

Orientierende Untersuchung zur pneumatischen Sanierung von Bodenschadverdichtung

Initial trials on melioration of soil compaction by pneumatic treatment

von *Katharina Weltecke, Marco Diers und Thorsten Gaertig*

Zusammenfassung

Störungen der Bodenbelüftung verhindern bei vielen Stadtbäumen eine ausreichende Erschließung des Bodens mit Feinwurzeln und begrenzen darüber die Vitalität und Lebenserwartung dieser Bäume. Daher ist die Verbesserung der Bodenbelüftung Ziel zahlreicher Sanierungsmaßnahmen. Gängige Mittel zur Bodenlockerung sind Injektionen von Wasser und Luft im Hochdruckverfahren. Um die Wirksamkeit dieser Verfahren zu überprüfen, wurde der Boden unter einer Kastanie im Forstbotanischen Garten in Göttingen mit einem Radlader verdichtet und anschließend mit Hochdrucklanzen saniert.

Über die Veränderungen der CO₂-Konzentrationen im Oberboden konnte nachgewiesen werden, dass die Bodenbelüftung durch die Befahrung stark reduziert wurde. Diese Störungen konnten durch das Hochdrucksanierungsverfahren wieder aufgehoben werden.

Summary

For many urban trees root penetration into the soil is hampered by soil aeration deficiencies, whereby vitality and life expectancy of these trees is reduced. Therefore many remediation measures aim to improve soil aeration. Common methods for loosening soils are injection of water or air under high pressure. To check effectiveness of those treatments, the soil substrate of a horse chestnut tree at the forest botanical garden in Göttingen was compacted with a wheel loader and subsequently rehabilitated with a high pressure lance.

Analyses of soil CO₂ concentration indicated a strong disturbance of soil aeration after soil compaction. These disturbances could be amended by remediation measures.

1 Einleitung

Stadtbäume erreichen aufgrund ihrer standörtlichen Besonderheiten in der Regel nicht das Lebensalter, welches Bäume auf natürlichen Standorten erreichen. Eine häufige Ursache der geringeren Lebenserwartung von Stadtbäumen ist die Störung der Bodenbelüftung, verursacht durch unterschiedlichste Arten der Bodennutzung: Der Boden dient zum einen als Unterlage für Verkehrsflächen wie Straßen, Parkplätze und Radwege, zum anderen werden nicht versiegelte Flächen, das heißt Flächen, die vorran-

gig natürliche Funktionen haben, durch Fußgänger, Baumaßnahmen, Großveranstaltungen oder aufgrund von Parkplatzmangel regelmäßig verdichtet. Diese Nutzungsformen stehen im Konflikt zu der Nutzung des Bodens als Wurzelraum.

Durch die Versiegelung und Verdichtung wird der Gasaustausch zwischen Wurzel und Atmosphäre unterbrochen. Die Versorgung der Wurzeln mit Sauerstoff und die Entsorgung des im Wurzelraum produzierten Kohlendioxids werden erheblich gestört. Besonders alte Bäume reagieren darauf empfindlich. Einschränk-

kungen der Wurzelatmung führen zu Funktionsverlusten der Wurzeln mit der Folge, dass der oberirdische Teil des Baumes nicht mehr ausreichend mit Wasser und Nährstoffen versorgt werden kann. Trockenäste, Wipfeldürre und Wachstumsverluste sind häufige Folgen solcher Bodenverdichtungen (ASLANBOGA 1976, GAERTIG 2001, GAERTIG et al. 2010).

Eine Bodenschadverdichtung liegt aus ökologischer Sicht vor, wenn aufgrund technogener Überlastung das Porensystem im Boden soweit reduziert ist, dass die Produktions-, Regelungs- und Lebensraumfunktionen des Bodens zeitweilig oder dauerhaft beeinträchtigt werden. Für Pflanzen bedeutet das eine Verschlechterung der Luft- und Wasserversorgung und führt zu einer nachhaltigen Beeinträchtigung der Wachstumsleistung (LUNG, 2010). § 1 des Bundes-Bodenschutzgesetzes (BBodSchG) gebietet eine Abwehr und Sanierung schädlicher Bodenveränderungen zum Schutze der natürlichen Funktionen des Bodens. Eine „Sanierung im Sinne dieses Gesetzes sind Maßnahmen zur Beseitigung oder Verminderung schädlicher Veränderungen der physikalischen, chemischen oder biologischen Beschaffenheit des Bodens“ (§ 2 Abs. 7 BBodSchG).

