

Geht unseren Bäumen die Luft aus?

Möglichkeiten und Grenzen der Diagnose von Bodenbelüftungsstörungen städtischer Baumstandorte

Assessment of soil aeration deficiencies at urban sites – potentialities and limits

von *Katharina Weltecke und Thorsten Gaertig*

Zusammenfassung

Zur Diagnose von Belüftungsstörungen steht eine Vielzahl von Untersuchungsmethoden zur Verfügung. Die Besonderheiten städtischer Standorte stellt die Anwendbarkeit vieler Parameter allerdings in Frage. Bei drei Studien in Göttingen und Kassel wurden auf verschiedenen städtischen Standorten von Buchen und Eichen die ökologische Relevanz und praktische Anwendbarkeit verschiedener bodenphysikalischer Belüftungsparameter untersucht.

Alle getesteten Parameter zeigten mit sinkender Bodenbelüftung einen Rückgang der Feinwurzel-dichte oder des Baumwachstums sowohl von Buche als auch Eiche. Die höchste ökologische Aussagekraft, aber auch den höchsten finanziellen und arbeitstechnischen Aufwand besitzt der Gaskoeffizient. Die Lagerungsdichte hat eine relativ geringe Aussagekraft, besticht aber durch ihre einfache Anwendbarkeit. Die CO₂-Konzentration ist im Gegensatz zu naturbelassenen Standorten auf vielen städtischen Standorten aufgrund des gestörten natürlichen C-Kreislaufs nicht anwendbar.

Summary

A variety of soil physical methods is available to diagnose soil aeration deficiencies. But the typical characteristics of urban sites call the applicability of many parameters into question. Three studies were performed in Göttingen and Kassel, Germany, at different urban sites of beech and oak trees to examine the ecological relevance and the practical feasibility of different soil physical aeration parameters.

All investigated parameters indicated with decreasing soil aeration a decrease of fine root density or tree growth of beech and oak trees. The relative gas diffusivity has the highest ecological relevance but requires the highest financial and labor effort. Bulk density has a relatively low force of expression, but impresses with the ease of application. Topsoil CO₂-concentration is not applicable at many urban sites, due to the disturbance of the natural carbon cycle.

1 Einleitung

Verglichen mit Waldbäumen haben unsere Stadtbäume eine sehr geringe Lebenserwartung. Die mittlere Lebenserwartung von Stadtbäumen liegt bei 60 Jahren (BALDER 1998). Eine häufige Ursache für die schlechte Vitalität der Stadtbäume sind Störungen der Bodenbelüftung (YELENOSKY 1964; ASLANBOGA 1976;

RUARK et al. 1983; GILMAN et al. 1987; KOWARIK et al. 1987; COSTELLO et al. 1991; DAY & BASSUK 1994; KOZLOWSKI 1999; WELTECKE & GAERTIG 2012). Sauerstoffmangel und ein Überschuss an Kohlendioxid können zu Funktionsstörungen im Wurzelraum führen und das Wurzelwachstum behindern (GLINSKI & STEPNIOWSKI 1985; GAERTIG et al. 1999; KOZLOWSKI 1999). Dadurch kann es zu einer Unterversorgung der Krone mit Wasser und Nährstoff-

fen kommen, was sich in einem reduzierten Baumwachstum und einer sichtbaren Veränderung der Kronenstruktur äußert (ASLANBOGA 1976; KOWARIK et al. 1987; HETSCH et al. 1990; DAY & BASSUK 1994; KOZLOWSKI 1999; GAERTIG 2001; UHL 2008; GAERTIG et al. 2010). Um die Verkehrssicherheit von Bäumen zu gewährleisten, müssen abgestorbene Äste entfernt werden. Dadurch entstehen den Städten und Gemeinden jährlich hohe Kosten, die zum großen Teil auf Bodenbelüftungsstörungen zurückzuführen sein dürften.

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 (GLINSKI & STEPNIOWSKI 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. Von zentraler Bedeutung für die Bodenbelüftung ist die Struktur der obersten Bodenschicht, da sie das Tor für die Luftversorgung der unteren Horizonte bildet.

Es gibt eine Reihe bodenphysikalischer Parameter, mit deren Hilfe sich die Qualität der Bodenbelüftung beurteilen lässt. Auf städtischen Standorten wurde die Bodenbelüftung im Vergleich zu Acker- oder Waldböden bislang nur wenig untersucht. Der Parameter, der in der Stadt am häufigsten eingesetzt wurde, war die Lagerungsdichte (ZISA et al. 1980; GILMAN et al. 1981; RUARK et al. 1983; PAN & BASSUK 1985; GILMAN et al. 1987; ROLF 1993; SMILEY 2001). Aber auch die Bodentextur (RUARK et al. 1983), der Bodenwiderstand (ZISA et al. 1980; PITTENGER & STAMEN 1990), die Porosität (ZISA et al. 1980), die Luftkapazität (ROLF 1993), die Sauerstoffdiffusionsrate (engl.: Oxygen diffusion rate = ODR) (WATSON 1988; COSTELLO et al. 1991; MACDONALD et al. 2004), die Korrosion von Eisenstangen (HODGE & KNOTT 1993; HODGE 1993) und die Sauerstoff- und Kohlendioxidkonzentration in der Bodenluft (GILMAN et al. 1987; WELTECKE et al. 2011) wurden herangezogen, um die Belüftungssituation abzuschätzen. Die große Bandbreite an Methoden und die Heterogenität der urbanen Baumstandorte machen die Wahl der richtigen Methodik für den Gutachter vor Ort schwierig.

Ziel dieser Studie ist es somit zum einen, den Einfluss von Belüftungsstörungen auf das Wurzel- und Baumwachstum zu untersuchen. Zum anderen soll ein Überblick über die Möglichkeiten gegeben werden, Belüftungsstörungen an urbanen Baumstandorten zu diagnostizieren. Getestet wurden die Parameter Lagerungsdichte, Luftkapazität, relativer scheinbarer Gasdiffusionskoeffizient (D_s/D_0) und CO_2 -Konzentration im Oberboden. In der Analyse wird auf die Aussagekraft und die ökologische Relevanz der Parameter ebenso eingegangen wie auf deren Praktikabilität für den Anwender.

2 Material und Methoden

2.1 Untersuchungsstandorte

Um grundlegende Zusammenhänge zwischen verschiedenen bodenphysikalischen Parametern und dem Wachstum von Baumwurzeln zu testen, wurden erste Untersuchungen auf einem weitgehend naturnahen städtischen Standort durchgeführt. Gute Voraussetzungen dafür fanden sich in der Parkanlage „Schillerwiesen“ in Göttingen, wo über den Park verteilt mehrere Altbüchen stehen, die unterschiedlichen Belastungen durch Parkbesucher ausgesetzt waren.

Die in der Parkanlage als relevant befundenen Parameter wurden dann weiter auf ihre Eignung als Belüftungsparameter stark anthropogen beeinflusster Standorte getestet. Im besonderen Maße haben sich für diese Untersuchungen die Baumstandorte des Landschaftskunstprojektes „7000-Eichen“ angeboten, das der Künstler JOSEPH BEUYS zur Dokumenta 1982 in Kassel initiiert hat. Im Zeitraum von 1982 bis 1986 wurden über die Stadt Kassel 7000 Bäume unterschiedlichster Arten gepflanzt und jeweils mit einer Basaltstele markiert. Aufgrund ihres annähernd gleichen Alters bildeten die Bäume einen idealen Untersuchungsbestand für die Analyse des Bodengashaushaltes verschiedener typischer urbaner Standorte.

