

# Faktoren der Nährstoffverfügbarkeit im Boden des Dauergrünlandes

Andreas Bohner<sup>1\*</sup>

## Zusammenfassung

Von einer ressourcenschonenden und umweltverträglichen Grünlandbewirtschaftung wird erwartet, dass die Düngung den Nährstoffbedarf der Pflanzen deckt, gleichzeitig aber die Umwelt nicht belastet. Für die Optimierung von Düngemaßnahmen sind Kenntnisse über die Faktoren der Nährstoffverfügbarkeit im Grünlandboden notwendig. Eine Beurteilung der Nährstoffverfügbarkeit ist nur möglich, wenn neben der Nährstoffmenge im durchwurzelten Boden auch die Freisetzungs- und Nachlieferungsgeschwindigkeit der Nährstoffe zu den Pflanzenwurzeln berücksichtigt wird. Dabei spielen die Bodentemperatur, der Bodenwasserhaushalt, die Bodenstruktur und der Boden-pH-Wert eine entscheidende Rolle.

*Schlagwörter:* Bodentemperatur, Bodenwasserhaushalt, Bodenstruktur, Boden-pH-Wert, Pflanzenwurzeln

## Summary

The aim of a resource-conserving and environment-friendly grassland management is that fertilisation meets the nutritional requirement of the vegetation without pollution of the environment. In order to optimize fertiliser application knowledge about factors influencing nutrient availability in grassland soils is necessary. An evaluation is possible only, if the amount of nutrients in the root zone, the rate of release from the available pool and the rate of transport via massflow and diffusion to plant roots are considered simultaneously. Thereby, soil temperature, soil moisture status, soil structure and soil pH play an important role.

*Keywords:* soil temperature, soil moisture status, soil structure, soil pH, plant roots

## Einleitung

Die Düngung ist neben der Regulierung der Bodenwasserhältnisse das wirksamste Mittel, um die Grünlanderträge zu erhöhen und die Futterqualität zu verbessern. Von einer ressourcenschonenden und umweltverträglichen Grünlandbewirtschaftung wird erwartet, dass die Düngung den Nährstoffbedarf der Pflanzen deckt, gleichzeitig aber die Umwelt (Atmosphäre, Pedosphäre, Hydrosphäre, Biosphäre) nicht belastet. Für die Optimierung von Düngemaßnahmen sind daher Kenntnisse über die Faktoren der Nährstoffverfügbarkeit im Grünlandboden notwendig. Die Thematik ist von großer praktischer Relevanz, denn davon hängen die Ausnutzbarkeit und Ertragswirksamkeit der Dünger ab. Die Nährstoffverfügbarkeit im Boden beeinflusst aber auch sehr wesentlich die Artenzusammensetzung der Vegetation und die Pflanzenartenvielfalt.

Diese Studie beruht auf eigenen Untersuchungen und auf einer umfangreichen Literaturrecherche. Sie erhebt nicht den Anspruch einer wissenschaftlichen Untersuchung mit dem Ziel neue Erkenntnisse zu gewinnen, sondern sie dient primär der Wissensvermittlung von der Forschung hin zur landwirtschaftlichen Praxis.

## Nährstoffverfügbarkeit

Die Verfügbarkeit eines Nährelements im Grünlandboden hängt vom Intensitäts-, Kinetik-, Kapazitäts- und Quantitätsfaktor ab. Von der im Grünlandboden enthaltenen Gesamtmenge eines Nährelements (Vorrat im durchwurzelten Bo-

denraum, Quantitätsfaktor) ist meist nur ein sehr kleiner Teil kurzfristig pflanzenverfügbar. Für die Pflanzenernährung ist die Konzentration eines Nährelements in der Bodenlösung (Intensitätsfaktor) entscheidend, denn die Pflanzen nehmen die Nährelemente aus der Bodenlösung auf.

Die Nährstoffkonzentration in der Bodenlösung ist daher ein direktes Maß für den Gehalt an pflanzenverfügbaren Nährstoffen im Boden. Zwischen der Konzentration eines Nährelements in der Bodenlösung und der Aufnehmbarkeit dieses Nährelements durch die Pflanzen muss allerdings keine Beziehung bestehen. Auch die Relation zwischen den verschiedenen Nähr- und Schadelementen ist für die Nährstoffaufnahme von Bedeutung. So kann beispielsweise die Aufnahme von Magnesium durch einen Überschuss an Kalzium oder Kalium infolge Ionenkonkurrenz (Antagonismus) verringert werden. Ebenso erniedrigen Aluminium-, Eisen-, Mangan- und Zink-Ionen in stark versauerten Grünlandböden die Aufnahme von Kalzium und Magnesium. Somit ist eine ausgewogene Zusammensetzung der Bodenlösung mit Nährelementen für eine optimale Ernährung der Pflanzen notwendig.

Das Ertragspotenzial eines Standortes wird nur dann voll ausgeschöpft, wenn im Boden alle lebensnotwendigen Nährelemente in ausreichenden Mengen und in einem harmonischen Verhältnis pflanzenverfügbar sind. Ein hoher Kalium-Gehalt im Grünlandboden führt zu keinem hohen Ertrag, wenn den Pflanzen gleichzeitig zu wenig aufnehmbare Stickstoff zur Verfügung steht. Ein einzelnes lebensnotwendiges Nährelement kann das Wachstum eines

<sup>1</sup> HBLFA Raumberg-Gumpenstein, Abteilung für Umweltökologie, A-8952 Irdning

\* Ansprechpartner: Dr. Andreas Bohner, [andreas.bohner@raumberg-gumpenstein.at](mailto:andreas.bohner@raumberg-gumpenstein.at)



