



Foto: M. Müller-Inkemann

Kostengünstig und praxisnah: Die Eisenstabmethode

Eisenstäbe zur Erfassung der Bodenbelüftung

Durch das Befahren mit Forstmaschinen unter ungünstigen Einsatzbedingungen kommt es infolge der Bodenverformung zu Belüftungsstörungen, die wiederum eine Beeinträchtigung des Wurzelsystems der Waldbäume zur Folge haben können.

Eine kostengünstige und praxisnahe Methode zur Abschätzung der Belüftungssituation wird beschrieben, bei der sich das Rosten von Eisen zunutze gemacht wird.

Michael Müller-Inkemann, Audrey Averdiek,
Heinz-Christian Fründ

Der Lufthaushalt des Bodens ist eine bedeutende Steuergröße für die Ausbildung des Wurzelsystems der Waldbäume. Für die Standortansprache in Bayern wurde deshalb ein Konzept zur Beschreibung des standörtlichen Lufthaushalts zusätzlich zum Wasserhaushalt entwickelt [3]. Belüftungsstörungen sind auch charakteristisch für Bodenverformungen, wie sie beim Befahren mit Forstmaschinen unter ungünstigen Einsatzbedingungen auftreten. Derartige Bodenbelüftungsstörungen führen zu einer Absenkung des Redoxpotenzials und zu Sauerstoffmangel im Boden, was sich wiederum negativ auf Baumwurzeln auswirkt.

Der Nachweis einer eingeschränkten Belüftungssituation erfordert Messungen der Konzentration von CO_2 oder O_2 in der Bodenluft. Eine andere Möglichkeit ist die Messung des Redoxpotenzials. Die genannten Methoden sind relativ aufwändig und werden in der Regel nur in Forschungsprojekten angewendet. Außerdem gibt das Auftreten von Staunässemerkmalen feldbodenkundlich einen Hinweis auf zeitweisen Luftmangel. So schätzen Falk et al. [3] den Bodenlufthaushalt mit einem empirischen Regressionsmodell aus Standortdaten ab,

und Gaertig et al. [4] nutzen zur Bestimmung der Verformungsintensität die Struktur und Redoximorphie des Bodens.

Eine praktisch leicht einsetzbare Möglichkeit der Standorterkundung ist die Eisenstabmethode, die erstmals in den USA erwähnt wurde [7]. In den letzten Jahrzehnten wurde sie zur Erfassung wassergesättigter Horizonte [u. a. 9, 10] oder zur Beurteilung der Belüftungssituation an urbanen Baumstandorten [6] verwendet. Auf einer Versuchsfläche in South Carolina dienten Eisenstäbe zur Ermittlung der Tiefenausdehnung reduzierender Bedingungen in Rückegassen [1]. Eine gründliche

Methodenprüfung mit Parallelmessungen der Sauerstoffkonzentration wurde erst in jüngerer Vergangenheit von Owens et al. [8] durchgeführt. Demnach erfahren blanke Eisenstäbe in feuchtem Boden nach einigen Tagen Veränderungen im Erscheinungsbild, die auf die Belüftungsverhältnisse schließen lassen. Bei einem Sauerstoffgehalt $> 5\%$ vol. und feuchtem Boden kommt es zu deutlicher Rostbildung (Eisenhydroxid). Bei freiem Wasser im Boden und weniger als 2 mg/l Sauerstoff im Bodenwasser entsteht auf der Metalloberfläche ein stumpfer, schwarz-grauer Belag (Patina). Bei starker Trockenheit im Boden bleibt das blanke Eisen unverändert, was in der Regel mit hohen Sauerstoffkonzentrationen ($> 12\%$ vol.) einhergeht.

In diesem Artikel wird über Erfahrungen mit der Eisenstabmethode bei der Untersuchung von Befahrungsfolgen in Rückegassen berichtet. Dabei lag der Schwerpunkt der Beobachtungen auf der Ausbildung von Patina (Indiz für sauerstoffarme Bodenverhältnisse), um für Baumwurzeln ungünstige Bodenzone zu identifizieren.