2.2 Versuchsdesign

In den Schillerwiesen wurden zwei unterschiedliche Messkampagnen durchgeführt. In der ersten Mess-

kampagne wurden im Labor die Lagerungsdichte, die Luftkapazität, der relative scheinbare Gasdiffusionskoeffizient und die Feinwurzeldichte anhand von 100-cm³-Stechzylinderproben bestimmt (Anzahl der Stechzylinderproben: 55). Zusätzlich wurden die CO₂-Konzentration in 5 cm Tiefe, die Bodentemperatur und der Bodenfeuchtegehalt in situ gemessen. Die CO₂-Messungen wurden inklusive der Temperatur- und Feuchtemessungen nach einem Monat wiederholt (Anzahl der Messungen je Wiederholung: 60).

Die Stechzylinderproben wurden im Mineralboden aus 0–15 cm Tiefe an den Standorten von fünf verschiedenen Altbuchen gewonnen, die über den Park verteilt waren. Es wurden fünf Stichprobenpunkte in regelmäßigen Abständen von 0,5 m oder 1 m – je nach Baumgröße – auf vier Transekten angelegt, die in jede Himmelsrichtung von den Bäumen abgingen. Stechzylinder, von denen die Feinwurzeln nicht sicher als Baumwurzeln identifiziert werden konnten, wurden verworfen. Die Messung der CO₂-Konzentration, Bodentemperatur und des Bodenfeuchtegehalts wurde im gleichen Versuchsdesign an drei der fünf Buchen vorgenommen.

Eine zweite Messkampagne zur Messung der CO₂-Konzentration, des relativen scheinbaren Gasdiffusionskoeffizienten in situ und der Feinwurzeldichte wurde in einer Gruppe von Altbuchen in der Nähe eines Spielplatzes im Park durchgeführt (Anzahl der Messungen je Parameter: 11). Eine ausführliche Versuchsbeschreibung findet sich bei GAERTIG et al. (2010) und GERHARDT (2009).

In Kassel wurden der relative scheinbare Gasdiffusionskoeffizient in situ (n = 223), die Respirationrate (n = 223) und die CO₂-Konzentration (n = 885) an acht verschiedenen Standorten von 36 Beuys-Eichen und 15 Beuys-Platanen gemessen. Der Versuchsaufbau wird ausführlich bei WELTECKE & GAERTIG (2012) dargestellt.

2.3 Methoden zur Beurteilung der Belüftungssituation

2.3.1 Lagerungsdichte

Die Lagerungsdichte wird definiert als die Masse der Trockensubstanz im Verhältnis zum Gesamtbodenvolumen. Sie steigt mit abnehmendem Porenvolumen (HILDEBRAND 1983) und kann daher indirekt Auskunft über die Bodenbelüftung geben.

Die Lagerungsdichte wurde bestimmt durch Trocknen einer ungestörten Stechzylinderprobe mit bekanntem Volumen (100 cm³) bei 105 °C und anschließendem Wiegen (HARTGE & HORN 1992).

2.3.2 Luftkapazität

Die Luftkapazität stellt das Volumen der weiten Grobporen dar, die bei einer Wasserspannung von 60 hPa (Feldkapazität) mit Luft gefüllt sind. Da neben der Porenkontinuität das luftgefüllte Porenvolumen der wichtigste Faktor für den Gasaustausch im Boden ist, kann die Luftkapazität als Maß für die Qualität der Bodenbelüftung dienen.

Zur Bestimmung der Luftkapazität wurden wassergesättigte ungestörte Stechzylinderproben bei 60 hPa entwässert und das Luftporenvolumen gemäß DANIELSON & SUTHERLAND (1986) mit einem Luftpneumometer bestimmt.

2.3.3 Relativer scheinbarer Gasdiffusionskoeffizient (D_s/D_0)

Der Gasaustausch im Boden ist in erster Linie ein diffusiver Prozess. Diffusion geschieht durch die Eigenbewegung der Moleküle entgegengesetzt einem Konzentrationsgradienten in Abhängigkeit von Temperatur, Druck und dem Diffusionskoeffizienten. Die Diffusion durch den Boden verringert sich um den Diffusionswiderstand, den Bodenteilchen und Bodenwasser der freien Diffusion entgegensetzen. Der D_s/D_0 gibt Auskunft darüber, inwieweit der Gastransport durch den Boden gegenüber dem Gastransport in der freien Atmosphäre verringert ist (GLINSKI & STEPNIIEWSKI

1985; FREDE 1986). Ein D_s/D_0 von 0.1 bedeutet zum Beispiel, dass der Gasfluss durch den Boden 10 % des Gasflusses in der freien Atmosphäre ausmacht (GAERTIG 2001).

Der relative scheinbare Gasdiffusionskoeffizient kann im Labor oder im Feldversuch *in situ* gemessen werden. Für die Labormessung wurden wassergesättigte ungestörte Stechzylinderproben zunächst bei 300 hPa entwässert und anschließend der D_s/D_0 mit einem Einkammersystem gemessen, bei dem die Messkammer nur über die Luftporen der Bodenprobe in Kontakt zur Außenluft stand. In die Messkammer wurde eine definierte Menge Neon injiziert und durch einen Miniventilator homogenisiert. In definierten Zeitabständen wurde die Neonkonzentration in der Kammer mit einem Gaschromatographen (CP-4900 Micro-GC, Varian) gemessen. Über die Konzentrationsabnahme von Neon in der Kammer wurde der D_s/D_0 nach FLÜHLER (1973) berechnet (SCHACK-KIRCHNER 1994; GAERTIG 2001).

Die Messung des D_s/D_0 *in situ* erfolgte mit Hilfe einer Feldmesskammer, die 5 cm in den Boden eingestochen wurde. Auf versiegelten Flächen wurde die Kammer auf den Boden aufgestellt und seitlich luftdicht abgeschlossen. Anhand der Konzentrationsabnahme eines in die Kammer injizierten Testgases wurde der D_s/D_0 in Anlehnung an das bei ROLSTON (1986) beschriebene Verfahren berechnet. Eine ausführliche Versuchsbeschreibung zur Messung des relativen scheinbaren Gasdiffusionskoeffizienten im Feld findet sich bei WELTECKE & GAERTIG (2012).

2.3.4 CO₂-Konzentration

Die CO₂-Konzentration in der Bodenluft ist im Vergleich zur atmosphärischen Luft deutlich erhöht. Dies wird sowohl durch die CO₂-Produktion der Bodenorganismen und Wurzeln verursacht, als auch durch den natürlichen Widerstand, den der Boden dem freien Gasaustausch entgegengesetzt (GLINSKI & STEPNIOWSKI 1985). Verschiedene Studien belegen, dass die CO₂-Konzentration im Boden mit abnehmendem Bodengasaustausch zunimmt, obwohl die Bodenrespiration gleichzeitig sinkt (SCHACK-KIRCHNER 1994; QI et al. 1994; GAERTIG et al. 1999; GAERTIG 2001). Das

bedeutet, dass erhöhte CO₂-Werte im Boden eher ein Hinweis auf Belüftungengpässe sind als auf hohe Atmungsaktivität. Der Messvorgang zur Erhebung der CO₂-Konzentration im Boden ist ausführlich bei WELTECKE & GAERTIG (2012) beschrieben.

