



Universität für Bodenkultur Wien

Ergebnisbericht zu LAFO-Projekt ABB-LEBO-498/0001

Nährstoffdynamik in Böden Niederösterreichischer Agrarlandschaften

Gefördert durch den Niederösterreichischen Landschaftsfonds

Tulln, 11.12.2020

Verfasser:

Christian Holzinger, BSc *

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr. Walter W. Wenzel*

* Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Bodenforschung, Konrad Lorenz-Straße 24, A-3430 Tulln a. d. Donau

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	1
Datengrundlage, Material und Methoden	3
VORARBEITEN	3
LABORARBEITEN.....	5
AUSWERTUNG DER ERGEBNISSE	7
Ergebnisse des Bodenmonitoring	7
AKTUELLER BODENZUSTAND (2015-2020)	7
<i>Ackerland.....</i>	<i>7</i>
<i>Grünland.....</i>	<i>9</i>
MONITORING VON BODENVERÄNDERUNGEN IM ZEITRAUM 1980/2000 – 2015/2020	11
<i>Boden-pH.....</i>	<i>12</i>
<i>Gesamtstickstoff.....</i>	<i>13</i>
<i>Organischer Kohlenstoff.....</i>	<i>14</i>
<i>C/N-Verhältnis</i>	<i>16</i>
<i>Verfügbarer Phosphor</i>	<i>16</i>
<i>Verfügbares Kalium</i>	<i>18</i>
<i>Verfügbare Siliziumfraktion.....</i>	<i>20</i>
<i>Amorphe Siliziumfraktion</i>	<i>21</i>
BETRACHTUNG DER ZEITLICHEN ÄNDERUNGEN VON BODENKENNWERTEN IN UNTERSCHIEDLICHEN REGIONEN	22
<i>Entwicklung der organischen Kohlenstoffgehalte auf Ackerland im Hauptproduktionsgebiet „Nordöstliches Flach- und Hügelland“ (HPG 8)</i>	<i>22</i>
<i>Entwicklung der Nährstoffe auf Ackerland in den Kleinproduktionsgebieten „Wiener Boden“ und „Baden-Gumpoldskirchener Gebiet“ (KPG 809 – 810).....</i>	<i>23</i>
<i>Entwicklung der Grünlandstandorte im Hauptproduktionsgebiet „Voralpen“ (HPG 2).....</i>	<i>25</i>
Zusammenfassung	28
Gehaltsklassenanhang	30
Tabellenverzeichnis	31
Abbildungsverzeichnis	32
Literaturverzeichnis	33

Einleitung

Die letzten flächendeckenden Bodenerhebungen auf landwirtschaftlichen Flächen fanden in Niederösterreich über die Bodenzustandsinventur, und über die landwirtschaftlichen Bodenkartierung statt. Die Bodenzustandsinventur in Niederösterreich wurde Ende der achtziger bis Anfang der neunziger Jahre durchgeführt. Die landwirtschaftliche Bodenkartierung in Niederösterreich begann in den achtziger Jahren, und wurde im Jahr 2000 abgeschlossen.

Die landwirtschaftliche Bodenkartierung hat zum Ziel Bodenformen und Bodenformkomplexe zu erfassen. Dafür wird für eine Bodenform mindestens eine Profilgrube mit einer Tiefe von 1 bis 1,5 m angelegt, die Profilbeschreibung durchgeführt und von jedem definiertem Horizont eine Mischprobe entnommen (vgl. Schneider et al., 2001).

Im Oberboden laufen aufgrund des Austausches mit der Atmosphäre, Biosphäre und anthropogenen Einwirkungen die biologischen, chemischen und physikalischen Prozesse am intensivsten ab, deshalb sind hier am ehesten zeitliche Veränderungen innerhalb weniger Jahrzehnte zu erwarten. Der Oberboden, oder auch A-Horizont, ist der fruchtbarste Bereich des Bodens und aus diesem Grunde von besonderem Interesse für vegetationstechnische Zwecke (vgl. BMLFUW, 2017).

Während manche Bodenkennwerte, wie die Bodenart, sich innerhalb von Jahrzehnten kaum verändern, kann die Dynamik bei pH, organischem Kohlenstoff und verfügbaren Nährstoffvorräten (wie z.B.: Stickstoff, Phosphor, Kalium und Silizium) wesentlich ausgeprägter sein, und in Abhängigkeit von Landschaftstypus und Landnutzung auch innerhalb relativ kurzer Zeiträume relevante Veränderungen zeigen.

Der pH ist einer der grundlegenden Bodenkennwerte. Er beeinflusst eine Unzahl an chemischen, physikalischen und biologischen Prozessen im Boden, und somit auch das Pflanzenwachstum und den Ertrag (vgl. Brady und Weil, 1999 und Minasy et al., 2006 zit. In Neina, 2019). Für weiterführende Informationen wird hier auf den Review-Artikel „The Role of Soil pH in Plant Nutrition and Soil Remediation“ von Dora Neina (2019) verwiesen, der im Internet frei zugänglich ist.

Der organische Kohlenstoff ist mit ca. 58% Anteil die Hauptkomponente von Humus. Humus ist ein wichtiger Faktor für Bodenstruktur, Wasserkapazität (Wasserhaltevermögen) und für den Kreislauf von Pflanzennährstoffen im Boden. Durch die Zersetzung der organischen Bodensubstanz werden Mineralstoffe (Pflanzennährstoffe) freigesetzt, und somit für die Pflanzenernährung zur Verfügung gestellt (vgl. Lefèvre et al., 2017). Der Anteil des organischen Kohlenstoffs wird hauptsächlich über die Rückführung von toter Biomasse (Ernterückstände und Wurzelmasse) bestimmt (vgl. ebd., 2017), und über die Entnahme durch Ernteprodukte. Zwischen den Landnutzungsformen Ackerland und Grünland herrschen signifikante Unterschiede in den organischen Kohlenstoffgehalten (vgl. Clymans et al., 2011). Stickstoff, Phosphor und Kalium sind essentielle Makronährstoffe. Das heißt, es sind unentbehrliche Nährstoffe, die in größerer Menge für die Pflanzenernährung zur Verfügung stehen müssen.

Stickstoff ist nach Kohlenstoff das Element, welches im größten Ausmaß von Pflanzen benötigt wird. Stickstoff ist ein wesentlicher Bestandteil von Proteinen, Nucleinsäure, Chlorophyll, Ko-Enzymen, Phytohormonen und sekundären Metaboliten, und macht einen Anteil von 1 – 5% der Trockenmasse von Pflanzen aus (vgl. Hawkesford et al., 2012).

Phosphor stellt oft einen limitierenden Faktor für die Landwirtschaft dar, und nimmt damit eine der Schlüsselpositionen für das Pflanzenwachstum ein (vgl. Tiessen et al., 1984; Roberts et al., 1985). Phosphor ist in allen lebenden Zellen enthalten und ist ein Bestandteil von DNA, RNA, ATP und Phospholipiden (vgl. Abelson, 1999). Dieses Element hat eine wichtige Rolle für Energietransfer und enzymatische Reaktionen (biochemisch beschleunigte Reaktionen) innerhalb der Pflanze (vgl. Hawkesford et al., 2012).

Kalium liegt mengenmäßig hinter Stickstoff für die Pflanzenernährung von Kulturpflanzen (vgl. Syer, 1998; Hawkesford et al., 2012). Innerhalb der Pflanze hat es eine wichtige Rolle für den Kohlenstoffmetabolismus, der (Wasser-/Trocken-) Stressresistenz (vgl. Zörb et al., 2014), und erhöht durch die Beteiligung an verschiedenen physiologischen Prozessen die Qualität von Kulturpflanzen (vgl. Pettigrew, 2008).

Silizium ist kein essentieller Pflanzennährstoff, jedoch belegen viele Arbeiten (z.B.: Gomes et al. 2005; Heine et al. (2007); Sun et al., 2010); Adrees et al., 2015; Guntzer et al., 2018) die Vorteile einer ausreichenden Siliziumversorgung. Positive Auswirkungen können sich in erhöhter Stressresistenz, erhöhtem Schutz gegenüber Herbivoren (Pflanzenfressern) und Insektenbefall, besserer Nährstoffversorgung und Reduzierung der Aufnahme von Schwermetallen zeigen. Nach Klotzbüchler et al. (2018) gibt es wenige Forschungsarbeiten zur Silizium-Thematik in unserer Klimazone.

Im Rahmen des vorliegenden Projektes wurde der Oberboden an 347 Profilstandorten der Österreichischen Bodenkartierung neu beprobt. Im Rahmen von Vorarbeiten des Instituts für Bodenforschung erfolgten in den Jahren 2015-2017 bereits Wiederholungsbeprobungen an 280 Standorten (Cocuzzza, 2017; Schiefer, 2019; Reiter, 2019). Die Auswahl der Standorte erfolgte über vorhandenes Archivmaterial aus der landwirtschaftlichen Bodenkartierung. Es wurden und werden weitere Daten der Bodenkennwerte aus dem Probenmaterial der Vorarbeiten, den Neuproben und dem Archivmaterial generiert, und in einer Excel-Datenbank erfasst. Die Analysen umfassen pH-Wert, Karbonat-Äquivalent, Siliziumfraktionen, organischer Kohlenstoff und Gesamtstickstoff an den neu beprobten Standorten, und organischer Kohlenstoff und Siliziumfraktionen an den Archivproben. An einem Teil der Standorte wurde auch potentiell pflanzenverfügbarer Phosphor und Kalium an Archiv- und Neuproben gemessen.

Der Vergleich der wieder beprobten Böden mit den zugehörigen Archivproben erlaubt nicht nur die Darstellung und Bewertung des aktuellen Bodenzustandes, sondern auch Aussagen zur Dynamik der Veränderung während der letzten ca. drei Jahrzehnte. Die Ergebnisse werden in Form einer EXCEL-Datenbank für weitere Anwendungen (z.B. Integration in NÖGIS) durch das Land NÖ aufbereitet. Das Projekt liefert einen Beitrag zur Charakterisierung von niederösterreichischen Landschaftsräumen hinsichtlich der Ausstattung landwirtschaftlich genutzter Böden mit den für die Bodenfruchtbarkeit wichtigen Elementen Kohlenstoff, Stickstoff, Phosphor, Kalium und Silizium sowie zur Bodenversauerung (Boden-pH, Kalkgehalt). Die Informationen stehen der Landesregierung, der landwirtschaftlichen Praxis sowie Regionen und Gemeinden als Planungsgrundlage für eine nachhaltige Bodenbewirtschaftung und z.B. die Schließung von lokalen / regionalen Kreisläufen durch gezielte Rückführung von sekundären kommunalen und landwirtschaftlichen Rohstoffen zur Verfügung. Die Ergebnisse stellen somit auch eine wesentliche Grundlage für die Boden-, Umwelt- und Landschaftsschutzpolitik auf regionaler und Gemeindeebene des Landes Niederösterreich dar.

Datengrundlage, Material und Methoden

Vorarbeiten

Für dieses Monitoringprojekt wurden insgesamt 626 Profilstellen der landwirtschaftlichen Bodenkartierung wiederbeprob (2015 – 2020). Durch die Zielsetzung der landwirtschaftlichen Bodenkartierung, Bodenkomplexe zu erfassen, und der regional sehr unterschiedlichen Verfügbarkeit von Archivmaterial sind die neu beprobten Standorte ungleichmäßig in Niederösterreich verteilt. Die Profilstellen (Anzahl in Klammer angeführt) befinden sich in den Kartierungsbereichen: Schwechat (56), Mödling (69), St. Peter in der Au (3), Eggenburg (6), Retz (47), Scheibbs (15), Kirchberg an der Pielach (34), Aspang (16), Gaming (91), Gloggnitz (74), Lilienfeld (60), Laa an der Thaya Nord (83) und Laa an der Thaya Süd (73). In Abbildung 1 ist die Verteilung ersichtlich.

Bei der ursprünglichen Beprobung teilte sich die Landnutzung in 352-mal Ackerland, 245-mal Grünland, 21-mal Wechselland, 8-mal Weinbau und eine Brache auf. Zum Zeitpunkt der erneuten Beprobung waren es 307-mal Ackerland, 279-mal Grünland, 30-mal Weinbau, 10-mal Brache und eine Spezialkultur.

Nährstoff NÖ – Übersicht Neubeprobungen der österreichischen Bodenkartierung in Niederösterreich

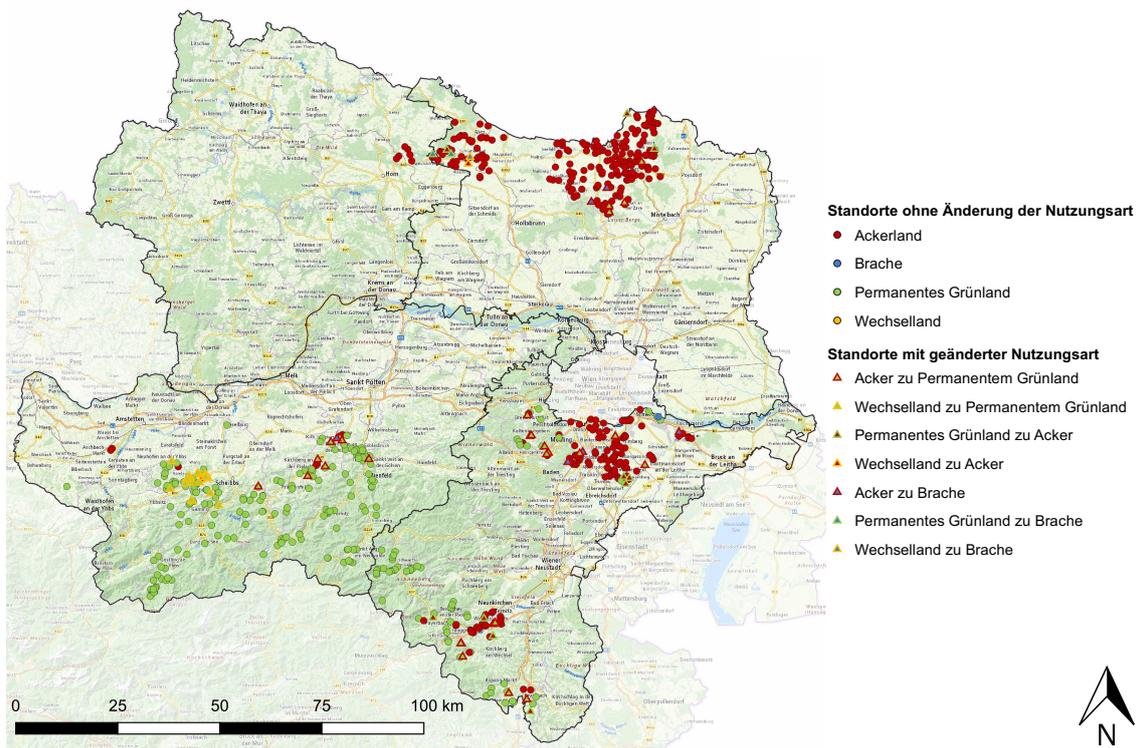


Abbildung 1: Profilstandorte der erneuten Probenahme (2015-2020)

Die Profilstellen und Lagekoordinaten wurden aus der digitalen Bodenkarte eBod (<https://www.bodenkarte.at>) vom Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft ermittelt. Wegen der Ungenauigkeit der Koordinatenermittlung in eBod, und des GPS-Gerätes zur Lokalisierung der Standorte wurde ein Radius von 8 – 10m festgelegt, innerhalb dessen 10 – 13 Teilproben (ca. 100g) entnommen

wurden. Die Entnahmetiefe erfolgte über den A-Horizont. Die Mischprobe wurde in PE-Plastiksäcke gefüllt, und anschließend zur Lufttrocknung an den BOKU Standort Tulln überführt. Danach erfolgte die Siebung auf die Feinbodenfraktion von 2mm.



Abbildung 2: Lufttrocknung nach der Probenahme (Quelle: eigenes Material)

Um die Stabilität der Probewerbung (Probenahme) zu kontrollieren, wurden fünf Standorte von unterschiedlichen Mitarbeitern (innerhalb von wenigen Jahren) erneut beprobt, und den chemischen Analysen unterzogen.

Bei einem Ackerstandort wurden einige Teilproben sowie die Mischprobe analysiert, hinsichtlich der Überprüfung der Homogenität des Bodenmaterials innerhalb des Probenahme-Radius.

