



Historie zur Bodenmüdigkeit und Beobachtungen zur Bodenqualität

Die Nachbaukrankheit oder Bodenmüdigkeit in Apfelkulturen ist bereits seit längerer Zeit bekannt. Über mögliche Ursachen und Gegenmaßnahmen wurde mindestens seit den 30er Jahren des letzten Jahrhunderts Verschiedenes berichtet. Jedoch sind bis heute weder die Entstehung der Krankheit aufgeklärt noch nachhaltige Gegenmaßnahmen verfügbar. Im Forschungsprojekt ORDIAmur, gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), wurde die Bodenmüdigkeit auf zentralen Versuchsflächen absichtlich induziert, um dann die Ursachen der Nachbaukrankheit untersuchen und verschiedene Lösungsansätze auf ihre Effektivität prüfen zu können.

In diesem zweiten Teil der Serie zur Bodenmüdigkeit und den Erkenntnissen dazu aus dem ORDIAmur Projekt werden zunächst Beobachtungen aus der Praxis aus den letzten ca. 100 Jahren geschildert. Daneben werden Versuchsergebnisse vorgestellt, inwieweit Bodeneigenschaften zur Intensität der Bodenmüdigkeit beitragen und in welchem Maße sich die Bodenqualität und Stoffkreisläufe durch die Bodenmüdigkeit verändern. In Ergänzung zum Teil 1 der Serie wird abschließende gezeigt, wie durch gezielte Beeinflussung von Bodeneigenschaften die Bodenmüdigkeit gemindert werden könnte.

Historische Betrachtung und Definition von Nachbaukrankheit

Der Verlust der Anbaueignung eines Standortes ist ein Phänomen, dass seit Beginn des gezielten Feldfruchtanbaus bekannt ist. Bereits vor 3000 Jahren wurden in Ägypten 'müde' Ackerflächen unmittelbar vor anhaltenden Wärmepetoden geflutet. Die Flächen erhitzen sich daraufhin auf bis zu 70°C. Auf diese Weise wurden wahrscheinlich die meisten pathogenen Pilze und Bakterien im Boden sowie Unkrautsamen in der obersten Bodenschicht abgetötet. Infolge dessen erlangten die Böden wieder ihre ursprüngliche Fruchtbarkeit.

Viele Pflanzenarten können häufiger nacheinander angebaut werden, ohne dass die Ertragsfähigkeit des Bodens dabei nachlässt. Andere Pflanzenarten, vor allem solche aus der Familie der Rosengewächse sind jedoch im Nachbau sehr problematisch. Mit der Ausdehnung und Intensivierung des Gartenbaus in den zurückliegenden Jahrzehnten traten Nachbaus Schäden daher immer öfter und intensiver auf. Betroffen sind vor allem Baumschulquartiere und Obstanlagen, insbesondere wenn die gleichen Arten wiederholt nacheinander angebaut werden. Für dieses Phänomen wurde schließlich der Begriff 'Bodenmüdigkeit' geprägt. Von ihr spricht man nach KLAUS (1939), wenn ein Boden durch wiederholten Anbau einer bestimmten Pflanzenart die Eignung verloren hat dieser Art als Substrat zu dienen. SAVORY (1966) hat wegen dem Auftreten der Bodenmüdigkeit nach artgleichem Nachbau von Obstgehölzen den Begriff der 'specific replant disease' eingeführt. Die Nachbaukrankheit hat erhebliche Wuchs- und Ertragsdepressionen, teilweise auch Qualitätseinbußen zur Folge, die beim Nachbau derselben Art, wie zum Beispiel Apfel auf Apfel, wesentlich stärker ausfallen können als beim Nachbau verschiedener Arten wie etwa Kirsche auf Apfel oder Quitte (auch als Unterlage) auf Apfel. Selbst bei den verschiedenen



Apfelunterlagen wurden unterschiedliche Anfälligkeiten beobachtet. Vor allem das Wurzelwerk ist stark betroffen (Abb. 1), was zu dem beobachteten Minderwachstum der oberirdischen Pflanzenteile führt. Für die Nachbaukrankheit des Apfels wird mittlerweile der von SAVORY (1966) konstruierte Begriff 'specific apple replant disease', abgekürzt SARD, oder vereinfacht 'apple replant disease' (ARD), verwendet.