2.4 Methoden zur Beurteilung der ökologischen Relevanz von Belüftungsstörungen

2.4.1 Respirationsrate

Die Respirationsrate gibt Auskunft über die Atmungsaktivität von Bodenorganismen und Wurzeln. Für die Bestimmung der Respirationsrate wurde parallel zur *in situ* Messung des Gasdiffusionskoeffizienten der Anstieg der CO₂-Konzentration in der Kammer gemessen, anhand dessen die Respirationsrate berechnet wurde (LOTFIELD et al. 1992). Zeitgleich wurde die Bodentemperatur aufgenommen, womit die Respirationsrate auf eine einheitliche Temperatur standardisiert wurde (USDA 2003).

2.4.2 Feinwurzeldichte

Zur Bestimmung der Feinwurzeldichte der Stechzylinder (Göttingen Schillerwiesen, 1. Messkampagne) wurden die Feinwurzeln (Durchmesser < 2 mm) ausgewaschen und die Baumwurzeln anhand ihrer Morphologie separiert. Die Feinwurzelmasse wurde nach dem Trocknen bei 60 °C gewogen. Der Glührückstand nach dem Erhitzen der Wurzeln bei 550 °C wurde von der Trockenmasse subtrahiert. Die Feinwurzeldichte wurde durch die Relation der Trockenmasse der Feinwurzeln zum Bodenvolumen berechnet. Für die Vergleichbarkeit der Werte wurden die Proben ausschließlich im Winter genommen.

In der 2. Messkampagne in Göttingen wurden an den Messpunkten in zwei Tiefenstufen (0–15 cm und 15–30 cm) Bohrkern mit einem Wurzelbohrer entnommen. Die Bohrkern wurden der Länge nach aufgeschnitten und alle sichtbaren Feinwurzeln mit Stecknadeln markiert und gezählt. Die Wurzeldichte gab in diesem Fall die Anzahl der gezählten Wurzeln pro Flächeneinheit an (GERHARDT 2009; GAERTIG et al. 2010).

2.4.3 Baumwachstum

Da die Bäume in Kassel alle ein ähnliches Alter hatten, wurden zur Bestimmung des bisherigen Baumwachstums die aktuelle Höhe und der Brusthöhen-durchmesser (BHD) gemessen.

2.5 Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung wurde mit der Open-Source-Software R, Version 2.9.2 durchgeführt. Signifikante Unterschiede von Gruppen wurden mit dem multiplen nicht-parametrischen Dunn-Test für ein Signifikanzlevel von $\alpha = 0.05$ überprüft (ZAR 1999).

3 Ergebnisse

3.1 Parkanlage Schillerwiesen in Göttingen

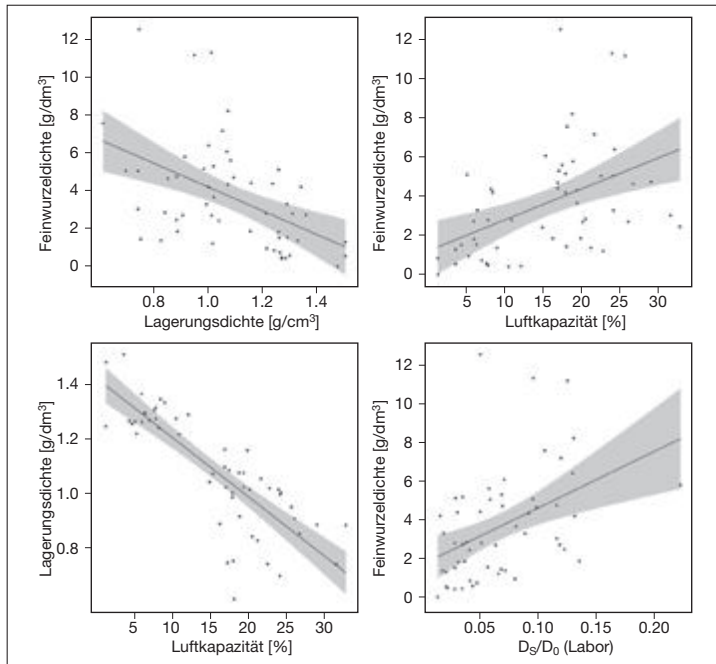
Auf den kohärenten Böden der Schillerwiesen konnte ein signifikanter Zusammenhang zwischen der Lagerungsdichte und der Feinwurzel-dichte der un-

tersuchten Buchen ebenso festgestellt werden wie zwischen der Luftkapazität und der Feinwurzel-dichte (Abbildung 1 oben). Abbildung 1 links unten zeigt den engen Zusammenhang zwischen beiden bodenphysikalischen Parametern. Die Lagerungsdichte des Bodens konnte zu 70 % durch das Volumen der weiten Grobporen im Boden erklärt werden.

Ebenso wie mit der Lagerungsdichte und der Luftkapazität zeigte die Feinwurzel-dichte einen signifikanten Zusammenhang mit dem relativen scheinbaren Gasdiffusionskoeffizienten, gemessen im Labor. Der Zusammenhang zwischen der Feinwurzel-dichte und den Parametern Lagerungsdichte, Luftkapazität und Gasdiffusionskoeffizient war bei allen drei Parametern in etwa gleich. Sie zeigen, dass mit abnehmender Bodenbelüftung die Durchwurzelung abnimmt.

Bei der zweiten Messkampagne in den Schillerwiesen wurde ein signifikanter Zusammenhang zwischen dem relativen scheinbaren Gasdiffusionskoeffizienten, aufgenommen mit einer Messkammer in situ, und der CO_2 -Konzentration in 5 cm Tiefe festgestellt (vgl. GERHARDT 2009; GAERTIG et al. 2010). Mit zuneh-

Abbildung 1: Feinwurzel-dichte in Abhängigkeit von der Lagerungsdichte ($r^2 = 0,2$; $p < 0,001$) (oben links), der Luftkapazität ($r^2 = 0,2$; $p < 0,001$) (oben rechts) und dem relativen scheinbaren Gasdiffusionskoeffizienten ($r^2 = 0,2$; $p < 0,001$) (unten rechts) auf den Schillerwiesen in Göttingen. Zusammenhang zwischen der Lagerungsdichte und der Luftkapazität ($r^2 = 0,7$; $p < 0,001$) (unten links). Die grau hinterlegten Flächen geben jeweils den 95 %igen Vertrauensbereich der linearen Regression an



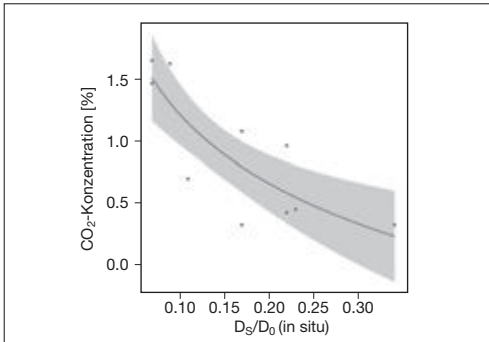


Abbildung 2: Zusammenhang zwischen relativem scheinbaren Gasdiffusionskoeffizienten und der CO₂-Konzentration in 5 cm Tiefe ($r^2 = 7$; $p = 0,003$) (verändert nach GAERTIG et al. 2010). Die schwarze Linie zeigt das Ergebnis einer logarithmischen Regression, die grau hinterlegten Bereiche zeigen das 95 %-Konfidenzintervall dazu

mender Gasdurchlässigkeit des Oberbodens nahm die CO₂-Konzentration im Boden ab (Abbildung 2). Die ökologische Bedeutung der CO₂-Konzentration im Oberboden konnte anhand der signifikanten Abnahme der Feinwurzelichte mit steigender CO₂-Konzentration in der Bodenluft belegt werden. Ab einer CO₂-Konzentration von 1,6 % wurden kaum noch lebende Feinwurzeln im Boden gefunden (Abbildung 3) (vgl. GERHARDT 2009; GAERTIG et al. 2010).

