

Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst  
Fakultät Ressourcenmanagement

**Sanierung von Bodenschadverdichtung  
an urbanen Baumstandorten  
(SANURBAUM)**

vorläufiger Abschlussbericht

gefördert unter dem Az: 34674/01-23 von der  
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Dr. Katharina Weltecke

Oliver Löwe

Prof. Dr. Thorsten Gaertig

Göttingen, 25.06.2024

## INHALTSVERZEICHNIS

1	Abbildungsverzeichnis.....	III
2	Tabellenverzeichnis.....	V
3	Abkürzungsverzeichnis.....	VI
4	Begriffsdefinitionen.....	VII
5	Zusammenfassung.....	- 1 -
6	Einleitung.....	- 2 -
7	Theoretische Grundlagen zum Gastransport im Boden.....	- 4 -
8	Material und Methoden.....	- 5 -
8.1	Versuchsflächen.....	- 5 -
8.1.1	Übersicht.....	- 5 -
8.1.2	Essen-Krupp Park (Schluff).....	- 5 -
8.1.3	Bad Arolsen (Sand).....	- 6 -
8.1.4	Bösinghausen (Ton).....	- 6 -
8.1.5	Langenhagen (Sand).....	- 7 -
8.1.6	Holzerode (Schluff).....	- 8 -
8.1.7	Forstbotanischer Garten Göttingen (Schluff).....	- 8 -
8.1.8	Göttingen Zienterrasse (Schluff).....	- 8 -
8.2	Messgeräte.....	- 6 -
8.2.1	Mobiles CO <sub>2</sub> - Messgerät.....	- 6 -
8.2.2	Profilsonde zur Messung der CO <sub>2</sub> -Konzentration.....	- 6 -
8.2.3	Mobiler Gaschromatograph.....	- 7 -
8.2.4	Laserscanner.....	- 7 -
8.3	Software und Datenverarbeitung.....	- 8 -
8.3.1	Laserscanner.....	- 8 -
8.3.2	Modellierung des Bodengashaushalts.....	- 8 -
8.3.3	Datenanalyse.....	- 8 -
8.4	Versuchsdesign.....	- 8 -
8.4.1	Mobiles CO <sub>2</sub> -Messgerät.....	- 8 -
8.4.2	Belüftungsrohre und Löcher.....	- 9 -
8.4.2.1	Laborversuch.....	- 9 -
8.4.2.2	Feldversuch.....	- 10 -
8.4.2.3	Modellierung.....	- 10 -
8.4.3	Druckluftlanzen.....	- 13 -
8.4.3.1	Versuchsaufbau.....	- 13 -
8.4.3.2	Bodenhebung.....	- 14 -
8.4.3.3	Bodenkundliche Untersuchungen.....	- 14 -
8.4.3.4	Baumphysiologische Parameter.....	- 16 -
8.4.3.5	Räumliche Verteilung des Stützgranulats.....	- 16 -

8.4.4	Phytomelioration.....	- 17 -
8.4.4.1	Flächenvorbereitung.....	- 17 -
8.4.4.2	Aufnahmen .....	- 18 -
9	Ergebnisse.....	- 19 -
9.1	Mobiles CO <sub>2</sub> -Messgerät .....	- 19 -
9.2	Belüftungsrohre und Löcher .....	- 21 -
9.2.1	Validierung der Computermodelle.....	- 21 -
9.2.2	Optimale Porosität von Belüftungsrohren .....	- 23 -
9.2.3	Vergleich von Belüftungslöchern und Belüftungsrohren .....	- 24 -
9.2.4	Effekt von Belüftungseinrichtungen auf unterschiedlich poröse Böden.....	- 25 -
9.2.5	Effekt von Belüftungsrohren auf versiegelte Böden .....	- 26 -
9.2.6	Effekt vieler kleiner Belüftungslöcher .....	- 28 -
9.3	Druckluftlanzen.....	- 29 -
9.3.1	Vergleich Sanierungsvarianten.....	- 29 -
9.3.1.1	Bodenhebung.....	- 29 -
9.3.1.2	Bodenkundliche und baumphysiologische Parameter .....	- 29 -
9.3.2	Nachhaltigkeit der Sanierungswirkung.....	- 30 -
9.3.2.1	Bodenhebung.....	- 30 -
9.3.2.2	Bodenkundliche und baumphysiologische Parameter .....	- 31 -
9.3.3	Auswirkungen der Bodenverdichtung auf den Sanierungserfolg (Tonfläche) .....	- 32 -
9.3.4	Effektiver Belüftungsradius .....	- 33 -
9.3.4.1	Vergleich der Sanierungsvarianten (Schlufffläche).....	- 33 -
9.3.4.2	Vergleich der Bodenarten für die Variante mit Stützkorn.....	- 34 -
9.3.5	Räumliche Verteilung des Stützgranulats.....	- 35 -
9.4	Phytomelioration .....	- 36 -
10	Diskussion.....	- 38 -
10.1	Projektdurchführung – Abweichungen von den ursprünglichen Zielen.....	- 38 -
10.2	Mobiles CO <sub>2</sub> -Messgerät .....	- 39 -
10.3	Belüftungsrohre und Löcher .....	- 40 -
10.3.1	Validierung des Computermodells.....	- 40 -
10.3.2	Bezug zur Praxis.....	- 42 -
10.4	Druckluftlanzen.....	- 43 -
10.4.1	Bodenhebung .....	- 43 -
10.4.2	Bodenkundliche und baumphysiologische Parameter.....	- 45 -
10.5	Phytomelioration .....	- 46 -
11	Fazit .....	- 47 -
11.1	Mobiles CO <sub>2</sub> -Messgerät .....	- 47 -
11.2	Belüftungsrohre und Löcher .....	- 48 -
11.3	Druckluftlanzen.....	- 48 -

11.4	Phytomelioration .....	- 49 -
11.5	Synthese .....	- 49 -
12	Weiterer Forschungsbedarf.....	- 51 -
13	Veröffentlichung der Ergebnisse .....	- 51 -
14	Danksagung .....	- 53 -
15	Literatur.....	- 54 -

## 1 ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1:	Schlufffläche im Krupp-Park in Essen (links) und Bodenprofil (rechts).....	- 5 -
Abbildung 2:	Sandfläche in Bad Arolsen während der Druckluftinjektion (links) und Bodenprofil (rechts). .....	- 6 -
Abbildung 3:	Tonfläche in Bösinghausen während der Bewässerungsmaßnahme (links) und Bodenprofil (rechts). .....	- 7 -
Abbildung 4:	Sandfläche in Langenhagen mit Saatbett zur Phytomelioration (links) und Bodenprofil (rechts). .....	- 7 -
Abbildung 5:	Aufbau des mobilen CO <sub>2</sub> -Messgeräts mit Infrarot-Sensor.....	- 6 -
Abbildung 6:	Aufbau der Profilsonde. ....	- 7 -
Abbildung 7:	Aufbau des Tonnenmodells im Labor. ....	- 9 -
Abbildung 8:	Definition der Physik des Tonnenmodells. $D_0$ ist der Gasdiffusionskoeffizient, $\gamma$ ist die Porentortuosität und $\epsilon$ ist die für den Luftaustausch zur Verfügung stehende Porosität.....	- 11 -
Abbildung 9:	Definition der Physik des In-situ-Modells "Belüftungsrohr". $D_0$ ist der Gasdiffusionskoeffizient, $\gamma$ die Porentortuosität, $\epsilon$ die für den Luftaustausch zur Verfügung stehende Porosität, $R$ die Respirationsrate und $h$ ist die Höhe des jeweiligen Horizontes. Bei der Variante „Belüftungsloch mit Baumsubstrat“ fehlt das Belüftungsrohr. Stattdessen ist das Loch in der Mitte vollständig mit Baumsubstrat gefüllt. ....	- 12 -
Abbildung 10:	Definition der Physik für die Modellvariante "viele kleine Belüftungslöcher". $D_0$ ist der Gasdiffusionskoeffizient, $\gamma$ die Porentortuosität, $\epsilon$ die für den Luftaustausch zur Verfügung stehende Porosität, $R$ die Respirationsrate und $h$ ist die Höhe des jeweiligen Horizontes. ....	- 13 -
Abbildung 11:	Sanierungs- und Untersuchungsraaster. ....	- 15 -
Abbildung 12:	Foto eines Abschnitts aus einem Bodenprofil. Rote Flächen zeigen markiertes Stützgranulat. ....	- 16 -
Abbildung 13:	Mit dem Bildanalyseprogramm ImageJ Fuji markierte Granulatflächen.....	- 16 -
Abbildung 14:	Von dem Gaschromatographen und dem neuen CO <sub>2</sub> -Messgerät mit Infrarot-Sensor gemessene CO <sub>2</sub> -Konzentrationen der vier Prüfgase im Labor. ....	- 19 -
Abbildung 15:	Mit dem Gaschromatographen (links) und den beiden CO <sub>2</sub> -Messgeräten mit Infrarot-Sensor gemessenen CO <sub>2</sub> -Konzentrationen auf der unverdichteten Fläche. Gleiche Buchstaben (a) zeigen, dass keine signifikanten Unterschiede vorliegen (Dunn test $p < 0,05$ ). .-	- 20 -

Abbildung 16: Mit dem Gaschromatographen (links) und den beiden CO <sub>2</sub> -Messgeräten mit Infrarot-Sensor gemessenen CO <sub>2</sub> -Konzentrationen auf der verdichteten Fläche. Unterschiedliche Buchstaben (a, b) verweisen auf signifikante Unterschiede (Dunn test $p > 0,05$ ). .....	- 20 -
Abbildung 17: Visuelle Darstellung der CO <sub>2</sub> -Konzentration [%] in der Tonne (a) und der Feldvariante mit Belüftungsrohr (b) mittels COMSOL-Multiphysics.....	- 21 -
Abbildung 18: Gemessene und modellierte CO <sub>2</sub> -Konzentration in der Tonne an verschiedenen Messpunkten.....	- 22 -
Abbildung 19: Gemessene und modellierte CO <sub>2</sub> -Konzentrationen des Feldversuchs. Die Box-Whisker-Plots stellen die in-situ gemessenen Daten dar, die grauen Rauten zeigen die modellierten Werte.....	- 23 -
Abbildung 20: Einfluss der Porosität der Rohrwand auf die CO <sub>2</sub> -Konzentration im Boden. Eine Porosität von 0,02 (blau) entspricht der Gasdiffusivität des untersuchten Bodens. Die Porosität der in den Versuchen verwendeten Rohre betrug 0,092 (rot). Die Linien für Porositäten der Rohrwand $>0,01$ überlappen sich und sind daher nicht einzeln sichtbar.....	- 24 -
Abbildung 21: Vergleich der modellierten CO <sub>2</sub> -Konzentration im Boden zwischen den Varianten "Belüftungsloch ohne Baumsubstrat=Loch" (Porosität = 1), "Belüftungsloch mit Baumsubstrat" (Porosität = 0,3) und "Belüftungsrohr" (Porosität der Rohrwand = 0,092) in vier verschiedenen Tiefen. ....	- 25 -
Abbildung 22: Vergleich der modellierten CO <sub>2</sub> -Konzentration im Boden für verschiedene Porositäten des Unterbodens in einer Tiefe von -0,46 m für die Varianten "Belüftungsloch mit Baumsubstrat" und "Belüftungsrohr".....	- 26 -
Abbildung 23: Gemessene und modellierte CO <sub>2</sub> -Konzentrationen in der oberflächlich versiegelten Tonne. Die Anzahl der Messwiederholungen ist jeweils $n=3$ .....	- 27 -
Abbildung 24: CO <sub>2</sub> -Konzentration in 1,0 m Tiefe von asphaltierten Böden mit unterschiedlicher Porosität. Die Darstellung umfasst eine Variante mit und eine ohne Flächenbelüftung. ....	- 28 -
Abbildung 25: CO <sub>2</sub> -Profil von asphaltierten Böden (Porosität des Bodens: 0,05) mit und ohne Flächenbelüftung.....	- 28 -
Abbildung 26: CO <sub>2</sub> -Konzentration in einem durch kleine Belüftungslöcher perforierten Boden. Die Löcher sind mit Granulat unterschiedlicher Dichte (Porosität 0,3 und 0,5) oder ohne Füllung (Porosität 1,0) gefüllt. Die CO <sub>2</sub> -Konzentration ist für drei Tiefen angegeben. Die Sternchen (*) geben die Lage der Belüftungslöcher an.....	- 28 -
Abbildung 27: Veränderungen der Bodenoberfläche in den verschiedenen Sanierungsvarianten auf der Schlufffläche. Alle Boxplots sind statistisch signifikant voneinander verschieden. ....	- 29 -
Abbildung 28: Dynamik der Bodenoberfläche auf der Tonfläche für die Sanierungsvarianten D und D+S über fünf Tage. Alle Boxplots sind statistisch signifikant voneinander verschieden.....	- 31 -
Abbildung 29: Veränderung der Bodenoberfläche für die verdichteten (v) und nicht verdichteten (nv) Messflächen auf der Tonfläche über einen Zeitraum von 5 Tagen. Die blaue Linie zeigt die bewässerte, unverdichtete Referenzfläche. Alle Boxplots sind statistisch signifikant voneinander verschieden.....	- 33 -
Abbildung 30: Veränderungen der Bodenoberfläche und Zunahme des Porenvolumens mit zunehmendem Abstand zum Belüftungsloch auf der Schlufffläche. ....	- 34 -
Abbildung 31: Veränderungen der Bodenoberfläche und Zunahme des Porenvolumens verschiedener Bodentypen mit zunehmender Entfernung zum Belüftungsloch. ....	- 35 -
Abbildung 32: Verteilung des Granulats im Abstand zum Injektionspunkt (Dubberke 2023). ....	- 36 -

Abbildung 33: Prozentuale Häufigkeit des Stützgranulats in der Tiefe.....	- 36 -
Abbildung 34 1-3: Über die Gesamtversuchsfläche gemittelter und absteigend sortierter Deckungsgrad der einzelnen Pflanzenarten in Langenhagen und Essen (2021 und 2022) sowie in Göttingen (2021) differenziert nach dem Ursprung der Arten.....	- 37 -
Abbildung 35 1–3: Gemittelte Wurzeldichte (N/dm <sup>2</sup> ) je Tiefenstufe aller Profilwänden der Referenzflächen und Saatflächen in Langenhagen, Essen und Göttingen. Die grau gestrichelten Linien markieren die Horizontgrenzen: jAh: Saatbett, yAl: Tonschotter, rAh und jrAh: ehemaliger Oberboden, yAh: Oberboden, BtSwSd, jB und yB: Unterboden. Die grau gepunkteten Linien markieren die Einstufung der Durchwurzelungsintensität gemäß Arbeitskreis Standortkartierung (2016). Mit 95%iger Wahrscheinlichkeit signifikante Unterschiede in der Wurzeldichte einer Tiefenstufe sind mit einem Sternchen gekennzeichnet. ....	- 38 -
Abbildung 36: Tagesgang der CO <sub>2</sub> -Konzentration in verschiedenen Abständen zum Rohr und in verschiedenen Tiefen.....	- 41 -

## 2 TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1. Biologische, klimatologische und bodenkundliche Parameter der Versuchsflächen im Projekt SANURBAUM. Die Abkürzungen für die Bodenarten und die Bodentypen entsprechen dem Klassifizierungssystem KA5 (Ad-hoc-AG Boden 2005). Der Bodentyp Deposol wurde aus dem Eberhardt (2022) entnommen. Die Niederschlags- und Temperaturdaten wurden vom Deutschen Wetterdienst ( <a href="https://cdc.dwd.de">https://cdc.dwd.de</a> ) am 10. März 2024 abgerufen. S, s: Sand, sandig; U, u: Schluff, schluffig; T, t: Ton, tonig; l: lehmig; 2: schwach, 3: mittel.....	- 5 -
Tabelle 2: Sanierungsparameter an den einzelnen Versuchsflächen. D steht für eine Sanierungsvariante ohne Stützgranulat und nur mit Druckluft. D+S bezeichnet eine Sanierungsvariante mit dem Einsatz von Stützgranulat nach Zugabe von Druckluft, und bei der Variante D+W wurde anstelle von Stützgranulat Wasser in den Boden gepresst. ....	- 14 -
Tabelle 3: Anzahl und Quellen der durchgeführten bodenphysikalischen Untersuchungen. ....	- 15 -
Tabelle 4: Zusammensetzung der verwendeten Saatmischung von Feldsaaten Freudenberger GmbH & Co. KG (Krefeld). ....	- 17 -
Tabelle 5: Anzahl und Größe der Versuchsflächen, Aufnahmeflächen und Profilwände an den Versuchsstandorten. ....	- 18 -
Tabelle 6: Auswirkungen der Druckluftlanzensanierungen auf die Bodenphysik und Bodenbiologie direkt nach der Sanierung im Jahr 2021. Ein Pfeil nach oben bedeutet mit 95 %iger Sicherheit, zwei Pfeile mit 99%iger Sicherheit eine signifikante Anhebung der Werte zur Referenz. Pfeil(e) nach unten zeigen entsprechend signifikante Absenkungen der Werte zur Referenz an. Grün bedeutet einen positiven Effekt, rot einen negativen und gelb bedeutet keinen signifikanten Unterschied zur Referenz. Bei leeren Feldern liegen keine Daten vor. Varianten: D: Druckluft, D+S Druckluft mit Stützgranulat, D+W: Druckluft mit Wasser. ....	- 30 -
Tabelle 7: Auswirkungen der Druckluftlanzensanierungen auf die Bodenphysik und Bodenbiologie ein Jahr nach der Sanierung im Jahr 2022. ....	- 31 -
Tabelle 9: Gesamtdeckungsgrad (%) und Artenanzahl auf den Untersuchungsflächen in den Jahren 2021 und 2022. ....	- 36 -
Tabelle 10: Eignung der Verfahren zur Sanierung von Bodenschadverdichtung bei verschiedenen Standortsbedingungen. Grün: grundsätzlich geeignet, orange: bedingt geeignet oder nur eingeschränkt zielführend, rot: nicht geeignet, blau: Beurteilung erfordert weitere Untersuchungen.....	- 50 -

### 3 ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

**A:** Fläche

**C:** Konzentration

**c** und **d:** empirische Parameter zur Beschreibung der Poprentortuosität in Abhängigkeit des luftgefüllten Porenvolumens.

**D:** Gasdiffusionskoeffizient; ein von den beteiligten Gasen abhängiger Proportionalitätskoeffizient.

**D:** Variante der Druckluftlanzensanierung, bei der ausschließlich Druckluft eingesetzt wird.

**D+S:** Variante der Druckluftlanzensanierung, bei der zusätzlich zur Druckluft Stützgranulat in den Boden geblasen wird.

**D+W:** Variante der Druckluftlanzensanierung, bei der nach der Einbringung von Druckluft Wasser statt Stützgranulat durch die Lanze injiziert wird.

**D<sub>0</sub>:** Gasdiffusionskoeffizienten der beteiligten Gase in der freien Atmosphäre

**D<sub>s</sub>:** scheinbarer Gasdiffusionskoeffizient; durch Porositätsfaktor und Tortuositätsfaktor reduziert Gasdiffusionskoeffizient in einem porösen Medium

**D<sub>s</sub>/D<sub>0</sub>:** relativer scheinbarer Gasdiffusionskoeffizient; gibt an, inwieweit der diffusive Gastransport durch den Boden gegenüber der Diffusion in der freien Atmosphäre verringert ist

**ε:** luftgefüllte Porenvolumen

**γ:** relative Diffusionseffizienz, auch Tortuosität genannt

**GC:** Gaschromatograph

**h:** Horizontstärke

**Ls2:** schwach sandiger Lehm

**Ls4:** stark sandiger Lehm

**p:** Druck

**q:** Fluss; Menge eines Gases, die in einer bestimmten Zeit t durch eine Fläche A (senkrecht zum Fluss) diffundiert.

**R:** Respirationsrate gemessen an der Bodenoberfläche

**Slu:** schluffig lehmiger Sand

**St2:** schwach toniger Sand

**Su2:** schwach schluffiger Sand

**t:** Zeit

**T:** Temperatur

**Tu2:** schwach schluffiger Ton

**Uls:** sandig lehmiger Schluff

**Ut3:** mittel toniger Schluff

#### 4 BEGRIFFSDEFINITIONEN

**Diffusion:** Durch thermische Eigenbewegung induzierter Transport von Teilchen entlang eines Konzentrationsgradienten

**Konvektion:** Massentransport von Gasen (oder Flüssigkeiten), der z. B. durch Wind, starke Niederschläge, Grundwasserschwankungen, Luftdruck- oder Temperaturunterschiede ausgelöst werden kann.

**Phytomelioration:** Verbesserung oder Wiederherstellung von ökologisch gestörten oder degradierten Standorten.

**Porosität:** luftgefüllter Porenanteil des Bodenvolumens ( $\epsilon$ )

**Respiration:** Durch Atmung von Bodenorganismen und Wurzeln produziertes CO<sub>2</sub>.

**Tortuosität:** Verhältnis der tatsächlichen Weglänge, die Gase im Boden aufgrund der spezifischen Porengeometrie und der dadurch gekrümmten Diffusionswege zurücklegen, zu einer geraden Strecke

## 5 ZUSAMMENFASSUNG

**Hintergrund:** Stadtbäume erbringen zahlreiche Ökosystemleistungen, die sich positiv auf die Lebensqualität der Stadtbevölkerung auswirken. Stark verdichtete Standorte führen allerdings häufig zu Vitalitätsverlusten und verfrühtem Absterben urbaner Bäume. In der Praxis werden verschiedene Sanierungsverfahren zur Sanierung von Bodenschadverdichtung angewendet. Allerdings sind deren Wirksamkeit, Nachhaltigkeit und ökologischen Konsequenzen kaum wissenschaftlich nachgewiesen.

**Ziel:** In dem Forschungsprojekt SANURBAUM sollte untersucht werden, ob und wie Bodenschadverdichtungen bei urbanen Baumstandorten mittels Belüftungsrohren und Löchern, Druckluftlanzen und tief und intensiv wurzelnden Pflanzen saniert werden können.

**Methoden:** Zur Evaluierung der Sanierungsverfahren wurde ein mobiles CO<sub>2</sub>-Messgerät entwickelt und sowohl im Labor als auch im Feld mit den Messungen eines Gaschromatographen verglichen. Der Einfluss von Belüftungsrohren und Löchern auf den Bodengashaushalt wurde anhand eines Computermodells simuliert, welches ebenfalls durch Messungen im Labor und Feld validiert wurde. Der Erfolg von Druckluftlanzensanierungen wurde auf einer sandigen, schluffigen und tonigen Versuchsfläche untersucht. Primär wurde die Effektivität der Sanierungsmaßnahmen über die Messung der Bodenhebung durch einen Laserscanner evaluiert. Außerdem wurden CO<sub>2</sub>-Konzentration, Eindringwiderstand, Wurzelichte und Lagerungsdichte, sowie die Arten und Dichte von Regenwürmern aufgenommen. Um die Reaktion der Bäume zu untersuchen wurde Dämmerungswasserpotenzial, Blattflächenindex, Kronenmantelfläche und Kronengeometrie sowie Baumhöhe und Stammumfang in 1 m Höhe aufgenommen. Die Sanierung von Bodenschadverdichtung mittels tief und intensiv wurzelnden Pflanzen wurde ebenfalls auf drei Versuchsflächen mit unterschiedlichen Bodenarten untersucht. Dafür wurde eine Saatmischung mit 29 verschiedenen Pflanzen ausgebracht und der Erfolg der Sanierungsmaßnahme anhand des Deckungsgrads der einzelnen Pflanzenarten und der Durchwurzelungsintensität analysiert.

**Ergebnisse:** Die Ergebnisse zeigen, dass das neu entwickelte CO<sub>2</sub>-Messgerät unter Laborbedingungen genauso so gut misst wie ein Gaschromatograph und bei Feldmessungen eine hinreichend hohe Genauigkeit liefert. Damit kann nun die Boden-CO<sub>2</sub>-Konzentration schnell und kostengünstig erhoben und so die Belüftungssituation des Bodens beurteilt werden.

In dem Projektteil zu den Belüftungsrohren und Löchern wurde ein Computermodell erstellt und anhand von Messergebnissen validiert. Mit Hilfe der Simulationen konnten bisherige Annahmen zur Effektivität von Belüftungsrohren überprüft und Empfehlungen zum Einsatz in der Praxis gegeben werden. Die Ergebnisse zu den Druckluftlanzensanierungen zeigen, dass der Sanierungseffekt erheblich von Bodenart, Verdichtungsgrad, Sanierungsvariante und dem Abstand zu den Belüftungslöchern abhängt. Eine Sanierung von Bodenschadverdichtung mittels tief und intensiv wurzelnden Pflanzen konnten in zwei Jahren nicht erreicht werden. Eine längere Standzeit der Pflanzen und eine Verbesserung der Wachstumsbedingungen durch Wässerung und ggf. Düngung lassen einen besseren Sanierungserfolg erwarten.

**Fazit:** Das Projekt SANURBAUM hat maßgeblich dazu beigetragen, viele essenzielle Fragen in Bezug auf die Effektivität von Verfahren zur Sanierung von Bodenschadverdichtung zu klären. Die Untersuchungen zeigen, dass die untersuchten Verfahren Potenzial haben, Bodenschadverdichtung auf urbanen Baumstandorte zu sanieren. Dennoch gilt, dass für eine erfolgreiche Sanierung eine Optimierung der Verfahren erforderlich ist. Weitere Forschung ist dafür notwendig.

**Kooperationspartner und Förderung:** Das Projekt wurde von 17 Partnern aus der Wirtschaft, darunter Anwender und Hersteller der Sanierungsverfahren, sowie mehreren Kommunen tatkräftig unterstützt. Gefördert wurde das Projekt von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) unter dem Aktenzeichen: Az: 34674/01-23.

## 6 EINLEITUNG

Stadtbäume erbringen als Kernelemente des urbanen Grüns zahlreiche Ökosystemleistungen, die sich positiv auf die Lebensqualität der Stadtbevölkerung auswirken: Sie kühlen durch Beschattung und Verdunstung, schützen vor Immissionen und haben einen positiven Effekt auf die Gesundheit und das Wohlbefinden der Menschen. Der Wert dieser Leistungen wird nicht zuletzt an den Grundstückspreisen für Quartiere mit hohen Stadtbaumanteilen sichtbar.

Ein entscheidender Faktor für die Vitalität von Bäumen ist die Beschaffenheit des Bodens. Der Boden ist ein geeigneter Wurzelraum, wenn er die Wurzeln gleichzeitig mit Wasser, Nährstoffen und Sauerstoff versorgt, produziertes CO<sub>2</sub> entsorgt und ihnen darüber hinaus die Möglichkeit der Verankerung gibt. Aufgrund der zahlreichen konkurrierenden Nutzungsansprüche auf der begrenzten städtischen Fläche (z. B. Verkehrs- und Parkflächen), müssen Stadtbäume überwiegend in versiegelten oder stark verdichteten Böden wurzeln. Sowohl die Infiltrationsrate von Niederschlägen als auch der Gasaustausch zwischen Boden und Atmosphäre ist dort gegenüber ungestörten Böden stark verringert. Vitalitätsverluste der betroffenen Bäume und verfrühtes Absterben sind häufig zu beobachtende Folgen.

Verschärft wird die Situation durch den urbanen Wärmeinseleffekt und die Folgen des Klimawandels. Dadurch sind Stadtbäume zunehmend extremen Temperaturen ausgesetzt. Niederschläge bleiben aus oder kommen in Form von Starkregenereignissen herab, wovon Bäume kaum profitieren können. Insgesamt führen diese Faktoren zu einer geringeren Lebensdauer von Stadtbäumen. Sie liegt im Schnitt bei 50 % ihrer potenziellen Altersspanne, bei Straßenbäumen sind es lediglich 25 % der potenziellen Altersspanne (Roloff 2013). Muss ein ausgewachsener Stadtbaum auf einer versiegelten Fläche vorzeitig entnommen werden, bedeutet dies z. B., dass an dem ehemaligen Baumstandort in der Vegetationszeit ca. 500 l Wasser pro Tag weniger verdunstet werden. Die Energiemenge, die für die genannte Verdunstung erforderlich ist, beträgt 340 kW/h. Diese Energie kann der bodennahen Luft nicht entzogen werden, verbleibt dort als Wärme und verstärkt den Wärmeinseleffekt der Stadt. Bis ein junger Baum die Funktionen wieder erfüllen kann, vergehen Jahrzehnte.

Daher ist es folgerichtig, dass versucht wird, stark verdichtete Böden zu sanieren, um die Lebenserwartung der dort wachsenden Bäume zu erhöhen. Ein vorrangiges Ziel der Sanierungsmaßnahmen ist es, den Gasaustausch zwischen Boden und Atmosphäre zu verbessern sowie die Infiltrationsrate zu verbessern. Dazu müssen Porenvolumen und/oder Porenkontinuität erhöht werden.

In der Praxis werden verschiedene Sanierungsverfahren angeboten, in vielen Fällen jedoch ohne einen wissenschaftlichen Nachweis ihrer Wirksamkeit, Nachhaltigkeit und ökologischen Konsequenzen. So werden z. B. Druckluftlanzen zur Sanierung von Bodenverdichtung eingesetzt ohne einen Nachweis zu haben, unter welchen Bedingungen (z. B. Bodenart, Feuchtigkeit) der Einsatz sinnvoll und wie nachhaltig die Bodenlockerung ist. In anderen Fällen werden Belüftungsrohre um den Baum herum in den Boden eingebaut, ohne dass klar ist, wie der Gasaustausch dadurch beeinflusst wird. Darüber hinaus gibt es aus land- und forstwirtschaftlichen Untersuchungen Hinweise zu einfachen natürlichen Sanierungsverfahren von Bodenverdichtung, die aber in der urbanen Baumpraxis weitestgehend unbekannt sind. Dazu zählt die Sanierung mit tief und stark wurzelnden Pflanzen, wie z. B. Luzerne, Waldstaudenroggen, Wegwarte oder Lupine (Felser 2017, Eichler 2020). Aufgrund der geringen Kosten, der nachhaltigen Wirkung und dem ökologischen Mehrwert scheint die Phytomelioration vielversprechend zu sein und sollte auf ihre Einsatzmöglichkeiten auf städtischen Baumstandorten untersucht werden.

**Ziel des Forschungsprojektes SANURBAUM** war es, praxistaugliche Verfahren zur nachhaltigen Sicherung der Bodenfunktion als Baumstandort in urbanen Quartieren herzuleiten und bereits eingesetzte Verfahren zu evaluieren. Konkret sollte untersucht werden, ob und wie Bodenschadverdichtungen bei urbanen Baumstandorten mit unterschiedlichen Standortsvoraussetzungen saniert werden können.

Dabei sollten folgende Ansätze verfolgt werden:

1. Melioration der Bodenbelüftung durch Belüftungslöcher
2. Sanierung der Bodenstruktur durch Druckluftpflanzen
3. Bodensanierung mittels intensiv und tief wurzelnden krautigen Pflanzen

Bei der **Melioration der Bodenbelüftung durch Belüftungslöcher** wird versucht, über perforierte Kunststoffrohre künstliche Transportwege für Sauerstoff bis in den Unterboden zu legen. Belüftungslöcher sollen damit eine Bypass-Funktion beim Gasaustausch einnehmen. In den einschlägigen Regelwerken werden pauschale Angaben gemacht, wie die Belüftungsrohre gestaltet sein sollten und wieviele Belüftungsrohre an einem Standort eingebracht werden sollen (FLL 2010, FGSV 1999). Diese Angaben sind wissenschaftlich nicht begründet und erscheinen häufig wenig sinnvoll. So ist zu vermuten, dass es z. B. bei der Anzahl an Belüftungslöchern pro Baumstandort einen großen Unterschied macht, ob der Boden sandig, lehmig oder tonig ist.

In diesem Projektteil sollte untersucht werden, wie die optimale Beschaffenheit von Belüftungslöchern (Durchmesser, Tiefe, Verfüllung, Konstruktion, räumliche Verteilung, etc.) sein muss, um dauerhaft eine bestmögliche Belüftung eines Standortes zu erreichen. Ziel sollte sein, zum einen die Wirkung von Belüftungslöchern zu bewerten, zum anderen aber ein durch Modellierung der Belüftungssituation passgenaue Maßnahmen abzuleiten.

Bei der **Sanierung schadverdichteter Böden mit Druckluftpflanzen** wird versucht, die verfestigte Bodenstruktur mit hohem Druck von unten aufzubrechen, so dass die dabei entstehenden Risse als Belüftungskorridore fungieren, die Ausgangspunkte einer Bodenregeneration darstellen. Zusätzlich werden häufig Flüssig- oder Feststoffe mit in den Boden injiziert, die als Stabilisatoren oder Hilfsstoffe der Wasser- und Nährstoffversorgung dienen sollen.

In diesem Projektteil sollte untersucht werden,

- ob ein schädlich verdichteter Boden durch die Behandlung mit Druckluftpflanzen so saniert werden kann, dass seine Funktion als Standort für Bäume nachhaltig wiederhergestellt wird;
- ob und wie unterschiedliche Rahmenbedingungen (Bodenart, Bodenfeuchte, Verdichtungsgrad, Injektionsverfahren, etc.) den Sanierungserfolg beeinflussen;
- ob durch die Druckinjektion von flüssigen und festen Bodenhilfsstoffen die Sanierung des Bodens unterstützt werden kann.

Bei der **Bodensanierung mittels stark und tief wurzelnden krautigen Pflanzen** werden schadverdichtete Böden mit Pflanzen eingesät, die ein tiefes und intensives Wurzelwerk ausbilden. Ziel ist, dass die Wurzeln den Boden durchdringen und nach ihrem Absterben und ihrer Zersetzung linienförmige, durchgehende Poren freigeben. Weiterhin hat die Anreicherung des Bodens mit Biomasse einen positiven Einfluss auf das Bodenleben und die Bodenstruktur. Auf Grundlage einer Literaturstudie sollte mit einer Auswahl vielversprechender Pflanzen die Durchwurzelungsintensität dieser Pflanzen im Gewächshaus und in Feldversuchen geprüft werden.

