen von 55-70 cm. Dieser besaß ein deutlich helleres braun, mit klarerer toniger Struktur, dazu feine Poren und eine horizontale Lagerung. Kaum Organik und stark eingeschränkte Wasserdurchlässigkeit, tonreicher Lehm. Klassischer Illuvialhorizont.

Der Übergang vom B- zum C-Horizont lag in Tiefen von 70-90 cm. Dieser war hellbraun, grobkörniger, sandiger Lehm ohne Struktur und schwach aggregiert. Weniger Bodenentwicklung und Übergang zur Ausgangsschicht.

In 90-100 cm Tiefe befand sich der C-Horizont. Hellbraun bis gelblich, lockerer Sand mit größeren Mineralanteilen. Sandiger Schluff ohne Organik. Übergang zum Ausgangsgestein.

## 4.7.2 Infiltration

Am 17.09.2025 wurden im Bayreuther Hofgarten die Versickerungstests an jeweils zwei Standorten durchgeführt. Diese befanden sich auf sichtbar verdichteten Trampelpfaden in der Nähe des Spielplatzes.

Tabelle 13: Wasserstände der einzelnen Tests vom Bayreuther Hofgarten. M1 = Messstelle 1; M2 = Messstelle 2.

| Zeit [min] | M1 Test 0 [cm] | M1 Test 1 [cm] | M1 Test 2 [cm] | M2 Test 0 [cm] | M2 Test 1 [cm] | M2 Test 2 [cm] |
|------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 00:00      | 18             | 18             | 18             | 18             | 18             | 18             |
| 02:00      | 18             | 17,3           | 18             | 17,5           | 16,8           | 17,6           |
| 04:00      | 18             | 16,7           | 17,9           | 17             | 15,8           | 17,2           |
| 06:00      | 17,9           | 16,2           | 17,9           | 16,5           | 14,9           | 16,8           |
| 08:00      | 17,9           | 15,8           | 17,9           | 16             | 14,1           | 16,4           |
| 10:00      | 17,9           | 15,4           | 17,9           | 15,5           | 13,4           | 16             |
| 12:00      | 17,9           | 15             | 17,9           | 15             | 12,6           | 15,6           |
| 14:00      | 17,8           | 14,6           | 17,8           | 14,5           | 11,8           | 15,2           |
| 16:00      | 17,8           | 14,2           | 17,8           | 14             | 11             | 14,8           |
| 18:00      | 17,8           | 13,8           | 17,8           | 13,5           | 10,2           | 14,4           |
| 20:00      | 17,8           | 13,4           | 17,8           | 13             | 9,4            | 14             |
| 22:00      | 17,7           | 13             | 17,7           | 12,5           | 8,6            | 13,6           |
| 24:00      | 17,7           | 12,6           | 17,7           | 12             | 7,8            | 13,2           |
| 26:00      | 17,7           | 12,2           | 17,7           | 11,5           | 7              | 12,8           |
| 28:00      | 17,7           | 11,8           | 17,7           | 11             | 6,2            | 12,4           |
| 30:00      | 17,6           | 11,4           | 17,6           | 10,5           | 5,4            | 12             |

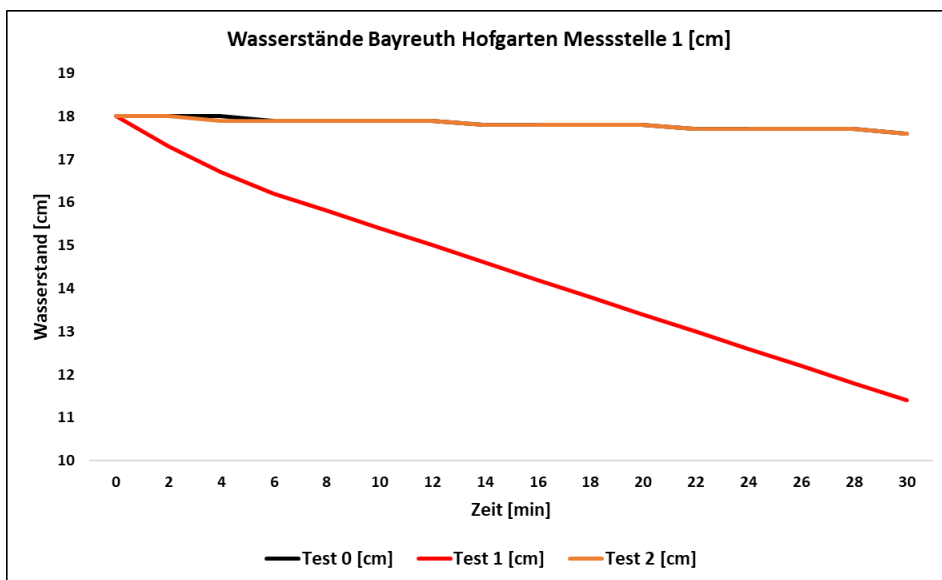


Abbildung 32: Wasserstände [cm] der einzelnen Testdurchläufe der Messstelle 1 im Bayreuther Hofgarten vom 17.09.2025

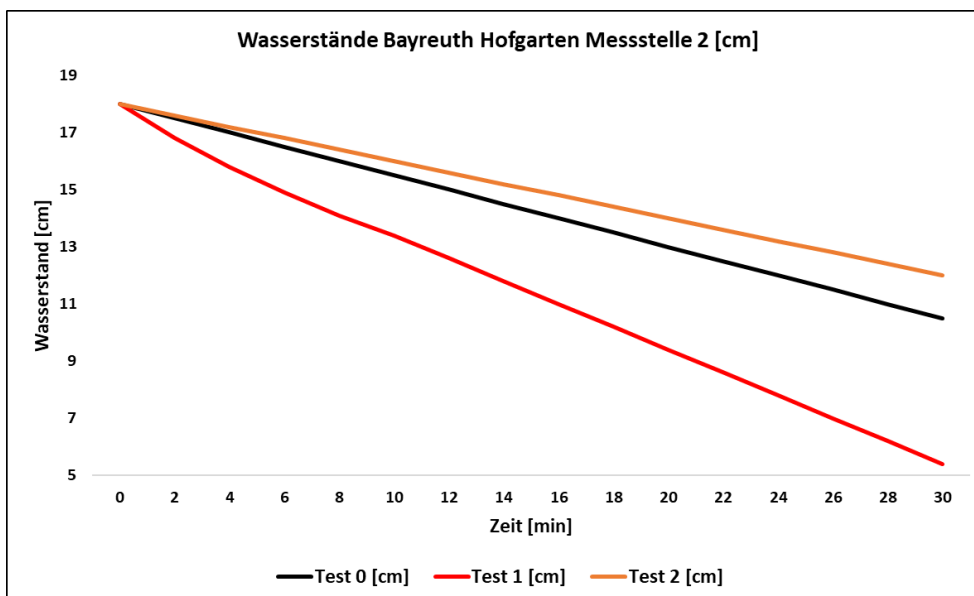


Abbildung 33: Wasserstände [cm] der einzelnen Testdurchläufe der Messstelle 2 im Bayreuther Hofgarten vom 17.09.2025.

Test 0 der Messstelle 1 erreichte nach 30 Minuten eine Gesamtabsenkung des Wasserstands von 0,4 cm. Test 1 im belüfteten Raster dagegen 6,6 cm, was einer prozentualen Steigerung der Absenkung von 1550% entspricht. Test 2, 100 cm entfernt von Test 1 und außerhalb des Rasters erreichte eine Absenkung von ebenfalls 0,4 cm in 30 Minuten, also die gleiche von Test 0.

Auf der Messstelle 2 erreichte der Kontrolltest 0 eine Gesamtabsenkung von 7,5 cm in 30 Minuten. Diese konnte auf 12,6 cm bei Test 1 im Raster gesteigert werden. Damit legte Test 1 prozentual um 68% gegenüber dem Kontrolltest zu. Test 2 erreichte eine Absenkung von 6,0 cm im gleichen Zeitraum und wies gegenüber dem Kontrolltest 0 einen leichten Rückgang von -20% auf.

Tabelle 14: Infiltrationsraten [mm/h] von Tests 0 (T0), Test 1 (T1) und Test 2 (T2) der Messstelle 1 (M1) und Messstelle 2 (M2) aus dem Bayreuther Hofgarten. Inkonstante Infiltrationsraten in Gelb gekennzeichnet, stationäre Raten in Grün.

| Zeit [min] | Inf. M1 T0 [mm/h] | Inf. M1 T1 [mm/h] | Inf. M1 T2 [mm/h] | Inf. M2 T0 [mm/h] | Inf. M2 T1 [mm/h] | Inf. M2 T2 [mm/h] |
|------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 00:00      | 10                | 180               | 10                | 150               | 310               | 120               |
| 06:00      | 7,5               | 120               | 7,5               | 150               | 230               | 140               |
| 12:00      | 7,5               | 120               | 7,5               | 150               | 240               | 120               |
| 18:00      | 7,5               | 120               | 7,5               | 150               | 240               | 120               |
| 24:00      | 7,5               | 120               | 7,5               | 150               | 240               | 120               |
| 30:00      | 7,5               | 120               | 7,5               | 150               | 240               | 120               |

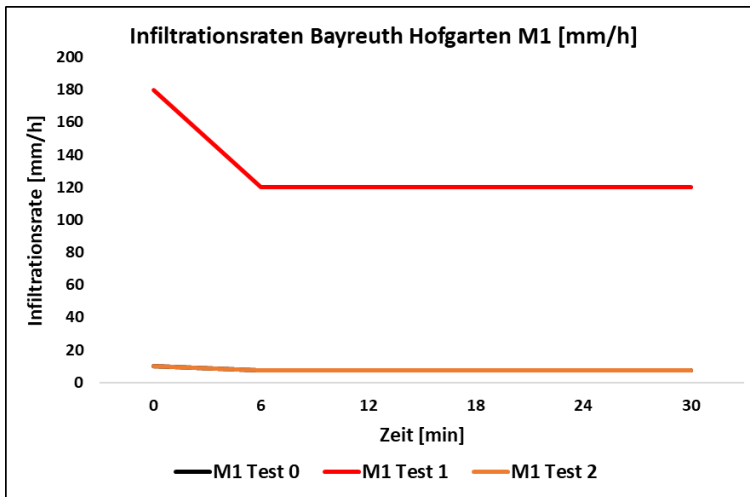


Abbildung 34: Graphische Darstellung der Infiltrationsraten der Tests 0-2 im Bayreuther Hofgarten auf Messstelle 1 (M1) [mm/h].

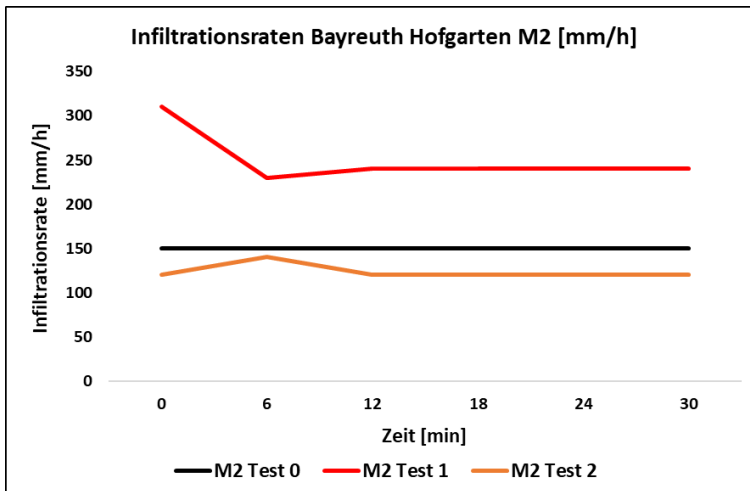


Abbildung 35: Graphische Darstellung der Infiltrationsraten der Tests 0-2 im Bayreuther Hofgarten auf Messstelle 2 (M2) [mm/h].

Auf Messstelle 1 erreichte Test 0 nach sechs Minuten inkonstanter Infiltration eine konstante Infiltrationsrate von 7,5 mm/h. Test 1 konnte in dem Raster mit Bodenbelüftung seine konstante Infiltrationsrate auf 120 mm/h steigern und erreichte diese ebenfalls nach sechs Minuten. Dies entspricht einer prozentualen Steigerung um 1500% gegenüber Test 0. Test 2 erreichte, wie Test 0, eine konstante Rate von 7,5 mm/h nach einer sechsminütigen inkonstanten Phase.

Auf Messstelle 2 erreichte der Kontrolltest 0 direkt eine konstante Infiltrationsrate von 150 mm/h. Test 1 im Raster steigerte seine Rate auf 240 mm/h nach 12 Minuten inkonstanter Infiltration. Die prozentuale Steigerung gegenüber Test 0 beträgt hier 60%. Test 2 erreichte nach 12 Minuten seine konstante Rate von 120 mm/h und verzeichnet damit einen Rückgang um -20% gegenüber Test 0.

### 4.7.3 Glühverlust (LOI)

Die getrocknete Probe von Messstelle 1 mit 10,000g wog nach dem Glühen 9,453g und erreicht somit einen Glühverlust von 5,47%.

Die trockene Probe der Messstelle 2 wog ebenfalls exakt 10,000g vor dem Glühen und erreichte danach ein geglühtes Gewicht von 9,410g. Dies entspricht einem Glühverlust von 5,90%.

## 5. Diskussion

### 5.1. Messbare Effekte der Bodenbelüftung auf die Infiltrationsraten

Tabelle 15: Übersicht der Bodentypen und der prozentualen Veränderungen der Infiltrationsraten der Tests 1;2;3 sowie der Folgetests und Test 4 gegenüber dem Kontrolltest 0, der einzelnen Messstellen. Zunahmen in Grün, gleiche Werte in Gelb und Abnahmen in Rot.

| Messstelle                       | Bodentyp                          | Test 1 $\Delta$ Inf. [%] zu Test 0 | Test 2 $\Delta$ Inf. [%] zu Test 0 | Test 3 $\Delta$ Inf. [%] zu Test 0 | Folgetest/ Test 4 $\Delta$ Inf. [%] zu Test 0 |
|----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------------------|
| Weidenberg                       | Lehmige Braunerde                 | +150                               | +87,5                              | 0                                  |                                               |
| Nürnberg (Platnersberg)          | Sandige Braunerde                 | +28,6                              | -57,1                              | +71,4                              |                                               |
| Fürth Stadtpark                  | Sandige Braunerde                 | +200                               | +100                               | +100                               | +300 (Test 4 auf Belüftungsloch)              |
| Erlangen FAU-Süd (Geo-Injektion) | Sand. Braun. (schwach entwickelt) | +60                                | -60                                | -40                                |                                               |
| Erlangen FAU-Süd (VOGT Lanze)    | Sand. Braun. (schwach entwickelt) | +50                                | 0                                  |                                    |                                               |
| Erlangen Schlossgarten           | Sandige Braunerde                 | +1500                              | +100                               | +100                               | +760 (Folgetest)                              |
| Bayreuth M1                      | Parabraunerde                     | +1500                              | 0                                  |                                    |                                               |
| Bayreuth M2                      | Parabraunerde                     | +60                                | -20                                |                                    |                                               |

Da Test 1 der einzige Test ist, welcher sich direkt auf der belüfteten Fläche befand, sagt dieser am meisten über den direkten Effekt der Druckluftinjektion auf die Infiltrationsraten aus. Nur Test 4, welcher nur im Stadtpark Fürth aufgenommen wurde, befand sich direkt auf einem der Belüftungslöcher und zeigt daher den Effekt, welcher direkt um das Belüftungsloch herum auftritt.



## 5.2. Analyse der Profile, Infiltrationsmessungen und Glühverluste

### 5.2.1 Weidenberg

Die Messstelle in Weidenberg befand sich auf einer lehmigen bis sandig-lehmigen Braunerde, ohne Anzeichen für eine Tonverlagerung, die für eine Parabraunerde sprechen würde. Der Ah-Horizont befand sich in den Tiefen von 0-20 cm und setzte sich aus mittlerem Lehm mit Sandanteilen zusammen. Somit ist diese Schicht ein humoser Oberboden mit guter Wasserspeicherung. Der Glühverlust von 6,48% bestätigt das Vorhandensein von organischer Materie, was ebenfalls einen humosen Oberboden mit mittlerer Fruchtbarkeit bestätigt (Bojko & Kabala, 2014). Der Ah-Horizont war aufgrund seiner hier lockeren Struktur, den Sandanteilen und den vielen Regenwurmkanälen fähig, gerade in den ersten zehn Minuten der Infiltration hohe Raten von 60 mm/h zu erreichen. Der Bv-Horizont in Tiefen von 20-30 cm war hier ein deutlich dichter, dunkler, tonig-lehmiger Unterboden, welcher hier als Infiltrationsbremse wirkte und erklärt, dass die konstante Infiltration ab 40 Minuten verstrichener Zeit bei niedrigeren 48 mm/h lag. Denn diese Schicht wirkte hier wie eine Art Engpass, welche erst durchströmt werden musste. Ab 30 cm Tiefe wurde der Boden sandig-lehmig, bei gröberen Verteilungen mit geringer Bindigkeit. Hier dürfte die Infiltrationsleistung wieder deutlich höher liegen als in der bremsenden Bv-Schicht. Die Infiltration war anfangs aufgrund des Matrixsaugspannungsgradienten höher. Die noch trockenen Poren ziehen das Wasser an. Der Gradient wird mit zunehmender Wassersättigung schwächer, was die niedrigeren konstanten Raten erklärt (Fitts et al., 1956). Zudem fließt das Wasser zu Beginn bevorzugt in die Makroporen und verfüllt diese. Sobald sie gefüllt sind bestimmt die hydraulische Leitfähigkeit des Bodens den Durchfluss (Jarvis, 2007). Die konstante Infiltrationsrate entspricht dann der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit.