Pflanzenbestandes begrenzen, selbst wenn alle übrigen im Optimum sind (Gesetz des Minimums, Abbildung 1). In der Bodenlösung liegt meist nur ein sehr kleiner Teil der während einer Vegetationsperiode von den Pflanzen insgesamt benötigten Nährelemente vor. Deshalb hat der Kinetikfaktor für die Pflanzenernährung eine große Bedeutung. Man versteht darunter die Rate, mit der die Bodenlösung aus dem verfügbaren Nährstoffvorrat mittels Mineralisations-, Desorptions- und Auflösungsprozessen wieder aufgefüllt wird. Der Kapazitätsfaktor ist ein Maß für den verfügbaren Nährstoffvorrat im Boden. Die Pflanzenverfügbarkeit der Nährelemente im Grünlandboden und die Nährstoffaufnahme der Pflanzen werden in erster Linie von der Nährstoffkonzentration in der Bodenlösung, vom Bodenwassergehalt und von der Kapazität des Bodens zur Nährstoffnachlieferung (mobilisierbarer Nährstoffvorrat) beeinflusst. Generell ist die Nährstoffanlieferung zu den Pflanzenwurzeln und folglich die Verfügbarkeit umso größer, je höher der Wassergehalt im Boden und die Nährstoffkonzentration in der Bodenlösung sind. Durch Düngung kann die Nährstoffkonzentration in der Bodenlösung und somit die Nährstoffverfügbarkeit erhöht werden (Abbildung 2). Entscheidend für die Nährstoffverfügbarkeit ist aber auch die Durchwurzelung des Grünlandbodens.

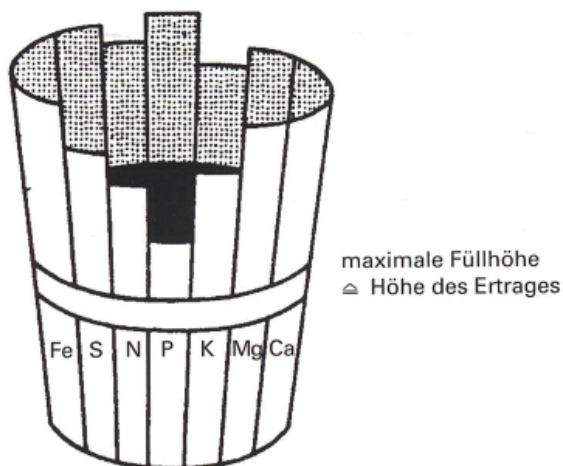


Abbildung 1: Gesetz des Minimums (Quelle: Finck, 2007)

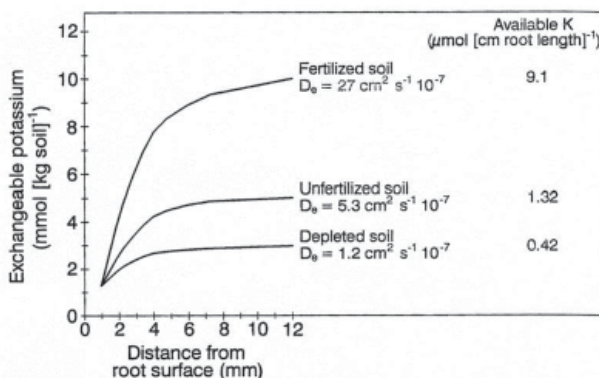


Abbildung 2: Nährstoffkonzentration in der Bodenlösung (Quelle: Marschner, 1998)

## Bodenuntersuchung

Ziel der Bodenuntersuchung ist es, einen Überblick über

den Nährstoffzustand der Grünlandböden zu bekommen. Auf der Basis von Bodenuntersuchungsergebnissen werden Düngeempfehlungen abgegeben, um die Bodenfruchtbarkeit zu steigern. Im Rahmen der routinemäßigen Bodenuntersuchung werden bei Grünlandböden die Proben aus der Tiefenstufe 0-10 cm gezogen. Die Bodenparameter, die zur Bewertung des Nährstoffzustandes herangezogen werden, sind hauptsächlich der pH-Wert sowie der Phosphor- und Kalium-Gehalt. Der Phosphor- und Kalium-Gehalt im Boden wird mit der Calcium-Acetat-Lactat-Methode (CAL-Methode) bestimmt. Mit der CAL-Methode (ÖNORM L 1087) wird annähernd der Kapazitätsfaktor ermittelt. Mit der Bestimmung wasserlöslicher Stoffe (ÖNORM L 1092) wird der Intensitätsfaktor und mit der Bestimmung des Gesamt-Stickstoffgehaltes (ÖNORM L 1095) der Quantitätsfaktor festgestellt. Die CAL-Methode liefert keine Informationen über den Intensitäts- und Kinetikfaktor. Daher können die ermittelten Phosphor- und Kalium-Gehalte nicht als „pflanzenverfügbar“ bezeichnet werden. Mittels chemischer Bodenanalyse kann lediglich der potenziell verfügbare Nährstoffgehalt im Boden bestimmt werden. Ob diese Nährstoffe auch tatsächlich pflanzenaufnehmbar sind, kann nicht festgestellt werden. Grünlandböden mit ähnlichen Kapazitätsfaktoren können verschiedene Kinetikfaktoren aufweisen. Unterschiedliche Pflanzenbestände und Futtererträge auf Grünlandböden mit gleichen Gehalten an CAL-löslichem Phosphor oder Kalium können daher das Ergebnis verschiedener Freisetzung- und Nachlieferungsgeschwindigkeiten der Nährstoffe zu den Pflanzenwurzeln sein. Die chemische Bodenanalyse liefert hauptsächlich einen Hinweis für die Kapazität eines Bodens den Pflanzen Nährstoffe zu liefern (chemische Verfügbarkeit), aber sie berücksichtigt nicht die Mobilität (räumliche Verfügbarkeit) der Nährstoffe im Boden. Daher reicht eine routinemäßige Bodenuntersuchung für die Charakterisierung der Nährstoffversorgung der Vegetation in der Regel nicht aus. Eine Beurteilung ist nur möglich, wenn neben den Nährstoffmengen im durchwurzelten Boden (Quantitäts- und Kapazitätsfaktor) auch die Freisetzungsgeschwindigkeit der Nährstoffe aus dem verfügbaren Vorrat (Kinetikfaktor) sowie die Transportrate zu den Pflanzenwurzeln berücksichtigt werden. Dabei spielen die Bodentemperatur, der Bodenwasserhaushalt, die Bodenstruktur und der Boden-pH-Wert eine entscheidende Rolle.