Die Reproduzierbarkeit der Boden-CO₂-Konzentrationen wurde an zwei verschiedenen Tagen mit unterschiedlicher Witterung an drei verschiedenen

Baumstandorten auf den Schillerwiesen getestet. Obwohl Feuchtigkeit und Temperatur im Boden sich an beiden Tagen an allen drei Standorten meist signifikant voneinander unterschieden, gab es keinen signifikanten Unterschied in der CO₂-Konzentration in 5 cm Tiefe (Tabelle 1).

3.2 Beuys-Bäume in Kassel

Im Gegensatz zu den Untersuchungen in der Parkanlage Schillerwiesen in Göttingen war das Aufnehmen von ungestörten Stechzylinderproben für die Erhebung der Lagerungsdichte, Luftkapazität und des Gasdiffusionskoeffizienten im Labor auf einem großen Teil der städtischen Böden in Kassel nicht möglich. Versiegelte Flächen, ein hoher Anteil an Steinen oder sehr trockene, harte Böden verhinderten das Eintreiben der Stechzylinder in den Boden.

Hingegen konnte auf jedem Standort – unabhängig von der Oberflächenbeschaffenheit – der relative scheinbare Gasdiffusionskoeffizient mit der Messkammer in situ aufgenommen werden. Die Abbildung 4 (links) zeigt den relativen scheinbaren Gasdiffusionskoeffizienten verschiedener städtischer Bodenbeläge, gruppiert nach (a) versiegelten Standorten (Asphalt, Gehwegplatten und Kopfsteinpflaster), (b) wassergebundener Decke, (c) unbewachsenen Flächen, die häufig mit einer Schotterschicht bedeckt waren und (d) bewachsenen Flächen (Rasenflächen, ungepflegte Primärvegetation und Blumenrabatten). Die signifikant geringsten Gasdiffusionskoeffizienten wiesen versiegelte Standorte auf, wo der Gasaustausch nahe-

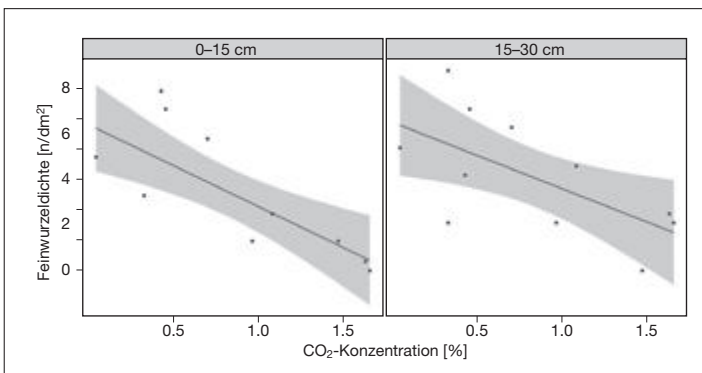


Abbildung 3: Zusammenhang zwischen Feinwurzelichte und CO₂-Konzentration in 0–15 cm Tiefe ($r^2 = 0,6$; $p = 0,006$) und 15–30 cm Tiefe ($r^2 = 0,4$; $p = 0,036$) (verändert nach GAERTIG et al. 2010). Die schwarzen Linien zeigen das Ergebnis einer linearen Regression, die grau hinterlegten Bereiche zeigen das 95 %-Konfidenzintervall dazu

Tabelle 1: Arithmetisches Mittel und Standardabweichung der CO₂-Konzentration, Bodentemperatur und Bodenfeuchte an drei Baumstandorten in den Schillerwiesen (Göttingen) bei zwei verschiedenen Messdurchgängen

Baumstandort	Stichprobenumfang	Parameter	1. Messdurchgang	Wiederholung	Signifikanz
Spielplatz	20	CO ₂ -Konzentration	3,28 ± 1,29	3,90 ± 1,52	
	20	Bodentemperatur	14,05 ± 0,74	16,53 ± 2,42	p < 0,05
	20	Bodenfeuchte	25,64 ± 10,06	19,50 ± 6,69	
Rasen	20	CO ₂ -Konzentration	1,12 ± 0,54	1,36 ± 0,45	
	20	Bodentemperatur	11,97 ± 0,24	16,57 ± 0,43	p < 0,05
	20	Bodenfeuchte	33,42 ± 4,53	21,77 ± 3,61	p < 0,05
Wald	20	CO ₂ -Konzentration	0,32 ± 0,13	0,52 ± 0,31	
	20	Bodentemperatur	12,43 ± 0,19	17,35 ± 0,80	p < 0,05
	20	Bodenfeuchte	30,24 ± 7,44	20,81 ± 5,94	p < 0,05

zu unterbunden war, während bewachsene Böden die höchste Gasdurchlässigkeit besaßen. Die Respirationsrate zeigt ein nahezu identisches Bild zum Gasdiffusionskoeffizienten: Dort, wo die Gasdurchlässigkeit am geringsten war (versiegelte Flächen), war auch die

Atmungsaktivität im Boden am geringsten, und wo die Gasdurchlässigkeit am höchsten war (bewachsene Flächen), war auch entsprechend die Atmungsaktivität am höchsten (Abbildung 4 rechts).

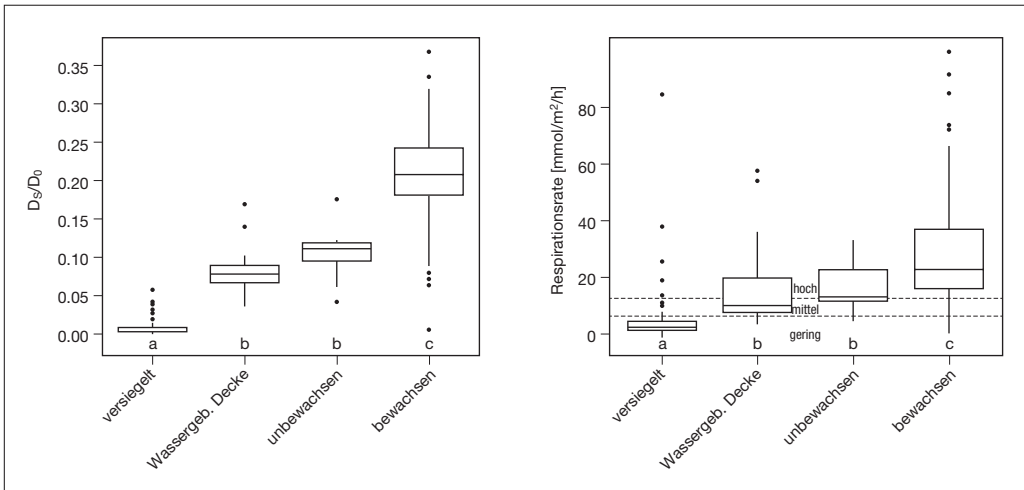


Abbildung 4: Relativer scheinbarer Gasdiffusionskoeffizient (links) und Respirationsrate (rechts) verschiedener städtischer Bodenbeläge (n = 223). Mittelwerte mit den gleichen Buchstaben unterscheiden sich mit 95 %iger Wahrscheinlichkeit nicht signifikant voneinander. Die Box zeigt das 25. und 75. Perzentil, die horizontalen Linien im Inneren der Box den Median und die vertikalen Verlängerungen der Boxen kennzeichnen die Beobachtungsbreite bis zum 1,5-fachen des Interquartilbereiches. Ausreißer sind durch Punkte dargestellt