Bereits seit mehreren Jahren werden Sanierungsverfahren angeboten, bei denen Wasser oder Luft mit Hochdruck in den Boden injiziert werden und dabei den Boden aufbrechen und lockern sollen. Die Effektivität solcher Bodenbelüftungsmaßnahmen wird unterschiedlich beurteilt. Zum einen hängt der Erfolg der Maßnahmen stark von der untersuchten Bodenart und Feuchtigkeit ab (ROBERTS et al. 2006). Zum anderen wurde häufig die Lagerungsdichte oder der Bodenwiderstand als Beurteilungskriterium für die Bodenbelüftung gewählt (SCHNEIDER 1999, SMILEY 2001, ROLF 1993, HODGE 1993). Beide Methoden vernachlässigen die Porenkontinuität, die maßgeblich den Gasaustausch mitbestimmt. Das Beispiel einer auf den Boden gelegten Plastikfolie mag verdeutlichen, dass eine Unterbrechung der Sauerstoffversorgung auch dann möglich ist, wenn bodenphysikalische Strukturmaße wie Lagerungsdichte oder Porenvolumen keinen Schaden signalisieren.

In der vorliegenden Studie wurde die Qualität der Bodenbelüftung über die CO₂-Konzentration im

Oberboden beurteilt. Die CO₂-Konzentration wird maßgeblich durch die Gasdurchlässigkeit des Bodens bestimmt. Bei gegebener Respirationsrate steigt die CO₂-Konzentration im Boden an, je geringer die Gasdiffusionsrate ist (GAERTIG 2001). Wird der Boden künstlich verdichtet oder die Bodenstruktur aufgelockert, zeigt sich dies in einer Änderungen des CO₂-Gehalts in der Bodenluft.

Im Rahmen einer Bachelorarbeit (DIERS 2010) wurde im Forstbotanischen Garten in Göttingen untersucht, wie sich die Befahrung mit einer üblichen Baumaschine auf den Gashaushalt des Bodens auswirkt und ob eine Sanierung des Schadens mit Hochdruckinjektionsverfahren möglich ist.

2 Material und Methoden

2.1 Untersuchungsstandort

Die Untersuchungen fanden im Sommer 2009 und 2010 unter einer etwa 20 Jahre alten solitären Rosskastanie (*Aesculus hippocastanum* L.) im Forstbotanischen Garten in Göttingen statt. Der Garten wurde in den 80er und 90er Jahren des letzten Jahrhunderts angelegt. Zur landschaftlichen Gestaltung wurde der ehemalige Oberboden abgeschoben und das Gelände mit Erdmaterial aus verschiedenen Baustellen Göttingens neu modelliert (TIETZE 2007). Beim Einbau des Fremdmaterials wurde der Unterboden zum Teil stark verdichtet. Die heutigen Böden bestehen aus kleinflächig unterschiedlichen, überwiegend schluffig-lehmigen, teilweise stark skeletthaltigen Substraten. Der Bodentyp des Untersuchungsstandorts ist eine Pararendzina, deren pH-Werte bei 6 im Oberboden und bei 6,5–7 im Unterboden liegen.