Entstehung der Bodenmüdigkeit

Bodenmüdigkeit entsteht nicht erst nach der Rodung der Altanlage, sondern bereits während der Kulturzeit. So stellte OTTO (1966) Bodenmüdigkeit in Böden fest, die im Bereich der Wurzelkronen älterer Bäume entnommen wurden. Zusammen mit WINKLER belegte er diesen Zusammenhang in mehreren darauffolgenden Studien (OTTO und WINKLER, 1976). Offenbar erfolgt im Verlauf der Kulturzeit einer Apfelanlage, in Abhängigkeit spezifischer bodenphysikalischer und bodenchemischer Einflüsse, eine Anreicherung von Organismen (darunter auch Schaderreger). Diese wird maßgeblich durch die Wurzeln der jeweiligen Pflanze induziert. Selbst noch nach 30 Jahren Anbaupause nach einer Baumschulkultur mit Gehölzen aus der Familie der Rosengewächse konnten ausgeprägte Nachbauerscheinungen nachgewiesen werden (FRIEDRICH, 2000). Bei Apfelanlagen stellt sich die Bodenmüdigkeit nach einer 15- bis 20-jährigen Kulturzeit ein und nimmt mit wiederholtem Anbau an Intensität zu. Dabei gehen die Ansichten zur Anfälligkeit verschiedener Böden, Nachbaukrankheit zu entwickeln, auseinander: Während zum Teil beobachtet wurde, dass leichte Böden besonders anfällig sind, sind es laut HILKENBÄUMER (1964) vielmehr trockene, schwere kalkreiche Böden. Auf zeitweilig überstauten Böden oder Standorten mit hohem und wechselndem Grundwasserstand treten hingegen oft nur marginale Nachbauschäden auf.

Bodenkundliche Fragestellungen im Rahmen des Projekts ORDIAmur

Im Rahmen des Forschungsprojekts ORDIAmur wird von bodenkundlicher Seite untersucht: 1) inwiefern Bodeneigenschaften einen Einfluss auf die Intensität von ARD haben, 2) in welcher Form sich gestörtes Wurzelwachstum auf die Bodenstruktur auswirkt, bzw. auch umgekehrt welche Bedeutung die Bodenstruktur für das Auftreten von ARD hat. 3) Inwiefern sich ARD auf Stoffkreisläufe im System Apfelpflanze, Bodenmikroorganismen und Boden auswirkt, und 4) ob Tonmineralzugaben oder eine Überstauung mit Wasser bzw. eine anaerobe Bodendesinfektion ARD-Symptome sich als Managementmethoden zur Bekämpfung von ARD eignen.

ARD in sandigen Böden am intensivsten

Die Abhängigkeit der ARD von Bodeneigenschaften wurde bisher an Böden mit sandiger, lehmig-sandiger und schluffig-lehmiger Textur und unterschiedlichen Gehalten an organischer Bodensubstanz an Standorten im Raum Pinneberg und bei Hannover untersucht. Die flächenhafte Befahrung mit Sensortechnik zur Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit (EC) zeigte deutliche Unterschiede zwischen den drei Standorten, auf denen die ORDIAmur-Experimente ausgeführt werden. Innerhalb eines Standortes waren die Eigenschaften der Böden jedoch vergleichbar (Abb. 2). Die intensivste Ausprägung der ARD wurde in ORDIAmur an einem sandigen Boden mit hohem Gehalt an relativ wenig zersetzter organischer Bodensubstanz festgestellt (Standort Heidgraben, siehe MAHNKOPP et al., 2018).

In einem Folgeexperiment mit Apfelpflanzen konnte gezeigt werden, dass die Wurzelverteilung vor allem mit der Zusammensetzung des Bodenmikrobioms (Gesamtheit der Bodenorganismen) in Verbindung stand und in geringerem Maße durch andere bodenchemischen Parametern wie pH, Kohlenstoff- oder Nährstoffgehalt. Im Rahmen von Gefäßversuchen konnte ergänzend gezeigt werden, dass die Organismen, die mit ARD in Zusammenhang gebracht werden können, eine geringe Mobilität aufweisen und Wurzeln daher unterschiedlich stark betroffen sind. Vermutlich ist dies auch der Grund dafür, dass in der obstbaulichen Praxis die Neupflanzung zwischen den Reihen oder ein tieferes Einpflanzen erfolgreiche Strategien zum Umgang mit ARD sein können.