## Bodentemperatur

Die Bodentemperatur ist ein entscheidender Standortsfaktor. Sie beeinflusst alle chemischen, biologischen und viele physikalische Prozesse im Grünlandboden und somit auch die Geschwindigkeit der Stoffkreisläufe im Grünlandökosystem. Die Wasser- und Nährstoffaufnahme der Pflanzenwurzeln, der Wurzeltiefgang und das Pflanzenwachstum sind ebenfalls von der Bodentemperatur abhängig. Die biochemische Aktivität in Böden nimmt im Allgemeinen mit steigender Temperatur zu, wobei im Bereich zwischen 5 und 30°C eine Zunahme um 10°C die mikrobielle Aktivität um das 2 bis 3fache ansteigen lässt (Van 't Hoff'sche Regel). Das Temperaturoptimum der meisten Bodenorganismen liegt zwischen 10 und 35°C. Bodenfrost führt bei vielen Lebewesen zum Erliegen ihrer Aktivität. Regenwürmer und Wirbeltiere suchen tiefere, frostfreie Horizonte auf. Für die Stickstoff-Mineralisation ist eine Bodentemperatur

von ca. 25°C optimal. Die Bodentemperatur beeinflusst die Nährstoffverfügbarkeit im Grünlandboden direkt über die Reaktionsgeschwindigkeit chemischer Prozesse. Generell laufen chemische Prozesse bei hohen Temperaturen schneller ab als bei niedrigen. Die Bodentemperatur beeinflusst die Nährstoffverfügbarkeit im Grünlandboden vor allem indirekt über die Mikroorganismen- und Enzymaktivität. In Grünlandböden werden Stickstoff, Schwefel und Phosphor zum Großteil in der organischen Substanz des Bodens (Humus) gespeichert. Der organisch gebundene Stickstoff, Schwefel und Phosphor ist daher eine wesentliche potenzielle Quelle für die Grünlandvegetation. Durch mikrobiellen Abbau der organischen Substanz bzw. durch enzymatische Reaktionen werden diese Nährstoffe pflanzenverfügbar. Diese Prozesse (Mineralisation) sind von der Bodentemperatur und vom Bodenwassergehalt und somit von der Witterung abhängig. Eine warme und niederschlagreiche Witterung und die daraus resultierende hohe mikrobielle Aktivität im Grünlandboden begünstigen die Nährstofffreisetzung aus dem organisch gebundenen Nährstoffvorrat. Beispielsweise steigt im Temperaturbereich 10-25°C die Brutto-Nitrifikationsrate im Grünlandboden mit zunehmender Bodentemperatur an (Abbildung 3). In kühlen, niederschlagreichen Gebieten sind die niedrige Lufttemperatur und die kurze Vegetationsperiode ertragsbegrenzende Faktoren. Die Ungunst des Klimas kann nicht durch Bewirtschaftungsmaßnahmen kompensiert werden. Düngung und Nutzungsintensität müssen bei abnehmendem Ertragspotenzial reduziert werden.

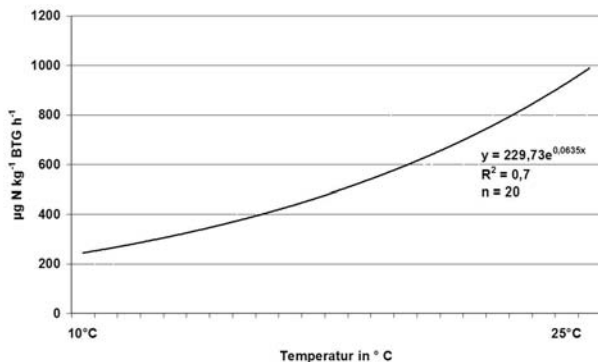


Abbildung 3: Brutto-Nitrifikationsrate im Grünlandboden in Abhängigkeit von der Bodentemperatur

### Bodenwasserhaushalt

Der Bodenwasserhaushalt entscheidet wesentlich über die Bonität eines Grünlandstandortes. Er beeinflusst maßgeblich die Nährstoffverfügbarkeit im Grünlandboden; vor allem die Nährstoff-mobilisierende Leistung der Bodenmikroorganismen ist vom Wärme- und Wasserhaushalt des Standortes abhängig. Der Futterertrag der Grünlandflächen hängt entscheidend von der Wasserversorgung der Pflanzen während der Vegetationszeit ab.

Wassermangel bedeutet:

- niedrige Transportrate der Nährstoffe zu den Pflanzenwurzeln
- gehemmte Nährstoffmineralisation im Grünlandboden infolge geringer mikrobieller Aktivität

- schlechtes Pflanzenwachstum und somit geringer Futterertrag.

Wasserüberschuss bedeutet:

- langsame und geringe Bodenerwärmung (niedrige Bodentemperatur)
- schlechte Bodendurchlüftung (Sauerstoffmangel und Anreicherung einiger bodenbürtiger Gase in phytotoxischen Konzentrationen)
- gehemmte Nährstoffaufnahme bei den meisten hochwertigen Grünlandpflanzen
- geringe Durchwurzelungstiefe (auf nassen Standorten)
- Humusanreicherung (Bildung von Anmoor-Humus oder Torf)
- gehemmte Nährstoffmineralisation im Grünlandboden infolge reduzierter biologischer Aktivität
- gasförmige Stickstoff-Verluste durch Denitrifikation, insbesondere auf wechselfeuchten Standorten (Abbildung 4)
- geringe Nitratbildung (Abbildungen 4 und 5)
- hohe Konzentration an Mangan, Eisen und Phosphor