Der Zusammenhang zwischen dem relativen scheinbaren Gasdiffusionskoeffizienten und dem Brusthöhendurchmesser (BHD) bzw. der Baumhöhe der untersuchten Beuys-Eichen zeigt anschaulich die hohe Bedeutung der Bodenbelüftung für das Baumwachstum (Abbildung 5). Sowohl der BHD als auch

die Baumhöhe der untersuchten Beuys-Eichen stiegen mit zunehmender Gasdurchlässigkeit des Oberbodens (schwarze durchgezogene Linie). Die gestrichelten Linien (rechte Grafik) zeigen zum Vergleich den oberen und unteren Grenzwert der Mittelhöhe von 35-jährigen Eichen auf Forststandorten der Ertragsklasse I bei

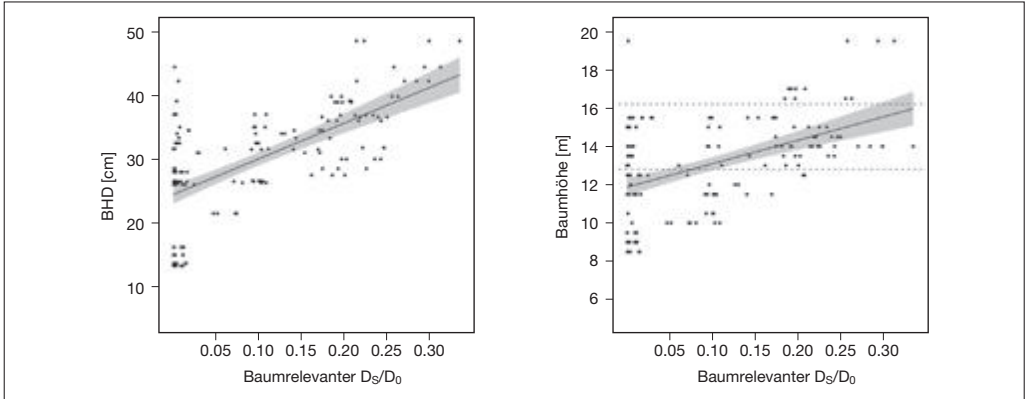


Abbildung 5: Zusammenhang zwischen dem baumrelevanten relativen scheinbaren Gasdiffusionskoeffizienten [D_s/D_0 gewichtet mit prozentualer Bodenbelagsart (vgl. WELTECKE & GAERTIG 2012)] und dem Brusthöhendurchmesser (BHD) (links, $r^2 = 0,4$; $p < 0,001$) bzw. der Baumhöhe (rechts, $r^2 = 0,3$; $p < 0,001$) von den untersuchten Beuys-Eichen in Kassel. Die schwarzen Linien zeigen das Ergebnis einer linearen Regression, die grau hinterlegten Bereiche zeigen das 95 %-Konfidenzintervall dazu. Die gestrichelten Linien (rechte Grafik) zeigen den Bereich der Mittelhöhen von 35-jährigen Eichen auf Forststandorten der Ertragsklasse I bei starker Durchforstung (SCHOBER 1995)

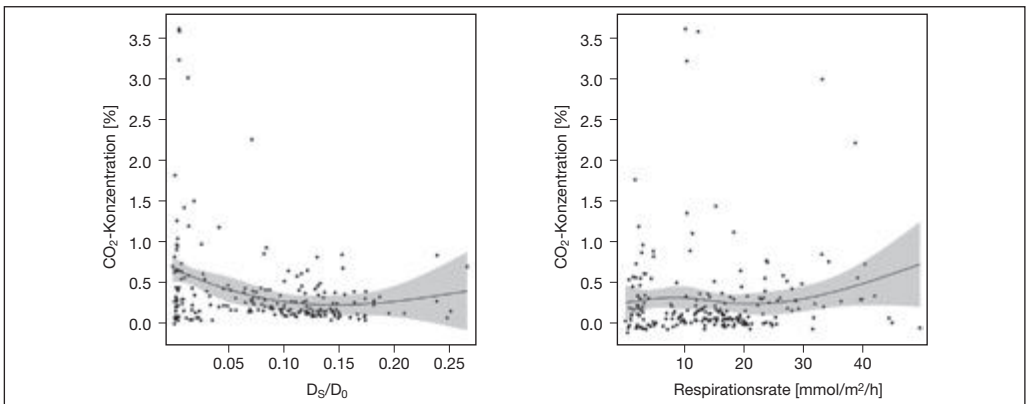


Abbildung 6: Zusammenhang zwischen CO_2 -Konzentration in 5 cm Tiefe und relativem scheinbaren Gasdiffusionskoeffizienten (links), bzw. Respirationsrate (rechts). Die schwarzen Linien zeigen das Ergebnis einer Spline-Funktion mit 3 Knotenpunkten, die grau hinterlegten Bereiche zeigen das 95 %-Konfidenzintervall

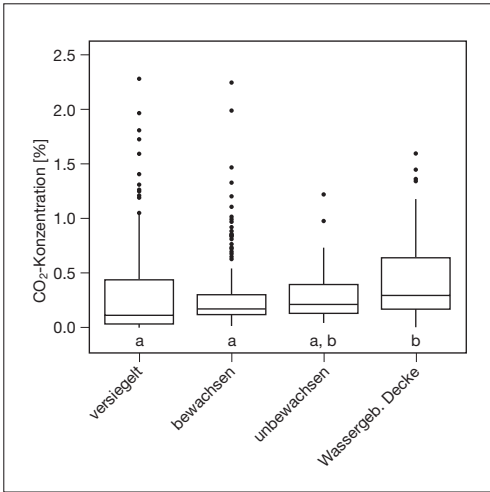


Abbildung 7: CO₂-Konzentration in 5 cm Tiefe verschiedener städtischer Bodenbeläge (n = 885). Mittelwerte mit den gleichen Buchstaben unterscheiden sich mit 95 %iger Wahrscheinlichkeit nicht signifikant voneinander. Die Box zeigt das 25. und 75. Perzentil, die horizontalen Linien im Inneren der Box den Median und die vertikalen Verlängerungen der Boxen kennzeichnen die Beobachtungsbreite bis zum 1,5-fachen des Interquartilbereiches. Ausreißer sind durch Punkte dargestellt

starker Durchforstung gemäß den Ertragstafeln nach SCHÖBER (1995). Sank der über den prozentualen Anteil der einzelnen Belagsarten gewichtete relative scheinbare Gasdiffusionskoeffizient des Oberbodens unter einen Wert von 0,1, führte dies im Mittel zu einem unterdurchschnittlichen Höhenwachstum der Eichen.

Die Aufnahmen in Kassel zeigen, dass die CO₂-Konzentration im Boden weder eine streng gerichtete Abhängigkeit vom Gasdiffusionskoeffizienten aufwies noch von der Respirationsrate (Abbildung 6). Dies zeigte sich auch in den CO₂-Konzentrationen der verschiedenen Bodenbelagsarten, die im Gegensatz zum Gasdiffusionskoeffizienten und zur Respirationsrate kein typisches Muster erkennen ließen (Abbildung 7). Versiegelte Standorte hatten eine ähnlich niedrige CO₂-Konzentration wie die bewachsenen Flächen. Auffällig war außerdem, dass unter versiegelten Standor-

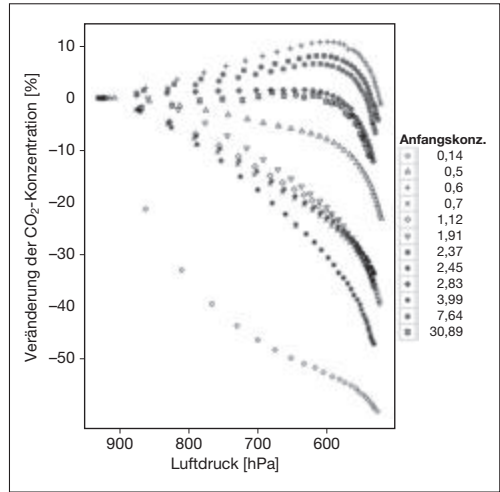


Abbildung 8: Veränderung der CO₂-Konzentration mit abnehmendem Luftdruck in einem geschlossenen System

ten, im Besonderen unter Gehwegplatten, einige CO₂-Konzentrationen gemessen wurden, die unter dem CO₂-Level der Atmosphäre lagen.