ARD-Böden zeigen reduzierte Bodenaggregatbildung

Es konnte nachgewiesen werden, dass die Störung des Wurzelwachstums in ARD-Böden einen Effekt auf die physikalische Bodenqualität hat. So führt reduzierter Wuchs der Wurzeln (Abb. 1) zu einer reduzierten Bodenaggregatbildung (SIMON et al., 2020). In diesen Aggregaten können sich Langzeitnährstoffspeicher bilden (JAHANGIR et al., 2020), die in müden Böden weniger häufig vorliegen.

Äpfel in ARD-Böden scheiden mehr Kohlenstoffverbindungen über die Wurzel aus

Bodenmikroorganismen tragen viele wichtige Funktionen im Boden (s.a. Teil 5 dieser Serie). Sie spielen z.B. insbesondere im Kohlenstoffkreislauf im System Pflanze-Mikroorganismen-Boden eine zentrale Rolle und schließen Nährstoffe wie Stickstoff aus der organischen Bodensubstanz auf.

Hinsichtlich der Kohlenstoffausscheidung von Apfel in die Rhizosphäre (der Bodenbereich der direkt an die Wurzeloberfläche angrenzt und durch die Wurzel beeinflusst ist) konnte im Rahmen eines Experimentes mit markiertem Kohlenstoff (^{13}C) eine vermehrte Ausscheidung von Kohlenstoff bei ARD-Pflanzen beobachtet werden, das als *carbon bleeding* („Kohlenstoffblutung“) bezeichnet wird. Weitere Versuchsergebnisse deuten an, dass die Äpfel dadurch ihre Wechselwirkungen mit arbuskuläre Mykorrhizapilzen erhöhen, um so der ARD entgegenzutreten. Diese Hypothese muss in kommenden Arbeiten jedoch noch abgesichert werden.

Obwohl schon lange bekannt ist, dass eine zusätzliche Stickstoffdüngung nicht als hilfreiches Mittel im Umgang mit der Bodenmüdigkeit bewertet werden kann, konnte in Experimenten eine Beeinflussung des Stickstoffkreislaufs zwischen Boden und Pflanze festgestellt werden. So zeigte sich, dass sich in Böden ohne ARD der gedüngte Stickstoff an der Schnittstelle zwischen Wurzel und Boden anreichert, während er in ARD-Böden auf eine größere Bodenfläche verteilt war. Es muss aber noch geklärt werden, ob und welche Rolle diese Beobachtung im komplexen Gefüge Bodenmüdigkeit spielt.

Auch pH-Werte und mikrobielle Aktivitäten waren in ARD-Böden immer deutlich herabgesetzt und das C/N-Verhältnis in der organischen Bodensubstanz war weiter. Dies deutet insgesamt auf einen Stress der Bodenorganismen und eine damit einhergehende reduzierte Nährstofffreisetzung in ARD-Böden hin.



Management von ARD über Veränderung von Bodeneigenschaften?

Ein weiteres Ziel der Arbeiten in ORDIAmur ist die Suche nach Möglichkeiten zum Umgang mit ARD. In diesem Zusammenhang ist in der Literatur zu lesen, dass Silizium sowohl die Effekte von biotischem und abiotischem Stress auf die Pflanzenentwicklung mindern kann (MELO et al., 2003; FORTUNATO et al., 2012; WANG et al., 2017). Das Kristallgitter von Tonmineralen baut sich neben Sauerstoff-, Aluminium- und Wasserstoffatomen vor allem aus Siliziumatomen auf. Deswegen wurden in einem Gewächshausversuch der natürliche Tongehalt von 6 % im Boden aus Heidgraben, in dem ARD am intensivsten ausgeprägt war, durch Zugabe eines spezifischen Tons (Bentonit, B) und einer Tonmischung (Florisol®, F) auf 12 bzw. 24 % angehoben. Das Anheben des Tongehaltes auf 24 % mit Bentonit führte zu einer starken Erhöhung des pflanzenverfügbaren Siliziums im Boden und zu deutlich höherer Trockenmasse von Spross- und Wurzeln bei Apfelpflanzen als in den anderen Varianten (Abb. 3).