Aus der digitalen Bodenkarte wurden Daten des Archivmaterials entnommen. Diese beinhalten Boden-pH, Bodenart (Bodentextur oder Körnung), Bodenstruktur, Humus, Karbonat, Landnutzung und Bodenklassifikation. Die Bodenklassifizierung in eBod beruht noch auf dem ersten österreichischen Bodenklassifikationssystem von Fink (1969). Die untersuchten Bodentypen umfassen Rendsina (9), Pararendsina (23), Ranker (9), Tschernosem (106), Paratschernosem (15), Feuchtschwarzerde (46), Gebirgsschwarzerde (2), Felsbraunerde(96) , Lockersediment-Braunerde (71), Parabraunerde (2), Pseudogley (25), Stagnogley (3), Hangpseudogley (3), Reliktboden (2), Relikt pseudogley (6), Braunlehm (38), Rotlehm (2), Hochmoor (1), Übergangsmoor (1), Niedermoor (8), Anmoor (10), Rohauboden (1), Grauer Auboden (20), Brauner Auboden (19), Auboden (2), Schwemmboden (3), Gley (30), Hanggley (9), Farb-Ortsboden (6), Kulturrohboden (19), Rigolboden (3), Planieboden (3), Haldenboden (1) und Kolluvium(33). Damit werden alle in landwirtschaftlich genutzten Böden Niederösterreichs bedeutenden Bodentypen abgedeckt. Über weitere, der Profilbeschreibung (eBod) entnommene Daten wie z.B. die Bodenstruktur und Bodenfarbe wurden die Böden nach der internationalen Bodensystematik – World Reference Base for Soil Resources 2014 (FAO, 2014) – klassifiziert, um auch eine Kommunikation auf EU und internationaler Ebene zu ermöglichen.

Für die Klimadaten – Jahresmitteltemperatur, mittlere Jahresniederschläge – wurde die Klimakarte von Hiebl et al. (2011) herangezogen, und über QGIS mit den Profilstellen verknüpft. Diese Klimakarte basiert auf Daten vieler verschiedener Wetterstationen aus dem Zeitraum 1970 bis 2000 und errechnet die Klimaverhältnisse für gesuchte Standorte innerhalb Österreich.

Um die aktuelle Landnutzungsform zu überprüfen wurden die Profilstellen über QGIS mit den Daten von INVEKOS („das Integriertes Verwaltungs- und Kontrollsystem“ der Europäischen Union zur Durchsetzung einer einheitlichen Agrarpolitik in den EU-Mitgliedsstaaten) verknüpft, und dokumentiert.

Laborarbeiten

Im Labor wurde der **Restfeuchtegehalt** der luftgetrockneten Proben bestimmt. Diesen benötigt man, um die Berechnungen nach den Analysen mit dem reinen Trockengewicht durchführen zu können.

Da noch nicht bei allen Archivproben der Restfeuchtegehalt bestimmt wurde, können sich Werte bis zum Abschlussbericht noch geringfügig ändern.

Die Bestimmung des **pH-Werts** wurde über die Extraktion (der Bodenprobe) mit einer 1M-KCL-Lösung durchgeführt, um die direkte Vergleichbarkeit mit den aus der ebod entnommenen Daten der Archivproben zu wahren. Dies weicht von der ÖNORM L 1083-89 ab, die in einer 0,01M CaCl₂-Lösung bestimmt wird. Ansonsten wurden die gleichen Arbeitsschritte verwendet. Die Messung erfolgt mittels einer Glaselektrode (pH-Elektrode), und basiert auf Ermittlung durch elektrochemischen Prozess. Die Verwendung einer anderen Extraktionslösung fußt auf dem Umstand, dass die Archivproben so gemessen wurden.

Der **Karbonatgehalt** (Karbonat-Äquivalent) wurde nach der Methode von Scheibler – ÖNORM L 1084 – ermittelt. Diese Methode basiert auf der Änderung des Volumens in einer U-förmigen Glasröhre, nachdem die karbonathaltige Probe mit einer 10%iger HCl-Lösung in Kontakt gebracht wird.

Der **organische Kohlenstoff** und der **Gesamtstickstoff** wurden über Elementaranalyse (Trocken-Verbrennungsmethode nach ÖNORM L 1080) ermittelt. Diese Methode beruht auf der vollständigen Verbrennung des Analysematerials, und der nachfolgenden Messung der Verbrennungsgase CO₂ und N₂.

Diese Methode liefert die Gesamtkonzentrationen von Gesamtkohlenstoff und Gesamtstickstoff, also die Summe aus anorganischen und organischen Anteilen. Aus diesem Grund muss man bei karbonathaltigen Proben noch den in den Karbonaten enthaltenen Kohlenstoff vom Gesamtkohlenstoff abziehen.

Da der Humusgehalt der Archivproben mit einer anderen Methode (Nassoxidation – Walkley-Black, 1934) bestimmt wurde, wurden auch diese mittels Elementaranalyse gemessen, obwohl eine Umrechnung vom Humusgehalt in organischen Kohlenstoffgehalt prinzipiell möglich ist.

Potentiell-pflanzenverfügbares Phosphor und **Kalium** wurden im CAL-Extrakt (Calcium-Acetat-Lactat-Extrakt), nach der ÖNORM L 1087, durchgeführt. Für die Phosphorbestimmung müssen die Extrakte nachfolgend eingefärbt, und am Photometer gemessen werden.

Diese Methode erfasst bei Böden mit einem pH-Wert < 6 nicht den gesamten potentiell-pflanzenverfügbaren Phosphor. Durch einen Umrechnungsfaktor kann dies korrigiert werden, der sich jedoch nur bei niedrigen Phosphorgehalten bestimmend auswirkt. Auch weil noch nicht alle pH-Werte verfügbar sind, wurde für diese Auswertung auf diese Korrektur verzichtet.

Die Kaliumbestimmung erfolgt ohne Einfärben auf der ICP-OES (Inductively Coupled Plasma – Optical Emission Spectrometry = optische Emissionsspektrometrie mittels induktiv gekoppelten Plasmas).

Für die **potentiell-pflanzenverfügbare Siliziumfraktion** wurde eine 0,01 M CaCl₂-Extraktion nach Haysom und Chapman (1975) herangezogen. Für die **amorphe Siliziumfraktion** wurde die 0,2M NaOH-Extraktionsmethode von Georgis et al. (2015) verwendet. Die nachfolgende Messung am Photometer wurde mit einer modifizierten Blaufärbemethode von Morrison und Wilson (1963) und Webber und Wilson (1964) durchgeführt.

Da die Vorarbeiten und dieses Projekt die ersten Arbeiten zur Silizium-Verfügbarkeit in Österreichs Böden darstellen, wurden die Methoden in unserem Labor überprüft und modifiziert (Cocuzza, 2017; Duboc et al., 2017).

Die Messungen des potentiell-pflanzenverfügbaren Phosphor und Kalium, sowie der Siliziumfraktionen, basieren auf der Bestimmung (optischer) Wellenlänge. In der nachfolgenden Abbildung 3 sieht man einige der durchgeführten Arbeitsschritte im Labor.



Abbildung 3: 1. Restfeuchtebestimmung 2. Extraktion

3. Blaufärbung 4. Messung am Photometer (Quelle: Schiefer, 2019)

Auswertung der Ergebnisse

Die Berechnungen nach den chemischen Analysen erfolgten im Microsoft Excel.

Die statistischen Analysen, sowie die dazugehörigen Abbildungen wurden im R Commander erarbeitet. Die untersuchten Daten wurden auf Normalverteilung mit dem Saphiro-Wilk-Test überprüft (Signifikanzniveau $p=0,05$). Zur Evaluierung ob statistische Änderungen stattgefunden haben, wurden nachfolgend bei Annahme der Normalverteilung der Welch-t-Test, bei Verwerfung (der Normalverteilung) der Wilcoxon-Rangsummentest angewendet. Zur Darstellung des aktuellen Bodenzustands wurden alle vorhandenen Daten der Neuproben verwendet, und auf die verschiedenen Landnutzungsformen aufgegliedert.

Für den Vergleich von zeitlichen Änderungen wurden nur jene Daten von Profilstellen verwendet, bei denen die Landnutzung ident geblieben ist. Dies beruht auf dem Umstand, da sich bei Landnutzungsänderungen der organische Kohlenstoff und Gesamtstickstoff nur langsam auf ein neues Equilibrium einstellen (vgl. Gregory et al., 2016).

Die Nutzungsarten Weinbau und Spezialkulturen wurden dem Ackerland zugeordnet.

Der Bodenzustand wurde über die „Richtlinien für die sachgerechte Düngung im Ackerbau und Grünland - Anleitung zur Interpretation von Bodenuntersuchungsergebnissen in der Landwirtschaft.“ vom BMLFUW (2017) eingeordnet. Die Einteilungen von spezifischen Klassen sind im Gehaltsklassenanhang angeführt.

Ergebnisse des Bodenmonitoring

Aktueller Bodenzustand (2015-2020)

Ackerland

Tabelle 1: Bodenkennwerte für Neuproben im Ackerland (n = Anzahl der aktuell verfügbaren Daten)

Neuproben Ackerland	pH (n=204)	Karbonat g/kg (n=135*)	OC g/kg (n=153)	N g/kg (n=153)	C/N (n=153)	P_CAL mg/kg (n=145)	K_CAL mg/kg (n=135)	Si_CaCl2 mg/kg (n=337)	Si_NaOH mg/kg (n=205)
Min	3,5	0,7	8,0	0,9	7,9	3,9	24,7	4,3	104
Max	8,1	640	188	19,1	19,8	322	778	123	12338
Mittelwert	6,9	136	31,7	2,9	10,9	67,4	181	39,3	2571
Median	7,3	72,5	22,9	2,1	10,5	49,5	149	38,6	2469
Standard-abweichung	0,9	155	29,7	2,7	1,8	57,4	124	18,0	1403

* ... weitere 87 Standorte waren karbonatfrei.

24% der Ackerböden befinden sich in den sauren Bereichen, diese teilen sich in 3% stark sauer (< 4,2), 8% sauer (4,2 – 4,5) und 13% schwach sauer (4,6 – 5,5) auf. 22% haben eine neutrale Bodenreaktion (6,6 – 7,2). Über die Hälfte (54%) der untersuchten Böden weisen einen alkalischen pH-Wert (7,3 – 8) auf. Nur einer der Böden hat (mit 8,1) eine stark alkalische Bodenreaktion (> 8).

Die organischen Kohlenstoffgehalte werden in Österreich in drei verschiedene Klassen eingeteilt (Ackerland: Klasse A: < 11,6 g/kg; Klasse B: 11,6 – 26,1 g/kg; Klasse C: > 26,1 g/kg). Nur 5% der Ackerböden liegen in der niedrigsten und damit unterversorgten Klasse A. 57% liegen in Klasse B, und 37% in der höchsten Klasse C, und sind damit ausreichend versorgt.

Das C/N-Verhältnis ist ein Maß für die Mineralisierbarkeit der Biomasse, und der damit verbundenen Freisetzung von Stickstoff. Im Ackerbau sollte das Verhältnis bei circa 9 liegen, mit einer Bandbreite von 7,9 – 13,1 (vgl. BMLFUW, 2017, Daten von Arbeitskreis Ackerbau OÖ; BWSB). Der Anteil von 91% der Böden in diesem Bereich ist nahezu optimal. Die restlichen Böden weisen ein weiteres C/N-Verhältnis auf.

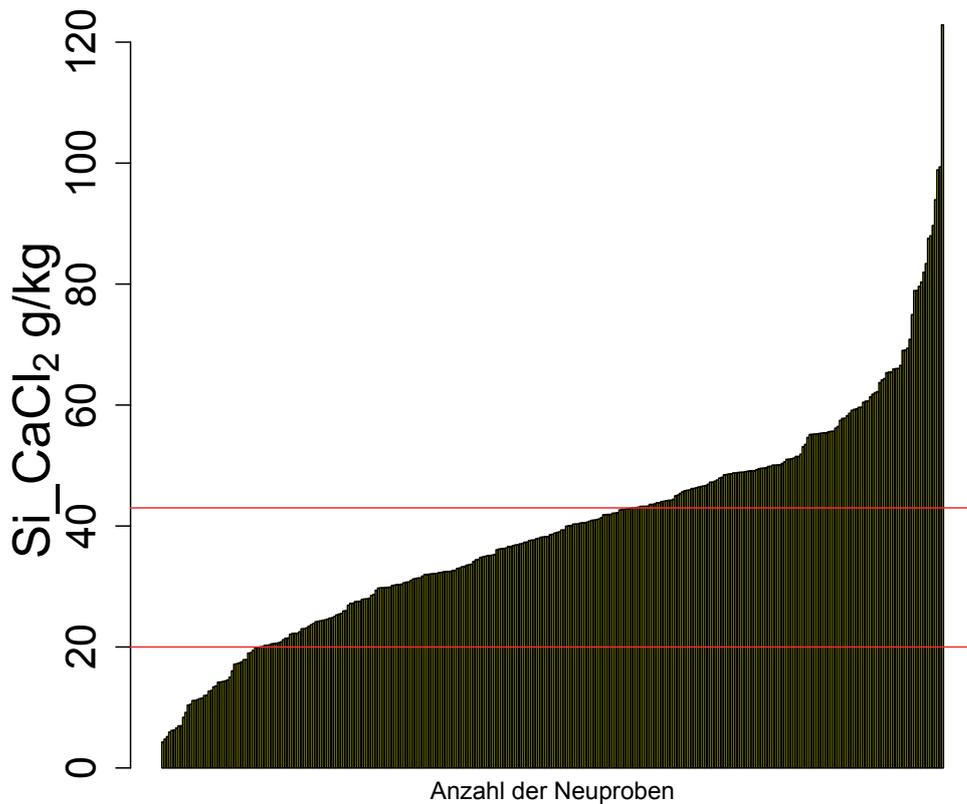
Die Verfügbarkeit von Phosphor zeigt ein differenziertes Bild. Nahezu 50% der untersuchten Böden befinden sich in den niedrig versorgten Bereichen (25% Klasse A: < 26 mg/kg; 23% Klasse B: 26 – 46 mg/kg), 32% sind ausreichend versorgt (Klasse C: 47 – 111 mg/kg), und 20% liegen in den höheren Bereichen (15%, Klasse D: 112 – 174 mg/kg; 5%, Klasse E: > 174 mg/kg).

Die Verfügbarkeit von Kalium hängt im Ackerland nicht nur von den pflanzenverfügbaren Werten ab. Es erfolgt eine weitere Einteilung in die Bodenschwere (Tongehalt), da Kalium an den Tonpartikel anhaftet, und damit im geringeren Maß pflanzenverfügbar ist. Die Einteilung nach der Bodenschwere wurde durchgeführt, um eine präzise Beurteilung der Kaliumverfügbarkeit im Ackerland zu gewährleisten.

Es zeigt sich, dass sich 38% in den niedrigen Bereichen (16% Klasse A: „leichte“ Böden (L): < 50 mg/kg; „mittlere“ Böden (M): < 66 mg/kg; „schwere“ Böden (S): < 83 mg/kg; 22%, Klasse B: (L): 50 – 87 mg/kg; (M): 66 – 112 mg/kg; (S): 83 – 137 mg/kg) befinden, 33% sind in Klasse C ausreichend ((L): 88 – 178 mg/kg; (M): 113 – 212 mg/kg; (S): 138 – 245 mg/kg) versorgt, und 29% liegen in den höher versorgten Bereichen (17% Klasse D: (L): 179 – 291 mg/kg; (M): 213 – 332 mg/kg; (S): 246 – 374 mg/kg; 12% Klasse E: (L): > 291 mg/kg; (M): > 332 mg/kg; (S): > 374 mg/kg).

Für das potentiell-pflanzenverfügbare Silizium gibt es für unsere Klimazone noch keine abgesicherten kritischen Werte, unter denen Ertragseinbußen an Kulturpflanzen eintreten. Haysom und Chapman (1975) bestimmten einen Wert von 20 mg/kg für Zuckerrohr, und Narayanaswamy und Prakash (2009) einen Wert von 43 mg/kg für Reis. Während nur 12% der Böden unter 20 mg/kg liegen, fallen für 43 mg/kg über 60% der Böden unter die kritische Grenze. Im Rahmen einer Masterarbeit wurden in unserer Arbeitsgruppe erst vor kurzem in einem Gefäßversuch kritische Werte für CaCl₂-extrahierbares Silizium für Roggen bestimmt. Je nach Trockenstressexposition und verwendetem Berechnungsmodell liegt dieser kritische Wert zwischen 25 und möglicherweise > 40 mg/kg (Jordan, 2020) und somit in etwa im Bereich der für subtropische und tropische Kulturpflanzen bekannten Werte.

In Abbildung 4 sind die potentiell-pflanzenverfügbaren Silizium-Gehalte der Ackerstandorte ersichtlich. Die beiden Grenzwerte (20 mg/kg und 43 mg/kg) der subtropischen und tropischen Kulturpflanzen wurden eingezeichnet.