2.2 Verdichtung und Sanierung

Der Boden im Umfeld der Kastanie wurde durch Überfahrten mit einem 4,5 t schweren Radlader verdichtet, der mit vier Dunlop T9 Reifen (365 X 80 R 20) – typisch für Baustellenfahrzeuge – bereift war. Acht Tage nach der Verdichtung wurde der Boden mit der Luftdrucklanze „Turbo-Terra-Air“ und in sehr stark verdichteten Bereichen mit der Wasserdrucklanze



Abbildung 1: Bodenverdichtung mit einem Radlader

„Bioinjector“ (MTM Spindler und Schmidt GmbH) behandelt. Der pneumatisch erzeugte Luft- bzw. Wasserstrom, der über die Lanzen in den Boden eingeführt wird, sorgt für ein Anheben des Bodens wodurch die Bodenstruktur aufgebrochen wird. Zeitgleich zu der Bodenlockerung wurden auf Teilflächen Bodenhilfsstoffe in den Boden eingeführt. Die Hilfsstoffe sollten ein Zusammensinken des Bodens nach der Belüftungsmaßnahme verhindern. Die Injektionen erfolgten in einem Abstand von ca. 0,5 m, so dass von einer flächigen Sanierung auszugehen ist.

2.3 Beurteilung der Bodenbelüftung

Die CO₂-Konzentrationsmessungen wurden auf einer 25 m² großen Fläche, in deren Mittelpunkt die Rosskastanie stand, in einem 1 × 1 m Raster durchgeführt. An den 36 Messpunkten wurde die CO₂-Konzentration in 5 cm Tiefe bestimmt. Die Bodenluft wurde von einem mobilen Gaschromatographen (Varian CP-4900) über eine Bodensonde angesaugt und analysiert. Die Messungen fanden kurz vor der Bodenverdichtung, vier Tage nach der Verdichtung, 39 Tage nach der Bodensanierungsmaßnahme sowie ein Jahr nach der Sanierung statt. Da Respiration und Gasdiffusion von Temperatur und Feuchtigkeit beeinflusst werden, wurden an jedem Messpunkt auch die Tem-



Abbildung 2: Hochdrucklanze „Turbo-Terra-Air“

peratur und die aktuelle Bodenfeuchte in 5 cm Tiefe gemessen.

3 Ergebnisse

Die Abbildung 3 zeigt die CO₂-Konzentration in 5 cm Bodentiefe auf der Untersuchungsfläche vor der Verdichtung, nach der Verdichtung sowie einen Monat und ein Jahr nach der Sanierung des Bodens. Vor der Verdichtung wurden auf der Untersuchungsfläche mittlere CO₂-Konzentration von 0,6 % und eine maximale CO₂-Konzentration von 1,2 % gemessen. Infolge der Radlader-Befahrung stiegen die CO₂-Konzentrationen stark an. Vier Tage nach der Verdichtung des Bodens lagen die mittleren CO₂-Konzentrationen bei 2,4 %, der Maximalwert betrug 8,4 %.

Nach der Bodensanierungsmaßnahme fielen die CO₂-Konzentrationen unter die Konzentrationen vor der Verdichtung. Die mittleren CO₂-Gehalte lagen bei 0,3 % und der Maximalwert bei 0,8 %. Ein Jahr nach der Bodensanierungsmaßnahme wurde eine mittlere CO₂-Konzentration von 0,8 % gemessen mit einem Maximalwert von 2,8 %. Es konnten keine messbaren Unterschiede der CO₂-Konzentration zwischen den unterschiedlich behandelten Flächen mit und ohne Bodenhilfsstoffen festgestellt werden.