Nach der Bodenbelüftung erreichte Test 1 auf dieser Fläche eine Infiltrationsrate von 150 mm/h in den ersten sechs Minuten. Anschließend lag die konstante Rate bei 120 mm/h und ist damit 150% größer als die des Kontrolltests. Makroporen wie Wurzelgänge, Regenwurmkanäle, Belüftungsrisse- und Löcher sind wichtige Transportwege für das Wasser. So kann an der feinporigen, tonig-lehmigen Bodenmatrix vorbeigeströmt werden. Die Bildung neuer Makroporen durch die Bodenbelüftung schafft also bevorzugte „Abkürzungen“ durch die infiltrationshemmende Bv-Schicht in die lockere und gröbere Schicht hinein (Jarvis, 2007). So ist das Potenzial der maximalen Infiltration durch das erleichterte Durchströmen der dichten Bv-Schicht deutlich erhöht, was durch die um 150% gesteigerte Infiltrationsrate bestätigt wird. Auch andere Untersuchungen zeigen die infiltrationssteigernde Wirkung. In anderen Forschungen konnte durch Druckluftinjektion in einen tonigen Boden die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit auch 12 Monate nach der Behandlung um  $100 \pm 30\%$  gesteigert werden, bei gleichzeitig gesenktem Penetrationswiderstand um  $67 \pm 9\%$  (Konadu, 2024).

Die Infiltrationsrate von 90 mm/h von Test 2 wurde 50 cm außerhalb der behandelten Fläche erreicht. Somit konnte hier die Rate im Vergleich zum Kontrolltest um 87,5% gesteigert werden, ist aber im Vergleich zur belüfteten Fläche hier schon deutlich geringer. Dies zeigt, dass sich der räumliche Effekt stark auf die Umgebung nahe der Belüftung begrenzt. Andere Feldversuche auf Tonböden zeigten eine Ausbreitung der Risse von bis zu 60 cm um das Injektionsloch herum (Lin & Lin, 2025). Smiley (2001) kam zu einer durchschnittlichen Rissausbreitung von ca. 56 cm Durchmesser, also 28 cm Radius um die Injektionsstelle auf sandigem Lehm. Dementsprechend treten die positiven Effekte wie erhöhte Infiltrationsraten, geringere Schüttdichten und erhöhte Sauerstoffdiffusions-Raten hauptsächlich in den Rissen in maximalen Abständen von bis zu 60 cm um die Bodenverbesserung herum auf.

Bestätigt wird diese These durch die unveränderte Infiltrationsrate von Test 3, welcher sich 150 cm außerhalb der belüfteten Fläche befand. Aufgrund dieser Reichweite wird üblicherweise ein Injektionsloch pro Quadratmeter erstellt. Dies führt zur Überlappung der effektiven Reichweiten und lässt keine verdichteten Horizonte zurück.

### **5.2.2 Nürnberg Platnersberg**

Die Messstelle am Nürnberger Platnersberg befand sich auf einer schwach entwickelten, sandigen Braunerde mit sandigem Ausgangsmaterial. Der geringe Glühverlust von 3,0% bestätigt die geringe organische Substanz im Gesamtprofil und deutet auf einen mineralischen, sanddominierten Boden hin (Bojko & Kabala, 2014). Dementsprechend ist auch das Wasserhaltevermögen stark limitiert, besonders unterhalb des Ah-Horizonts. Dieser war in den Tiefen von 0-20 cm lehmig-sandig, humos und von mittlerer Bindigkeit. Der Bv-Horizont in den Tiefen 20-40 cm war homogener brauner Unterboden. Kaum Humus und Durchwurzelung, bei feinkörnigem Sand. Mittelsandig, hellbraun und locker, ohne Restorganik war der Übergang vom Bv- zum C-Horizont in 40-60 cm Tiefe. Der C-horizont ab 60 cm Tiefe war heller grobkörniger, sehr lockerer Sand mit sehr hoher Durchlässigkeit. Aufgrund des lockeren und sanddominierten Profils kombiniert mit kaum vorhandener Organik wurden hier anfangs sehr hohe Infiltrationsraten von bis zu 270 mm/h gemessen, welche in der konstanten Phase ab Minute 16 210 mm/h betrugen. Sande haben typischerweise hohe gesättigte hydraulische Leitfähigkeiten und hohe Infiltrationsraten, da sie ein hohes Porenvolumen und eine hohe Durchlässigkeit besitzen (West et al., 1988).

Innerhalb der belüfteten Fläche (Test 1) konnte die konstante Rate auf 270 mm/h gesteigert werden, was einem prozentualen Zuwachs von 28,6% entspricht. Die inkonstante Phase dauerte hier 26 Minuten. Die Belüftung schaffte hier ebenfalls zusätzliche Risse und Makroporen.

Da es hier aber keine bremsende und dichte Schicht gab, ist der positive Effekt wesentlich geringer als auf einem lehmigen oder tonigen Boden (Jarvis, 2007). Der Boden war vor der Injektion bereits sehr durchlässig. Das deutlich spätere Erreichen der konstanten Phase ist auf die neugeschaffenen Makroporen und Kanäle zurückzuführen. Das größere Volumen muss erst verfüllt werden, bis sich eine Konstanz einstellt und die Infiltration der hydraulischen Leitfähigkeit entspricht.

Auffällig ist die niedrigere Infiltrationsrate von Test 2, 50 cm entfernt von der Belüftungsfläche. Diese war mit 90 mm/h deutlich geringer als die des Kontrolltests mit 210 mm/h. Möglich ist hier eine lokale Verdichtungsschicht im Bv-Horizont, welche das Infiltrations-Potenzial hier stark hemmt und das Wasser lateral ableitet, bis ein bevorzugter Kanal gefunden wird (Hillel, 1998).

Ebenfalls auffällig ist hier die Infiltrationsrate von Test 3, welche mit 360 mm/h deutlich höher war, als die von Test 1, obwohl sich Test 3 150 cm außerhalb der Belüftungsfläche von Test 1 befand. Mögliche Erklärungen sind lokale Bodenzonen mit gröberen Sandanteilen und die Heterogenität der Sandmatrix. Sande können sehr variable gesättigte hydraulische Leitfähigkeiten (Ksat-Werte) besitzen, welche sich direkt auf die Infiltrationsraten auswirken. So können Sande Ksat-Werte von 15-3790 mm/h aufweisen (Schaap et al., 2003). Daher können lokal gemessene Werte von >300 mm/h durchaus plausibel sein. Des Weiteren können günstig gelegene Strömungskanäle und Makroporen lokal zu einer großen Varianz der Infiltrationen führen (Jarvis, 2007). Durch den geringen Organikgehalt kann sich kaum eine stabile Krümelstruktur bilden, wodurch sich der Boden sehr texturabhängig verhält. Dadurch wirkt sich ein lokaler Unterschied der Korngrößen und der Dichte direkt sehr stark auf die Infiltration aus (Rawls et al., 2003). Bei bereits sehr durchlässigen und lockeren, sanddominierten Böden ist eine Bodenbelüftung nur zur reinen Bekämpfung der Verdichtung und Steigerung der Infiltrationsrate eher obsolet.

### **5.2.3 Stadtpark Fürth**

Die Messstelle im Fürther Stadtpark befand sich ebenfalls auf einer schwach entwickelten, sandigen Braunerde. Kein Bt-Horizont, der auf eine Parabraunerde hindeuten würde. Der Ah-Horizont (0-20cm) war hier dunkelbraun, locker, deutlich durchwurzelt, sandig-lehmig mit Humusanteilen. Ein gut strukturierter Oberboden mit mäßiger Bindigkeit. Der Ah/Bv-Übergang stand in einer Tiefe von 20-40 cm an und war weniger humos, lockerer mit höheren Sandanteilen und weniger Organik. Der Bv-Horizont befand sich in einer Tiefe von 40-60 cm und war homogen, sandig und schwach bindig. Kaum noch Organik. Ab 60 cm begann der C-Horizont, der hier grobkörnig und locker war. Keine Restorganik, sondern reiner Grob- bis Mittelsand. Sehr hohe Durchlässigkeit bei geringer Speicherfähigkeit. Dies wird auch von dem sehr geringen Glühverlust von 2,25% bestätigt.

Daraus lässt sich ein mineralisch geprägter Oberboden mit kaum Organik ableiten, welcher eine sehr geringe Wasserretention und eine niedrige Kationenaustauschkapazität besitzt (Bojko & Kabala, 2014). Die Infiltration des Kontrolltests 0 lag zu Beginn bei bis zu 60 mm/h, sank nach 24 Minuten aber auf das konstante Niveau von 30 mm/h. Dies ist für solch einen sanddominierten Boden auffällig gering und könnte auf eine Tritt- und Lastverdichtung im Ah-Horizont hindeuten. Schon eine Erhöhung der Schüttdichte von 1,6 g/cm<sup>3</sup> auf 1,8 g/cm<sup>3</sup> verringert die Infiltrationsrate um 54% (Meek et al., 1992). In einer Laboruntersuchung wurden fünf verschiedene Schüttdichten erzeugt (1,0/ 1,3/ 1,4/ 1,5/ 1,7 g/cm<sup>3</sup>) aus denen leiteten sich Infiltrationen von 71/ 54/ 25/ 11/ 9,6 mm/h ab. Bei einem Anstieg der Schüttdichte von 1,0 g/cm<sup>3</sup> auf 1,7 g/cm<sup>3</sup> sinkt die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit um den Faktor 7 (Mbarki et al., 2023). Der Verlust von Makroporenkonnektivität und die steigende Tortuosität (Grad der gewundenen Pfade, die ein Fluid durch die Porenstruktur des Bodens zurücklegt) führen zur Infiltration durch feinere Matrix, was die Leitfähigkeit und die Infiltrationsrate stark senkt (Mbarki et al., 2023). Zudem könnte die hydrophobe Wirkung in Sanden ein zusätzlicher Grund für die geringen Raten sein. Trockene und leicht organische Sande sind oft hydrophob, verzögern das Eindringen des Wassers und senken so die Infiltrationsrate (Razipoor et al., 2025).

Die Infiltrationsrate von Test 1 konnte innerhalb der Belüftungsfläche auf konstante 90 mm/h gesteigert werden, nach einer zehnminütigen inkonstanten Phase. Dies entspricht gegenüber dem Kontrolltest einen Zuwachs von 200%. Auch hier bricht die Belüftung lokal verdichtete Horizonte auf, bildet Risse und Makroporen, an denen das Wasser wie in den vorherigen Kapiteln beschrieben in Infiltrationsstärkere Horizonte geleitet wird. Die gebildeten Kanäle dienen auch hier wie eine Art Abkürzung durch die vorher anstehenden Bremsschichten (Jarvis, 2007). Zudem wird durch die Bodenbelüftung die Schüttdichte um bis zu 15% verringert (Sorochan & Dickson, 2014), was die Infiltrationsrate erhöht, da die im vorherigen Absatz genannten negativen Effekte einer erhöhten Schüttdichte rückgängig gemacht werden (Mbarki et al., 2023).

Test 2 erreichte mit 50 cm Abstand zur Belüftungsfläche eine konstante Rate von 60 mm/h. Auch Test 3 mit 150 cm Abstand erreichte konstante 60 mm/h. Dies ist hier auch auf die sehr lokale Heterogenität zurückzuführen. Lokale Verdichtungen und hydrophobische Effekte erzeugen hier ähnliche Infiltrationsniveaus. Test 2 liegt mit seinen 50 cm noch in der Reichweite der Bodenbelüftung und hat daher noch positive Randeffekte dieser erhalten (Smiley, 2001).

Test 3 liegt mit 150 cm Abstand weit außerhalb dieser Reichweite und erhält seine gleichermaßen hohe konstante Rate womöglich durch eine lokal niedrigere Verdichtung, eine gröbere Korngrößen-Verteilung, günstiger verteilten Makroporen oder weniger starken hydrophoben Effekten.

Auf dieser Messstelle wurde ein Test 4 durchgeführt. Dieser befand sich direkt auf einem der Injektionslöcher und erreichte konstante Raten von 120 mm/h. Das Loch wurde mit grobkörnigem Terramolgranulat verfüllt und fungiert daher als direkter makroporiger Kanal in den infiltrationsstarken und grobkörnigen C-Horizont. Der Effekt von neugeschaffener Makroporosität, das Aufbrechen verdichteter Horizonte und die gesenkte Schüttdichte sind hier am Ursprung der Injektion am stärksten und führen somit zur höchsten Infiltrationsrate dieses Standorts (Jarvis, 2007).

## **5.2.4 Südgelände der FAU Erlangen**

### **5.2.4.1 Geo-Injektion**

Die Messstellen auf dem Südgelände der FAU in Erlangen befanden sich auf einer sehr schwach entwickelten Braunerde aus Sand, mit sandigem Ausgangsmaterial. Der Ah-Horizont von 0-20 cm Tiefe war hier dunkelbraun, humos durchsetzt, durchwurzelt und feinkrümelig, mit einer gut durchlüfteten sandig-lehmigen Struktur. Ein klassischer humoser Oberboden. Der Bv-Horizont lag in Tiefen von 20-40 cm und war heller, kaum noch humos, sandig und locker gelagert. Ab 40 cm begann der C-Horizont bis zum Ende des Profils in 100 cm Tiefe. Dieser war gelblicher, homogener und grobkörniger Sand, sehr locker ohne Bindigkeit und Organik. Hier ist eine sehr hohe Wasserdurchlässigkeit zu erwarten. Der Glühverlust des Profils beträgt hier 0,81% und zeigt einen extrem niedrigen Anteil an Organik, welche nur aus dem Ah-Horizont stammt. Damit ist dieses Profil sehr verarmt an Humus, mit einer fast reinen Sandmatrix. Dementsprechend kann hier eine sehr geringe Nährstoffmenge und eine geringe Kationenaustauschkapazität erwartet werden (Bojko & Kabala, 2014). Test 0 befand sich abseits des anthropogen geschaffenen Trampelpfads und erreichte nach 20 Minuten die konstante Infiltration von 300 mm/h. Der Boden ist hier Texturdominiert und passt mit dieser Infiltrationsrate in den Bereich von typischen gesättigten hydraulischen Leitfähigkeiten von ca. 297 mm/h bei Sanden (Carsel & Parrish, 1988). Aufgrund des großen Porenvolumens und der sehr geringen Wasserretention durch fehlende Organik, kombiniert mit der sehr hohen gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit ist diese hohe Infiltrationsrate auf diesem lockeren Messpunkt von Test 0 sehr plausibel (West et al., 1988).

Die Bodenbelüftung wurde direkt auf dem Trampelpfad durchgeführt und Test 1 auf die Belüftungsfläche gesetzt. So konnte die Infiltrationsrate, nach zwanzigminütiger inkonstanter Phase, auf konstante 480 mm/h angehoben werden, trotz des sichtbar dichteren Bodens von Test 1 gegenüber Test 0. Dies entspricht einem Zuwachs von 60% und kann wiederum durch geöffnete Makroporen erklärt werden, welche das Wasser schneller den Ah-Horizont passieren lassen (Jarvis, 2007). Der trittverdichtete Ah-Horizont wird aufgebrochen und dabei Risse und Kanäle zu der stark durchlässigen Bv- und C-Schicht erstellt. Zudem wird die Schüttdichte des Bodens durch die Druckluftinjektion verringert.

So konnte in Feldversuchen die Schüttdichte auf einem sandig-lehmigen Boden von  $1,63 \text{ g/cm}^3$  auf  $1,39 \text{ g/cm}^3$  also um -14,7% gesenkt werden. Die Gesamtporosität stieg dabei von 0,40 auf 0,50 (50% vol. Poren, 50% vol. Feststoff) an (Soroohan & Dickson, 2014). Senkt man die Schüttdichte, steigert man durch das erhöhte Porenvolumen die Infiltrationsrate (Meek et al., 1992). Die Makroporenkonnektivität wird erhöht, während die Tortuosität sinkt, wodurch das Wasser effizient in die durchlässigeren Schichten infiltrieren kann (Mbarki et al., 2023).