Ackerland

Abbildung 4: Siliziumverfügbarkeit der Ackerstandorte in Niederösterreich. Grenzwert 20 mg/kg für Zuckerrohr (Haysom und Chapman, 1975) und 43 mg/kg für Reis (Narayanaswamy und Prakash, 2009) als rote Linien eingezeichnet (n=337)

Grünland

Tabelle 2: Bodenkennwerte für Neuproben im Grünland (n = Anzahl der aktuell verfügbaren Daten)

Neuproben Grünland	pH (n=173)	Karbonat g/kg (n=60*)	OC g/kg (n=130)	N g/kg (n=130)	C/N (n=130)	P_CAL mg/kg (n=176)	K_CAL mg/kg (n=156)	Si_CaCl2 mg/kg (n=265)	Si_NaOH mg/kg (n=173)
Min	3,2	0,8	12,7	1,5	8,2	2,2	17,1	3,7	86,5
Max	7,7	591	297	18,2	22,1	194	822	65,4	6688
Mittelwert	5,6	130	63,7	6,0	10,4	23,5	134	19,0	2211
Median	5,5	43,7	54,6	5,5	9,9	16,3	89,9	16,8	1957
Standardabweichung	1,2	171	36,9	2,9	1,8	28,6	129,5	9,5	1205

* ... weitere 135 Standorte waren karbonatfrei.

Der Großteil der Grünlandböden (69%) weist eine saure Bodenreaktion ($< 6,5$) auf, 27% zeigen einen neutralen pH-Wert ($6,6 - 7,2$), und etwa 4% liegen im alkalischen Bereich ($7,3 - 8$). Der Anteil im stark sauren Bereich ($< 4,6$) ist mit 26% sehr hoch. Jedoch liegt nur ein Standort unter einem pH-Wert von 4,2 und somit im Aluminium-Pufferbereich.

Die organischen Kohlenstoffgehalte liegen größtenteils im ausreichend bzw. gut versorgten Bereich (Klasse B: $26,1 - 52,2$ g/kg; Klasse C: $> 5,2$ g/kg), nur 5% befinden sich in Klasse A ($< 26,1$ g/kg) und sind somit als unterversorgt einzustufen.

Die C/N-Verhältnisse sollten im Grünland bei circa 10, mit einer Bandbreite von $8,2 - 15,6$, liegen (vgl. BMLFUW, 2017, Daten des Arbeitskreis Milchviehhaltung OÖ; BWSB). Nur drei von 130 Standorten liegen über diesem Bereich.

Die Pflanzenverfügbarkeit von Phosphor ist in vielen der untersuchten Grünlandböden stark limitiert. Es befinden sich 91% in den unterversorgten Klassen A (75%) und B (16%) (Klasse A: < 26 mg/kg; Klasse B: $26 - 46$ mg/kg). Dem ausreichend versorgten Bereich (Klasse C: $47 - 68$ mg/kg) sind nur 5% zuzuordnen, die übrigen 4% der Grünlandböden sind sehr gut versorgt (Klasse D: $69 - 174$ mg/kg und Klasse E: > 174 mg/kg). Drei der untersuchten Grünlandböden (2%) befinden sich in Klasse E.

Die Kaliumverfügbarkeit in den Grünlandböden ist günstiger einzustufen als die Phosphorverfügbarkeit, jedoch liegen auch hier 48% im unterversorgten Bereich der Klassen A (< 50 mg/kg) und B ($50 - 87$ mg/kg). In der Klasse A liegen 20%, in der Klasse B sind es 28%. In der ausreichend versorgten Klasse C ($88 - 170$ mg/kg) liegen 26%, gleichfalls wie in den hohen Bereichen (Klasse D: $69 - 174$ mg/kg; Klasse E: > 174 mg/kg). In der höchsten Gehaltsklasse E befinden sich immer noch 6% der untersuchten Grünlandböden.

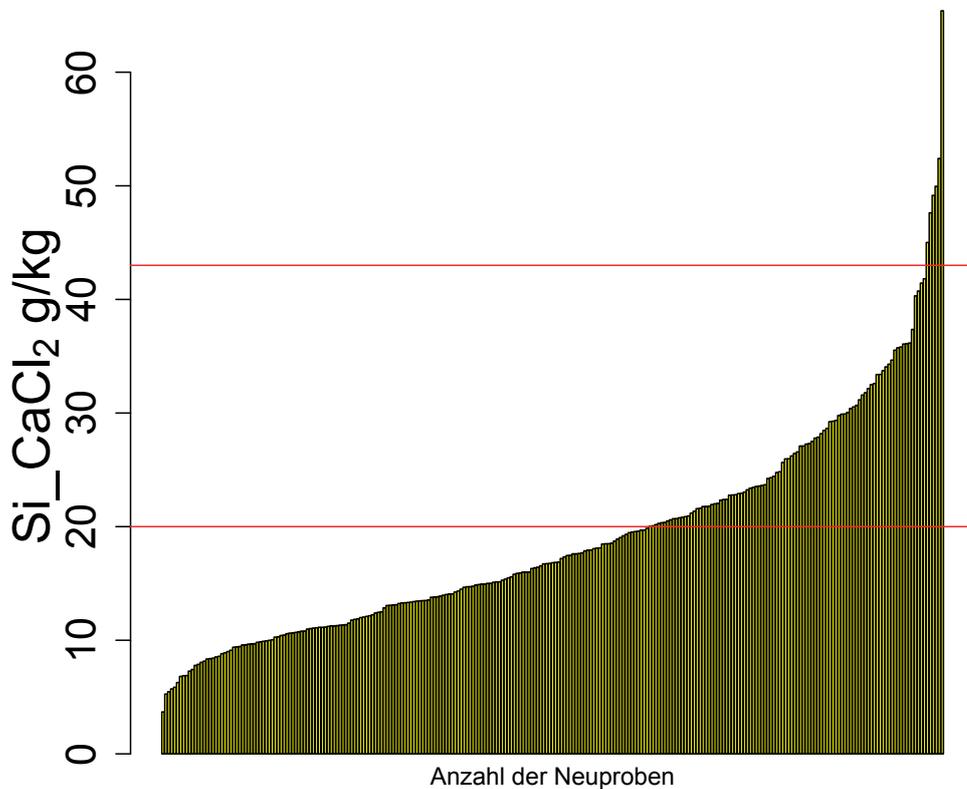
Die Siliziumversorgung der Grünlandböden ist sehr gering. Unterstellt man einen kritischen Wert von 20 mg/kg (Haysom und Chapman, 1975), sind 62% der untersuchten Böden als unterversorgt zu klassifizieren, bei einem kritischen Wert von 43 mg/kg (Narayanaswamy und Prakash, 2009) sind es sogar 98%. Eine abschließende Beurteilung ist jedoch nicht möglich, da für Grünland keine Informationen zu kritischen Werten der Siliziumversorgung von Böden verfügbar sind. Da viele grasartige Pflanzen jedoch zur Siliziumakkumulation neigen, ist es nicht unwahrscheinlich, dass Grünlandaufwuchs einen ähnlichen Siliziumbedarf wie viele Getreidearten hat. Da der erwähnte Gefäßversuch für Roggen (Jordan, 2020) eine ähnliche Bandbreite wie die der tropischen und subtropischen Grenzwerte hat, werden die Grenzwerte auch für das Grünland unterstellt.

In Abbildung 5 ist die Verteilung der Grünlandstandorte, und die unterstellten Grenzwerte für die Siliziumverfügbarkeit ersichtlich.

Eine Verbesserung der Siliziumversorgung könnte – gerade im Hinblick auf die zunehmenden Trockenperioden und die damit verbundenen Ernteausfälle – eine Strategie zur Klimawandelanpassung eröffnen.

Die Vorarbeiten (Coccuzza, 2017 und Schiefer, 2019) zeigen einen positiv signifikanten Zusammenhang zwischen pH-Wert und Siliziumverfügbarkeit, dies wird auch von weiterer Literatur (z.B.: Yanai et al., 2016) untermauert. Der organische Kohlenstoffgehalt zeigt in den Vorarbeiten (Coccuzza, 2017; Schiefer, 2019; Reiter, 2019) einen negativ signifikanten Zusammenhang zur Siliziumverfügbarkeit. Dies wurde über einen Verdünnungseffekt der

organischen Bodenbestandteile zur pflanzenverfügbaren Siliziumfraktion erklärt. Diese Ergebnisse (pH-Wert, organischer Kohlenstoff) liefern eine Erklärung für den großen Unterschied der Siliziumverfügbarkeit zwischen Grünland- und Ackerböden.



Grünland

Abbildung 5: Siliziumverfügbarkeit der Grünlandstandorte in Niederösterreich. Grenzwert 20 mg/kg für Zuckerrohr (Haysom und Chapman, 1975) und 43 mg/kg für Reis (Narayanaswamy und Prakash, 2009) als rote Linien eingezeichnet (n=265)

Monitoring von Bodenveränderungen im Zeitraum 1980/2000 – 2015/2020

Zum Vergleich von Bodenkennwerten, aus anderen Monitoringprojekten, werden hier Daten aus der ÖPUL-Evaluierung von 2010 (AGES, 2010a) angeführt. Bei dieser Untersuchung handelt es sich um eine Evaluierung von 1991 – 2009, in der vier Perioden untersucht wurden. Dabei werden Entwicklungen an Bodenkennwerten über ein großes Kontingent an Probenmaterial abgelesen, die von Landwirten aufgrund von ÖPUL-Vorgaben, oder zur Düngeplanung zugesendet werden. Die Standorte und deren Anzahl variieren deshalb in den unterschiedlichen Perioden.

Der Großteil der untersuchten Grünlandstandorte (mit gleichbleibender Landnutzung) befindet sich im Hauptproduktionsgebiet „Voralpen“, deswegen wird der Vergleich zu der ÖPUL-Evaluierung in dem Kapitel „Betrachtung der zeitlichen Änderungen von Bodenkennwerten in unterschiedlichen Regionen“ angeführt.

Zur Veranschaulichung der Unterschiede zwischen Acker- und Grünlandstandorte werden bei der Auswertung des gesamten Datenkollektivs auch die Grünlandstandorte angeführt. Im gesamten Datenmaterial des Grünlands befinden sich 59% Böden mit hydromorphen Merkmalen, im Hauptproduktionsgebiet „Voralpen“ 62%. Dies wird erwähnt, da Böden mit hydromorphen Merkmalen oft trotz gutem Nährstoffvorkommen eine geringe Nährstoffverfügbarkeit aufweisen (vgl. Blume et al., 2010).

Boden-pH

Tabelle 3: Direkter Vergleich für pH im Ackerland

Ackerland	pH	
	Altproben (n=194)	Neuproben (n=194)
Min	4,0	3,5
Max	8,1	8,1
Mittelwert	7,0	7,0
Median	7,4	7,3
Standard- abweichung	0,8	0,9

Tabelle 4: Direkter Vergleich für pH im Grünland

Grünland	pH	
	Altproben (n=150)	Neuproben (n=150)
Min	4,1	3,2
Max	7,8	7,6
Mittelwert	6,0	5,6
Median	5,9	5,5
Standard- abweichung	0,9	1,2

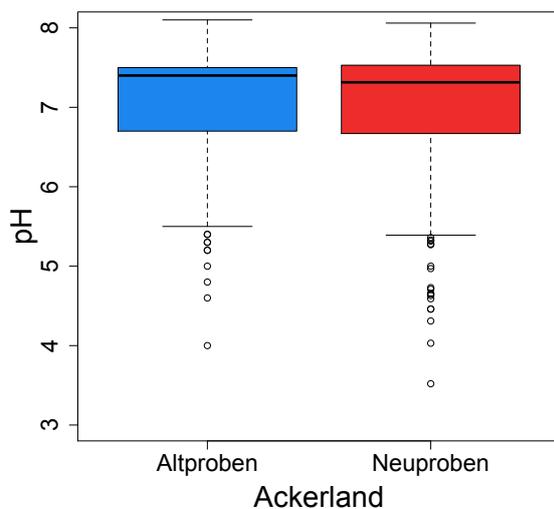


Abbildung 6: Direkter Vergleich für pH im Ackerland
($p=0,75$) ($n=194$)

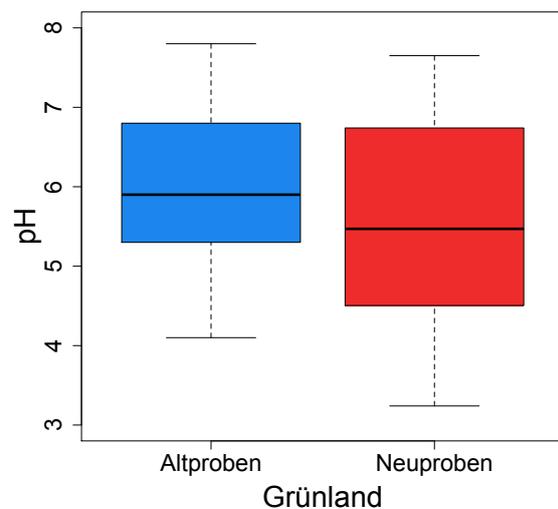


Abbildung 7: Direkter Vergleich für pH im Grünland
($p=1*10^{-3}$) ($n=150$)

Beim Vergleich der Altproben zu den Neuproben zeigt sich, dass es im Ackerland keine signifikanten Änderungen gegeben hat (Normalverteilung verworfen; Wilcoxon-Rangsummentest $p=0,75$). Der Großteil dieser Ackerstandorte befindet sich im Hauptproduktionsgebiet „Nordöstliches Flach- und Hügelland“ und im Hauptproduktionsgebiet „Voralpen“.

Bei der ÖPUL-Evaluierung 2010 (AGES, 2010a) des Ackerbaus, und des Hauptproduktionsgebiets „Nordöstliches Flach- und Hügelland“ blieb die Verteilung nach den Bodenreaktionen (stark sauer: $< 4,6$; sauer: $4,6 - 4,5$; schwach sauer: $5,6 - 6,5$; neutral: $6,6 - 7,2$; alkalisch und stark alkalisch $> 7,2$) stabil. Für das Hauptproduktionsgebiet „Voralpen“ liegen

keine Ergebnisse vor, hingegen für das angrenzende Hauptproduktionsgebiet „Alpenvorland“. In diesem wird eine geringe Tendenz zu mehr sauren Standorten festgestellt.

Die Ergebnisse aus der ÖPUL-Evaluierung decken sich gut mit den Ergebnissen dieser Untersuchung. In Abbildung 6 zeigt sich, dass der Boxplot der Neuproben (rot) annähernd den gleichen Bereich umfasst wie der Boxplot der Altproben (blau). Der rote Bereich, mit den „Antennen“ (Linien ausgehend vom Boxplot), dem Median, und den außen liegenden Ausreißern haben sich geringfügig nach unten verlagert. Betrachtet man ausschließlich die Ackerstandorte des Hauptproduktionsgebiets „Nordöstliches Flach- und Hügelland“ bleibt der Median des pH-Wertes stabil bei 7,4, was genau dem zeitlichen Verlauf der ÖPUL-Evaluierung 2010 entspricht.

Im Grünland hingegen hat eine signifikante Abnahme stattgefunden (Normalverteilung verworfen; Wilkoxon-Rangsummentest $p=1,04 \cdot 10^{-3}$). Es ist ersichtlich, dass sich der Boxplot (Abbildung 7) im unteren Bereich erweitert hat, sowie die Verlagerung des Median-Wertes nach unten. Der Medianwert liegt jedoch noch in einem guten Bereich.

Unter einem pH-Wert von 5 wird das Pflanzenwachstum vor allem durch gesteigerte Aluminiumtoxizität beeinflusst. Die Verfügbarkeit von Aluminium hat negative Auswirkungen auf das Wurzelwachstum, damit verbunden ist eine geringere Nährstoffaufnahme und erhöhtes Risiko von Wasserstress (vgl. AGES, 2010b). Dies ist in Bezug auf die zunehmenden Trockenperioden kritisch zu betrachten. Ein weiterer Effekt bei einem pH-Wert unter 5 ist das Einsetzen der Zerstörung von Tonmineralen, und dem Verlust ihrer Kationenaustauschkapazität (vgl. AGES, 2010a). Dies hat negative Auswirkungen auf die Bodenstruktur, und die Nährstoffverfügbarkeit. Eine Anhebung des pH-Wertes erhöht die Aktivität von Bodenmikroorganismen, verbessert die Bodenstruktur und somit auch den Wasserhaushalt (vgl. Blume et al., 2010).

Generelle Empfehlungen zur Erhöhung des pH-Wertes beziehen sich meist auf die Produktivität der Standorte. Es gibt jedoch auch säureliebende Pflanzen, die niedrige pH-Werte benötigen. Aus Sicht der Biodiversität sind deshalb auch solche Standorte erhaltungswürdig. Es ist immer wichtig den Zweck der landwirtschaftlichen Nutzfläche zu kennen, um Empfehlungen aussprechen zu können.