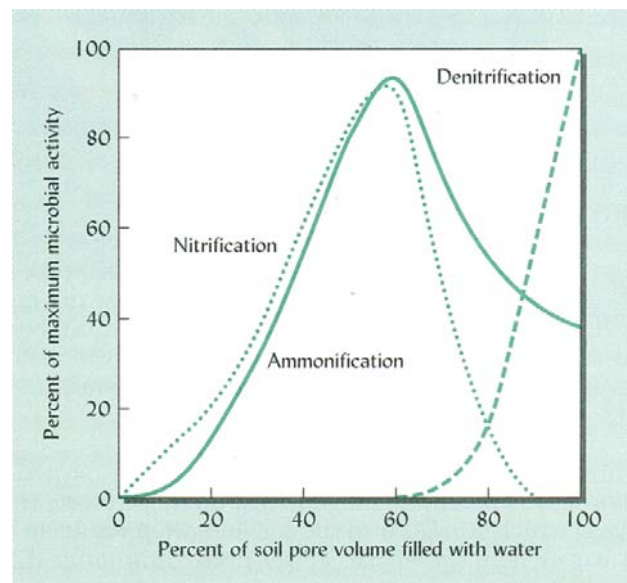


Abbildung 4: Einfluss des Bodenwassergehaltes auf Ammonifikation, Nitrifikation und Denitrifikation (Quelle: Brady & Weil, 1999)

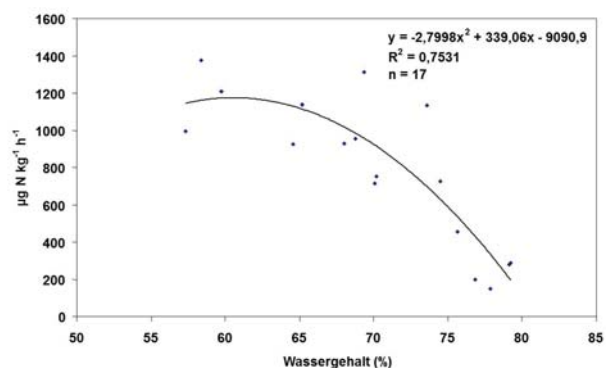


Abbildung 5: Brutto-Nitrifikationsrate im Boden in Abhängigkeit vom Bodenwassergehalt

- in der Bodenlösung, insbesondere in sauren Grünlandböden
- hohe Transportrate der Nährstoffe zu den Pflanzenwurzeln
- schlechtes Pflanzenwachstum und somit geringer Futterertrag.

Bei ungünstigen Lebensbedingungen für Bodenorganismen (niedrige durchschnittliche Bodentemperatur, häufiger oder lang andauernder Wassermangel bzw. Wasserüberschuss) erfolgt eine langsame Mineralisierung der organischen Substanz im Grünlandboden. Dies führt auch zu einer geringen Nährstofffreisetzung aus dem organisch gebundenen Nährstoffvorrat.

Im Grünland können alle Wasserhaushaltsstufen von trocken bis nass angetroffen werden. Das Optimum liegt aus landwirtschaftlicher Sicht je nach Naturraum im Bereich frisch (kühle, niederschlagreiche Gebiete) bis feucht (warme, niederschlagarme Gebiete). Diese Standorte weisen – unter sonst gleichen Bedingungen – das höchste Ertragspotenzial auf. Frische bis feuchte, wärmebegünstigte Standorte können bei ausgewogener Düngung nachhaltig am intensivsten genutzt werden, weil hochwertige Futterpflanzen optimale Standortbedingungen vorfinden. Die mehr oder weniger gleichmäßige Wasserversorgung während der Vegetationsperiode gewährleistet eine hohe Anlieferungsgeschwindigkeit der Nährstoffe zu den Pflanzenwurzeln, bewirkt eine hohe Nährstoffaufnahme und ermöglicht dadurch hohe Ernteerträge bei bester Futterqualität. Auf halbtrockenen oder trockenen Standorten ist die Nährstoffverfügbarkeit im Grünlandboden bei vergleichbarer Düngung geringer als auf frischen oder feuchten Standorten, weil der Transport der Nährstoffe in und mit der Bodenlösung zu den Pflanzenwurzeln langsamer erfolgt. Trockenheit bedeutet nicht nur Wasser- sondern gleichzeitig auch Nährstoffmangel für die meisten hochwertigen Futterpflanzen. Trockene und halbtrockene Standorte liefern daher immer weniger Futter als frische oder feuchte Standorte. Auf nassen Standorten ist das Wachstum der meisten hochwertigen Futterpflanzen vor allem durch Sauerstoffmangel gehemmt; Ertrag und Futterqualität sind niedriger als auf frischen oder feuchten Standorten. Somit muss auf trockenen, halbtrockenen und nassen Standorten die Nutzungsintensität niedriger als auf frischen oder feuchten Standorten sein. Aus Naturschutzgründen sollte auf eine Düngung verzichtet werden.

## Bodenstruktur

Die Bodenstruktur beeinflusst viele Bodenfaktoren wie beispielsweise:

- Wärme-, Wasser- und Lufthaushalt
- Lagerungsdichte, Porenvolumen, Porengrößenverteilung und Porenkontinuität
- Aufnahme, Speicherung und Versickerung von Niederschlags- und Schneeschmelzwasser
- Durchwurzelbarkeit
- Wasser- und Nährstoffverfügbarkeit für Pflanzen und Bodenorganismen
- Aktivität der Bodenorganismen.

Die Struktur im Oberboden hat für die Nährstoffverfügbarkeit eine große Bedeutung. Sie kann durch Bewirtschaftungsmaßnahmen leicht verändert werden.

Günstig ist eine krümelige Struktur, weil die Aufnahme, Speicherung und Versickerung von Niederschlags- und Schneeschmelzwasser, die Durchlüftung und Durchwurzelbarkeit optimal sind (Abbildung 6). Davon profitieren Grünlandpflanzen und Bodenorganismen gleichermaßen. Die krümelige Struktur ist charakteristisch für einen gut durchwurzelten, intensiv belebten, nicht verdichteten Grünlandboden. Sie kommt vor allem im Oberboden von extensiv genutzten Grünlandflächen vor. Ungünstig ist eine dicht gelagerte, plattige Struktur. Die wichtigsten Gründe sind:

- erhöhte Gefahr einer pflanzenschädigenden Staunäsebildung (Krumenpseudovergleyung)
- Hemmung des Wurzelwachstums bei einigen hochwertigen Grünlandpflanzen wegen Sauerstoffmangel, Kohlendioxidüberschuss und erhöhtem mechanischen Eindringwiderstand
- schlechte Ausnutzung der vorhandenen Wasser- und Nährstoffvorräte infolge geringer Durchwurzelbarkeit
- Hemmung der mikrobiellen Aktivität aufgrund von Sauerstoffmangel und zu weniger Hohlräume
- negative Veränderungen im Pflanzenbestand (Auftreten bzw. Zunahme von Zeigerpflanzen für Oberbodenverdichtung zu Lasten hochwertiger Grünlandpflanzen), Ertragsrückgang und Verschlechterung der Futterqualität
- erhöhte Gefahr von gasförmigen Stickstoff-Verlusten durch Denitrifikation
- in Hanglagen verstärkter Oberflächenabfluss von Regen- und Schneeschmelzwasser, somit erhöhte Gefahr der Abschwemmung von gedüngten Nährstoffen.