50 cm außerhalb der Belüftungsfläche konnte Test 2 nur noch 120 mm/h in der konstanten Rate erreichen, die inkonstante Phase dauerte hier nur sechs Minuten gegenüber den 20 Minuten von Test 1. Damit liegt die Rate von Test 2 nicht nur deutlich unter der der Belüftungsfläche, sondern auch deutlich unter der des Kontrolltests 0. Dies lässt sich durch die Lage von Test 2 auf dem verdichteten Trampelpfad erklären. Die Verdichtung führt hier zu einer höheren Schüttdichte, welche zu einem geringeren Porenvolumen und zu einer steigenden Tortuosität führen. Dadurch hemmt besonders die verdichtete Ah-Schicht die Infiltration. Allein bei einer Steigerung der Schüttdichte um  $+0,2 \text{ g/cm}^3$  wird die Infiltrationsrate bereits um bis zu 54% gesenkt (Meek et al., 1992). Zudem führt die pfadspezifische Wurzelarmut zusätzlich zu einer verminderten Infiltration (Nir et al., 2022). Wurzeln erzeugen Makroporen und steigern den Ksat-Wert, so lagen die Werte in einem Studienaufbau für wurzelreiche Messstellen bei 74 mm/h, während wurzelarme Messstellen nur noch 2,9 mm/h erreichten (Zhang et al., 2023). Die Wurzelgänge stellen auch für das Wasser nutzbare Kanäle in tiefere Schichten dar. So konnte in einer Metaanalyse gezeigt werden, dass lebende Wurzelmasse durch perennierende Vegetation die Infiltration um 59% steigern konnte (Basche & DeLonge, 2019). Dieser Effekt der fehlenden Wurzelmasse führt hier zusätzlich zur Trittdichtung zu einer stark gesenkten Infiltrationsrate. Auch anhand der kurzen inkonstanten Phase von Test 2 von sechs Minuten lässt sich zeigen, dass hier kaum noch Makroporen vorhanden waren, welche erst verfüllt werden mussten. Es wurde relativ schnell die geringe konstante Infiltration erreicht, da die Ah-Schicht hier direkt als bremsende Schicht fungierte.

Test 3 befand sich 150 cm entfernt von der Belüftungsfläche, aber auch auf dem Trampelpfad und erreichte nach 14 Minuten eine konstante Infiltrationsrate von 180 mm/h. Damit ist die Infiltration hier deutlich geringer als abseits des Pfades, ist aber im Vergleich zu Test 2 um 50% angestiegen. Die Bodenbelüftung hat auf Test 3 keine Auswirkung mehr, da die maximale Reichweite der Rissbildung bis zu 60 cm um das Injektionsloch herum stattfindet (Lin & Lin, 2025). Der Grund für die höheren Infiltrationsraten liegt hier in der Heterogenität des Pfadquerschnitts. Die Trittintensität und Frequentierung, die lokale Bodenzusammensetzung und die Wurzelarmut können lokal variieren und messbar unterschiedliche Infiltrationsraten erzeugen. Untersuchungen zu Verdichtungspfaden bestätigen die sehr lokalen Variationen in den Ksat-Werten, der Infiltration und der Schüttdichte (Nir et al., 2022).



Die inkonstante Phase betrug hier 14 Minuten gegenüber den sechs Minuten von Test 2. Dies passt auch zur höheren Infiltrationsrate, da hier mehr Makroporen vorhanden sein könnten, welche erst verfüllt werden müssen. Dennoch unterliegt auch Test 3 den gleichen infiltrationshemmenden Einflüssen, welche im vorherigen Absatz für Test 2 beschrieben worden sind. Daher sind die Infiltrationsraten auch hier deutlich niedriger als auf dem lockeren Boden von Kontrolltest 0.

#### **5.2.4.2 VOGT-Lanze**

Auf der Messstelle im Südgelände der FAU in Erlangen wurde zudem eine Versuchsreihe mit der VOGT-Lanze durchgeführt. Diese arbeitete sich unter konstanter Druckluftabgabe von ca. 8 bar in Tiefen von bis zu 100 cm vor und bildete dabei Löcher von ca. 10 cm Durchmesser, welche anschließend mit grobkörnigem Terramolgranulat verfüllt wurden. Besonders bei nicht bindigen und sandigen Böden, wie sie an dieser Messstelle vorlagen, ist das Verfahren der Bodenbelüftung geeignet um Verdichtungshorizonte aufzubrechen und die Infiltrationsleistung zu steigern. Die Rissausbildung ist bei dieser Methode deutlich näher an den Injektionspunkt beschränkt, wodurch hier neun Belüftungslöcher pro  $\text{m}^2$  erstellt wurden, statt den vier Löchern pro  $\text{m}^2$  bei der gängigen Druckluftinjektion. Dafür beanspruchte die Erstellung der neun Löcher drei Minuten während die fachgemäße Druckluftinjektion für einen Punkt alleine bis zu drei Minuten dauern kann.

Bei gleichem Profil wie in Kapitel 5.2.4.1 lag die Infiltrationsrate vom Kontrolltest 0 auf dem Trampelpfad bei konstanten 240 mm/h nach einer inkonstanten Phase von 0-16 Minuten. Die Ursachen für die hier lokal stark unterschiedlichen Raten vor der Bodenbelüftung wurden bereits im vorherigen Kapitel 5.2.4.1 beschrieben. Auf dem belüfteten Quadratmeter mit neun Injektionslöchern betrug die Infiltrationsrate von Test 1 360 mm/h, nach einer zehnminütigen inkonstanten Phase. Somit konnte die Infiltrationsrate hier um 50% gesteigert werden. Das Verfahren mit der VOGT-Lanze ist bei der horizontalen Riss- und Makroporenbildung von sehr beschränkter Reichweite, bietet aber eine schnelle und simple Methode zur Erstellung von vertikalen Infiltrationskanälen in die sehr lockere und durchlässige C-Schicht. Die verkürzte inkonstante Phase zeigt, dass das Wasser hier bevorzugt direkt entlang der erstellten Kanäle infiltriert. Diese Methode fokussiert sich allein in das Aufbrechen von Verdichtungshorizonten und in die Umleitung des Wassers direkt in die unteren Horizonte, sorgt dabei aber kaum für eine Verringerung der Schüttdichte des umliegenden Bodens und erhöht das Porenvolumen in den lateralen Bereichen nicht. Dies beweisen auch die Infiltrationsraten des 50 cm außerhalb der Belüftungsfläche liegenden Tests 2, welche mit konstanten 240 mm/h auf dem Niveau des Kontrolltests 0 liegen. Während die Druckluftinjektion den Boden mit Reichweiten von bis zu 60 cm um das Injektionsloch herum (Lin & Lin, 2025) nachweislich, mit den in vorherigen Kapiteln beschriebenen Effekten beeinflusst,

beschränkt sich die Druckluftfreilegung dagegen auf die schnelle und einfache Erstellung direkter Kanäle in tiefere Horizonte. Liegt ein nicht bindiger, überwiegend sandiger Boden vor, kann mit diesem Verfahren schneller gegen Staunässe vorgegangen werden.

### **5.2.5 Schlossgarten Erlangen**

Die Messstelle im Erlanger Schlossgarten befand sich auf einem, durch frequentierter Trittverdichtung geschaffenem Trampelpfad, auf einer sandigen Braunerde mit humosen Oberboden, ohne Anzeichen auf eine Parabraunerde. Der Ah-Horizont von 0-20 cm Tiefe bestand hier aus dunkelbraunem, bis schwarzen und lehmigen Sand. Stark humos, gut durchwurzelt und feinkrümelig. Der Ah-Bv-Übergang lag in Tiefen von 20-40 cm vor und war dunkelbrauner, weniger humoser und körnig-krümeliger mittlerer Sand. In 40-60 cm Tiefe stand der Bv-Horizont an, welcher hier hellbrauner, grober Sand mit etwas Lehmantellen und von lockerer Struktur war. Der C-Horizont (60-100 cm Tiefe) war hier gelblich-brauner, grober Sand. Sehr homogen und unverwittert, ohne Organik, mit sehr hoher Durchlässigkeit und geringer Wasserretention. Der Glühverlust von 5,10% ist für ein überwiegend sandiges Profil relativ hoch. Der größte Teil der Organik stammt dabei aus dem Ah-Horizont, welcher auf eine gute Nährstoffdichte und Wasserretention hindeutet. Die Infiltrationsrate des Kontrolltests 0 auf dem Trampelpfad betrug konstante 7,5 mm/h, ohne eine inkonstante Phase. Die für dieses überwiegend sandige Profil sehr niedrige Rate lässt sich durch eine Kombination von bremsenden Faktoren erklären. So führen Niederschläge zur Bildung von Feinaggregaten, welche sich in die Poren ablagern und diese somit abdichten, es kommt zur Oberflächenversiegelung mit sehr niedriger Durchlässigkeit und Infiltrationsfähigkeit (Assouline, 2004). So konnten in Extremfällen der Oberflächenversiegelung Infiltrationsraten von 0,19 mm/h gemessen werden (Chen et al., 2013). Zusätzlich führt die Verringerung des Porenvolumens durch gesteigerte Schüttdichten, welche hier durch die häufige Trittverdichtung gebildet werden, zu einer stark gesenkten Infiltration (Sorochan & Dickson, 2014); (Mbarki et al., 2023). Dies erfolgt durch die selben Mechanismen, welche in den vorherigen Kapiteln 5.2.3 und 5.2.4 bereits intensiv beschrieben worden sind. Auch die Trampelpfadspezifische Wurzelarmut senkt hier, wie in Kapitel 5.2.4.1 erläutert, die Infiltrationsleistung deutlich (Basche & DeLonge, 2019); (Zhang et al., 2023). In wasserabweisenden Sanden bedecken hydrophobe, organische Partikel die Korngrenzen, erhöhen den Kontaktwinkel und verringern dadurch die kapillare Saugkraft. Dies resultiert in einer schlechteren Benetzung, einer verzögerten Infiltration und in der Bildung instabiler Fließwege. Dieses präferentielle Infiltrieren ist eine weitere infiltrationshemmende Wirkung, welche in Sanden auftreten kann (Ritsema & Dekker, 2000).

Die Infiltration betrug nach der Bodenbelüftung auf gleichem Trampelpfad konstante 120 mm/h, welche auf der Belüftungsfläche einer Steigerung um 1500% entsprechen. Auch hier wirken dieselben durchlässigkeitssteigernden Mechanismen, welche in den vorherigen Kapiteln der Messstellen ausführlich beschrieben worden sind. Die Bodenbelüftung senkt die Schüttdichte (Soroohan & Dickson, 2014) und erhöht somit Porenvolumen und Infiltration, sie bildet Risse und Makroporen, welche als Abkürzungen in die infiltrationsstarke C-Schicht dienen (Jarvis, 2007) und senkt die Tortuosität, wodurch das Wasser auf direkteren Wegen in die durchlässigeren Schichten infiltrieren kann (Mbarki et al., 2023).

Die Infiltrationsraten von Test 2, 50 cm von der Belüftungsfläche entfernt und die von Test 3, 150 cm entfernt, liegen beide bei konstanten 15 mm/h und befinden sich damit schon außerhalb der lateralen Ausbreitung der Risse und profitieren daher, falls überhaupt, nur minimal von den positiven Effekten der Druckluftinjektion. Die maximale Reichweite der Rissbildung liegt bei ca. 28-60 cm um das Injektionsloch herum (Lin & Lin, 2025); Smiley (2001).

Im Erlanger Schlossgarten wurde ein Folgetest, acht Wochen nach der Bodenbelüftung durchgeführt. Dieser befand sich auf der Messstelle von Test 1, also direkt auf der Belüftungsfläche und erreichte eine konstante Rate von 60 mm/h. Damit lag die Rate noch um ca. 700% höher als die des Kontrolltests 0, sank im Vergleich zu Test 1 aber um -50%. Die Gründe für das abfallende Infiltrationsniveau liegen zum einen in der erneuten Versiegelung der Oberfläche durch Niederschlag. Denn die ausgespülten Feinpartikel verdichten die oberen Poren und verkrusten die Oberfläche, wodurch die dünne, leitfähigkeitsarme Schicht die Infiltration erneut limitiert (Assouline, 2004). Zudem erhöhen erneute Trittv Verdichtungen durch intensive Begehung die Schüttdichte, senken das Makroporenvolumen und damit auch die Leitfähigkeit (Ksat-Wert) und letztendlich die Infiltrationsrate (Meek et al., 1992); (Mbarki et al., 2023).

### **5.2.6 Eichenhain Fürth**

Am Eichenhain in Fürth konnte das Profil aufgrund der zu großen Trockenheit und Verdichtung nur in bis zu 50 cm Tiefe aufgenommen und keine sachgemäße Bodenbelüftung durchgeführt werden. Dabei setzte sich der Ah-Horizont (0-15 cm) aus dunkelbraunem, humosen und durchwurzelter, körnig-krümeligen, Mittel- bis Grobsand mit Schluffanteilen zusammen. Die grobe Textur spricht für eine begrenzte Retention. Der Bv-Horizont erstreckte sich von 15-25 cm Tiefe und war hier brauner, humusarmer und mineralischer, Mittel- bis Grobsand mit kaum Restorganik. Der C-Horizont füllte das Profil von 25-50 cm Tiefe aus und war hier gelblicher, homogener und reiner Mittel- bis Grobsand, welcher ohne Restorganik von lockerer Struktur war. Hier ist eine sehr hohe Durchlässigkeit und geringe Wasserretention zu erwarten.

Der Glühverlust von 4,92% ist aufgrund der dunklen, humosen Ah-Schicht relativ hoch für ein solch sandiges Profil. Der Ah-Horizont steht mit seinem fruchtbaren Oberboden im hohen Kontrast zum nährstoffarmen, organikarmen Unterboden. Die Infiltration betrug nach achtminütiger inkonstanter Phase konstante 15 mm/h, was für dieses grobsandige Profil auf sehr niedrigem Niveau liegt. Die Gründe dafür liegen in der, wie im vorherigen Kapitel 5.2.5 beschriebenen, Hydrophobie der Sande (Ritsema & Dekker, 2000), der Oberflächenversiegelung durch Niederschlag [Vgl. Kapitel 5.2.5 (Assouline, 2004); (Chen et al., 2013)] und der oberflächennahen Verdichtung durch intensiver Begehung, welche wiederum die Schüttdichte erhöht und dabei die Leitfähigkeit, das Makroporenvolumen und dadurch die Infiltrationsfähigkeit senkt [Vgl. Kapitel 5.2.3 (Meek et al., 1992); (Mbarki et al., 2023)].

## **5.2.7 Hofgarten Bayreuth**

Im Bayreuther Hofgarten wurden zwei Messkampagnen nahe eines Spielplatzes, bei gleichem Profil, durchgeführt. Der Boden ist hier eine Parabraunerde. Der Ah-Horizont (0-10 cm Tiefe [T.]) war hier dunkelbraun bis schwarz, humusreich, feinkörnig, bei überwiegend Schluff mit Feinsand und Ton. Hoher Organikanteil bei starker Durchwurzelung. Der Ah-Bv-Übergang (10-30 cm T.) war dichter, weniger humos, bei lehmigen Schluff und ersten Anzeichen auf Lessivierung (Tonverlagerung). Der Bv-Horizont (30-55 cm T.) war deutlich dichter, lehmig bis tonig, bei kaum Organik und sichtbarer Verdichtung. Der Bt-Horizont (Tonanreicherungshorizont, bzw. Illuvialhorizont) in Tiefen von 55-70 cm war toniger Lehm, mit feinen Poren und horizontaler Lagerung (→ Parabraunerde). Hier ist eine eingeschränkte Durchlässigkeit zu erwarten. Der Übergang von B- zum C-Horizont (70-90 cm T.) war sandiger Lehm, mit grobkörniger, schwach aggregierter Struktur. Zuletzt bestand der C-Horizont ab 90 cm T. aus gelblichem, lockeren und sandigem Schluff ohne Organik. Die Glühverluste liegen bei 5,47% (M1) und 5,90% (M2) und zeigen einen deutlichen Humusgehalt im Oberboden mit einer deutlichen Ah-Dominanz.

