

Wurzelworkshop: Auf der Suche nach Wasser – Wie können sich Baumwurzeln an Trockenheit anpassen?

Workshop about roots: In search of water – How tree roots adapt to drought

Katrin Pietig

Zusammenfassung

Die Wurzeln von Bäumen sind überlebenswichtige Organe, welche u. a. die Nährstoff- und Wasseraufnahme des Baumes sicherstellen. Sie sind eine Einflussgröße im Bodenwasserhaushalt und können auf verschiedenste Weisen durch Trockenheit beeinflusst werden. Im Laufe der Zeit haben sie einige Anpassungsmechanismen entwickelt. Umweltbildungsmaßnahmen in Form von Wurzelworkshops ermöglichen es, verschiedene Aspekte von Wurzeln, wie z. B. ihre Morphologie oder Ektomykorrhiza-Assoziationen, zu untersuchen. An realen Beispielen können Workshopteilnehmende etwas über mögliche Anpassungsstrategien lernen und die Relevanz von Wurzeln in Hinblick auf die Zukunft unserer Wälder hautnah erleben.

Wurzeln, Bodenwasser, Morphologie, Mykorrhiza, Wurzelworkshop

Abstract

The roots of trees are essential organs that ensure the uptake of nutrients and water for the tree's survival. They play a significant role in the soil-water balance and can be influenced in various ways by drought. However, trees have evolved several adaptation strategies against drought. Environmental education in form of root workshops provide opportunities to explore various aspects of roots, such as their morphology or ectomycorrhizal associations. Through real-life examples, workshop participants can learn about potential adaptation strategies and experience firsthand the importance of roots in the context of the future of our forests.

roots, soil water, morphology, mycorrhiza, workshop about roots

doi: 10.23766/NiPF.202401.09

Einführung

Neben dem oberirdischen Teil eines Baumes mit seinen Blättern, Zweigen und dem Stamm haben Bäume auch eine versteckte unterirdische Hälfte. Diese besteht aus einem verwachsenden Geflecht aus Wurzeln. Wurzeln bilden überlebenswichtige Organe für den Baum, denn sie stellen den Kontakt zwischen Baum und Boden dar (BRUNNER et al., 2015; ESHEL & BEECKMAN, 2013; GERMON et al., 2020). In den vergangenen Jahren (2018 und 2019) haben die Bäume in Deutschland stark unter extremen Dürreperioden gelitten (THONFELD et al., 2022). Die Wasserspeicherkapazität des Bodens und die Dynamik der Bodenwasserentnahme durch die Wurzeln sind wichtige Faktoren, die die hydrologischen Schwellenwerte der Baumarten angesichts eines sich immer stärker erwärmenden und trockeneren Klimas bestimmen (FAN et al., 2017; AMELUNG et al., 2018). BOEING et al. (2022) haben gezeigt, dass die Intensität der Bodentrockenheit bis 2 m Bodentiefe in den vergangenen Jahren alarmierend zugenommen hat. Zudem existieren große regionale Unterschiede in der Feuchtigkeit des Bodens (BOEING et al., 2022). Niedrige Bodenfeuchtigkeit kann Wurzeln Trockenstress aussetzen (MEIER et al., 2018).

Für die meisten Pflanzenwurzeln und besonders für Baumwurzeln gilt, dass Wurzeln eine Schlüsselrolle in der Funktion und Leistung des Organismus Baum übernehmen und zusätzlich in einer Vielzahl verschiedener ökologischer Prozesse involviert sind (LOZANOVA et al., 2019). Zu den wichtigsten Aufgaben von Baumwurzeln zählt die Aufnahme von Wasser und Nährstoffen aus dem Boden (YANG et al., 2023). Das durch Feinwurzeln aufgenommene Wasser und die gelösten Nährelemente werden durch Wurzeln größerer Durchmesser an andere Organe eines Baumes weitergeleitet (GERMON et al., 2020). Doch auch die Verankerung und Stabilität von Bäumen im Boden werden besonders durch dickere Wurzeln mit einem großen Durchmesser sichergestellt (COUTTS, 1968). Durch die Aufnahme von Wasser aus dem Boden gelten die Wurzeln damit als Einflussgröße im Bodenwasserhaushalt (AMELUNG et al., 2018). Kommt es nun zu einer Dürreperiode und Trockenheit, können die Wurzeln in ihrem Wachstum und ihrer Struktur beeinträchtigt werden. MCCORMACK & GUO (2014) konnten u. a. nachweisen, dass eine geringere Bodenfeuchtigkeit in einer kürzeren Lebensdauer von Feinwurzeln und einem damit verbundenen höheren Wurzelumsatz resultieren. Weiter nimmt die hydraulische Leitfähigkeit zwischen den Wurzeln und dem Boden ab, was zu