## 7 THEORETISCHE GRUNDLAGEN ZUM GASTRANSPORT IM BODEN

Voraussetzung für eine ungestörte Wurzelatmung ist die Versorgung des Bodens mit Sauerstoff und die Entsorgung des entstandenen Kohlendioxids. Der Austausch der Bodenluft geschieht in erster Linie durch Diffusion, die verursacht wird durch ein Konzentrationsgefälle zwischen der Bodenluft und der atmosphärischen Luft (Gliński & Stępniewski 1985). Die Qualität der Bodenbelüftung wird durch das Luftporenvolumen und die Kontinuität der Poren bestimmt. Gestörte Böden weisen gegenüber gut strukturierten Böden ein geringeres Luftporenvolumen und eine geringere Porenkontinuität auf.

Ein geeigneter Parameter zur Beschreibung der Bodenbelüftung ist die relative Gasdiffusivität, auch relativer scheinbarer Gasdiffusionskoeffizient genannt (Ball 1987; Schack-Kirchner 1994; Schack-Kirchner 1996). Er beschreibt den diffusiven Fluss zwischen Bodenluft und Atmosphäre, der der wichtigste Mechanismus für den Gasaustausch ist (Gliński und Stępniewski 1985). Das erste Fick'sche Gesetz (Gl. 1) für stationäre Diffusion (die Konzentration  $C$  verändert sich nicht mit der Zeit) beschreibt den diffusiven Fluss  $q$ , der durch einen Konzentrationsgradienten in der freien Atmosphäre verursacht wird:

$$q = -D \nabla C \quad (1)$$

Dabei ist  $q$  die Menge eines Gases, die in einer bestimmten Zeit  $t$  durch eine Fläche  $A$  (senkrecht zum Fluss) diffundiert.  $D$  ist ein von den beteiligten Gasen abhängiger Proportionalitätskoeffizient. Er ist abhängig von der Temperatur  $T$  und dem Druck  $p$ . Im Folgenden wird das Problem auf den ein-dimensionalen Fall (Fluss in Richtung  $x$ ) begrenzt, sodass Gleichung 1 wie folgt geschrieben werden kann:

$$q = -D \frac{dc}{dx} \quad (2)$$

Der Gastransport im Boden kann nur im Porenanteil des Bodenvolumens ( $\epsilon$ ) stattfinden. Im Folgenden wird angenommen, dass das gesamte Porenvolumen luftgefüllt ist - oder anders ausgedrückt:  $\epsilon$  ist das luftgefüllte Porenvolumen und die Diffusion in der flüssigen Phase ist vernachlässigbar. Das reduziert den Diffusionskoeffizienten zu  $D = D\epsilon$ . Dadurch wird allerdings unterstellt, dass die Poren gerade Röhren in Richtung des Flusses sind. Da dies grundsätzlich nicht der Fall ist, wird der Diffusionsparameter außerdem durch die spezifische Porengeometrie reduziert:

$$D_s = D_0 \frac{\epsilon}{\gamma} \quad (3)$$

Dabei gibt der Index  $D_s$  den sogenannten scheinbaren Gasdiffusionskoeffizienten an, während  $D_0$  den Gasdiffusionskoeffizienten der beteiligten Gase in der freien Atmosphäre angibt.  $\gamma$  ist die relative Diffusionseffizienz, oder auch Tortuosität genannt. Sie wird häufig als eine steigende Funktion von  $\epsilon$  ausgedrückt. Die Form hängt von dem Strukturmodell ab. In dieser Arbeit wurde dafür der Zusammenhang nach Schack-Kirchner et al. (2001) verwendet:

$$\gamma = \frac{1}{c\epsilon^{d-1}} \quad (4)$$

wobei  $c = 0.496$  und  $d = 1.661$  empirische Parameter sind. Dividiert man den scheinbaren Gasdiffusionskoeffizienten ( $D_s$ ) durch den Gasdiffusionskoeffizienten ( $D_0$ ), das heißt, eliminiert man den von den beteiligten Gasen abhängigen Proportionalitätsfaktor, erhält man ein Relativmaß, welches allein den Gasdiffusionswiderstand des Bodens beschreibt:

$$\frac{D_s}{D_0} = \frac{\epsilon}{\gamma} = \frac{\epsilon}{\frac{1}{c\epsilon^{d-1}}} = \epsilon * c\epsilon^{d-1} = c\epsilon^d \quad (5)$$

## 8 MATERIAL UND METHODEN

### 8.1 Versuchsflächen

#### 8.1.1 Übersicht

Fast alle Untersuchungen erfolgten auf stark verdichteten urbanen Baumstandorten. Es wurden Versuchsflächen ausgewählt, die die drei Hauptbodenarten repräsentieren (Sand, Schluff und Ton). Tabelle 1 enthält die klimatologischen, biologischen und bodenkundlichen Standortsfaktoren der einzelnen Versuchsflächen. Weiterhin kann Tabelle 1 entnommen werden, welche Untersuchungen auf welcher Versuchsfläche stattgefunden haben.

#### 8.1.2 Essen-Krupp Park (Schluff)

In den vorliegenden Untersuchungen stellt der Krupp-Park in Essen das größte Untersuchungsgebiet dar, welches insgesamt 28 Mess- und 10 Referenzflächen umfasst. Angelegt im Jahr 2008, erstreckt sich dieser künstlich geschaffene Park über ein Areal, das vormals industriell genutzt wurde. Der Park wird durch fünf markante Hügel geprägt, die mit Reihen von Säuleneichen (*Quercus robur* 'Fastigiata Koster') bepflanzt sind. Die Eichen stehen in regelmäßigen Abständen von 6 m zueinander.

Am Standort befindet sich ein extensiv gepflegter Rasen auf einem leicht verdichteten, humosen Oberboden. Darunter ist der Standort durch einen stark verdichteten Unterboden aus sandig-lehmigem Schluff (Uls) geprägt (Abbildung 1). Auf dieser Versuchsfläche wurden Untersuchungen zur Druckluftanzensanierung und Phytomelioration durchgeführt.



Abbildung 1: Schlufffläche im Krupp-Park in Essen (links) und Bodenprofil (rechts).

### 8.1.3 Bad Arolsen (Sand)

Die Untersuchungsfläche in Bad Arolsen besteht aus einem ca. 20 Meter breiten Grünstreifen, welcher in insgesamt acht Mess- und zehn Referenzflächen unterteilt wurde. Auf dieser Fläche stehen Hainbuchen (*Carpinus betulus*) in einem Abstand von 6 bis 7 Metern zueinander. Der grasbewachsene Oberboden des Grünstreifens zeigt eine leichte, bis mittel starke Verdichtung und besteht aus schwach schluffigem Sand. Der Unterboden, bestehend aus schwach schluffigem Sand (Su2) bis schluffigen Sand (Slu) ist stark verdichtet. An diesem Standort wurden Untersuchungen zur Druckluftlanzensanierung durchgeführt (Abbildung 2).



Abbildung 2: Sandfläche in Bad Arolsen während der Druckluftinjektion (links) und Bodenprofil (rechts).

### 8.1.4 Bösinghausen (Ton)

Die Versuchsfläche Bösinghausen, gelegen im Göttinger Wald, ca. 15 km nordöstlich von Göttingen, umfasst eine Größe von etwa 160 Quadratmetern. Der dortige Boden zeichnet sich durch einen schwach schluffigen, locker gelagerten Tonboden (Tu2) aus. Im Rahmen dieser Studie wurden drei Referenz- und zehn Messflächen angelegt. Nach Absprache mit dem Sanierungsunternehmen erfolgte eine Bewässerung der Versuchsfläche bis zur Feldkapazität (Wassergehalt 40 Vol.-%) (Abbildung 3). Da es sich bei dieser Fläche um keinen urbanen Standort handelt, liegt keine dementsprechende Bodenverdichtung vor. Aus diesem Grund wurden für unsere Untersuchungen auf drei Messflächen eine Bodenverdichtung mit Hilfe eines Traktors erzeugt. Die Versuchsfläche Bösinghausen wurde für die Untersuchung der Druckluftlanzensanierung verwendet und ermöglichte Messungen über einen Zeitraum von fünf aufeinanderfolgenden Tagen nach der Sanierung.



Abbildung 3: Tonfläche in Bösinghausen während der Bewässerungsmaßnahme (links) und Bodenprofil (rechts).

#### 8.1.5 Langenhagen (Sand)

Bei der Versuchsfläche Langenhagen handelt es sich um eine unbefestigte Parkplatzanlage am Silbersee. Die Fläche zeichnet sich durch einen geringmächtigen humosen Oberboden aus, welcher von einer wenige Zentimeter dicken Tonschotterschicht unterlagert wird. Der Unterboden besteht aus einem stark verdichteten, schwach tonigen, skelettfreien Sand. Die Versuchsfläche ist laut Aussagen der Stadt Langenhagen das Gelände einer ehemaligen Munitionsfabrik und war Frontlinie zur Zeit des zweiten Weltkrieges. Durch diese Historie geht eine weitreichende Kampfmittelverunreinigung einher, welche die Fläche für Druckluftlanzensanierungen unbrauchbar macht. Dementsprechend wurde die Versuchsfläche für Untersuchungen zur Phytomelioration ausgewählt (Abbildung 4).



Abbildung 4: Sandfläche in Langenhagen mit Saatbett zur Phytomelioration (links) und Bodenprofil (rechts).

### 8.1.6 Holzerode (Schluff)

Die Versuchsfläche Holzerode ist ein kleines Waldstück ca. 3 km nördlich der gleichnamigen Ortschaft. Die Fläche unterteilt sich in zwei Bereiche, welche einerseits eine ehemalige Rückegasse und andererseits eine unverdichtete Fläche umfassen. Beim Boden der unverdichteten Fläche handelt es sich um eine humose Auflage, welche von einer Lössschicht unterlagert wird. Bei der Rückegasse dagegen fehlt die Humusaufgabe und der Lössboden ist stark verdichtet. Die Versuchsfläche wurde für die Testung der neuen CO<sub>2</sub>-Messeräte ausgewählt, da die Fläche leicht zugänglich ist und verhältnismäßig homogene Bodenverhältnisse vorliegen.

### 8.1.7 Forstbotanischer Garten Göttingen (Schluff)

Der im Jahr 1970 erstellte forstbotanische Garten Göttingen umfasst auf über 40 ha mehr als 2000 Gehölzarten. Die Fläche wurde mit Materialien umliegender Baumaßnahmen künstlich aufgeschüttet und ist von einer deutlichen Bodenverdichtung gekennzeichnet. Bei dem Bodenaufbau handelt es sich um einen 10 cm mächtigen Ah Horizont mit schluffigem Lehm, welcher von leicht tonigem Schluff unterlagert wird. An diesem Standort wurden Versuche zur Phytomelioration und den Belüftungslöchern durchgeführt.

### 8.1.8 Göttingen Zietenterrasse (Schluff)

Bei der Versuchsfläche der Göttinger Zietenterrasse handelt es sich um ein ehemaliges Kasernengelände mit Panzerreperaturstationen. Die Anlage zeichnet sich durch eine tiefgehende Bodenverdichtung aus. Aktuell befindet sich an diesem Standort eine Streuobstwiese (*Prunus avium*, *Malus domestica*) mit krautiger Wiese (*Plantago lanceolata*, *Hypericum perforatum*, *Daucus carota*, *Trifolium pratense*, *Poa pratensis*). Der Bodenaufbau ist durch einen 25 cm mächtigen leicht verdichteten Ah-Horizont gekennzeichnet, welcher von einem schwach sandigen Lehm unterlagert ist. Im Zuge einer Bachelorarbeit wurden an diesem Standort Untersuchungen zur Phytomelioration durchgeführt.

Tabelle 1. Biologische, klimatologische und bodenkundliche Parameter der Versuchsfelder im Projekt SANURBAUM. Die Abkürzungen für die Bodenarten und die Bodentypen entsprechen dem Klassifizierungssystem KA5 (Ad-hoc-AG Boden 2005). Der Bodentyp Deposol wurde aus dem Eberhardt (2022) entnommen. Die Niederschlags- und Temperaturdaten wurden vom Deutschen Wetterdienst (<https://cdc.dwd.de>) am 10. März 2024 abgerufen. S, s: Sand, sandig; U, u: Schluff, schluffig; T, t: Ton, tonig; l: lehmig; 2: schwach, 3: mittel

Testfläche	Essen	Bad Arolsen	Bösinghausen	Langenhagen	Holzerode	Göttingen (Forstbotanischer Garten)	Göttingen (Zietenterassen)
Unter- suchungen	Druckluftlanze Phytomelioration	Druckluftlanze	Druckluftlanze	Phytomelioration	CO <sub>2</sub> -Messgeräte	Belüftungsrohr Phytomelioration	Phytomelioration
Koordinaten	51.462654° N   6.986455° E	51.371400° N   9.025440° E	51.569656° N   10.052662° E	52.429988° N   9.763470° E	51.604470° N   10.064826° E	51.558557° N   9.962959° E	51.521589° N   9.972431° E
Jahresnieder- schlag [mm]	1087,3 (2021) 817,3 (2022)	575,3 (2021) 528,8 (2022)	613,5 (2021) 488,9 (2022)	597,3 (2021) 495,9 (2022)	613,5 (2021) 488,9 (2022)	613,5 (2021) 488,9 (2022)	613,5 (2021) 488,9 (2022)
Jahrestem- peratur [°C]	10,4 °C (2021) 12,0 °C (2022)	8,5 °C (2021) 9,4 °C (2022)	9,3 °C (2021) 10,6 °C (2022)	9,9 °C (2021) 11 °C (2022)	9,3 °C (2021) 10,6 °C (2022)	9,3 °C (2021) 10,6 °C (2022)	9,3 °C (2021) 10,6 °C (2022)
Bodentyp (KA6)	Deposol	podsolige Braunerde	Pseudogley- Braunerde	Pseudogley	Braunerde	Deposol	Deposol
Unterboden- art (KA5)	Uls	Su2-Slu	Tu2	Uls-St2	Uls	Ut3	Ls2
Baumarten	Säuleneiche ( <i>Quercus robur</i> ) 'Fastigiata Koster'	Hainbuche ( <i>Carpinus betulus</i> )	Laubmischwald ( <i>Fagus sylvatica</i> , <i>Quercus spp.</i> , <i>Carpinus betulus</i> , <i>Picea abies</i> )	<i>Quercus robur</i> <i>Carpinus betulus</i> <i>Betula pendula</i>	Laubmischwald ( <i>Fagus sylvatica</i> , <i>Quercus spp.</i> , <i>Carpinus betulus</i> , <i>Picea abies</i> )	N.E.	Streuobstwiese ( <i>Prunus avium</i> , <i>Malus domestica</i> )

## 8.2 Messgeräte

### 8.2.1 Mobiles CO<sub>2</sub> - Messgerät

Ausgehend von einem älteren Prototyp (KUHNE UND GAERTIG 2012, FÖRSTER ET AL. 2012) wurde zusammen mit der „Messwert - Sanfte Mess- und Regeltechnik GmbH“ ein kompaktes, von mobilen Rechnern und externer Stromversorgung unabhängiges mobiles CO<sub>2</sub>-Messgerät entwickelt, welches zum Monitoring der CO<sub>2</sub>-Konzentrationen der Bodenluft bis in 25 cm Tiefe geeignet ist (Abbildung 5). Für die CO<sub>2</sub>-Messung wird etwa 30 ml Bodenluft von einer Schlauchpumpe durch ein 25 cm langes und 6 mm breites Einstichrohr aus dem Boden gesaugt. In dem Rohr befindet sich eine angefasste Führungsstange, an deren Ende eine Spitze angebracht ist. Diese verschließt beim Einstechen das Rohr und verhindert so das Eindringen von Bodenmaterial. Nach dem Einstechen wird das Rohr zur Bodenluftentnahme über einen Hebel am Griff geöffnet. Die angesaugte Bodenluft wird einem CO<sub>2</sub>-Sensor (Senseair K33 ICB), der auf Infrarotbasis misst, zugeführt.

Die Messgenauigkeit liegt nach Herstellerangaben bei 0,5 Vol.% und  $\pm 3\%$  des Messwertes. Die programmierbare Rechereinheit des Gerätes steuert die Messungen, verarbeitet die Sensordaten, gibt sie auf einem Display aus und speichert die Messwerte. Die Analyseergebnisse können per USB-Schnittstelle exportiert und direkt ausgelesen werden. Die Stromversorgung erfolgt über eine Powerbank, welche jederzeit gewechselt oder auch über einen USB-Port geladen werden kann. Mit dem Gerät können sowohl Einzelmessungen wie auch mehrere Messungen in frei definierbaren Zeitabständen über Tage hinweg erfolgen.



Abbildung 5: Aufbau des mobilen CO<sub>2</sub>-Messgeräts mit Infrarot-Sensor.

### 8.2.2 Profilsonde zur Messung der CO<sub>2</sub>-Konzentration

Zur Untersuchung der Auswirkungen von Belüftungsrohren und Löchern wurden in Zusammenarbeit mit der „Messwert - Sanfte Mess- und Regeltechnik GmbH“ Profilsonden entwickelt, die eine Messung der CO<sub>2</sub>-Konzentration bis in 62 cm Tiefe erlauben. Die Profilsonde besteht aus einem 1,0 m langen Aluminiumrohr, in das miniaturisierte CO<sub>2</sub>-Sensoren vom Typ SCD4x (Sensirion Inc., Stäfa, Schweiz) in 6 cm, 14 cm, 28 cm und 62 cm Tiefe eingesetzt sind. Dabei handelt es sich um photoakustische NDIR-Sensoren (Non-Dispersive Infrared). Diese sind in einem PFA-Rohr eingeschlossen, um sie innerhalb

des Hauptrohrs abzudichten. Eine über den Sensoren angebrachte Membran schützt diese vor Verunreinigungen von außen. Unterhalb der Sensoren ist eine Heizung installiert, die sich bei längeren Messzyklen automatisch einschaltet. Sie dient dazu, die Kondensation von Wasser auf der Sensoroberfläche zu verhindern (Abbildung 6). Der Durchmesser der Sonde entspricht mit 28 mm dem Durchmesser eines Schlagbohrstocks (Typ ‚Pürkhauer‘), sodass der Einbau ohne größeren Aufwand und Krafteinsatz erfolgen kann.



Abbildung 6: Aufbau der Profilsonde.

### 8.2.3 Mobiler Gaschromatograph

Zur Kalibrierung und Verifikation der Messwerte der mobilen CO<sub>2</sub>-Messgeräte und der CO<sub>2</sub>-Profilsonden wurde ein mobiler Gaschromatograph (Micro GC - 4900, Varian Deutschland GmbH, i.e., Agilent Technologies) verwendet. Die Bedienung lief über die Software OpenLAB CDS EZChrom Edition A.04.10.

### 8.2.4 Laserscanner

Für die Untersuchungen der Druckluftlanzsanierungen wurde ein terrestrischer Laserscanner FARO Focus M70 verwendet. Die zugrunde liegende Annahme der Laserscannmessungen ist, dass eine Erhöhung der Bodenoberfläche dem Volumen der neu geschaffenen Bodenporen entspricht. Durch einen Scan der Bodenoberfläche vor und nach der Sanierungsmaßnahme kann demzufolge die Anhebung der Oberfläche und damit das geschaffene Porenvolumen durch die Sanierungsmaßnahme beurteilt werden.

Der Laserscanner nutzt ein Laserlicht mit einer Wellenlänge von 1550 nm. Die Strahlabweichung beträgt 0,3 mrad und die Reichweite reicht von 0,6 m bis 70 m. Um den Okklusionseffekt zu minimieren, wurde jede Messfläche in mindestens zwei Richtungen mit der höchsten Auflösung gescannt.

## **8.3 Software und Datenverarbeitung**

### **8.3.1 Laserscanner**

Für die automatische räumliche Registrierung und Rauschfilterung der Laserscans wurde die Software Faro SCENE (FARO Technologies, Inc., Lake Mary, FL, USA, 2019.2) verwendet. Die Auflösung der Laserscans wurde auf 1 mm festgelegt, wobei bei Entfernungen von weniger als 20 m Abweichungen von etwa 4 mm beobachtet wurden, zusätzlich zu weiteren Fehlerwerten, die auf die räumliche Referenzierung zurückzuführen sind.

Nach der räumlichen Referenzierung der Laserscandaten wurden aus den digitalen Geländemodellen in Essen und Bad Arolsen die Untersuchungsbäume entfernt. Zusätzlich wurde im Umkreis von 3,0 Metern in Essen und 2,8 Metern in Bad Arolsen die Fläche zugeschnitten, um Überschneidungen mit anderen Messbereichen zu vermeiden. Die Mess- und Referenzflächen in Bösinghausen blieben unbearbeitet. Die weiterführende Datenbearbeitung der Laserscandaten erfolgte mittels CloudCompare und dem Einsatz des M3C2-Plugins, welches das Vergleichen von zwei digitalen Geländemodellen nur in der z-Richtung ermöglicht und womit ein digitales Differenzenmodell erstellt werden konnte (James et al. 2017).

Für die Bestimmung des effektiven Radius in Kapitel 9.3.4 wurden, basierend auf dem digitalen Differenzenmodell, 5 mm breite Streifen von den Belüftungspunkten aus in Richtung des Untersuchungsbaumes auf der Sand- und Schlufffläche bzw. auf der Tonfläche in Richtung der Ränder der einzelnen Messflächen ausgeschnitten. Dieser Schritt der Datenbearbeitung war notwendig, um eine gegenseitige Beeinträchtigung der einzelnen Sanierungspunkte auszuschließen.

### **8.3.2 Modellierung des Bodengashaushalts**

Für die Computersimulation der Auswirkungen von Belüftungsrohren und Löcher auf den Bodenlufthaushalt wurde die Finite-Elemente-Modellierungssoftware COMSOL Multiphysics® 6.2 mit dem Subsurface-Flow-Modul verwendet.

### **8.3.3 Datenanalyse**

Die statistische Auswertung erfolgte bei den Projektteilen „Phytomelioration“ und „Belüftungsrohre und Löcher“ mit der Statistiksoftware R (Core Team, 2018). Die Analyse der Daten zu den CO<sub>2</sub>-Messgeräten und dem Projektteil „Druckluftlanzenanierung“ erfolgte mit Matlab (The MathWorks, Inc., Natick, MA, USA, R2020b) und SPSS (IBM GmbH, Ehningen, Deutschland, IBM SPSS Statistics 29).

## **8.4 Versuchsdesign**

### **8.4.1 Mobiles CO<sub>2</sub>-Messgerät**

Zur Überprüfung der Messgenauigkeit des CO<sub>2</sub>-Messgerätes wurden im Labor ein mobiler Gaschromatograph (GC) und das CO<sub>2</sub>-Messgerät parallel an einen mit Prüfgas gefüllten Gasbeutel geschlossen. Beide Geräte konnten so zeitgleich die Gaskonzentration des Prüfgases messen. Insgesamt wurden 36 vergleichende Messungen bei unterschiedlichen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen (0,07%, 0,46%, 2,6% und 9,5 %) vorgenommen.

In einem Feldversuch wurde außerdem auf einer verdichteten und einer unverdichteten Probefläche bei Göttingen ein Versuchsraster angelegt, in dem in kleinräumigen Abständen zueinander die CO<sub>2</sub>-

Konzentration der Bodenluft in 10 cm Tiefe mit dem GC und zwei CO<sub>2</sub>-Messgeräten gemessen wurde. Die Messungen auf einer Fläche erfolgten zur gleichen Zeit.

## 8.4.2 Belüftungsrohre und Löcher

### 8.4.2.1 Laborversuch

Um den Einfluss von Belüftungsrohren auf den Bodengashaushalt unter Laborbedingungen zu untersuchen, wurde eine Regentonne (Volumen: 510 Litern) mit Sand gefüllt und in deren Mitte ein geschlitztes Belüftungsrohr der Firma Funke Kunststoffe GmbH (Hamm-Uentrop) gestellt (Abbildung 7). Das mit einem Vlies ummantelte Belüftungsrohr hatte eine Porosität von 0,092 (= 9,2 %). In der Tonne wurde im unteren Bereich eine etwa 10 cm hohe Kammer durch eine poröse Plexiglasplatte (Porosität: 0,165) abgetrennt. Ein Metallgitter und Drainagevlies verhinderten das Durchrieseln des Sandes in diese Kammer. Das Rohr stand auf der Plexiglasplatte auf, die unterhalb des Belüftungsrohrs keine Porosität aufwies.

Über ein Einlassventil in der unteren Kammer, wurde ein CO<sub>2</sub>-Luftgemisch mit einer definierten CO<sub>2</sub>-Konzentration über eine Schlauchpumpe mit einer Durchflussrate von ca. 10 ml/Minute in die Kammer eingelassen. Damit das Gasgemisch durch den Einlassdruck nicht durch Konvektion in den Sand gedrückt wird, wurde zusätzlich ein Auslass auf der gegenüberliegenden Seite des Einlassventils installiert. Hier wurde durch eine zweite Schlauchpumpe, die die gleiche Durchflussrate hatte, die gleiche Luftmenge abgepumpt, die am Einlassventil eingelassen wurde. Auf diese Weise sollte sichergestellt werden, dass sich das CO<sub>2</sub> im Sandkörper ausschließlich durch Diffusion verteilt und nicht durch Konvektion.

Zur Messung der CO<sub>2</sub>-Konzentration im Sandkörper wurden Schläuche, die zur Stabilisierung an Bambusstangen befestigt waren, in einer Tiefe von 0,1 m, 0,4 m und 0,8 m und in einem Abstand von 0,125 m, 0,210 m und 0,315 m zum Belüftungsrohr installiert. Am Ende der Schläuche wurden Zigarettenfilter angebracht, damit kein Bodenmaterial die Schläuche während der Messungen verstopfen konnte. Alle Schläuche führten zur Oberfläche, sodass die CO<sub>2</sub>-Konzentration in den jeweiligen Tiefen und Abständen bestimmt werden konnte. Die CO<sub>2</sub>-Konzentration im Inneren des Fasses wurde dann über mehrere Stunden gemessen, bis sich ein Gleichgewicht in der Tonne eingestellt hat.

Die Messung der CO<sub>2</sub>-Konzentration erfolgte mit Hilfe eines mobilen Gaschromatographen (Micro GC - 4900, Varian Deutschland GmbH, i.e., Agilent Technologies). Kalibriert wurde der Gaschromatograph mit einem Kalibriergas mit einer CO<sub>2</sub>-Konzentration von 5000 ppm.

Um den Einfluss des Belüftungsrohrs auf versiegelte Böden unter Laborbedingungen zu modellieren, wurde in einem zweiten Versuchsdurchlauf die Oberfläche der Tonne durch eine Plastikfolie rund um das Belüftungsrohr luftdicht abgeschlossen.

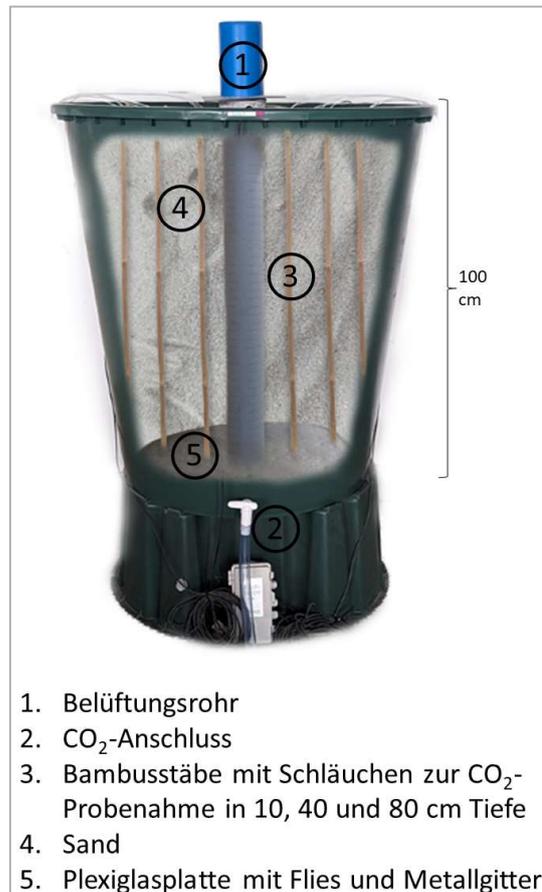


Abbildung 7: Aufbau des Tonnenmodells im Labor.

#### 8.4.2.2 Feldversuch

Um den Einfluss von Belüftungsrohren und Löchern unter realen Bedingungen zu untersuchen, wurden kreisförmig im Kronentraufbereich einer Dreiergruppe von Linden im Forstbotanischen Garten in Göttingen jeweils fünf Belüftungsrohre und Löcher installiert. Die Belüftungsrohre wurden von der Firma Funke Kunststoffe GmbH zur Verfügung gestellt. Dabei handelt es sich um 120 cm lange Rohre mit einem Durchmesser von 11 cm. Die oberen 30 cm sind ungeschlitzt mit einer Bodenverankerung und einem geschlitzten Muffenstopfen. Die restlichen 120 cm sind geschlitzt und mit einem Filterstrumpf überzogen. Für den Einbau wurden die Belüftungsrohre in Löcher mit einer Tiefe von 120 cm und einem Durchmesser von 30 cm in einem Baumsubstrat eingebettet (Bauweise 2 gemäß FLL (2010)). Für die Belüftungslöcher wurden gleich dimensionierte Bodenstrukturen ausgehoben, in die lediglich Baumsubstrat eingefüllt und auf die Installation von Belüftungsrohre verzichtet wurde. Die Anordnung der Belüftungsrohre und Löcher erfolgte alternierend mit einem Abstand von zwei Metern zueinander.

Die Messung der CO<sub>2</sub>-Konzentration erfolgte mit Hilfe der in Kapitel 8.2.2 vorgestellten Profilsonde. Insgesamt 8 Profilsonden wurden um das Belüftungsrohr bzw. Belüftungsloch in Abständen von 5 bis 40 cm angeordnet. Eine der Profilsonden wurde während der Messung innerhalb des Belüftungsrohres bzw. innerhalb des Baumsubstrates platziert. Neben der CO<sub>2</sub>-Konzentration der Bodenluft wurde die Respirationsrate gemessen. Die Messung erfolgte mit einem Edelstahlzylinder an der Erdoberfläche, welcher luftdicht zur Atmosphäre und offen auf den Boden eingebracht wird. Über ein Septum kann dann die CO<sub>2</sub>-Konzentration innerhalb des Zylinders mit der Zeit gemessen werden. Der Anstieg der CO<sub>2</sub>-Konzentration gibt Rückschlüsse über die Bodenrespiration (Loftfield et al. 1992). Zusätzlich wurden an den Messtagen die Temperatur in 5 cm Tiefe, sowie die Bodenfeuchte erfasst. Die Bodentemperatur und -feuchte dient zur Überprüfung der Vergleichbarkeit beider Messtage.

#### 8.4.2.3 Modellierung

##### **Modellierung des Laborversuchs**

Als Vorlage für die Simulation des Laborversuchs diente die im Laborexperiment verwendete Regentonne (Abbildung 7). Die im Modell definierten Randbedingungen werden in Abbildung 8 erläutert. Der diffusive Gastransport im Modell wurde durch folgende Parameter bestimmt:

- Gasdiffusionskoeffizient von CO<sub>2</sub> in Luft,  $D_0$ : 0,16 cm<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>, d. h. 0,000016 m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup> (Marrero und Mason 1972)
- Porentortuosität:  $\gamma = \frac{1}{c\varepsilon^{d-1}}$ , (Schack-Kirchner et al. 2001), wobei  $\varepsilon$  die für den Luftaustausch zur Verfügung stehende Porosität darstellt (vgl. Kapitel 7).

Die Porosität der einzelnen Schichten wurde an ungestörten Stechzylinderproben durch Luftpyknometrie nach DIN 66137-2 (DIN 2019) gemessen. Die resultierende Porosität der oberen Sandschicht (A) betrug  $\varepsilon=0,474$ , der mittleren Schicht (B)  $\varepsilon=0,446$  und der unteren Schicht (C)  $\varepsilon=0,439$ . Um den Einfluss des Belüftungsrohrs auf versiegelte Böden unter Laborbedingungen zu modellieren, wurde in einer zweiten Variante eine dünne undurchlässige Barriere in das Modell eingefügt ('I' in Abbildung 8).