Um diesen Sachverhalt besser zu verstehen, wurde im Labor unter kontrollierten Bedingungen die CO₂-Konzentration in einem geschlossenen System gemessen, das nur an einer Stelle mit dem Gaschromatographen verbunden war. Bei jedem Ansaugvorgang zur Analyse der Luftkonzentrationen reduzierte sich der Luftdruck in dem System. Abbildung 8 zeigt, dass mit abnehmendem Luftdruck ab ca. 870 hPa die gaschromatographische Analyse keine konstante CO₂-Konzentration mehr ergab. Es konnte aber für den Grad der Konzentrationsveränderung kein Muster in Abhängigkeit von der Anfangskonzentration festgestellt werden.

4 Diskussion

4.1 Belüftungsstörungen und Baumwachstum

Die Ergebnisse in den Schillerwiesen und in Kassel zeigen, dass sowohl Buchen als auch Eichen sensibel auf Belüftungsstörungen reagieren (Abbildungen 1, 3 und 6). Obwohl die Buche (*Fagus sylvatica* L.) von

Natur aus in Mitteleuropa die am weitesten verbreitete und konkurrenzstärkste Baumart ist, ist sie in unseren Städten kaum vertreten. Sie ist bekannt für ihre Empfindlichkeit gegenüber Extrembedingungen wie Wechselfeuchte und Staunässe oder Dürre (HETSCH et al. 1990; AAS et al. 2002). Wenn die Bodenporen über längere Zeit mit Wasser gefüllt sind, kommt es zu Sauerstoffmangel im Boden und zu einer Anreicherung von CO₂. Eine Kombination aus Sauerstoffmangel, hoher CO₂-Konzentration und den daraus resultierenden Folgen wie verändertem pH-Wert, verstärktem Auftreten von Pathogenen, mangelnder Verfügbarkeit einiger Nährstoffe oder toxischer Konzentrationen anderer Elemente führt zu einem sich selbstverstärkenden devitalisierenden Kreislauf, der letztendlich ein Absterben der Wurzeln oder des ganzen Baumes verursacht (GRABLE 1966; GLINSKI & STEPNIOWSKI 1985; KOZLOWSKI 1999).

In der Stadt sind die Belüftungsstörungen in erster Linie zwar nicht durch Staunässe verursacht, aber der ökologische Effekt durch Versiegelung oder Verdichtung ist der gleiche. Daher ist der Zusammenhang von sinkender Feinwurzeldichte von Buchen mit zunehmender CO₂-Konzentration plausibel (Abbildung 3).

Im Gegensatz zur Buche ist die Stieleiche (*Quercus robur* L.) ein populärer Stadtbaum, der maßgeblich das Bild vieler Städte prägt (KOWARIK et al. 1987). Während die Buche in der GALK-Straßenbaumliste (2006) überhaupt keine Erwähnung findet, wird die Stieleiche als ein geeigneter Baum für Stadtstandorte beurteilt. Die Stieleiche besitzt eine große ökologische Amplitude. Bestandsbildend ist sie besonders in der periodisch überfluteten Hartholzaua und größeren Flussniederungen (AAS et al. 2002). Das heißt, sie ist im Gegensatz zur Buche an periodische Sauerstoffdefizite angepasst. Daher mag es überraschen, dass die Eiche ähnlich sensibel auf Belüftungsstörungen in der Stadt reagiert wie die Buche.

Im Gegensatz zu Belüftungsstörungen in der Stadt, die durch dauerhafte Versiegelung oder Verdichtung verursacht sind, findet in Auen durch periodisches Absenken des Wasserspiegels und eine hohe bodenbiologische Aktivität in regelmäßigen Abständen ein Gasaustausch zwischen Atmosphäre und Bodenluft statt. Da die Eiche an diese ökologische Nische ange-

passt ist, findet sie in der Aue ausreichend gute Wachstumsbedingungen vor. An permanente Störungen der Bodenbelüftung scheint die Eiche im Gegensatz dazu nicht angepasst zu sein. So wurde festgestellt, dass die Feinwurzeldichte und die Vitalität von Eichen auf durch Befahrung strukturgestörten Waldstandorten erheblich reduziert sind (GAERTIG et al. 2002). Somit ist auch das reduzierte Wachstum der Beuys-Eichen auf Standorten mit dauerhaft reduzierter Bodenbelüftung plausibel (Abbildung 5).

Zum Zeitpunkt der Messung haben die Beuys-Eichen nur ein Drittel ihrer physiologisch möglichen Endhöhe erreicht (SCHÖBER 1995). Es ist daher davon auszugehen, dass die Probleme, die durch Belüftungsstörungen für die Eichen entstehen, mit weiterem Wachstum zunehmen werden. Ein frühzeitiges Erkennen und Beheben von Belüftungsstörungen kann die Bäume vor weiteren Schäden bewahren und letztendlich Kosten einsparen.

4.2 Beurteilung von Belüftungsstörungen

In vielen Fällen wird zur Beurteilung der Bodenbelüftungssituation die Lagerungsdichte herangezogen (ZISA et al. 1980; GILMAN et al. 1981; RUARK et al. 1983; PAN & BASSUK 1985; GILMAN et al. 1987; ROLF 1993; SMILEY 2001). Wie Abbildung 1 zeigt, gibt es einen engen Zusammenhang zwischen der Lagerungsdichte und der Luftkapazität. Aber die Lagerungsdichte kann nicht allein über die Luftkapazität erklärt werden, da die Lagerungsdichte auch von dem Volumen der Mittel- und Feinporen mitbestimmt wird. Diese Poren sind bei Feldkapazität allerdings wassergefüllt und stehen somit über weite Teile im Jahr nicht für den Gasaustausch zur Verfügung. Außerdem gibt die Lagerungsdichte keine Informationen über die Porenkontinuität, weshalb sie als bodenphysikalischer Parameter alleinstehend unzureichend ist, um Aussagen über die Belüftungssituation zu treffen (HILDEBRAND 1983; POWERS et al. 1998; GAERTIG 2007).

Da die Luftkapazität zumindest das Makroporenvolumen, ein wichtiger Faktor für die Gasdiffusion, direkt wiedergibt, ist die Luftkapazität theoretisch ein geeigneter Parameter, um die Belüftungssituation abzuschätzen als die Lagerungsdichte. Nichtsdesto-

trotz zeigt die Abbildung 1, dass die Feinwurzelndichte der Buchen von beiden Parametern in gleichem Maße erklärt werden kann. Daher ist die Verwendung der weniger aufwendigen Lagerungsdichte gerechtfertigt (SOJKA & SCOTT 2002). Hinzu kommt, dass im Gegensatz zur Luftkapazität die Lagerungsdichte auch an gemischten Bodenproben mit Hilfe einer Volumen-äquivalentmethode bestimmt werden kann (BLAKE & HARTGE 1986; GROSSMAN & REINSCH 2002; RIEK et al. 2006; ENGELHARD 2009; WELTECKE & GAERTIG 2012). Dadurch ist es möglich, die Lagerungsdichte auch an Standorten zu messen, die sehr steinig, trocken und hart sind.