Gesamtstickstoff

Tabelle 5: Direkter Vergleich vom Gesamtstickstoff im Ackerland (n=119)

Ackerland	N g/kg	
	Altproben (n=119)	Neuproben (n=119)
Min	0,9	0,9
Max	17,3	15,9
Mittelwert	2,6	2,6
Median	2,0	2,1
Standardabweichung	1,8	1,8

Tabelle 6: Direkter Vergleich vom Gesamtstickstoff im Grünland (n=95)

Grünland	N g/kg	
	Altproben (n=95)	Neuproben (n=95)
Min	1,5	1,5
Max	61,7	16,4
Mittelwert	5,6	6
Median	4,1	5,5
Standardabweichung	6,7	2,8

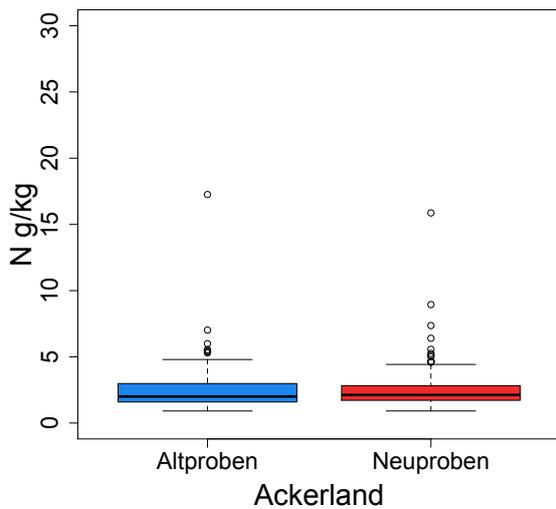


Abbildung 8: Direkter Vergleich vom Gesamtstickstoff im Ackerland ($p=0,59$) ($n=119$)

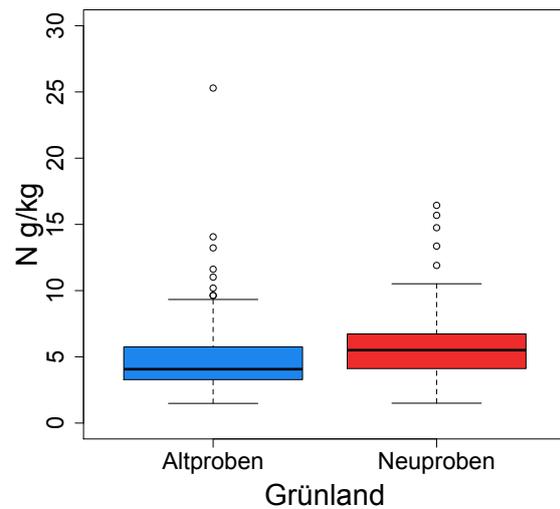


Abbildung 9: Direkter Vergleich vom Gesamtstickstoff im Grünland ($p=6,3 \cdot 10^{-4}$) ($n=95$)

Für das Ackerland konnten keine signifikanten Änderungen gezeigt werden (Normalverteilung verworfen; Wilkoxon-Rangsummentest $p=0,59$), auch der Median, und der Mittelwert blieben stabil. Durch die Nitrat-Aktions-Verordnung in Österreich herrscht Aufzeichnungspflicht für die Ausbringung von stickstoffhaltigen Düngemitteln (vgl. BMLRT). Im Internet ist auch ein kostenloser Düngerrechner verfügbar (LKO). Die Stabilität dieses Bodenkennwertes im Ackerbau zeigt eine gute Düngepraxis, in Bezug auf Stickstoff.

Im Grünland stiegen die Werte dagegen signifikant (Normalverteilung verworfen; Wilkoxon-Rangsummentest $p=6,3 \cdot 10^{-4}$). Eine gesamte Verschiebung des Boxplots ist in Abbildung 7 ersichtlich. Der Maximalwert von 61,7 g/kg ist in der Darstellung nicht mehr ersichtlich, dieser liegt weit außerhalb des Diagrammbereichs.

Die Erhöhung des Gesamtstickstoffs kann über die nachfolgende Betrachtung der organischen Kohlenstoffgehalte erklärt werden. Diese sind im Betrachtungszeitraum signifikant (Median um 45%) gestiegen. Stickstoff ist zum größten Anteil in der organischen Biomasse gebunden (vgl. Blume et al., 2010).

Organischer Kohlenstoff

Tabelle 7: Direkter Vergleich vom organischen Kohlenstoff im Ackerland ($n=119$)

Ackerland	organischer Kohlenstoff g/kg	
	Altproben ($n=119$)	Neuproben ($n=119$)
Min	4,5	8,0
Max	187	185
Mittelwert	26,0	28,9
Median	20,5	22,9
Standard- abweichung	20,3	22,3

Tabelle 8: Direkter Vergleich vom organischen Kohlenstoff im Grünland ($n=95$)

Grünland	organischer Kohlenstoff g/kg	
	Altproben ($n=95$)	Neuproben ($n=95$)
Min	14,8	12,7
Max	331	172
Mittelwert	54,9	62,0
Median	37,8	54,9
Standard- abweichung	49,9	31,9

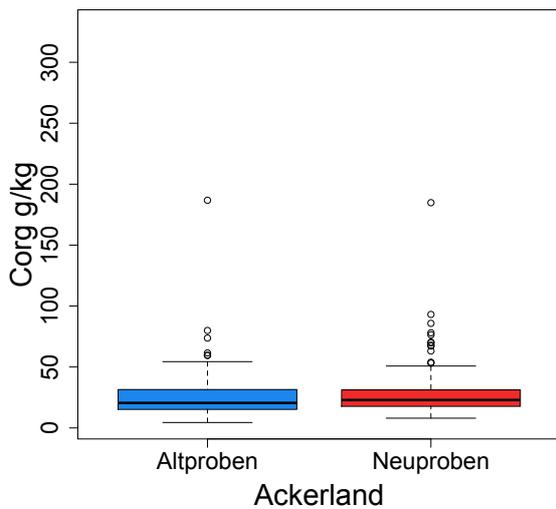


Abbildung 10: Direkter Vergleich vom organischen Kohlenstoff im Ackerland ($p=0,13$) ($n=119$)

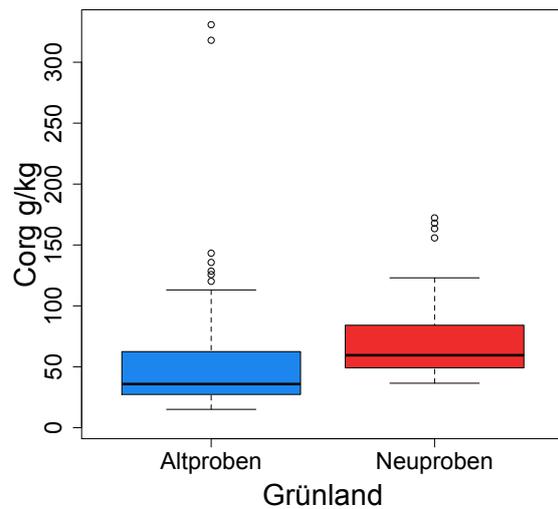


Abbildung 11: Direkter Vergleich vom organischen Kohlenstoff im Grünland ($p=3,6 \cdot 10^{-4}$) ($n=95$)

Für das Ackerland zeigen sich keine signifikanten Änderungen (Normalverteilung verworfen; Wilkoxon-Rangsummentest $p=0,13$), jedoch ist in der Abbildung 10 ersichtlich, dass sich bei den Neuproben eine größere Anzahl an Ausreißern über der Box befindet. Gleichfalls verschob sich die Box leicht nach oben, und der Median erhöhte sich um 12%.

Der Vergleich mit AGES (2010a) erfolgt in der nachfolgenden Betrachtung von zeitlichen Änderungen von Bodenkennwerten in unterschiedlichen Regionen, da sich von den 119 Ackerstandorten an den organische Kohlenstoffgehalte verfügbar sind 104 im Hauptproduktionsgebiet „Nordöstliches Flach- und Hügelland“ befinden.

Wie bei der Betrachtung des Gesamtstickstoffs schon angeführt, fand im Grünland eine signifikante Zunahme (Normalverteilung verworfen; Wilkoxon-Rangsummentest $p=3,6 \cdot 10^{-4}$) statt. Der Medianwert ist um 45% gestiegen. Die starke Zunahme an diesen Standorten deutet auf eine Extensivierung hin. Durch den geringeren Entzug der Biomasse kommt es zu einer Erhöhung der organischen Kohlenstoffgehalte.

Die beiden Maximalwerte der Altproben (im Grünland) des organischen Kohlenstoffs, wie des Gesamtstickstoffs sind durch Niedermoor-Standorte bedingt (205001, 196023). Bei der erneuten Beprobung wurde eine weitgehende Vererdung festgestellt. Dies zeigt sich auch in den Analysen der Neuproben. Die organischen Kohlenstoffgehalte dieser Standorte verringerten sich von > 300 g/kg auf ca. 60 g/kg, auch die Gesamtstickstoffgehalte nahmen um das 5- bzw. 9-fache ab.

Diese Änderung lässt sich durch (wahrscheinliche) Entwässerungsmaßnahmen erklären. Durch der Änderung des Wasserhaushaltes kommt es zu einer vermehrten Umsetzung von Kohlenstoff, und damit auch zu einer Änderung des Gesamtstickstoffs (vgl. Blume et al., 2010). Diese beiden Profilstellen verdeutlichen die Relevanz des Wasserhaushalts für Bodencharakteristika.

Die Vorteile guter organischer Kohlenstoffgehalte wurden in der Einleitung kurz besprochen.

C/N-Verhältnis

Tabelle 9: Direkter Vergleich vom C/N-Verhältnis im Ackerland (n=119)

Ackerland	C/N	
	Altproben (n=119)	Neuproben (n=119)
Min	3,8	8,1
Max	18,7	19,8
Mittelwert	10,0	10,8
Median	10,0	10,5
Standardabweichung	1,9	1,6

Tabelle 10: Direkter Vergleich vom C/N-Verhältnis im Grünland (n=95)

Grünland	C/N	
	Altproben (n=95)	Neuproben (n=95)
Min	5,2	8,2
Max	38,0	15,7
Mittelwert	10,3	10,3
Median	9,2	9,9
Standardabweichung	4,1	1,5

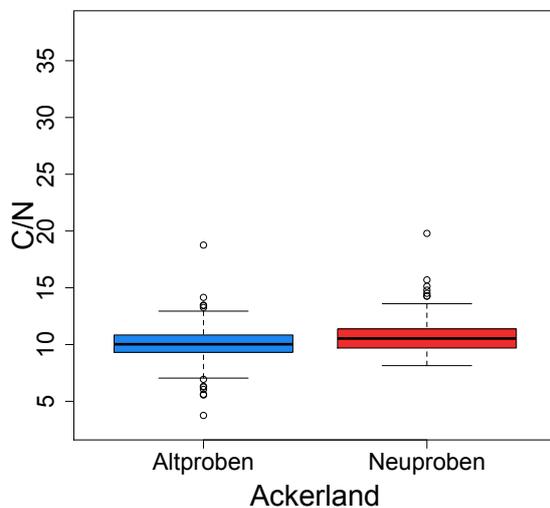


Abbildung 12: Direkter Vergleich vom C/N-Verhältnis im Ackerland ($p=1,3 \cdot 10^{-3}$) (n=119)

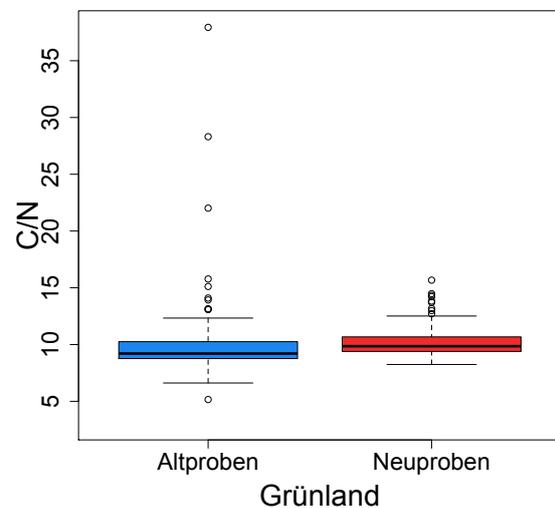


Abbildung 13: Direkter Vergleich vom C/N-Verhältnis im Grünland ($p=4,4 \cdot 10^{-4}$) (n=95)

Das C/N-Verhältnis spiegelt die Ergebnisse aus den separaten Betrachtungen (gleicher Datenbestand) des organischen Kohlenstoffs und des Gesamtstickstoffs wider.

Die (nicht signifikanten) Änderungen des organischen Kohlenstoffgehalts im Ackerbau führen jedoch schon zu einer signifikanten Änderung (Normalverteilung verworfen; Wilcoxon-Rangsummentest $p=1,3 \cdot 10^{-3}$) beim C/N-Verhältnis.

Im Grünland hat sich durch den starken Anstieg des organischen Kohlenstoffs, trotz Zunahme des Gesamtstickstoffs, auch das C/N-Verhältnis signifikant erweitert (Normalverteilung verworfen; Wilcoxon-Rangsummentest $p=4,4 \cdot 10^{-4}$) (Tabelle 10).

Verfügbare Phosphor

Im Ackerbau sind die Werte für den verfügbaren Phosphor gesunken. Die Änderung liegt knapp über der statistischen Signifikanzgrenze (Normalverteilung verworfen; Wilcoxon-Rangsummentest $p=5,2 \cdot 10^{-2}$), wobei Boxplot und Median deutlich niedriger liegen als bei der Erstuntersuchung. Die Werte sind in Tabelle 12 und 13 angeführt.

Tabelle 11: Direkter Vergleich vom verfügbaren Phosphor im Ackerland (n=110)

Ackerland	P_CAL mg/kg	
	Altproben (n=110)	Neuproben (n=110)
Min	3,2	3,9
Max	378	322
Mittelwert	80,4	68,6
Median	65,3	49,4
Standardabweichung	65,1	58,8

Tabelle 12: Direkter Vergleich vom verfügbaren Phosphor im Grünland (n=100)

Grünland	P_CAL mg/kg	
	Altproben (n=100)	Neuproben (n=100)
Min	0,7	3,4
Max	85,0	194
Mittelwert	19,5	22,0
Median	14,5	15,8
Standardabweichung	15,5	27,6

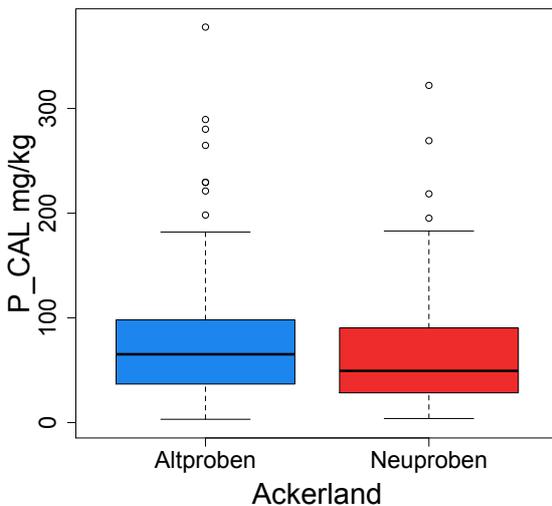


Abbildung 14: Direkter Vergleich vom verfügbaren Phosphor im Ackerland ($p=5,2 \cdot 10^{-2}$) (n=110)

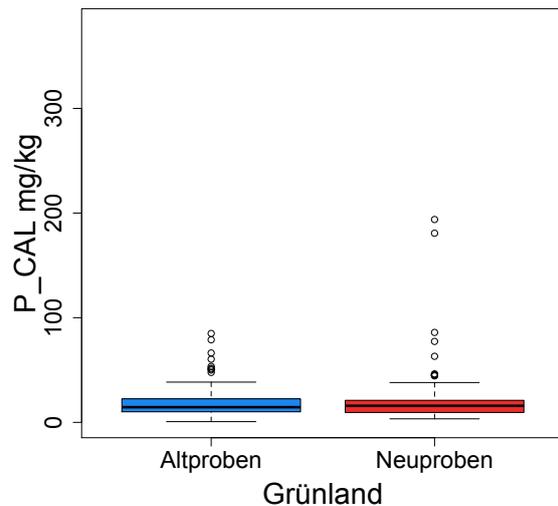


Abbildung 15: Direkter Vergleich vom verfügbaren Phosphor im Grünland ($p=0,95$) (n=100)

Von den 110 Ackerstandorten befinden sich 94 im Hauptproduktionsgebiet „Nordöstliches Hügel- und Flachland“. Um einen direkten Vergleich mit der ÖPUL-Evaluierung von 2010 zu ermöglichen, werden diese gesondert betrachtet. In Tabelle 14 und 15 sind die prozentuellen Anteile der Gehaltsklassen dieser Untersuchung und der ÖPUL-Evaluierung ersichtlich.