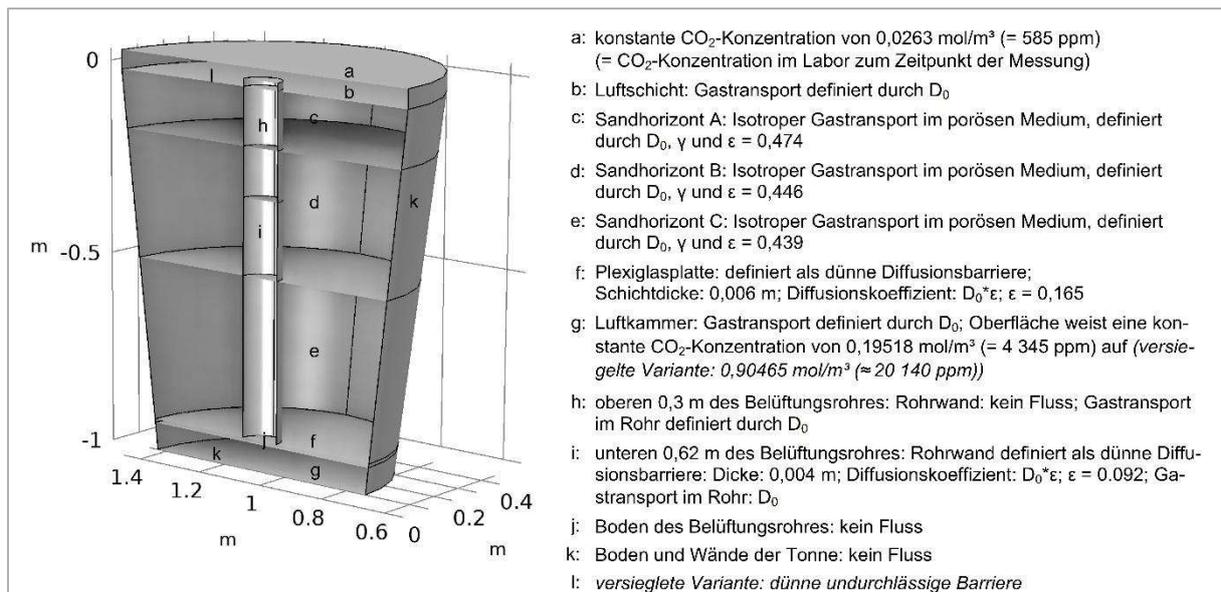


Abbildung 8: Definition der Physik des Tonnenmodells.  $D_0$  ist der Gasdiffusionskoeffizient,  $\gamma$  ist die Porentortuosität und  $\epsilon$  ist die für den Luftaustausch zur Verfügung stehende Porosität.

## Modellierung des Feldversuchs

### Ausgangssituation

Der Versuchsaufbau im Forstbotanischen Garten wurde mit den beiden in dem in Abbildung 9 dargestellten Modell mit der Software COMSOL Multiphysics® nachgebildet. Die Abbildung zeigt den Aufbau für die Variante "Belüftungsrohr". Die Variante „Belüftungsloch mit Baumsubstrat“ unterscheidet sich dahingehend, dass anstelle des Belüftungsrohres das gesamte Loch in der Mitte mit Baumsubstrat gefüllt ist.

Der diffusive Gastransport im Modell wurde durch den Gasdiffusionskoeffizienten,  $D_0$ , und dem Tortuositätsmodell, wie in Kapitel 8.4.2.1 erläutert, definiert. Die in-situ gemessene Respirationsrate,  $R$ , für die Variante "Belüftungsloch mit Baumsubstrat" betrug  $R=1,5182 \times 10^{-6} \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  und für die Variante "Belüftungsrohr"  $R=3,6899 \times 10^{-6} \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ . Diese Werte wurden anteilmäßig auf die verschiedenen Horizonte verteilt. Da unklar ist, wie viel der Respiration in den einzelnen Horizonten stattgefunden hat, wurde die Verteilung durch einen Vergleich der gemessenen und modellierten  $\text{CO}_2$ -Werte iterativ ermittelt.

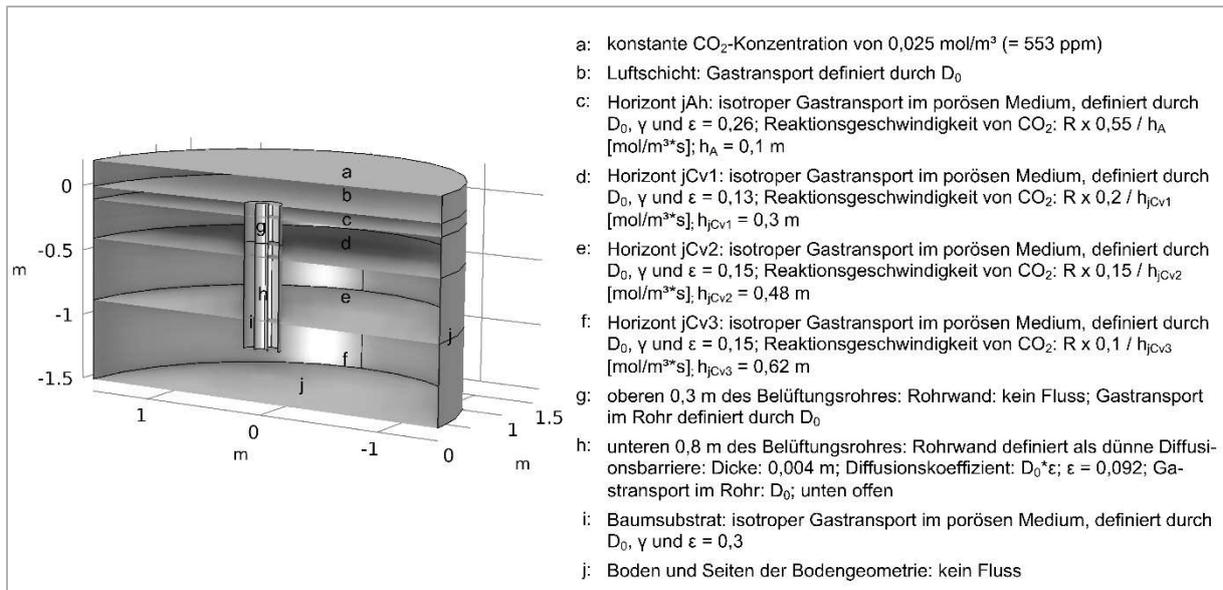


Abbildung 9: Definition der Physik des In-situ-Modells "Belüftungsrohr". D<sub>0</sub> ist der Gasdiffusionskoeffizient, γ die Porentortuosität, ε die für den Luftaustausch zur Verfügung stehende Porosität, R die Respirationsrate und h ist die Höhe des jeweiligen Horizontes. Bei der Variante „Belüftungsloch mit Baumsubstrat“ fehlt das Belüftungsrohr. Stattdessen ist das Loch in der Mitte vollständig mit Baumsubstrat gefüllt.

### Varianten mit Versiegelung

Um die Auswirkungen von Belüftungsrohren auf versiegelte Böden unter Feldbedingungen zu untersuchen, wurden zusätzliche Varianten des In-situ-Modells "Belüftungsrohr" modelliert. Dafür wurde ein Versiegelungshorizont mit geringer Durchlässigkeit und einer darunter befindlichen Schottertragschicht in das Modell eingefügt.

Für die Definition der Gasdurchlässigkeit des Versiegelungshorizontes wurde ein relativer scheinbarer Gasdiffusionskoeffizient (D<sub>s</sub>/D<sub>0</sub>) von 0,005 verwendet. Dies entspricht dem mittleren D<sub>s</sub>/D<sub>0</sub> für Asphalt nach Weltecke (2012). Zur Ableitung der für das Comsol-Modell erforderlichen Porosität aus dem D<sub>s</sub>/D<sub>0</sub> wurde die Beziehung von Schack-Kirchner et al. (2001) verwendet: D<sub>s</sub>/D<sub>0</sub> = 0,496 \* ε<sup>1,66</sup>.

Die verwendete Respirationsrate entsprach der von Weltecke (2012) gemessenen mittleren Respirationsrate von Asphalt. Das Modell wurde für drei verschiedene Bodenporositäten berechnet: ε = 0,05, ε = 0,15 und ε = 0,25.

Um den Einfluss einer Flächenbelüftung aus grobem Kies zu untersuchen, wie sie im Stockholmer Modell für Pflanzbeete verwendet wird (Embrén et al. 2017), wurde eine weitere Variante mit einem zusätzlichen Belüftungshorizont unterhalb der Schottertragschicht simuliert. Dieser Horizont hatte eine Porosität von ε = 0,3.

### Variante mit vielen kleinen Belüftungslöchern

Um den Einfluss vieler kleiner Bohrlöcher auf den Bodengashaushalt zu untersuchen, wurde das Modell des Ausgangsszenarios "Belüftungsloch mit Baumsubstrat" modifiziert. Anstelle eines einzigen größeren Belüftungslochs wurden mehrere kleine Bohrlöcher mit einem Durchmesser von 0,028 m und einer Tiefe von 0,6 m implementiert. Solche Löcher können im Feld durch einen Erdbohrer wie den sogenannten 'Pürckhauer' erstellt werden. Im Modell wurden 24 Bohrlöcher in einem Raster mit einem Abstand von 0,25 m zueinander eingefügt.

Es wurden drei Varianten simuliert:

- Bohrlöcher gefüllt mit Granulat mit einer Luftporosität von ε = 0,3.
- Bohrlöcher gefüllt mit Granulat mit einer Luftporosität von ε = 0,5.
- Bohrlöcher ohne Granulat; die Luftporosität beträgt ε = 1,0.

Weitere Einzelheiten des Modellaufbaus sind in Abbildung 10 dargestellt.

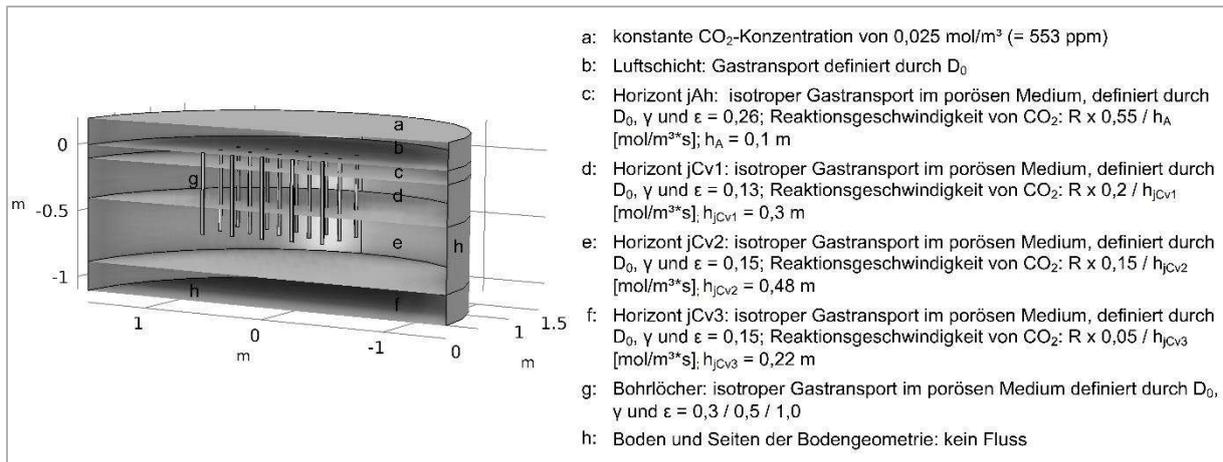


Abbildung 10: Definition der Physik für die Modellvariante "viele kleine Belüftungslöcher". D<sub>0</sub> ist der Gasdiffusionskoeffizient, γ die Porentortuosität, ε die für den Luftaustausch zur Verfügung stehende Porosität, R die Respirationsrate und h ist die Höhe des jeweiligen Horizontes.

### 8.4.3 Druckluftpflanzen

#### 8.4.3.1 Versuchsaufbau

Die Ausführung der Sanierungsarbeiten wurde von Fachunternehmen übernommen, die über Erfahrungen im Einsatz mit Druckluftpflanzen verfügten. Diese Firmen passten diverse Parameter wie den Abstand zwischen den Sanierungspunkten, die Sanierungstiefe und die Druckluftstärke an die spezifischen Gegebenheiten der jeweiligen Standorte an, um einen optimalen Sanierungseffekt zu erzielen. Demzufolge unterscheiden sich die Sanierungsparameter zwischen den Versuchsflächen. Die Unterschiede in den Sanierungsparametern sowie die verwendeten Sanierungsvarianten können der Tabelle 2 entnommen werden.

In den Untersuchungen wurden drei Sanierungsvarianten verwendet:

- D: ausschließliche Lockerung mittels Druckluft
- D+S: Injektion von Druckluft und Stützgranulat
- D+W: Injektion von Druckluft und anschließend Wasser

Bei allen Sanierungsvarianten wurde nach der Sanierung der vertikale Belüftungskanal, in dem die Druckluftpflanze platziert war, manuell mit Stützgranulat aufgefüllt. Das eingesetzte Stützgranulat, bestehend aus kalzinierten Kieselalgen mit einer Dichte von etwa 2,3 g/cm<sup>3</sup> und einem Porenvolumen von circa 70%, wurde von der terra fit GmbH in Maroldsweisach, Deutschland, unter der Produktbezeichnung TE30K bereitgestellt. Die Auswahl der Sanierungsmethoden wurde den Dimensionen der Versuchsflächen angepasst, wie in Tabelle 2 ersichtlich. Die Sanierungsmaßnahmen fanden unter trockenen Bedingungen und unter Feldkapazität statt.

Tabelle 2: Sanierungsparameter an den einzelnen Versuchsflächen. D steht für eine Sanierungsvariante ohne Stützgranulat und nur mit Druckluft. D+S bezeichnet eine Sanierungsvariante mit dem Einsatz von Stützgranulat nach Zugabe von Druckluft, und bei der Variante D+W wurde anstelle von Stützgranulat Wasser in den Boden gepresst.

Versuchsgebiet / Parameter	Essen		Bad Arolsen		Bösinghausen	
Bodenart	Schluff		Sand		Ton	
Variante	D	D+S	D+W	D+S	D	D+S
Tiefe der Belüftung	35 u. 75 cm	35 u. 75 cm	35 u. 75 cm	40 cm	40 cm	40 cm
Druckluftstärke	8 bar	8 bar	7 bar	8 bar	7,5 bar	7,5 bar
Druckluft Häufigkeit pro Sanierungspunkt	2x	2x	N/A.	2x	1x	1x
Abstände im Raster	1,0 m	1,0 m	1,0 m	0,80 m	0,80 m	0,80 m
Menge an Stützkorn oder Wasser pro Punkt	/	500 g	4 L	360 g	/	250-300 g

Für jedes Untersuchungsgebiet wurde ein Raster definiert, das auf den Empfehlungen der Sanierungsfirmen bezüglich des Abstands zwischen den Sanierungspunkten beruhte. Daraus resultierte eine variierende Anzahl an Sanierungspunkten und somit eine unterschiedliche Rasterdichte auf den einzelnen Versuchsflächen. Das Raster in Essen umfasste 30 Sanierungspunkte, in Bad Arolsen 52 Punkte und in Bösinghausen jeweils sechs Punkte pro Versuchsfläche. Der festgelegte Abstand zwischen den Sanierungspunkten betrug in Essen 1,0 Meter und in Bad Arolsen sowie Bösinghausen jeweils 0,8 Meter. Zentral auf den Sand- und Schluffflächen wurde jeweils ein Untersuchungsbaum ausgewählt, dessen Vitalitätsparameter in den folgenden Jahren überwacht werden, um die langfristigen Effekte der Druckluftsanierung zu evaluieren. Auf der Versuchsfläche in Bösinghausen wurden keine Untersuchungsbaume festgelegt. Hier sollte primär die Langzeitwirkung der Sanierungsmaßnahme auf die Bodenstruktur untersucht werden.

#### 8.4.3.2 Bodenhebung

Die Bodenoberfläche wurde mittels terrestrischem Laserscanner erfasst, um darüber die durch die Sanierung erfolgte Bodenhebung – als Maß für den Sanierungserfolg – zu quantifizieren. Der Scan erfolgte einmal vor der Sanierung und einmal danach. Die räumliche Orientierung der Laserscandaten wurde durch die Verwendung von Zielmarken sichergestellt, die rund um den Messbereich platziert wurden. Um eine Vergleichbarkeit der Daten trotz unterschiedlicher Raster zu gewährleisten, wurden nur definierte Bereiche um jeden einzelnen Belüftungspunkt betrachtet.

#### 8.4.3.3 Bodenkundliche Untersuchungen

Für die bodenkundlichen Untersuchungen wurde ein Raster gewählt, das eine Überlagerung mit den Sanierungspunkten ausschließt. Sowohl in Essen als auch in Bad Arolsen wurden jeweils 20 Probenahmepunkte pro Untersuchungsbaum festgelegt (Abbildung 11).

Die Bodenproben wurden mit einem Stechzylinder (100 cm<sup>3</sup>) in einer Tiefe von 5 cm entnommen. Die CO<sub>2</sub>-Konzentration wurde in 5 cm Tiefe mit dem in Kap. 8.2.1 vorgestellten mobilen CO<sub>2</sub>-Messgerät gemessen. An den Stechzylinderproben wurden im Labor Lagerungsdichte, Feststoffvolumen, Gesamtporenvolumen, Luftkapazität, Gasdiffusionskoeffizient bei 300 hPa und Luftleitfähigkeit gemessen. Außerdem wurden je Sanierungsvariante an zwei Untersuchungsbaumen Regenwürmer ausgetrieben und deren Anzahl und Arten bestimmt. Weiterhin wurde an Profilwänden die

Wurzeldichte aufgenommen. Eine Übersicht über die Anzahl der Untersuchungspunkte pro Untersuchungsfläche und Jahr sowie der jeweiligen Aufnahmeverfahren ist in Tabelle 3 aufgeführt.

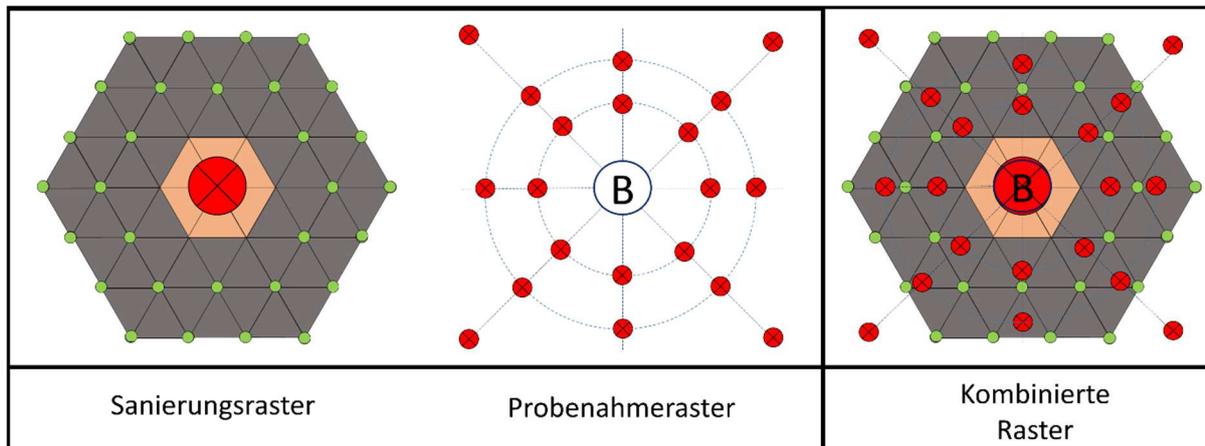


Abbildung 11: Sanierungs- und Untersuchungs raster.

Tabelle 3: Anzahl und Quellen der durchgeführten bodenphysikalischen Untersuchungen.

Parameter	Anzahl der Bäume / Probepunkte				Quelle
	Schluff		Sand		
	2021	2022	2021	2022	
CO <sub>2</sub> -Konzentration	35 / 392	37 / 421	9 / 90	4 / 80	Gaertig (2001); Weltecke und Gaertig (2012)
Luftleitfähigkeit	8 / 160	8 / 160	2 / 56	4 / 80	DIN 19682-9; Ball und Schjønning (2002)
Gasdiffusionskoeffizient	8 / 160	8 / 160	2 / 56	4 / 80	Schack-Kirchner (1994)
pf-Kurve	8 / 160	8 / 160	2 / 56	4 / 80	Blume (2010); VDLUFA (2016), Stahr et al. (2020)
Lagerungsdichte	8 / 160	8 / 160	2 / 56	4 / 80	Hartge and Horn (2020); VDLUFA (2016)
Feststoffvolumen	8 / 160	8 / 160	2 / 56	4 / 80	DIN 19683
Gesamtporenvolumen	8 / 160	8 / 160	2 / 56	4 / 80	Hartge and Horn (2020); VDLUFA (2016)
Luftkapazität	8 / 160	8 / 160	2 / 56	4 / 80	Hartge and Horn (2020); VDLUFA (2016)
Wassergehalt (grav. und vol.)	8 / 160	8 / 160	2 / 56	4 / 80	Stahr et al. (2020); VDLUFA (2016)
Regenwürmer	8 / 3	8 / 3	2 / 3	2 / 3	Fründ und Jordan (2003); Krück (2018)
Wurzeldichte	4 Profile je 0,4 m <sup>2</sup> Profilwand	4 Profile je 0,4 m <sup>2</sup> Profilwand	NA	2 Profile je 0,3 m <sup>2</sup>	Böhm (1979) (Profilwandmethode)

#### 8.4.3.4 Baumphysiologische Parameter

An 72 Bäumen in Essen und 18 Bäume in Bad Arolsen wurden über einen Zeitraum von zwei Jahren folgende baumphysiologischen Parameter erfasst: Baumhöhe, Baumumfang, Dämmerungswasserpotenzial sowie spezifische Blattfläche gemäß Pérez-Harguindeguy et al. (2016).

Darüber hinaus wurden weitere baumphysiologische Parameter wie Kronenvolumen, Kronenlänge, Baumhöhe und Baumumfang anhand der in Kapitel 8.2.4 und Kapitel 8.3.1 beschriebenen Laserscanneraufnahmen ermittelt (Seidel, 2018).

#### 8.4.3.5 Räumliche Verteilung des Stützgranulats

Im Rahmen einer Bachelorarbeit wurde untersucht, wie sich das Stützgranulat bei einer Druckluftlanzensanierung im Boden verteilt. Dafür wurden im Forstbotanischen Garten in Göttingen auf einer Fläche von 3 x 3 m rasterförmig 9 Druckluftinjektionen bis 30 cm Tiefe durchgeführt. In 6 von 9 Löchern wurde in zwei Tiefenstufen (etwa in 15 und 30 cm Tiefe) belüftet, wobei die Lanze jeweils um 90° gedreht wurde. In zwei Löchern wurde nur einmal in 30 cm Tiefe belüftet und in einem Referenzloch wurde nur die Lanze eingeführt, aber nicht belüftet. Bei den Druckluftinjektionen wurden jeweils 300 ml Stützgranulat verblasen (TE30K von terra fit GmbH, Maroldsweisach), welches zur besseren Auffindbarkeit im Boden vorab mit Forstmarkierspray orange eingefärbt wurde.

Um die Lage des Granulats nach der Sanierungsmaßnahme aufzunehmen, wurde beginnend in 50 cm Entfernung von der ersten Injektionsreihe in 10-cm Schritten auf der gesamten Fläche Bodenprofile bis ein Meter Tiefe manuell abgetragen. Die Profilwände wurden mit UV-Licht angestrahlt, um das Granulat besser sichtbar zu machen und dann in festen Rastern abfotografiert. An jedem Foto wurde mit Hilfe des Bildanalyseprogramm ImageJ Fuji die Flächen mit Granulat in Quadratzentimeter bestimmt (Abbildung 12 und Abbildung 13).

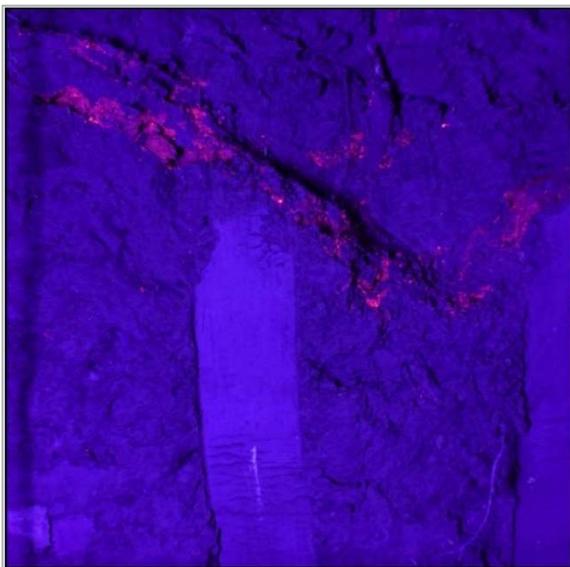


Abbildung 12: Foto eines Abschnitts aus einem Bodenprofil. Rote Flächen zeigen markiertes Stützgranulat.

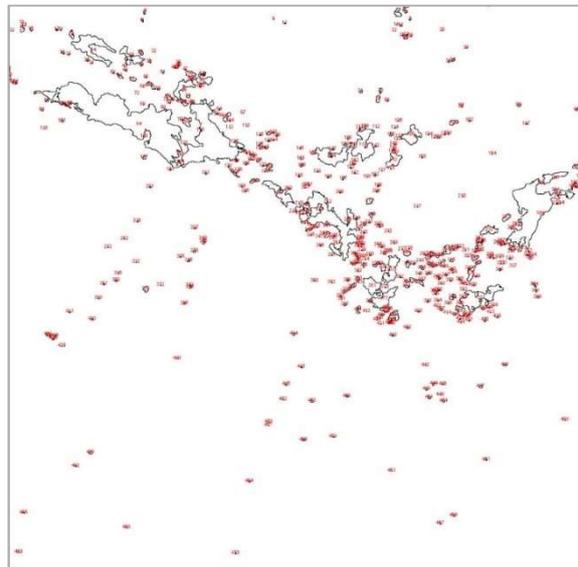


Abbildung 13: Mit dem Bildanalyseprogramm ImageJ Fuji markierte Granulatflächen.

## 8.4.4 Phytomelioration

### 8.4.4.1 Flächenvorbereitung

Auf den Untersuchungsstandorten wurden je nach örtlichen Gegebenheiten unterschiedlich große Versuchsflächen eingerichtet (Tabelle 5). Die Versuchsflächen wurden wie folgt vorbereitet:

Auf der Versuchsfläche in Essen wurde die vorhandene Vegetation flach abgemäht und zweimal vertikutiert, um den Konkurrenzdruck durch die vorhandene Vegetation zu minimieren. Auf der Versuchsfläche in Langenhagen war keine Vegetation vorhanden. Hier wurde der blanke Boden mit einer Harke etwas aufgeraut, um den Kapillarbruch zwischen Saatbett und Boden zu minimieren. Auf der Streuobstwiese in Göttingen wurde der Boden ca. 5 cm tief gefräst, um die Konkurrenzvegetation zu entfernen. Dies war möglich, weil sich die Versuchsflächen nicht im Wurzelbereich der Obstbäume befanden.

In Essen und in Langenhagen wurden anschließend 2–3 cm Mutterboden als Saatbett aufgetragen (Langenhagen: mittel humoser schluffiger Sand (Su3); Essen: mittel humoser schluffig lehmiger Sand (Slu)). Auf der Versuchsfläche in Göttingen wurde hierauf verzichtet, da seitens der Eigentümer kein Nährstoffeintrag erwünscht war.

Auf die so vorbereitete Fläche wurde Anfang Mai 2021 eine Saatmischung ausgebracht, die explizit für den Versuch von Feldsaaten Freudenberger GmbH & Co. KG (Krefeld) zusammengestellt wurde. Die Zusammenstellung der Mischung wird in Tabelle 4 angegeben. Auf jeder Fläche wurden mit einem manuellen Saatstreuer 4 g/m<sup>2</sup> Saat ausgesät und diese mit einer Rasenwalze leicht angedrückt. Eine Bewässerung der aufkeimenden Saat musste aufgrund der feuchten Witterung im Jahr 2021 nicht erfolgen.

In unmittelbarer Umgebung der Untersuchungsflächen wurden Bodenprofile auf Referenzflächen erstellt. In Essen und Göttingen waren dies Flächen mit der natürlich vorhandenen Vegetation, bei denen keine weiteren Maßnahmen getroffen worden sind. In Langenhagen wurde eine Referenzfläche eingezäunt, damit diese nicht weiter befahren werden konnte, und mit 2–3 cm Mutterboden abgedeckt.

In Göttingen wurde die Saatfläche eine Vegetationsperiode lang im Rahmen einer Bachelorarbeit beobachtet (Gerdes 2022), in Langenhagen und Essen zwei Jahre lang.

Tabelle 4: Zusammensetzung der verwendeten Saatmischung von Feldsaaten Freudenberger GmbH & Co. KG (Krefeld).

Deutscher Name	Wissenschaftlicher Name	Gewichtsanteile in %
Luzerne (PLATO)	<i>Medicago sativa</i>	5
Rotklee (MERULA)	<i>Trifolium pratense</i>	3
Gelbklee	<i>Medicago lupulina</i>	2
Gelber Steinklee	<i>Melilotus officinalis</i>	3
Weißer Steinklee	<i>Melilotus albus</i>	3
Weißklee (JURA)	<i>Trifolium repens</i>	1,5
Esparssette (SARZENS)	<i>Onobrychis viciifolia</i>	5
Gew. Natternkopf	<i>Echium vulgare</i>	1
Gew. Leimkraut	<i>Silene vulgaris</i>	1
Wilde Malve	<i>Malva sylvestris</i>	2
Blaue Bitterlupine (ESKUBLUE)	<i>Lupinus angustifolius</i>	15
Gelbe Lupine (MISTER)	<i>Lupinus luteus</i>	10
Leindotter	<i>Camelina sativa</i>	2
Pannonische Wicke	<i>Vicia pannonica</i>	7
Bienenfreund (BALO)	<i>Phacelia</i>	5

Sonnenblume (PEREDOVIC)	<i>Helianthus annuus</i>	5
Ölrettich (STRUKTURATOR)	<i>Raphanus sativus</i>	6
Wilde Möhre	<i>Daucus carota</i>	2
Rohrglanzgras (BREST)	<i>Phalaris aruncinacea</i>	5
Färberwaid	<i>Iratis tinctoria</i>	1
Färberkamille	<i>Anthemis tinctoria</i>	1,5
Gemeines Leinkraut	<i>Linaria vulgaris</i>	1
Gemeine Nachtkerze	<i>Oenothera biennis</i>	1
Großblütige Königskerze	<i>Verbascum densiflorum</i>	0,5
Mehlige Königskerze	<i>Verbascum lychnitis</i>	0,5
Zypressenwolfsmilch	<i>Euphorbia cyparissias</i>	1
Gemeine Wegwarte	<i>Cichorium intybus</i>	3
Rohrschwengel (HYKOR)	<i>Festuca arundinace</i>	4
Knaulgras (TREPOSNO)	<i>Dactylis glomerata</i>	3

#### 8.4.4.2 Aufnahmen

Im Jahr der Saatausbringung (2021), und bei den Flächen in Essen und Langenhagen zusätzlich im Jahr 2022, wurde jeweils Ende Juli bis Ende August der Deckungsgrad der einzelnen Arten nach Braun-Blanquet aufgenommen (Wilmanns 1989). Dies ist die Bodenfläche, die von den Pflanzen überdeckt wird. Die Aufnahme erfolgte in einem Untersuchungsrahmen von 100 x 60 cm Seitenlänge (0,6 m<sup>2</sup>) mit Parzellen von 5 x 4 cm in Langenhagen und Essen sowie 4 x 4 cm in Göttingen. Da die Pflanzen sich zum Teil überlappten, überschritt die Summe der einzelnen Deckungsgrade häufig 100 %. Die Anzahl der Messwiederholungen bei den einzelnen Varianten ist Tabelle 3 zu entnehmen.

Die Durchwurzelung wurde durch Zählung der Wurzelspitzen an Bodenprofilwänden bestimmt. Für die Aufnahmen wurden dieselben Zählrahmen verwendet, die für die Erhebung des Deckungsgrads zum Einsatz gekommen sind. Pro Parzelle wurde die Anzahl der Wurzelspitzen gezählt und auf Quadratdezimeter hochgerechnet. Dabei wurde nach Möglichkeit aufgrund ihrer Optik zwischen Wurzeln von Bäumen und Kräutern unterschieden. Tabelle 5 gibt die Anzahl und Dimension der Profilwände an den einzelnen Untersuchungsflächen an.

Tabelle 5: Anzahl und Größe der Versuchsflächen, Aufnahmeflächen und Profilwände an den Versuchsstandorten.

	Langenhagen		Essen		Göttingen	
	Versuchsfläche	Referenz	Versuchsfläche	Referenz	Versuchsfläche	Referenz
Anzahl der Versuchsflächen	2	1	1	1	4	2
Größe der Versuchsflächen	12 x 15 m (180 m <sup>2</sup> ) 12 x 7 m (84 m <sup>2</sup> )		15 x 25 m (375 m <sup>2</sup> )		3 x 4 m (12 m <sup>2</sup> )	
Anzahl der Aufnahmen des Deckungsgrads	10	1	12	–	8	2
Anzahl Profilwände	5	3	4	4	4	2
Länge x Tiefe der Bodenprofile	alle 1,5 x 1,0 m	alle 1,5 x 1,0 m	1,0 x 0,88 m 1,5 x 0,8 m 1,5 x 0,88 m 0,5 x 48 m	1,0 x 1,0 m 1,5 x 0,8 m 1,5 x 0,8 m 0,5 x 0,6 m	1,0 x 0,5 m	1 x 0,5 m

## 9 ERGEBNISSE

### 9.1 Mobiles CO<sub>2</sub>-Messgerät

Abbildung 14 zeigt den Zusammenhang zwischen den Messergebnissen des Gaschromatographen und des CO<sub>2</sub>-Messgeräts auf Infrarotbasis. Die nahezu perfekte 1:1 Linie mit einer Steigung von 0,97 und einem  $r^2=0,999$  zeigt, dass beide Geräte unter Laborbedingungen gleich gut die unterschiedlich hohen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in den Prüfsäcken gemessen haben.