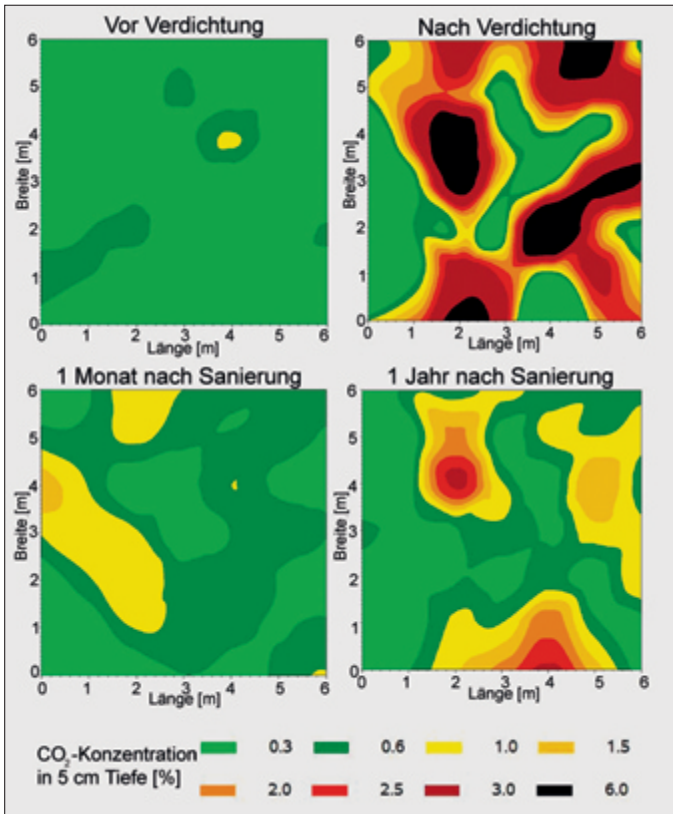


Abbildung 3: CO₂-Konzentrationen in 5 cm Bodentiefe vor und nach der Verdichtung (oben) sowie einen Monat und ein Jahr nach der Bodenlockerung (unten)

Die Messungen vor der Verdichtung und nach der Bodensanierungsmaßnahme erfolgten bei vergleichbaren Bodentemperaturen, während es bei der Messung nach der Verdichtung etwa 5 °C wärmer war.

Die Bodenfeuchtigkeit war nach der Verdichtung etwa doppelt so hoch wie bei den anderen beiden Mes-

sungen vor der Verdichtung und nach der Sanierung (Tabelle 1).

Bei den Messungen ein Jahr nach der Sanierung lagen vergleichsweise niedrige Temperaturen und hohe Feuchtigkeiten im Boden vor.

Tabelle 1: Mittlere CO₂-Konzentration, Temperatur und Feuchte in 5 cm Bodentiefe. Mittelwerte der CO₂-Konzentrationen mit den gleichen Buchstaben unterscheiden sich mit 95 % Wahrscheinlichkeit nicht signifikant (nicht parametrischer Dunn-Test (ZAR 1999))

	CO ₂ -Konzentration [%]	Temperatur [°C]	Feuchte [%]
Vor Verdichtung	0,6 ± 0,3 (a)	17,4 ± 1,6	15,1 ± 0,0
Nach Verdichtung	2,4 ± 2,1 (b)	23,3 ± 1,8	33,2 ± 5,6
Nach Sanierung	0,3 ± 0,2 b (c)	18,2 ± 0,9	13,3 ± 4,3
Ein Jahr nach Sanierung	0,8 ± 0,6 (a)	12,9 ± 0,35	37,4 ± 4,8

4 Diskussion

Die Befahrung des Bodens mit schweren Maschinen hat eine Verringerung des Porenvolumens, besonders der luftgefüllten weiten Grobporen, zur Folge. Die Zerstörung von Grobporen führt zwangsläufig zu einer Erhöhung der relativen Bodenfeuchte, da das nach der Befahrung verringerte Bodenvolumen noch die gleiche Menge Bodenwasser enthält (HILDEBRAND 1983). Neben der reinen Verdichtung kommt es durch die auftretenden Scherkräfte zur einer Unterbrechung der Porenkontinuität („Plastikfolieneffekt“) (HILDEBRAND et al. 2000). Beide Effekte führen zu einer Verringerung des Bodengasaustauschs. Das heißt, weniger Sauerstoff gelangt in den Boden und das bei der Bodenatmung produzierte Kohlendioxid reichert sich in der Bodenluft an.

Besonders strukturlabil und damit befahrungsfährdet sind Böden mit einem hohen Schluffanteil. Die enormen Belüftungsstörungen, die durch das Befahren mit dem Radlader auf dem schluffigen Boden des Forstbotanischen Gartens verursacht wurden, bestätigen dies eindrucksvoll. Vergleiche der CO₂-Konzentration mit Untersuchungen aus Waldböden mit ähnlichen Schluffgehalten zeigen, dass die Werte vor der Befahrung denen eines ungestörten Waldbodens entsprachen. Die CO₂-Konzentrationen nach der Befahrung lagen allerdings deutlich über den Werten von extrem verdichteten Rückegassen, wo mittlere CO₂-Konzentrationen von knapp 2 % gemessen wurden (GAERTIG et al. 2000).