Da Bodenbelüftung in erster Linie ein diffusiver Prozess ist, wird sie am genauesten durch den relativen scheinbaren Gasdiffusionskoeffizienten beschrieben (GLINSKI & STEPNIWSKI 1985). Er integriert neben dem luftgefüllten Porenvolumen auch Informationen über die Geometrie der Poren (FREDE 1986) und besitzt somit die höchste Sensitivität für anthropogene Strukturveränderungen und damit für Belüftungsstörungen (SCHACK-KIRCHNER 1994; SCHACK-KIRCHNER 1996). Alle Studien bezüglich Bodendiffusivität und Wachstum von Baumwurzeln zeigen ein abnehmendes Wurzelwachstum mit abnehmendem Gasdiffusionskoeffizienten, unabhängig von der Boden- oder Pflanzenart (SCHACK-KIRCHNER 1994; GAERTIG et al. 2002; WILPERT & SCHÄFER 2006).

Der D_s/D_0 kann sowohl im Labor anhand ungestörter Stechzylinderproben bestimmt werden als auch anhand von Kammermessungen im Feld. Die Labormessungen haben im Vergleich zu den Feldmessungen den Vorteil, dass definierte Randbedingungen herrschen und die Werte nicht durch Temperatur- oder Feuchtigkeitsschwankungen beeinflusst werden. Allerdings ist das Aufnehmen von ungestörten Stechzylinderproben an vielen städtischen Standorten nicht möglich, wie die Arbeiten in Kassel gezeigt haben.

Mit der Messkammer für die Aufnahmen im Feld ist eine Methode verfügbar, mit der die Gasdiffusion auf allen Standorten – unabhängig von der Oberflächenbeschaffenheit – gemessen werden kann (WELTECKE & GAERTIG 2012). Außerdem ist die Fläche der Feld-Messkammer wesentlich größer als die Fläche der Stechzylinder, sodass die Feld-Messkammer besser den

Effekt größerer Bodenstrukturen widerspiegelt als die Messungen an den kleinen Stechzylindern (SCHACK-KIRCHNER et al. 2001). Unabhängig von der Methodik ist der messtechnische Aufwand zur Ermittlung des relativen scheinbaren Gasdiffusionskoeffizienten im Vergleich zu anderen bodenphysikalischen Parametern relativ hoch.

Auf natürlichen Standorten hat man festgestellt, dass die Respirationsrate im Boden mit abnehmender Gasdurchlässigkeit des Oberbodens abnimmt, gleichzeitig aber die CO_2 -Konzentration im Boden steigt. Daher sind erhöhte CO_2 -Konzentrationen in natürlichen Böden eher Ausdruck eines reduzierten Gasaustauschs als erhöhter Bodenatmung (SCHACK-KIRCHNER 1994; GAERTIG et al. 2002).

Dieser Sachverhalt scheint bei stärker anthropogen beeinflussten Böden als z. B. in einer Parkanlage nicht mehr zuzutreffen. Abbildung 6 zeigt, dass die CO_2 -Konzentration auf den untersuchten Standorten in Kassel weder einen deutlichen Zusammenhang mit dem Gasdiffusionskoeffizienten besitzt noch mit der Respirationsrate. Es ist davon auszugehen, dass beide Faktoren gleich stark auf die CO_2 -Konzentration einwirken. Das bedeutet, dass niedrige CO_2 -Konzentrationen sowohl durch eine gute Bodenbelüftung als auch durch eine geringe Atmungsaktivität verursacht worden sein können; oder umgekehrt, hohe CO_2 -Konzentrationen können sowohl durch einen eingeschränkten Gasaustausch als auch durch stark erhöhte CO_2 -Produktion hervorgerufen worden sein. Wie ist zu erklären, dass auf natürlichen Standorten geltende Gesetzmäßigkeiten in der Stadt offensichtlich keine Gültigkeit mehr haben?

Um CO_2 als Indikator verwenden zu können, muss eine gewisse Atmungsaktivität im Boden vorhanden sein. In der Stadt werden häufig Bodenmaterialien aufgetragen, die völlig frei von Humus sind. Zusätzlich wird die Neubildung von Humus durch die aktive oder zufällige Beseitigung von herunterfallendem Laub verlangsamt. In solchen Böden ist die Bodenaktivität auf ein Minimum reduziert, sodass selbst bei starker Verdichtung keine erhöhten CO_2 -Konzentrationen im Boden vorhanden sind (Abbildung 7). Auf der anderen Seite wird an einigen Standorten organisches Material in Form von Mulch eingetragen,

Tabelle 2: Kurzbeurteilung der untersuchten bodenphysikalischen Parameter zur Beurteilung der Belüftung

Parameter	Anwendbar für:						Unabhängig von:			Aufwand:*			
	Naturnahe Böden	Versiegelung	Trockener und harter Boden	Steiniger Boden	Humusarmer Boden	Mulch	Vegetationsperiode	Aktueller Bodenfeuchte	Aktueller Bodentemperatur	Arbeit	Equipment	Know-how	Aussagekraft*
Lagerungsdichte	+	-	+	+	+	-	+	+	+	2	1	1	1
Luftkapazität	+	-	-	-	+	-	+	+	+	2	2	2	2
D _s /D ₀	Labor	+	-	-	+	-	+	+	+	3	3	3	3
	in situ	+	+	+	+	+	+	-	-	2	3	3	3
CO ₂ -Konzentration	+	(+)	+	+	-	-	-	-	-	1	3	2	2

* Level: 1 = gering, 2 = mittel, 3 = hoch

das für eine überdurchschnittliche CO₂-Produktion sorgt. Hohe CO₂-Konzentrationen an gemulchten Standorten sind somit eher auf hohe Kohlenstoffumsätze zurückzuführen als auf starke Bodenstrukturstörungen.

Bemerkenswert an den CO₂-Konzentrationen in Kassel unter versiegelten Flächen, besonders unter Gehwegplatten, war, dass sie Werte unterhalb des Levels der atmosphärischen CO₂-Konzentration erreichten. Dieser Umstand kann auf zwei mögliche Ursachen zurückzuführen sein. Zum einen können Reste von nicht abgebundenem Löschkalk als CO₂-Senke fungieren. Je nach Anwesenheit von CO₂ kann die Karbonatisierung von Löschkalk jahrelang andauern (BIEHLER 1998). Eine weitere Erklärung kann das Laborexperiment liefern, bei dem gezeigt wurde, dass bei abnehmendem Luftdruck die CO₂-Werte nicht reproduzierbar waren (Abbildung 8). Probemessungen im Feld, bei denen der Luftdruck während des Ansaugprozesses gemessen worden ist, zeigten, dass bei Messungen in 5 cm Tiefe auf stark verdichteten Böden der Luftdruck auf 542 hPa sinken kann und in 10 cm Tiefe sogar auf 334 hPa. Das geschieht, wenn das Luftvolumen, das für die Analyse vom Gaschromatographen benötigt wird, größer ist als das Luftvolumen, das im Boden zur Verfügung steht. Da der Gaschromatograph bei normalem atmosphärischen Druck kalibriert wird, kann es auf solchen Standorten durch den entstehenden niedrigen Luftdruck zu Fehlmessungen kommen. Um Fehlmessungen auszuschließen, sollte daher auf stark verdichteten oder versiegelten Standorten gleichzeitig zur CO₂-Messung der Luftdruck gemessen werden, der beim Ansaugen entsteht. Damit die

Abweichungen der gemessenen CO₂-Werte von den tatsächlichen CO₂-Konzentrationen eine Toleranzgrenze von 5 % nicht überschreiten, sollte der Luftdruck am Ende des Ansaugprozesses nicht mehr als 15 % unter dem Normalluftdruck liegen.