An veraschtem Blattmaterial konnte darüber hinaus eine vermehrte Einlagerung von Silizium, das nicht im Kristallgitter von Tonmineralen gebunden war in Spross und Wurzel in den Bentonit-Varianten gezeigt werden. Dieses amorphe Silizium führte wahrscheinlich zu einer Stärkung der Rhizodermis und der inneren Gefäßbündel der Apfelpflanzen und damit zu einer Verringerung des Befalls mit bodenbürtigen Krankheitserregern (SCHIMMEL et al., in Bearbeitung).

Basierend auf der Beobachtung, dass auf zeitweise überstauten Böden die Bodenmüdigkeit weniger stark ausgeprägt ist, wurde ein entsprechendes Gewächshausexperiment mit den Böden der drei ORDIAmur-Standorte (Ellerhoop, Heidgraben, Ruthe) durchgeführt. Die Böden wurden überstaut und mit Grasschnitt versetzt, um möglichst rasch anaerobe Bedingungen herzustellen. Nach 6 Wochen war die mikrobielle Gemeinschaft im Boden verändert, die Böden wurden getrocknet und mit jungen Apfelpflanzen bepflanzt. Obwohl wir Hinweise darauf erhalten haben, dass die ARD gemildert wurde (geringere Phytoalexinkonzentrationen, siehe Teil 4 dieser Artikelserie), war dies nur auf sandigem Boden sichtbar (Standort Heidgraben). Auf den beiden schwereren Böden aus Ellerhoop und Ruthe, wurde keine Wachstumsverbesserung erzielt - im Gegenteil führte die Überstauung zu weiter reduziertem Wachstum doch vermutlich mit anderen Ursachen.

Eine weitere Möglichkeit der anaeroben Bodendesinfektion ist die zusätzliche Abdeckung mit einer Folie, durch die im Boden nur noch chemisch gebundener Sauerstoff vorliegt und durch den Mangel an freiem Sauerstoff pathogene Organismen unterdrückt oder abtötet werden. Ein entsprechender Ansatz wird von der Landwirtschaftskammer Schleswig-Holstein in zwei kooperierenden Baumschulen im Rahmen von ORDIAmur getestet.

Ausblick aus bodenkundlicher Perspektive

Der Zusammenhang zwischen Bodeneigenschaften und der Intensität der Bodenmüdigkeit wird zurzeit anhand von Böden von 150 Nachbau-Standorten, verteilt auf die bekannten Apfelanbauregionen und Baumschulgebiete Deutschlands mit Unterstützung von Unternehmen, untersucht. Vermutet wird, dass die Sorptionsfähigkeit der Böden, die beispielsweise durch hohe Gehalte an Tonmineralen und organischer Substanz sowie durch Unterschiede im pH-Wert beeinflusst ist, die Intensität der ARD durch die Beeinflussung der Bodenmikroorganismen steuert. Offen ist hier noch, ob die erwarteten Effekte auf eine höhere

Serie „Müde Böden beim Nachbau von Äpfeln“ – Teil 2

- Berichte für die Praxis aus dem Projekt ORDIAMur -

Sorptionskapazität, d.h. Bindefähigkeit, oder auf günstigere Lebensräume für die Pflanzenentwicklung fördernde Mikroorganismen zurückzuführen ist.

Innerhalb des Projektverbunds ORDIAMur wird Forschung zu Unterlagen und deren Anfälligkeit für ARD, den Reaktionen der Pflanzen auf der Ebene der Wurzelmorphologie und der Physiologie, den Verschiebungen im Netz der Bodenorganismen und der Testung von Gegenmaßnahmen betrieben (s. a. weitere Artikel dieser Serie). Letztlich dient der Boden mit all seinen verschiedenen Eigenschaften als Lebensraum für Organismen und als Filter oder Speicher für Schadsubstanzen und Nährstoffe, so dass sich im Boden und beeinflusst von seinen Eigenschaften die komplexen Interaktionen der ARD manifestieren. Alle gewonnenen Erkenntnisse sollen zum Ende des Projekts ORDIAMur in Form eines Entscheidungshilfetools für die Praxis zusammengeführt werden und helfen das komplexe Bild der Bodenmüdigkeit weiter aufzuklären und entsprechende wirkungsvolle Maßnahmen zu entwickeln.