Material und Methodik

Die Eisenstabmethode wurde auf einer RÜWOLA-Versuchsfläche in den Niedersächsischen Landesforsten im Forstamt Dassel auf mehreren neu angelegten Rücke-

Schneller Überblick

- Der Lufthaushalt des Bodens spielt für die Wurzelbildung von Waldbäumen eine wichtige Rolle
- Nach dem Einsatz von Forstmaschinen im Bestand, v. a. unter schlechten Einsatzbedingungen, kommt es durch die Bodenverdichtung zu Belüftungsstörungen
- Eisenstäbe bieten eine kostengünstige und einfache Methode, um die Belüftungssituation nach einer Befahrung abzuschätzen

gassen erprobt. Der Boden ist eine Braunerde unter Buche mit einer 30 bis 60 cm mächtigen Decke aus saurem Lösslehm über Buntsandstein. Die Befahrung erfolgte bewusst bei feuchtem Boden im Dezember bis März 2012/13, um deutliche Fahrspuren zu erhalten. Die Spurtiefen nach der Befahrung lagen überwiegend zwischen 5 und 15 cm (ohne Randwulst). Eisenstäbe wurden in den Fahrspuren, dem Mittelstreifen (Bereich zwischen den Fahrspuren) und im unbefahrenen Bestand jeweils von September bis Oktober in den Jahren 2013 bis 2015 eingesetzt.

Verwendet wurden angespitzte Stäbe mit einer Länge von 30 cm und einem Durchmesser von 0,8 cm aus handelsüblichem Stahl (S235JRC+C, Kohlenstoffgehalt 0,2 %). Das den Eisenstäben anhaftende Öl wurde einen Tag vor dem Eintrieb in den Boden in einem Aceton-Tauchbad entfernt. Die entfetteten Eisenstäbe wurden in einem verschlossenen Behältnis mit Trocknungsmittel (z. B. Luftentfeuchter für Waffenschränke) zwischengelagert, um eine frühzeitige Rostbildung zu verhindern. Anschließend wurden sie 27 cm tief in den Mineralboden getrieben. Auf die aus dem Boden herausschauende 3 cm lange Spitze wurde eine Kunststoffhülse zur Markierung gesteckt. Nach vier bis fünf Wochen Verweilzeit wurden sie mithilfe einer Gripzange aus dem Boden herausgezogen. Feuchte Eisenstäbe wurden mit einem Baumwolltuch trocken getupft und sämtliche Stäbe wurden in einer luftdurch-

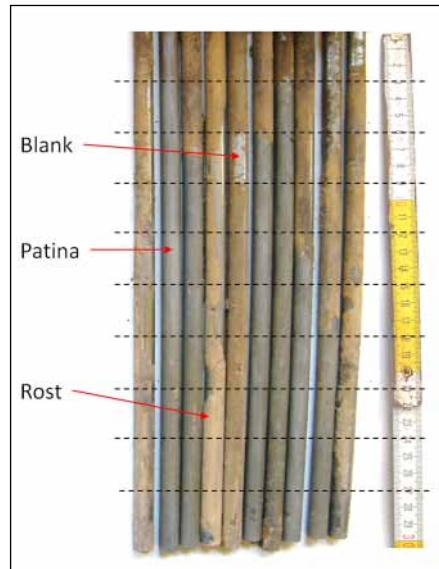


Abb. 1: Eisenstäbe nach Verweilzeit im Boden mit unterschiedlicher Berostungsintensität

strömten Gitterbox für den Transport zwischengelagert, um ein ungewolltes Rosten außerhalb des Bodens zu unterbinden.

Einen Tag nach dem Ziehen der Eisenstäbe wurden sie visuell ausgewertet (Abb. 1). Hierfür wurde jeder Stab in Abschnitte von jeweils drei Zentimetern unterteilt. Ein Stababschnitt wird entsprechend seiner Berostungsintensität bewertet und einer Kategorie zugeordnet (Tab. 1). Die Auswertung des Erscheinungsbildes erfolgte anschließend über den prozentualen Anteil der jeweils betrachteten Bewertungskategorie an der Gesamtmenge der Stababschnitte.