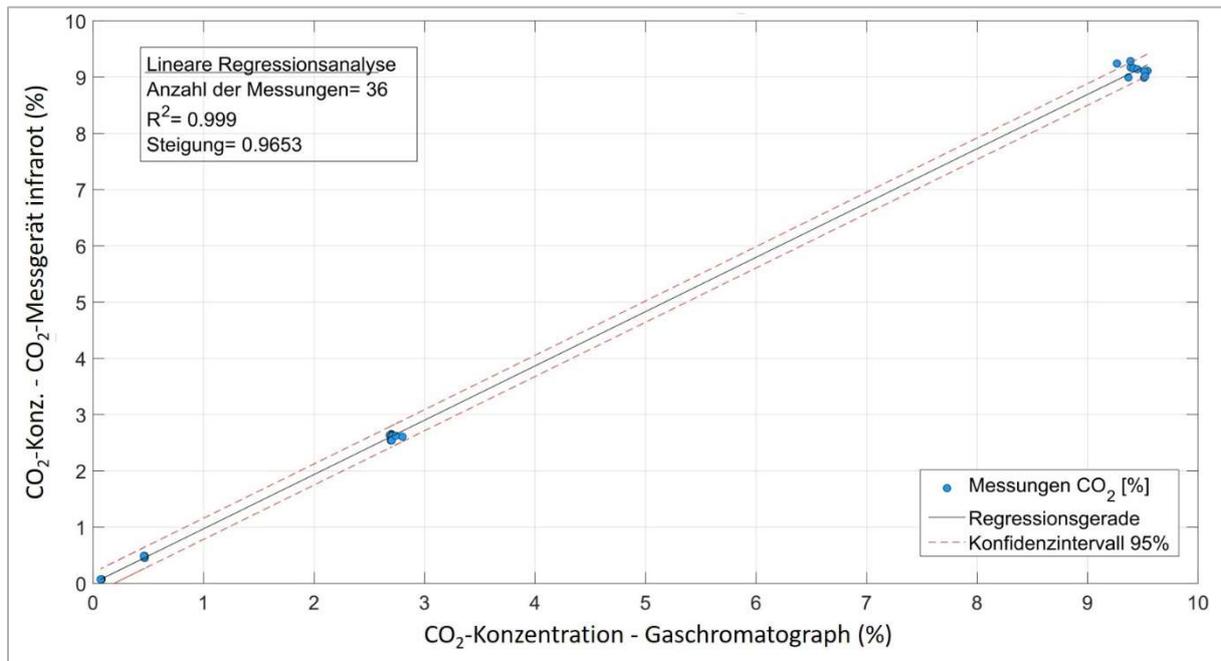


Abbildung 14: Von dem Gaschromatographen und dem neuen CO<sub>2</sub>-Messgerät mit Infrarot-Sensor gemessene CO<sub>2</sub>-Konzentrationen der vier Prüfgase im Labor.

Auf der unverdichteten Versuchsfläche im Gelände liegen die mittleren CO<sub>2</sub>-Konzentrationen der Bodenluft knapp unter 0,3%. Die Box-Whisker-Plots zeigen nahezu identische Werte des Gaschromatographen und der beiden CO<sub>2</sub>-Messgeräte mit Infrarotsensor (Abbildung 15). Entsprechend konnten mit dem Dunn-Test auch keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden.

Auf der verdichteten Versuchsfläche im Freiland liegen die mittleren CO<sub>2</sub>-Konzentrationen durchweg um den Faktor 10 höher als auf der unverdichteten Fläche. Jedoch unterscheiden sich hier die von dem Gaschromatographen gemessenen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen signifikant von den mit den CO<sub>2</sub>-Messgeräten mit Infrarotsensor gemessenen Konzentrationen. Die beiden letztgenannten Messgeräte unterscheiden sich wiederum nicht signifikant voneinander (Abbildung 16).

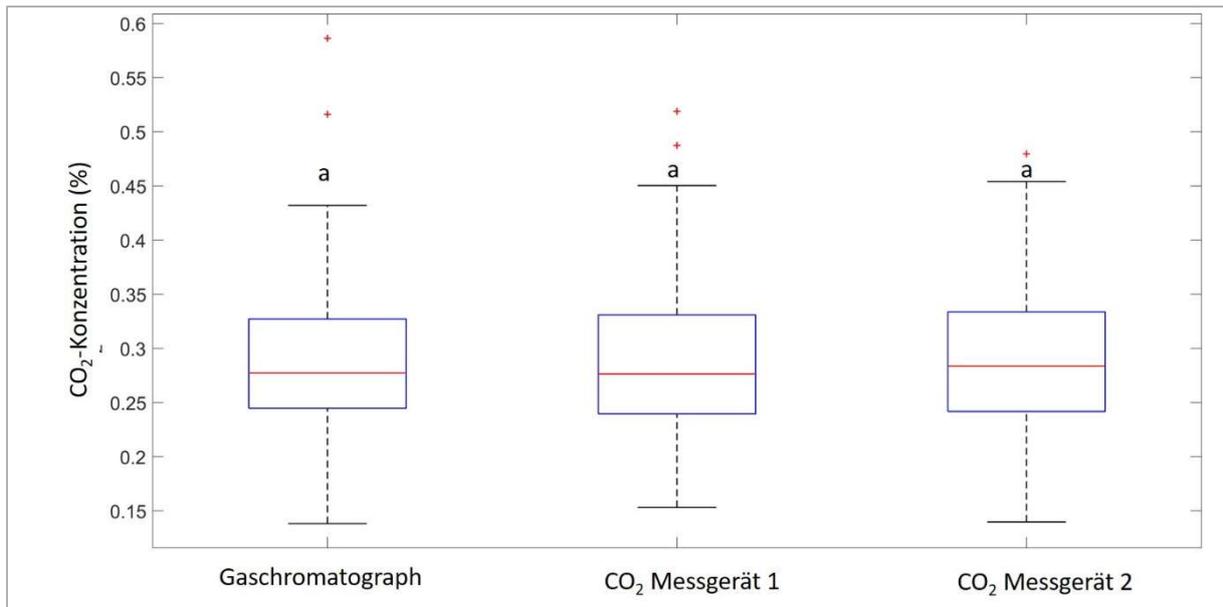


Abbildung 15: Mit dem Gaschromatographen (links) und den beiden CO<sub>2</sub>-Messgeräten mit Infrarot-Sensor gemessenen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen auf der unverdichteten Fläche. Gleiche Buchstaben (a) zeigen, dass keine signifikanten Unterschiede vorliegen (Dunn test  $p < 0,05$ ).

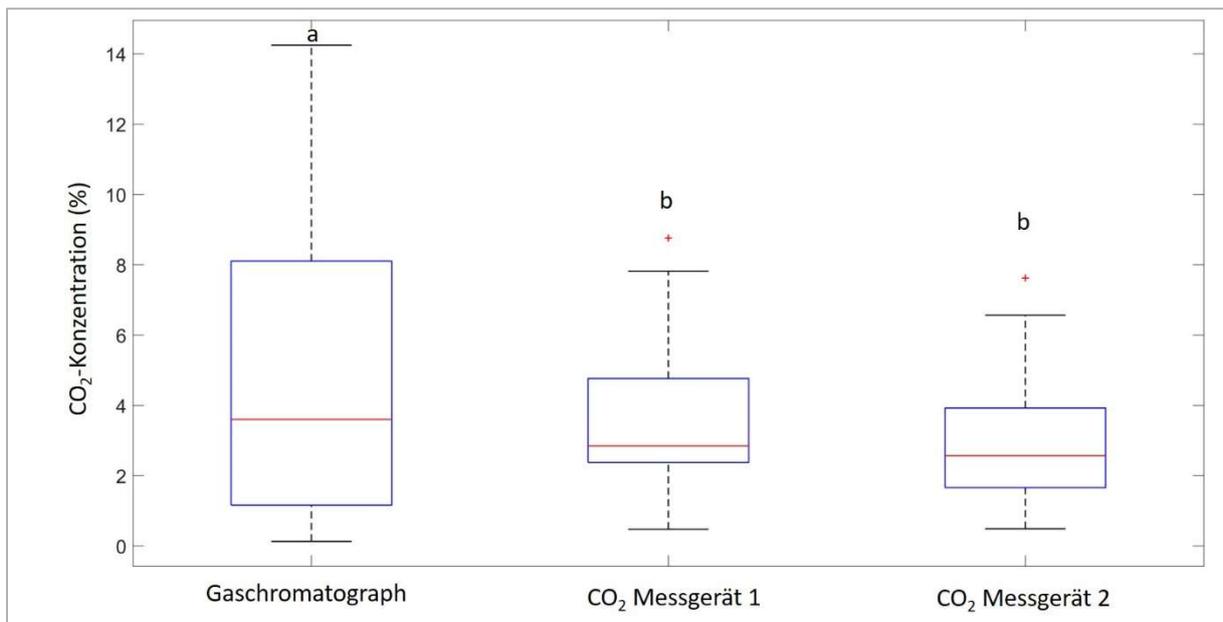


Abbildung 16: Mit dem Gaschromatographen (links) und den beiden CO<sub>2</sub>-Messgeräten mit Infrarot-Sensor gemessenen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen auf der verdichteten Fläche. Unterschiedliche Buchstaben (a, b) verweisen auf signifikante Unterschiede (Dunn test  $p > 0,05$ ).

## 9.2 Belüftungsrohre und Löcher

### 9.2.1 Validierung der Computermodelle

**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** visualisiert exemplarisch die durch COMSOL Multiphysics® modellierte CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Tonne und der Feldvariante „Belüftungsrohr“.

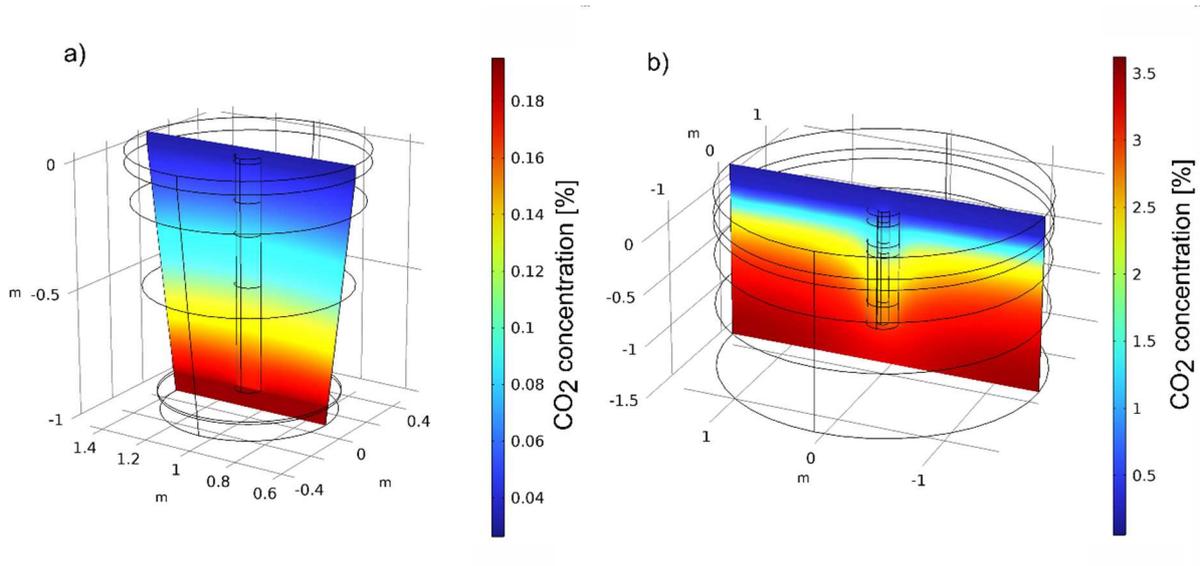


Abbildung 17: Visuelle Darstellung der CO<sub>2</sub>-Konzentration [%] in der Tonne (a) und der Feldvariante mit Belüftungsrohr (b) mittels COMSOL-Multiphysics.

Abbildung 18 stellt grafisch die modellierten und gemessenen CO<sub>2</sub>-konzentrationen in verschiedenen Tiefen in der Tonne gegenüber. Dabei zeigt sich eine gute Übereinstimmung zwischen den gemessenen und modellierten CO<sub>2</sub>-Konzentrationen im mittleren und oberen Teil der Tonne. In einer Tiefe von -0,8 m ist die gemessene CO<sub>2</sub>-Konzentration allerdings im Sand etwa 0,5 % höher als die modellierte Konzentration. Während die gemessenen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen mit zunehmendem Abstand zum Belüftungsrohr leicht ansteigen, bleiben die modellierten CO<sub>2</sub>-Konzentrationen relativ konstant bzw. nehmen mit zunehmendem Abstand zum Belüftungsrohr sogar ganz leicht ab.

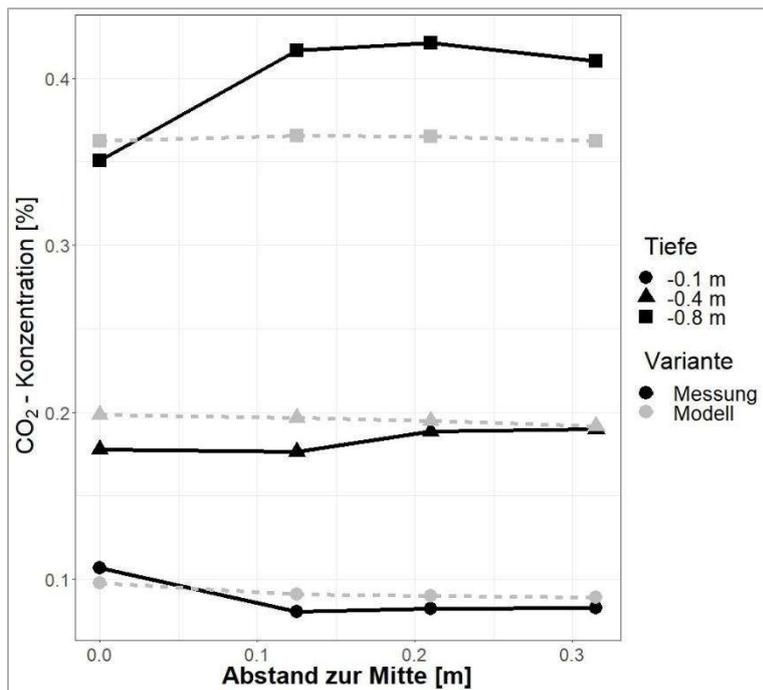


Abbildung 18: Gemessene und modellierte CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Tonne an verschiedenen Messpunkten.

Bei der Feld-Variante "Belüftungsloch mit Substrat" stimmen die modellierten Daten in den tieferliegenden Bereichen eng mit den gemessenen Daten überein. Beide Datensätze zeigen eine Zunahme der CO<sub>2</sub>-Konzentration mit der Tiefe und einen leichten Anstieg mit der Entfernung vom Belüftungsloch. Der Einfluss des Belüftungslochs ist jedoch bei den gemessenen Daten etwas stärker ausgeprägt als im Modell (Abbildung 19).

Im Falle der Variante "Belüftungsrohr" ist die Übereinstimmung zwischen gemessenen und modellierten Daten etwas schlechter. Während die CO<sub>2</sub>-Konzentration des Modells mit dem Abstand zum Belüftungsrohr zunimmt, nimmt die gemessene CO<sub>2</sub>-Konzentration ab einem Abstand von 0,3 m zum Zentrum ab (z. B. -0,46 m) oder folgt keinem Trend (z. B. -0,26 m) (Abbildung 19).

Bemerkenswert ist auch, dass im Inneren des Rohres (Abstand zum Zentrum: 0 m) die simulierten Werte deutlich höher sind als die in der Realität gemessenen Werte. Offensichtlich ist die Belüftung innerhalb der Rohre in der Realität effektiver als im Modell dargestellt. Dennoch setzt sich dieser Belüftungseffekt im Rohr quasi nicht in den Bodenkörper fort. Dies zeigt sich an dem deutlichen Anstieg der gemessenen CO<sub>2</sub>-Konzentration von 0 m auf 0,2 m Abstand vom Zentrum, gefolgt von einem weiteren leichten Anstieg mit zunehmendem Abstand. Insgesamt scheint der Einfluss der Belüftungsrohre und Löcher auf den Bodengashaushalt der Versuchsfläche sehr gering zu sein.

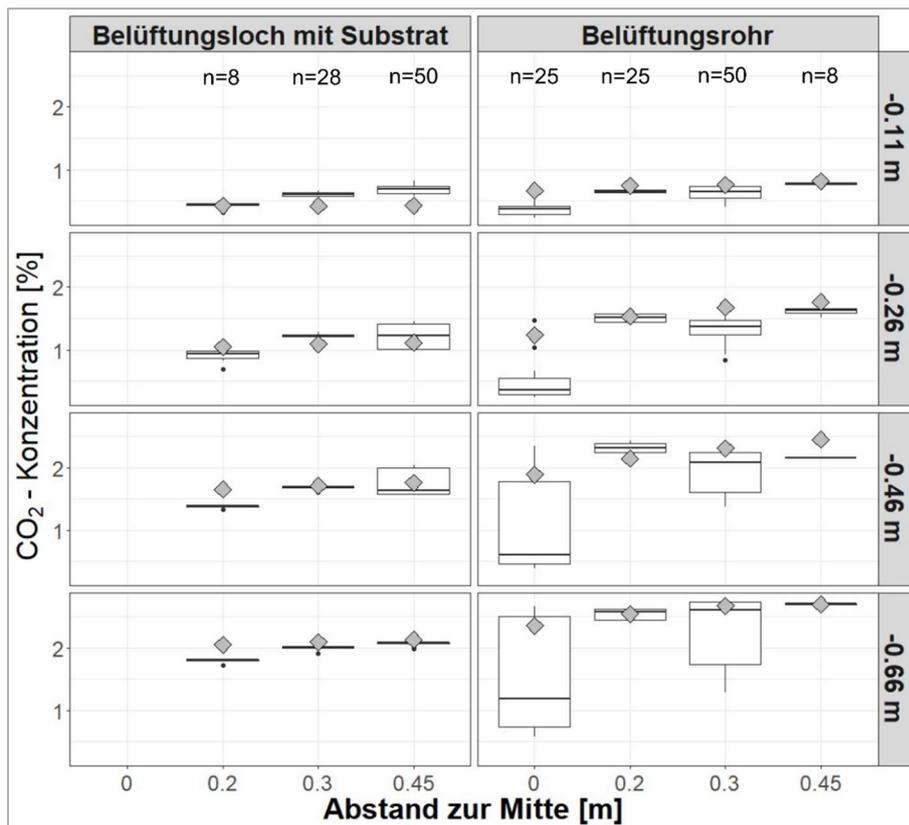


Abbildung 19: Gemessene und modellierte CO<sub>2</sub>-Konzentrationen des Feldversuchs. Die Box-Whisker-Plots stellen die in-situ gemessenen Daten dar, die grauen Rauten zeigen die modellierten Werte.

### 9.2.2 Optimale Porosität von Belüftungsrohren

Die Effektivität von Belüftungsrohren wird unter anderem von der Porosität der Rohrwand beeinflusst. Da die Öffnungen in der Rohrwand keine Krümmungen, also keine Tortuosität, wie die Poren im Boden aufweisen, ist der Tortuositätsfaktor  $\gamma$  gleich 1. Folglich hängt die Gasdurchlässigkeit der Rohrwand nur vom Gasdiffusionskoeffizienten  $D_0$  und der Porosität der Rohrwand  $\epsilon$  ab. Mit Hilfe der Gleichung 5 (Kapitel 7) kann die notwendige Porosität der Rohrwand hergeleitet werden, um eine Gasdurchlässigkeit der Rohrwand zu erreichen, die mindestens der des Bodens entspricht.

Eine sehr hohe Porosität des Bodens von 0,3, die z. B. durch die Verwendung von grobem Kies erreicht werden kann, führt gemäß Gleichung 5 zu einem Gasdiffusionskoeffizienten von 0,067. Folglich muss die Porosität der Rohrwand mindestens  $\epsilon = (D_s/D_0) \cdot \gamma = 0,067 \cdot 1 = 0,067$  betragen, damit die Rohrwand nicht zu einem Engpass für die Bodenbelüftung wird. Das verwendete Belüftungsrohr weist mit einer Porosität von 0,092 eine höhere Gasdurchlässigkeit als dieser Boden auf und kann somit rein rechnerisch zu einer Entlüftung des Bodens beitragen.

In den untersuchten Beispielen beträgt die Porosität des Unterbodens 0,15, was nach Gleichung 5 zu einem Gasdiffusionskoeffizienten von 0,02 führt. Entsprechend muss die Rohrwand eine Porosität von 0,02 aufweisen. Eine höhere Porosität verbessert die Diffusionsfähigkeit des Rohres und damit die Bodenbelüftung nicht. Abbildung 20 zeigt allerdings, dass schon eine Porosität der Rohrwand von 0,01 nicht mehr zu einer besseren Bodenbelüftung beiträgt.

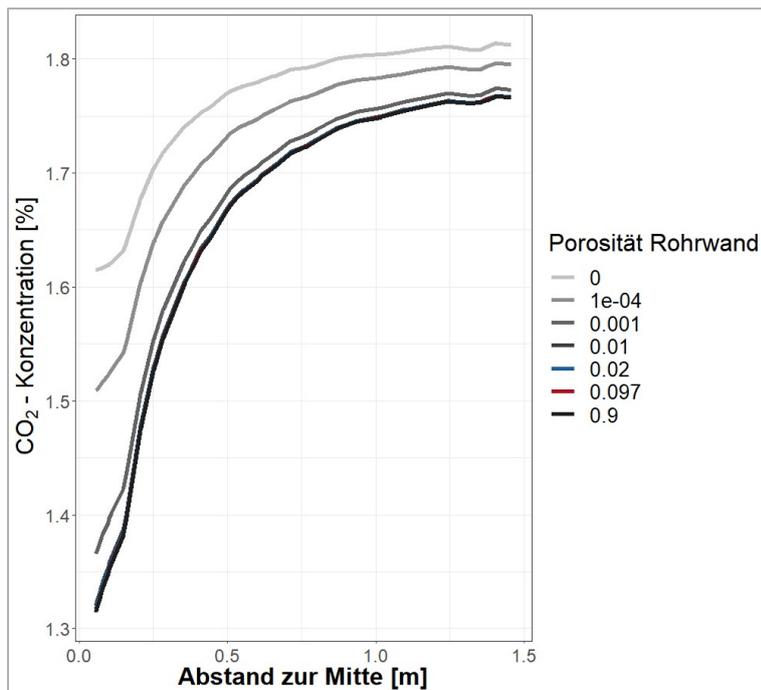


Abbildung 20: Einfluss der Porosität der Rohrwand auf die CO<sub>2</sub>-Konzentration im Boden. Eine Porosität von 0,02 (blau) entspricht der Gasdiffusivität des untersuchten Bodens. Die Porosität der in den Versuchen verwendeten Rohre betrug 0,092 (rot). Die Linien für Porositäten der Rohrwand >0,01 überlappen sich und sind daher nicht einzeln sichtbar.

### 9.2.3 Vergleich von Belüftungslöchern und Belüftungsrohren

Um den Effekt von Belüftungslöchern mit und ohne Baumsubstrat sowie von Belüftungsrohren miteinander zu vergleichen, wurden die Modelle der Varianten "Belüftungsrohr" und "Belüftungsloch mit Baumsubstrat" in Bezug auf die Respirationsrate aneinander angepasst. Zusätzlich wurde die Porosität des Belüftungslochs verändert, um verschiedene Gasdurchlässigkeiten des Belüftungslochs zu simulieren: Für die Variante "Belüftungsloch ohne Baumsubstrat" wurde sie auf 1,0 gesetzt, für die Variante "Belüftungsloch mit Baumsubstrat" wurde sie entsprechend der Ausgangssituation bei 0,3 belassen.

Die Computersimulationen zeigen, dass die Bodenbelüftung bei der Variante "Belüftungsloch ohne Baumsubstrat" am effektivsten ist, gefolgt von der Variante "Belüftungsrohr". Am geringsten ist der Effekt bei der Variante "Belüftungsloch mit Baumsubstrat". Die Unterschiede zwischen den Varianten "Belüftungsrohr" und "Belüftungsloch mit Baumsubstrat" sind jedoch minimal, sofern eine hohe luftgefüllte Porosität des Substrats gewährleistet werden kann (Abbildung 21).

Die Tatsache, dass die Belüftung bei der Variante "Belüftungsloch ohne Baumsubstrat" etwas besser ist als bei der Variante "Belüftungsrohr", ist darauf zurückzuführen, dass bei ersterer der gesamte Durchmesser von 30 cm mit Luft gefüllt ist, während bei letzterer nur das Innere des Rohrs mit Luft gefüllt ist und das Rohr von einer Kiesbettung (Porosität 0,3) ummantelt ist. Dies zeigt zusätzlich, dass die Bodenbelüftung umso effektiver ist, je größer der Durchmesser des Lochs oder des Rohrs ist.

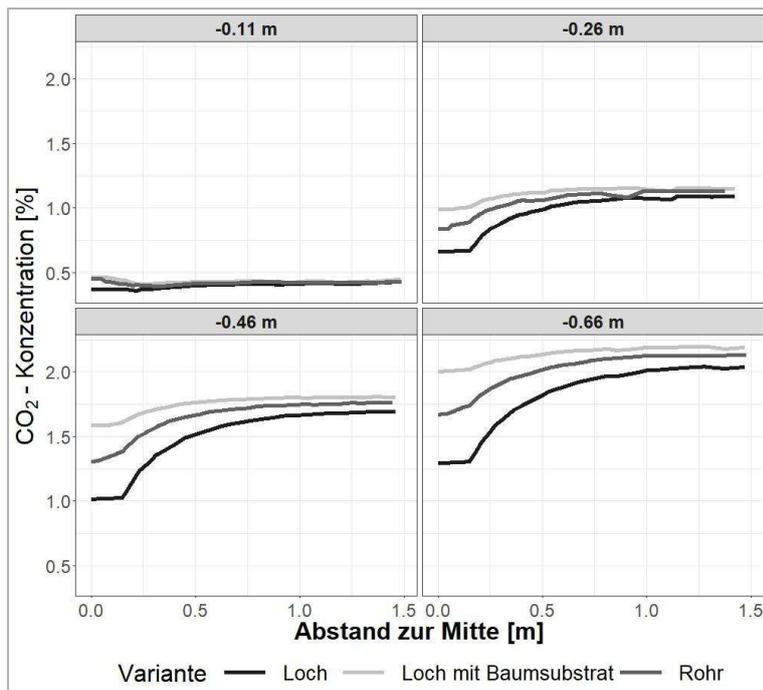


Abbildung 21: Vergleich der modellierten CO<sub>2</sub>-Konzentration im Boden zwischen den Varianten "Belüftungsloch ohne Baumsubstrat=Loch" (Porosität = 1), "Belüftungsloch mit Baumsubstrat" (Porosität = 0,3) und "Belüftungsrohr" (Porosität der Rohrwand = 0,092) in vier verschiedenen Tiefen.

#### 9.2.4 Effekt von Belüftungseinrichtungen auf unterschiedlich poröse Böden

Grundsätzlich verbessert ein Belüftungsloch oder ein Belüftungsrohr die Bodenbelüftung, solange die Diffusivität des Bodens geringer ist als die des Lochs oder Rohrs. Abbildung 22 zeigt jedoch, dass die Wirksamkeit solcher Belüftungseinrichtungen mit zunehmender Bodenporosität exponentiell abnimmt. Während bei sehr niedrigen Porositäten des Bodens (0,03 bis 0,1) noch ein nennenswerter Einfluss auf die CO<sub>2</sub>-Konzentration im Boden bis zu einem Abstand zur Belüftungseinrichtung von etwa 0,75 m zu beobachten ist, ist der Einfluss bei Porositäten > 0,15 auch in unmittelbarer Nähe der Belüftungseinrichtung vernachlässigbar.

Beim Vergleich der beiden Varianten "Belüftungsrohr" und "Belüftungsloch mit Baumsubstrat" wird deutlich, dass die Variante "Belüftungsrohr" im Vergleich zur Variante "Belüftungsloch mit Baumsubstrat" einen leicht höheren Effekt auf die Bodenbelüftung hat, je geringer die Porosität des Bodens ist.

Nichtsdestotrotz verdeutlicht diese Grafik, dass die CO<sub>2</sub>-Konzentration in Böden mit geringer Porosität auch in unmittelbarer Nähe der Belüftungseinrichtung höher als in Böden mit hoher Porosität. Das heißt eine Belüftungsrohr oder Loch kann eine unzureichende Bodenbelüftung aufgrund geringer Porosität auch in deren unmittelbarer Nähe nicht vollständig beheben.

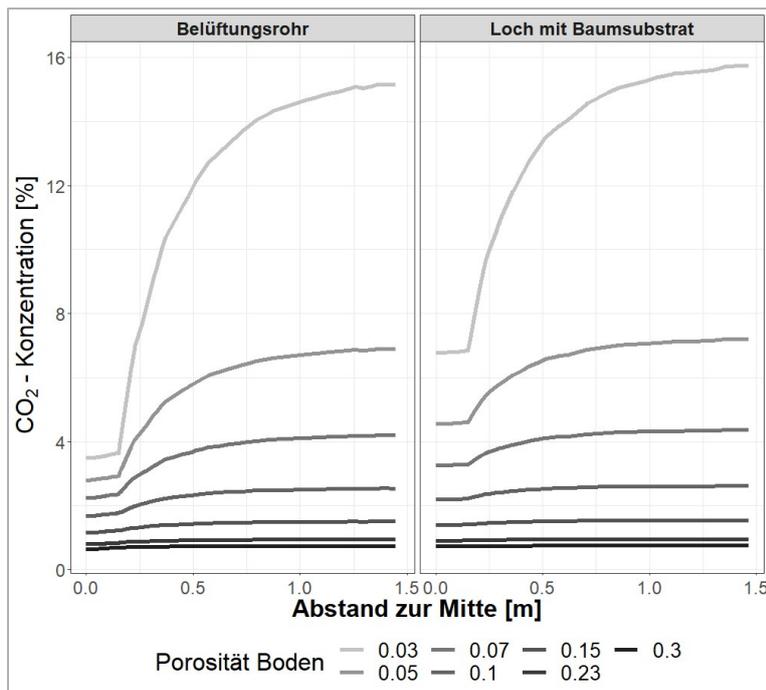


Abbildung 22: Vergleich der modellierten CO<sub>2</sub>-Konzentration im Boden für verschiedene Porositäten des Unterbodens in einer Tiefe von -0,46 m für die Varianten "Belüftungsloch mit Baumsubstrat" und "Belüftungsrrohr".

### 9.2.5 Effekt von Belüftungsrohren auf versiegelte Böden

Um den Effekt eines Belüftungsrohrs auf den Bodengashaushalt versiegelter Böden zu untersuchen, wurde in dem Laborexperiment die Oberfläche der Tonne versiegelt. Abbildung 23 zeigt, dass sich sowohl die gemessenen als auch die modellierten CO<sub>2</sub>-Konzentrationen im Boden in allen Tiefen der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Luftkammer unterhalb des Bodens annähern (~2,0 %). Die einzigen Ausnahmen traten direkt innerhalb des Belüftungsrohrs auf, wo die gemessenen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen deutlich niedriger waren. In einer Tiefe von -0,1 m war die modellierte CO<sub>2</sub>-Konzentration im Inneren des Rohrs ebenfalls sehr niedrig.

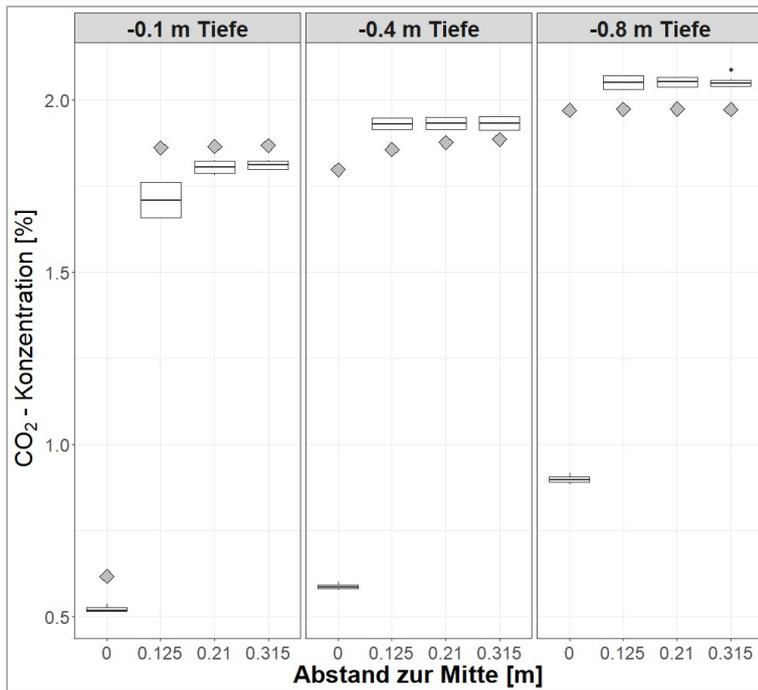


Abbildung 23: Gemessene und modellierte CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in der oberflächlich versiegelten Tonne. Die Anzahl der Messwiederholungen ist jeweils n=3.

Im zweiten Schritt wurde der Einfluss eines Belüftungsrohrs auf versiegelte Böden im Feld modelliert. Wie in Abbildung 24 dargestellt, nimmt bei mit Asphalt versiegelten Standorten der Einfluss des Belüftungsrohrs auf die CO<sub>2</sub>-Konzentration im Boden zu, je geringer die Porosität des Bodens ist. Dies entspricht den in Kapitel 9.2.4 vorgestellten Ergebnissen. Wie schon bei den vorherigen Modellierungen festgestellt, nimmt die Wirkung des Belüftungsrohrs mit der Entfernung exponentiell ab. In Böden mit geringem Luftporenvolumen (z. B. Porosität von 0,05) reicht der Einfluss des Belüftungsrohres bis zu einer Entfernung von etwa 1,5 m. In Böden mit höherem Luftporenvolumen (z. B. Porosität von 0,25) reicht der Einfluss dagegen lediglich bis zu einer Entfernung von etwa 1,0 m (Abbildung 24).