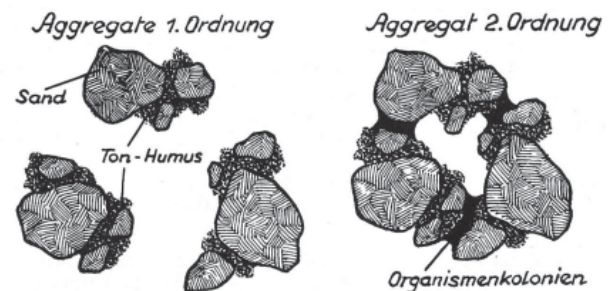


Abbildung 6: Bauplan der Krümelstruktur (Quelle: Sekera, 1984)

Die plattige Struktur ist generell umso ungünstiger, je größer, dichter und stärker verfestigt die Aggregate sind. Vor allem in kühlen, niederschlagreichen Gebieten oder Jahren ist eine dicht gelagerte, wasserstauende, plattige Struktur besonders ungünstig. Die plattige Struktur zeigt häufig eine Verdichtung des Oberbodens an. Eine Verdichtung entsteht im Grünlandboden vor allem in 5 bis 10 cm Bodentiefe. Ursachen sind das häufige Befahren der Grünlandfläche mit schweren landwirtschaftlichen Maschinen oder eine permanent hohe Trittbelastung. Die plattige Struktur im Oberboden ist daher charakteristisch für intensiv genutzte Grünlandflächen.

In stark verdichtete Bodenschichten können die Pflanzenwurzeln nicht oder nur sehr spärlich eindringen. Eine Bodenverdichtung verringert somit den durchwurzelbaren Bodenraum. Daher stellen Grünlandböden mit gutem

Strukturzustand ihre Nährstoffe den Pflanzen besser zur Verfügung als verdichtete Böden mit ungünstigen physikalischen Eigenschaften. Um eine günstige Krümelstruktur im Boden aufrecht zu erhalten bzw. wiederherzustellen, sollten Oberbodenverdichtungen durch ein zu häufiges Befahren mit schweren landwirtschaftlichen Maschinen oder eine zu intensive Beweidung vermieden werden.

## Boden-pH-Wert

Der pH-Wert beeinflusst sehr wesentlich die Nährstoffverfügbarkeit im Grünlandboden. Er kontrolliert viele chemische Bodeneigenschaften, wie die Löslichkeit und Bioverfügbarkeit von Nähr- und Schadelementen sowie deren Speicherung und Verlagerung im Boden. Der pH-Wert kann im Hauptwurzelraum durch Bewirtschaftungsmaßnahmen leicht verändert werden. Der pH-Wert zeigt den Säuregrad des Bodens an. Ein neutraler Boden hat pH 7, in alkalischen Böden liegt der pH-Wert über 7 und in sauren Böden sind die pH-Werte kleiner als 7. Der pH-Wert (gemessen in einer  $\text{CaCl}_2$ -Lösung) variiert in den Grünlandböden in den obersten 10 cm zwischen 3.5 und 7.5. Er ist vor allem bei ungedüngten Grünlandböden im humusreichen Oberboden meist niedriger als im Unterboden. Der pH-Wert in der Rhizosphäre (unmittelbare Umgebung lebender Pflanzenwurzeln) kann sich erheblich von jenem des wurzelfernen Bodens unterscheiden. Der Säuregrad des Grünlandbodens ist sehr wesentlich vom Ausgangssubstrat der Bodenbildung und vom Klima abhängig. Wenn das Ausgangsmaterial der Bodenbildung karbonathaltig ist (insbesondere Kalkstein, Dolomit, Mergel), weisen die Grünlandböden meist eine schwach saure bis leicht alkalische Bodenreaktion auf und die Gefahr einer stärkeren Bodenversauerung ist gering. Die Bodenversauerung ist aus klimatischen Gründen ein natürlicher Prozess. Vor allem karbonatfreie Grünlandböden mit einem basenarmen Ausgangsgestein (z.B. Granit, Gneis, Sandstein, Quarzit) sind in kühlen, niederschlagsreichen Gebieten besonders versauerungsgefährdet.

Ein abnehmender pH-Wert

- verbessert die Löslichkeit mineralischer Phosphordünger (Hyperphosphat)
- beschleunigt die chemische Verwitterung der Minerale (dabei werden Nährelemente für Pflanzen und Bodenorganismen freigesetzt)
- verbessert die Löslichkeit und Bioverfügbarkeit der meisten Mikronährelemente (insbesondere Mangan, Zink, Eisen) im Grünlandboden (Pflanzen, die auf stark sauren Grünlandböden wachsen, weisen deshalb einen hohen Gehalt an Mangan und Zink auf)
- erhöht die Löslichkeit von Phosphor im Grünlandboden (stark saure Grünlandböden weisen im Oberboden oft hohe Gehalte an leicht verfügbarem Phosphor auf)
- erhöht die Löslichkeit von Schadelementen (z.B. Aluminium) und toxischen Schwermetallen (z.B. Cadmium, Blei) im Grünlandboden
- verringert die Fähigkeit des Grünlandbodens kationische Nährelemente (insbesondere Kalzium und Magnesium) in pflanzenverfügbarer Form im humusreichen Oberboden zu speichern (dies führt zu einer Nährstoffverarmung und zu höheren Auswaschungsverlusten nach einer übermäßigen Düngung)

- verengt das Kalzium : Kalium-Verhältnis im Grünlandboden
- bewirkt generell ein disharmonisches Nährstoffangebot für Pflanzen und Bodenorganismen (dies führt – je nach Nährelement – zu einem Mangel oder Überschuss in der pflanzlichen und tierischen Biomasse).