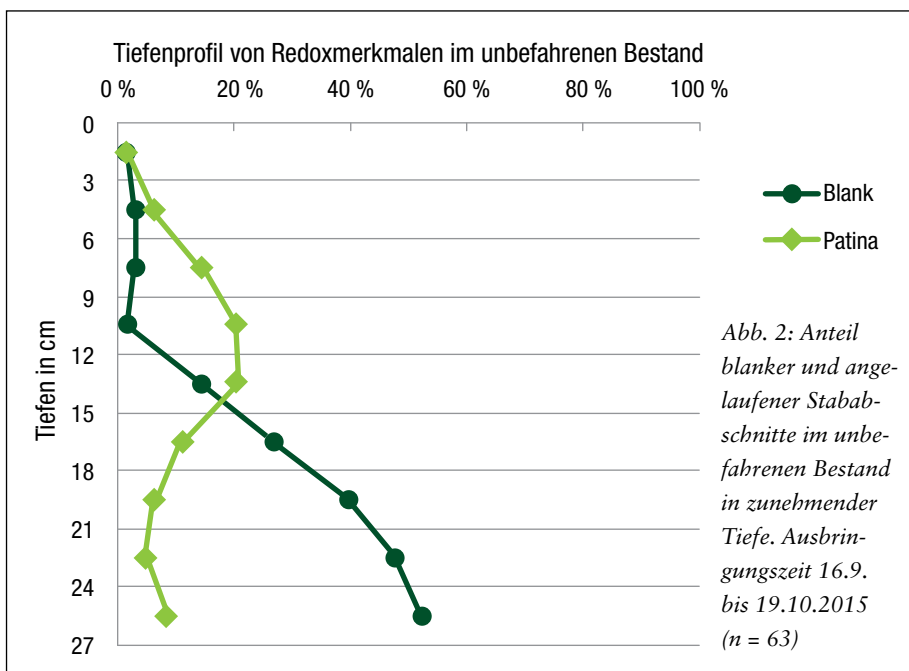


Abb. 2: Anteil blanker und angelaufener Stababschnitte im unbefahrenen Bestand in zunehmender Tiefe. Ausbringungszeit 16.9. bis 19.10.2015 (n = 63)

Ergebnisse und Diskussion

In Abb. 2 werden die Tiefenprofile der Stababschnitte ohne Rost, getrennt nach „Patina“ und „Blank“, im unbefahrenen Bestand des Jahres 2015 dargestellt. Der Vergleich offenbart zwei verschiedene Kurvenverläufe, die bei einer alleinigen Darstellung der Bereiche ohne Rost (Patina und Blank zusammengefasst) nicht aufgezeigt worden wären. Bis in eine Tiefe von 15 cm überwiegen Abschnitte mit Patina und ab einer Tiefe von 15 cm überwiegen blanke Stababschnitte. Zur Interpretation der Ergebnisse muss man sich klar machen, dass eine Bodenpore nur mit Wasser oder Luft gefüllt sein kann und ein wassergesättigter Boden eine wesentlich geringere Luftleitfähigkeit als ein trockener Boden hat. Das Bodenwasser ist somit ein Schlüsselfaktor der Bodenbelüftung und wirkt sich stark auf die Färbung der Eisenstäbe aus. Im ersten Moment erscheint es paradox, dass die Belüftung in größerer Bodentiefe günstiger sein soll als im Oberboden. Schließlich steht der Oberboden in direktem Austausch mit der Atmosphärenluft. Die Eisenstäbe waren in einer Phase der Wiederbefeuchtung des Bodens nach dem extrem warmen und trockenen Sommer 2015 im Boden. Das Bodenwasser wurde als Wasserfront in tiefere Schichten verlagert, welche im Ausbringungszeitraum bis in eine Tiefe von 15 cm vorgedrungen war. Unterhalb war es aber immer noch derart trocken, dass infolge des Wassermangels kein Rost und keine Patina gebildet werden konnten. Die Eisenstabmethode stößt hier zur Beurteilung der Belüftungssituation an ihre Grenzen, da Wassermangel ursächlich für die blanken Stellen war und nicht ein Sauerstoffmangel. Zur Identifizierung belüftungsgehemmter Bodenzonen mit der Eisenstabmethode muss deshalb die Bodenfeuchte beachtet werden. Die Bewertung des Merkmals „mit Patina“ gibt zuverlässigere Hinweise als das Kriterium „ohne Rost“.

In Abb. 3 werden die Tiefenprofile der Stababschnitte mit Patina getrennt nach den Ausbringungsorten dargestellt. Augenfällig ist die Ausbauchung aller Kurven, welche im Bereich von 9 bis 12 cm ihre maximale Ausdehnung erfährt. Unter der Fahrspur traten die hohen Flächenanteile von Patina an den Eisenstäben allerdings in allen drei Untersuchungs-jahren auf, unabhängig vom Witterungsverlauf. Hier ist der Belüftungsmangel durch Bodenverdichtung und weniger durch