Tabelle 13: Anteile in % der P-Gehaltsstufen auf Ackerland der landwirtschaftlichen Bodenkartierung 1980-2000/2015-2020, im Hauptproduktionsgebiet „Nordöstliches Flach- und Hügelland“ (HPG 8)

	P_CAL				
	A (< 26*)	B (26-46*)	C (47-68*)	D (69-174*)	E (> 174*)
Nordöstl. Flach- und Hügelland	8/20	19/23	19/18	41/28	9/5

* mg/kg

Tabelle 14: Anteile in % der P-Gehaltsstufen auf Ackerland der ÖPUL-Evaluierung 200-2005/2006 -2010, im Hauptproduktionsgebiet „Nordöstliches Flach- und Hügelland“ (HPG 8) (Quelle: AGES, 2010a)

	P_CAL				
	A (< 26*)	B (26-46*)	C (47-68*)	D (69-174*)	E (> 174*)
Nordöstl. Flach- und Hügelland	3/5	12/15	60/60	19/15	6/5

* mg/kg

Die zeitlichen Verläufe der beiden Bodenmonitoringprojekte haben vergleichbare Tendenzen. Die Anzahl der unterversorgten Klassen A und B nehmen zu, während die Anzahl der überversorgten Klassen D und E abnehmen, und der Anteil im ausreichend versorgten Bereich C annähernd stabil ist.

Die ÖPUL-Evaluierung (AGES, 2010a) zeigt einen größeren Anteil in der Klasse C, und ein balancierteres Verhältnis zwischen dem unterversorgten und überversorgten Bereich als diese Untersuchung.

Der Rückgang des überversorgten Bereichs der Ackerstandorte dieser Untersuchung (landwirtschaftliche Bodenkartierung) ist als positiv zu bewerten, da dadurch die Gefahr von Eutrophierung (Nährstoffaustrag) in umgebende Naturräume vermindert wird. Phosphor ist stark an den Bodenpartikeln gebunden (vgl. Williams, 1950; Tomar, 2000), deswegen erfolgt eine Nährstoffverfrachtung aus den landwirtschaftlichen Nutzflächen in umliegende Gebiete über Wasser- und Winderosion. Maßnahmen, um die Erosion von landwirtschaftlichen Böden zu verhindern sichern somit nicht nur die Ertragsfähigkeit der Kulturflächen, sondern schützen auch die Umwelt.

Im Grünland wurde keine signifikanten Änderungen festgestellt (Normalverteilung verworfen; Wilcoxon-Rangsummentest $p=0,95$). Bei einzelnen Standorten fällt eine Steigerung der Werte auf. Die Werte in dieser Arbeit liegen sehr niedrig. Der Median der Altproben, sowie der Neuproben liegt in der untersten Gehaltsklasse A. Verschiedene Arbeiten beschäftigen sich mit den niedrigen Phosphorgehalten im österreichischen Grünland (z.B. Bohner et al., 2012; Gerzabek et al., (2004); Pötsch und Baumgarten, 2010). Bohner et al., (2012) verweisen auf Arbeiten von Heinzlmaier et al. (2005), Bohner und Eder (2006), sowie Bohner und Schink (2007) in denen in österreichischen Naturräumen der Großteil der untersuchten Grünlandböden der untersten Gehaltsklasse A zuzuordnen waren. Nach Gerzabek et al. (2004) zeigen österreichische Grünlandböden tendenziell eine Unterversorgung mit Phosphor.

Eine weitere Relativierung der niedrigen Phosphorgehalte im Grünland wird durch den Umstand belegt, dass in humusreichen Grünlandböden der organisch gebundene Phosphor eine wesentliche potentielle Phosphor-Quelle für die Grünlandvegetation darstellt (vgl. Bohner und Rohrer, 2013). Dieser wird über mikrobiellen Abbau der organischen Substanz, bzw. durch enzymatische Reaktionen pflanzenverfügbar gemacht (vgl. ebd, 2013).

Verfügbares Kalium

Tabelle 15: Direkter Vergleich vom verfügbaren Kalium im Ackerland (n=106)

Ackerland	K_CAL mg/kg	
	Altproben (n=106)	Neuproben (n=106)
Min	7,8	24,7
Max	576	778
Mittelwert	181	189
Median	151	153
Standardabweichung	127	128

Tabelle 16: Direkter Vergleich vom verfügbaren Kalium im Grünland (n=98)

Grünland	K_CAL mg/kg	
	Altproben (n=98)	Neuproben (n=98)
Min	8,0	17,1
Max	392	657
Mittelwert	38,0	123
Median	21,8	82,0
Standardabweichung	51,7	115

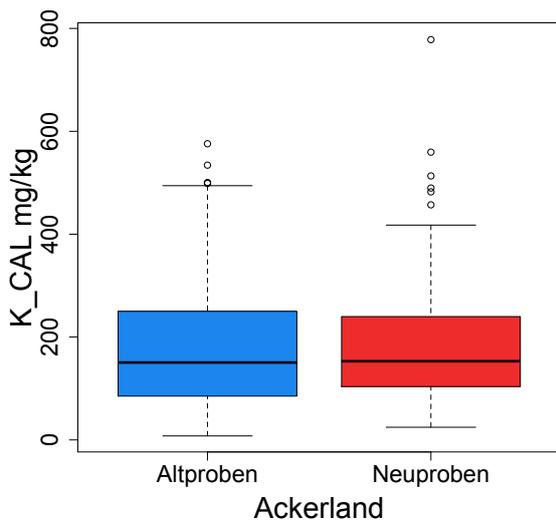


Abbildung 16: Direkter Vergleich vom verfügbaren Kalium im Ackerland ($p=0,42$) ($n=106$)

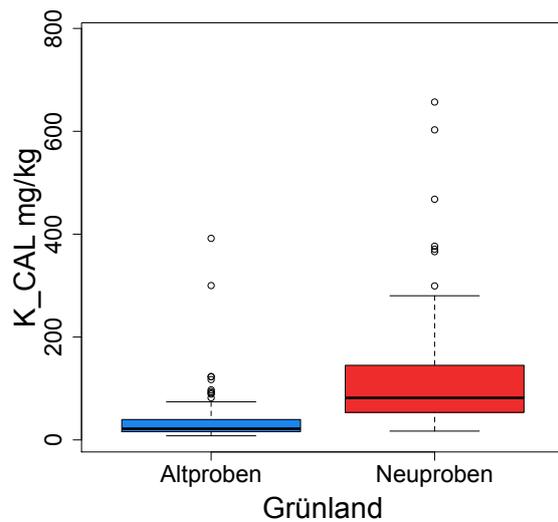


Abbildung 17: Direkter Vergleich vom verfügbaren Kalium im Grünland ($p < 2,2 \cdot 10^{-16}$) ($n=98$)

Die verfügbaren Kaliumgehalte im Ackerland sind weitgehend stabil (Normalverteilung verworfen; Wilcoxon-Rangsummentest $p=0,42$). Es zeigt sich nur eine geringfügige Verkleinerung des Bereichs des roten Boxplots (Abbildung 16).

91 der 106 Ackerlandstandorte befinden sich im Hauptproduktionsgebiet „Nordöstliches Hügel- und Flachland“. Um die Daten direkt mit den Ergebnissen der AGES (2010a) zu vergleichen, werden die prozentuellen Anteile des Hauptproduktionsgebiets „Nordöstliches Hügel- und Flachland“ in den Gehaltsklassen gesondert angeführt. Die Einstufung in den Gehaltsklassen erfolgte unter Berücksichtigung der Bodenschwere (Tongehalt). Die Ergebnisse dieser Untersuchung und der AGES (2010a) sind in den nachfolgenden Tabellen 18 und 19 angeführt.

Tabelle 17: Anteile in % der K-Gehaltsstufen auf Ackerland der landwirtschaftlichen Bodenkartierung 1980-2000/2015-2020, im Hauptproduktionsgebiet „Nordöstliches Flach- und Hügelland“ (HPG8)

	K_CAL				
	A*	B*	C*	D*	E*
Nordöstl. Flach- und Hügelland	11/10	26/23	31/34	19/20	13/13

* Einteilung nach Tongehalt, die genauen Werte sind im Gehaltsklassenanhang angeführt.

Tabelle 18: Anteile in % der K-Gehaltsstufen auf Ackerland der ÖPUL-Evaluierung 200-2005/2006 -2010, im Hauptproduktionsgebiet „Nordöstliches Flach- und Hügelland“ (HPG 8) (Quelle: AGES, 2010a)

	K_CAL				
	A*	B*	C*	D*	E*
Nordöstl. Flach- und Hügelland	2/2	13/12	50/50	28/28	7/8

* Einteilung nach Tongehalt, die genauen Werte sind im Gehaltsklassenanhang angeführt.

Die Ergebnisse der AGES (2010a) zeigen stabile zeitliche Verläufe auf Ackerstandorten innerhalb der Gehaltsklassen im Hauptproduktionsgebiet „Nordöstliches Hügel- und Flachland“.

Dies lässt sich gut mit dieser Untersuchung vergleichen. Wie in der Tabelle 18 ersichtlich trat nur eine geringe Verbesserung in den unterversorgten Klassen A und B, dem ausreichend versorgten Bereich C und eine geringfügige Reduktion in den überversorgten Klassen D und E ein.

Die Werte im Grünland haben sich stark signifikant erhöht (Normalverteilung verworfen; Wilkoxon-Rangsummentest $p < 2,2 \cdot 10^{-16}$). Der Median liegt jedoch immer noch im niedrigen Bereich (Klasse A und B) $< 87 \text{ mg/kg}$, weswegen weiterer Handlungsbedarf besteht.

Wie in der Einleitung erwähnt, hat die Kaliumverfügbarkeit Auswirkungen auf die Trockenresistenz der Pflanzen (vgl. Zörb et al., 2014). Gerade bei zunehmenden Trockenperioden kann eine ausreichende Kaliumversorgung zu einer erhöhten Ertragsicherheit führen.

Verfügbare Siliziumfraktion

Tabelle 19: Direkter Vergleich der verfügbaren Siliziumfraktion im Ackerland (n=214)

Ackerland	Si_CaCl ₂ - mg/kg	
	Altproben (n=214)	Neuproben (n=214)
Min	3,8	4,3
Max	110	123
Mittelwert	38,6	33,1
Median	38,7	39,7
Standardabweichung	16,2	18,3

Tabelle 20: Direkter Vergleich der verfügbaren Siliziumfraktion im Grünland (n=155)

Grünland	Si_CaCl ₂ - mg/kg	
	Altproben (n=155)	Neuproben (n=155)
Min	3,0	3,7
Max	44,0	49,2
Mittelwert	16,9	17,7
Median	14,7	15,6
Standardabweichung	9,9	8,5

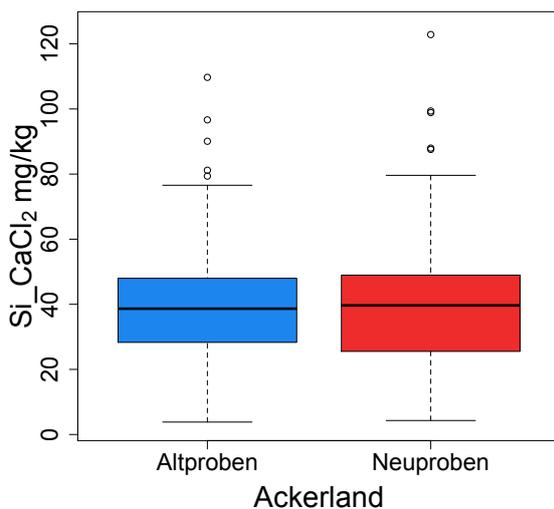


Abbildung 18: Direkter Vergleich der verfügbaren Siliziumfraktion im Ackerland ($p=0,98$) (n=214)

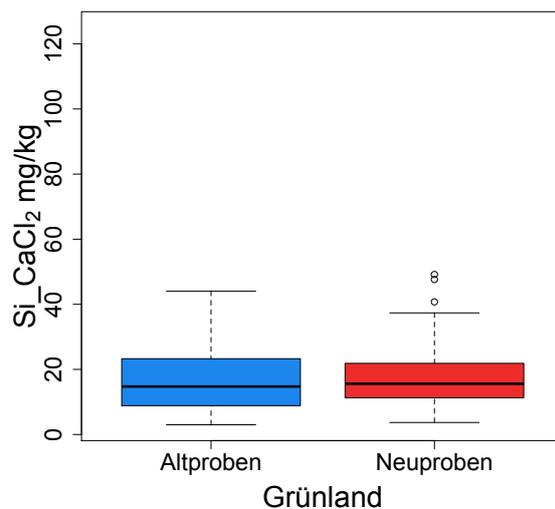


Abbildung 19: Direkter Vergleich der verfügbaren Siliziumfraktion im Grünland ($p=0,13$) (n=155)

Die verfügbare Siliziumfraktion zeigt weder im Ackerland (Normalverteilung verworfen; Wilcoxon-Rangsummentest $p=0,98$) noch im Grünland (Normalverteilung verworfen; Wilcoxon-Rangsummentest $p=0,13$) signifikante Änderungen. Der Mittelwert, als auch der Median, haben sich über den Beobachtungszeitraum nicht wesentlich verändert. Die Abnahme des Mittelwerts bei nahezu identischem Median im Ackerland zeigt sich in der Vergrößerung des roten Boxplots in Abbildung 18.

Amorphe Siliziumfraktion

Tabelle 21: Direkter Vergleich der amorphen Siliziumfraktion im Ackerland (n=194)

Ackerland	Si_NaOH mg/kg	
	Altproben (n=194)	Neuproben (n=194)
Min	142	155
Max	9666	12338
Mittelwert	2613	2622
Median	2382	2479
Standardabweichung	1502	1388

Tabelle 22: Direkter Vergleich der amorphen Siliziumfraktion im Grünland (n=144)

Grünland	Si_NaOH mg/kg	
	Altproben (n=144)	Neuproben (n=144)
Min	200	86,5
Max	13041	6688
Mittelwert	2702	2235
Median	2290	1982
Standardabweichung	1772	1246

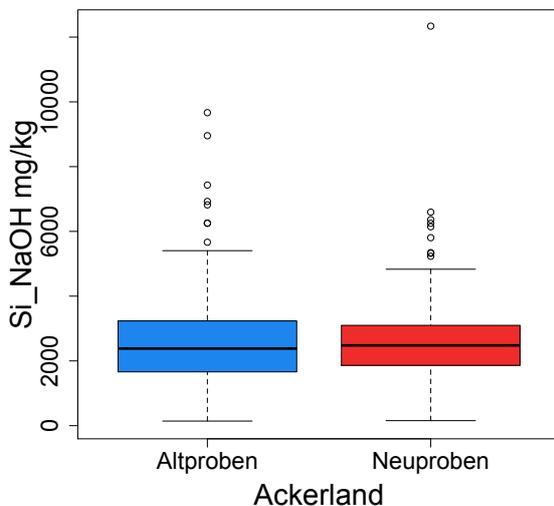


Abbildung 20: Direkter Vergleich der amorphen Siliziumfraktion im Ackerland ($p=0,47$) (n=194)

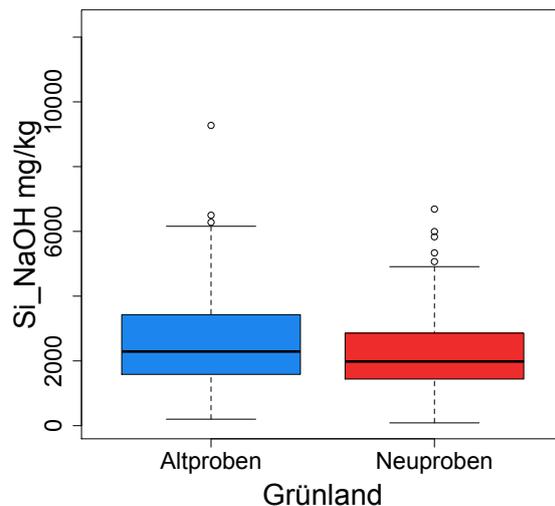


Abbildung 21: Direkter Vergleich der amorphen Siliziumfraktion im Grünland ($p=2,5 \cdot 10^{-2}$) (n=144)

Im Ackerland fanden keine signifikanten Änderungen statt (Normalverteilung verworfen; Wilcoxon-Rangsummentest $p=0,47$), die Spannweite der Gehalte wurde geringer. Der Median und Mittelwert sind nahezu ident.