Ein zu hoher Karbonatgehalt im Grünlandboden und eine alkalische Bodenreaktion können

- zu einem selektiven Nährelementmangel bei den Grünlandpflanzen führen (z.B. Mangel an Kalium, Eisen, Mangan, Zink, Phosphor) und
- höhere gasförmige Stickstoff-Verluste durch Verflüchtigung von Ammoniak bewirken.

Der pH-Wert beeinflusst indirekt auch die Bodenstruktur. Eine schwach saure bis leicht alkalische Bodenreaktion begünstigt die Krümelbildung. Der pH-Wert hat auch für die Bodenorganismen und die mikrobielle Aktivität im Grünlandboden eine große Bedeutung. Regenwürmer und die meisten Bakterienarten im Boden bevorzugen eine schwach saure bis leicht alkalische Bodenreaktion. Nitrifizierende Bakterien beispielsweise sind sehr säureempfindlich. Daher wird in stark sauren Grünlandböden vergleichsweise weniger Nitrat-Stickstoff gebildet als bei schwach saurer bis alkalischer Bodenreaktion. Die Pilzarten hingegen ertragen auch niedrige Boden-pH-Werte. Pilze haben daher in sauren Grünlandböden eine große Bedeutung für die Humifizierung und Mineralisierung der organischen Substanz. Der pH-Wert beeinflusst auch die Artenzusammensetzung der Grünlandvegetation. Die Pflanzen haben unterschiedliche Ansprüche an den Säuregrad des Bodens. Die meisten hochwertigen Grünlandpflanzen bevorzugen eine schwach saure bis leicht alkalische Bodenreaktion. Sie können auf stark sauren Böden ( $\text{pH CaCl}_2: < 5.0$ ) kaum noch wachsen, weshalb Ertrag und Futterqualität mit zunehmender Bodenversauerung sinken. Insbesondere Leguminosen und ihre Knöllchenbakterien meiden stark saure Grünlandböden, was wiederum zu einer reduzierten biologischen Stickstoff-Bindung führt.

Die beste Bioverfügbarkeit von Nährelementen ist bei einer schwach bis mäßig sauren Bodenreaktion gegeben. Der pH-Wert (gemessen in einer  $\text{CaCl}_2$ -Lösung) von Grünlandböden sollte daher im Hauptwurzelraum idealerweise zwischen 5.0 und 6.2 liegen. Nur Grünlandböden mit niedrigeren pH-Werten haben einen Kalkbedarf; eine Kalkdüngung oder die Zufuhr basenreicher Gesteinsmehle ist zu empfehlen.

## Pflanzenwurzeln

Die Nährstoffverfügbarkeit im Grünlandboden wird erheblich von Pflanzenfaktoren wie beispielsweise Wurzelabscheidungen (mobilisieren Nährstoffe im wurzelnahen Boden), Wurzelwachstumsrate, Größe der aufnahmeaktiven Wurzeloberfläche oder Wurzellänge beeinflusst. Je größer die Wurzelichte (Anzahl von Feinwurzeln pro  $\text{m}^2$  Boden) im Grünlandboden ist, desto mehr Wasser und Nährstoffe können aus dem Boden aufgenommen werden. Durch eine große aufnahmeaktive Wurzeloberfläche erhöht sich die räumliche Verfügbarkeit der Nährstoffe im Boden, weil die Nährstoffe geringere Distanzen zu den Pflanzenwurzeln zurücklegen müssen (Abbildung 7). Nur durch ein ständiges und ungehindertes Wurzelwachstum werden die Wasser- und Nährstoffvorräte im Boden optimal ausgenutzt. Günstig

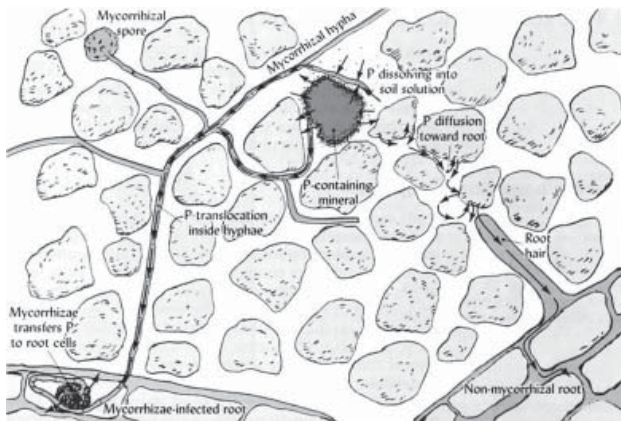


Abbildung 7: Räumliche Nährstoffverfügbarkeit im Boden (Quelle: Brady & Weil, 1999)

ist eine gleichmäßige und intensive Durchwurzelung des Grünlandbodens.

Die Durchwurzelungstiefe beträgt unter Dauergrünland im Durchschnitt etwa 60 cm. Ungefähr 80-90 % der Wurzelmasse befinden sich in den obersten 10 cm des Bodens. Daher wird der Großteil der Nährstoffe von den Pflanzenwurzeln aus dem Oberboden aufgenommen. Allerdings tragen auch die Nährstoffgehalte im durchwurzelten Unterboden zur Nährstoffversorgung der Grünlandpflanzen bei, insbesondere in niederschlagarmen Vegetationsperioden.