verminderten Wasser- und Nährstoffaufnahmeleistungen führen kann (BRUNNER et al., 2015; CHOAT et al., 2019). Eine weitere Beeinträchtigung des Wurzelsystems kann entstehen, wenn Luft in die Leitbahnen der Wurzeln gelangt und Luftbläschen (Embolien) das hydraulische Netzwerk des Baumes schädigen (BRODERSEN et al., 2013; CHOAT et al., 2019). All diese Beeinträchtigungen können zu einer ansteigenden Mortalität der Wurzeln und im schlimmsten Fall sogar zum Absterben des Baumes führen (ANDEREGG et al., 2013; MEIER & LEUSCHNER, 2008). Ist eine größere Anzahl von Bäumen betroffen, ist eine reduzierte Waldgesundheit und eine abnehmende Produktivität die Folge (BRUNNER et al., 2015). Dennoch bestehen nach wie vor Wissenslücken und weiterer Forschungsbedarf, die Sensitivität und die Anpassung von Bäumen an Trockenheit zu untersuchen (FUCHS et al., 2020).

Einige mögliche Anpassungsstrategien von Baumwurzeln an eine reduzierte Wasserverfügbarkeit sind allerdings schon bekannt. Diese Mechanismen unterscheiden sich teilweise zwischen den verschiedenen Baumarten (BRUNNER et al., 2015). Eine mögliche Antwort auf Trockenstress ist die Anpassung der Wurzelbiomasse (MEIER & LEUSCHNER, 2008). Entlang des Bodenprofils kann die vertikale Biomasseverteilung stark variieren (FAN et al., 2017). Baumarten mit einer größeren maximalen Wurzeltiefe sind in der Lage, auch tiefere, vorher unerreichbare Wasserreservoirs zu erschließen (GERMON et al., 2020). Dies ermöglicht eine gesicherte Wasseraufnahme auch bei Trockenheit im Oberboden (GERMON et al., 2020). Neben der Wurzeltiefe ist auch die Morphologie von Wurzeln entscheidend für eine effiziente Wasser- und Nährstoffaufnahme (MEIER et al., 2018). Bei geringer Wasserverfügbarkeit können beispielsweise Adaptionen in der Anzahl der Wurzelspitzen und -verzweigungen vorgenommen werden, oder die Wurzellänge und der Durchmesser der Wurzeln verändern sich (BRUNNER et al., 2015; FRESCHET et al., 2021). Ein in der Öffentlichkeit immer präsenteres Thema ist der Einfluss von Mykorrhiza-Pilzen auf die Baumwurzeln.

Wurzelworkshop

Um die Relevanz und Bedeutung von Baumwurzeln in der Gesellschaft deutlich zu machen und zu bewerben eignen sich verschiedene Umweltbildungsmaßnahmen. Eine gute Möglichkeit um Wissen zu vermitteln, bieten Workshops. Innerhalb einer kurzen Zeitspanne ist es möglich, Menschen verschiedene Bereiche der Wurzelforschung hautnah zum Anfassen anzubieten. Je nach infrastrukturellen und zeitlichen Voraussetzungen ist es möglich, von der Beprobung von Wurzeln bis hin zu ersten optischen Analysen, unterschiedliche Schritte der Wurzelforschung zu durchlaufen. Die Zielstellung des Workshops definiert, welche und wie viele der im Folgenden beschriebenen möglichen Methoden genutzt werden können.

1. Beprobung von Wurzeln

Für die Beprobung von Wurzeln gibt es viele verschiedene Methoden. Im Rahmen eines Workshops bietet sich beispielsweise die Probenahme mittels eines Stechrahmens in einem sich in der Nähe befindenden Wald an, vorausgesetzt, es liegt eine Geneh-

migung durch den Waldbesitzenden vor (Abb. 1). Zufällig verteilt oder mit festgelegten Abständen zum nächsten Baum können je nach Anzahl an Teilnehmenden verschieden viele Monolithe (quadratische Bodenblöcke) beprobt werden. Hierzu wird die organische Auflage und die Humusschicht des Bodens abgetragen und mittels Stechrahmens (z. B. 25x25x10 cm) ein volumengerechtes Stück Boden entnommen. Alternativ zum Stechrahmen können auch zylindrische Bodenbohrer genutzt werden, um volumenmäßig kleinere Wurzelproben zu entnehmen (FRESCHET et al., 2021).