Die erwähnten Besonderheiten der CO₂-Messung auf städtischen Standorten führen dazu, dass der Parameter CO₂-Konzentration auf vielen städtischen Standorten schwer zu interpretieren ist. Somit ist die CO₂-Konzentration als Indikator für Belüftungsstörungen in der Stadt nur an weitgehend naturbelassenen Standorten wie Parkanlagen brauchbar.

Welche Methode zur Diagnose von Belüftungsstörungen jeweils angewendet werden sollte, hängt

- vom Ziel der Messung ab, sprich von der benötigten Aussagekraft,
- von den Standortbedingungen und
- von den technischen, finanziellen und personellen Ressourcen.

Als Entscheidungshilfe kann Tabelle 2 dienen, die einen Überblick über die untersuchten Methoden und deren Möglichkeiten und Grenzen des Einsatzes auf städtischen Standorten gibt.

Untersuchungen der Bodenbelüftungssituation in der Stadt werden meistens an einzelnen Solitäräumen gemacht, wo die Erhebung von Referenzwerten unmöglich ist. Daher muss für die Beurteilung der erhobenen Daten häufig auf Referenzwerte anderer Studien zurückgegriffen werden. Allerdings führt die

Tabelle 3: Übersicht über die in der Literatur aufgeführten Grenzwerte

Parameter	Boden	Pflanzenart	Grenzwert	SI-Einheit	Art des Standorts	Referenz
Lagerungsdichte	Lösslehm	<i>Fagus sylvatica</i>	1,25 g cm ⁻³	1250 kg m ⁻³	Labor	HILDEBRAND 1983
	Forstliche Verwaltungsbezirke der USA		Anstieg von 15 % über die natürlichen Gegebenheiten		Forstlich	POWERS et al. 1998
	Schluff-Lehm, sandiger Lehm	<i>Pinus rigida</i> MILL., <i>Pinus nigra</i> ARNOLD, <i>Picea abies</i> (L.) KARST	1,25–1,6 g cm ⁻³	1250–1600 kg m ⁻³	Labor	ZISA et al. 1980
Luftkapazität	Literaturrecherche		0,12–0,2 m ³ m ⁻³	0,12–0,2 m ³ m ⁻³	Landwirtschaftlich	GLINSKI & STEPNIWSKI 1985
	Lösslehm	<i>Fagus sylvatica</i>	15 cm ³ /100 g		Labor	HILDEBRAND 1983
	Faustregel		5 %	0,05 m ³ m ⁻³	Landwirtschaftlich	LEBERT et al. 2004
	Forstliche Verwaltungsbezirke der USA		Abnahme von > 20 % oder > 50 % in Bezug auf ungestörte Bedingungen		Forstlich	POWERS et al. 1998
	Faustregel		10 %	0,1 m ³ m ⁻³		MULLINS 1991; HERBAUTS et al. 1996; SOJKA & SCOTT 2002
D _s /D ₀	Parabraunerden aus Löss		0,02	0,02	Landwirtschaftlich	FREDE 1986
	Parabraunerde, Terra-Fusca-Braunerde, Pseudogley-Parabraunerde, Parabraunerde-Braunerde aus Lösslehm	<i>Quercus robur</i> , <i>Quercus petraea</i>	0,06	0,06	Forstlich	GAERTIG et al. 2000; GAERTIG et al. 2002
	Sand, Schluff, Lehm		0,02	0,02	Baumschule	RICHTER & GROSSGEBAUER 1978
	Literaturstudie		0,005–0,02	0,005–0,02		STEPNIWSKI 1981
	Parabraunerde, Terra-Fusca-Braunerde, Pseudogley-Parabraunerde, Parabraunerde-Braunerde aus Lösslehm		<i>Quercus robur</i> , <i>Quercus petraea</i>	0,6 %	0,006 m ³ m ⁻³	Forstlich
CO ₂ -Konzentration	Braunerde aus sandigem Lehm, Pseudogley aus Schlufflehm	<i>Picea Abies</i> , <i>Fagus sylvatica</i>	1–2 %	0,01–0,02 m ³ m ⁻³	Forstlich	SCHACK-KIRCHNER & HILDEBRAND 1998
	Faustregel		10 %	0,1 m ³ m ⁻³		SCHAEFFER & SCHACHTSCHABEL 2010
	Literaturrecherche		0,01–0,8 m ³ m ⁻³	0,01–0,8 m ³ m ⁻³	Landwirtschaftlich	GLINSKI & STEPNIWSKI 1985

fast unendliche Anzahl an Möglichkeiten, Boden-, Pflanzen- und Klimafaktoren zu kombinieren, dazu, dass jeder Versuch, das Verhalten von Pflanzen durch eine einzelne Bodeneigenschaft, wie z. B. Belüftung, zu erklären, zum Scheitern verurteilt sein muss (GRABLE 1966). Deswegen erscheint der Ansatz „one size fits all“, wie er für die Feststellung von Grenzwerten verlangt wird, nicht gerechtfertigt (SIEGEL-ISSEM 2002).

Tabelle 3 zeigt eine Reihe von Grenzwerten für verschiedene Parameter aus der Literatur. Die unterschiedliche Durchführung der Methoden und die unterschiedlichen Pflanzen und Böden, die untersucht worden sind, führen zu einer breiten Streuung der Werte und verdeutlichen das oben beschriebene Problem. Deswegen können Grenzwerte eigentlich nur für bestimmte Arten auf bestimmten Standorten definiert werden. Da es besonders in Städten einen großen Artenreichtum an verschiedenen Bäumen gibt und eine hohe Variabilität der Standortbedingungen, sollten die aufgezeigten Werte lediglich als grobe Richtwerte betrachtet werden.

Im Allgemeinen ist davon auszugehen, dass es keinen abrupten sondern einen allmählichen Übergang von ausreichender zu unzureichender Bodenbelüftung für Pflanzen gibt (FROELICH & McNABB 1984; ZOU et al. 2001). Nichtsdestotrotz bleibt aufgrund der Literaturstudie festzuhalten, dass bei Lagerungsdichten unterhalb von $1,25 \text{ g cm}^{-3}$ kein negativer Einfluss auf das Pflanzenwachstum zu erwarten ist. Das gleiche gilt, wenn die Luftkapazität über $0,2 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ beträgt, der relative scheinbare Gaskoeffizient über 0,06 ist oder die CO_2 -Konzentration unter 0,6 % liegt (Tabelle 3).

Literatur

Das Literaturverzeichnis wird auf Anfrage gerne von den Autoren zur Verfügung gestellt.

Autoren

Dipl. Ing. (FH) Katharina Weltecke ist wissenschaftliche Mitarbeiterin und Doktorandin an der HAWK, Fakultät Ressourcenmanagement.

Katharina Weltecke
HAWK, Fakultät
Ressourcenmanagement
Büsgenweg 1a
37077 Göttingen
Tel. (05 51) 5 03 21 80
weltecke@hawk-hhg.de



Prof. Dr. Thorsten Gaertig ist Professor für angewandte Bodenkunde und Stadtökologie an der HAWK, Fakultät Ressourcenmanagement.

Prof. Dr. Thorsten Gaertig
HAWK, Fakultät
Ressourcenmanagement
Büsgenweg 1a
37077 Göttingen
Tel. (05 51) 5 03 21 71
gaertig@hawk-hhg.de