### **5.2.7.1 Messstelle 1 (M1)**

Alle Tests der Messstelle 1 lagen auf einem Trampelpfad. Der Kontrolltest 0 erreichte nach sechs Minuten konstante Raten von 7,5 mm/h. Die Mittelwerte der Infiltrationsraten liegen für schluffigen Lehm bei ca. 4,5 mm/h, für Lehm bei ca. 10,4 mm/h und für sandigen Lehm bei ca. 44,2 mm/h (Carsel & Parrish, 1988). In diesem Profil mit lehmreichen Ah-Horizont über dichteren Bv/ Bt-Schichten sind 7,5 mm/h also typische konstante Raten, welche alleine nicht zwingend auf lokale Verdichtung hinweisen müssen.

Durch die Bodenbelüftung konnte die konstante Rate auf 120 mm/h gesteigert werden. So beträgt die prozentuale Steigerung von Test 1 auf der Belüftungsfläche gegenüber Kontrolltest 0 +1500%. Dies konnte durch die Erstellung von Rissen und Makroporen erreicht werden, welche das Wasser durch die dichten Bv- und Bt-Horizonte direkt in die lockere und grobkörnige C-Schicht weiterleiteten (Jarvis, 2007). Oberflächenversiegelung, welche die Infiltration deutlich hemmt, konnte aufgebrochen werden (Assouline, 2004) und vorhandene Trittv Verdichtungen konnten wie in Kapitel 5.2.3 beschrieben rückgängig gemacht werden (Meek et al., 1992); (Mbarki et al., 2023).

Test 2 erreichte 50 cm abseits der Belüftungsfläche wieder die ursprünglichen konstanten 7,5 mm/h von Kontrolltest 0 und zeigt damit wieder, dass die maximale Reichweite der Riss- und Porenbildung, sowie die Verringerung der Schüttdichte nur in Reichweiten von maximal 60 cm zum Injektionsloch stattfinden (Lin & Lin, 2025), jedoch auch deutlich geringere Reichweiten von maximal 28 cm auf sandigem Lehm möglich sind, wie Smiley (2001) herausfand. Hier war nach 50 cm Abstand zur Belüftungsfläche bereits kein messbarer Effekt vorhanden, was Smileys Befund aus dem Jahre 2001 unterstreicht. Somit kam Test 2 nicht mehr mit den neu geschaffenen Makroporen in Kontakt, sondern blieb weitestgehend unbeeinflusst.

### **5.2.7.2 Messstelle 2 (M2)**

Messstelle 2 befand sich auf einer häufig überquerten Wiese zwischen einigen Bäumen, welche zu einem Spielplatz führt. Die konstante Infiltrationsrate lag hier bei 150 mm/h. Diese untypisch hohe Rate spricht für ein förderliches, intaktes Makroporennetzwerk, welches üblicherweise durch Regenwurmröhren und Wurzelkanäle gebildet wird (Jarvis, 2007). So steigern Wurzeln den Ksat-Wert und erhöhen durch die Makroporenbildung die Infiltration. Die Kanäle der Wurzeln dringen auch in tiefere Schichten vor und führen das Wasser somit in diese Schichten, wodurch die dichteren Schichten überbrückt werden können (Zhang et al., 2023); (Basche & DeLonge, 2019). Aufgrund dieser hohen Infiltration kann hier, falls vorhanden, nur von einer geringen Trittv Verdichtung ausgegangen werden.

Nach der Bodenbelüftung erreichte Test 1 hier konstante Raten von 240 mm/h, konnte also um +60% zulegen. Dies zeigt, dass nochmals zusätzliche Risse und Makroporen durch die infiltrationshemmende Bv- und Bt-Schicht geschaffen worden sind, durch welche das Wasser präferierend infiltriert (Jarvis, 2007). Eine zusätzlich verminderte Schüttdichte sorgt ebenfalls für eine gesteigerte Durchlässigkeit (Meek et al., 1992).

Test 2 erreichte 50 cm außerhalb der Belüftungsfläche eine konstante Rate von 120 mm/h und liegt damit um -20% niedriger als die des Kontrolltests 0.

Die Gründe dafür könnten in der kleinskaligen Heterogenität der Oberflächenversiegelung und Hydrophobie des Sandes liegen. Die infiltrationshemmenden Wirkungen der Oberflächenversiegelung und die Hydrophobie von Sanden wurde im Kapitel 5.2.5 präziser erläutert (Assouline, 2004); (Chen et al., 2013); (Ritsema & Dekker, 2000). Schon kleinflächige Unterschiede könnten sich auf die Durchlässigkeit bemerkbar machen. Auch könnte sich dieser Test auf einem lokal stärker trittverdichteten Boden befunden haben, falls dieser besonders frequentiert begangen wurde. Somit würde die höhere Schüttdichte und das geringere Makroporenvolumen zu einer messbar niedrigeren Infiltration führen [vgl. Kapitel 5.2.3 (Meek et al., 1992); (Mbarki et al., 2023)].

### **5.3 Fazit der Wirkung der Bodenbelüftung auf die Infiltrationsraten**

Wie alle Messstellen zeigten, liegt die maximale Effektivität und Wirkung der Druckluftinjektion bei  $\leq 50$  cm Radius um das Injektionsloch herum. Dies stimmt auch gut mit den Werten von Lin & Lin (2025) und Smiley (2001) überein, welche auf ca. 28-60 cm maximale Riss- und Porenbildung kamen. Die Effekte der geringeren Schüttdichte und Tortuosität, sowie der gesteigerten Makroporosität und Infiltrationsrate sind, falls überhaupt, in Abständen von über 50 cm zum Injektionspunkt kaum existent. Daher kann das übliche Vorgehen bei einer Bodenbelüftung, bei der ein Injektionspunkt pro Quadratmeter belüftet wird, weiterempfohlen werden. Die effektiven Reichweiten der Punkte nähern sich so weitestgehend an oder überlappen sogar. So kann der positive Effekt am effektivsten auf einer Fläche verteilt werden.

Auf allen Messstellen konnte die Infiltrationsrate von Test 1 auf der belüfteten Fläche messbar gesteigert werden. Besonders effektiv ist die Bodenbelüftung, falls bereits eine starke Verdichtung im Boden vorliegt, wie es z.B. an der Messstelle Schlossgarten Erlangen der Fall war. Hier konnte die Infiltration um 1500% gesteigert werden. Dies bestätigt die lockernde Wirkung der Bodenbelüftung auf stark verdichtete Flächen. Auch effektiv war die Methode, falls im Bodenprofil eine infiltrationshemmende Schicht, wie z.B. der Bt-Horizont im Bayreuther Hofgarten vorhanden war. Hier konnte die Infiltration ebenfalls um 1500% gesteigert werden, da die Bodenbelüftung Risse und Makroporen also quasi „Abkürzungen“ durch die dichten Schichten bildete und das Wasser in durchlässigere Schichten leitete. Damit lässt sich auch erklären, welche maximalen Tiefen für die Bodenbelüftung gewählt werden müssen. In dieser Arbeit lag die maximale Tiefe der Injektionen stets bei genau 100 cm und der Boden wurde beim presslufthammerartigem herunterarbeiten Stück für Stück belüftet. Da die Infiltrationsrate durch die hydraulisch engste Stelle bestimmt wird, wirkt eine Hochdruckinjektion am besten, wenn genau dieser Engpass durchschritten wird und Risse das Wasser durch diese Bremsschichten in durchlässigeres Material leiten.

Lokale Trittv Verdichtungen und Bodenversiegelung traten in dieser Arbeit bereits in der obersten Ah-Schicht auf. Bremsende Bv/Bt-Schichten lagen dagegen meist in Tiefen von 20-60 cm auf. Das zeigt warum die üblicherweise gewählte Tiefe von 100 cm bei der Bodenbelüftung (wie in diesem Projekt) der Standard ist. Jede lokale Verdichtung und jede bremsende Schicht konnte damit gelockert werden, wodurch die Infiltrationsrate von jedem Standort angehoben werden konnte. Bei bekannten tieferliegenden Bremsschichten muss die Lanzenzlänge so gewählt werden, dass man durch diese Schichten hindurch in durchlässigere Schichten gelangt. Damit ist die Frage der Tiefe der Behandlung nur eine Frage der Tiefe der hydraulischen Engstelle.

Wie die Standorte am Platnersberg Nürnberg und am Südgelände der FAU in Erlangen zeigten, lassen sich auch in bereits sehr durchlässigen Böden die Infiltrationsraten steigern. Jedoch ist ein solches Vorhaben für die alleinige Infiltrationssteigerung kaum sinnvoll, da die Raten nicht erheblich gesteigert wurden, wie es auf verdichteten Böden und bei Deckschichten der Fall war. Hier macht eine Bodenbelüftung nur Sinn, wenn sie begleitend aus den in den folgenden Kapiteln dargestellten Gründen und Methoden zur Bodenverbesserung durchgeführt wird.

## **5.4 Auswirkung der Bodenbelüftung auf das Bodenleben (Edaphon)**

### **5.4.1 Kurzfristige Effekte auf das Edaphon**

Bei der Bodenauflockerung per Druckluftinjektion können sowohl positive Effekte, als auch potenziell negative Effekte auf die im Boden heimische Flora und Fauna entstehen. So verbessert das Verfahren die Gasdurchlässigkeit des Bodens. Die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen können in verdichteten Böden erhöht sein, während die O<sub>2</sub>-Konzentrationen zeitgleich stark reduziert sind. Dieser Sauerstoffmangel limitiert die Aktivität von aerober Mikrofauna (Smiley, 2001). Die Druckluftinjektion bricht die anaeroben Porenräume auf, wodurch diese wieder mit Sauerstoff versorgt werden können. Durch das Zuführen von Sauerstoff kann ein Aktivitätsschub der aeroben Organismen ausgelöst werden, die bakterielle Diversität erhöht und die Nährstoffumsetzung im Boden beschleunigt werden (Qian et al., 2022). In Gewächshausversuchen konnte nachgewiesen werden, dass nach einer künstlichen Belüftung des Bodens nach wenigen Tagen die Aktivität der Enzyme Urease, Phosphatase und Katalase im Wurzelraum, sowie die Biomasse der Mikrofauna messbar positiv beeinflusst wurden (Li et al., 2016). Bodenbelüftung regt die aerobe Zersetzung von organischer Materie an, was die Mineralisation von Nährstoffen fördern kann. Jedoch kann eine starke Belüftung ohne das gleichzeitige Zuführen von organischer Substanz zum Abbau von organischer Materie führen. So ist die Menge an Organik im Boden in einem jahrelangen Feldversuch durch verstärkte mikrobielle Oxidation nach einer einmaligen Aeration stark gesunken (Fite et al., 2011). Besonders trat dieser Effekt auf, wenn kein Mulch und Kompost begleitend in den Boden eingebracht wurden.



Direkt nach der Aeration überwiegt jedoch der positive Effekt einer erneuerten Oxidation der anoxischen Bodenporen, da die mikrobielle Aktivität und die enzymatischen Umsetzungsraten ansteigen, was auf eine wachsende Menge an Mikrofauna schließen lässt (Li et al., 2016).

Die lokal sehr impulsartige und starke Hochdruckinjektion stellt für die Bodenfauna wie z.B. Regenwürmer eine große Störung dar. Der umliegende Erdraum wird ruckartig geweitet und mit Stützgranulat verfüllt, wodurch Bodenorganismen physische Verletzungen davontragen können, oder sich die Bodenfauna verlagert. Die Landwirtschaft zeigt, dass intensive Bodenbearbeitung wie z.B. tiefes Pflügen die lokale Regenwurmpopulation verkleinern kann (Ahmed & Al-Mutairi, 2022). Daher ist anzunehmen, dass die Hochdruckinjektion zu einer kurzfristigen Abnahme der Mikrofauna in der bearbeiteten Zone führen kann, verursacht, durch physischen Schaden oder durch Verlagerung. Ist die Bodenbehandlung eine einmalige Maßnahme, kann sich die Regenwurmpopulation nach einem Jahr wieder vollständig erholen (Ahmed & Al-Mutairi, 2022). Die Bodenbelüftung stellt für die ansässige Bodenfauna einen Eingriff und Stress dar. Jedoch kann dieser Stress bei einer ausbleibenden Folgebehandlung innerhalb eines Jahres überwunden werden und sich die Populationen auf ihr ursprüngliches Niveau erholen. Der kurzfristige physische Schaden und der Stress stehen den direkten positiven Folgen der Bodenbelüftung auf die Bodenfauna wie erhöhte Sauerstoffwerte, bessere Infiltration, höhere Nährstoffverfügbarkeit und ein lockereres Bodengefüge gegenüber (Weltecke et al., 2024).

### **5.5.2 Langfristige Effekte auf das Edaphon**

Ob sich langfristige positive Effekte durch die Druckluftinjektion auf das Bodenleben einstellen hängt besonders davon ab, ob die strukturellen Verbesserungen der Bodenbeschaffenheit dauerhaft und nicht nur sehr temporär vorhanden bleiben. So kann eine einmalige Auflockerung verdichteter Horizonte zu einer nachhaltigen Steigerung der Habitatsqualität für die Bodenflora führen. Ein gelockerter Boden kann größere Mengen organischer Materie aufnehmen und halten, besonders bei unterstützender Zugabe von Mulch oder Kompost (Smiley, 2001). Nach mehreren Monaten bis Jahren nach der Bodenbelüftung könnte sich eine leistungsfähigere und biodiversere Mikroflora ausbilden, solange genügend Porenluft und Nachschub an organischer Substanz vorhanden ist. Unter begleitender Mulchung ist ein Sauerstoffgehalt von 17,6% für die Biodiversität von Bakterien besonders optimal (Quian et al., 2022). Regenwurmpopulationen können nach einer Belüftungsmaßnahme langfristig deutliche Zuwächse verzeichnen. In einer Untersuchung wurde gezeigt, dass Regenwürmer innerhalb eines Jahres nach der Bodenbehandlung in die umliegenden, noch nicht bearbeiteten Flächen migrierten und dort ebenfalls die Bodenqualität steigerten (Fite et al., 2011).

Dieses Verhalten zeigt das erfolgreiche Zusammenspiel von technischer Bodenverbesserung gefolgt von biologischer Interaktion. Die physische Bodenbelüftung schafft neue Hohlräume, verbessert die chemischen und physikalischen Parameter, die lokale Bodenfauna besiedelt diese und wertet die naheliegenden Gebiete auf. Diese positiven Langzeitfolgen gelten allerdings nur bei einer langfristigen Wirkung der Bodenlockerung. So zeigte eine Studie aus einem Obstgarten in Taiwan 34 Tage nach der Hochdruckinjektion zwar noch einen verminderten Penetrationswiderstand von ca. 15%, doch dieser Effekt war nach längerer Zeit nicht mehr nachzuweisen und sowohl das Pflanzenwachstum, als auch der Ernteertrag konnten innerhalb einer Saison nicht verbessert werden (Lin & Lin, 2025). Hält die Lockerung nur temporär an, sind die Langzeitwirkungen auf die Bodenfauna kaum existent, da die physikalischen Parameter nicht hinreichend verbessert wurden. Ferner kann eine wiederholte Hochdruckinjektion ohne unterstützende Maßnahmen sogar die Bodenorganik durch zu großen Stress abbauen. Daher wird geraten, die Bodenbelüftung durch gleichzeitige Zugabe von Kompost und anderen Strukturstabilisierenden Substanzen zu begleiten. Die Kombination von Bodenbelüftung und der Anwendung von Mulch und Dünger führt zu deutlich nachhaltigeren Verbesserungen für das Bodengefüge und der Flora und Fauna (Smiley, 2001).

## **5.6 Effekte der Druckluftinjektion auf die Flora in verdichteten Böden**

Die Druckluftinjektion auf verdichteten urbanen Flächen führt zur direkten mechanischen Lockerung der Bodenmatrix und erzeugt durch den hohen Druck von ca. 8 bar ein System aus netzartigen Rissen (Hodge, 1993). Die Trockenraumdichte wird gesenkt und die Gas- und Wasserpermeabilität steigen an. Die neu gebildeten Luftporen reduzieren hypoxische Bereiche im Wurzelraum, der mechanische Widerstand für Wurzeln kann in verdichteten Milieus reduziert werden und Staunässe leichter abgebaut. Messungen des Penetrationswiderstands auf verdichtetem Boden zeigten nach der Hochdruckinjektion einen reduzierten Eindringwiderstand von 15,4% im Vergleich zum unbearbeiteten Boden (Lin & Lin, 2025). Dies bestätigt eine Erleichterung der Wurzelbildung. Während mechanische Tiefenlockerung durch Rippen mit Zinken oder einem Tiefenmeißel große Wurzeln beschädigen kann, werden die Wurzeln bei der Bodenbelüftung umströmt und somit die Poren erweitert und das Wurzelsystem geschont (Lin & Lin, 2025). Dennoch sind kurzfristige, milde Stressreaktionen nicht auszuschließen. So sanken die Phosphor- und Kaliumgehalte der Blätter von auf urbanem, sandigem Boden stehenden Birken gegenüber Kontrollmessungen, während die Triebverlängerung von Birken nach der Hochdruckinjektion um 21%-37% in den Folgejahren gegenüber unbehandelten Birken gesteigert werden konnte (Hodge, 1993). Daraus lässt sich schließen, dass das Verfahren das Wachstum effektiv verbessert, aber dadurch zeitgleich die Nährstoffe im Baum verdünnt werden, oder die Nährstoffverfügbarkeit gesenkt werden könnte.