Autoren:

Eva Lehndorff, Gerhard Baab, Georg Guggenberger, Margaux Simon, Nele Meyer, Stefan Pätzold, Wulf Amelung, Jens Boy, Jessica Schimmel, Jiem Krüger, Doris Vetterlein, Andreas Wrede, Traud Winkelmann



Abb. 1: Die Unterlage M.9 nach sechswöchiger Kultur im Container, links in Nachbauboden, rechts in sterilisiertem Boden (J. Henfrey)



Abb. 2: Hochaufgelöste räumliche Analyse der Bodenleitfähigkeit, die die Unterschiede in der Textur der Böden widerspiegelt. Abb. a, b, c: die 3 Standorte Heidgraben, Ellerhoop und Ruthe, Flächen mit ARD sind orange umrandet, Flächen mit Gras sind grün umrandet, die elektrische Leitfähigkeit (ECa) spiegelt Variationen in den Bodeneigenschaften wider (aus MAHNKOPP et al., 2018)

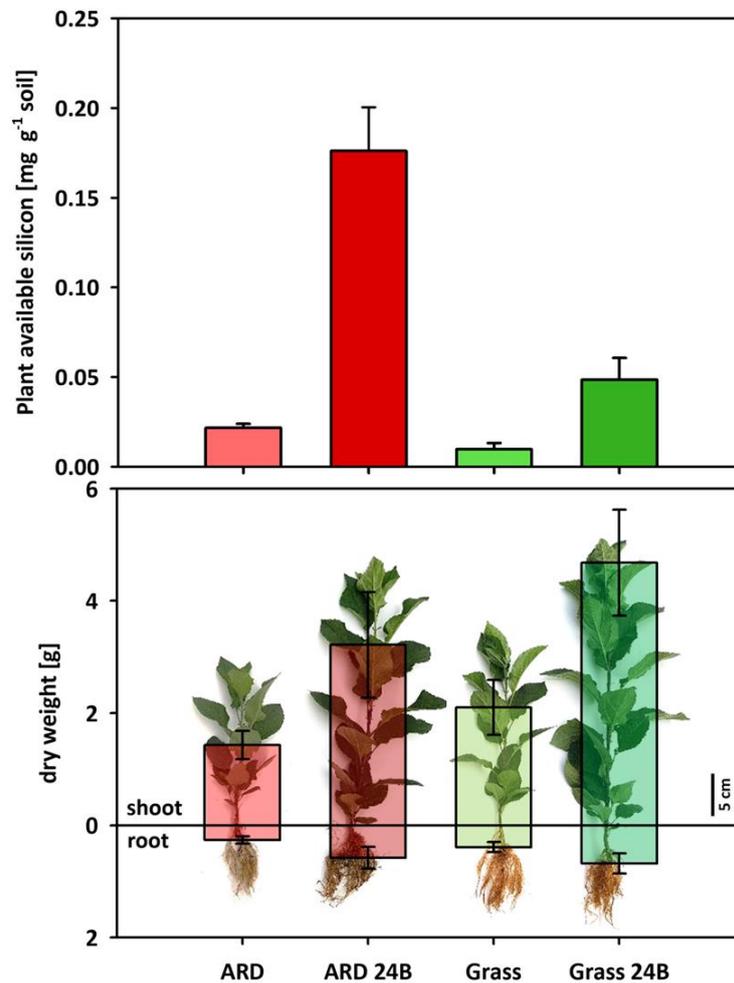


Abb. 3: Pflanzenverfügbares Silizium im Boden (n=5, oben) und Trockenmassen von Spross und Wurzeln nach 8-wöchigem Wachstum in nachbaukrankem Boden (ARD) und Kontrollboden (Grass, unten) sowie jeweils einer Variante mit Tonzugabe (Bentonit, 24B) auf insgesamt 24 %



Referenzen:

Baab, G, Henfrey, J (2015) *Obstbau* 11, S 641 -646.