Im Grünland fielen die Werte leicht signifikant ab (Normalverteilung verworfen; Wilcoxon-Rangsummentest $p=2,5 \cdot 10^{-2}$), dies ist in Abbildung 21 anhand der Größe des roten Boxplots, und an den Ausreißern schön ersichtlich.

Betrachtung der zeitlichen Änderungen von Bodenkennwerten in unterschiedlichen Regionen

Entwicklung der organischen Kohlenstoffgehalte auf Ackerland im Hauptproduktionsgebiet „Nordöstliches Flach- und Hügelland“ (HPG 8)

Tabelle 23: Entwicklung der organischen Kohlenstoffgehalte auf Ackerland im Hauptproduktionsgebiet „Nordöstliches Flach- und Hügelland“ (HPG 8) (n=104)

Ackerland (n=104)	organischer Kohlenstoff g/kg	
	Altproben (n=104)	Neuproben(n=104)
Min	4,5	8
Max	187	185
Mittelwert	25,6	29,6
Median	19,5	22,4
Standardabweichung	21,1	23,3

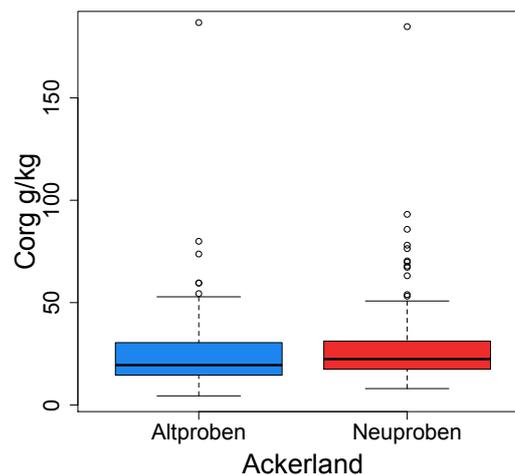


Abbildung 22: Entwicklung der organischen Kohlenstoffgehalte auf Ackerland im Hauptproduktionsgebiet „Nordöstliches Flach- und Hügelland“ (HPG 8) (n=104)

Die Steigerung der organischen Kohlenstoffgehalte liegt knapp über der Signifikanzgrenze (Normalverteilung verworfen; Wilcoxon-Rangsummentest $p=0,06$). Der Median ist um 15% gestiegen. Der Anteil von 8% in der Klasse A verringerte sich um die Hälfte.

Die Betrachtung des Hauptproduktionsgebiet 8 wurde gewählt, da auch eine Auswertung von zeitlichen Änderungen der AGES (2010a) vorliegt. Bei dieser Evaluierung stieg der Median der organischen Kohlenstoffgehalte von 15 auf 17 g/kg (13%), und der Anteil von 20 Standorten im niedrigen Bereich wurde halbiert.

Die Ergebnisse beider Untersuchungen haben dieselben Tendenzen. Der Median des organischen Kohlenstoffgehalts der AGES (2010a) liegt in den gesamten Perioden unter den Werten dieser Untersuchung.

Die Vorarbeit von Reiter (2019) zeigt eine signifikante Steigerung im Hauptproduktionsgebiet „Nordöstliches Hügelland- und Flachland“. Diese Arbeit verglich die organischen Kohlenstoffgehalte der Neuproben jedoch mit errechneten organischen Kohlenstoffgehalten

der Altproben. Von den insgesamt 101 Profilstellen wurden bisher an 82 Altproben die organischen Kohlenstoffgehalte gemessen. Der Vergleich der errechneten und analysierten organischen Kohlenstoffgehalte zeigt deutliche Unterschiede. Der Medianwert der errechneten organischen Kohlenstoffgehalte (der Altproben) liegt bei 16,7 g/kg. Der Medianwert der analysierten organischen Kohlenstoffgehalte (der Altproben) liegt bei 19,7 g/kg, und damit im Bereich der in der Tabelle 24 angeführten Werte. Auch die statistische Betrachtung der 82 Neuproben von Reiter liegt mit einem Median von 22,9 g/kg in diesem Bereich. Die Unterschiede der errechneten und analysierten organischen Kohlenstoffgehalte verdeutlichen die Wichtigkeit von gleichen chemischen Methoden (die organischen Kohlenstoffgehalte der Altproben wurden über eine andere Methode ermittelt) beim Vergleich von Daten. Der Unterschied zwischen errechnet und analysiert (in den Altproben) liegt höher als die Steigerung der organischen Kohlenstoffgehalte von Alt- zu Neuproben.

Entwicklung der Nährstoffe auf Ackerland in den Kleinproduktionsgebieten „Wiener Boden“ und „Baden-Gumpoldskirchener Gebiet“ (KPG 809 – 810)

Tabelle 24: Bodenkennwerte der Altproben der Ackerflächen in den Kleinproduktionsgebieten „Wiener Boden“ und „Baden-Gumpoldskirchener Gebiet“ (KPG 809 – 810) (n = Anzahl der aktuell verfügbaren Daten)

Ackerland – Altproben	pH (n=57)	OC g/kg (n=36)	N g/kg (n=36)	C/N (n=36)	Si_CaCl2 mg/kg (n=65)	Si_NaOH mg/kg (n=57)	P_CAL mg/kg (n=38)	K_CAL mg/kg (n=36)
Min	6,8	10,6	1,1	7,1	6,4	142	2,4	7,8
Max	8,0	187	17,3	14,2	56,4	9666	378	576
Mittelwert	7,5	40,0	3,7	10,7	33,7	1985	101	211
Median	7,5	34,2	3,1	10,6	34,3	1560	75,9	170
Standardabweichung	0,2	28,9	2,7	1,5	11,5	1376	78,2	147

Tabelle 25: Bodenkennwerte der Neuproben der Ackerflächen in den Kleinproduktionsgebieten „Wiener Boden“ und „Baden-Gumpoldskirchener Gebiet“ (KPG 809 – 810) (n = Anzahl der aktuell verfügbaren Daten)

Ackerland – Neuproben	pH (n=57)	OC g/kg (n=36)	N g/kg (n=36)	C/N (n=36)	Si_CaCl2 mg/kg (n=65)	Si_NaOH mg/kg (n=57)	P_CAL mg/kg (n=38)	K_CAL mg/kg (n=36)
Min	6,2	12,8	1,4	8,6	5,9	155	12,7	32,2
Max	7,9	185	15,9	19,8	64,4	4463	322	778
Mittelwert	7,5	48,5	4,1	11,7	33,1	1560	79,8	230
Median	7,5	39,5	3,4	11,5	32,4	1846	53,0	156
Standardabweichung	0,3	31,2	2,6	2,3	12,6	1156	66,8	156

Der pH-Wert zeigt sich konstant über den Untersuchungszeitraum (Normalverteilung verworfen; Wilkoxon-Rangsummentest $p=0,29$), der Median und der Mittelwert zeigen keine Veränderungen über die zwei Untersuchungsperioden. Bei der Erstprobenahme befanden sich alle Böden im Karbonat-Pufferbereich ($> 6,5$). In der zweiten Periode liegen zwei Standorte im schwach sauren Bereich ($5,6 - 6,5$). Dieser wird auch als optimal betrachtet für den Ackerbau.

Der organische Kohlenstoffgehalt hat sich leicht (nicht signifikant) erhöht (Normalverteilung verworfen; Wilkoxon-Rangsummentest $p=0,12$), der Median ist um 15% gestiegen. Befanden sich bei den Altproben noch zwei Standorte in der niedrigsten Klasse A ($< 11,6$ g/kg), so befinden sich nun alle Standorte in den ausreichend und gut versorgten Klassen B ($11,6 - 26,1$ g/kg) und C ($> 26,1$ g/kg)

Der Gesamtstickstoff zeigt keine signifikanten Änderungen (Normalverteilung verworfen; Wilkoxon-Rangsummentest $p=0,25$).

Das C/N-Verhältnis hat sich leicht (nicht signifikant) nach oben verschoben (Normalverteilung verworfen; Wilkoxon-Rangsummentest $p=0,11$). Waren in der ersten Periode noch zwei Standorte unter der anzustrebenden Bandbreite ($7,9 - 13,1$ (vgl. BMLFUW, 2017; Daten von Arbeitskreis Ackerbau OÖ; BWSB)), und drei darüber, so sind nun 8 Standorte über diesen Bereich. Jedoch liegen die Standorte alle unter 20, weshalb auch für diese keine negativen Auswirkungen zu erwarten sind.

Die Phosphorgehalte zeigen eine nicht signifikante Abnahme (Normalverteilung verworfen; Wilkoxon-Rangsummentest $p=0,07$). Von den 38 untersuchten Standorten erhöhte sich die Anzahl in den niedrigen Bereichen (< 47 mg/kg) von 18% auf 42%, im sehr niedrigen Bereich (Klasse A: < 26 g/kg) von 5% auf 18%. Der Anteil im ausreichend versorgten Bereich (Klasse C: $47 - 68$ mg/kg) nahm von 55% auf 32% ab. In den hohen Bereichen (Klasse D und E) blieben die Anteile (26%) gleich. Ein Wechsel fand von Klasse E zu D statt. Die Anteile in Klasse E nahmen von 16% auf 11% ab.

Die Zunahme im niedrigen Bereich ist als kritisch zu betrachten.

Die Kaliumgehalte zeigen eine leichte nicht signifikante Abnahme (Normalverteilung verworfen; Wilkoxon-Rangsummentest $p=0,51$). Die Medianwerte beider Untersuchungsperioden befinden sich jedoch in einem guten Bereich.

Betrachtet man die Entwicklung nach den Gehaltssklassen so zeigt sich eine positive Tendenz. Liegen bei den Altproben noch 39% im niedrigen Bereich („leichte“ Böden (L): < 88 mg/kg; „mittlere“ Böden (M): < 113 mg/kg; „schwere“ Böden (S): < 138 mg/kg), 28% im ausreichend versorgten Bereich (L: $88 - 178$; M: $113 - 212$; S: $138 - 245$), und 33% im höher versorgten Bereich (L: > 178 ; M: 212 ; S: > 245), so befinden sich bei den Neuproben nur mehr 31% im niedrigen Bereich, im ausreichenden sind es 33%, und im hohen Bereich 36%.

Die Abnahme im niedrigen Bereich, und die (leichte) Zunahme im ausreichenden Bereich sind positiv zu bewerten.

Die Verfügbarkeit von Silizium zeigt keine signifikanten Änderungen (Normalverteilung angenommen; Welch-t-Test $p=0,77$). Der Anteil von 14% unter 20 mg/kg (Grenzwert für Zuckerrohr von Haysom und Chapman, 1975) ist gleich geblieben, der Anteil unter 43 mg/kg

(Grenzwert für Reis von Narayanaswamy und Prakash, 2009) hat sich um 3% auf 80% verringert.

Die amorphe Siliziumfraktion blieb über den Untersuchungszeitraum stabil (Normalverteilung verworfen; Wilkoxon-Rangsummentest $p=0,83$)

Bei der ÖPUL-Untersuchung 2010 des Kleinproduktionsgebiets 809 – 811, von 2010 (AGES, 2010a) zeigen sich für den pH-Wert ähnliche Tendenzen.

Die Phosphorgehalte (Median) verhielten sich, in der Untersuchung der AGES (2010a) stabil. Der Medianwert ist vergleichbar mit dem Medianwert der ersten Beprobung (Tabelle 25) dieser Untersuchung. Der prozentuelle Anteil der Gehaltsklassen in der letzten Periode (AGES, 2010a) entspricht auch weitgehend der Klassenverteilung der ersten Beprobung dieser Untersuchung.

Bei der Untersuchung der AGES (2010a) sind die Kaliumgehalte in der ersten Periode signifikant gefallen, danach verhielten sie sich stabil. Bei jeweiliger Betrachtung der ersten und letzten Periode liegen die Werte um etwa 40 und 30 mg/kg höher als die Werte von Tabelle 25 und 26.

Die Aufteilung in die Gehaltsklassen in der letzten Periode (AGES, 2010a) zeigt eine etwas andere Verteilung als diese Untersuchung. Der Anteil mit 12% im niedrigen Bereich fällt geringer aus, der Anteil mit 48% im ausreichend versorgten Bereich fällt höher aus, und der Anteil mit 40% im hohen Bereich ist in etwa vergleichbar mit den 36% der Neuproben dieser Untersuchung.

Entwicklung der Grünlandstandorte im Hauptproduktionsgebiet „Voralpen“ (HPG 2)

Tabelle 26: Bodenkennwerte der Altproben der Grünlandflächen im Hauptproduktionsgebiet „Voralpen“ (HPG 2) (n = Anzahl der aktuell verfügbaren Daten)

Grünland – Altproben	pH (n=138)	OC g/kg (n=90)	N g/kg (n=90)	C/N (n=90)	P_CAL mg/kg (n=100)	K_CAL mg/kg (n=96)	Si_CaCl2 mg/kg (n=143)	Si_NaOH mg/kg (n=132)
Min	4,1	14,8	1,5	5,2	0,7	8,0	3,0	200,3
Max	7,6	331	61,7	38,0	85,0	392	44,0	13041
Mittelwert	6,0	53,6	5,5	10,1	19,5	38,5	17,3	2733
Median	5,9	37,6	4,1	9,2	14,7	21,8	14,9	2289
Standardabweichung	0,9	49,6	6,8	3,7	15,6	52,1	9,8	1796

Tabelle 27: Bodenkennwerte der Neuproben der Grünlandflächen im Hauptproduktionsgebiet "Voralpen" (HPG 2) (n = Anzahl der aktuell verfügbaren Daten)

Grünland – Neuproben	pH (n=138)	OC g/kg (n=90)	N g/kg (n=90)	C/N (n=90)	P_CAL mg/kg (n=100)	K_CAL mg/kg (n=96)	Si_CaCl2 mg/kg (n=143)	Si_NaOH mg/kg (n=132)
Min	3,6	12,7	1,5	8,2	3,37	17,1	3,7	316,1
Max	7,7	172	16,4	15,7	194	657	49,2	6688
Mittelwert	5,5	60,4	5,8	10,2	21,8	124,9	17,8	2260
Median	5,4	54,6	5,5	9,8	15,6	84,6	15,6	1982
Standardabweichung	1,1	30,1	2,7	1,4	27,7	116	8,5	1214

Der pH-Wert zeigt eine signifikante Abnahme (Normalverteilung verworfen; Wilkoxon-Rangsummentest $p=3 \cdot 10^{-4}$). Der Anteil im stark sauren Bereich hat sich von 4% auf 29% stark erhöht. Die Reduktion könnte auf eine Extensivierung zurückzuführen sein, da dadurch meist weniger Dünger- und Kalkungsmaßnahmen durchgeführt werden, die den pH-Wert stabilisieren.

Die ÖPUL-Untersuchung (vgl. AGES, 2010a) zeigt für HPG 2 auch eine signifikante Abnahme (Median von 6,2 auf 6), jedoch liegt der Median in allen Perioden beträchtlich höher.

Der organische Kohlenstoff (Normalverteilung verworfen; Wilkoxon-Rangsummentest $p=3 \cdot 10^{-4}$) und der Gesamtstickstoffgehalt (Normalverteilung verworfen; Wilkoxon-Rangsummentest $p=7 \cdot 10^{-4}$) sind signifikant gestiegen. Diese Steigerung deutet auf eine Extensivierung der Grünlandflächen hin (wurde schon bei den Erläuterungen der einzelnen Bodenkennwerte besprochen), und lässt sich gut mit den Ergebnissen der Entwicklung des pH-Werts verbinden.

Das C/N-Verhältnis hat sich signifikant verbessert (Normalverteilung verworfen; Wilkoxon-Rangsummentest $p=5 \cdot 10^{-4}$). Die weiten und engen Verhältnisse liegen nun nahezu in der anzustrebenden Bandbreite (8,2 – 15,6; (vgl. BMLFUW, 2017, Daten des Arbeitskreis Milchviehhaltung OÖ; BWSB)). Einzig der Maximalwert liegt mit einer Abweichung von 0,1 sehr knapp darüber.

Die (Median-) Gehalte an verfügbarem Phosphor haben sich geringfügig gebessert (Normalverteilung verworfen; Wilkoxon-Rangsummentest $p=0,81$). Der Median stieg leicht von 14,7 auf 15,6 mg/kg. Bei näherer Betrachtung der Gehaltsklassen zeigt sich jedoch eine leicht negative Entwicklung. Im unterversorgten Bereich (< 47 mg/kg) blieb der Anteil mit 92 bzw. 94% annähernd stabil, wobei sich der Anteil in der untersten Klasse A (< 26 mg/kg) von 83% auf 80% senkte, in Klasse B (26 – 46 mg/kg) befindet sich nun eine größere Anzahl (8% auf 14%). Im ausreichend versorgten Bereich C (47 – 68 mg/kg) befinden sich nun weniger Standorte (7% auf 2%). Im überversorgten Bereich blieben die Anteile in Klasse D (69 – 174 mg/kg) mit 2% stabil, während sich die Anteile in Klasse E (> 174 mg/kg) von 0 auf 3% erhöhten.