So konnte bei den Birken drei Jahre nach der Bodenbehandlung eine Blattvergilbung festgestellt werden, was eine Folge von temporären Stress oder Nährstoffmangel sein könnte (Hodge, 1993). Diese Beobachtungen zeigen die unterstützende Möglichkeit, nach der Bodenbelüftung zusätzlichen Dünger auszubringen, um den eingeleiteten Wachstumsschub zu fördern.

Wenn Verdichtung die Hauptursache für Wachstumsbegrenzung bei Bäumen darstellt, kann die Bodenbelüftung eine verbesserte Vitalität und Wachstumsleistung hervorrufen. So konnte bei einer Gruppe von Birken nach einer einmaligen Belüftungskampagne der jährliche Triebzuwachs im ersten Jahr um ca. 21%, im zweiten um ca. 37% und im dritten Jahr nach der Belüftung um ca. 22% gegenüber unbehandelten Bäumen gesteigert werden (Hodge, 1993). Das anhaltende gesteigerte Wachstum deutet darauf hin, dass die geschaffenen Bodenporen über die Jahre weitestgehend vorhanden blieben und die Birken somit ein größeres Wurzelvolumen bilden konnten.

In Hodges Untersuchung zeigten Rosskastanien auf verdichtetem Tonboden keine Vitalitäts- und Wachstumssteigerung, was darauf schließen lässt, dass die Hochdruckinjektion nur bestimmte wachstumslimitierende Faktoren wie die Verdichtung des Bodens beheben kann. Ist die Verdichtung tatsächlich der größte negative Aspekt, kann eine gezielte Bodenbelüftung das Wurzel- und Längenwachstum fördern (Hodge, 1993). Andere limitierende Faktoren wie z.B. Nährstoffmangel, Schädlingsdruck und Trockenstress, sowie ein weniger responsiver Boden (stark tonig) können durch die reine Bodenbelüftung möglicherweise kaum behoben werden (Hodge, 1993). Geschädigte Bäume profitieren besonders, wenn bei einer Hochdruckinjektion begleitend eine Tiefendüngung oder die Verfüllung der Injektionslöcher mit Kompost vorgenommen wird. So konnte eine Kompostabgabe nach der Bodenbelüftung das Wurzelwachstum urbaner Bäume nachhaltig verbessern, während eine bloße Belüftung weniger positive Effekte erzielte (Fite et al., 2011). Eine Kombination aus Behandlungen wie die Bodenbelüftung und das zeitgleiche Einbringen von Pflanzkohle und Holzhackschnitzel erwiesen sich als beste Maßnahme um positive Effekte wie erhöhte organische Substanz, gesteigerte mikrobiologische Aktivität und bessere Gaspermeabilität hervorzurufen (Percival et al., 2023). Somit kann die Druckluftinjektion bei urbanen Stadtbäumen eine hilfreiche Sanierungsmaßnahme sein, vor allem bei geschädigten Bäumen durch Bodenverdichtung. Stellt diese Verdichtung für die Bäume die größte Limitierung beim Wachstum und der Vitalität dar, kann durch die gezielte Bodenbelüftung begleitet mit Folgemaßnahmen wie Mulchen und Düngen das Wurzel- und Längenwachstum, sowie die allgemeine Vitalität des Baums langfristig merkbar gesteigert werden.

## 5.7 Auswirkungen der Bodenbelüftung auf die Grundwasserneubildung

Die Grundwasserneubildung kann mit folgender Formel beschrieben werden (Nimmo et al., 2005):

$$R \approx I - ET - \Delta S - Q_{\text{lat}} \quad (3)$$

$R$ : Grundwasserneubildung

$I$ : Tatsächlich infiltrierte Wassermenge [mm]

$ET$ : Evapotranspiration (Evaporation + Transpiration) [mm], Gesamtverdunstung

$\Delta S$ : Änderung des Bodenwasserspeichers in der Wurzelzone [mm]

$Q_{\text{lat}}$ : Lateraler Abfluss [mm], seitlicher Verlust aus der Wurzelzone

Mit Hilfe der gesteigerten Infiltrationsraten durch die Bodenbelüftung kann die tatsächlich infiltrierte Wassermenge, bei gleichzeitiger Reduktion des oberflächlichen Runoffs, erhöht werden. Dies kann laut dieser Formel die Grundwasserneubildung erhöhen. Die Druckluftinjektion fördert den präferenziellen Fluss in Makroporen, wodurch das Wasser den ungesättigten Boden schneller passieren kann und früher den Grundwasserleiter erreicht, dabei steigt jedoch auch das Risiko gelöste Stoffe mitzuführen (Jarvis, 2007).

Eine verbesserte Durchlüftung im Wurzelraum kann durch vitalere Vegetation jedoch die Evapotranspiration erhöhen, wodurch mögliche Infiltrationsgewinne wieder entzogen werden könnten. So wurden, in Versuchen mit belüfteten Böden, die Bodenwassergehalte im Wurzelraum aufgrund von pflanzlicher und bakterieller Aktivität um 5-13% verringert (Li et al., 2019). Zudem kann der laterale Abfluss zunehmen. Die Bodenbelüftung schafft Makroporen oder stellt diese wieder her. Diese leiten Wasser zu den strukturbedingten Leitflächen. Diese präferenziellen Netzwerke begünstigen den lateralen statt vertikalen Fluss, besonders bei geneigten Hängen (Weiler & McDonnell, 2007). Eine feinkörnigere, kapillarreichere Schicht, welche über einer groben Schicht liegt, zwingt das Wasser bei ungesättigten Bedingungen seitlich zu fließen, bis zur lokalen Überwindung der Barriere. Makroporen speisen diesen lateralen Fluss effizient (Ross, 1990). Der laterale Fluss überwiegt der Grundwasserneubildung, falls ein hydraulisches Gefälle mit zusammenhängenden Makroporen vorhanden ist, falls eine schnelle Einspeisung des Wassers stattfindet oder falls Gräben in der Reichweite der Makroporen liegen. Unter diesen Konstellationen erhöht die Bodenbelüftung zwar die tatsächlich infiltrierte Wassermenge, der Großteil davon fließt jedoch lateral ab, statt vertikal zu infiltrieren (Weiler & McDonnell, 2007). Soll die Bodenbelüftung die Grundwasserneubildung fördern, sollte diese an vertikalen Sickerkörpern ankoppeln und laterale Leitbahnen durchbrechen.

Liegt eine Infiltrationslimitierung durch Verdichtung oder einer abdichtenden Schicht vor, können die erhöhten Infiltrationsraten und verkleinerte, oberflächliche Runoffs zu einer größeren Grundwasserneubildung führen, wenn der Großteil der neuen Fließwege vertikal perkoliert.

## **5.8 Geeignete Bodenfeuchte für die Druckluftinjektion**

Um eine effektive und möglichst langlebige Bodenauflockerung herzustellen sollte der Boden während der Druckluftinjektion von ausreichender Feuchtigkeit, aber nicht wassergesättigt sein. So sollte sich die Bodenfeuchte für lehmige und sandige Böden nahe der Feldkapazität befinden (AirSpade, o. D.). Die Feldkapazität beschreibt die Wassermenge, die ein wassergesättigter Boden maximal gegen die Schwerkraft halten kann. Die Feldkapazität wird als Prozentsatz des Wassers im Boden ausgedrückt. Dabei sind typische VWC-Werte (Volumen-Wasser-Gehalt [%]) 20% bei sandigen bis 40% bei Lehm Böden (Gould, 2024), was ungefähr 70-100% der Feldkapazität entspricht. Feldversuche zeigten für Tonböden einen optimalen Wassergehalt von 15-17% Vol., welcher nahe der plastischen Grenze liegt, um die effektivste Boden-Bearbeitung zu gewährleisten (Seleiman et al., 2019). Eine mittlere Bodenfeuchte sorgt für eine verringerte Kohäsion und Festigkeit des Bodens, gewährleistet aber das Aufrechterhalten der Bodenstruktur, wodurch der Luftdruck den Boden leichter aufbrechen und erweitern kann.

Die Bodenfeuchte sorgt gleichzeitig für ein zusammenhängendes Bodengefüge, welches Risse und Poren offenhalten kann. Die ideale Bodenfeuchte ist allerdings für jede Bodenart unterschiedlich. Sand, Schluff und Ton besitzen verschiedene Wasserhaltevermögen und Plastizität. Reine Sande weisen keine Plastizität auf, da sie keine Tonminerale enthalten, welche Wasser binden können und eine Plastizität erzeugen (Knappett & Craig, 2012). Bei sandigen Böden ist die Feuchte daher hilfreich, um die mögliche Staubeentwicklung während der Belüftung zu minimieren.

Ist der Boden zu trocken verhält er sich spröde, wodurch er sehr leicht Risse bildet. Jedoch wird die Luft hier schnell entlang dieser Bruchflächen an die Oberfläche zurückgeleitet, anstatt den Boden effektiv zu lockern (Hodge et al., 1993). Daher kommt es bei zu trockenen Böden zu einer sehr starken Staubbefreiung und zu seitlichen Lockerungszonen, aus denen Luft und Granulat direkt wieder an die Oberfläche gelangen. Dies war der Fall auf der Teststelle „Eichenhain Fürth“ mit mittelsandigen Böden und Schluffanteilen. Hier war der Boden deutlich zu trocken und hart, was das saubere Eindringen der Lanze deutlich erschwerte und die Druckluft direkt unter großer Staubeentwicklung an die Oberfläche zurückleitete. Eine effektive Bodenauflockerung war unter diesen Umständen der deutlich zu niedrigen Bodenfeuchte nicht möglich, da der Boden die Energie der Druckluft nicht absorbierte, sondern reflektierte.

Umgekehrt führt ein deutlich zu feuchter Boden zu einer hohen Plastizität. Hier erzeugt die Druckluft eher eine Verformung statt Aufweitung. Der Boden kann hier nach der Behandlung in seinen ursprünglichen Zustand zurückfließen oder sacken, statt die Porosität aufrechtzuhalten (Hodge et al., 1993).

Aufgrund der Relevanz der Bodenfeuchte auf die Effektivität der Druckluftinjektion ist der passende Zeitpunkt der Maßnahme von gleicher Bedeutung. Die Bodenfeuchte und Wurzelaktivität sind mit der vorherrschenden Witterung verbunden. Grundsätzlich kann für Mitteleuropa das späte Frühjahr empfohlen werden. So ist die Staunässe aus der Feuchtperiode des Winters in den Monaten April und Mai abgezogen und der Boden schon genug abgetrocknet. Hier findet man am wahrscheinlichsten die Bodenfeuchte nahe der Feldkapazität. Der Boden ist hier weder gefroren, noch nach einer möglichen Schneeschmelze wassergesättigt. Niederschläge im Frühling halten den Boden weiter feucht, bei noch geringer Austrocknung. Zudem beginnt hier die Vegetationsaktivität, welche durch die Bodenverbesserungsmaßnahme für die bevorstehende Vegetationsperiode direkte Vorteile erfährt.

## **5.9 Langlebigkeit der hochdruckinduzierten Effekte**

Nach der mechanischen Bodenlockerung treten Mechanismen auf, welche den Boden auf natürlicherweise rekonsolidieren können. Untersuchungen zeigten, dass sich die Böden durch ihr Eigengewicht mit zunehmender Zeit nach der Behandlung selbst konsolidierten, wobei letztendlich die Schüttdichte zunahm und die Leitfähigkeit sank (Osunbitan et al., 2004). Die geschaffenen Makroporen verlieren die Funktion des präferenziellen Fließens, da Feinmaterial Poren abdichten kann, oder die Poren gar kollabieren, dadurch sinkt die Porosität und damit auch die Sauerstoff- und Wasserdurchlässigkeit (Armenise et al., 2017). Erneute starke Tritt- oder Verkehrsbelastung kann den Boden zusätzlich durch die Verfüllung der Makroporosität verdichten. Die Lasten senken das Porenvolumen und die Leitfähigkeit, wodurch die Schüttdichte ansteigt und die Infiltration wiederum stark limitiert wird. Dies konnte durch den Folgetest im Schlossgarten Erlangen gezeigt werden. Hier war die Infiltration auch acht Wochen nach der Belüftung noch um 700%, im Vergleich zum unbehandelten Boden, erhöht. Doch der Effekt nahm im Vergleich zur frischen Wirkung nach der Belüftung bereits um -50% ab. Der Grund dafür liegt hier hauptsächlich in der weiter anhaltenden starken Trittbelastung. Aber auch die erneute Oberflächenversiegelung wirkt daran mit. Das gelöste Feinmaterial verstopft die obersten Poren und dichtet diese ab. Dadurch sinkt die Infiltrationsrate selbst bei dem Vorhandensein von darunterliegenden Makroporen und Rissen, welche durch dichte Horizonte führen (Assouline, 2004).

Während die Wirkung der Hochdruckinjektion im Folgetest zwar abnahm, aber noch nachweislich stark vorhanden war, zeigen auch andere Feldversuche die Langzeit-Wirkungen. So konnte auch noch 22 Monate nach der Lockerung in lehmigen Schluff die gesteigerte Permeabilität, Makroporosität und Leitfähigkeit nachgewiesen werden, obwohl auch hier eine Rekompaktion in den obersten 12 cm des Bodens nachgewiesen werden konnte (Drewry & Paton, 2000). Um die Langlebigkeit der Bodenverbesserung zu steigern, werden die Makroporen und gebildeten Risse mit Zuschlagsstoffen verfüllt, welche im folgenden Kapitel vorgestellt werden. Zudem sollte auf eine verminderte Trittbelastung geachtet werden, um die Langzeitwirkung bestmöglich zu konservieren.

## **5.10 Zuschlagsstoffe**

Die durch Hochdruckinjektion geschaffenen Risse und Porenräume verfüllen sich durch das umliegende Bodenmaterial mit der Zeit. Um die verbesserte Bodenstruktur aufrechtzuerhalten wird während der Bodenbelüftung Zusatzmaterial in den Boden eingebracht. Diese Bodenhilfsstoffe sollen die geschaffene Porenstruktur stabilisieren, den Bodenzustand erhalten, den Gasaustausch fördern und im Idealfall auch die Nährstoffversorgung im Wurzelbereich verbessern. Dabei gibt es poröse und organische Zusatzmaterialien mit jeweils spezifischen Charakteristiken, welche in den folgenden Kapiteln näher vorgestellt werden.

### **5.10.1 Poröse Zuschlagsstoffe**

Die porösen Zusatzstoffe sind inaktive, mineralische oder synthetische Stützgranulate. Sie sollen die geschaffenen Makroporen füllen und dabei ein grobes Gefüge schaffen, welches die Luft- und Wasserpermeabilität erhöhen soll. Die Materialien sind in ihrer Form stabil und verrotten nicht. Die Korngrößen liegen üblicherweise zwischen 0,5-8 mm, wodurch es gut durch die Injektionslanze passt. Üblich sind die folgenden Stützgranulate:

Pumice (Bimsstein) weist mit einem Porenvolumenanteil von 64-85% eine hohe Porosität bei einer gleichzeitig geringen Schüttdichte von ca.  $0,35-0,65 \text{ g/cm}^3$  auf. Durch seine überwiegend feinporige Struktur ( $<30 \mu\text{m}$ ) kann Bims eine höhere Fraktion an Wasser mobilisieren. Dieses mobile und verfügbare Wasser kann für Wurzeln bereitgestellt werden. Zudem fördert Bims durch sein Porenvolumen die Luftzirkulation, wodurch er Wurzeln mit mehr Sauerstoff versorgt (Kong et al., 2021). Reines Bimsgranulat liefert jedoch keine Nährstoffe und entzieht dem Boden im trockenem Zustand Wasser, da das Porenvolumen erst gefüllt werden muss. Daher muss noch der Eingabe intensiv bewässert werden. Der Preis für das Bimsgranulat liegt bei ca. 3,29€ pro kg (Vitanal GmbH, n.d.).  $1 \text{ m}^3$  Bimsgranulat kann zwischen 300-600 kg wiegen, wodurch die Preisspanne für  $1 \text{ m}^3$  bei ca. 1000-2000€ liegt.