Abbildung 1:
Entnahme von
Wurzelproben mittels
Stechrahmen in einem
Buchenwald.

2. Verarbeitung der Wurzeln

Um die Wurzeln vom Boden zu lösen, bietet es sich an, die Wurzelprobe ein paar Stunden in Wasser einweichen zu lassen. Anschließend können die Wurzeln mit Hilfe eines Wasserschlauchs mit Düse vorsichtig von Erde befreit und gewaschen werden (FRESCHET et al., 2021).

3. Analyse der Wurzelproben

3.1 Klassifizierung der Wurzeln

Je nachdem, ob es sich bei dem beprobten Waldbestand um einen Rein- oder Mischbestand handelt, können viele unterschiedliche Wurzeln von verschiedenen Baumarten in der Probe gefunden werden. Steht ein Labor mit Stereomikroskopen zur Verfügung, können die verschiedenen Wurzeln darunter betrachtet werden (Abb. 2). Die Wurzeln der verschiedenen Baumarten unterscheiden sich hinsichtlich der Farbe und anderer morphologischer Merkmale (HÖLSCHER et al., 2002), so z. B. auch bei den Wurzeln der in Deutschland wachsenden *Pseudotsuga menziesii* (Douglasie) und *Fagus sylvatica* (Buche) (Abb. 2). Ebenso können die Wurzeln auch hinsichtlich ihrer Vitalität in die Kategorien tot und lebendig eingeordnet werden (FRESCHET et al., 2021). Unter der Zuhilfenahme eines Messschiebers können die Wurzeln auch in die verschiedenen Durchmesserklassen: Feinwurzeln (< 2 mm), Schwachwurzeln



Abbildung 2: Fotos von Feinwurzeln mit Ektomykorrhizen der Baumarten a) *Pseudotsuga menziesii* und b) *Fagus sylvatica*.

(2- 5 mm) und Grobwurzeln (> 5 mm) klassifiziert werden (BÖHM, 1979). Der Leiter bzw. die Leiterin des Workshops sollte vorab mit den Workshopteilnehmenden notwendige Kriterien zur Unterscheidung der Wurzeln und deren jeweilige Funktion besprechen.

3.2 Morphologie der Wurzeln

Die Morphologie von Wurzeln kann Aufschluss darüber geben, wie Wurzeln unterirdisch den Boden erschließen, um Wasser und Nährstoffe aufnehmen zu können (FRESCHET & ROUMET, 2017). Morphologische Eigenschaften geben Hinweise in welcher Weise sich Wurzeln an klimatische und edaphische Gegebenheiten anpassen können (COMAS et al., 2013). Zu den relativ einfach zu messenden Merkmalen zählt z.B. der Durchmesser von Feinwurzeln (FRESCHET et al., 2021). So kommen beispielsweise dickere Feinwurzeln bevorzugt in tonreicheren Böden mit einer höheren Bodendichte vor (MATERECHERA et al., 1992). Dünnere Feinwurzeln stehen oft in Verbindung mit einer größeren spezifischen Wurzellänge und sind so besser an die Wasserabsorption in grobkörnigeren Böden angepasst (FRESCHET et al., 2021). Mittels eines Messschiebers kann im Rahmen eines Wurzelworkshops grob der Durchmesser von verschiedenen Feinwurzeln gemessen werden. Dieser unterscheidet sich oft nicht nur zwischen verschiedenen Standorten, sondern auch zwischen verschiedenen Baumarten.

3.3 Assoziation der Wurzeln mit Ektomykorrhizen

Mykorrhizen sind eine Form der mutualistischen Symbiose zwischen höheren Pflanzen und Pilzen. Schon vor über 400 Millionen Jahren hat sich diese Symbiose zwischen Pflanzen und Pilzen entwickelt (ALLEN, 2022). Der Pilz erhält von der Pflanze Kohlenhydrate, im Gegenzug leitet er wichtige Nährstoffe wie Stickstoff und Phosphor an die Pflanze weiter (VAN DER HEIJDEN et al., 2015). Weiter kann der Pilz durch die vergrößerte Absorptionsoberfläche zu einer erhöhten Wasseraufnahme beitragen. Dieses ist besonders bei Trockenheit von Vorteil (ALLEN, 2022). Es existieren ver-

schiedene Formen der Mykorrhiza-Symbiose, von denen eine die Ektomykorrhizen sind (FINLAY, 2008). Es gibt eine hohe Diversität an Ektomykorrhiza-Pilzen und für eine genaue Artbestimmung sind genetische Methoden nötig (VARMA, 1999). Dennoch können auch optisch unter Zuhilfenahme eines Stereomikroskops verschiedene Morphotypen von Ektomykorrhizen mit ihren vielen verschiedenen Farben und Formen identifiziert und betrachtet werden (Abb. 2) (AGERER, 1987-2012).