Alle bisherigen Untersuchungen, die CO₂-Konzentrationen im Boden mit der Feinwurzelschließung oder der Vitalität von Bäumen in Beziehung gesetzt haben, lassen den Schluss zu, dass der Boden im Forstbotanischen Garten im Hauptwurzelraum nach der Befahrung seine Lebensraumfunktion für Wurzeln verloren hat (GAERTIG 2001, GAERTIG et al. 2010). Eine natürliche Regeneration des derart verdichteten Bodens ist nicht zu erwarten (SCHACK-KIRCHNER 1994, KREMER 2008).

Mit der durchgeführten Bodensanierungsmaßnahme konnte die Belüftungssituation im Boden jedoch deut-

lich verbessert werden und die Lebensraumfunktion für Wurzeln wieder hergestellt werden. Die direkt nach der Sanierung erhobenen CO₂-Konzentrationen, die signifikant niedriger waren als vor der Befahrung, lassen auf eine Überlockerung des Bodens durch die Maßnahme schließen. Das heißt, der Boden ist lockerer, als es dem aktuellen Zusammenspiel poren-schaffender und porenzerstörender Prozesse im Forstbotanischen Garten entspricht. Im Laufe eines Jahres hat sich die Belüftungssituation wieder dem ursprünglichen Zustand angenähert. Die CO₂-Gehalte der Bodenluft unterscheiden sich nicht mehr signifikant von der Ausgangssituation. Ob die aktuelle Belüftungssituation langfristig auf dem jetzigen Niveau bleibt oder es noch zu Sackungsverdichtungen kommt, kann zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht beurteilt werden.

Da die unterschiedlichen Bodenhilfsstoffe keinen messbaren Effekt auf die CO₂-Konzentration hatten, ist davon auszugehen, dass die Verbesserung der Belüftungssituation in erster Linie durch ein Aufbrechen der Bodenstruktur zustande gekommen ist. Gestützt wird diese Annahme durch die Beobachtung, dass die Bodenhilfsstoffe bei einer Profilgrabung lediglich in den Lanzenbohrlöchern gefunden wurde, aber nicht wie angenommen, sich im Boden durch den Druck verteilt haben. Das heißt, dass das Einführen der verwendeten Bodenhilfsstoffe bei ähnlich strukturierten Böden nicht geeignet ist, um ein Zusammensinken des Bodens nach einer Bodensanierungsmaßnahme zu verhindern. Dieser Befund deckt sich mit Untersuchungen von SMILEY (1994), HODGE (1993) und SCHNEIDER (1999), die ebenfalls keinen positiven Effekt von Bodenhilfsstoffen auf die Bodenbelüftung beobachten konnten.

Für welche Standorte die hier beschriebene Maßnahme Erfolg hat und wie nachhaltig sie ist, kann zum jetzigen Zeitpunkt nicht beurteilt werden. In der Literatur wird der Erfolg von Hochdrucklanzen zur Verbesserung der Bodenbelüftung kontrovers diskutiert (HASCHE und WELLS 2007, HODGE 1993, ROLF 1993, SMILEY et al. 1990, SMILEY 2001, URBAN 2008). Wichtige Faktoren für eine erfolgreiche Belüftung sind die Bodenart, die aktuelle Bodenfeuchte (ROBERTS et al. 2006) und der Grad der Vorverdichtung.

Literatur

ASLANBOGA (1976) nach SUKKOP, H. und WITTIG, R., 1998: Stadtökologie. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, Jena, Lübeck, Ulm. 474 pp.

DIERS, M., 2010: Der Einfluss von Bodensanierungsmaßnahmen auf den Bodengashaushalt im Forstbotanischen Garten in Göttingen. unveröffentlichte Bachelorarbeit an der HAWK HHG, Fakultät Ressourcenmanagement, 36. pp.

FOSTER, R. S.; BLAINE, J., 1978: Urban tree survival: trees in the sidewalk. *Journal of Arboriculture*: 4 (1), 14–17.