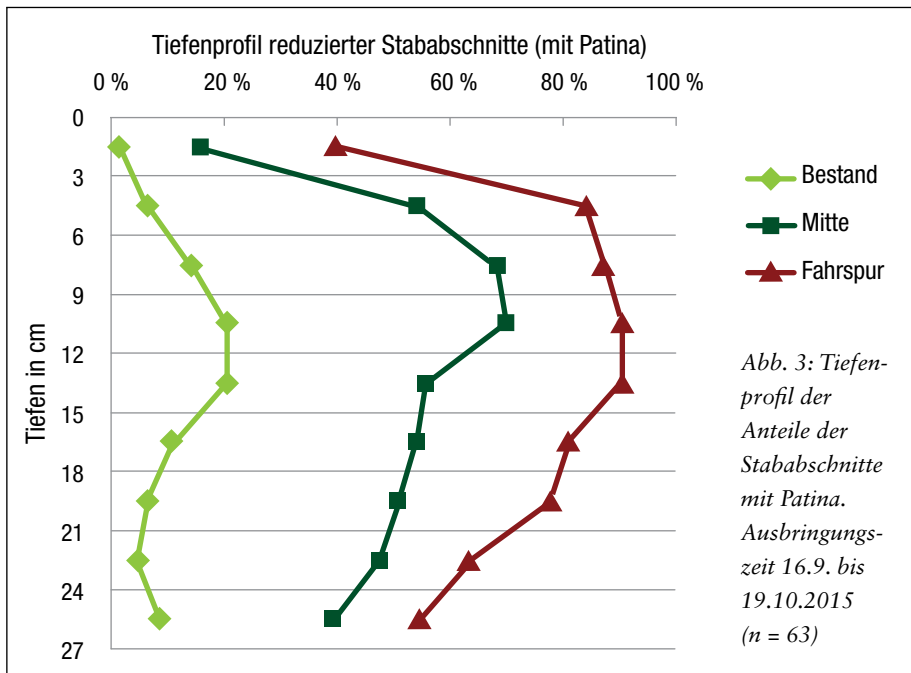


Abb. 3: Tiefenprofil der Anteile der Stababschnitte mit Patina. Ausbringungszeit 16.9. bis 19.10.2015 (n = 63)

die aktuelle Bodenfeuchte zu erklären. Eine zunehmende Beeinträchtigung der Bodenbelüftung (Ausbildung von Patina) in der Reihenfolge unbefahrener Bestand < Mittelstreifen < Fahrspur war die Regel in allen Untersuchungsjahren und in allen Tiefenstufen. Die klimatischen Unterschiede zwischen den Untersuchungsjahren machten sich vor allem im unbefahrenen Bestand bemerkbar. Der Anteil der Stababschnitte mit Patina betrug dort 2013 0,8 %, 2014 38,7 % und 2015 10,7 %. Die Ausbildung von Rost war im Bestand stets am größten, was auf eine wesentlich bessere Sauerstoffversorgung im Vergleich zur befahrenen Rückegasse hinweist. Interessant ist, dass sich die Befahrung der Rückegasse auch auf den unverdichteten Mittelstreifen auswirkte. Im Mittelstreifen wurde auch eine höhere Bodenfeuchte als im Bestand festgestellt [5], was die Bodenbelüftung beeinträchtigt haben kann.

Hinsichtlich der Ausbringungsdauer der Stäbe gibt es unterschiedliche Empfehlungen. Nach Carnell und Anderson [2] sollte der Zeitraum nicht kürzer als ein Monat und nicht länger als drei Monate sein, da kürzere Zeiträume zu inkonsistenten Berostungsgraden führen können und bei längeren Ausbringungszeiten Schwankungen der Bodenfeuchte bzw. des Sauerstoffgehalts nicht erfasst werden. Unter für die Rostbildung günstigen Bodenverhältnissen im Laborversuch konnten Owens et al. [8] bereits nach drei Tagen eine vollständige Bedeckung der Stäbe mit Rost beobachten. Wir konnten bei Expositionen von 21 bis 89 Tagen

keinen Einfluss der Expositionsdauer auf den Berostungsgrad feststellen. Außerdem nimmt die Intensität der Rostbildung mit der Zeit erheblich ab, weshalb eine längere Versuchsdauer keine wesentlichen Zusatzinformationen bringt.

Das Markieren der Stäbe mittels Kunststoffhüllen ist unbedingt zu empfehlen, da verwehte Streu oder krautige Vegetation die Stabspitzen überdecken können – ein Auffinden der Stäbe wäre erheblich erschwert. Ist die Hülse im Querschnitt halboval, bildet sich auf dem Eisen ein Roststreifen, der den oberirdischen Teil des Stabes deutlich markiert. Sollte eine Auswertung nicht zeitnah erfolgen können, ist es unproblematisch, die Eisenstäbe in einem verschlossenen Behälter mit Trocknungsmittel zu lagern.