Die Pflanzenarten unterscheiden sich sehr in ihrem Wurzeltiefgang, in ihrer aufnahmeaktiven Wurzeloberfläche und in ihrem Nährstoff-Aneignungsvermögen. Das Wurzelsystem der Grünlandpflanzen ist in erster Linie erblich bedingt, wird in seiner Ausprägung aber auch wesentlich von den Bodeneigenschaften und von der Intensität der Grünlandbewirtschaftung beeinflusst. Gräser haben im Allgemeinen eine größere Wurzelmasse als Leguminosen und die Mehrzahl der Kräuter; sie durchwurzeln daher den Boden intensiver. Die Wurzelmasse und der Wurzeltiefgang sind bei Untergräsern in der Regel geringer als bei Obergräsern. Unter den wertvollen Futtergräsern erreichen insbesondere der Glatthafer, das Wiesen-Knaulgras und das Wiesen-Rispengras eine beachtliche Wurzeltiefe, im Gegensatz zum Gewöhnlichen Rispengras, das nur flach wurzelt. Generell fördern Trockenheit und Wärme das Tiefenwachstum der Wurzeln, während Nässe, Kälte, eine starke Bodenversauerung und eine geringe Bodenmächtigkeit (Flachgründigkeit) das Tiefenstreben der Wurzeln vermindern. Ein großer Wurzeltiefgang schützt die Pflanzen vor Wassermangel. Eine tiefreichende Durchwurzelung erhöht den Humusgehalt im Unterboden und vermindert die Nährstoffverluste durch Auswaschung mit dem Sickerwasser. Außerdem werden die Nährstoffvorräte im Unterboden besser ausgenutzt. Auch die Intensität der Grünlandbewirtschaftung beeinflusst die Wurzelmasse und räumliche Wurzelverteilung im Boden. Je häufiger eine Nutzung durch Mahd oder Beweidung erfolgt, desto geringer werden Wurzelmasse und Wurzeltiefgang. Die unterirdische Phytomasse nimmt dabei nicht gleichmäßig in allen Tiefen ab, sondern in tieferen Bodenschichten besonders stark. Vor allem bei intensiver Beweidung verringert sich die Wurzelmasse und sie verlagert sich noch stärker in die oberste Bodenschicht. Die Verminderung der Wurzelmasse und Durchwurzelungstiefe infolge intensiver Nutzung erfolgt primär durch Änderungen in der Pflanzenar-

tenzusammensetzung im Grünlandbestand; flachwurzelnde Arten mit geringerer Wurzelmasse werden durch Nutzungsintensivierung in der Regel gefördert. Die Verminderung des Wurzelwachstums durch intensive Nutzung tritt aber auch bei Einzelepflanzen einer Art in Erscheinung. Die Düngung vermindert die Wurzelmasse in erster Linie durch Änderungen in der Artenzusammensetzung im Grünlandbestand. Generell haben Arten, die auf nährstoffarmen Böden wachsen (Magerkeitszeiger) eine größere Wurzelmasse als Arten von nährstoffreichen Böden (Nährstoffzeiger). Dies ist eine Anpassung an die Nährstoffarmut im Boden. Die Wurzeln bevorzugen für ihr Wachstum einen lockeren Boden, weil für ein ungehindertes Wurzelwachstum eine gute Durchlüftung des Bodens erforderlich ist. Die Wurzelmasse, Wurzellänge und Wurzeloberfläche werden in der Regel durch Bodenverdichtung reduziert. Die Verminderung des Wurzelwachstums in verdichteten Böden wird auf den erhöhten mechanischen Eindringwiderstand und auf den gehemmten Gasaustausch zurückgeführt.

Ein verdichteter, nährstoffreicher Grünlandboden fördert flachwurzelnde Pflanzenarten mit relativ geringer Wurzelmasse. Eine Intensivierung der Grünlandbewirtschaftung bewirkt somit vor allem durch Änderungen in der Artenzusammensetzung des Pflanzenbestandes eine Verminderung der unterirdischen Phytomasse und gleichzeitig auch eine relativ stärkere Anreicherung in der Tiefenstufe 0-5 cm. Daraus resultiert eine ungleichmäßige Wurzelverteilung im Grünlandboden. Die Wasser- und Nährstoffvorräte im Unterboden werden dadurch nicht optimal ausgenutzt.

Auch Mykorrhizapilze erhöhen die räumliche Verfügbarkeit der Nährstoffe im Boden und verbessern damit die Nährstoffversorgung der Wirtspflanzen auf nährstoffarmen Böden.

Allerdings muss auch erwähnt werden, dass in Grünlandökosystemen eine größere Wurzelmasse und ein höherer Mykorrhizierungsgrad der Pflanzenwurzeln eine Nährstoffzufuhr mit Wirtschaftsdünger hinsichtlich Ertragssteigerung nicht ersetzen kann.

## Praxisrelevante Schlussfolgerungen

Die Pflanzenverfügbarkeit der Nährstoffe im Grünlandboden und die Düngerwirkung hängen nicht allein vom Nährstoffgehalt des Bodens, sondern auch von zahlreichen anderen Bodeneigenschaften (insbesondere Bodentemperatur, Bodenwasserhaushalt, Bodenstruktur, pH-Wert, mikrobielle Aktivität, Durchwurzelbarkeit) und von Pflanzenfaktoren ab. Die Nährstoffverfügbarkeit im Grünlandboden und die Effizienz der Düngung können durch folgende Maßnahmen erhöht werden:

- Düngung an den mengenmäßigen und zeitlichen Nährstoffbedarf der Vegetation anpassen
- auf eine richtige Wahl der Düngemittel achten (keine Düngung mit Gülle oder Jauche auf stark sauren Grünlandböden; keine Düngung mit Hyperphosphat auf karbonathaltigen, alkalischen Grünlandböden)
- Witterung, Bodenzustand und Geländeform bei der Ausbringung der Düngemittel beachten (keine Ausbringung flüssiger Wirtschaftsdünger (Gülle, Jauche) in steilen Hanglagen, wenn ein Dauer- oder Starkregen zu erwarten ist; Unterhang-, Mulden- und Rinnenlagen)

sowie Hangverebnungen und Hangfußbereiche sind natürliche Anreicherungsstandorte und haben somit einen geringeren Düngebedarf)

- auf günstige Verhältnisse der einzelnen Nährelemente im Grünlandboden achten (Überschuss an Kalium vermeiden)
- Düngung und Nutzungsintensität an den Standort und an den Pflanzenbestand anpassen
- Bodenverdichtung (Schadverdichtung) weitgehend vermeiden
- Erhaltung oder Schaffung einer ganzjährig geschlossenen, dichten Grasnarbe
- Aktivierung des Bodenlebens durch Zufuhr organischer Dünger (bewirkt eine erhöhte Nährstofffreisetzung durch positiven „priming effect“)
- Erhöhung des pH-Wertes im Hauptwurzelraum von stark versauerten Grünlandböden ( $\text{pH CaCl}_2 < 5.0$ ) durch Kalkung oder Zufuhr basenreicher Gesteinsmehle
- Entwässerung feuchter oder nasser Standorte (Naturschutzaspekte berücksichtigen).