Eine zusätzliche Flächenbelüftung mit einer Porosität von 0,3 führt zu einer erheblichen zusätzlichen Abnahme der CO<sub>2</sub>-Konzentration auf der gesamten Fläche (Abbildung 24). Das Tiefenprofil in 1,25 m Entfernung von der Mitte des Belüftungsrohrs zeigt, dass die durch die Flächenbelüftung bewirkte Verringerung der CO<sub>2</sub>-Konzentration über das gesamte Profil hinweg wirksam ist. Die plötzliche Verschiebung der Kurve in einer Tiefe von 0,7 m ist auf eine Änderung der Respirationsrate im Modell zurückzuführen (Abbildung 25).

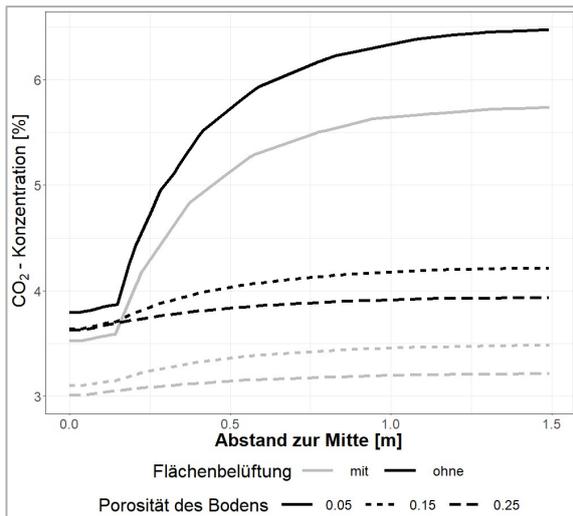


Abbildung 24: CO<sub>2</sub>-Konzentration in 1,0 m Tiefe von asphaltierten Böden mit unterschiedlicher Porosität. Die Darstellung umfasst eine Variante mit und eine ohne Flächenbelüftung.

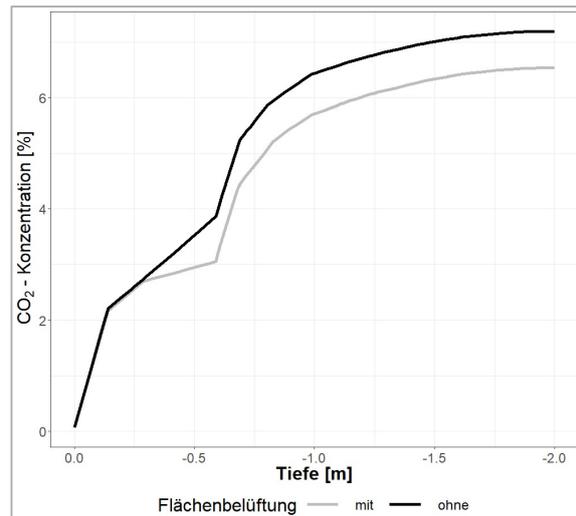


Abbildung 25: CO<sub>2</sub>-Profil von asphaltierten Böden (Porosität des Bodens: 0,05) mit und ohne Flächenbelüftung.

### 9.2.6 Effekt vieler kleiner Belüftungslöcher

In einer weiteren Variante wurde untersucht, welchen Einfluss das Perforieren des Bodens alle 0,25 m mit einem Erdbohrer, wie z. B. einem 'Pürckhauer' (Durchmesser 2,8 cm) bis in eine Tiefe von 0,6 m auf den Bodengashaushalt hat. Die Modellierungen zeigen, dass in der Nähe der Löcher, die nicht mit Granulat gefüllt sind (Porosität = 1), kaum ein Abfall der CO<sub>2</sub>-Konzentration zu verzeichnen ist. Wenn die Bohrlöcher mit Granulat gefüllt sind (Porosität = 0.3 und 0.5), tendiert der Belüftungseffekt trotz hoher Porosität des Granulats gegen Null (Abbildung 26).

In -0,1 m Tiefe ist aufgrund der günstigen Porosität der oberen Bodenschicht (Porosität = 0,26) kein Abfall der CO<sub>2</sub>-Konzentration vorhanden. In den Löchern selbst ist oberflächennah die Konzentration leicht erhöht, in größerer Tiefe hingegen leicht verringert. Das weist auf eine geringe Entgasung des CO<sub>2</sub> in den Löchern hin. Allerdings ist der Effekt im Ganzen sehr gering.

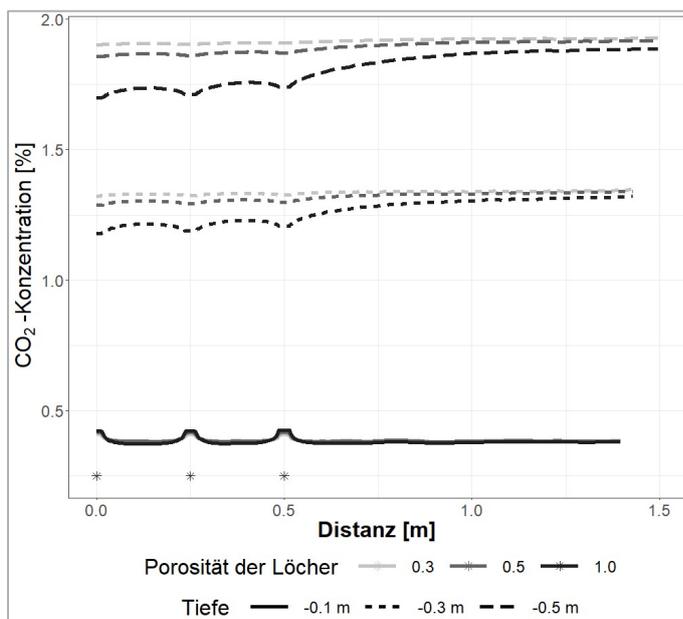


Abbildung 26: CO<sub>2</sub>-Konzentration in einem durch kleine Belüftungslöcher perforierten Boden. Die Löcher sind mit Granulat unterschiedlicher Dichte (Porosität 0,3 und 0,5) oder ohne Füllung (Porosität 1,0) gefüllt. Die CO<sub>2</sub>-Konzentration ist für drei Tiefen angegeben. Die Sternchen (\*) geben die Lage der Belüftungslöcher an.

## 9.3 Druckluftlanzen

### 9.3.1 Vergleich Sanierungsvarianten

#### 9.3.1.1 Bodenhebung

Abbildung 27 visualisiert die Veränderungen der Bodenoberfläche auf der Schlufffläche durch die Anwendung der Sanierungsmethoden D, D+S und D+W. Die Ergebnisse sind in Form von Box-and-Whisker-Plots dargestellt, wobei unterhalb der Abbildung ergänzend die Anzahl der Datenpunkte, die Spannweite der Daten und die untersuchte Flächengröße aus dem digitalen Geländemodell angegeben sind. Die Kombination aus Druckluft und Stützgranulat (D+S) zeigte mit einer durchschnittlichen Anhebung der Bodenoberfläche um ungefähr 8,9 mm die größte Veränderung. Die alleinige Verwendung von Druckluft (D) resultierte in einer etwas niedrigeren Erhebung von 6,1 mm. Im Gegensatz dazu verursachte die Anwendung von Wasser (D+W) die geringste Veränderung der Bodenoberfläche mit einer Erhebung von 2,3 mm.

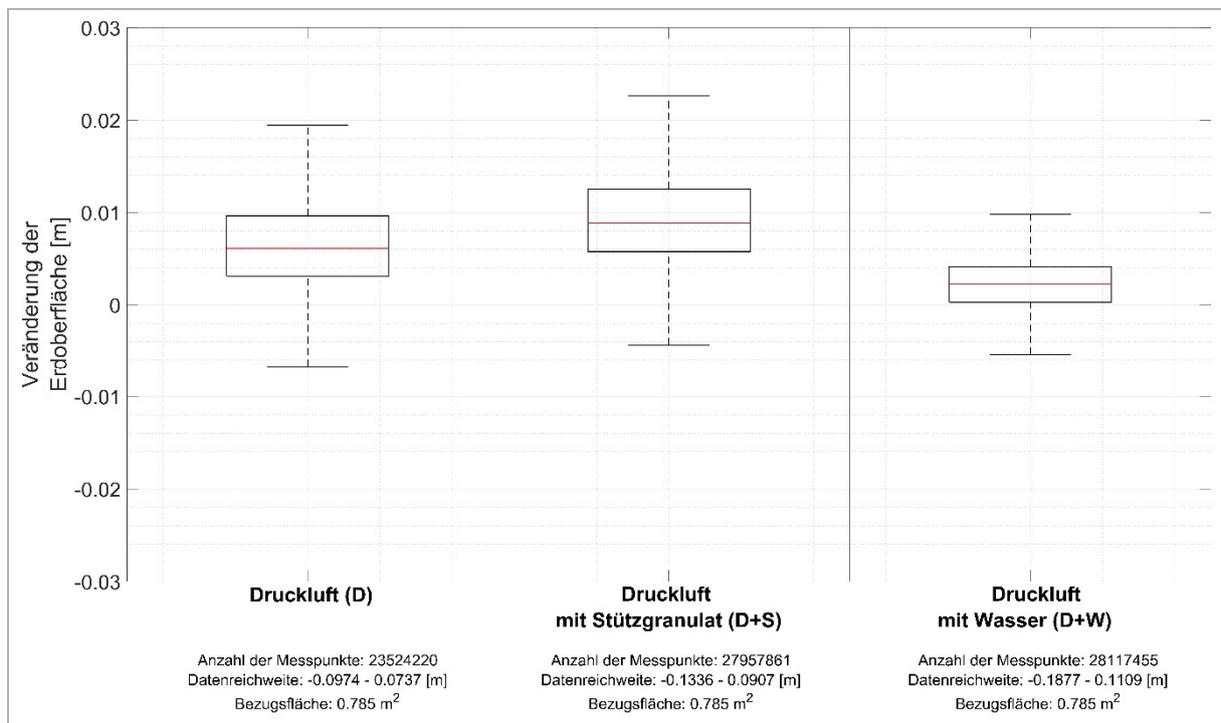


Abbildung 27: Veränderungen der Bodenoberfläche in den verschiedenen Sanierungsvarianten auf der Schlufffläche. Alle Boxplots sind statistisch signifikant voneinander verschieden.

#### 9.3.1.2 Bodenkundliche und baumphysiologische Parameter

Die Aufnahmen zur Bodenphysik und Bodenbiologie im Jahr der Sanierung (2021) zeigen, dass im Oberboden auf der Schlufffläche bei der Variante nur mit Druckluft (D) zwar eine geringfügige aber signifikante Lockerung der Bodenverdichtung und damit Verbesserung der Bodenbelüftung im Vergleich zur Referenz entstanden ist. Gleichzeitig war die Durchwurzelung im Vergleich zur Referenz signifikant erhöht.

Bei der Variante Druckluft mit Stützkorn (D+S) gab es keine signifikante Veränderung zur Referenz und bei der Variante Druckluft mit Wasser (D+W) kam es lediglich zu einer signifikanten Erhöhung der Luftkapazität. Die übrigen Parameter haben keine signifikante Änderung zur Referenz ergeben (Tabelle 6).

Im Oberboden der Sandversuchsfläche in Bad Arolsen waren die Luftkapazität und das Gesamtporenvolumen im Vergleich zur Referenz deutlich erhöht und die Lagerungsdichte leicht, aber signifikant reduziert. Nicht nachvollziehbar ist eine gleichzeitige Abnahme der Luftleitfähigkeit.

In größerer Tiefe gab es bei allen Varianten keine Veränderungen der bodenphysikalischen Parameter.

**Tabelle 6: Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**

	Einheit	Schluff					Sand		
		Anzahl	Ref.	D	D+S	D+W	Anzahl	Ref.	D+S
CO <sub>2</sub>	ppm	391	3402				123	4282	
Luftleitfähigkeit	cm/s	139	3,80				34	3,74	2,15 ▼
Gasdiffusionskoeffizient	-	160	0,07	0,08 ▲			48	0,11	
Lagerungsdichte	g/cm <sup>3</sup>	134	1,38	1,32 ▼			40	1,36	1,24 ▼
Gesamtporenvolumen	Vol. %	134	41,27	46,70 ▲			40	24,00	▲ 46,00 ▲
Luftkapazität	Vol. %	145	14,99	19,02 ▲		19,85 ▲	33	9,10	▲ 20,30 ▲
Regenwürmer Juvenil	N	74	8				45	31	
Regenwürmer adult	N	74	5				45	9	
Regenwürmer gesamt	N	74	13				45	40	
Wurzeln	N /dm <sup>2</sup>	524	0,84	1,17 ▲		1,29 ▲	0	0	
Dämmungswasserpotenzial	Bar	74	-1,56				15	-2,62	

Bei der Baumhöhe und dem Dämmungswasserpotenzial, ein maßgeblicher Parameter zur Quantifizierung von Trockenstress und Vitalität, gab es im Jahr 2021 auf der Schlufffläche keinen signifikanten Unterschied zur Referenzfläche. Lediglich die Durchwurzelung war bei der Variante nur mit Druckluft im Vergleich zur Referenz erhöht (Tabelle 6).

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass im Jahr nach der Sanierung ein positiver Effekt der Bodensanierung bei der Variante mit Druckluft auf der Schlufffläche und bei der Variante Druckluft und Stützgranulat auf der Sandfläche entstanden ist, während die anderen Varianten keinen Effekt hatten. Eine Ad-hoc-Reaktion der Bäume konnte nicht nachgewiesen werden.

## 9.3.2 Nachhaltigkeit der Sanierungswirkung

### 9.3.2.1 Bodenhebung

Die Messungen auf der Tonfläche fanden über einen Zeitraum von fünf aufeinanderfolgenden Tagen, vom 12.03.2021 bis zum 16.03.2021, statt. Ähnlich der Darstellungsweise in Kapitel 9.3.1.1, werden die Bodenoberflächenveränderungen in Metern mittels Box-Whisker-Plots dargestellt. Die durchschnittliche Anhebung der Bodenoberfläche betrug bei der Anwendung mit Stützgranulat und Druckluft (D+S) 5,8 mm und bei der Variante ohne Stützgranulat (D) 4,7 mm. In den folgenden vier Tagen halbierten sich diese Erhebungen, wodurch die Unterschiede zwischen den beiden Sanierungsvarianten nicht mehr signifikant waren; die Anhebung der Bodenoberfläche reduzierte sich auf 2 mm Höhe. Am fünften Tag wurde ein leichter Anstieg der Bodenoberfläche beobachtet: Ohne Stützgranulat auf 2,9 mm und mit Stützgranulat auf 2,5 mm.

Zusätzlich zeigt die Abbildung 28 den Median der Bodenoberflächenanhebung auf der Referenzfläche in Blau. Diese Anhebung zeigt einen ähnlichen Trend wie die Sanierungsflächen, jedoch mit einem kontinuierlichen Abfall unter 0 m über den gesamten Beobachtungszeitraum. Zwischen dem vierten und fünften Tag konnte auf der Referenzfläche eine deutliche Erhöhung der Bodenoberfläche um ca. 3 mm verzeichnet werden. Die Rate, mit der die Oberfläche der Referenzfläche sich bis zum vierten Tag absenkte, war vergleichbar mit der der Messflächen. Der Anstieg vom vierten auf den fünften Tag war jedoch fast doppelt so hoch gegenüber den sanierten Flächen.

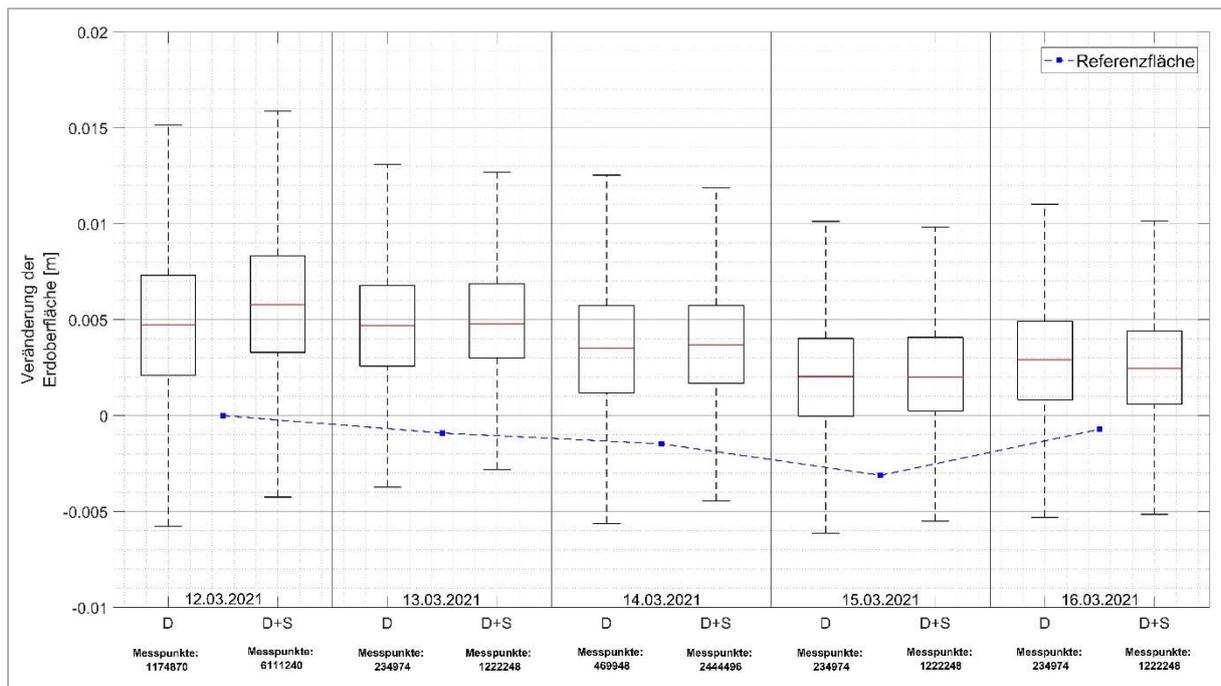


Abbildung 28: Dynamik der Bodenoberfläche auf der Tonfläche für die Sanierungsvarianten D und D+S über fünf Tage. Alle Boxplots sind statistisch signifikant voneinander verschieden.

### 9.3.2.2 Bodenkundliche und baumphysiologische Parameter

Die statistische Auswertung der bodenphysikalischen und bodenbiologischen Parameter ein Jahr nach der Sanierung (2022) zeigt, dass zwar teilweise die Regenwurmdichte zugenommen hat, es ansonsten allerdings keine oder eine geringfügige aber signifikante Verschlechterung der bodenkundlichen Kennwerte gegeben hat (Tabelle 7). Dies zeigt, dass der zumindest in Teil positive Effekt direkt nach der Sanierungsmaßnahme ein Jahr später nicht mehr vorhanden war.

Ebenso wenig gab es ein Jahr nach der Sanierung weder auf der Schluff- noch auf der Sandfläche eine positive Reaktion der Bäume in Bezug auf Baumhöhe, Baumumfang, Dämmerungswaterpotenzial, Boxdimension, Kronenvolumen, Kronenlänge und spezifische Blattfläche. Es gab weder einen signifikanten Unterschied zur Referenzfläche (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) noch zum Vorjahr. Auch im zweiten Jahr nach der Sanierung (2023) wurde kein signifikanter Unterschied bei der Baumhöhe und Baumumfang festgestellt.

Tabelle 7: Auswirkungen der Druckluftplanzensanierungen auf die Bodenphysik und Bodenbiologie ein Jahr nach der Sanierung im Jahr 2022.

Ein Pfeil nach oben bedeutet mit 95 %iger Sicherheit, zwei Pfeile mit 99%iger Sicherheit eine signifikante Anhebung der Werte zur Referenz. Pfeil(e) nach unten zeigen entsprechend signifikante Absenkungen der Werte

zur Referenz an. Grün bedeutet einen positiven Effekt, rot einen negativen und gelb bedeutet keinen signifikanten Unterschied zur Referenz. Bei leeren Feldern liegen keine Daten vor. Varianten: D: Druckluft, D+S Druckluft mit Stützgranulat, D+W: Druckluft mit Wasser.

	Einheit	Schluff					Sand		
		Anzahl	Ref.	D	D+S	D+W	Anzahl	Ref.	VmS
CO <sub>2</sub>	ppm	426	927				158	2414	
Luftleitfähigkeit	cm/s	184	3,90		▼ 2,85 ▼		60	9,53	1,99 ▼
Gasdiffusionskoeffizient	-	196	0,07	▼ 0,06 ▼	▼ 0,06 ▼	▼ 0,06 ▼	80	0,06	
Lagerungsdichte	g/cm <sup>3</sup>	173	1,40	▲ 1,49 ▲			79	1,46	
Gesamtporenvolumen	Vol. %	173	37,10		▼ 28,59 ▼	▼ 30,33 ▼	79	31,45	
Luftkapazität	Vol. %	110	11,4	▼ 10,65 ▼	▼ 6,31 ▼	▼ 8,93 ▼	79	19,00	16,55 ▼
Regenwürmer Juvenil	N	169	3	15 ▲			6	1	
Regenwürmer adult	N	169	2				6	1	
Regenwürmer gesamt	N	169	4	19 ▲		22 ▲	6	2	
Wurzeln	N /dm <sup>2</sup>	509	0,99			1,56 ▲	260	0,82	
Dämmungswasserpotenzial	Bar	74	-4,74				16	4,88	

### 9.3.3 Auswirkungen der Bodenverdichtung auf den Sanierungserfolg (Tonfläche)

Abbildung 29 zeigt die Veränderungen der Bodenoberfläche auf der Tonfläche in Bereichen, die vorab verdichtet wurden (v), im Vergleich zu solchen, die unverdichtet blieben (nv) über einen Messzeitraum von fünf aufeinanderfolgenden Tagen. Die Messungen zeigen, dass die Veränderungen der Erdoberfläche auf den vorverdichteten Messflächen stets größer waren als auf den unverdichteten Bereichen. Anfangs lag die Veränderung der Erdoberfläche bei etwa 3 mm und reduzierte sich in den nicht verdichteten Bereichen bis zum fünften Tag auf 1,6 mm Höhe. In den verdichteten Bereichen sank die Veränderung der Erdoberfläche bis zum vierten Tag von 5,8 mm auf 2,0 mm und danach erfolgte am fünften Tag ein geringfügiger Anstieg auf 2,5 mm. Im Gegensatz dazu fiel in den unverdichteten Bereichen die Erhebung von 2,8 mm auf -0,7 mm ab, bevor sie am fünften Tag wieder auf 0,9 mm anstieg. Diese Entwicklung der Messdaten über den gesamten Zeitraum entspricht der in Abbildung 28 dargestellten Tendenz, mit einer markanten Abnahme der Bodenerhebung am vierten Tag und einem moderaten Anstieg am fünften Tag.

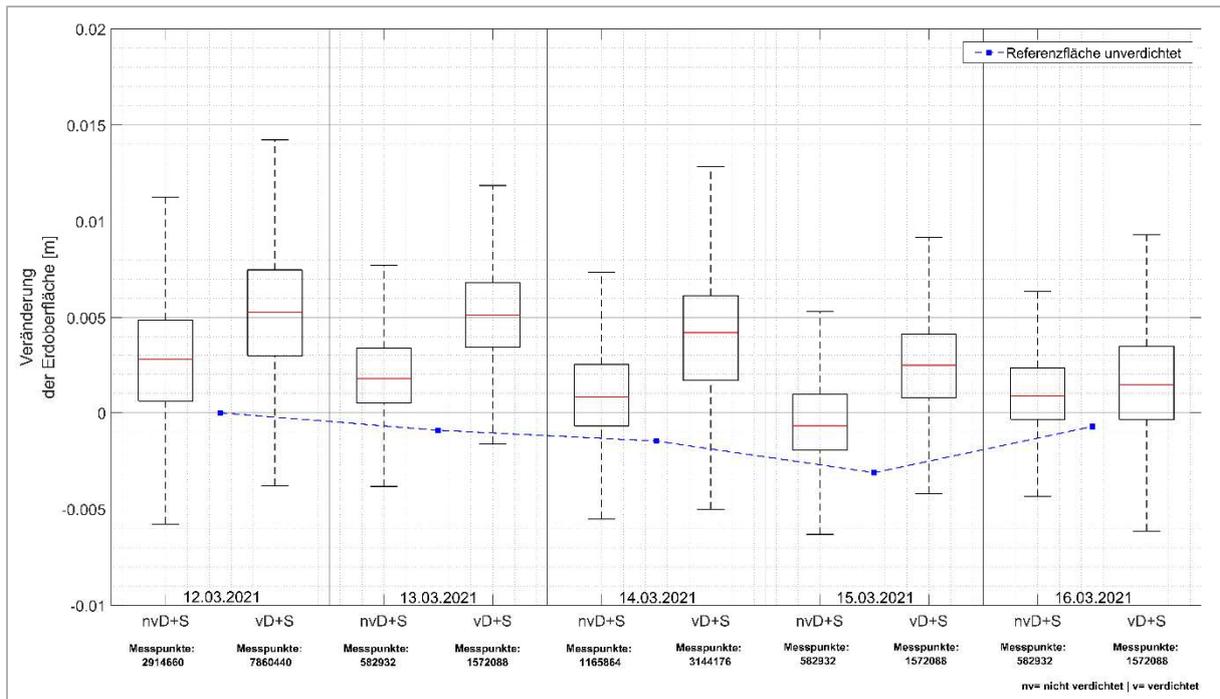


Abbildung 29: Veränderung der Bodenoberfläche für die verdichteten (v) und nicht verdichteten (nv) Messflächen auf der Tonfläche über einen Zeitraum von 5 Tagen. Die blaue Linie zeigt die bewässerte, unverdichtete Referenzfläche. Alle Boxplots sind statistisch signifikant voneinander verschieden.

### 9.3.4 Effektiver Belüftungsradius

#### 9.3.4.1 Vergleich der Sanierungsvarianten (Schlufffläche)

Der obere Teil von Abbildung 30 zeigt die Veränderungen der Bodenoberfläche bei den verschiedenen Sanierungsvarianten auf der Schlufffläche aufgetragen gegen den Abstand vom Belüftungslöcher in 0,1 m Abständen. Bei allen drei Varianten kann mit zunehmender Entfernung vom Belüftungspunkt eine Abnahme der Bodenoberfläche beobachtet werden. Bei der Variante ohne Stützkorn zeigt sich in einem Abstand von 0,05 m vom Belüftungspunkt eine Erhebung der Bodenoberfläche von 15,5 mm. Die Variante mit Stützkorn dagegen zeigt bei gleichem Abstand eine Veränderung der Bodenoberfläche um 16,6 mm. Bei der Variante mit Wasser liegt dagegen die Erhöhung der Bodenoberfläche im Abstand von 0,05 m zum Belüftungspunkt bei 9 mm. Sowohl bei der Variante mit als auch bei der Variante ohne Stützgranulat halbieren sich die Werte bis zu einem Abstand von 0,4 m. Ab 1,2 m Abstand sind keine Veränderungen der Bodenoberfläche mehr messbar. Bei der Variante mit Wasser halbierten sich die Werte bei einem Abstand von 0,2 m, und ab einem Abstand von 0,8 - 0,9 m wurde keine Bodenoberflächenerhöhung mehr gemessen.

Der untere Teil von Abbildung 30 zeigt das Porenvolumen, das in Abständen von 0,1 m für jede Sanierungsvariante generiert wird. Es ist zu beobachten, dass das anfängliche Porenvolumen für alle drei Varianten von etwa 0,3 dm<sup>3</sup> in der Wasservariante bis zu etwa 0,5 dm<sup>3</sup> in beiden Varianten mit und ohne Stützgranulat reicht. Bei der Wasservariante steigt das Porenvolumen bis zu einem Abstand von 0,4 m auf etwa 0,7 dm<sup>3</sup> an und nimmt dann ab. Jenseits von 0,85 m ist, abgesehen von wenigen Ausreißern, kein geschaffenes Porenvolumen mehr messbar. Bei der Variante mit Stützgranulat steigt das Porenvolumen bis 0,4 m an und bleibt konstant bei 2 dm<sup>3</sup> bis zu einem Abstand von 0,6 m, danach nimmt es deutlich ab, wobei ab einem Abstand von 1,3 m kein Volumen mehr messbar ist. Die Variante ohne Stützgranulat folgt einem ähnlichen Muster, wobei das Porenvolumen bis 0,4 m ansteigt und danach sofort wieder abnimmt. Die Untersuchungsflächen zeigen eine Vergleichbarkeit innerhalb eines Abstandes von 0,85 m. Summiert man die entstandenen Porenvolumina, so ergeben sich 13,32 dm<sup>3</sup> für die Variante mit Stützkorn, 9,31 dm<sup>3</sup> für die Variante ohne Stützkorn und 3,51 dm<sup>3</sup> für die

Wasservariante auf einer Kreisfläche von 2,27 m<sup>2</sup>. Zieht man das Volumen des eingebrachten Stützgranulats ab, so ergibt sich ein Nettoporenvolumen für die Variante mit Stützgranulat von 13,10 dm<sup>3</sup>.

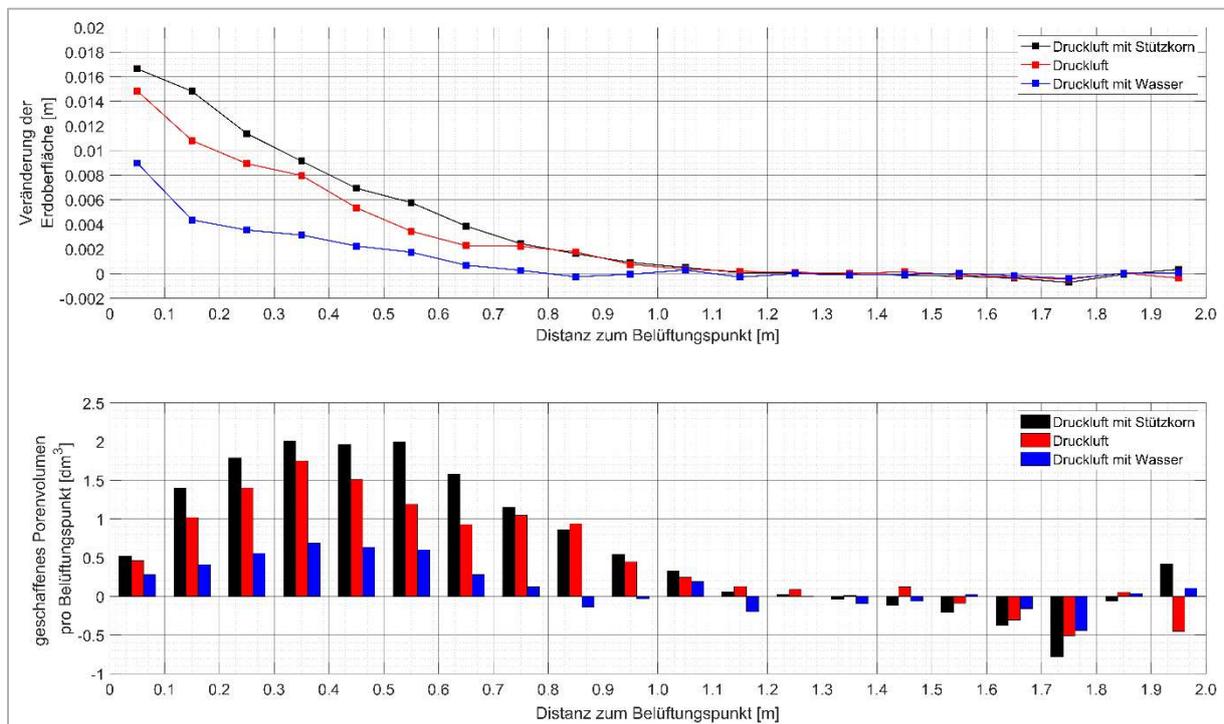


Abbildung 30: Veränderungen der Bodenoberfläche und Zunahme des Porenvolumens mit zunehmendem Abstand zum Belüftungsloch auf der Schlufffläche.

#### 9.3.4.2 Vergleich der Bodenarten für die Variante mit Stützkorn

Der obere Abschnitt von Abbildung 31 veranschaulicht die Bodenoberflächengeometrie in den einzelnen Versuchsflächen für die Variante mit Stützgranulat. Es ist erkennbar, dass im Abstand von 0 m bis 0,1 m vom Belüftungsloch die größten Veränderungen der Bodenoberfläche in der Sandfläche mit einer Höhe von ca. 22 mm zu verzeichnen sind. Die geringste Veränderung wurde auf der Tonfläche mit 12 mm beobachtet. Auf der Schlufffläche lag die Bodenoberflächenerhöhung bei ca. 17 mm. In allen drei Versuchsflächen ist eine Verringerung der Bodenoberfläche mit dem Abstand vom Belüftungspunkt zu beobachten. Dabei nimmt die Höhe der Bodenoberfläche in einem Abstand von etwa 0,4 Metern um ca. die Hälfte ab. Die Schluff- und Sandflächen erreichen schließlich bei einem Abstand von 1,3 m ein Plateau, über das hinaus die Höhe der Bodenoberfläche konstant bleibt. Auf der Sandfläche sinkt die Bodenoberfläche jedoch nicht genau auf 0 m Höhe. Aufgrund des Untersuchungsdesigns kann die Untersuchung der Oberflächengeometrie auf der Tonfläche nur für eine Distanz von 0,85 m erfolgen.