Die Auswertungen der AGES (2010a) konnten bezüglich des Phosphors keinen Trend über die Perioden feststellen. Die Medianwerte von den Untersuchungsperioden (AGES, 2010a) liegen

mit 26 bis 29 mg/kg jedoch um 66 – 86% höher als die Neuproben dieser Untersuchungen (Tabelle 28). Bei der Untersuchung der AGES wurde in der letzten Periode ein Anteil von 50% in Klasse A, und ein Anteil von 30% in Klasse B festgestellt.

Das verfügbare Kalium stieg stark signifikant (Normalverteilung verworfen; Wilkoxon-Rangsummentest $p < 2,2 \cdot 10^{-16}$). Der Median hat sich im Beobachtungszeitraum etwa vervierfacht. Die Änderung der Verteilung in den Gehaltsklassen ist in Tabelle 29 ersichtlich.

Tabelle 28: Anteile in % der K-Gehaltsstufen auf Grünland der landwirtschaftlichen Bodenkartierung 1980-2000/2015-2020, im Hauptproduktionsgebiet „Voralpen“ (HPG 2)

	K-CAL				
	A (<50 mg/kg)	B (50-87 mg/kg)	C (88-170 mg/kg)	D (171-332 mg/kg)	E (> 332 mg/kg)
Voralpen	85/21	5/30	7/26	1/17	1/6

Die Gehalte an Kalium sind in der ersten Periode extrem niedrig, und liegen unter der 5%igen Gehaltsgrenze der untersuchten Böden der ÖPUL-Evaluierung von 2010 (vgl. AGES, 2010a). Bei der ÖPUL-Evaluierung konnte nur eine leicht signifikante Erhöhung des Medians von 127 auf 142 mg/kg festgestellt werden. Vergleicht man den Median der Kaliumgehalte der AGES mit den Kaliumwerten der Neuproben dieser Untersuchung (Tabelle 28), so liegen die Werte der Neuproben, trotz der starken Zunahme, immer noch um 30 – 40% niedriger.

Für die potentiell-pflanzenverfügbare Siliziumfraktion zeigen sich nur geringe Verbesserungen (Normalverteilung verworfen; Wilkoxon-Rangsummentest $p = 0,24$). Es wird die gleiche Darstellung gewählt wie in der Besprechung des aktuellen Zustands des Grünlands. Es wurde schon angeführt, dass es keine anerkannten Grenzwerte für die Siliziumverfügbarkeit von grasartigen Pflanzen gibt, eine ausreichende Versorgung jedoch gerade in Zeiten zunehmender Trockenperioden günstig erscheint.

Bei den Altproben liegen alle Böden unter dem (unterstellten) kritischen Wert von 43 mg/kg und 66% unter dem (unterstellten Wert) von 20 mg/kg. Nur ein Boden gelangte über den unteren kritischen Wert, und zwei über den oberen.

Für die amorphe Siliziumfraktion wurden eine signifikante Abnahme über den Untersuchungszeitraum festgestellt (Normalverteilung verworfen; Wilkoxon-Rangsummentest $p = 3,2 \cdot 10^{-2}$), der Median ist von 2289 auf 1982 mg/kg gesunken. Die Vorarbeiten (Coccuzza, 2017; Schiefer, 2019; Reiter, 2019) zeigten einen negativen Zusammenhang, zwischen dem organischen Kohlenstoffgehalt und der amorphen Siliziumfraktion auf. Liang et al., (2015) fasst die chinesische Literatur zusammen, in der zwar die meisten Forscher eine positive Relation dieser Bodenkennwerte sehen, jedoch auch manche eine negative Beziehung festgestellt haben.

Die Abnahme der amorphen Siliziumfraktion dieser Untersuchung könnte somit auf die Zunahme der organischen Kohlenstoffgehalte zurückzuführen sein.

Eine Erklärung für die starke Abweichung der Gehalte der Bodenkennwerte aus dieser Untersuchung (und Region) und der ÖPUL-Evaluierung 2010 könnte an der großen Anzahl (62%) von Böden mit hydromorphen Merkmalen in dieser Untersuchung begründet sein. Diese weisen oft trotz gutem Nährstoffvorkommen eine geringe Nährstoffverfügbarkeit auf (vgl. Blume et al. 2010).

Zusammenfassung

Der derzeitige Zustand der untersuchten Ackerflächen ist für den organischen Kohlenstoff als gut einzustufen. Nur 5% liegen in der niedrigsten Klasse. Ähnliches gilt für das C/N-Verhältnis, nur 9% weisen ein leicht zu weites Verhältnis auf. Der pH-Wert teilt sich in 24% im sauren –, 22% im neutralen und 54% im alkalischen Bereich auf. Die Phosphorverfügbarkeit zeigt für nahezu 50% der Standorte eine Unterversorgung auf, während 32% ausreichend versorgt sind, und 20% übersorgt. Die Kaliumverfügbarkeit liegt zu 38% im niedrigen Bereich, ausreichend versorgt sind 33% und die restlichen 29% liegen in den höheren Bereichen. Für die verfügbare Siliziumfraktion zeigt sich je nach angenommenem Grenzwert ein differenziertes Bild. Während nur 12% unter 20 mg/kg (Zuckerrohr) liegen, befinden sich 60% unter 43 mg/kg (Reis).

Für den derzeitigen Zustand der untersuchten Grünlandstandorten befinden sich nur der organische Kohlenstoff und das C/N-Verhältnis in einem guten Bereich. Der Großteil (69%) der Standorte weist eine saure Bodenreaktion auf. Der Anteil von 26% im stark sauren Bereich ist hoch. Für das pflanzenverfügbare Phosphor zeigt sich eine niedrige Versorgung. 91% sind unterversorgt, 5% ausreichend versorgt und 4% liegen in dem hohen und sehr hohen Bereich. Die Kaliumverfügbarkeit liegt zu 48% im unterversorgten Bereich, ausreichend versorgt gelten 26%, und 26% sind als übersorgt einzustufen. Die Verfügbarkeit von Silizium zeigt sich in einem schlechten Bild (bei den unterstellten Grenzwerten liegen 60% < 20 mg/kg und 98% < 43 mg/kg).

Die Untersuchung zu möglichen zeitlichen Veränderungen der Bodenkennwert im Ackerbau konnte nur für das CN-Verhältnis eine signifikante Änderung feststellen. Der verfügbare Phosphor hat sich leicht (nicht signifikant) verringert. Dabei hat sich die Anzahl in den untersten Gehaltsklassen A und B erhöht, der Anteil der ausreichend versorgte Klasse C blieb stabil und die übersorgten Klassen D und E nahmen ab. Der organische Kohlenstoffgehalt zeigt eine nicht signifikante Erhöhung des Median, von 20,5 auf 22,9 g/kg.

Im Grünland fand eine signifikante Erhöhung der Bodenkennwerte organischer Kohlenstoff, Gesamtstickstoff, CN-Verhältnis und eine sehr starke Erhöhung des verfügbaren Kaliums (Median fast vervierfacht) statt. Der pH, und die amorphe Siliziumfraktion nahmen signifikant ab. Der verfügbare Phosphor nahm leicht (nicht signifikant) zu. Für die potentiell-verfügbare Siliziumfraktion zeigt sich keine Änderungen.

Bei der Betrachtung von zeitlichen Änderungen in geografischen Räumen konnten die ermittelten Werte für Ackerland und des Hauptproduktionsgebietes „Nordöstliches Flach- und Hügelland“ (HPG 8) und der Kleinproduktionsgebiete „Wiener Boden“ und „Baden-Gumpoldskirchener Gebiet“ (KPG 809 – 810) gut mit der der ÖPUL-Evaluierung (AGES, 2010) verglichen werden.

Im Kleinproduktionsgebieten „Wiener Boden“ und „Baden-Gumpoldskirchener Gebiet“ blieben die pH-Werte weitgehend stabil im Karbonat-Pufferbereich. Der organische Kohlenstoffgehalt hat sich etwas erhöht (Median 34,2 zu 39,5 g/kg), wobei die Zunahme statistisch nicht abgesichert werden konnte. Die Gesamtstickstoffgehalte blieben annähernd konstant (3,1 bzw. 3,4). Der Anteil der Gehaltsklassen von pflanzenverfügbarem Phosphor nahm in den niedrigen – und ausreichend versorgten Bereich ab. Für die Kaliumverfügbarkeit zeigt sich eine Abnahme in den unterversorgten Klassen (A und B) und eine leichte Zunahme

in der ausreichend versorgten Klasse C, sowie in den höheren Klassen (D und E). Die Siliziumfraktionen zeigen keine signifikanten zeitlichen Veränderungen. Im Hauptproduktionsgebiet „Nordöstliches Flach- und Hügelland“ kam es zu einer relevanten, statistisch derzeit noch knapp nicht abgesicherten Zunahme der Medianwerte des organischen Kohlenstoffgehalts um 15%.

Die ermittelten Werte für das Hauptproduktionsgebiet „Voralpen“ (HPG 2) lagen weit unter den Werten der ÖPUL-Evaluierung. Ein Grund könnte die hohe Anzahl von Böden mit hydromorphen Merkmalen bei der erneuten Beprobung der landwirtschaftlichen Bodenkartierung sein. Der Wasser- und damit auch verbundenen Lufthaushalt haben eine immense Bedeutung für die biogeochemischen Bodenreaktionen. Wenn keine relativ homogene Verteilung von wichtigen Bodencharakteristika, oder auch Bodentypen (in Österreich nach genetischen Merkmalen) besteht, kann auch dies zu nicht vergleichbaren Bodendaten führen. Gerade dem Wasserhaushalt (und Lufthaushalt) ist diesbezüglich eine wichtige Rolle zuzuschreiben.

Der pH-Wert zeigt eine signifikante Abnahme (Median von 5,9 auf 5,4). Der organische Kohlenstoff (Median von 37,6 auf 54,6 g/kg) und Gesamtstickstoff (Median von 4,1 auf 5,5 g/kg) haben sich signifikant erhöht. Das C/N-Verhältnis hat sich signifikant verbessert, und liegt nun in einem besseren Bereich. Die Phosphorverfügbarkeit hat sich nicht verbessert, und der Großteil der Böden liegt im unterversorgten Bereich (94%). Das potentiell-pflanzenverfügbare Kalium zeigt eine stark signifikante Erhöhung (Median von 21,8 auf 84,6 mg/kg), die Verteilung in den Gehaltsklassen hat sich verbessert. Für die Siliziumverfügbarkeit zeigt sich keine signifikante Änderung (Median von 14,9 auf 15,6 mg/kg). Die amorphe Siliziumfraktion zeigt eine signifikante Abnahme (Median von 2290 auf 1980 mg/kg).

Die Zunahme der organischen Kohlenstoffgehalte in beiden Landnutzungsformen (Ackerland und Grünland) ist positiv zu bewerten. Die Zunahme im Ackerland ist im Einklang mit Ergebnissen der AGES (2015). Es sei darauf verwiesen, dass es sich insbesondere bei den Daten zum organischen Kohlenstoff um vorläufige Auswertungen handelt, da zurzeit nur ein Teil der Analysedaten vorliegt.

Gehaltsklassenanhang

modifizierte Klassen der „Richtlinien für sachgerechte Düngung im Ackerbau und Grünland – Anleitung zur Interpretation von Bodenuntersuchungsergebnissen in der Landwirtschaft“ (BMLFUW, 2017)

Boden-pH

pH-Wert (CaCl ₂)	Bodenreaktion	Puffersystem	Pufferkapazität *	Einflussfaktor
< 4,2	stark sauer	Aluminium-Puffer	150 kmol H ⁺ je % Ton	Tonminerale
4,2 – 4,5		Silikat-Puffer	7,5 mol H ⁺ je % Silikat	Silikate
4,6 – 5,5	sauer	Austauscher-Puffer	25 kmol H ⁺ je % Ton	Tonfraktion/Humus
5,6 -6,5	schwach sauer			
6,6 – 7,2	neutral			
7,3 – 8,0	alkalisch	Karbonat-Puffer	300 kmolH ⁺ je % CaO	Karbonate
> 8	stark alkalisch			

* ... Die Pufferkapazität ist jene Menge an Säure, die ohne wesentliche Änderung des pH-Wertes neutralisiert werden kann.

Anzustrebender pH-Wert			
Bodenschwere	Ackerland		Grünland
	Hafer, Roggen, Kartoffel	Übrige Kulturen	
leicht	> 5	> 5,5	um 5
mittel	> 5,5	> 6	um 5,5
schwer	> 6	> 6,5	um 6

Organischer Kohlenstoff

	Gehaltsklasse A	Gehaltsklasse B	Gehaltsklasse C
	g/kg		
Ackerland	< 11,6	11,6 – 26,1	> 26,1
Grünland	< 26,1	26,1 – 52,2	> 52,2

Potentiell-pflanzenverfügbare Phosphor

Gehaltsklasse	Nährstoffversorgung	Ackerland	Grünland
		mg P _{CAL} /1000g	
A	sehr niedrig	< 26	< 26
B	niedrig	26 – 46	26 – 46
C	ausreichend	47 – 111	47 – 68
D	hoch	112 – 174	69 – 174
E	sehr hoch	> 174	> 174

Potentiell-pflanzenverfügbares Kalium

Gehaltsklasse	Nährstoffversorgung	Ackerland			Grünland
		mg K_CAL/1000g			
		Bodenschwere*			
		leicht	mittel	schwer	
A	sehr niedrig	< 50	< 66	< 83	< 50
B	niedrig	50 – 87	66 – 112	83 – 137	50 – 87
C	ausreichend	88 – 178	113 – 212	138 – 245	88 – 170
D	hoch	179 – 291	213 – 332	246 – 374	171 – 332
E	sehr hoch	> 291	> 332	> 374	> 332

* leicht: < 150 g/kg Ton; mittel: 150 – 250 g/kg Ton; schwer: > 250 g/kg Ton

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Bodenkennwerte für Neuproben im Ackerland (n = Anzahl der aktuell verfügbaren Daten)....	7
Tabelle 2: Bodenkennwerte für Neuproben im Grünland (n = Anzahl der aktuell verfügbaren Daten).....	9
Tabelle 3: Direkter Vergleich für pH im Ackerland	12
Tabelle 4: Direkter Vergleich für pH im Grünland.....	12
Tabelle 5: Direkter Vergleich vom Gesamtstickstoff im Ackerland (n=119).....	13
Tabelle 6: Direkter Vergleich vom Gesamtstickstoff im Ackerland (n=95).....	13
Abbildung 9: Tabelle 7: Direkter Vergleich vom Gesamtstickstoff im Ackerland (n=95).....	14
Tabelle 8: Direkter Vergleich vom organischen Kohlenstoff im Ackerland (n=119)	14
Tabelle 9: Direkter Vergleich vom organischen Kohlenstoff im Grünland (n=95)	14
Tabelle 10: Direkter Vergleich vom C/N-Verhältnis im Ackerland (n=119).....	16
Tabelle 11: Direkter Vergleich vom C/N-Verhältnis im Grünland (n=95).....	16
Tabelle 12: Direkter Vergleich vom verfügbaren Phosphor im Ackerland (n=110)	17
Tabelle 13: Direkter Vergleich vom verfügbaren Phosphor im Grünland (n=100)	17
Tabelle 14: Anteile in % der P-Gehaltsstufen auf Ackerland der landwirtschaftlichen Bodenkartierung 1980-2000/2015-2020, im Hauptproduktionsgebiet „Nordöstliches Flach- und Hügelland“ (HPG 8).....	17
Tabelle 15: Anteile in % der P-Gehaltsstufen auf Ackerland der ÖPUL-Evaluierung 200-2005/2006 -2010, im Hauptproduktionsgebiet „Nordöstliches Flach- und Hügelland“ (HPG 8) (Quelle: AGES, 2010a)	17
Tabelle 16: Direkter Vergleich vom verfügbaren Kalium im Ackerland (n=106)	18
Tabelle 17: Direkter Vergleich vom verfügbaren Kalium im Grünland (n=98)	18
Tabelle 18: Anteile in % der K-Gehaltsstufen auf Ackerland der landwirtschaftlichen Bodenkartierung 1980-2000/2015-2020, im Hauptproduktionsgebiet „Nordöstliches Flach- und Hügelland“ (HPG8).....	19
Tabelle 19: Anteile in % der K-Gehaltsstufen auf Ackerland der ÖPUL-Evaluierung 200-2005/2006 -2010, im Hauptproduktionsgebiet „Nordöstliches Flach- und Hügelland“ (HPG 8) (Quelle: AGES, 2010a)	19
Tabelle 20: Direkter Vergleich der verfügbaren Siliziumfraktion im Ackerland (n=214)	20
Tabelle 21: Direkter Vergleich der verfügbaren Siliziumfraktion im Grünland (n=155)	20