Blähton (LECA = light expanded clay aggregates) wird durch das Brennen von Ton bei Temperaturen von 1200°C hergestellt. Daraus resultieren seine hohe innere Porosität und die luftgefüllten Kapillarräume (Mlih et al., 2020). Die hohe Porosität führt zu geringen Schüttdichten von 250-510 kg/m<sup>3</sup>, erreicht dabei gleichzeitig aber eine hohe mechanische Stabilität. Abhängig von Korngröße und Materialdichte weist Blähton eine Wasserspeicherkapazität von 10-50% auf (Uysal et al., 2024). Durch die innere Porenstruktur fördert LECA die Sauerstoffversorgung von Wurzeln und verbessert gleichzeitig die hydraulische Leitfähigkeit, wodurch das Risiko von Staunässe gesenkt wird. LECA ist zudem chemisch inert, pH-neutral und biologisch stabil (Mlih et al., 2020). Die lockernde Wirkung bleibt dadurch langfristig erhalten. Aufgrund der hohen Wasseraufnahme speichert Blähton übermäßige Niederschläge und gibt das Wasser in Trockenphasen sukzessive an die Wurzeln ab. Für 1000 Liter fallen ca. 200-400€ an.

Zeolithe gehören zu den kristallinen aluminiumsilikatischen Mineralen. In ihren Mikroporen (0,3–1 nm) werden Wasser und Kationen reversibel eingebaut. Dies resultiert in einer hohen Kationenaustauschkapazität (CEC) und Wasseraufnahmefähigkeit. Zeolithe entstehen aus vulkanischer Asche und Tuffgesteinen (Pérez-Botella et al., 2022). Zeolithe können auch synthetisch hergestellt werden. Diese besitzen definierte Porengrößen, sogenannte Molekularsiebe und werden in der Umwelttechnik genutzt (Cundy & Cox, 2005). Im Boden erhöhen sie die Wasserspeicherkapazität (bis zu 30% mehr verfügbares Wasser in sandigen Böden), verbessern die Infiltrationsrate und senken die Penetrationsresistenz um 20-30%. Zudem besitzen Zeolithe eine hohe Kationenspeicherung, wodurch die Hauptkationen wie NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup> und Mg<sup>2+</sup> gebunden und nur langsam abgegeben werden. Sie sind stabil, biologisch inert und pH-neutral, sodass ihre Wirkung im Boden über Jahrzehnte anhält (Kakabouki et al., 2025). Zeolithe sollen nach der mechanischen Bodenbelüftung die Porenräume stabilisieren, die Wasserretention und die Gaspermeabilität im Wurzelraum verbessern, sowie die Nährstoffionen durch Düngung festhalten und sukzessiv abgeben. Bei der Bodenbelüftung wird granulierter Zeolith mit einer Körnung von 0,5-5 mm verwendet (Kakabouki et al., 2025). 1000 kg des Zeolithgranulats mit einer Körnung von 2,5-5 mm kosten ca. 575€ (Schicker Mineral, 2025).

Kieselgur (Terramol) ist das für diese Arbeit benutzte Zusatzmaterial. Es besteht aus den Silikatgerüsten fossiler Kieselalgen (Diatomeen) und besitzt eine hohe Porosität mit ca. 70% Porenvolumen und eine große Oberflächenstruktur. Es ist biologisch inert mit Korngrößen von 2-4 mm. Aksakal et al. (2011) zeigten, dass die Zugabe von 30% Kieselgur die Aggregatstabilität, also die Widerstandsfähigkeit des Bodens, von 28% auf 45,7% steigerten. Eine größere Aggregatstabilität schützt den Boden vor Erosion, erhöht die Infiltrationsrate und erleichtert die Bearbeitbarkeit des Bodens. Zudem wurde durch die Zugabe von 30% Kieselgur eine deutlich gesenkte Bodendichte und ein deutlich verringerter Penetrationswiderstand bei gleichzeitig erhöhter Feldkapazität

festgestellt (Aksakal et al., 2011). Böden mit höheren Schluff- und Sandanteilen zeigten stärkere positive Effekte in der Feldkapazität und Wasserspeicherung als Böden mit hohem Tonanteil. Auch Glab & Gondek (2025) kamen auf eine steigende Feldkapazität bei der Zugabe von 4% Diatomeen (DT). So stieg diese von  $0,042 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  in der Kontrolle auf  $0,083 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  an. Die verfügbare Wasserkapazität und die pflanzenverfügbare Wassermenge waren bei der Behandlung von Kieselgur mit Bentonit am höchsten (Glab & Gondek, 2025). Die überragende Porosität und die hohe Sorptionskapazität (bis zu 200%) spricht für eine deutliche Steigerung des Luft- und Wasseraustauschs, sowie die Fähigkeit überschüssiges Wasser aufzunehmen und bei Bedarf langsam abzugeben (Przybek, 2024). Der Verbrauch für ein Injektionsloch kann bei mehreren Litern liegen. Ein 20 kg Sack mit 40 Litern Volumen liegt preislich bei ca. 30-40€ (Terra Fit GmbH, 2025).

### 5.10.2 Organische Zusatzmaterialien

Mit organischen Zusatzmaterialien kann die Bodengesundheit nach einer Bodenverbesserung langfristig konserviert werden. Das Einbringen von Nährstoffen und Kohlenstoff stimuliert die Biologie im Erdreich (Percival et al., 2023). Die Zugabe folgt in Form von Pellets und krümeligen Körnern.

Kompost (Humusgranulat) verringert je nach Kompostmenge und Bodenart die Bodendichte um 5-25%. Kompost besitzt eine Dichte von ca.  $0,2\text{--}0,8 \text{ g/cm}^3$ , während mineralische Böden eine Dichte von  $1,2\text{--}1,6 \text{ g/cm}^3$  aufweisen. Die hydraulische Leitfähigkeit konnte im Vergleich zu den Kontrolltests um 100-300% gesteigert werden. Auch die Feldkapazität und das pflanzenverfügbare Wasser erhöhten sich im Bereich von 10-40% (Kranz et al., 2020). Auch die Infiltrationsraten können deutlich gesteigert werden. So dokumentierte Alshraah et al. (2024) eine Zunahme der Infiltration von 46-50% nach Kompostzugabe. Die erhöhte Makroporosität erleichtert die Infiltration und hemmt den Oberflächenabfluss. Auch in einem anderen Feldversuch in tonreichem Boden konnte die Infiltrationsrate und die Feldkapazität vergrößert und die Bodendichte gesenkt werden (Castellini et al., 2022). Zudem erhöht die Zugabe von Kompost die Menge des pflanzenverfügbaren Wassers. Bondi et al. (2022) zeigten, dass die Gesamtporosität und die Wasserretention deutlich anstiegen. Je nach Kompostmenge nahm die pflanzenverfügbare Wasserkapazität um 15-30% zu. Die organische Materie wirkt im Boden wie ein Schwamm, welcher das Wasser langsam abgibt (Bondi et al., 2022). Nach gewisser Zeit kann sich der Boden jedoch wieder setzen, da das organische Material zersetzt wird und das Volumen der verfüllten Hohlräume schrumpft. In großen Mengen liegt der Preis pro Liter bei ca. 0,30€. So kosten 1500 Liter Kompost 480€ (Organifer, 2024).

Biochar (Pflanzenkohle) ist eine stark kohlenstoffreiche organische Biomasse mit großer Porosität. Hergestellt wird diese Substanz durch die Pyrolyse, also dem thermischen Zersetzen von organischer Materie unter Sauerstoffarmut (Zanutel et al., 2023). Die einmalige Zugabe von Biochar führte in den Versuchen von Zanutel et al. (2023) zu einer Reduktion der Bodendichte um ca. 16,8%, zur Erhöhung der gesättigten Wasserkapazität um ca. 16% und gleichzeitig zur Steigerung der Makroporosität um ca. 78,8%. Die Fähigkeit des Bodens Wasser aufzunehmen und zeitgleich Luft in den Poren zu halten steigt also deutlich an. In Feldversuchen von Toková et al. (2020) wurden 20 t/ha Biochar auf landwirtschaftlich genutzte Böden aufgebracht. Nach einem Jahr nahm die Schüttdichte des Bodens um 12% ab, während die Porosität entsprechend um 12% zunahm, vor allem in der obersten Bodenschicht. In den mit Biochar verbesserten Böden war der Bodenwassergehalt während Trockenperioden höher als in den Kontrollböden (Toková et al., 2020). Solche Effekte sind jedoch nicht nur von kurzfristiger Dauer, sondern können über mehrere Jahre vorhanden sein. So bestätigten Jiang et al. (2025), dass die Ausbringung von Biochar über mehrere Saisons hinweg zu einer Verbesserung der hydraulischen Bodenfunktionen führten. Die Infiltrationsraten, sowie das verfügbare Bodenwasser konnten erhöht werden, bei gleichzeitiger Abnahme der Schüttdichte (Jiang et al., 2025). In den Versuchen von Singh et al. (2022) führte die Anwendung von Biochar im Mittel zu einer Reduktion der Schüttdichte um 29% gegenüber den Kontrollböden. Eine noch größere Abnahme der Schüttdichte von ca. 31% konnte durch Biochar erreicht werden, welcher durch höhere Pyrolysetemperaturen von über 500°C erzeugt wurde. Mit steigender Biochar Zugabe sinkt auch die Schüttdichte stärker. Gleiches lässt sich über die Bodengesamtporosität sagen. Mit steigender Biochar Zugabe steigt auch die Bodengesamtporosität. Im Mittel stieg diese um 59%. Auch hier zeigte eine höhere Pyrolysetemperatur von über 500°C einen größeren Effekt auf die Porosität. So konnte diese um ca. 66% gesteigert werden (Singh et al., 2022). Grundlegend besitzt Biochar eine hohe innere Porosität und ein großes Volumen (80%) an Mikro- und Makroporen, welche Luft und Wasser aufnehmen. Höhere Pyrolysetemperaturen treiben flüchtige Bestandteile leichter aus und öffnen das Porengerüst wodurch dieses robuster wird und die Permeabilität weiter verbessert wird. Größere Mengen Biochar zeigen größere positive Effekte, wobei grobe und sandige Böden mehr profitieren als sehr tonige Böden (Singh et al., 2022). Langzeitstudien über Jahre zeigen, dass Biochar am besten kombiniert mit gleichzeitiger physikalischer Verbesserung des Bodens funktioniert, zum Beispiel nach der Bodenbelüftung kombiniert mit Mulchen (Percival et al., 2023). Preislich liegen 1000 Liter (160 kg) bei ca. 300€ (CarboZero, o. D.).

## **5.11 Mögliche Risiken für Leitungen und Wurzeln**

Die Druckluftinjektion und das Freilegen von im Boden liegender Infrastruktur gelten generell als schonend und zerstörungsfrei. Anders als bei mechanischen Ausgrabungen und Lockerungen werden Kabel und Rohre nicht durchtrennt, sondern umströmt. So wurden im Jahr 2017 weniger als 0,4% der gemeldeten Leitungsschäden durch grabungssanfte Maßnahmen mit Druckluft verursacht, während 99,6% durch mechanische Verfahren verursacht worden sind (Davey, 2024). Hierbei darf die Belüftungslanze jedoch nicht in mögliche Leitungen und Rohre mechanisch gebohrt werden. Daher ist eine vorsorgliche Leitungsauskunft für die zu bearbeitenden Flächen unerlässlich. In der Nähe von Bauwerken und sensiblen Leitungen ist besondere Vorsicht geboten, da die Rissbildung und Bodenbewegung zu Schäden führen könnte. Grundsätzlich handelt es sich trotzdem um eine für Leitungen und Rohre sichere Methode der Bodenlockerung, welche durch die Leitungsauskunft und eine sachgemäße Durchführung keine Gefahr darstellt.

Die Bodenbelüftung per Druckluftinjektion bietet den Vorteil bei geschwächten Bäumen auch in sensiblen Wurzelbereichen, nahe des Stamms schonend zu sein, wo mechanische Bodenlockerung undenkbar wäre. So kann die Bodenbelüftung auch im Traufbereich von älteren Bäumen eingesetzt werden, ohne Wurzelschäden zu verursachen (Lin & Lin, 2025). Natürlich darf auch hier nicht mechanisch in große Wurzeln hineingebohrt werden. So wurden in München 80-jährige Linden nach Verdichtung durch Baumaßnahmen mit der Hochdruckinjektion behandelt, um die Verdichtung zu bekämpfen. Jeder Baum erhielt fünf Injektionspunkte, welche anschließend mit Blähtongranulat verfüllt wurden. Nach drei Jahren zeigten die damals geschwächten Bäume eine deutlich gesteigerte Kronenvitalität bei mehr Feinverzweigung. Dabei wurden keine Wurzelverluste beobachtet, was den schadensarmen Umgang mit Wurzeln bestätigt. (Bodensanierung An Baumstandorten Durch Einsatz von Druckluft, 2024).

## **5.12 Aktuelle Anwendung und Verbreitung der Injektionstechnik und**

Bislang existieren noch keine amtlichen Zahlen und Statistiken über die jährliche Anzahl der Bodenbelüftungen durch Hochdruckinjektionen für Deutschland oder Europa. Auch Branchenverbände wie der deutsche Fachverband geprüfter Baumpfleger liefern in ihren Veröffentlichungen keine konkreten Zahlen und Statistiken zur Anzahl der Hochdruckinjektion (Fachverband Baumpflege e.V., o. J.). Das Netzwerk „terrafit.eu“ ist ein Systemanbieter für Bodenbelüftung und verfügt 60 regionale Stützpunkte in acht europäischen Ländern. 240 Partnerfirmen sind diesem Netzwerk angeschlossen (Terra Fit GmbH, 2025). Daraus lässt sich folgern, dass es in Europa bislang nur wenige hundert Firmen existieren, welche diese Leistungen anbieten.

Der aktuelle Hauptbereich für die Anwendungen der Hochdruckinjektionen liegt bei der Behandlung von Stadtbäumen auf verdichteten Grünflächen, wie einige Fachartikel vermuten lassen (Home, 2025). In der Agrarwirtschaft findet das Verfahren derzeit nur vereinzelt und experimentell Anwendung. So zum Beispiel in einer zentraltaiwanischen Obstplantage als minimalinvasiver Ansatz, den verdichteten Unterboden aufzubrechen (Lin & Lin, 2025). Auch in Ontario, Kanada, wird über das pneumatische „soil fracturing“, also die Hochdruckluftinjektion diskutiert. Hier sollen verdichtete Fahrspuren behandelt und gelockert werden (Sawicki, 2025). Es handelt sich in diesen Fällen jedoch um Pilotprojekte und wissenschaftliche Beprobungen. Die Bodenbelüftung ist im breiten Ackerbau noch nicht etabliert.

Die globale Marktgröße für Bodenbelüftungsanlagen wurde 2024 auf rund 30,2 Milliarden USD geschätzt, wovon die Marktgröße von allein hochdruckbasierter Technik ca. 8,2 Milliarden USD im Jahr 2024 erreichte (Singh & Singh, 2025). Der gesamte Markt besitzt für den Zeitraum von 2025-2034 eine prognostizierte CAGR (Compound Annual Growth Rate = zusammengesetzte jährliche Wachstumsrate) von 6,8%, wodurch er auf eine Gesamtkapitalisierung von 57,7 Milliarden USD wachsen soll (Singh & Singh, 2025). Auf Europa entfallen aktuell ca. 30% der Marktkapitalisierung, was eine größere Verbreitung der Bodenbelüftungstechnik andeutet (Verified Market Reports, 2025). In diesen Berichten bestätigt sich durch die Wachstumsprognosen der Trend des steigenden Interesses und der Nachfrage nach luftdruckbasierten Injektionstechniken. Steigende Anforderungen an die Landwirtschaft, die technologische Weiterentwicklung dieser Techniken und das Streben nach einer nachhaltigen Bodengesundheit lassen die Nachfrage stetig wachsen (Singh & Singh, 2025).

Die IPCC prognostiziert zukünftig ein zunehmend frequentiertes Auftreten von intensiven Starkregenereignissen und gleichzeitig längere Trockenperioden (IPCC — Intergovernmental Panel On Climate Change, o. D.). Bei gleichzeitig steigender verdichteter Fläche in der Landwirtschaft und in urbanen Gebieten ist die Bodenbelüftung in Kombination mit den vorgestellten Zusatzstoffen eine geeignete Methode um lokal geschädigte Böden und Bäume von den nachweislich erhöhten Infiltrations- und Sauerstoffdiffusionsraten profitieren zu lassen. So kann Staunässe und die daraus resultierende Hochwassergefahr eingedämmt werden und die Vitalität und das Wachstum von verdichtungsgeschädigten Bäumen nachweislich verbessert werden. Dementsprechend sind die steigende Nachfrage und die wachsende Marktkapitalisierung keine Überraschung, sondern zeigen das stetig wachsende Interesse und das Potenzial dieser Bodenverbesserungsmethode.