Der untere Teil von Abbildung 31 zeigt das geschaffene Porenvolumen, berechnet aus den mittleren Veränderungen der Bodenoberfläche in Abständen von 0,1 m. Auf der Sandfläche wurde mit ca. 0,7 dm<sup>3</sup> das größte erzeugte Porenvolumen gemessen, während die Tonfläche mit 0,4 dm<sup>3</sup> das geringste geschaffene Porenvolumen aufweist. Sowohl in der Ton- als auch in der Schlufffläche ist eine Zunahme des Porenvolumens bis zu einem Abstand von 0,4 m zu verzeichnen, darüber hinaus bleibt das geschaffene Porenvolumen konstant bis zu einer Distanz von 0,6 m. Auf diesem Plateau erreicht das geschaffene Porenvolumen auf der Tonfläche 1,3 dm<sup>3</sup> pro 0,1 m Schritt. Anschließend nimmt das erzeugte Porenvolumen stetig ab. Bemerkenswert ist, dass die Abnahme des Porenvolumens ab 0,4 m im Tonversuchsgebiet langsamer verläuft als auf der Schluff- und Sandfläche, so dass das Porenvolumen auf der Tonfläche mit 1,0 dm<sup>3</sup> bei einem Abstand von 0,85 m etwas höher liegt als auf

der Schlufffläche mit  $0,9 \text{ dm}^3$ . Im Gegensatz dazu zeigt sich auf der Sandfläche ein deutlicher Anstieg des Porenvolumens auf  $3,6 \text{ dm}^3$  bei  $0,5 \text{ m}$  Distanz, welches dann auf  $0,3 \text{ dm}^3$  bei  $1,3 \text{ m}$  Distanz stark abnimmt. Die Versuchsflächen zeigen eine Vergleichbarkeit innerhalb eines Abstandes von  $0,85 \text{ m}$ . Die Zusammenfassung des entstandenen Porenvolumens ergibt  $21,45 \text{ dm}^3$  auf der Sandfläche,  $13,32 \text{ dm}^3$  auf der Schlufffläche und  $9,41 \text{ dm}^3$  auf der Tonfläche, für eine Kreisfläche von  $2,27 \text{ m}^2$ . Nach Abzug des Volumens des eingebrachten Stützgranulats ergibt sich ein Nettoporenvolumen von  $21,30 \text{ dm}^3$  für die Sandfläche,  $13,10 \text{ dm}^3$  für die Schlufffläche und  $9,41 \text{ dm}^3$  für die Tonfläche.

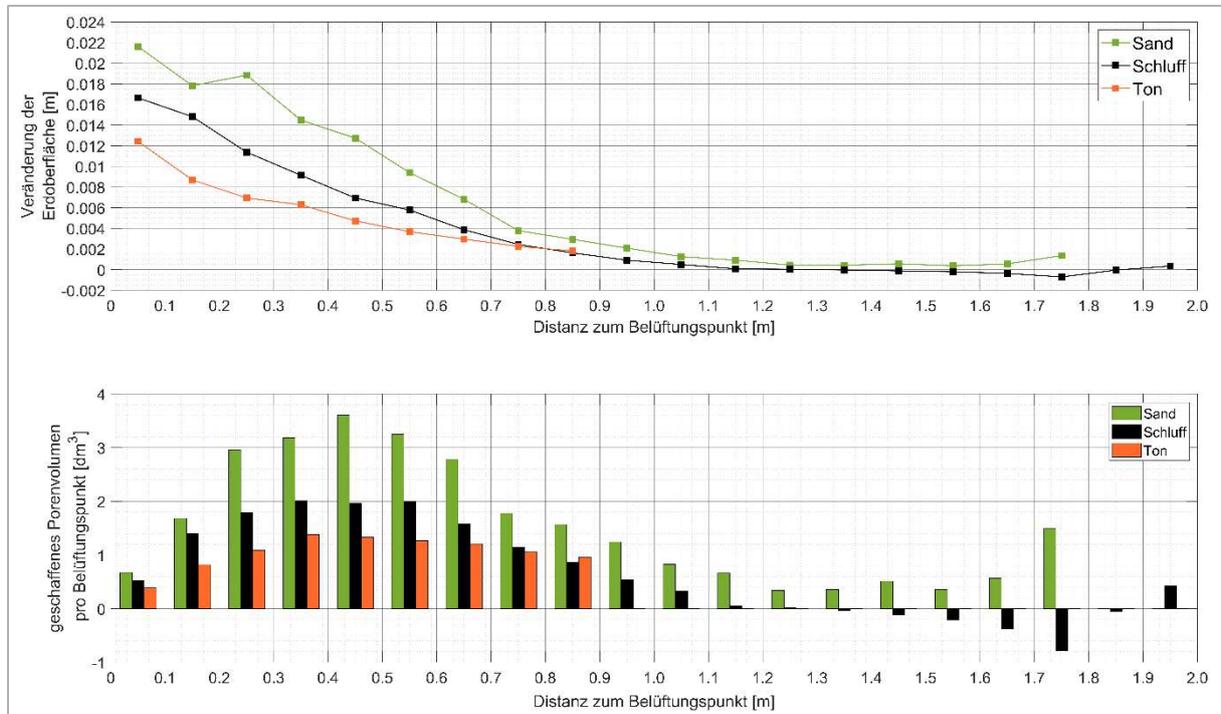


Abbildung 31: Veränderungen der Bodenoberfläche und Zunahme des Porenvolumens verschiedener Bodentypen mit zunehmender Entfernung zum Belüftungslöch.

### 9.3.5 Räumliche Verteilung des Stützgranulats

Die Untersuchungen zur Verteilung des Granulats zeigen, dass sich knapp  $\frac{3}{4}$  des Granulats ( $73 \%$ ) im Umkreis von  $20 \text{ cm}$  um das Belüftungslöch verteilt hat. Die übrigen  $27 \%$  befanden sich im Umkreis von  $30\text{--}50 \text{ cm}$  Entfernung zum Belüftungslöch (Abbildung 32).

In der Tiefe hat sich knapp  $\frac{2}{3}$  des Granulats ( $62 \%$ ) in  $15$  bis  $25 \text{ cm}$  Tiefe verteilt. Dies ist die Übergangszone zwischen Mineralboden und humosen Oberboden. Offensichtlich hat sich die Druckluft nicht gleichmäßig im Boden verteilt, sondern hat sich – den Weg des geringsten Widerstands gehend – unterhalb der Grasnarbe ausgedehnt. Die Häufigkeitsverteilung ist zweigipflig, was auf die zwei durchgeführten Druckluftstöße zurückzuführen ist (Abbildung 33).

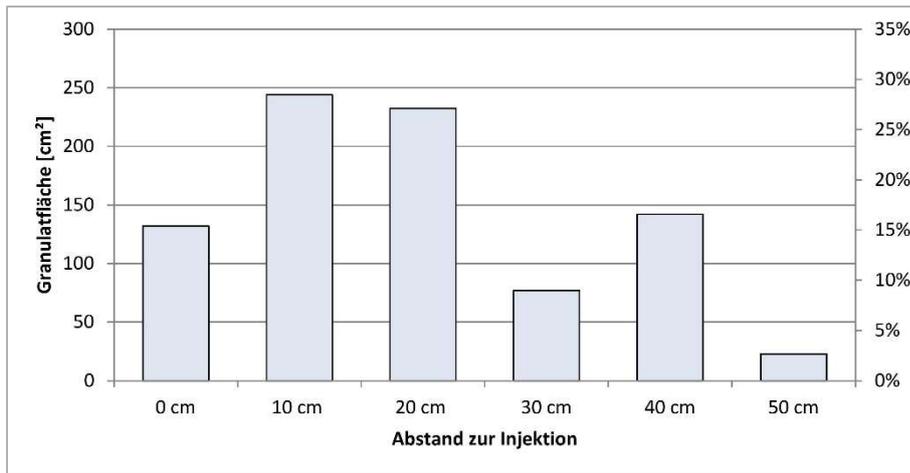


Abbildung 32: Verteilung des Granulats im Abstand zum Injektionspunkt (Dubberke 2023).

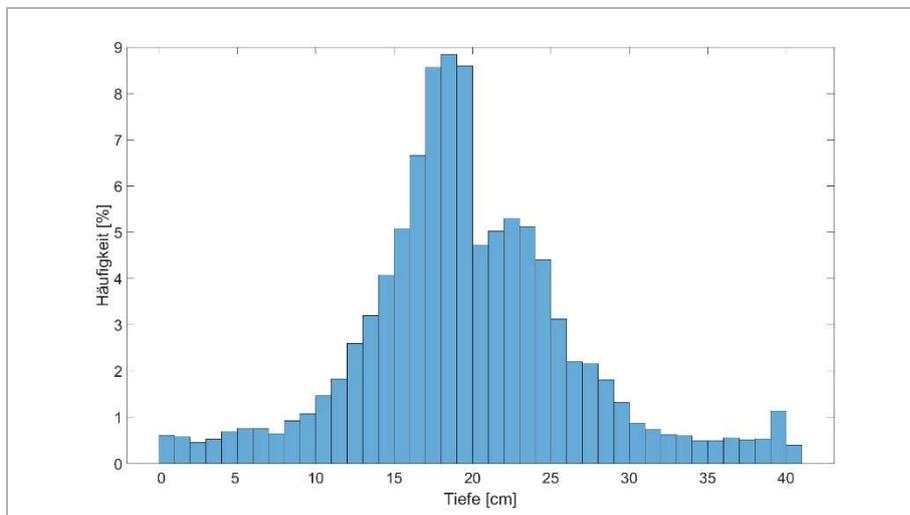


Abbildung 33: Prozentuale Häufigkeit des Stützgranulats in der Tiefe.

## 9.4 Phytomelioration

Auf allen Flächen erreichte der Deckungsgrad der krautigen Vegetation im Jahr der Ansaat (2021) etwa 93–111 %. Im zweiten Jahr nach der Ansaat (2022) ging dieser im Vergleich zum Vorjahr erheblich zurück: in Langenhagen um 28 %, in Essen um 63 % (Tabelle 4).

Von den insgesamt 29 Arten der Saatmischung sind in Langenhagen im ersten Jahr 15, in Essen 13 und in Göttingen 10 Arten aufgekommen. In Göttingen wurden insgesamt 19 verschiedene Arten vorgefunden, wovon allerdings etwa die Hälfte der Arten der vorhandenen Vegetation entstammte. Im zweiten Jahr ging die Anzahl der Arten um etwa die Hälfte zurück und verringerte sich auf 8 Arten in Langenhagen und 6 Arten in Essen (Tabelle 4). In Langenhagen und Essen sind sowohl im ersten als auch im zweiten Jahr nur Arten aufgekommen, die auch in der Saatmischung enthalten waren.

Tabelle 8: Gesamtdeckungsgrad (%) und Artenanzahl auf den Untersuchungsflächen in den Jahren 2021 und 2022.

	Langenhagen		Essen		Göttingen	
	Deckungsgrad	Anzahl Arten	Deckungsgrad	Anzahl Arten	Deckungsgrad	Anzahl Arten
<b>2021</b>	93 %	15	111 %	13	109 %	10
<b>2022</b>	26 %	8	70 %	6	NA	NA

Während in Langenhagen auf der sandigen Fläche im ersten Jahr vor allem Weißklee und Gelbklee dominierten, ist in Essen auf der schluffigen Fläche in erster Linie der Gelbe Steinklee aufgekommen und auf dem lehmigen Boden in Göttingen der Spitz-Wegerich, der nicht Teil der Saatmischung war, sondern der natürlichen Vegetation entstammte. In geringer Beimischung sind in Essen Weißer Steinklee und Rotklee aufgekommen und in Göttingen aus der Saatmischung Gemeine Wegwarte, Bienenfreund, Rohrschwengel und Rotklee.

Im zweiten Jahr gab es in Langenhagen einen Wechsel der Arten hin zu Knautgras, Rohrschwengel, sowie Weißem und Gelbem Steinklee. In Essen kam im zweiten Jahr zum Gelben Steinklee auch der Weiße Steinklee und Rohrglanzgras vermehrt hinzu (Abbildung 34).

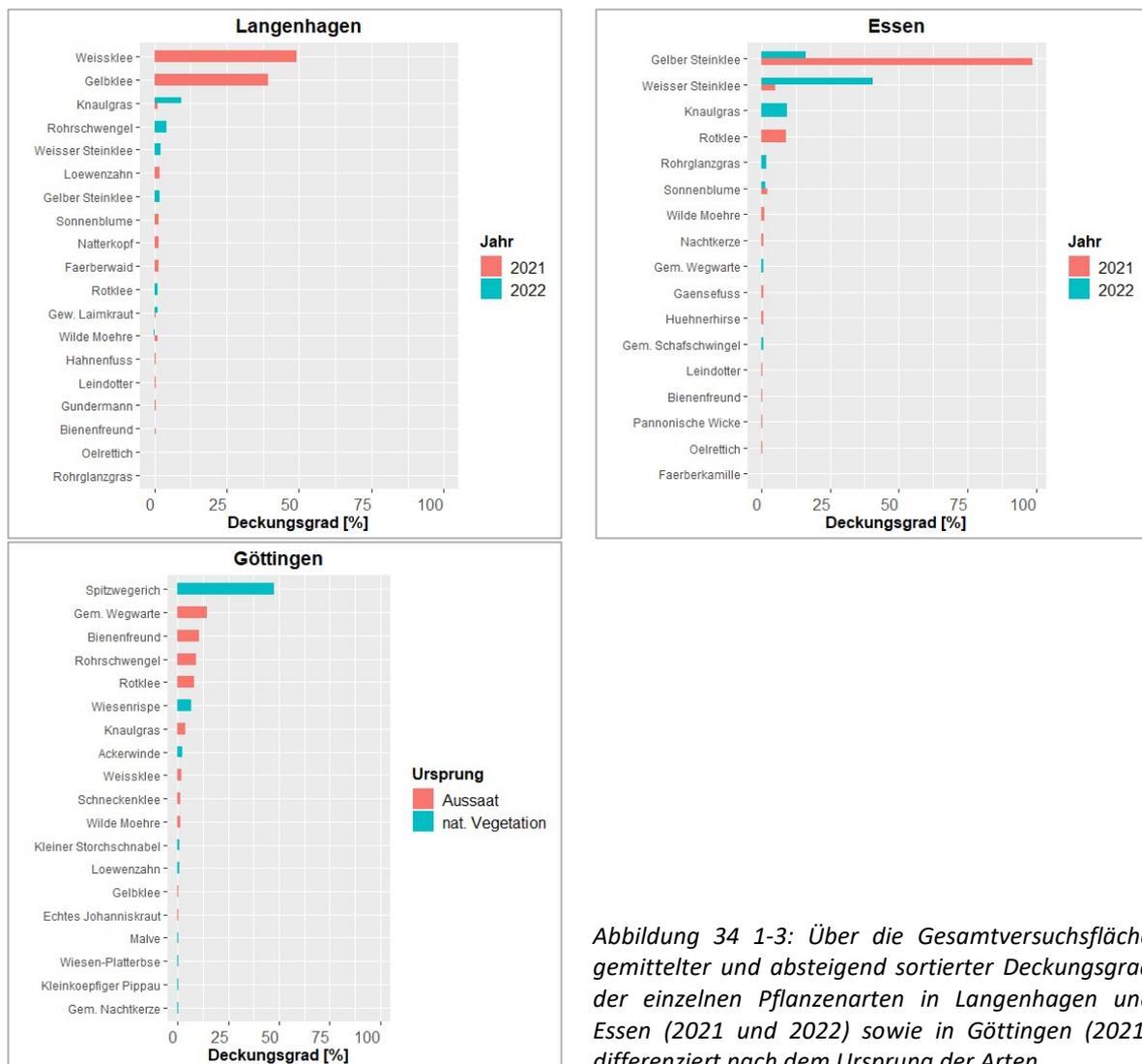


Abbildung 34 1-3: Über die Gesamtversuchsfläche gemittelter und absteigend sortierter Deckungsgrad der einzelnen Pflanzenarten in Langenhagen und Essen (2021 und 2022) sowie in Göttingen (2021) differenziert nach dem Ursprung der Arten.

Alle drei Standorte waren in den oberen 20–25 cm, die den Oberboden und in Langenhagen und Essen zusätzlich das aufgetragene Saatbett umfassten, mittel bis sehr stark durchwurzelt. Auffällig ist, dass in Essen und Göttingen die Durchwurzlung auf den Referenzflächen im Oberboden höher war als auf den Saatflächen. In Essen war dieser Unterschied signifikant, in Göttingen nicht (vermutlich aufgrund des geringeren Datenumfangs). In Langenhagen verhielt es sich umgekehrt: Dort waren im Oberboden auf den Saatflächen signifikant mehr Wurzeln als auf der Referenzfläche.

In Langenhagen und Göttingen waren in den stark verdichteten Unterböden fast keine Wurzeln vorhanden, weder auf den Referenzflächen noch auf den Saatflächen. Leicht erhöhte Wurzeldichten gab es in Essen auf der Saatfläche zwischen 52 und 64 cm Tiefe, die allerdings nicht signifikant waren.

Bei diesen Wurzeln handelte es sich ausschließlich um krautige Wurzeln und nicht um Baumwurzeln. Im Ganzen war aber auch hier die Durchwurzelungsintensität sehr schwach (Abbildung 9).

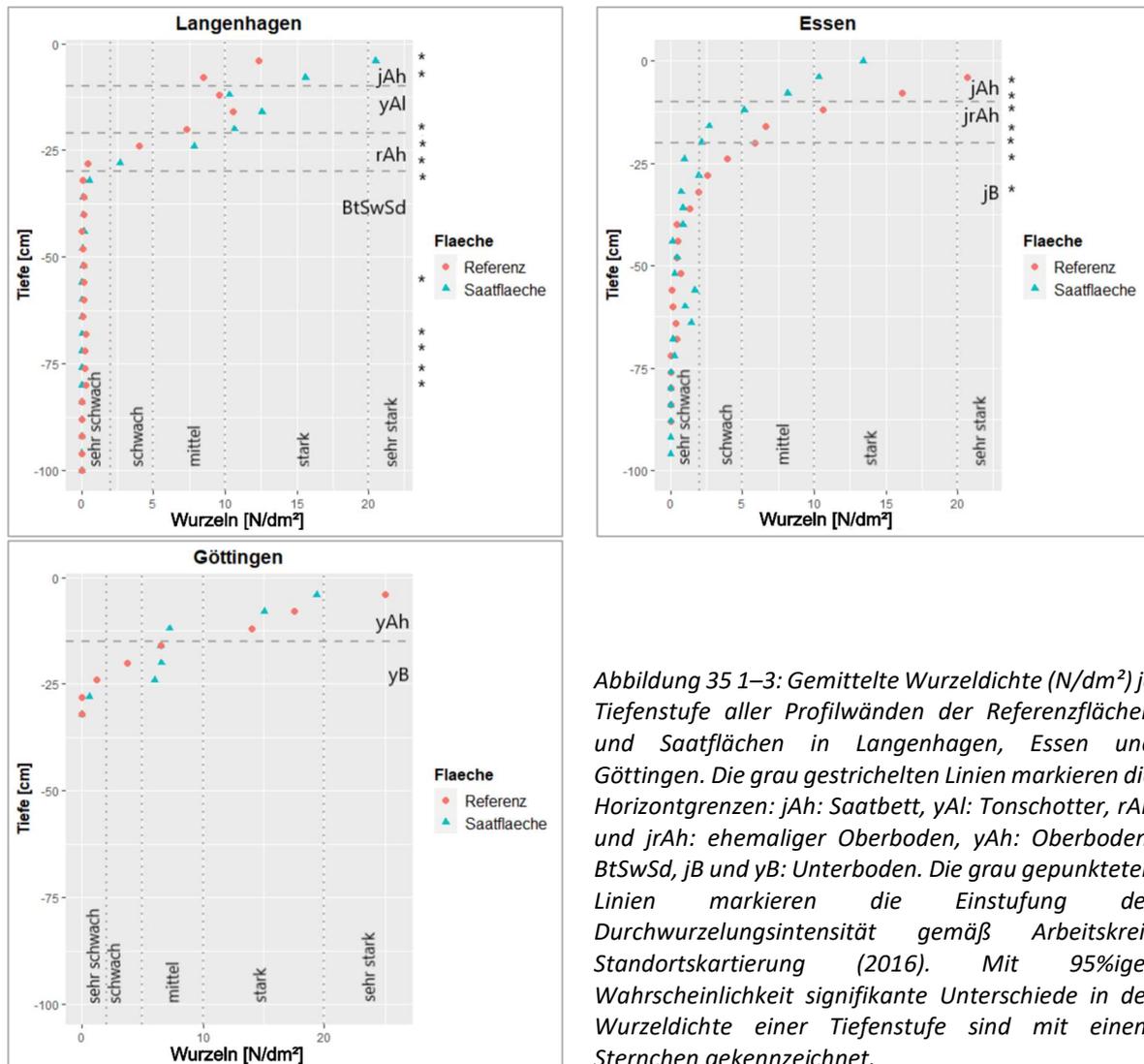


Abbildung 35 1–3: Gemittelte Wurzel-dichte (N/dm<sup>2</sup>) je Tiefenstufe aller Profilwänden der Referenzflächen und Saatflächen in Langenhagen, Essen und Göttingen. Die grau gestrichelten Linien markieren die Horizontgrenzen: jAh: Saatbett, yAl: Tonschotter, rAh und jrAh: ehemaliger Oberboden, yAh: Oberboden, BtSwSd, jB und yB: Unterboden. Die grau gepunkteten Linien markieren die Einstufung der Durchwurzelungsintensität gemäß Arbeitskreis Standortkartierung (2016). Mit 95%iger Wahrscheinlichkeit signifikante Unterschiede in der Wurzel-dichte einer Tiefenstufe sind mit einem Sternchen gekennzeichnet.

## 10 DISKUSSION

### 10.1 Projektdurchführung – Abweichungen von den ursprünglichen Zielen

Zu Projektbeginn wurde ein Projektbeirat eingerichtet, der die Bearbeitung des Projektes wissenschaftlich begleitet hat. Mitglieder des Projektbeirats waren Prof. Dr. Rust (HAWK Göttingen), Prof. Dr. Rinklebe (Bergische Universität Wuppertal) und Prof. Dr. Stützel (Ruhr-Universität Bochum). Bei der Auftaktveranstaltung, die mit dem Projektbeirat sowie den Praxisvertretern, die das Projekt unterstützten, durchgeführt wurde, wurden die vorgesehenen Behandlungs- und Untersuchungsmethoden detailliert vorgestellt und zur Diskussion gestellt. Zusammenfassend sind folgende Aspekte erwähnenswert, die zu Modifikationen der ursprünglich angedachten Methodik führten:

- Im Projektteil „Bodensanierung mittels Druckluftpflanzen“ stießen die vorgestellten Ideen, einen Laserscanner zur Beurteilung des Sanierungserfolgs einzusetzen und die Messungen der CO<sub>2</sub>-Konzentration der Bodenluft messtechnisch zu verbessern, auf große Zustimmung.

- Der Sanierungserfolg durch Druckluftlanzen bei unterschiedlich feuchten Bodenverhältnissen wurde nicht untersucht. Seitens der Anwender war man sich einig, dass der größte Sanierungserfolg bei feuchten Bodenverhältnissen zu erwarten ist, weshalb diese Variante bevorzugt durchgeführt worden ist. Die feuchten Witterungsbedingungen im Sommer 2021 haben die Durchführung einer trockenen Variante schlussendlich verhindert.
- Es hat sich als nicht zielführend herausgestellt, mit einem Computermodell zu simulieren, wie die Rissbildung in einem Boden bei einer Druckluftlanzensanierung erfolgt, um darauf basierend, ideale Abstände zwischen den Druckluftlanzenlöchern festzulegen. Die Randbedingungen sind zu komplex, als dass sie erkenntnisbringend modelliert werden könnten. Stattdessen konnte über die Auswertung der Laserscandaten der effektive Belüftungsradius für verschiedene Bodenarten und darauf basierend Abstandsempfehlungen ausgesprochen werden.
- Im Projektteil „Bodensanierung mit krautigen Pflanzen“ wurde auf Topfversuche verzichtet, da diese kaum die Praxissituation widerspiegeln und daraus wenige Erkenntnisse abgeleitet werden können. Stattdessen wurde durch eine erfahrene Saatgutfirma (Feldsaaten Freudenberger GmbH & Co. KG, Krefeld) eine Saatmischung aus Pflanzen zusammengestellt, die alle potenziell in der Lage sind, schadverdichtete Bereiche zu durchwurzeln. Ziel war es, eine Mischung zu erstellen, die so breit aufgestellt es, dass unabhängig von den Standortparametern es zum Aufwuchs einiger Arten der Mischung kommt.
- Im Projektteil „Melioration der Bodenbelüftung durch Belüftungslöcher“ wurde ein größeres Labormodell mit einem Belüftungsrohr im Maßstab 1:1 erstellt, an der die Modellierung mit Comsol-Multiphysics kalibriert werden konnte, bevor die Messungen im Gelände erfolgten.
- Die Versuchsflächen sollten vorrangig die Hauptbodenarten Sand, Schluff und Ton repräsentieren. Daher eigneten sich die Flächen im Krupp-Park in Essen und Hannover Langenhagen besser als die im Antrag genannten Beuys-Eichen in Kassel und die Mathildenhöhe in Darmstadt.

Die Ergebnisse der bodenphysikalischen Parameter bei der Druckluftlanzensanierung und die Reaktion der Bäume darauf befinden sich noch in der Auswertung und werden Teil der Endfassung des Abschlussberichtes werden.

## 10.2 Mobiles CO<sub>2</sub>-Messgerät

Die Laborergebnisse zeigen, dass das neu entwickelte CO<sub>2</sub>-Messgerät mit Infrarotsensor unter Laborbedingungen genauso gut misst wie der um den Faktor 10 teurere Gaschromatograph. Da auch die Rüst- und Vorbereitungszeiten bei dem GC mit ca. ein bis anderthalb Stunden etwa 10-mal so hoch sind, wird in dem bodenphysikalischen Labor der Fakultät Ressourcenmanagement für CO<sub>2</sub>-Messungen nur noch das neue Messgerät eingesetzt.

Bei den Feldversuchen fallen die Ergebnisse heterogener aus. Während auf den unverdichteten Böden ebenfalls keine Unterschiede festzustellen sind, misst der GC in den extrem verdichteten Bodenbereichen höhere CO<sub>2</sub>-Konzentrationen. Dies ist wohl nicht auf das eigentliche Analyseverfahren zurückzuführen, sondern auf die Rahmenbedingungen der Messung: Während der GC mit einem Bodenluftvolumen von etwa 5-10 ml auskommt, benötigt das CO<sub>2</sub>-Messgerät mit Infrarotsensor etwa 30 ml Bodenluft, um auch bei wechselnden Messungen zwischen hohen und niedrigen Konzentrationen zuverlässige Werte zu generieren (RÖPER 2021). Auf den unverdichteten und weniger verdichteten Böden ist das Porenvolumen in der Regel so hoch, dass mit beiden Messverfahren (GC und Infrarot) vergleichbare Bodenluftaliquote angesaugt und analysiert werden. In den stark verdichteten Böden können zwei Aspekte, die beide auf das geringe Porenvolumen verdichteter Böden zurückzuführen sind, die etwas niedrigeren Messwerte der CO<sub>2</sub>-Messgeräte mit Infrarotsensor erklären: Wenn aufgrund des geringen Porenvolumens keine ausreichende Menge Bodenluft zur Analyse vorhanden ist, wird die Bodenluft, sofern keine Bypässe vorhanden sind, beim Ansaugprozess aufgrund des entstehenden Unterdrucks „gedehnt“. Dadurch sind in der dem Sensor zugeführten Luft weniger CO<sub>2</sub>-Moleküle und das Gerät zeigt geringere Konzentrationen an als in der „ungedehnten“ Luft

vorhanden wären. Des Weiteren kann der aufgrund des geringen Porenvolumens entstehende Unterdruck beim Ansaugen dazu führen, dass Luft durch Bypässe (z. B. entlang des Randes des Einstichrohres) aus höheren Bodenschichten oder gar aus der Außenluft mit angesaugt wird. Dementsprechend fallen die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen dann geringer aus.

Vor dem Hintergrund, dass starke Störungen der Bodenbelüftung dann vorliegen, wenn die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen 1% übersteigen und Konzentrationen von über 2% extreme Belüftungsstörungen anzeigen (Weltecke and Gaertig 2012a, 2012b; Cannell 1977; Chang and Loomis 1945), kann festgehalten werden, dass die CO<sub>2</sub>-Messgeräte mit Infrarotsensor sehr gut geeignet sind, um im Gelände den für Belüftungsstörungen relevanten Bereich 0,2-2,5 % CO<sub>2</sub> nachzuzeichnen. Ob sich die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen der Bodenluft dann tatsächlich in einem Extrembereich bei 5% oder 8% bewegen, ist für die Diagnose „Belüftungsstörung“ irrelevant, da beide Konzentrationen jenseits jeglicher tolerierbaren Konzentrationen liegen.

## 10.3 Belüftungsrohre und Löcher

### 10.3.1 Validierung des Computermodells

Ziel dieses Projektteils war es, ein Computermodell zu entwickeln, mit deren Hilfe der Einfluss von Belüftungsrohren und Belüftungslöchern auf den Bodengashaushalt untersucht werden kann. Nachdem jeweils ein Basismodell für ein Labor- und ein Feldexperiment entwickelt und durch Messungen validiert wurde, konnte dieses zur Simulation verschiedener Szenarien eingesetzt werden.

Die Randbedingungen im Modell beruhen auf Messwerten im Feld und im Labor. Durch Änderungen der Randbedingungen, z. B. der Porosität oder der Respirationsrate des Bodens, ändern sich die modellierten CO<sub>2</sub>-Werte. Das heißt, dass die absoluten Werte dieser Simulationen nicht direkt auf andere Situationen übertragen werden können. Sie dienen lediglich dazu, die grundlegenden Effekte von Belüftungseinrichtungen auf den Bodengashaushalt darzustellen.

Der Vergleich zwischen den gemessenen und modellierten Werten zeigt, dass diese im Allgemeinen gut übereinstimmen. Es gibt jedoch zwei auffällige Unterschiede:

1. Bei der Feldvariante mit Belüftungsrohr nimmt die gemessene CO<sub>2</sub>-Konzentration im Gegensatz zu den modellierten Werten mit zunehmendem Abstand zum Belüftungsrohr ab oder folgt keinem Trend (Abbildung 19). Bei der Variante 'Belüftungslloch mit Baumsubstrat' gab es diese Auffälligkeit nicht; sowohl die gemessenen als auch die modellierten Werte nahmen mit zunehmendem Abstand zum Belüftungslloch leicht zu. Eine plausible Erklärung ist, dass die Messwerte im Falle der Variante 'Belüftungsrohr' die Variabilität des Bodengashaushalts zeigen. Kleinräumige Unterschiede in der Gasdurchlässigkeit und Respirationsrate haben hier offensichtlich den Einfluss des Belüftungsrohres überlagert.
2. Bei der versiegelten Laborvariante und der Feldvariante mit Belüftungsrohr waren die gemessenen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen im Rohrrinneren vor allem in den tieferen Regionen deutlich niedriger als die modellierten Werte (Abbildung 19 und Abbildung 23).

Untersuchungen der Messwerte der Feldvariante im Tagesverlauf haben gezeigt, dass im Rohr die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen nachts deutlich abgefallen sind (Abbildung 36). Dadurch ist die Varianz der CO<sub>2</sub>-Konzentrationen im Rohr deutlich höher als im Boden und der Median niedriger (Abbildung 19). Dieser nächtliche Abfall der CO<sub>2</sub>-Konzentration kann mit einer geringeren nächtlichen Respirationsrate in der unmittelbaren Rohrumbgebung durch Abkühlung zusammenhängen. Das über Tag produzierte CO<sub>2</sub> entweicht aus dem Rohr, es wird aber weniger nachgebildet.

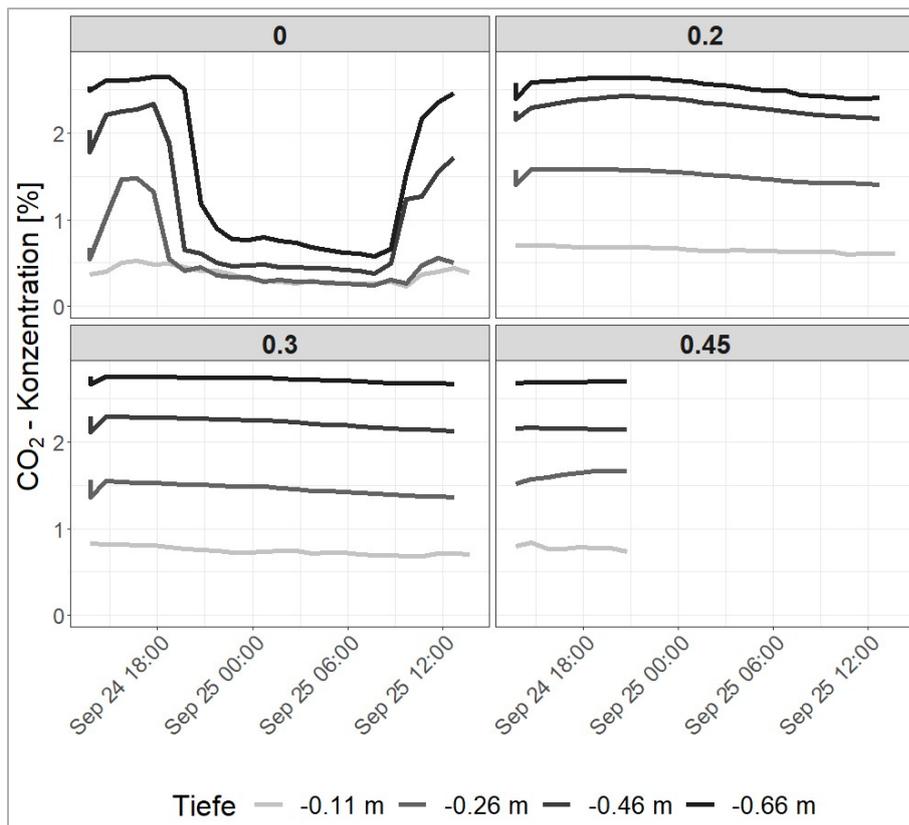


Abbildung 36: Tagesgang der CO<sub>2</sub>-Konzentration in verschiedenen Abständen zum Rohr und in verschiedenen Tiefen.