Tabelle 22: Direkter Vergleich der amorphen Siliziumfraktion im Ackerland (n=194)	21
Tabelle 23: Direkter Vergleich der amorphen Siliziumfraktion im Grünland (n=144)	21
Tabelle 24: Entwicklung der organischen Kohlenstoffgehalte auf Ackerland im Hauptproduktionsgebiet „Nordöstliches Flach- und Hügelland“ (HPG 8)	22
Tabelle 25: Bodenkennwerte der Altproben der Ackerflächen in den Kleinproduktionsgebieten „Wiener Boden“ und „Baden-Gumpoldskirchener Gebiet“ (KPG 809 – 810) (n = Anzahl der aktuell verfügbaren Daten)	23
Tabelle 26: Bodenkennwerte der Neuproben der Ackerflächen in den Kleinproduktionsgebieten „Wiener Boden“ und „Baden-Gumpoldskirchener Gebiet“ (KPG 809 – 810) (n = Anzahl der aktuell verfügbaren Daten)	23
Tabelle 27: Bodenkennwerte der Altproben der Grünlandflächen im Hauptproduktionsgebiet „Voralpen“ (HPG 2) (n = Anzahl der aktuell verfügbaren Daten)	25
Tabelle 28: Bodenkennwerte der Neuproben der Grünlandflächen im Hauptproduktionsgebiet „Voralpen“ (HPG 2) (n = Anzahl der aktuell verfügbaren Daten)	26
Tabelle 29: Anteile in % der K-Gehaltsstufen auf Grünland der landwirtschaftlichen Bodenkartierung 1980-2000/2015-2020, im Hauptproduktionsgebiet „Voralpen“ (HPG 2)	27

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Profilstandorte der erneuten Probenahme (2015-2020).....	3
Abbildung 2: Lufttrocknung nach der Probenahme (Quelle: eigenes Material).....	4
Abbildung 3: 1. Restfeuchtebestimmung 2. Extraktion 3. Blaufärbung 4. Messung am Photometer (Quelle: Schiefer, 2019)	6
Abbildung 4: Siliziumverfügbarkeit der Ackerstandorte in Niederösterreich. Grenzwert 20 mg/kg für Zuckerrohr (Haysom und Chapman, 1975) und 43 mg/kg für Reis (Narayanaswamy und Prakash, 2009) als rote Linien eingezeichnet (n=337).....	9
Abbildung 5: Siliziumverfügbarkeit der Grünlandstandorte in Niederösterreich. Grenzwert 20 mg/kg für Zuckerrohr (Haysom und Chapman, 1975) und 43 mg/kg für Reis (Narayanaswamy und Prakash, 2009) als rote Linien eingezeichnet (n=265).....	11
Abbildung 6: Direkter Vergleich für pH im Ackerland ($p=0,75$) (n=194)	12
Abbildung 7: Direkter Vergleich für pH im Grünland ($p=1*10^{-3}$) (n=150).....	12
Abbildung 8: Direkter Vergleich vom Gesamtstickstoff im Ackerland ($p=0,59$) (n=119)	14
Abbildung 9: Direkter Vergleich vom Gesamtstickstoff im Ackerland ($p=6,3*10^{-4}$) (n=95)	14
Abbildung 10: Direkter Vergleich vom organischen Kohlenstoff im Ackerland ($p=0,13$) (n=119).....	15
Abbildung 11: Direkter Vergleich vom organischen Kohlenstoff im Grünland ($p=3,6*10^{-4}$) (n=95)	15
Abbildung 12: Direkter Vergleich vom C/N-Verhältnis im Ackerland ($p=1,3*10^{-3}$) (n=119).....	16
Abbildung 13: Direkter Vergleich vom C/N-Verhältnis im Grünland ($p=4,4*10^{-4}$) (n=95).....	16
Abbildung 14: Direkter Vergleich vom verfügbaren Phosphor im Ackerland ($p=5,2*10^{-2}$) (n=110)	17
Abbildung 15: Direkter Vergleich vom verfügbaren Phosphor im Grünland ($p=0,95$) (n=100)	17
Abbildung 16: Direkter Vergleich vom verfügbaren Kalium im Ackerland($p=0,42$) (n=106).....	19
Abbildung 17: Direkter Vergleich vom verfügbaren Kalium im Grünland($p<2,2*10^{-16}$) (n=98).....	19

Abbildung 18: Direkter Vergleich der verfügbaren Siliziumfraktion im Ackerland ($p=0,98$) ($n=214$)	20
Abbildung 19: Direkter Vergleich der verfügbaren Siliziumfraktion im Grünland ($p=0,13$) ($n=155$)	20
Abbildung 20: Direkter Vergleich der amorphen Siliziumfraktion im Ackerland ($p=0,47$) ($n=194$)	21
Abbildung 21: Direkter Vergleich der amorphen Siliziumfraktion im Grünland($p=2,5*10^{-2}$) ($n=144$)	21
Abbildung 22: Entwicklung der organischen Kohlenstoffgehalte auf Ackerland im Hauptproduktionsgebiet „Nordöstliches Flach- und Hügelland“ (HPG 8) ($n=104$)	22

Literaturverzeichnis

Abelson, P.H. (1999): A Potential Phosphate Crisis. *Science* 283: 2015.

Adrees, M., Ali, S., Rizwan, M., Zia-ur-Rehman, M., Ibrahim, M., Abbas, M., Farid, M., Farooq Qayyum, M. und Kashif Irshad, M. (2015): Mechanisms of silicon-mediated alleviation of heavy toxicity on plants: A review. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 119: 186– 197. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.05.011>.

AGES (2010a): ÖPUL-Evaluierung – Auswirkungen von ÖPUL-Maßnahmen auf die Nährstoffverfügbarkeit österreichischer Böden. BMLFUW. Wien.

AGES (2010b): Evaluierung von ÖPUL-Agrar-/Umweltmaßnahmen im Hinblick auf Parameter der Bodenfruchtbarkeit. BMLFUW. Wien.

AGES (2015): Die Humusgehalte der heimischen Ackerböden haben sich positiv entwickelt. Edited by AGES – Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherheit. Available online at <https://www.ages.at/themen/umwelt/boden/positive-humusentwicklung/>. Abgerufen am 7.12.2020.

Blum, W.E.H, Spiegel, H. und Wenzel W.W (1996): Bodenzustandsinventur – Konzeption, Durchführung und Bewertung. Empfehlung zur Vereinheitlichung der Vorgangsweise in Österreich. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft. Wien.

BMLFUW (2007): Richtlinien für die sachgerechte Düngung im Ackerbau und Grünland - Anleitung zur Interpretation von Bodenuntersuchungsergebnissen in der Landwirtschaft. BMLFUW. Wien.

BMLRT: https://www.bmlrt.gv.at/wasser/wasser-oesterreich/wasserrecht_national/recht_gewaesserschutz/APNitrat2012.html. Abgerufen am 2.12.2020.

Bohner, A. und Eder, G. (2006): Boden- und Grundwasserschutz im Wirtschaftsgrünland. Seminar Umweltprogramme für die Landwirtschaft. Bericht HBLFA Raumberg-Gumpenstein: 53 – 64.

Bohner, A., Huemer, C. Schaumberger, J. und Liebhard, P. (2012): Einfluß der landwirtschaftlichen Bewirtschaftung und des Reliefs auf den Nährstoffgehalt im Oberboden mit besonderer Berücksichtigung des Phosphors. 3. Umweltökologisches Symposium 2012: 91 – 100. ISBN: 978-3-902559-69-2.

Bohner, A. und Rohrer, V. (2013): Jahreszeitlicher Verlauf der Phosphor-Konzentration im Bodenwasser eines Grünlandbodens. 18. Alpenländisches Expertenforum 2013: 33 – 40. ISBN: 978-3-902559-98-2.

Bohner, A. und Schink, M. (2007): Ergebnisse der Bodenuntersuchungen im Einzugsgebiet des Mondsees und Irrsees mit besonderer Berücksichtigung des Phosphors. Schriftenreihe BAW 26: 34 – 50.

Clymans, W., Struyf, E., Govers, G., Vandevenne, F. und Conley, D. J. (2011): Anthropogenic impact on amorphous silica pools in temperate soils. *Biogeosciences* 8 (8): 2281– 2293. doi:10.5194/bg-8-2281-2011.

Cocuzza, E. (2017): Silicon availability in Lower Austrian topsoils. Masterarbeit. Universität für Bodenkultur Wien. Wien.

- Duboc, O., Cocuzza, E., Robbe, A. und Schabl, P. (2017): Silicon colorimetric measurement for soil, plant and fertilizers.
- Gerzabek, M.H., Baumgarten, A., Tulipan, M. und Schwarz, S. (2004): Ist die Nährstoffversorgung der Pflanzen noch ausgewogen? – Eine Analyse aufgrund von Bodenuntersuchungsergebnissen und Langzeitversuchen. *Ländlicher Raum* 2: 1 – 8.
- Georgiadis, A., Sauer, D., Breuer, J., Herrmann, L., Rennert, T. und Stahr K. (2015): Optimising the extraction of amorphous silica by NaOH from soils of temperate-humid climate. *Soil Research* 53: 392. doi:10.1071/SR14171.
- Gregory, A. S., Dungait, J. A. J., Watts, C. W., Bol, R., Dixon, E. R., White, R. P. und Whitmore, A. P. (2016): Long-term management changes in topsoil and nitrogen dynamics in a temperate agricultural system. *European Journal of Soil Science*, 67: 421 – 430.
- Gomes, F.B., de Moraes, J.C., dos Santos, C.D. und Goussain, M.M. (2005): Resistance induction in wheat plants by silicon and aphids. *Scientia Agricola* 62: 547–551.
- Guntzer, F., Keller C. und Meunier, J.-D (2012): Benefits of plant silicon for crops: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, Springer Verlag/EDP Sciences/INRA, 2012, 32: 201-213. doi:10.1007/s13593-011-0039-8.hal-00930510.
- FAO (2014): World reference base for soil resources 2014. Rom.
- Fink, J. (1969): Nomenklatur und Systematik der Bodentypen Österreichs. Mitteilung der Österreichischen Bodenkundlichen Gesellschaft 13. Wien.
- Haysom, M.B.C. und Chapman, L.S. (1975): Some Aspects of the Calcium Silicate Trials at Mackay. Forty Second Conference: 117–122.
- Hawkesford, M., Horst, W., Kichey, T., Lambers, H., Schjoerring, J., Skrumsager Møller, I. und White, P. (2012): Functions of Macronutrients. *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants*: 135 – 189. Elsevier.
- Heinzlmaier, F., Gerzabek, M.H., Tulipan, M. und Baumgarten, A. (2005): Pflanzennährstoffe in Österreichs Böden: Räumliche und zeitliche Variationen sowie Wechselwirkungen mit Bodeneigenschaften. *Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss.* 17: 96 – 97.
- Heine, G., Tikum, G., und Horst, W. J. (2007). The effect of silicon on the infection by and spread of *Pythium aphanidermatum* in single roots of tomato and bitter melon. *Journal of Experimental Botany* 58: 569–577. doi:10.1093/jxb/erl232.
- Hiebl, J., Reisenhofer, S., Auer, I., Böhm, R., und Schöner, W. (2011): Multi-methodical realisation of Austrian climate maps for 1971–2000. *Adv. Sci. Res.*, 6: 19-26. <https://doi.org/10.5194/asr-6-19-2011>.
- Jordan, E. (2020): Critical levels of CaCl₂-extractable soil silicon for rye (*Secale cereale* L.) with and without drought or copper stress. Masterarbeit. Universität für Bodenkultur Wien und Universität Lincoln. Wien.
- Klotzbücher, T., Klotzbücher, A., Kaiser, K., Merbach, I. und Mikutta, R. (2018): Impact of agricultural practices on plant-available silicon. *Geoderma* 331:15–17. doi:10.1016/j.geoderma.2018.06.011.
- Lefèvre, C., Rekik, F., Alcantara, V. und Wiese, L. (2017): Soil organic carbon. The hidden potential. Rom: Food and Agriculture Organization of the United Nations. Verfügbar im Internet (18.11.2020): <http://www.fao.org/3/a-i6937e.pdf>.
- Liang, Y.; Nikolic, M.; Bélanger, R.; Gong, H. und Song, A. (2015): Silicon Biogeochemistry and Bioavailability in Soil. In Y. Liang, M. Nikolic, R. Bélanger, H. Gong, A. Song (Eds.): *Silicon in agriculture. From theory to practice*. Dordrecht. Springer: 45–68.
- LKO: <https://ooe.lko.at/lk-düngerrechner-ein-kostenloses-edv-programm-der-landwirtschaftskammern+2500+1652577>. Abgerufen am 2.12.2020.
- Morrison, I. R. und Wilson, A. L. (1963): The absorptiometric determination of silicon in water. Part II. Method for determining “reactive” silicon in power-station waters. *Analyst* 88 (1043): 100–104. doi:10.1039/AN9638800100.

- Narayanaswamy, C. und Prakash, N. B. (2009): Calibration and Categorization of Plant Available Silicon in Rice Soils of South India. *Journal of Plant Nutrition* 32 (8), pp. 1237–1254. doi: 10.1080/01904160903005970.
- Neina, D. (2019): The Role of Soil pH in Plant Nutrition and Soil Remediation. *Applied and Environmental Soil Science* 129: 1 – 9. doi:10.1155/2019/5794869.
- Nestroy, O., Danneberg, O. H., Englisch, M., Hager, H., Herzberger, E., Kilian, W., Nelhiebel, P., Ortner, G., Pecina, E., Pehamberger, A., Schneider, W. und Wagner, J. (2011): Systematische Gliederung der Böden Österreichs – Österreichische Bodensystematik 2000 in der revidierten Fassung von 2011. Österreichische Bodenkundliche Gesellschaft 79. Wien.
- Pettigrew, W.T. (2008): Potassium influences on yield and quality production for maize, wheat, soybean and cotton. *Physiologia Plantarum* 133: 670–681.
- Pötsch, E.M und Baumgarten, A. (2010): Phosphorproblematik im Grünland. *Landwirt* 18: 30-31.
- Reiter, J. (2019): Monitoring of silicon, soil pH, nitrogen and organic carbon in the Lower Austrian Chernozem / Phaeozem region. Masterarbeit. Universität für Bodenkultur Wien. Wien.
- Roberts, T.L., Stewart, J.W.B. und Bettany, J.R. (1985): The influence of topography on the distribution of organic and inorganic soil phosphorus across a narrow environmental gradient. *Canadian Journal of Soil Science* 65: 651–665.
- Schneider, W., Nelhiebel, P., Aust, G., Wandl, M. und Danneberg, O.H (2001): Die Landwirtschaftliche Bodenkartierung in Österreich. *Mitteilung der Österreichischen Bodenkundlichen Gesellschaft* 62: 39 – 67. Wien.
- Schiefer, A. (2019): Spatio-temporal pattern of Silicon fraction in Lower Austrian topsoils. Masterarbeit. Universität für Bodenkultur Wien. Wien.
- Sun, W., Zhang, J., Fan, Q., Xue, G., Li, Z., und Liang, Y. (2010): Silicon-enhanced resistance to rice blast is attributed to silicon-mediated defence resistance and its role as physical barrier. *European Journal of Plant Pathology* 128: 39–49. doi:10.1007/s10658- 010- 9625- x.
- Syer J.K. (1998): Soil and Plant Potassium in Agriculture. The Fertiliser Society. Newcastle upon Tyne.
- Tiessen, H., Stewart, J.W.B. und Cole, C.V. (1984): Pathways of phosphorus transformations in soils of differing pedogenesis. *Soil Science Society of America Journal* 48: 853–858.
- Tomar, N.K. (2000): Dynamics of phosphorus in soils. *Journal of the Indian Society of Soil Science* 48: 640–668.
- Webber, H. M., Wilson, A. L. (1964): The absorptiometric determination of silicon in water. Part IV. Method for determining “reactive” silicon in power-station waters containing phosphate. *Analyst* 89 (1063): 632–641. doi:10.1039/AN9648900632.
- Williams, C.H. (1950): Studies on soil phosphorus: 1: A method for partial fractionation of soil phosphorus. *Journal of Agricultural Science* 40: 233–242.
- Yanai, J., Taniguchi, H. und Nakao, A. (2016): Evaluation of available silicon content and its determining factors of agricultural soils in Japan. *Soil Science and Plant Nutrition* 62 (5-6): 511–518. doi: 10.1080/00380768.2016.1232601.
- Zörb, C., Senbayram, M. und Peiter, E. (2014): Potassium in agriculture – status and perspectives. *Journal of Plant Physiology* 171: 656–669.