Fortunato, A.A., Rodrigues, F.Á., Do Nascimento, K.J.T. (2012) Physiological and biochemical aspects of the resistance of banana plants to Fusarium wilt potentiated by silicon. *Phytopathology* 102, 957–966.

Friedrich, G, Neumann D, Vogl M (1986) *Physiologie der Obstgehölze*. S 458-467.

Friedrich, G, Fischer M (2000) *Physiologische Grundlagen des Obstbaus*. S 281-286.

Hewavitharana, S.S., Mazzola, M. Influence of rootstock genotype on efficacy of anaerobic soil disinfestation for control of apple nursery replant disease. *Eur J Plant Pathol* **157**, 39–57 (2020). <https://doi.org/10.1007/s10658-020-01977-z>

Hilkenbäumer, F (1964) *Obstbau*. S 225-228.

Jahangir, M.M.R., Jahiruddin, M., Akter, H., Pervin, R. and Islam, K.R. (2021) Cropping diversity with rice influences soil aggregate formation and nutrient storage under different tillage systems. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 184: 150-162.

Krüssmann, G (1978) *Die Baumschule*. S 203-212.

Kemmer, E (1935) Über die Auswirkungen der Bodenmüdigkeit bei Obstgehölzen. *Gartenwelt* 39.

Klaus, H (1939) Das Problem der Bodenmüdigkeit unter Berücksichtigung des Obstbaus. *Landwirtsch. Jahresbl.* 89. S 413-459.

Mahnkopp, F, Simon, M, Lehndorff, E, Pätzold, S, Wrede, A, Winkelmann T (2018) Induction and diagnosis of apple replant disease (ARD): a matter of heterogeneous soil properties? *Scientia Horticulturae* 241, 167-177.

Melo, S P de, Korndörfer, G H, Korndörfer, C M, Lana, R M Q, Santana, D G de (2003) Silicon accumulation and water deficit tolerance in *Brachiaria* grasses. *Scientia Agricola* 60, 755–759.

Otto, G und Winkler, H (1976) Nachweis der Bodenmüdigkeit in wachsenden Apfelanlagen. *Zbl. f. Bakt., Parasitenkde., Infektionskrank. u. Hygiene* 2 Abtl.131. S 730-736.

Otto, G und Winkler, H (1977) Untersuchungen über die Ursache der Bodenmüdigkeit bei Obstgehölzen. *Zbl. f. Bakt., Parasitenkde., Infektionskrank. u. Hygiene* 2 Abtl.132. S 593-606.

Otto, G und Winkler, H (1989) Stand und Anwendungsmethoden bei der Bekämpfung von Nachbauschäden in Baumschulen. *Gartenbau* 36; 3 Beilage 5-6.

Overdieck J G C (1852) *Anleitung zur Kenntnis und Aufpflanzung des besten Obstes für das nördliche Deutschland*. Verlag J. Manz, Regensburg.

Savory B M (1966) *Specific replant diseases*. Res. Rev. Nr 1. East Malling.CAB.Royal Bucks, Engl.

Schimmel, J, Gentsch, N, Boy, J, Uteau, D, Rohr, A-D, Winkelmann, T, Busnena, B, Liu, B, Krueger, J, Kaufhold, S, Rammelmaier, D, Dultz, S, Guggenberger, G (in Bearbeitung): Alleviation of apple replant disease in sandy soils by clay amendments increasing plant available silicon.

Simon, M, Lehndorff, E, Wrede, A, Amelung, W (2020). In-field heterogeneity of apple replant disease: relations to abiotic soil properties. *Scientia Horticulturae* 259, 108809.



Serie „Müde Böden beim Nachbau von Äpfeln“ – Teil 2

- Berichte für die Praxis aus dem Projekt ORDIAMur -

Simon, M (2020) Apple Replant Disease (ARD): Relations to abiotic soil properties at different spatial scales (Dissertationsschrift). Rheinische-Friedrich-Wilhelms- Universität Bonn.

Wang, M, Gao, L, Dong, S, Sun, Y, Shen, Q, Guo, S (2017) Role of Silicon on Plant – Pathogen Interactions. *Frontiers in Plant Science* 8, 1–14.