Ein weiterer Effekt, der hinzukommen kann, ist Konvektion (Massenfluss), die durch Unterschiede der Temperatur im Rohr und der atmosphärischen Luft induziert wird. Ganot et al. (2014) haben in einem Laborversuch festgestellt, dass unter konstanten Temperaturbedingungen primär diffusive Prozesse den Bodenluftaustausch steuern. Nachts kühlt die atmosphärische Luft jedoch ab und es kommt zu Temperaturgradienten zwischen der Luft im Boden und der Atmosphäre. In stark durchlässigen Bereichen, wie z. B. in einem Belüftungsrohr, kommt es dadurch zu Konvektion. In Böden mit geringer Gasdurchlässigkeit bleibt allerdings der primäre Faktor für den Gasaustausch die Diffusion. Weiterhin weisen die Autoren darauf hin, dass temperaturinduzierte Konvektion insbesondere in ariden Gebieten auftritt, da dort die Tag-Nacht-Unterschiede der Lufttemperatur besonders hoch sind. In den gemäßigten Breiten wird thermische Konvektion daher vor allem an heißen Sommertagen auftreten.

Eine solche thermisch induzierte Konvektion oder schwankende Respiration während des Tag-Nacht-Zyklus können jedoch im Laborexperiment ausgeschlossen werden, da im Labor konstante Temperaturbedingungen herrschten und der trockene und humusfreie Sand nahezu inert, d. h. ohne Respiration war. Es bleibt weiterhin unklar, warum der Unterschied in der CO<sub>2</sub>-Konzentration im Rohr nur in der versiegelten Variante (Abbildung 23), nicht aber in der Ausgangssituation ohne Versiegelung beobachtet wurde (Abbildung 18). Weitere Untersuchungen sind erforderlich, um die Unterschiede zwischen der gemessenen und der modellierten CO<sub>2</sub>-Konzentration in Belüftungsrohren endgültig zu verstehen. Es bleibt jedoch festzuhalten, dass die effektive Entgasung von Kohlendioxid aus dem Belüftungsrohr weitgehend auf das Rohr selbst beschränkt bleibt und keine signifikanten Auswirkungen auf den Boden hat, wie Abbildung 19 und Abbildung 23: Gemessene und modellierte CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in der oberflächlich versiegelten Tonne. Die Anzahl der Messwiederholungen ist jeweils n=3. Abbildung 23 zeigen.

### 10.3.2 Bezug zur Praxis

Die Modellierungen haben ergeben, dass der Effekt von Belüftungsrohren mit zunehmender Durchlässigkeit des Bodens abnimmt. Schon bei Porositäten  $> 0,15$  ist der Einfluss von Belüftungseinrichtungen vernachlässigbar (Abbildung 22). Dies entspricht z. B. der Luftkapazität von stark verdichteten schwach schluffigen oder schwach tonigen Sanden (Su2, St2) oder locker gelagerten stark sandigen Lehmen (Ls4) (Arbeitskreis Standortkartierung 2016). Dies ist nachvollziehbar, da gemäß dem 1. Fick'schen Gesetz der diffusive Fluss umso größer ist, je kürzer der Diffusionsweg ist. Die Tortuosität von Bodenporen nimmt jedoch mit abnehmender Porosität zu (Gleichung 4, Kapitel 7). Das heißt, Diffusionswege aus dem Boden zur Atmosphäre sind umso kürzer, je poröser der Boden ist. In Rohrnähe läuft der kürzeste Diffusionsweg über das Rohr, da es selbst keine Tortuosität besitzt. Mit zunehmendem Abstand zum Belüftungsrohr ist der kürzeste Diffusionsweg allerdings die Vertikale über die Bodenporen. Je poröser der Boden ist, desto eher entgast das  $\text{CO}_2$  somit über die Bodenporen und desto geringer ist der Einfluss des Belüftungsrohres. Hiermit ist auch erklärbar, warum in dem Labormodell quasi kein Belüftungseffekt des Rohres erkennbar war: Der verwendete trockene Sand war zu porös (Porosität  $\sim 0,46$ ); die Belüftung lief primär über die Poren im Sand.

Für die Verwendung von Belüftungseinrichtungen in der Praxis bedeutet dies, dass diese nur zielführend bei Böden mit geringer Porosität sind. Bei der Verwendung von Baums substraten beispielsweise, die eine Luftkapazität bei pF 1,8 (Feldkapazität) von mindestens 15 % (=Porosität: 0,15) aufweisen (FLL 2010), ist eine Verwendung von Belüftungsrohren nur bedingt zielführend. Eine Verbesserung der Bodenbelüftung durch diffusive Prozesse ist hier nicht zu erwarten. Der Einfluss von konvektiven Prozessen, die z. B. durch Wind, starke Niederschläge, Grundwasserschwankungen, Luftdruck- oder Temperaturunterschiede ausgelöst werden, ist weiter zu erforschen.

Ein weiterer Einsatzschwerpunkt von Belüftungsrohren ist deren Verwendung in versiegelten Bereichen. Sie sollen dort als Bypass dienen, um den Luftaustausch zwischen dem Wurzelraum unter der versiegelten Fläche und der Atmosphäre zu gewährleisten. Die "Empfehlungen für Baumpflanzungen" (FLL 2010) empfehlen z. B. die Installation von vier Belüftungsrohren in überbauten Pflanzgruben sowie alle 5 m ein Belüftungsrohr in Wurzelgräben unter versiegelten Flächen. Die Modellierungen zum Einfluss von Belüftungsrohren auf den Boden versiegelter Flächen legen jedoch nahe, dass auch unter versiegelten Flächen der Diffusionseffekt von Belüftungsrohren in Böden mit hoher Porosität vernachlässigbar ist. Anders verhält es sich bei versiegelten Böden mit geringer Porosität. Hier können Belüftungsrohre eine Verbesserung der Belüftungssituation bewirken. Nichtsdestotrotz weisen Flächenbelüftungen einen deutlich höheren Effekt auf, auch wenn diese nicht mit Belüftungsrohren gekoppelt sind (Abbildung 24).

Eine verbreitete Methode zur Sanierung von Bodenschadverdichtung im Baumumfeld ist die Verwendung von Druckluftlanzen. Dabei wird mit dünnen Metalllanzen Druckluft in den Boden gepresst und dadurch die Bodenstruktur aufgebrochen. Die Lanzenlöcher werden im Anschluss mit Granulat verfüllt, um diese für die Bodenbelüftung offen zu halten. In diesem Projekt konnte gezeigt werden, welchen Lockerungseffekt diese Druckluftlanzen haben (siehe Kapitel 9.3). Eine zusätzliche Frage ist, inwieweit die Lanzenlöcher zur Bodenbelüftung beitragen. Die Modellierungen haben ergeben, dass eine Perforation des Bodens mit Löchern mit einem Durchmesser von 2,8 cm, 0,6 m Tiefe und einem Abstand von 0,25 m einen sehr geringen Einfluss auf den Bodengasaustausch hat. Wenn die Bohrlöcher mit Granulat gefüllt sind, tendiert der Belüftungseffekt trotz hoher Porosität des Granulats gegen Null (Kapitel 9.2.6). Das bedeutet für die Praxis, dass die Belüftungslöcher – auch bei Druckluftlanzensanierungen – nach Möglichkeit nicht mit Granulat verfüllt werden sollten, um den Belüftungseffekt nicht unnötig zu reduzieren.

Belüftungsrohre und Löcher können einen Boden vielleicht nicht perfekt durchlüften, offen bleibt jedoch die Frage, ob die erreichte Verbesserung des Bodenluftaustauschs ausreicht, um sich positiv auf das Wurzelwachstum auszuwirken. Wurzeln besitzen eine hohe Sensitivität für Sauerstoff und gut belüftete Bodenbereiche (Gliński und Stępniewski 1985, Porterfield und Musgrave 1998) und sie

wachsen bevorzugt entlang von Grenzflächen, wie sie z. B. zwischen einem Belüftungsrohr und dem umgebenden Boden vorhanden sind (Reichwein 2002). Weiterhin können Sekundäreffekte auftreten, die zusätzlich zur Verbesserung der Belüftungssituation beitragen. So könnte es in lehmigen Böden z. B. zu Rissbildungen infolge von Austrocknung im Umfeld der Rohre kommen. Die entstandenen Risse können dann ebenfalls zur Belüftung des Bodens beitragen. Diese Umstände können dafür sorgen, dass sich Wurzeln direkt an den Grenzflächen zu den Belüftungsrohren ansiedeln und somit ihre Lebensbedingungen verbessert werden. Weiterhin könnte dadurch ein Tiefenstreben der Wurzeln hervorgerufen und so die Wurzeln in feuchtere Bodenregionen gelenkt werden. Dies kann als präventive Maßnahme für Trockenstress sinnvoll sein (Mattheck et al. 2021).

So konnten z. B. Fründ et al. (2013) zwar keine Verbesserung der Bodenbelüftung in stark verdichteten Fahrspuren im Wald feststellen, die mit Löchern perforiert worden sind. Allerdings war offensichtlich die Feinwurzelndichte in den Löchern und deren näherer Umgebung bis in 20 cm Tiefe gegenüber nicht perforierter Referenzflächen deutlich erhöht (Fründ und Gaertig 2012–2017). Islam et al. (1998) stellten fest, dass Karotten, die auf Erdwällen angebaut wurden, die durch horizontal verlaufende poröse Kunststoffrohre belüftet wurden, deutlich mehr Wurzel- und Sprossmasse gebildet haben als Karotten, die auf nicht belüfteten Erdwällen wuchsen. Mc Donald et al. (2004) konnten hingegen nach drei Jahren Wachstum in einem verdichteten Füllboden mit Belüftungsrohren kein verstärktes Wurzelwachstum von Kirschbäumen (*Prunus x yedoensis* 'Afterglow') entlang der Belüftungsrohre feststellen. Allerdings hatte in diesem Versuch der Füllboden insgesamt keinen negativen Einfluss auf das Wachstum der Bäume im Vergleich zur Referenz.

Insgesamt gibt es nur sehr wenige Untersuchungen über den Einfluss von Belüftungsrohren und -löchern auf das Wurzel- und Sprosswachstum von Pflanzen. Die wenigen Ergebnisse lassen noch keine allgemein gültige Aussage zu. Da Belüftungsrohre und -löcher jedoch regelmäßig in der Praxis eingesetzt und von Regelwerken empfohlen werden (FLL 2010; FGSV 2019), besteht weiterer Forschungsbedarf zur Frage, wie Wurzeln von der Grenzfläche Belüftungsrohr/Boden und sekundären Effekten wie Rissbildung profitieren. Darüber hinaus müssen sich künftige Untersuchungen zum Einfluss von Belüftungsrohren und -löchern auf den Gasaustausch im Boden auf den Einfluss des Massenflusses konzentrieren.

## **10.4 Druckluftlanzen**

### **10.4.1 Bodenhebung**

Betrachtet man alle beobachteten Oberflächenveränderungen, so zeigt sich, dass die Variante mit Stützgranulat (D+S) im Vergleich zu den anderen Varianten die größten Veränderungen der Erdoberfläche erzielte. Der Vorteil der D+S-Variante gegenüber der Variante ohne Stützgranulat (D) ist wahrscheinlich auf den Einsatz und nicht auf die Menge des Stützgranulats zurückzuführen. Darauf deutet die Tatsache hin, dass trotz des Einsatzes von 140 g weniger Stützgranulat pro Belüftungspunkt auf der Sandfläche und 200 g weniger auf der Tonfläche im Vergleich zur Schlufffläche die initialen Veränderungen der Bodenoberfläche nicht nachteilig beeinflusst wurden. Ein möglicher kombinierter Effekt mit der Bodenart bzw. dem Korngefüge kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, so dass weitere Untersuchungen erforderlich sind. Eine erste Theorie könnte sein, dass die einzelnen Körner des Stützgranulats im Druckluftstrom, verdichtete Bodenschichten aufgrund ihrer Aufprallkraft effektiver aufbrechen können.

Die größten Veränderungen der Bodenoberfläche wurden auf der Sandfläche gemessen. Sie waren ca. doppelt so groß wie die Messungen auf der Schlufffläche. Im Gegensatz dazu waren die beobachteten Veränderungen auf der Tonfläche so gering, dass sie fast im Bereich der Messungenauigkeit des Laserscanners lagen. Die Daten deuten darauf hin, dass der Sanierungserfolg von der Bodenart abhängt, wobei gröbere Kornfraktionen zu stärkeren Oberflächenveränderungen und damit zu einem

größeren Sanierungserfolg führen, sofern die Druckluft nicht durch Grobporen oder Hohlräume entweicht. Diese Schlussfolgerung deckt sich mit den Ergebnissen von Smiley et al. (1990) und Kaj (1992). Beim Vergleich der Ergebnisse der Tonfläche mit denen der anderen Testgebiete ist jedoch Vorsicht geboten, da während der Sanierung nur einmal pro Tiefenstufe Druckluftimpulse eingebracht worden sind, statt zweimal wie auf den Sand- und Schluffflächen. Folglich könnte der Sanierungseffekt auf der Tonfläche bei gleichem Drucklufteinsatz stärker sein.

Voruntersuchungen an den Sanierungspunkten auf der Sandfläche in Bad Arolsen sowie die Aufnahmen zur Verteilung des Stützgranulats zeigten, dass das Stützgranulat durch die Druckluftanwendung beeinträchtigt wurde und eher einem Pulver als einem intakten Granulat glich (Dubberke 2023). Seine stützende Funktion hat es damit weitgehend eingebüßt. Die Ergebnisse von Weltecke et al. (2011) zeigten, dass ein Jahr nach der Sanierung die anfänglichen Sanierungserfolge nachgelassen hatten. In diesem Fall war der Boden schluffig, und es wurden sowohl Wasser als auch Stützgranulat verwendet. Eine plausible Hypothese ist, dass dort ähnlich wie in Bad Arolsen das eingebrachte Stützgranulat durch den komprimierten Luftstrom beeinträchtigt wurde und dadurch seine Stützfunktion verloren hat. Daher ist es ratsam, ein stabileres Stützkornmaterial zu verwenden. Darüber hinaus wurden bei Verwendung von  $0,2 \text{ dm}^3$  Stützgranulat auf der Schlufffläche und  $0,1 \text{ dm}^3$  auf der Sand- und Tonfläche weniger als 0,5-1,5 % des erzeugten Porenvolumens mit Stützgranulat aufgefüllt. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, zukünftig eine deutlich größere Menge an Stützgranulat einzubringen.

Während der Belüftungsmaßnahmen wurde auf der Sandfläche eine Beobachtung gemacht: Ein erheblicher Teil der eingesetzten Druckluft schien unter der Grasnarbe zu entweichen und löste dadurch die Rasenfläche vom Mineralboden. Es kann vermutet werden, dass dieser Übergang als Weg des geringsten Widerstands für die Druckluft einen bevorzugten Weg darstellt. Diese These wird dadurch gestützt, dass bei den Untersuchungen zur Verteilung des Stützgranulats sich ein großer Teil des Granulats primär im Bereich zwischen Mineralboden und Oberboden verteilt hat (Kapitel 9.3.5, Dubberke 2023). Weitere bodenspezifische Untersuchungen sind erforderlich, um zu verstehen, wie sich der Druckluftstrom und Stützgranulat im Boden ausdehnen. Nichtsdestotrotz könnte diese Dynamik erklären, warum auf der Sandfläche selbst bei Abständen von mehr als 1,3 m nie eine Höhe von 0 m erreicht wird: Offensichtlich reicht die Ablösung der Grasnarbe darüber hinaus.

Im Tonversuchsgebiet war der Sanierungseffekt insgesamt gering, und die Bodenoberflächenhöhe halbierte sich innerhalb von fünf Tagen nach der Sanierung, was darauf hindeutet, dass die Bodenauflockerung mit Druckluftlanzen in hochplastischen, tonigen Böden nicht den gewünschten Effekt hervorruft. Da die Fläche vor der Messung bewässert wurde, könnte die anschließende Absenkung auf eine natürliche Schrumpfung nach einer bewässerungsbedingten Quellung zurückzuführen sein – eine Hypothese, die durch die Referenzflächen gestützt wird, die eine ähnliche Bodenabsenkung wie die Messflächen aufweist. Kirby et al. (2003) berichten von Höhenunterschieden von bis zu 30 mm in 0,3 m Bodentiefe in Folge von Quellung und Schrumpfung bei Tonböden. Diese Schwankungen sind fast dreimal so groß wie die anfänglichen Höhenänderungen, die durch die Druckluftsanierung erreicht werden. Daraus folgt, dass bei plastischen Tönen die Sanierung von Bodenschadverdichtung im Regelfall der natürlichen Regeneration überlassen werden kann.

Abbildung 30 und Abbildung 31 zeigen eine Abnahme der Bodenoberfläche in Abhängigkeit von der Entfernung zum Sanierungsloch auf allen Testflächen. Die höchsten Erhebungen wurden direkt am Sanierungspunkt gemessen. Betrachtet man das geschaffene Porenvolumen, das sich aus der Veränderung der Bodenoberfläche und der Größe der Kreisfläche um den Belüftungspunkt ergibt, so wird deutlich, dass die größten Auswirkungen bei einem Abstand von 0,5 m zu beobachten sind. Dies deutet darauf hin, dass die von Sanierungsunternehmen gewählten Abstände von 1,0 oder 0,8 m als die effektivsten Arbeitsabstände angesehen werden können. Allerdings sollte berücksichtigt werden, dass die erreichte Hebung bereits bei einem Abstand von 0,4 m um die Hälfte reduziert ist. Das heißt, geringere Abstände zwischen den Belüftungslöchern lassen einen höheren Sanierungserfolg erwarten.

Wird der Abstand zwischen den einzelnen Belüftungslöchern zu stark verringert, kann die Druckluft durch bereits vorhandene Kanäle entweichen. Dieses Problem könnte durch unterschiedliche Belüftungstiefen und -drücke an verschiedenen Sanierungspunkten reduziert werden. Beobachtungen von Smiley et al. (1990) und Kaj (1992) deuten darauf hin, dass sich die Druckluft primär horizontal in der Höhe ausbreitet, in der der Druckluftstoß gegeben wird. Das unterstreicht die Notwendigkeit einer Belüftung in unterschiedlichen Tiefen. Es sind jedoch weitere Untersuchungen erforderlich, um optimale Abstände und Sanierungsmuster für unterschiedliche Situationen definieren zu können.

Um das Maß der erreichten Hebungen zu beurteilen, können die Ergebnisse in den Kontext landwirtschaftlicher Untersuchungen gestellt werden: Durch den Einsatz eines Pfluges konnten Bodenhebungen von 30,9 – 57,3 mm erreicht werden (Herodowicz-Mleczak et al. 2022). Der Einsatz einer Scheibenegge führte dagegen zu deutlich geringeren Bodenhebungen von 13,9 mm bzw. 17,4 mm. Hanna et al. (1993) beobachteten eine Bodenhebung von 8,5 mm bei der Bearbeitung mit einem Grubber bis zu einer Tiefe von 100 mm. Bis zu einer Entfernung von 0,5 m sind die Hebungen auf der Sand- und Schlufffläche mit diesen Werten vergleichbar.

Für eine Betrachtung darüber, um wieviel Prozent das Porenvolumen zugenommen hat, müssen Annahmen über die Ausbreitung der Druckluft gemacht werden. So ist unbekannt, ob sich das neu geschaffene Porenvolumen primär horizontal auf einer Höhe gebildet hat oder sich vertikal in der gesamten Bodensäule verteilt hat. Bei einer gleichmäßigen vertikalen Porenbildung bis in die Belüftungstiefe von 0,4 m und der in Kapitel 9.3.4 bis zu einem Abstand von 0,85 m dargestellten Hebungen, ergibt sich eine Erhöhung des Porenvolumens von 2,65 % für die Sandfläche, 1,63 % für die Schlufffläche und 1,17 % für die Tonfläche. Wird von einer primär horizontalen Ausdehnung ausgegangen – der vertikale Effekt beschränkt sich angenommen auf 0,1 m – dann beträgt die Erhöhung des Porenvolumens 10,60 % für die Sandfläche, 6,52 % für die Schlufffläche und 4,68 % für die Tonfläche. Diese Berechnungen zeigen, dass die Bodenverbesserung über die gesamte Bodensäule von 0,4 m eher geringfügig ist. Ist der Sanierungseffekt dagegen auf eine Tiefenstufe von 0,1 m konzentriert sollten die gewonnenen Porenvolumina ausreichend sein, um eine Verbesserung der Belüftungssituation in diesem Bereich hervorzurufen.

Leider war es in dem Projekt nicht möglich, die Testflächen über einen längeren Zeitraum mit dem Laserscanner zu beobachten und zu messen. Vandalismus und andere Störfaktoren verhinderten insbesondere auf den urbanen Versuchsflächen eine Datenerhebung über längere Zeiträume. Diese Untersuchungen sollten in zukünftigen Studien in einem kontrollierten Umfeld erfolgen.

#### **10.4.2 Bodenkundliche und baumphysiologische Parameter**

Die bodenphysikalischen und bodenbiologischen Messungen bestehen im Gegensatz zum Laserscanner immer nur aus punktuellen Daten. Sie können den Sanierungseffekt nicht auf der ganzen Fläche wiedergeben. Ob ein signifikanter Unterschied zwischen der behandelten Fläche und der nichtbehandelten Referenz vorhanden ist, hängt somit von der Lage der Erhebungspunkte ab.

Ein Großteil der Aufnahmen wurde im Oberboden (0–10 cm) durchgeführt. Die Aufnahmen zeigten hier auf der Schlufffläche bei der Variante nur mit Druckluft und auf der Sandfläche (Variante Druckluft mit Stützgranulat) eine signifikante Verbesserung der Belüftungssituation im Jahr der Sanierung. Die übrigen Varianten blieben im Oberboden ohne oder nur mit einem geringen erkennbaren Effekt. Das heißt, die Ergebnisse durch den Laserscanner werden nur zum Teil bestätigt.

Im Unterboden, wo die Druckluftstöße durchgeführt worden sind, konnte keine Verbesserung der bodenphysikalischen Kennwerte festgestellt werden. Dies kann zum einen daran liegen, dass der von den Druckluftanlagen gelockerte Bereich durch die Messpunkte nicht erfasst worden ist. Zum anderen kann es aber auch daran liegen, dass sich ein Großteil der Druckluft unterhalb der Rasennarbe verteilt

und primär eine Lockerung des Oberbodens, bzw. des Grenzbereichs zwischen Oberboden und Unterboden herbeigeführt hat (vgl. Kap. 9.3.5).

Ein Jahr nach der Sanierungsmaßnahme konnte der anfänglich positive Effekt nicht mehr nachgewiesen werden. Dies bestätigt die Beobachtungen auf der Tonversuchsfläche, wo der Sanierungseffekt nur relativ kurz angehalten hat (Kap. 9.3.2.1). Auch Weltecke et al. (2011) stellten bei einer orientierenden Untersuchung zur Druckluftlanzensanierung eine Rücksackung des Bodens fest. Konsistent damit einhergeht damit, dass keine Reaktion der Bäume festgestellt werden konnte.

Für die Praxis bedeutet dies, dass eine Druckluftlanzensanierung jährlich wiederholt werden müsste, um der Bodenschadverdichtung dauerhaft entgegenzuwirken. Ergänzend oder alternativ ist anzuraten, die Druckluftlanzensanierung mit Maßnahmen zu verknüpfen, die die Bodenbiologie aktivieren. Dies wird in der Praxis im Regelfall gemacht, in dem Dünger, Mykorrhiza und/oder Kompost bei der Injektion mit eingebracht werden. Eine Optimierung des Verfahrens ist außerdem durch eine Kombination mit der Phytomelioration denkbar. Die Lockerungswirkung durch das Edaphon ist allerdings ein langfristiger Prozess, der erst nach mehreren Jahren bis Jahrzehnten messbar sein wird (Ebeling et al. 2016). Ein wissenschaftlicher Nachweis zum Effekt einer Kombination der Maßnahmen steht noch aus.

## 10.5 Phytomelioration

Wurzelwachstum folgt konsequent bestimmten Gesetzmäßigkeiten: Wurzeln wachsen immer in Richtung Luft, Wasser und entlang des geringsten Widerstandes (vgl. Streckenbach 2011). Humose Oberböden vereinen in sich ein lockeres, luftiges und durch Niederschläge zeitweise feuchtes Milieu. Zusätzlich bieten sie den Wurzeln Nährstoffe. Somit ist die hohe Wurzeldichte im Oberboden und die sehr schwache Durchwurzelung des verdichteten Unterbodens auf den drei Untersuchungsstandorten schlüssig.

In Langenhagen haben die Pflanzen der Saatmischung ausschließlich das Saatbett und in geringem Umfang die darunterliegende ca. 8 cm starke Tonschotterschicht durchwurzelt. Die Wurzeln, die sich im ehemaligen Oberboden befanden, waren alle verholzt und konnten somit den Bäumen zugeordnet werden. Offensichtlich hat die Tonschotterschicht aufgrund ihrer Dichtlagerung eine Barriere dargestellt, die von den aufgekommenen Pflanzen der Saatmischung innerhalb des zwei Jahre dauernden Versuchszeitraumes nicht durchdrungen werden konnte.

Auffällig ist, dass selbst die Wurzeln der Stiel-Eichen nicht in den verdichteten Unterboden eingewachsen sind. Offensichtlich stellt der Unterboden in Langenhagen außerhalb der Pflanzgruben einen derart wurzelfeindlichen Lebensraum dar, dass selbst Stiel-Eichen, die grundsätzlich in der Lage sind, verdichtete Bereiche zu durchwurzeln (Kutschera & Lichtenegger 2013; Köstler et al. 1968), nach 50- bis 60-jähriger Standzeit den Boden nicht erschließen konnten. Ursache dafür ist in erster Linie der extrem hohe Verdichtungsgrad des Unterbodens. Zusätzlich wird der sehr niedrige pH-Wert (pH 4,7) und die geringe Nährstoffverfügbarkeit die Erschließung des Unterbodens erschwert haben.

Ein ähnliches Tiefenprofil der Wurzeldichte war in Göttingen zu finden. Auch hier war der Verdichtungsgrad des Unterbodens aufgrund der ehemaligen Nutzung als Kranfläche extrem hoch. Allerdings muss die Tiefendurchwurzelung auf der Göttinger Versuchsfläche mit Einschränkungen betrachtet werden, da der dominierende Spitz-Wegerich, der aus der natürlichen Vegetation stammt, zwar auf lockeren Standorten ein tiefreichendes Wurzelwachstum haben kann, aber nicht für seine Fähigkeiten bekannt ist, verdichtete Böden zu durchdringen (Kutschera et al. 1992). Außerdem betrug die Standzeit der Pflanzen bis zur Untersuchung der Durchwurzelung nur wenige Monate.

Während in Langenhagen und Göttingen keine Wurzeln der Pflanzen aus der Saatmischung im Unterboden vorhanden waren, konnten in Essen vereinzelte Wurzeln der krautigen Pflanzen den Unterboden erschließen. Allerdings war die Wurzeldichte sehr gering und gegenüber der

Referenzfläche nicht signifikant. Ob eine höhere Wurzelerschließung des Unterbodens durch eine längere Standzeit der Saatzpflanzen erreicht werden kann, sollte geprüft werden.

Dass in Essen und Göttingen im Oberboden die Durchwurzelung auf den Referenzflächen höher war als auf den Saatflächen, liegt aller Wahrscheinlichkeit daran, dass sich auf den Saatflächen die Wurzeln neu etablieren mussten, während sie auf den Referenzflächen durch die vorhandene Vegetation schon vorhanden waren. Die Wurzeln, die in Essen auf der Versuchsfläche von der ursprünglichen Vegetation hätten vorhanden sein können, waren offensichtlich in den zwei Jahren bis zur Aufnahme der Wurzeln schon zersetzt. Hinzu kommt, dass die natürliche Vegetation auf den Referenzflächen zu einem großen Teil aus Gräsern bestand, die oftmals ein dichteres Wurzelgeflecht ausbilden, während die Saatzmischung nur einen geringen Anteil Gräser enthielt. In Langenhagen war hingegen kaum krautige Vegetation auf der Referenzfläche vorhanden, sodass dort folgerichtig die Durchwurzelung auf der Referenzfläche geringer war als auf der Saatfläche.

Die Artenzusammensetzung der Versuchsflächen hat gezeigt, dass für eine erfolgreiche Etablierung der Saatzmischung eine gute Flächenvorbereitung unablässig ist. So konnte durch zweimaliges Vertikutieren und Ausbringen einer 2–3 cm dicken Schicht Mutterbodens die vorhandene Vegetation in Essen unterdrückt und die Saatzpflanzen etabliert werden. Auch auf der ansonsten vegetationsfreien Fläche in Langenhagen konnte durch Ausbringung eines Saatzbettes die Saatzmischung erfolgreich etabliert werden. In Göttingen hingegen wurde kein Mutterboden ausgebracht, sodass die natürliche Vegetation auf den Saatflächen dominiert hat. Dabei hat sich insbesondere der Spitz-Wegerich verbreitet. Dieser hat davon profitiert, dass der Boden vor Ausbringung der Saat gefräst wurde. Dabei wurden die Rhizome des Spitz-Wegerichs zerkleinert, sodass aus den Stückchen viele neue Pflanzen entstehen konnten (Gerdes 2022).

Der Rückgang des Deckungsgrades im zweiten Jahr der Standzeit lässt sich durch die Witterungsbedingungen im Jahr 2022 erklären, die deutlich trockener und heißer waren als im Jahr 2021. Zum Zeitpunkt der Aufnahmen im Jahr 2022 war die Vegetation auf den Flächen schon vertrocknet, während sie im Vorjahr noch grün war.

Interessant ist, dass in Langenhagen und Essen von den knapp 30 ausgebrachten Arten die Steinklee- und Kleesorten im ersten Jahr über 90 % des Deckungsgrades ausmachen, diese aber keine ausreichende Tiefendurchwurzelung erreicht haben. Das heißt, dass mit diesen Arten keine Melioration der Bodenschadverdichtung erreicht werden konnte. In zukünftigen Forschungsprojekten sollte daher untersucht werden, ob durch eine andere Artenzusammensetzung und eine Verbesserung der Wachstumsbedingungen durch Wässerung und ggf. Düngung ein besseres Ergebnis erreicht werden kann.

## **11 FAZIT**

### **11.1 Mobiles CO<sub>2</sub>-Messgerät**

Die Gewährleistung einer effizienten Bodenbelüftung im Wurzelraum von Bäumen ist in den letzten Jahren stark in den Fokus der Verantwortlichen in Forst-, Umwelt- und Gartenämtern gerückt. So wurden eigentlich in allen „grünen“ Bereichen Richtlinien zum Schutz vor Bodenverdichtungen erlassen. Auf verdichteten Flächen wird mit aufwendigen Methoden versucht, diese zu sanieren. Bislang mangelte es aber an einem geeigneten Verfahren, um Belüftungsstörungen schnell und kostengünstig zu erkennen, um einerseits Sanierungsbedarf und andererseits Verstöße gegen den verlangten Schutz vor Bodenverdichtung festzustellen. Mit dem vorgestellten neu entwickelten portablen CO<sub>2</sub>-Messgerät ist es nun möglich, schnell und preiswert zu überprüfen, ob:

- Belüftungsstörungen des Wurzelraumes ursächlich für den Zustand eines Baumes sein können (Ausschlussdiagnose),

- eingeleitete Sanierungsmaßnahmen zur Verbesserung der Bodenbelüftung erfolgreich waren (Diagnose),
- bei Baumaßnahmen, wie in der jeweiligen Ausschreibung verlangt, der Boden z. B. im Umkreis der Baumkronen, nicht unzulässig verdichtet wurde (Beweissicherung),
- Maschinen auf den vorgesehenen Fahrwegen geblieben sind und keine unnötige Bodenverdichtung stattfand (Beweissicherung).

## 11.2 Belüftungsrohre und Löcher

In diesem Projektteil konnte ein Computermodell erstellt und validiert werden, mit dem es möglich ist, den Einfluss von Belüftungsrohren und Löchern auf den Bodengashaus zu evaluieren. Basierend auf diesen Ergebnissen können folgende Schlussfolgerungen gezogen bzw. Empfehlungen gegeben werden:

- Je geringer die Gasdurchlässigkeit eines Bodens ist, desto höher ist der Effekt von Belüftungseinrichtungen. Bei der Verwendung von Baumsubstraten bei nicht überbauten Standorten ist der Einsatz von Belüftungsrohren nicht notwendig.
- Ein Belüftungsrohr hat einen leicht höheren Belüftungseffekt als ein gleich dimensioniertes Loch mit Baumsubstrat.
- Der Abstand zwischen zwei Belüftungsrohren oder Löchern sollte so gering wie möglich sein, aber 1,50 m nicht übersteigen.
- Die Anzahl und Dimension der Schlitze der verwendeten Belüftungsrohre sind ausreichend, um den gleichen Belüftungseffekt zu erzielen wie ein Loch mit dem gleichen Durchmesser des Rohres.
- Eine schlechte Bodenbelüftung aufgrund eines geringen Porenvolumens kann durch Belüftungsrohre und Belüftungslöcher nicht vollständig ausgeglichen werden.
- Je größer der Durchmesser der Belüftungseinrichtung ist, desto größer ist deren Einfluss.
- Flächenbelüftungen sind effektiver als Belüftungsrohre und Löcher.
- Bei Druckluftlanzensanierung sollten die Lanzenlöcher nicht mit Granulat verfüllt werden, sondern offengelassen werden.