## 6. Schlussfolgerung

Die verschiedenen Messstellen zeigten die Auswirkungen der Bodenbelüftung mittels Hochdruckinjektion. Nach der Belüftung an den Eckpunkten eines Quadratmeters konnte durch jede Infiltrationsmessung auf dieser Belüftungsfläche ein deutlicher Zuwachs in der Infiltrationsrate gemessen werden. Zwar reagierten die verschiedenen Böden sehr unterschiedlich, doch auf allen Böden konnte die Wasserdurchlässigkeit messbar gesteigert werden.

Dabei zeigten bereits sehr durchlässige Böden eher moderate Steigerungen der Raten von ca. 30-60%. Das legte dar, dass auch diese noch Verbesserungspotential aufwiesen. Lag eine infiltrationshemmende Schicht im tieferen Boden vor (Bt/Bv-Horizont), so konnte an diesen Messstellen die Infiltration stark um ca. 60-200% gesteigert werden. Hier wurden diese hydraulischen Engstellen durchdrungen und somit günstige Kanäle in tiefere durchlässigere Schichten erstellt, welche das Infiltrationspotential deutlich anhoben. Am stärksten wirkte sich die Bodenbelüftung auf stark tritt- und verkehrsverdichtete urbane Böden aus. So lagen die Infiltrationsraten vor der Belüftung hier im einstelligen Bereich von mm/h. Nach der Belüftung konnten die Infiltrationsraten um ca. 200-1500% angehoben werden. Hier wurden die Oberflächenversiegelungen, sowie verdichtete Horizonte im Erdreich geweitet und Makroporen geschaffen. Dieses erhöhte Porenvolumen dient dem Wasser als eine Art Abkürzung direkt in die Infiltrationsstarken Schichten hinein. Die Erstellung der Profile mit der Pürckhauer-Handsondierung half im Vorfeld, dichte Schichten und Horizonte zu lokalisieren und einen Überblick über die Bodenstruktur und deren Korngrößen zu erlangen. Mit dem Glühverlust konnte dazu unterstützend noch der Organikanteil dieses Profils ermittelt werden. Aus der Kombination des Profils und dessen organischer Materie konnten bereits vor der Belüftung mögliche infiltrationshemmende Schichten ausfindig gemacht werden und die gemessenen Veränderungen anhand des individuellen Bodenaufbaus sinngemäßer interpretiert werden.

Des Weiteren zeigten Infiltrationsmessungen in 50 cm bzw. 150 cm Abständen zur Belüftungsfläche, dass die maximale effektive Reichweite der Behandlung bei  $\leq 50$  cm Radius um das Injektionsloch herum liegt. Daher wird empfohlen bei der Bodenbelüftung, zur Staunässebehandlung oder zur Lockerung des Bodens an urbane Bäume, Injektionsabstände von 100 cm zu wählen, bzw. ein Raster aus einer Injektion pro Quadratmeter durchzuführen, wie es üblicherweise schon praktiziert wird. Ein Folgetest zeigte auf der Belüftungsfläche acht Wochen nach der Behandlung zwar noch deutlich gesteigerte Raten von +700% im Vergleich zum unbehandelten Boden, verlor gegenüber der direkten Behandlung aber schon -50% im Vergleich zur frischen Rate. Dies ist bei anhaltender Neuverdichtung auch zu erwarten, weshalb das Reduzieren von Tritt- und Verkehrsfrequenzierung bei gleichzeitiger Nachbehandlung des Bodens mit porösen Granulaten und Düngern sehr zu empfehlen ist.

Auch war der Zeitpunkt der Bodenbelüftungen nicht optimal. Aufgrund der nötigen Bodenfeuchte nahe der Feldkapazität wäre ein Zeitraum im Frühling günstiger gewesen. Im Sommer sind die Böden schon zunehmend ausgetrocknet, wodurch die intensive Bewässerung an den Tagen vor der Maßnahme nötig war. So konnte der Standort am Eichenhain in Fürth aufgrund zu großer Trockenheit nicht fachgerecht aufgenommen werden.

Letztendlich konnte die in der Einleitung gestellte Forschungsfrage folgendermaßen beantwortet werden: Mit der Bodenbelüftung lassen sich verdichtete urbane Böden nachweislich auflockern und die Infiltrationsfähigkeit der Böden konnte deutlich gesteigert werden. Dabei ist die Methode umso effektiver, desto stärker eine Oberflächenverdichtung oder eine hydraulische Bremsschicht die Infiltrationsrate bereits einschränkt. Gerade auf solchen Böden konnten die größten Gewinne in den Raten verzeichnet werden, was für die Effektivität dieser Behandlung spricht. Mit den in Kapitel 5.10 beschriebenen Zusatzstoffen lassen sich die positiven Effekte der Bodenbelüftung noch weiter verstärken. Daher wird die Anwendung dieser dringend empfohlen, um die besten Ergebnisse zu erzielen. Kurzgesagt konnte gezeigt werden, dass man mit diesem Verfahren effektiv gegen Staunässe und den damit einhergehenden Bodenverlust von stark verdichteten Flächen angehen kann.

Auch andere Untersuchungen zeigen den infiltrationssteigernden Effekt der Boden-Belüftung, der von geringeren Schüttdichten und erhöhtem Porenvolumen ausgelöst wird. Auch hier wird betont, neben der reinen Belüftung auch unterstützendes poröses Granulat einzubringen, wie es in diesen Testreihen der Fall war. Damit knüpft die Arbeit an die Forschung an und zeigt die variierende Effektivität der Belüftung gegen verschiedene infiltrationshemmende Gründe.

Im Hinblick auf die noch ungewisse Langzeitwirkung der erhöhten Infiltration über mehrere Jahre, könnten Versuchskampagnen auf den belüfteten Flächen in zunehmenden Zeitabständen stattfinden, welche die Abnahme des messbaren Effekts quantifizieren. Zudem könnte man das Verhalten von noch weiteren unterschiedlichen Böden untersuchen und vergleichen, indem man noch zusätzliche Testflächen aufnimmt, behandelt und auswertet.

## **Eidesstattliche Erklärung**

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und ohne unerlaubte Hilfsmittel verfasst habe.

Ich habe keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt und alle wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Texten entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht. Dies gilt für gedruckte Texte wie für Texte aus dem Internet.

Alle Stellen und Personen, welche mich bei der Vorbereitung und Anfertigung der Abhandlung unterstützten, habe ich genannt.

Die Arbeit wurde in der vorliegenden bzw. modifizierten Form noch keiner anderen Stelle zur Prüfung vorgelegt und dieselbe hat auch nicht anderen Zwecken – auch nicht teilweise – gedient. Mit einer Plagiatsprüfung bin ich einverstanden.

Mir ist bewusst, dass jeder Verstoß gegen diese Erklärung eine Bewertung der eingereichten Arbeit mit Note "ungenügend" zur Folge hat.

Ort, Datum

Eigenständige Unterschrift



## 7. Literaturverzeichnis

- Ahmed, N. & Al-Mutairi, K. A. (2022). Earthworms Effect on Microbial Population and Soil Fertility as Well as Their Interaction with Agriculture Practices. *Sustainability*, 14(13), 7803. <https://doi.org/10.3390/su14137803>
- AirSpade. (o. D.). AirSpade Pneumatic Soil Excavation Tools. Abgerufen am 1. Oktober 2025, von <https://www.airspade.com/>
- Aksakal, E. L., Angin, I. & Oztas, T. (2011). Effects of diatomite on soil physical properties. *CATENA*, 88(1), 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2011.08.004>
- Alshraah, S. H., Kranz, C. N., McLaughlin, R. A. & Heitman, J. L. (2024). Wildflowers and compost amendment can improve infiltration in soils impacted by construction. *JAWRA Journal Of The American Water Resources Association*, 60(3), 784–795. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.13202>
- Amelung, W., Blume, H., Fleige, H., Horn, R., Kandeler, E., Kögel-Knabner, I., Kretzschmar, R., Stahr, K. & Wilke, B. (2018). Scheffer/Schachtschabel Lehrbuch der Bodenkunde. Springer Spektrum.
- Armenise, E., Simmons, R. W., Ahn, S., Garbout, A., Doerr, S. H., Mooney, S. J., Sturrock, C. J. & Ritz, K. (2017). Soil seal development under simulated rainfall: Structural, physical and hydrological dynamics. *Journal Of Hydrology*, 556, 211–219. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.10.073>
- Asady, G. H., & Smucker, A. J. M. (1989). Compaction and root modifications of soil aeration. *Soil Science Society of America Journal*, 53(1), 9–13. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj1989.03615995005300010045x>
- Asif, M., Nawaz, M. F., Ahmad, I., Rashid, M. H. U., Farooq, T. H., Kashif, M., Gul, S. & Li, Q. (2023). Detrimental Effects of Induced Soil Compaction on Morphological Adaptation and Physiological Plasticity of Selected Multipurpose Tree Species. *Plants*, 12(13), 2468. <https://doi.org/10.3390/plants12132468>
- Assouline, S. (2004). Rainfall-Induced Soil Surface Sealing: A Critical Review of Observations, Conceptual Models, and Solutions. *Vadose Zone Journal*, 3(2), 570–591. <https://doi.org/10.2136/vzj2004.0570>
- Basche, A. D. & DeLonge, M. S. (2019). Comparing infiltration rates in soils managed with conventional and alternative farming methods: A meta-analysis. *PLoS ONE*, 14(9), e0215702. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0215702>
- Bayerische Vermessungsverwaltung. (2025). BayernAtlas – Topographische Karte 1:10 000 [PDF-Karte]. <https://geoportal.bayern.de/bayernatlas>
- Bender, S. F., Wagg, C., & van der Heijden, M. G. A. (2016). An underground revolution: biodiversity and soil ecological engineering for agricultural sustainability. *Trends in Ecology & Evolution*, 31(6), 440–452. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2016.02.016>

- Blume, H., Brümmer, G. W., Horn, R., Kandeler, E., Kögel-Knabner, I., Kretzschmar, R., Stahr, K. & Wilke, B. (2010). Scheffer/Schachtschabel: Lehrbuch der Bodenkunde. Spektrum Akademischer Verlag.
- Bodenhilfsstoffe | EWALD-Boden. (o. D.). EWALD-Boden. Abgerufen am 1. Oktober 2025, von <https://www.ewald-bodenoptimierung.de/bodenhilfsstoffe>
- Bodensanierung an Baumstandorten durch Einsatz von Druckluft. (2024, Juli 31). Klimaanpassung für Historische Gärten. Abgerufen am 1. Oktober 2025, von <https://klimaanpassung-gartendenkmal.de>
- Bodenverdichtung. (2002, 29. August). Lexikon der Geowissenschaften. Abgerufen am 1. Oktober 2025, von <https://www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften/bodenverdichtung/2142>
- Bojko, O. & Kabała, C. (2014). Loss-on-Ignition as an Estimate of Total Organic Carbon in the Mountain Soils. *Polish Journal of Soil Science*, 47(2), 13–25.
- Bondì, C., Castellini, M. & Iovino, M. (2022). Compost Amendment Impact on Soil Physical Quality Estimated from Hysteretic Water Retention Curve. *Water*, 14(7), 1002. <https://doi.org/10.3390/w14071002>
- CarboZero. (n.d.). Lernen Sie BIOCHAR kennen. Abgerufen am 1. Oktober 2025, von <https://www.carbozero.de/>
- Carsel, R. F. & Parrish, R. S. (1988). Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics. *Water Resources Research*, 24(5), 755–769. <https://doi.org/10.1029/wr024i005p00755>
- Castellini, M., Diacono, M., Preite, A. & Montemurro, F. (2022). Short- and Medium-Term Effects of On-Farm Compost Addition on the Physical and Hydraulic Properties of a Clay Soil. *Agronomy*, 12(6), 1446. <https://doi.org/10.3390/agronomy12061446>
- Chen, G., & Weil, R. R. (2010). Penetration of cover crop roots through compacted soils. *Plant and Soil*, 331(1), 31–43. <http://dx.doi.org/10.1007/s11104-009-0223-7>
- Chen, L., Sela, S., Svoray, T. & Assouline, S. (2013). The role of soil-surface sealing, microtopography, and vegetation patches in rainfall-runoff processes in semiarid areas. *Water Resources Research*, 49(9), 5585–5599. <https://doi.org/10.1002/wrcr.20360>
- Costello, L. R., & Jones, K. S. (2003). Reducing infrastructure damage by tree roots: A compendium of strategies. Western Chapter, International Society of Arboriculture.
- Cundy, C. S. & Cox, P. A. (2005). The hydrothermal synthesis of zeolites: Precursors, intermediates and reaction mechanism. *Microporous And Mesoporous Materials*, 82(1–2), 1–78. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2005.02.016>

- Davey, C. (2024, 12. September). The Case for Soft Excavation. AirSpade Pneumatic Soil Excavation Tools. Abgerufen am 1. Oktober 2025, von <https://www.airspade.com/blogs/educational-library/the-case-for-soft-excavation>
- Drewry, J. J. & Paton, R. J. (2000). Effect of subsoiling on soil physical properties and dry matter production on a Brown Soil in Southland, New Zealand. *New Zealand Journal Of Agricultural Research*, 43(2), 259–268. <https://doi.org/10.1080/00288233.2000.9513426>
- Druckluft Baugeräte | VOGT Baugeräte GmbH | Deutschland. (o. D.). VOGT Baugeräte GmbH. Abgerufen am 1. Oktober 2025, von <https://www.vogt-tec.de/?lang=en>
- Druckluftlanze | VOGT Baugeräte GmbH. (o. D.). VOGT Baugeräte GmbH. Abgerufen am 1. Oktober 2025, von <https://www.vogt-tec.de/vogt-lanze>
- Duran, B. (o. D.). Double-ring-infiltrrometer.pdf. Scribd. <https://de.scribd.com/document/642742979/double-ring-infiltrrometer-pdf?>
- Edwards, C. A. & Bohlen, P. (1996). *Biology and Ecology of Earthworms*. Springer Science & Business Media.
- Fachverband Baumpflege e.V. (o. J.). Startseite. Abgerufen am 1. Oktober 2025, von <https://www.baumpflegeverband.de/>
- Fite, K., Smiley, E. T., McIntyre, J. & Wells, C. (2011). Evaluation of a Soil Decompaction and Amendment Process for Urban Trees. *Arboriculture & Urban Forestry*, 37(6), 293–300. <https://doi.org/10.48044/jauf.2011.038>
- Fitts, J. W., Welch, C. D. & Nelson, W. L. (1956). Soil Test Summaries for Predicting Fertilizer Ratios and Type of Lime Needed. *Soil Science Society Of America Journal*, 20(1), 36–40. <https://doi.org/10.2136/sssaj1956.03615995002000010009x>
- Głąb, T. & Gondek, K. (2025). Enhancing Soil Physical Quality with Diatomite Amendments. *Agronomy*, 15(2), 424. <https://doi.org/10.3390/agronomy15020424>
- Glaser, B., Lehmann, J. & Zech, W. (2002). Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal - a review. *Biology And Fertility Of Soils*, 35(4), 219–230. <https://doi.org/10.1007/s00374-002-0466-4>
- Gould, S. (2024, 15. Mai). A Guide to Soil Moisture. ConnectedCrops. Abgerufen am 1. Oktober 2025, von <https://connectedcrops.ca/the-ultimate-guide-to-soil-moisture/>
- Hamza, M. & Anderson, W. (2004). Soil compaction in cropping systems. *Soil And Tillage Research*, 82(2), 121–145. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.08.009>
- Hartmann, K. J., Bauriegel, A., Dehner, U., Eberhardt, E., Hesse, S., Kühn, D., Martin, W., & Waldmann, F. (Hrsg.). (2024). *Bodenkundliche Kartieranleitung [KA6]*. Band 1: Grundlagen, Kennwerte und Methoden; Band 2: Geländeaufnahme und Systematik (6., komplett überarbeitete und erweiterte Auflage). E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung. ISBN 978-3-510-96869-5.