GAERTIG, T., 2001: Bodengashaushalt, Feinwurzeln und Vitalität von Eichen. *Freiburger Bodenkundl. Abhandlungen* 40.

GAERTIG, T.; PULS, C.; SCHACK-KIRCHNER, H.; HILDEBRAND, E. E., 2000: Die Beurteilung der Bodenstruktur in Waldböden: Feldbodenkundliche Merkmale und ihre Relevanz für die aktuelle Bodenbelüftung auf Lösslehm-Standorten. *Allg. Forst u. J.-Zeitg.* 171: 227–234.

GAERTIG, T.; GERHARDT, D.; WELTECKE, K., 2010: Nachweis von Belüftungsstörungen infolge der Neuanlage eines Spielplatzes. In: DUJESIEFKEN, D. (Hrsg): *Jahrbuch der Baumpflege 2010*, Haymarket Media, Braunschweig, 280–285.

HILDEBRAND, E. E., 1983: Der Einfluß der Bodenverdichtung auf die Bodenfunktionen im forstlichen Standort. *Forstwissenschaftl. Cbl.* 102: 111–125.

HILDEBRAND, E. E.; PULS, C.; GAERTIG, T.; SCHACK-KIRCHNER, H., 2000: Flächige Bodenverformung durch Befahren. *Allgem. Forst Zeitschr./Der Wald* 55 (13): 683–686.

HASCHER, W.; WELLS, C. E., 2007: Effects of Soil Decompaction and Amendment on Root Growth and Architecture in Red Maple (*Acer rubrum*). *Arboriculture & Urban Forestry*, 428–432.

HODGE, S. J., 1993: Using Steel rods for the Non-destructive Assessment of Aeration. In: *The Landscape Below Ground*. International Society of Arboriculture, 201–206.

KREMER, J., 2008: Regenerationsvermögen befahrungsbedingt strukturveränderter Böden, *LWF Aktuell* 67 13–15.

LUNG (Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern): Beiträge zum Bodenschutz in Mecklenburg-Vorpommern. URL: <http://www.lung.mv-regierung.de/dateien/bodenverdichtung.pdf> (zugegriffen am 01.12.2010).

ROBERTS, J.; JACKSON, N.; SMITH, M., 2006: *Tree roots in the Built Environment*. TSO (The Stationery Office) London, 488.

ROLF, K., 1993: Soil Compaction and Loosening Effects on Soil Physics and Tree Growth. In: *The Landscape Below Ground*. International Society of Arboriculture, 131–148.

SCHACK-KIRCHNER, H., 1994: *Struktur und Gashaushalt von Waldböden*. Forschungszentr. Waldökosysteme der Uni Göttingen. Reihe A Bd. 112. 145 pp.

SMILEY, E. T.; WATSON, G. W.; FRAEDRICH, B. R.; BOOTH, D. C., 1990: Evaluation of soil aeration equipment. *Journal of Arboriculture*: 16 (5), 118–123.

SMILEY, E. T., 2001: Terravent: Soil fracture patterns and impact on bulk density. *Journal of Arboriculture*: 27 (6), 326–330.

URBAN, 2008: *Up by roots. Healthy Soils and Trees in the Built Environment*. International Society of Arboriculture, Champaign, Illinois, 479 pp.

ZAR, J. H., 1999: *Biostatistical analysis*. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.

Autoren

Dipl.-Ing. Katbarina Weltecke ist wissenschaftliche Mitarbeiterin an der HAWK, Fachhochschule Hildesheim / Holzminden Göttingen. *B.-Sc. Marco Diers* hat an der HAWK Arboristik studiert und ist derzeit Masterstudent an der Georg-August-Universität Göttingen im Bereich Forstwissenschaften. *Prof. Dr. Thorsten Gaertig* hat die Professur für die Angewandte Bodenkunde und Stadtökologie an der HAWK, Fachhochschule Hildesheim/Holzminden/Göttingen inne.

*Dipl.-Ing.
Katbarina Weltecke
HAWK Fakultät
Ressourcenmanagement
Büsgenweg 1a
37077 Göttingen
Tel. (05 51) 50 32-171
weltecke@hawk-hbg.de*