Der Nährstoffgehalt im Grünlandboden ist ein wichtiger, aber nicht der einzige ertragsbegrenzende Faktor. Für einen geringen oder sinkenden Grünlandertrag sind mehrere Ursachen möglich: niedriger mobilisierbarer Nährstoffvorrat und/oder geringe Freisetzungs- und Nachlieferungsrate der Nährstoffe zu den Pflanzenwurzeln, Schadstoffe und/oder ungünstige Verhältnisse der einzelnen Nährelemente, geringe Durchwurzelung, niedrige Bodentemperatur, langandauernder Wasserüberschuss oder Wassermangel, stark verdichteter Oberboden, geringe Bodenmächtigkeit, geringer Feinbodenanteil sowie geringe Humusmenge. Diese Tatsachen sollten bei der Standortsbeurteilung und bei Düngeempfehlungen berücksichtigt werden. Der Grundsatz „Bodenfruchtbarkeit kommt nicht aus dem Düngersack“ hat nach wie vor Gültigkeit.

## Literatur

- BOHNER, A., A. BAUMGARTEN, G. KOVACS und R. ÖHLINGER, 2004: Einfluss der Düngung auf den P-Kreislauf in Grünlandökosystemen. Mitteilungen der Österreichischen Bodenkundlichen Gesellschaft, Heft 70, 5-9.
- BOHNER, A. und M. HERNDL, 2011: Einfluss einer Nutzungsintensivierung auf Wurzelmasse und Wurzelverteilung im Grünlandboden. 1. Tagung der Österreichischen Gesellschaft für Wurzelforschung, 35-44.
- BRADY, N.C. und R.R. WEIL, 1999: The nature and properties of soils. 12th edition, Prentice-Hall, 881 p.
- FINCK, A., 1992: Dünger und Düngung. 2. Auflage, VCH Verlagsgesellschaft, 488 S.
- FINCK, A., 2007: Pflanzenernährung und Düngung. 6. Auflage, Gebrüder Borntraeger Verlagsbuchhandlung, 253 S.
- FLOSSMANN, R. und D. RICHTER, 1982: Extraktionsmethode zur Charakterisierung der Kinetik der Freisetzung von P aus der festen Phase des Bodens in die Bodenlösung. Arch. Acker- u. Pflanzenbau u. Bodenkd. 26, 703-709.
- HELAL, H.M., 1991: Bodengefüge, Wurzelentwicklung und Wurzelfunktionen. Zeitschrift Pflanzenernährung, Bodenkunde 154, 403-407.
- JUNGK, A., 1993: Die Pflanzenverfügbarkeit der Nährstoffe im Boden: chemische und räumliche Aspekte. In: Berichte über Landwirtschaft 207, SH 5, 70-84.
- KLAPP, E., 1943: Über die Wurzelverbreitung der Grasnarbe bei verschiedener Nutzungsweise und Pflanzengesellschaft. Zeitschrift Pflanzenbau 19, 221-236.
- KLAPP, E., 1951: Leistung, Bewurzelung und Nachwuchs einer Grasnarbe unter verschieden häufiger Mahd und Beweidung. Zeitschrift Acker- und Pflanzenbau 93, 269-286.
- KLAPP, E., 1971: Wiesen und Weiden. Parey Verlag, 620 S.
- KMOCH, H.G., 1952: Über den Umfang und einige Gesetzmäßigkeiten der Wurzelmasseausbildung unter Grasnarben. Zeitschrift Acker- und Pflanzenbau 95, 363-380.
- KNAUER, N., 1968: Über die Abhängigkeit des lactatlöslichen Nährstoffgehaltes des Bodens von der Nährstoffanreicherung durch die Düngung. Zeitschrift Acker- und Pflanzenbau 127, 89-102.
- KNAUER, N., 1973: Bedeutung der Nährstoffdynamik im Boden für die Ermittlung des Nährstoffbedarfes von Grünland. Die Phosphorsäure 30, 27-43.
- KULLMANN, A., 1957: Zur Intensität der Bodendurchwurzelung. Zeitschrift Acker- und Pflanzenbau 103, 189-197.
- LICHTENEGGER, E., 1997: Wurzeln. Bewurzelung von Pflanzen in verschiedenen Lebensräumen. Spezieller Teil. Stapfia 49, 55-331.
- LICHTENEGGER, E., 1983: Wurzel- und Bodentyp als Ausdruck des Standortes. In: Böhm, W., L. Kutschera und E. Lichtenegger (Hrsg.), Wurzelökologie und ihre Nutzenanwendung. Bundesanstalt für alpenländische Landwirtschaft, 369-388.
- MARSCHNER, H., 1998: Mineral nutrition of higher plants. Academic Press, 889 S.
- MOHR, H.D., 1980: Einfluss der Bodeneigenschaften auf das Wurzelwachstum. Kali-Briefe 15, 305-316.
- MENGEL, K., 1991: Ernährung und Stoffwechsel der Pflanze. 7. Auflage, Gustav Fischer Verlag, 466 S.
- SCHEFFER, F. und P. SCHACHTSCHABEL (Begr.), 2002: Lehrbuch der Bodenkunde. 15. Auflage, Spektrum Akademischer Verlag, 593 S.
- SCHULZE, E. und H. Mues, 1961: Ertragsleistung, Pflanzenbestand und Bewurzelung einer Grasnarbe bei verschiedener Düngungsweise. Zeitschrift Acker- und Pflanzenbau 112, 141-160.
- SEKERA, M., 1984: Gesunder und kranker Boden. 5. Auflage, Stocker Verlag, 100 S.
- STAHR, K., E. KANDELER, L. HERRMANN und T. STRECK, 2008: Bodenkunde und Standortlehre. Ulmer Verlag UTB, 318 S.