- Haynes, R. J., & Naidu, R. (1998). Influence of lime, fertilizer and manure applications on soil organic matter content and soil physical conditions: a review. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 51(2), 123–137. <https://doi.org/10.1023/A:1009738307837>
- Heinrich-Böll-Stiftung, Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e. V., TMG – Think Tank for Sustainability, TMG Research gGmbH, Luig, L., et al. (2024). *BODENATLAS 2024*.
- Hillel, D. (1998). *Environmental Soil Physics: Fundamentals, Applications, and Environmental Considerations*. Academic Press.
- Hodge, S. J., D O E Arboricultural Advisory & Information Service & Forestry Authority. (1993). Compressed air soil injection around amenity trees. Abgerufen am 1. Oktober 2025, von <https://trees.org.uk/Trees.org.uk/files/82/82b8e6c2-12da-461b-b358-ea543ac82540.pdf>
- Home. (2025, 25. Juli). *Klimaanpassung für Historische Gärten*. Abgerufen am 1. Oktober 2025, von <https://klimaanpassung-gartendenkmal.de/>
- Huang, C., Ouyang, Y. & Zhang, J. (2006). Effects of a compact layer on soil O<sub>2</sub> diffusion. *Geoderma*, 135, 224–232. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2005.12.006>
- IPCC — Intergovernmental Panel on Climate Change. (o. D.). IPCC. Abgerufen am 1. Oktober 2025, von <https://www.ipcc.ch/>
- Jarvis, N. J. (2007). A review of non-equilibrium water flow and solute transport in soil macropores: principles, controlling factors and consequences for water quality. *European Journal Of Soil Science*, 58(3), 523–546. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2007.00915.x>
- Jeffery, S., Verheijen, F., Van der Velde, M. & Bastos, A. (2011). A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 144(1), 175–187. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.08.015>
- Jiang, Z., Huang, S. & Meng, Z. (2025). Long-term effects of biochar on the hydraulic properties of soil: A meta-analysis based on 1–10 years field experiments. *Geoderma*, 458, 117318. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2025.117318>
- Kakabouki, I., Roussis, I., Mavroeidis, A., Stavropoulos, P., Kanatas, P., Pantaleon, K., Folina, A., Beslemes, D. & Tigka, E. (2025). Effects of Zeolite Application and Inorganic Nitrogen Fertilization on Growth, Productivity, and Nitrogen and Water Use Efficiency of Maize (*Zea mays* L.) Cultivated Under Mediterranean Conditions. *Sustainability*, 17(5), 2178. <https://doi.org/10.3390/su17052178>
- Knappett, J. & Craig, R. (2012). *Craig's Soil Mechanics*, Eighth Edition. CRC Press.
- Konadu, O. T. N. A. (2024). Improving stormwater infiltration with pneumatic air fracturing. Abgerufen am 1. Oktober 2025, von <https://udspace.udel.edu/items/bd1769b1-12f5-47da-8f98-6325e3e7885>

- Kong, C., Camps-Arbestain, M. & Clothier, B. (2021). Influence of the physical properties of pumice and biochar amendments on the soil's mobile and immobile water: implications for use in saline environments. *Soil Research*, 60(3), 234–241. <https://doi.org/10.1071/sr20327>
- Kozłowski, T. (1999). Soil Compaction and Growth of Woody Plants. *Scandinavian Journal Of Forest Research*, 14(6), 596–619. <https://doi.org/10.1080/02827589908540825>
- Kranz, C. N., McLaughlin, R. A., Johnson, A., Miller, G. & Heitman, J. L. (2020). The effects of compost incorporation on soil physical properties in urban soils – A concise review. *Journal Of Environmental Management*, 261, 110209. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110209>
- Kuhnert, M. (2008). Quantifizierung von Oberflächenabfluss und Erosion auf Böden mit hydrophoben Eigenschaften [Dissertation, Universität Potsdam]. [https://publishup.uni-potsdam.de/opus4-ubp/frontdoor/deliver/index/docId/3125/file/kuhnert\\_diss.pdf](https://publishup.uni-potsdam.de/opus4-ubp/frontdoor/deliver/index/docId/3125/file/kuhnert_diss.pdf)
- Lal, R. (2009). Bodendegradation als Grund für unzureichende menschliche Ernährung. *Lebensmittel-Sec. 1*, 45–57. <http://dx.doi.org/10.1007/s12571-009-0009-z>
- Lal, R. & Shukla, M. K. (2004). Principles of Soil Physics. In CRC Press eBooks. <https://doi.org/10.4324/9780203021231>
- Lehmann, J., & Joseph, S. (Eds.). (2015). *Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation* (2nd ed.). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203762264>
- Li, Y., Niu, W., Wang, J., Liu, L., Zhang, M. & Xu, J. (2016). Effects of Artificial Soil Aeration Volume and Frequency on Soil Enzyme Activity and Microbial Abundance when Cultivating Greenhouse Tomato. *Soil Science Society Of America Journal*, 80(5), 1208–1221. <https://doi.org/10.2136/sssaj2016.06.0164>
- Lin, H. & Lin, S. (2025). Alleviating Soil Compaction in an Asian Pear Orchard Using a Commercial Hand-Held Pneumatic Cultivator. *Agronomy*, 15(7), 1743. <https://doi.org/10.3390/agronomy15071743>
- Li, Y., Niu, W., Cao, X., Wang, J., Zhang, M., Duan, X. & Zhang, Z. (2019). Effect of soil aeration on root morphology and photosynthetic characteristics of potted tomato plants (*Solanum lycopersicum*) at different NaCl salinity levels. *BMC Plant Biology*, 19(1). <https://doi.org/10.1186/s12870-019-1927-3>
- Mbarki, Y., Gumiere, S. J., Celicourt, P. & Brédy, J. (2023). Study of the effect of the compaction level on the hydrodynamic properties of loamy sand soil in an agricultural context. *Frontiers in Water*, 5. <https://doi.org/10.3389/frwa.2023.1255495>

- Meek, B. D., Rechel, E. R., Carter, L. M., DeTar, W. R. & Urie, A. L. (1992). Infiltration Rate of a Sandy Loam Soil: Effects of Traffic, Tillage, and Plant Roots. *Soil Science Society Of America Journal*, 56(3), 908–913.  
<https://doi.org/10.2136/sssaj1992.03615995005600030038x>
- Mlih, R., Bydalek, F., Klumpp, E., Yaghi, N., Bol, R. & Wenk, J. (2020). Light-expanded clay aggregate (LECA) as a substrate in constructed wetlands – A review. *Ecological Engineering*, 148, 105783.  
<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.105783>
- Marahrens, S. (o. D.). Verdichtung. Umweltbundesamt. Abgerufen am 1. Oktober 2025, von <https://www.umweltbundesamt.de/themen/boden-flaeche/bodenbelastungen/verdichtung>
- Maschine für Bodenbelüftung | VOGT Baugeräte GmbH. (o. D.-b). VOGT Baugeräte GmbH. Abgerufen am 1. Oktober 2025, von <https://www.vogt-tec.de/geoinjector-maxi>
- Nimmo, J. R., Healy, R. W. & Stonestrom, D. A. (2005). Aquifer recharge. *Encyclopedia Of Hydrological Sciences*. <https://doi.org/10.1002/0470848944.hsa161a>
- Nir, N., Stahlschmidt, M., Busch, R., Lüthgens, C., Schütt, B. & Hardt, J. (2022). Footpaths: Pedogenic and geomorphological long-term effects of human trampling. *CATENA*, 215, 106312. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106312>
- Organifer. (2024, August 20). Organifer.com | Organische Düngemittel & Pflanzenstärkungsmittel. Organifer | Organische Meststoffen & Plantversterkers. Abgerufen am 1. Oktober 2025, von <https://organifer.com/de/>
- Osunbitan, J., Oyedele, D. & Adekalu, K. (2004). Tillage effects on bulk density, hydraulic conductivity and strength of a loamy sand soil in southwestern Nigeria. *Soil And Tillage Research*, 82(1), 57–64. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.05.007>
- Percival, G. C., Graham, S. & Franklin, E. (2023). The Influence of Soil Decompaction and Amendments on Soil Quality. *Arboriculture & Urban Forestry*, 49(4), 179–189.  
<https://doi.org/10.48044/jauf.2023.012>
- Pérez-Botella, E., Valencia, S. & Rey, F. (2022). Zeolites in Adsorption Processes: State of the Art and Future Prospects. *Chemical Reviews*, 122(24), 17647–17695.  
<https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.2c00140>
- Pietsch, J. & Kamieth, H. (1991). Stadtböden: Entwicklungen, Belastungen, Bewertung und Planung (1. Aufl.). Eberhard Blottner Verlag.
- Przybek, A. (2024). Assessment of Physico-Chemical Behavior and Sorptivity—Diatomaceous Earth as Support for Paraffinic Phase-Change Materials. *Materials*, 17(19), 4691. <https://doi.org/10.3390/ma17194691>

- Qian, Z., Zhuang, S., Gao, J., Tang, L., Harindintwali, J. D. & Wang, F. (2022). Aeration increases soil bacterial diversity and nutrient transformation under mulching-induced hypoxic conditions. *The Science Of The Total Environment*, 817, 153017. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153017>
- Rawls, W., Pachepsky, Y., Ritchie, J., Sobecki, T. & Bloodworth, H. (2003). Effect of soil organic carbon on soil water retention. *Geoderma*, 116(1–2), 61–76. [https://doi.org/10.1016/s0016-7061\(03\)00094-6](https://doi.org/10.1016/s0016-7061(03)00094-6)
- Razipoor, E., Mukherjee, S. & Schütt, B. (2025). Spatiotemporal Variability of Soil Water Repellency in Urban Parks of Berlin. *Soil Systems*, 9(2), 31. <https://doi.org/10.3390/soilsystems9020031>
- Regionaldatenbank Deutschland: Statistik: 86321. (o. D.). Abgerufen am 1. Oktober 2025, von <https://www.regionalstatistik.de>
- Ritsema, C. & Dekker, L. (2000). Preferential flow in water repellent sandy soils: principles and modeling implications. *Journal Of Hydrology*, 231–232, 308–319. [https://doi.org/10.1016/s0022-1694\(00\)00203-1](https://doi.org/10.1016/s0022-1694(00)00203-1)
- Ross, B. (1990). The diversion capacity of capillary barriers. *Water Resources Research*, 26(10), 2625–2629. <https://doi.org/10.1029/wr026i010p02625>
- Sannier, C., Ivits, E., Maucha, G., Maes, J. & Dijkstra, L. (2024). Harmonized Pan-European Time Series for Monitoring Soil Sealing. *Land*, 13(7), 1087. <http://dx.doi.org/10.3390/land13071087>
- Sawicki, J. (2025, 23. Juli). Potential Soil Compaction Solutions for Ontario Agriculture – Field Crop News. Field Crop News - Ontario Ministry Of Agriculture, Food And Rural Affairs in Partnership With The University Of Guelph. Abgerufen am 1. Oktober 2025, von <https://fieldcropnews.com/2025/07/potential-soil-compaction-solutions-for-ontario-agriculture/>
- Schaap, M. G., Shouse, P. J., & Meyer, P. D. (2003). Laboratory Measurements of the Unsaturated Hydraulic Properties at the Vadose Zone Transport Field Study Site (PNNL-14284). Pacific Northwest National Laboratory.
- Schicker Mineral. (2025). Zeolith-Aqua 2,5–5,0 mm (5 kg Sack). Schicker Mineral. Abgerufen am 2. September 2025, von <https://www.schicker-mineral.de/zeolith-aqua-2-5-5-0-mm>
- Seleiman, M. F., Kheir, A. M. S., Al-Dhumri, S., Alghamdi, A. G., Omar, E. H., Aboelsoud, H. M., Abdella, K. A. & Hassan, W. H. A. E. (2019). Exploring Optimal Tillage Improved Soil Characteristics and Productivity of Wheat Irrigated with Different Water Qualities. *Agronomy*, 9(5), 233. <https://doi.org/10.3390/agronomy9050233>

- Singh, H., Northup, B. K., Rice, C. W. & Prasad, P. V. V. (2022). Biochar applications influence soil physical and chemical properties, microbial diversity, and crop productivity: a meta-analysis. *Biochar*, 4(1). <https://doi.org/10.1007/s42773-022-00138-1>
- Singh, S. & Singh, A. (2025). Marktgröße für Bodenbelüfter – nach Produkttyp, nach Mechanismus, nach Mobilität, nach Preis, nach Endnutzung, nach Vertriebskanalanalyse, Anteil, Wachstumsprognose, 2025 – 2034. In Global Market Insights Inc. Abgerufen am 1. Oktober 2025, von <https://www.gminsights.com/de/industry-analysis/soil-aerators-market>
- Smiley, E. T. (2001). Terravent™: Soil Fracture Patterns and Impact on Bulk Density. *Arboriculture & Urban Forestry*, 27(6), 326–330. <https://doi.org/10.48044/jauf.2001.036>
- Sorochan, J. & Dickson, K. (2014). GT AirInject Final Report Draft. [https://campeyturfcare.com/wp-content/uploads/2015/02/airInjection\\_report.pdf](https://campeyturfcare.com/wp-content/uploads/2015/02/airInjection_report.pdf)
- Statistisches Bundesamt (Destatis). (2024). Landwirtschaftlich genutzte Fläche 2023. Abgerufen am 1. Oktober 2025, von <https://www.destatis.de>
- Sumner, M. E. (1993). Gypsum and Acid Soils The World Scene. In *Advances in agronomy* (S. 1–32). [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60589-1](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60589-1)
- Terra Fit GmbH. (2025, April 24). Injektionstechnik. Terra Fit GmbH. Abgerufen am 1. Oktober 2025, von <https://terrafit.eu/home/injektionstechnik-2/>
- Terramol TE 30K / 20kg Sack - terra fit GmbH. (2025, 29. April). Terra Fit GmbH. Abgerufen am 1. Oktober 2025, von <https://terrafit.eu/produkt/terramol-te-30k-20kg-sack/>
- Toková, L., Igaz, D., Horák, J. & Aydin, E. (2020). Effect of Biochar Application and Re-Application on Soil Bulk Density, Porosity, Saturated Hydraulic Conductivity, Water Content and Soil Water Availability in a Silty Loam Haplic Luvisol. *Agronomy*, 10(7), 1005. <https://doi.org/10.3390/agronomy10071005>
- Unger, P. W. & Kaspar, T. C. (1994). Soil Compaction and Root Growth: A Review. *Agronomy Journal*, 86(5), 759–766. <https://doi.org/10.2134/agronj1994.00021962008600050004x>
- Uysal, O., Uslu, İ., Aktaş, C. B., Chang, B. & Yaman, İ. Ö. (2024). Physical and Mechanical Properties of Lightweight Expanded Clay Aggregate Concrete. *Buildings*, 14(6), 1871. <https://doi.org/10.3390/buildings14061871>
- Verified Market Reports. (2025, Februar). Pneumatic Soil Aerator Market [Marktbericht]. Abgerufen am 28. August 2025, von <https://www.verifiedmarketreports.com/product/pneumatic-soil-aerator-market/>
- Vitalan GmbH. (n.d.). Bimsgranulat. Vitalan. Abgerufen am 1. Oktober 2025, von <https://www.vitalan.com/bimsgranulat>



- Weil, R. R. & Brady, N. C. (2016). The Nature and Properties of Soils.
- Weiler, M. & McDonnell, J. J. (2007). Conceptualizing lateral preferential flow and flow networks and simulating the effects on gauged and ungauged hillslopes. *Water Resources Research*, 43(3). <https://doi.org/10.1029/2006wr004867>
- Weltecke, K., Löwe, O., & Gaertig, T. (2024). Sanierung von Bodenschad-verdichtung an urbanen Baumstandorten (SANURBAUM). Vorläufiger Abschlussbericht (Az. 34674/01-23). Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst, Fakultät Ressourcenmanagement. Deutscher Bundesstiftung Umwelt (DBU).
- West, L. T., Wilding, L. P., Stahnke, C. R. & Hallmark, C. T. (1988). Calciustolls in Central Texas: I. Parent Material Uniformity and Hillslope Effects on Carbonate-Enriched Horizons. *Soil Science Society Of America Journal*, 52(6), 1722–1731. <https://doi.org/10.2136/sssaj1988.03615995005200060039x>
- Wilke, S. (o. D.). Bodenversiegelung. Umweltbundesamt. Abgerufen am 1. Oktober 2025, von <https://www.umweltbundesamt.de/daten/flaeche-boden-land-oekosysteme/boden/bodenversiegelung>
- Williams, S. M., & Weil, R. R. (2004). Cover crop root channels may alleviate soil compaction effects on soybean crop. *Soil Science Society of America Journal*, 68(4), 1403–1409. <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.1403>
- Zanutel, M., Garré, S., Sanglier, P. & Bièlders, C. (2023). Biochar modifies soil physical properties mostly through changes in soil structure rather than through its internal porosity. *Vadose Zone Journal*, 23(1). <https://doi.org/10.1002/vzj2.20301>
- Zhang, Y., Wang, L., Zhang, W., Zhang, Z. & Zhang, M. (2023). Quantification of Root Systems and Soil Macropore Networks Association to Soil Saturated Hydraulic Conductivity in Forested Wetland Soils. *Forests*, 14(1), 132. <https://doi.org/10.3390/f14010132>

## 8. Appendix

Im elektronischen Appendix finden Sie die PDF-Datei der gesamten Masterarbeit, die erstellten Excel- Tabellen, sowie die erstellten und benutzten Grafiken. Der Appendix ist dabei folgendermaßen gegliedert:

1. PDF-Dokument der Masterarbeit
2. Excel-Tabellen aller Messwerte und den daraus erstellten Grafiken (Datei ist untergliedert)