Folgerungen

Die Eisenstabmethode ist eine robuste Methode zur Abschätzung der Belüftungssituation, die von jedermann durchgeführt werden kann. Es können Boden-zonen mit Sauerstoffmangel sowohl in der Tiefe als auch in der Fläche aufgespürt

Kategorie	Interpretation
Blank	Boden zu trocken für Rostbildung oder Anhaftung von Substanzen, die das Eisen vor Rost geschützt haben
Patina	Feuchter Boden mit Sauerstoffmangel
Rost	Feuchter, gut belüfteter Boden

Tab. 1: Übersicht über die verwendeten Bewertungskategorien und ihre Bedeutung

werden. Aufgrund der geringen Kosten zur Anschaffung der Eisenstäbe und der einfachen Ausbringung ist es möglich, eine hohe Stichprobenanzahl auf großer Fläche zu realisieren. Die Materialkosten belaufen sich auf ca. 2,50 € pro Stab. An einem Tag können problemlos 120 Stäbe in einem Bestand ausgebracht werden. Es dürfte auch möglich sein, Eisennägel zu verwenden, die im Baustoffhandel je nach gekaufter Anzahl im Bereich von 0,90 bis 1,50 € pro Stück kosten (300er-Nägel), wodurch die Methode noch günstiger würde. Letztlich sind Eisenstäbe ein probates Hilfsmittel, um die Auswirkung eines Maschineneinsatzes auf die Bodenbelüftung aufzuzeigen, durch Befahrung gestörte Bereiche zu identifizieren (u. a. alte Fahrspuren ohne Zeigerpflanzen) oder Regenerationsprozesse zu belegen. Da es noch keine validierten Beurteilungswerte für den Berostungsgrad gibt, sollte man jedoch eine Referenzfläche in die Untersuchung miteinbeziehen.

Literaturhinweise:

[1] AUST, W. M.; TIPPETT, M. D.; BURGER, J. A.; MCKEE, W. H. (1995): Compaction and rutting during harvesting affect better drained soils more than poorly drained soils on wet pine flats. *Southern Journal of Applied Forestry*, 19(2), 72-77. [2] CARNELL, R.; ANDERSON, A. (1986): A technique for extensive field measurement of soil anaerobism by rusting of steel rods. *Forestry*, 59(2), 129-140. [3] FALK, W.; OSENSTETTER, S.; DIETZ, E. (2011): Konzept für ein quantitatives Verfahren zur Kennzeichnung des Lufthaushaltes von Waldböden in Bayern. *Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz*, Heft 12, 93-99. [4] 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. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung*, 171(12), 227-234. [5] FRÜND, H.-C.; AVERDIEK, A.; MÜLLER-INKMANN, M.; HEMKER, O. (2013): Bodenperforation (Lochstanzen) als Maßnahme zur Behandlung von Fahrspurvverdichtungen im Wald. In: *Jahrestagung der DBG „Böden – Lebensgrundlage und Verantwortung“*, 7.-12. September 2013, Rostock, <http://eprints.dbg.de/965/>. [6] HODGE, S. J.; BOSWELL, R.; KNOTT, K. (1993): Development of the steel rod technique for the assessment of aeration in urban soils. *Journal of Arboriculture*, 19(5), 281-288. [7] MCKEE JR., W. H. (1978): Rust on iron rods indicates depth of soil water tables. In: *BALMER, W. E. (Hrsg.): Proceedings Soil Moisture...Site Productivity Symposium*. Myrtle Beach 1.-3. Nov. 1977, 286-291. [8] OWENS, P. R.; WILDING, L. P.; MILLER, W. M.; GRIFFIN, R. W. (2008): Using iron metal rods to infer oxygen status in seasonally saturated soils. *Catena*, 73(2), 197-203. [9] QUALLS, R. G.; RICHARDSON, C. J.; SHERWOOD, L. J. (2001): Soil reduction-oxidation potential along a nutrient-enrichment gradient in the Everglades. *Wetlands*, 21(3), 403-411. [10] SPINALE, F. G.; MCKEE, W. (1985): Use of iron rods to determine the depth of seasonal water tables for absorption fields in sewage disposal systems. *Journal of Environmental Health*, 48(1), 26-27.

Michael Müller-Inkmann, m.mueller-inkmann@baum-boden.de, Audrey Averdiek und Prof. Dr. Heinz-Christian Fründ sind Mitarbeiter der Hochschule Osnabrück, Fakultät Agrarwissenschaften u. Landschaftsarchitektur. Die Arbeit wurde gefördert durch das Niedersächsische Ministerium für Wissenschaft und Kultur. www.hs-osnabrueck.de/ruewola