Die fünf oben genannten Methoden können im Rahmen eines Wurzelworkshops angewendet werden. Jede einzelne Methode dient dazu, dass sich die Workshopteilnehmenden mit dem Thema Wurzeln aus einer anderen Sichtweise auseinandersetzen. Am Ende des Workshops können hoffentlich alle Teilnehmenden ein bisschen in die unterirdische Welt der Wurzeln eintauchen und ihre Vielfalt und Relevanz für die Bäume und unsere Wälder in einer sich immer stärker verändernden Zukunft nachvollziehen.

Literaturverzeichnis

- AGERER, R. (1987-2012). Colour atlas of ectomycorrhizae. Einhorn-Verlag Dietenberger.
- ALLEN, M. F. (2022). Mycorrhizal dynamics in ecological systems. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781139020299>
- AMELUNG, W., BLUME, H.-P., FLEIGE, H., HORN, R., KANDELER, E., KÖGEL-KNABNER, I., KRETZSCHMAR, R., STAHR, K. & WILKE, B.-M. (2018). Scheffer/Schachtschabel Lehrbuch der Bodenkunde (17. Aufl.). Springer Spektrum. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-55871-3>
- ANDEREGG, W. R. L., KANE, J. M. & ANDEREGG, L. D. L. (2013). Consequences of widespread tree mortality triggered by drought and temperature stress. Nature Climate Change, 3(1), 30–36. <https://doi.org/10.1038/nclimate1635>