## 11.3 Druckluftlanzen

Aus den vorliegenden Untersuchungen im Projektteil Druckluftlanzen lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen:

- Der Erfolg der Bodensanierung mit Druckluftlanzen wird erheblich von der Bodenart beeinflusst. Sandige Standorte weisen im Vergleich zu schluffigen und tonigen Standorten eine größere Bodenhebung auf.
- Von den untersuchten Optionen erwies sich die Kombination aus Druckluft und Stützgranulat als am wirksamsten, während die Sanierung mit Wassereinsatz die geringste Wirkung hatte.
- Die Sanierungsergebnisse stehen in engem Zusammenhang mit der Dichte des Sanierungsrasters. Ein geringerer Abstand zwischen den Sanierungspunkten wird den Sanierungserfolg auf allen Versuchsflächen erhöhen. In Anbetracht der Wirtschaftlichkeit und Wirksamkeit der Belüftung kann ein Abstand von 1 Meter zwischen den Injektionslöchern empfohlen werden.
- Je größer die Verdichtung eines Bodens ist, desto größer ist das Potenzial neue Poren zu schaffen, also desto größer ist der zu erwartende Sanierungseffekt.
- Eine unzureichende Verzahnung zwischen zwei Horizonten kann dazu führen, dass sich die Druckluft dazwischen entlädt, was den Sanierungserfolg deutlich reduziert.

- Stützgranulat sollte so beschaffen sein, dass es der Druckluftanwendung standhält und seine Korngröße beibehält.
- Die Menge des nach dem Druckluftimpuls eingebrachten Stützgranulats ist im Vergleich zum geschaffenen Porenvolumen unzureichend und muss in zukünftigen Sanierungsmaßnahmen angepasst werden.
- Eine lokale Verbesserung der Bodenbelüftung ist bei einem geringen vertikalen Wirkungsgradienten zu erwarten. Daher ist es ratsam, die Belüftungstiefe mehrmals direkt im verdichteten Horizont zu variieren, um optimale Ergebnisse zu erzielen.
- Die Wirkung einer Druckluftlanzensanierung ist nach einem Jahr nicht mehr nachweisbar. Das heißt, eine jährliche Wiederholung der Maßnahme ist notwendig und/oder eine Kombination mit Maßnahmen zur Aktivierung des Bodenlebens.

Die Sanierung mit Druckluftlanzen ist ein vielversprechendes Verfahren zur Verringerung der Bodenverdichtung. In Anbetracht der Komplexität und der Vielzahl der beteiligten Parameter ist es jedoch nicht ratsam, im Sinne von "hinfahren und sanieren" zu arbeiten. Die Bodenart und die Lage des Verdichtungshorizontes sollten vor der Sanierung bestimmt werden, um Parameter wie Sanierungsabstand, Belüftungstiefe, Druck, sowie die Menge erforderliche Menge an Stützgranulat anzupassen und ein optimales Ergebnis zu erzielen.

#### **11.4 Phytomelioration**

Die Ergebnisse zeigen, dass eine Sanierung der verdichteten Böden auf den Untersuchungsstandorten durch die ausgebrachte Saatmischung aus tief- und intensiv wurzelnden Pflanzen in einer zweijährigen Standzeit nicht erreicht werden konnte. Die positiven Erfahrungen aus der land- und forstwirtschaftlichen Praxis und Forschung zur Sanierung von Bodenschadverdichtung mit krautigen Pflanzen sowie die Erschließung schadverdichteter Bereiche durch einige Wurzeln auf dem Standort in Essen lassen erwarten, dass eine längere Standzeit der Saatmischung und eine Verbesserung der Wachstumsbedingungen durch Wässerung und ggf. Düngung zu einer besseren Erschließung des Unterbodens führen kann.

Weiterhin ist für ein Gelingen der Meliorationspflanzung essenziell, dass:

- die Standortbedingungen wie z. B. der Verdichtungsgrad und der pH-Wert eine Erschließung durch Pflanzenwurzeln grundsätzlich noch erlaubt und
- der Oberboden den Pflanzenwurzeln keinen übermäßig attraktiven Lebensraum bietet, sodass diese das Bestreben haben, weitere Bodenbereiche zu erschließen.

Wichtig sind hier weitere Forschungen, um zu untersuchen, unter welchen Bedingungen und nach welcher Standzeit ein Erfolg zu erwarten ist.

#### **11.5 Synthese**

In einer synthetischen Betrachtung der Projektergebnisse, anderen wissenschaftlichen Untersuchungen und praktischen Erfahrungen werden Empfehlungen zur Sanierung von Bodenschadverdichtung bei verschiedenen standörtlichen Voraussetzungen gegeben (Tabelle 9). Vorausgesetzt wird, dass die Durchführung der Verfahren entsprechend der in diesem Projekt gewonnenen Erkenntnisse erfolgt.

Die Farben in Tabelle 9 haben folgende Bedeutung:

- Grün: Das Verfahren ist bei den jeweiligen Standortseigenschaften grundsätzlich geeignet und/oder der jeweilige Standortparameter beeinträchtigt nicht die Anwendbarkeit des Verfahrens.

- Rot: Das Verfahren ist bei den jeweiligen Standortsvoraussetzungen ungeeignet bzw. nicht zielführend.
- Orange: Die Anwendung des Verfahrens ist nur eingeschränkt zielführend oder bestimmte Voraussetzungen müssen erfüllt sein, damit das Verfahren angewendet werden kann. Diese Voraussetzungen stehen in der jeweiligen Zelle.
- Blau: Eine abschließende Beurteilung auf Basis der bisherigen Kenntnisse ist nicht möglich; weitere Untersuchungen müssen erfolgen.

Da sich die Vielzahl an urbanen Standortmerkmalen nicht abschließend tabellarisch festhalten lässt, dient diese Übersicht als grobe Orientierung. Die Übersicht macht deutlich, dass insbesondere im Bereich der Druckluftanzersanierung und der Phytomelioration weiterer Forschungsbedarf herrscht. Aber auch bei den Verfahren, die aufgrund der Forschungsergebnisse grundsätzlich eine Verbesserung der Situation erwarten lassen, ist zum jetzigen Zeitpunkt oftmals noch nicht abschließend beurteilbar, ob die Verbesserung für ein vitales Wachstum der Bäume ausreicht.

*Tabelle 9: Eignung der Verfahren zur Sanierung von Bodenschadverdichtung bei verschiedenen Standortbedingungen. Grün: grundsätzlich geeignet, orange: bedingt geeignet oder nur eingeschränkt zielführend, rot: nicht geeignet, blau: Beurteilung erfordert weitere Untersuchungen.*

Vorrangige Standorteigenschaft	Belüftungsrohre und Löcher	Flächenbelüftung	Druckluftanlagen	Phytomelioration
Sand	Rot	Orange	Grün	Blau
Schluff	Grün	Grün	Grün	Blau
Ton	Grün	Grün	Rot	Blau
Lehm	Grün	Grün	abhängig vom Tonanteil	Blau
Baumsubstrat	Rot	Orange	Blau	Blau
oberflächennahe Verdichtung	abhängig von Bodenart	Grün	Blau	Blau
lockerer Oberboden über verdichtetem Unterboden	abhängig von Bodenart	Grün	abhängig von Bodenart	Rot
scharfe Übergänge zwischen Ober- und Unterboden	abhängig von Bodenart	Grün	Rot	Rot
Stark steinige Böden	Orange	Orange	Blau	Blau
Objekte wie Leitungen und Kampfmittel	Rot	Abhängig von der Tiefe der Objekte	Rot	Orange
Versiegelung	abhängig von Bodenart	Grün	Blau	Rot
Stauwasser	abhängig von Stärke des Stauhorizontes	ggf. geeignet als Drainagehorizont	Blau	Blau
geringe Bodenfeuchte	abhängig von Bodenart	Orange	Rot	Blau

## 12 WEITERER FORSCHUNGSBEDARF

Die bisherigen Untersuchungen zeigen, dass die untersuchten Verfahren Potenzial haben, Bodenschadverdichtung auf urbanen Baumstandorte zu sanieren. Dennoch zeigen die Studien, dass es weiterhin Forschungsbedarf gibt, um die Verfahren in der Praxis erfolgreich und nachhaltig einzusetzen. Schwerpunkte der weiteren Forschung müssen daher sein:

1. Erforschung der Einflussfaktoren: Es besteht Bedarf an weiteren umfassenden wissenschaftlichen Studien, die den Wirkungsgrad der Druckluftlanzensanierung und der Phytomelioration bei verschiedenen Einflussfaktoren wie unterschiedliche Bodenarten, Bodenschichten und Bodenfeuchten untersuchen. Dies würde dazu beitragen, ein genaueres Bild von den potenziellen Effekten und Grenzen dieser Maßnahmen zu erhalten.
2. Verfahrensoptimierung und Entwicklung von Standards: Die Effektivität der Druckluftlanzensanierung muss weiter optimiert werden. Dafür müssen insbesondere Untersuchungen gemacht werden, bei welchen Drücken und Sanierungsmustern und mit welchen zusätzlichen Maßnahmen wie z. B. Einbringen von Bodenhilfsstoffen die besten Ergebnisse erzielt werden. Ziel muss es sein, allgemeingültige Standards für Anwender zu entwickeln.
3. Pneumatische Flächenbelüftung (im englischen Sprachraum als ‚air tillage‘ bekannt): Bei der pneumatischen Flächenbelüftung wird der Boden mit einer Druckluftlanze flächig aufgewühlt, sodass die Bodenkörner einzeln oder in kleinen Aggregaten vorliegen (Scharenbroch et al. 2014)). Dieses Verfahren ist in Deutschland weitestgehend unbekannt, gilt aber im englischsprachigen Raum als bevorzugtes Sanierungsverfahren. Untersuchungen sollten darauf abzielen, unter welchen Voraussetzungen dieses Verfahren angewendet werden kann.
4. Kombination von Sanierungsverfahren: Weitere Untersuchungen sollten sich darauf konzentrieren, ob eine Maximierung des Sanierungserfolgs durch eine Kombination der Druckluftlanzensanierung, Phytomelioration und der pneumatischen Flächenbelüftung erreicht werden kann.
5. Bewertung der Langzeitwirkung: Es ist wichtig, die Langzeitwirkung der Verfahren auf die Bodenstruktur, die Bodenfruchtbarkeit und die Bäume zu bewerten, um die Nachhaltigkeit der Sanierungsmethoden zu beurteilen.
6. Einfluss von Konvektion auf die Effektivität von Belüftungsrohren und Löchern: Neben Diffusion kann der Bodenluftaustausch durch Konvektion, induziert z. B. durch Wind, Luftdruckunterschiede, Temperaturgradienten oder Grundwasserschwankungen. Es muss geklärt, inwieweit solche Faktoren den Belüftungseffekt von Belüftungseinrichtungen verbessern.
7. Einfluss von Belüftungseinrichtungen auf Baumwurzeln: Offen ist weiterhin die Frage, welchen Effekt Belüftungsrohre und Löcher auf das Wurzelwachstum haben. Hier sind Untersuchungen an Belüftungseinrichtungen notwendig, die vor mehreren Jahren installiert worden sind.

## 13 VERÖFFENTLICHUNG DER ERGEBNISSE

Die Ergebnisse des Forschungsprojektes wurden bereits in mehreren Veröffentlichungen und Vorträgen publiziert. Weitere Veröffentlichungen in per-reviewed Journals und in deutschsprachigen Fachzeitschriften sind in Bearbeitung. Ebenso sind bereits weitere Vorträge auf Baumpflegeportalen vorgesehen, wie z. B. auf dem Baumsymposium in Münster-Wohlbeck am 29.08.2024 oder den Deutschen Baumpflegetag in Augsburg 2025. Außerdem finden die Ergebnisse Eingang in die Lehre bei den Arboristen an der HAWK, in einer Erweiterung des ‚Praxishandbuch Wurzelraumsprache‘ (Benk et al. 2021) und in diversen bodenbezogenen Seminaren.

## **Veröffentlichungen**

Löwe, O.; Weltecke, K.; Gaertig, T. (2024): Sanierung von Bodenschadverdichtung an urbanen Baumstandorten. AFZ-DerWALD 4/2024, S. 13–16.

Weltecke, K.; Löwe, O.; Gaertig, T. (2023): Sanierung von Bodenschadverdichtung. In: Bouillon, J. (Hrsg.): 39. Osnabrücker Baumpflegetage - Tagungsband. Patzer Verlag, Hannover, S. 17–28.

Gaertig, T., Löwe, O., Kurth, E.W., Thiers, O. Weltecke, K. (2023): Identifikation von Belüftungsstörungen im Boden mit einem praxistauglichen mobilen CO<sub>2</sub>-Messgerät. In: Dujesiefken, D., (Hrsg.): Jahrbuch der Baumpflege 2023. Haymarket Media, Braunschweig, 247-254.

Gaertig, T., Löwe, O., Kurth, E.W., Thiers, O. Weltecke, K. (2023): Identifikation von Belüftungsstörungen im Boden mit einem praxistauglichen mobilen CO<sub>2</sub>-Messgerät. TASPO 2/23. Haymarket Media, Braunschweig, 52-55.

Löwe, O., K., Seidel D., Weltecke, K., Gaertig, T. (2023): Einsatz von Druckluftpflanzen im Boden – Quantifizierung des Sanierungserfolges mittels Laserscanaufnahmen der Bodenoberfläche. In: Dujesiefken, D., (Hrsg.): Jahrbuch der Baumpflege 2023. Haymarket Media, Braunschweig, S. 56-69.

Weltecke, K., Löwe, O., Gaertig, T. (2023): Sanierung von Bodenschadverdichtungen mit Pflanzen. In: Dujesiefken, D., (Hrsg.): Jahrbuch der Baumpflege 2023. Haymarket Media, Braunschweig, 281-291.

Löwe O., Weltecke, K., Gaertig, T. (2022): Sanierung von urbanen Baumstandorten. Tagungsband 7. Fachtagung der Baumkontrolleure in Frankfurt, 17-18.05.2022. Patzer Verlag, Berlin. 54.S. ISBN: 978-3-87617-171-5

## **Vorträge**

Weltecke, K. (2024): Sanierung von Bodenschadverdichtung urbaner Baumstandorte. VulkaTec–Stadtbaum-Seminar, Heidelberg, Berlin, Essen. 26.01.2024, 16.02.2024 und 23.02.2024.

Löwe, O. (2024): Bodenschadverdichtung – Erkennen und sanieren. Humberg-Seminar 2024, Leipzig. 13.03.2024.

Weltecke, K. (2023): Bodenschadverdichtung – Erkennen und sanieren. Humberg-Seminar 2023, Stift Tilbeck, Harvixbeck. 18.10.2023.

Löwe, O. (2023): Projekt SANURBAUM, Grenzen und Möglichkeiten der Druckluftpflanzensanierung, EXPERTENAUSTAUSCH GALABAU, Magdeburg. 11.10.2023.

Löwe, O. (2023): SANURBAUM- Druckluftpflanzensanierung 2020-2023, 22. Kommunalen Baumpflegetag Rhein-Main 2023, Geisenheim. 03.10.2023

Löwe, O., Weltecke, K. (2023): Sanierung von Bodenverdichtungen in urbanen Böden. Möglichkeiten und Grenzen technischer und biologischer Maßnahmen. Baumpraxis, Schloss Dyck. 27.09.2023,

Löwe, O. (2023): Projekt Sanurbaum Bodenschadverdichtung identifizieren und sanieren, 31. Nordische Baumtage. 06.07.2023.

Gaertig, T., Löwe, O., Kurth, E.W., Thiers, O. Weltecke, K. (2023): Identifikation von Belüftungsstörungen im Boden mit einem praxistauglichen mobilen CO<sub>2</sub>-Messgerät. Deutsche Baumpflegetage, Augsburg. 25.04 - 27.04 2023.

Löwe, O., K., Seidel D., Weltecke, K., Gaertig, T. (2023): Einsatz von Druckluftpflanzen im Boden – Quantifizierung des Sanierungserfolges mittels Laserscanaufnahmen der Bodenoberfläche. Sanierung von Bodenschadverdichtungen mit Pflanzen. Deutsche Baumpflegetage, Augsburg. 25.04 - 27.04 2023.

Weltecke, K., Löwe, O., Gaertig, T. (2023): Sanierung von Bodenschadverdichtungen mit Pflanzen. Deutsche Baumpflegetage, Augsburg. 25.04 - 27.04 2023.

Löwe, O. (2022): Sanierung von urbanen Baumstandorten. 7. Fachtagung der Baumkontrolleure in Frankfurt. 17-18.05.2022.

Löwe, O., Kurth, E.W. Weltecke, K., Gaertig, T (2022).: Mobiles CO<sub>2</sub>-Messgerät zur Analyse der CO<sub>2</sub> -Konzentration in der Bodenluft. Jahrestagung der deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft 2022. Trier. 08.09.2022.

Löwe, O., Kurth, E.W., Weltecke, K., Gaertig, T (2022): Mobile CO<sub>2</sub> measuring device for analysing the CO<sub>2</sub> concentration in the soil air. SUITMA 11th Conference on Soils of Urban, Industrial, Traffic, Mining and Military Areas 2022. Berlin. 05.09.2022.

## 14 DANKSAGUNG

Die Untersuchungen fanden im Rahmen des von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) geförderten Forschungsprojektes SANURBAUM (Sanierung von Bodenschadverdichtung urbaner Baumstandorte) an der Hochschule für Angewandte Wissenschaft und Kunst, Fakultät Ressourcenmanagement, Göttingen, statt. Wir bedanken uns für die Förderung und die tolle Zusammenarbeit mit den Projektpartnern, die dieses Projekt erst möglich gemacht haben. Namentlich sind dies:

- AGFW
- Amtage Landschaftsarchitektur und Sachverständigenbüro
- Baum und Boden
- Benk GmbH
- Blattwerker
- Eichhorn Baumpflege
- Feldsaaten Freudenberger GmbH & Co. KG
- Funke Kunststoffe GmbH
- GEFA Produkte Fabritz GmbH
- Institut für Unterirdische Infrastruktur (IKT)
- Kaeser Kompressoren SE Coburg
- Humberg GmbH
- MTM Spindler & Schmid GmbH
- Sachverständigenbüro Eiko Leitsch (Jetzt Baum4 GmbH)
- Sachverständigenbüro für Urbane Vegetation
- Terrafit
- TFI Vitaleres Grün GmbH
- Vogt Baugeräte GmbH
- Stadt Bad Arolsen
- Stadt Darmstadt
- Stadt Essen
- Stadt Göttingen
- Stadt Langenhagen
- Stadt Norderstedt

Unser besonderer Dank gilt dem Projektbeirat, die dieses Projekt wissenschaftlich begleitet haben, namentlich:

- Prof. Dr. Rust (HAWK Göttingen),
- Prof. Dr. Rinklebe (Bergische Universität Wuppertal) und

- Prof. Dr. Stützel (Ruhr-Universität Bochum).

## 15 LITERATUR

Arbeitskreis Standortkartierung in der Arbeitsgemeinschaft Forsteinrichtung (2016): Forstliche Standortaufnahme. 7. Auflage. IHW-Verlag und Verlagsbuchhandlung, Eching, 400 S.

Ball, B. C. (1987): Air permeability and gas diffusion measurements to quantify soil compaction. In: Monnier, G.; Goss, M. J. (Hrsg.): Soil compaction and regeneration: proceedings of the workshop on soil compaction: Consequences and Structural Regeneration Process. Balkema, Rotterdam, 15–23.

Ball, B. C., Schjønning, P. (2002): 4.4 Air Permeability, in Dane, J. H., Clarke Topp, G., Dane, J. H., Topp, G. C., Campbell, G. S.: Methods of soil analysis: Part 4: Physical methods. Number 5 in the Soil Science Society of America book series. Soil Science Society of America, Madison, Wis, S. 1141–1158.

Benk, J.; Artmann, S.; Kutscheidt, J.; Müller-Inkmann, M.; Streckenbach, M.; Weltecke, K. (2021): Praxishandbuch Wurzelraumsprache. 2. überarbeitete Auflage. Arbeitskreis Baum im Boden, Möhnese, 206 S.

Blume, H.-P. (2010): Bodenkundliches Praktikum: Eine Einführung in pedologisches Arbeiten für Ökologen, insbesondere Land- und Forstwirte, und für Geowissenschaftler. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg.

Böhm, W. (1979): Methods of Studying Root Systems. Springer Berlin / Heidelberg, Berlin, Heidelberg, S. 202.

Cannell, R. Q. (1977): Soil Aeration and Compaction in Relation to Root Growth and Soil Management. In: Applied Biology, Vol. II. London: Academic Press, Inc., pp. 1–86.

Chang, H. T.; Loomis, W. E. (1945): Effect of carbon dioxide on absorption of water and nutrients by roots. In *Plant Physiology* (20 (2)), pp. 221–232

Core Team (2018): R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>.

DIN-Deutsches Institut für Normung e. V. (2019): DIN 66137-2:2019-03: Bestimmung der Dichte fester Stoffe - Teil 2: Gaspyknometrie. Beuth-Verlag, Berlin, 15 S.

Dubberke, L. (2023): Die Verteilung von Granulat im Boden nach der Injektion durch eine Druckluftlanze. Bachelorarbeit im Studiengang Arboristik. Hochschule für Angewandte Wissenschaft un Kunst (HAWK), Fakultät Ressourcenmanagement, Göttingen, 41 S.

Ebeling, C., Lang, F., Gaertig, T. (2016): Structural Recovery In Three Selected Forest Soils After Compaction By Forest Machines In Lower Saxony, Germany. *Forest Ecology And Management* 359, Pp. 74-82. Doi:10.1016/J.Foreco.2015.09.045.

Eberhardt, E. (2022): Die neue Bodensystematik, die Substratsystematik und die neuen Horizontsymbole – Überblick und Prinzipien. Tagungsbeitrag zur Jahrestagung der DBG, Kommission V. Trier, 05.–08.09.2022.

Eichler, S. (2020): Mit Tiefgang. *Forschungsfelder* 1/20, S. 31-32.

Embrén, B.; Alvem, B.-M.; Grönjard, R. (2017): Planting beds in the City of Stockholm – a handbook. 3rd edition 2017. 28 S. Online unter: [https://www.tdag.org.uk/uploads/4/2/8/0/4280686/planting\\_beds\\_in\\_the\\_city\\_of\\_stockholm\\_v4.5.pdf](https://www.tdag.org.uk/uploads/4/2/8/0/4280686/planting_beds_in_the_city_of_stockholm_v4.5.pdf). Zuletzt aufgerufen am 21.03.2024.

Felser, M. (2017): Möglichkeiten zur Sanierung von schädlich verdichteten urbanen Standorten durch Pflanzen. Bachelorarbeit im Studiengang Arboristik, HAWK, Fak. Ressourcenmanagement, Göttingen, 53 S.

FGSV – Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen e. V. (1999): RAS - LP 4: Richtlinie für die Anlage von Straßen – Teil: Landschaftspflege, Abschnitt 4: Schutz von Bäumen, Vegetationsbeständen und Tieren bei Baumaßnahmen. FGSV, Köln.

FGSV – Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen e. V. (2019): Merkblatt für die Erhaltung von Verkehrsflächen mit Baumbestand. FGSV, Köln. 34 S.

FLL (Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e. V.) (2010): Empfehlungen für Baumpflanzungen – Teil 2: Standortvorbereitungen für Neupflanzungen; Pflanzgruben und Wurzelraumerweiterungen, Bauweisen und Substrate. FLL, Bonn, 62 S.

Foerster, T., Gaertig, T., Kuhnke F.: (2012): Messtechnische Möglichkeiten zur Beurteilung der Belüftungssituation von Böden über deren CO<sub>2</sub>-Gehalt. In: Dujesiefken, D. (Hrsg.): Jahrbuch der Baumpflege 2012. Haymarket Media, Braunschweig, 259-264.

Fründ, H.-C.; Averdiek, A., Müller-Inkmann, M.; Hemker, O. (2013): Bodenperforation (Lochstanzen) als Maßnahme zur Behandlung von Fahrspurverdichtungen im Wald. Tagungsbeitrag zu: Jahrestagung der DBG, Kommission VI. 7.-12. September 2013, Rostock. Online unter: [https://eprints.dbges.de/965/1/Bodenperforation\\_final.pdf](https://eprints.dbges.de/965/1/Bodenperforation_final.pdf). Zuletzt aufgerufen am 09.03.2024.

Fründ, H.-C.; Gaertig, T. (2012–2017): Entwicklung von Verfahren zur Steigerung des Regenerationspotenzials der Böden von Rückegassen. Hochschule Osnabrück und HAWK Hildesheim/Holzminden/Göttingen, 185 S.

Fründ, H.-C., Jordan, B. (2003): Regenwurmerfassung mit Senf oder Formalin? Versuche zur Eignung verschiedener Senfzubereitungen für die Austreibung von Regenwürmern 29.

Gerdes, G. (2022): Sanierung von Bodenschadverdichtung mittels tief- und intensiv wurzelnder Pflanzen. Bachelorarbeit. Hochschule für Angewandte Wissenschaft und Kunst (HAWK), Fakultät Ressourcenmanagement, Göttingen, 46 S.

Gliński, J.; Stępniewski, W. (1985): Soil aeration and its role for plants. CRC Press, Boca Raton Fla., 229 S.

Hartge, K. H., Horn, R. (2020): Die physikalische Untersuchung von Böden. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, p. 178.

Hanna, H. M.; Marley, S.; Erbach, D.; Melvin, S. (1993): Change in Soil Microtopography by Tillage with a Sweep. Online verfügbar unter <https://dr.lib.iastate.edu/entities/publication/f4506222-dc15-44d2-b9a0-37c5a6cec50c>.

Herodowicz-Mleczak, K.; Piekarczyk, J.; Kaźmierowski, C.; Nowosad, J.; Mleczak, M. (2022): Estimating Soil Surface Roughness With Models Based on the Information About Tillage Practises and Soil Parameters. In: J Adv Model Earth Syst 14 (3), Artikel e2021MS002578, e2021MS002578. DOI: 10.1029/2021MS002578.

Islam, A. F. M. S.; Kitaya, Y.; Hirai, H.; Yanase, M.; Mori, G.; Kiyota, M. (199): Growth characteristics and yield of carrots grown in a soil ridge with a porous tube for soil aeration in a wet lowland. Scientia Horticulturae 77, S. 117–124.

James, M. R.; Robson, S.; Smith, Mark W. (2017): 3-D uncertainty-based topographic change detection with structure-from-motion photogrammetry: precision maps for ground control and directly georeferenced surveys. In: Earth Surf. Process. Landforms 42 (12), S. 1769–1788. DOI: 10.1002/esp.4125.

- Kaj, R. (1992): Soil Physical Effects of Pneumatic Subsoil Loosening using a terralift Soil Aerator. In: Journal of Arboriculture, 1992 (18(5)), S. 235–240.
- Köstler, H. J.; Brückner, E.; Bibelriether, H. (1968): Die Wurzeln Der Waldbäume - Untersuchungen zur Morphologie der Waldbäume. Verlag Paul Parey Hamburg, Berlin 284 S.
- Krück, S. (2018): Bildatlas zur Regenwurmbestimmung: Mit einem Kompendium der Regenwurmfaua des Nordostdeutschen Tieflands. Natur + Text, Rangsdorf, p. 196.
- Kuhnke, F., Gaertig T. (2012): Deutsches Patent und Markenamt. Patentschrift: Vorrichtung zur Analyse kleinvolumiger Bodengasproben am 27.04.2012. Veröffentlichungsnr: DE 10 20212 008 584 B3 2013.06.13.
- Kutschera, L.; Lichtenegger, E.; Sobotik, M. (1992): Wurzelatlas mitteleuropäischer Grünlandpflanzen, 2. Band. Pteridophyta und Dicotyledoneae. Fischer, Stuttgart, 851 S.
- Kutschera, L.; Lichtenegger, E.; (2013): Wurzelatlas mitteleuropäischer Gehölze, 6. Band der Wurzelatlasreihe, 2. Auflage. Leopold-Stocker Verlag, Graz, Stuttgart, 604 S.
- Loftfield, N. S.; Brumme, R.; Beese, F. (1992): Automated monitoring of nitrous oxide and carbon dioxide flux from forest soils. Soil Science Society of America Journal 56, 1147–1150.
- MacDonald, J. D.; Costello, L. R.; Lichter, J. M.; Quickert, D. (2004): Fill soil effects on soil aeration and tree growth. Journal of Arboriculture 30(1), S. 19–21.
- Marrero, T. R.; Mason, E. A. (1972): Gaseous diffusion coefficients. Journal of Physical and Chemical Reference Data 1, 3–118.
- Mattheck, C.; Bethge, K.; Weber, K.; Tesari, I. (2021): Klimafester Baum? – Biomechanische Anpassung der Baumwurzel an den Trockenstress. Forschungszentrum Karlsruhe GmbH und Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe, Kindle Ausgabe, 96 S.
- Pérez-Harguindeguy, N.; Díaz, S.; Garnier, E.; Lavorel, S.; Poorter, H.; Jaureguiberry, P.; Bret-Harte, M. S.; Cornwell, W. K.; Craine, J. M.; Gurvich, D. E.; Urcelay, C.; Veneklaas, E. J.; Reich, P. B.; Poorter, L.; Wright, I. J.; Ray, P.; Enrico, L.; Pausas, J. G.; Vos, A. C. de; Buchmann, N.; Funes, G.; Quétier, F.; Hodgson, J. G.; Thompson, K.; Morgan, H. D.; Steege, H. ter; Sack, L.; Blonder, B.; Poschlod, P.; Vaieretti, M. V.; Conti, G.; Staver, A. C.; Aquino, S.; Cornelissen, J. H. C. (2016): Corrigendum to: New handbook for standardised measurement of plant functional traits worldwide. Aust. J. Bot. 64, 715.
- Porterfield, D. M. und Musgrave, M. E. (1998): The tropic response of plant roots to oxygen: oxytropism in *Pisum sativum* L.. Planta, Vol. 202, S. 1–6.
- Reichwein, S. (2002): Baumwurzeln unter Verkehrsflächen. Beiträge zur räumlichen Planung 66. Hannover, 306 S.
- Roloff, A. (2013): Bäume in der Stadt. Besonderheiten – Funktionen – Nutzen – Arten – Risiken. Eugen Ulmer KG, Stuttgart (Hohenheim), 254 S.
- Röper, A. M. (2021): Untersuchungen zur Optimierung der Bedienung eines neu entwickelten Messgeräts zur Bestimmung der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Bodenluft. Bachelorarbeit, Fakultät Ressourcenmanagement. 38 S.
- Schack-Kirchner, H. (1994): Struktur und Gashaushalt von Waldböden. Forschungszentrum Waldökosysteme der Georg-August Universität, Reihe A 112, Göttingen, 145 S.
- Schack-Kirchner, H. (1996): Ansätze zur Erhebung quantitativer Strukturparameter im Rahmen der Bodenzustandserfassung im Wald. Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft 79, 157–160.

Schack-Kirchner, H.; Gaertig, T.; Wilpert, K. von; Hildebrand, E. E. (2001): A modified McIntyre and Philip approach to measure topsoil gas diffusivity in-situ. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 164, 253–258.

Scharenbroch, B. C.; Smiley, E. T.; Kocher, W. (2014): Best Management Practices – Soil management for urban trees. ISA (International Society of Arboriculture (Hrsg.)), Martin One Source, Champaign, Illinois, USA, 37 S.

Seidel, D. (2018): A holistic approach to determine tree structural complexity based on laser scanning data and fractal analysis. *Ecology and evolution* 8, 128–134.

Sense Air AB (2022): SE-82060 Delsbo, Schweden, Datenblatt des Sensors K33 ICB. [www.senseair.com](http://www.senseair.com). Zugriff am 28.11.2022.

Smiley, E. T.; Watson, G. W.; Fraedrich, B. R.; Booth, D. C. (1990): Evaluation of soil aeration equipment. In: *Journal of Arboriculture*, 1990 (16(5)), S. 118–123.

Stahr, K., Kandeler, E., Herrmann, L., Streck, T. (2020): *Bodenkunde und Standortlehre*. utb GmbH, Stuttgart.

Streckenbach, M. (2011): Wurzelwachstum an naturfremden Standorten. In: Roloff, A.; Thiel, D.; Weiss, H. (Hrsg.): *Aktuelle Fragen der Baumpflege, Baumverwendung und Jungbaumpflege*. Forstwissenschaftliche Beiträge Tharandt, Beiheft 10, S. 5–17.

*VDLUFA* (2016): *Handbuch der Landwirtschaftlichen Versuchs- und Untersuchungsmethodik*. VDLUFA-Verlag Darmstadt.

Weltecke, K.; Gaertig, T.; Diers, M. (2011): Orientierende Untersuchung zur pneumatischen Sanierung von Bodenschadverdichtung. In: Dujesiefken, D. (Hrsg.): *Jahrbuch der Baumpflege 2011*. Braunschweig: Haymarket Media, S. 280–285.

Weltecke, K. (2012): *Untersuchung der Bodenbelüftung forstlicher und urbaner Baumstandorte*. Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades der Naturwissenschaften der Fakultät für Forst- und Umweltwissenschaften, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Brsg., 212 S.

Weltecke, K.; Gaertig, T. (2012a): Influence of soil aeration on rooting and growth of the Beuys-trees in Kassel. In *Urban Forestry & Urban Greening* (11 (3)), pp. 329–338.

Weltecke, Katharina; Gaertig, Thorsten (2012b): Geht unseren Bäumen die Luft aus? Möglichkeiten und Grenzen der Diagnose von Bodenbelüftungsstörungen städtischer Baumstandorte. In: Dujesiefken, D. (Hrsg.): *Jahrbuch der Baumpflege 2012*. Braunschweig: Haymarket Media.

Wilmanns, O. (1989): *Ökologische Pflanzensoziologie*. 4. Auflage. Quelle & Meyer, Heidelberg, Wiesbaden, 378 S.