- BOEING, F., RAKOVEC, O., KUMAR, R., SAMANIEGO, L., SCHRÖN, M., HILDEBRANDT, A., REBMANN, C., THOBER, S., MÜLLER, S., ZACHARIAS, S., BOGENA, H., SCHNEIDER, K., KIESE, R., ATTINGER, S. & MARX, A. (2022). High-resolution drought simulations and comparison to soil moisture observations in Germany. *Hydrology and Earth System Sciences*, 26(19), 5137–5161. <https://doi.org/10.5194/hess-26-5137-2022>
- BÖHM, W. (1979). *Methods of studying root systems*. Springer.
- BRODERSEN, C. R., McELRONE, A. J., CHOAT, B., LEE, E. F., SHACKEL, K. A. & MATTHEWS, M. A. (2013). In vivo visualizations of drought-induced embolism spread in *Vitis vinifera*. *Plant Physiology*, 161(4), 1820–1829. <https://doi.org/10.1104/pp.112.212712>
- BRUNNER, I., HERZOG, C., DAWES, M. A., AREND, M. & SPERISEN, C. (2015). How tree roots respond to drought. *Frontiers in Plant Science*, 6, Artikel 547, 1–16. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00547>
- CHOAT, B., NOLF, M., LOPEZ, R., PETERS, J. M. R., CARINS-MURPHY, M. R., CREEK, D. & BRODRIBB, T. J. (2019). Non-invasive imaging shows no evidence of embolism repair after drought in tree species of two genera. *Tree Physiology*, 39(1), 113–121. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpy093>
- COMAS, L. H., BECKER, S. R., CRUZ, V. M. V., BYRNE, P. F. & DIERIG, D. A. (2013). Root traits contributing to plant productivity under drought. *Frontiers in Plant Science*, 4, Artikel 442. <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00442>
- COUTTS, M. P. (1968). Components of Tree Stability in Sitka Spruce on Peaty Gley Soil. *Forestry*, 59(2). <https://doi.org/10.1093/forestry/59.2.173>
- ESHEL, A. & BEECKMAN, T. (Hrsg.). (2013). *Plant roots: The hidden half* (4. ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b14550>
- FAN, Y., MIGUEZ-MACHO, G., JOBBÁGY, E. G., JACKSON, R. B. & OTERO-CASAL, C. (2017). Hydrologic regulation of plant rooting depth. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 114(40), 10572–10577. <https://doi.org/10.1073/pnas.1712381114>
- FINLAY, R. D. (2008). Ecological aspects of mycorrhizal symbiosis: with special emphasis on the functional diversity of interactions involving the extraradical mycelium. *Journal of Experimental Botany*, 59(5), 1115–1126. <https://doi.org/10.1093/jxb/ern059>
- FRESCHET, G. T., PAGÈS, L., IVERSEN, C. M., COMAS, L. H., REWALD, B., ROUMET, C., KLIMEŠOVÁ, J., ZADWORNÝ, M., POORTER, H., POSTMA, J. A., ADAMS, T. S., BAGNIEWSKA-ZADWORNÁ, A., BENGOUGH, A. G., BLANCAFLOR, E. B., BRUNNER, I., CORNELISSEN, J. H. C., GARNIER, E., GESSLER, A., HOBBIÉ, S. E., . . . & McCORMACK, M. L. (2021). A starting guide to root ecology: strengthening ecological concepts and standardising root classification, sampling, processing and trait measurements. *The New Phytologist*, 232(3), 973–1122. <https://doi.org/10.1111/nph.17572>
- FRESCHET, G. T. & ROUMET, C. (2017). Sampling roots to capture plant and soil functions. *Functional Ecology*, 31(8), 1506–1518. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12883>
- FUCHS, S., HERTEL, D., SCHULDT, B. & LEUSCHNER, C. (2020). Effects of Summer Drought on the Fine Root System of Five Broadleaf Tree Species along a Precipitation Gradient. *Forests*, 11(3), Artikel 289. <https://doi.org/10.3390/f11030289>
- GERMON, A., LACLAU, J.-P., ROBIN, A. & JOURDAN, C. (2020). Deep fine roots in forest ecosystems: Why dig deeper? *Forest Ecology and Management*, 466, Artikel 118135. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118135>
- HÖLSCHER, D., HERTEL, D., LEUSCHNER, C. & HOTTKOWITZ, M. (2002). Tree species diversity and soil patchiness in a temperate broad-leaved forest with limited rooting space. *Flora – Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, 197(2), 118–125. <https://doi.org/10.1078/0367-2530-00021>
- LOZANOVA, L., ZHIYANSKI, M., VANGUELOVA, E., DONCHEVA, S., MARINOV, M. P. & LAZAROVA, S. (2019). Dynamics and Vertical Distribution of Roots in European Beech Forests and Douglas Fir Plantations in Bulgaria. *Forests*, 10(12), Artikel 1123. <https://doi.org/10.3390/f10121123>
- MATERECHERA, S. A., ALSTON, A. M., KIRBY, J. M. & DEXTER, A. R. (1992). Influence of root diameter on the penetration of seminal roots into a compacted subsoil. *Plant and Soil*, 144(2), 297–303. <https://doi.org/10.1007/BF00012888>
- McCORMACK, M. L. & GUO, D. (2014). Impacts of environmental factors on fine root lifespan. *Frontiers in Plant Science*, 5, Artikel 205. <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00205>
- MEIER, I. C., KNUTZEN, F., EDER, L. M., MÜLLER-HAUBOLD, H., GOEBEL, M.-O., BACHMANN, J., HERTEL, D. & LEUSCHNER, C. (2018). The Deep Root System of *Fagus sylvatica* on Sandy Soil: Structure and Variation Across a Precipitation Gradient. *Ecosystems*, 21(2), 280–296. <https://doi.org/10.1007/s10021-017-0148-6>
- MEIER, I. C. & LEUSCHNER, C. (2008). Genotypic variation and phenotypic plasticity in the drought response of fine roots of European beech. *Tree Physiology*, 28(2), 297–309. <https://doi.org/10.1093/treephys/28.2.297>
- THONFELD, F., GESSNER, U., HOLZWARTH, S., KRIESE, J., DA PONTE, E., HUTH, J. & KUENZER, C. (2022). A First Assessment of Canopy Cover Loss in Germany's Forests after the 2018–2020 Drought Years. *Remote Sensing*, 14(3), Artikel 562. <https://doi.org/10.3390/rs14030562>
- VAN DER HEIJDEN, M. G. A., MARTIN, F. M., SELOSSE, M.-A. & SANDERS, I. R. (2015). Mycorrhizal ecology and evolution: the past, the present, and the future. *The New Phytologist*, 205(4), 1406–1423. <https://doi.org/10.1111/nph.13288>
- VARMA, A. (1999). *Mycorrhiza: Structure, Function, Molecular Biology and Biotechnology* (2. Aufl.). Springer.
- YANG, Y., McCORMACK, M. L., HU, H., BAO, W. & LI, F. (2023). Linking fine-root architecture, vertical distribution and growth rate in temperate mountain shrubs. *Oikos*, 2023(1). <https://doi.org/10.1111/oik.08491>

Kontakt

Katrin Pietig, M.Sc.
 Universität Göttingen
 Albrecht-von-Haller-Institut für Pflanzenwissenschaften
 Abteilung Ökologie und Ökosystemforschung
 Untere Karspüle 2
 37073 Göttingen

