

Kriterien für Bodenfruchtbarkeit in Zusammenhang mit der Kationenaustauschkapazität, Säuregrad, Humus-, Ton- und Nährstoffgehalt

Masterthesis

Ausgeführt zum Zweck der Erlangung des akademischen Grades
MSc

im Masterlehrgang Agrar- und Technologiemanagement der
Zukunftsakademie Mostviertel

an der Fachhochschule St. Pölten,

von:

Ing. Patrick Falkensteiner, akad. BT
41785724

Betreuer und Erstbegutachter: Dr. Georg Dersch
Zweitbegutachter: DI Dr. Franz Fidler

Enns, 30.05.2022

Ehrenwörtliche Erklärung

Ich versichere, dass

- ich diese Arbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfe bedient habe.

- ich dieses Thema bisher weder im Inland noch im Ausland einem Begutachter/einer Begutachterin zur Beurteilung oder in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe.

Diese Arbeit stimmt mit der vom Begutachter bzw. der Begutachterin beurteilten Arbeit überein.

.....

Ort, Datum

.....

Unterschrift

Kurzfassung

In vorliegender Masterthesis wurden vorwiegend oberösterreichische Grünlandflächen einer Bodenbeprobung unterzogen. Diese Proben wurden mittels einer chemischen Bodenuntersuchung analysiert und die Ergebnisse daraus ausgewertet. Durch Sichtung des gegenwärtigen Wissensstands im Bereich der Bodenuntersuchungen wurden Kriterien für die Bodenfruchtbarkeit festgelegt. Insbesondere wird auf die Kationenaustauschkapazität, den Säuregrad, den Humus-, Ton- und Nährstoffgehalt in Böden eingegangen. Rund 1.800 Bodenprobenergebnisse wurden quantifiziert. Die Auswertung mittels statistischer Verfahren erfolgte auf Basis der Kleinproduktionsgebiete (KPG) in Oberösterreich, wobei Gebietsunterschiede erhoben wurden.

Das Innere Salzkammergut, Eisenwurzen unterscheidet sich durch die höchsten Humusgehalte von durchschnittlich 10,61 Prozent (%) Humus signifikant von den übrigen KPG: Vor allem vom Alpenvorland mit mittleren Gehalten von 6,22% im Grieskirchner-Kremsmünster Gebiet, 6,47% im Rieder Gebiet, 7,96% im Vöcklabrucker Gebiet und 8,17% im Oberen Innviertel. Im direkten Vergleich mit dem Äußeren Salzkammergut - dem zweiten KPG in den Voralpen - mit durchschnittlich 8,43% Humus, wurden ebenso signifikante Unterschiede festgestellt. Grund dafür ist die geografische Lage der beiden Gebiete in den Alpen beziehungsweise dem Alpenvorland mit unterschiedlichen klimatischen Verhältnissen und Niederschlagsmengen. Bad Ischl (Inneres Salzkammergut, Eisenwurzen): 8,6 Grad Celsius (°C) Jahresmitteltemperatur und 1.741 mm Jahresniederschlag, Gmunden (Äußeres Salzkammergut): 9,3 °C Jahresmitteltemperatur und 1.245 mm Jahresniederschlag (Quelle: Messstationen der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG), 1981-2010). Der Humusgehalt in den Hochlagen des Mühlviertels liegt im Schnitt bei 9,25% und unterscheidet sich signifikant von den Mittellagen mit durchschnittlich 6,88% Humus. Die Unterschiede zwischen den beiden Gebieten können aufgrund der Höhenlage und der damit einhergehenden kühleren Witterung in den Hochlagen begründet werden, auch die dadurch bedingte geringere Schnitthäufigkeit kann mit als Ursachenkomplex angeführt werden. Freistadt (Mittellagen des Mühlviertels): 7,2 °C Jahresmitteltemperatur und 757 mm Jahresniederschlag, Weitersfelden (Hochlagen des Mühlviertels): 6,5 °C Jahresmitteltemperatur und 890 mm Jahresniederschlag (Quelle: Messstationen der ZAMG, 1981-2010).

Der Säuregrad eines Bodens wird durch den pH-Wert charakterisiert. Dieser liegt bei leichten Grünlandböden (unter 15% Tongehalt) optimalerweise mindestens um

5, bei mittelschweren Standorten (15 bis 25% Tongehalt) um 5,5. Rund 15% der Proben liegen unter diesen anzustrebenden pH-Mindestbereichen. Die mittleren pH-Werte liegen für alle KPG in einem engeren Bereich zwischen 5,67 und 6,37, dennoch liegen eine Reihe signifikanter Unterschiede vor: Auch beim pH-Wert weist das Innere Salzkammergut, Eisenwurzen einen signifikant höheren Wert auf als das Äußere Salzkammergut und alle weiteren KPG. Der Mittelwert der Hochlagen des Mühlviertels liegt bei 5,67 und ist signifikant niedriger als in den Mittellagen und bei den übrigen Gebieten. Ein Grund für pH-Wert-Unterschiede in den Regionen ist der geogene Untergrund. Das kalkhaltige Ausgangsgestein in den Alpen und im Alpenvorland setzt Calcium frei und stabilisiert so den pH-Wert im Boden. Wohingegen der silikatische Untergrund mit Granit und Gneis im Mühlviertel den gegenteiligen Effekt erzielt und den pH-Wert im Oberboden senkt. Der niedrigste mittlere pH-Wert ist in den Hochlagen des Mühlviertels mit 5,67 zu finden.

Beim Phosphorgehalt wurde eine tendenzielle Unterversorgung der Böden festgestellt, wobei der niedrigste mittlere Gehalt mit 21,2 mg/kg (Stufe A: sehr niedrige Versorgung) im Inneren Salzkammergut, Eisenwurzen ermittelt wurde. Im Grießkirchner - Kremsmünster Gebiet und im Rieder Gebiet mit knapp über 50 mg/kg die höchsten mittleren Werte (Stufe C: ausreichende Versorgung). Signifikante Unterschiede liegen noch zwischen den Mittellagen des Mühlviertels mit 43,6 mg/kg und den übrigen vier KPG mit Mittelwerten zwischen 32 – 37 mg/kg vor (jeweils niedrige Versorgung). Weil keine geogenen Ursachen für die Unterschiede herangezogen werden können, spiegelt sich darin auch die unterschiedliche Bewirtschaftungsintensität wider. Durch den höchsten Humusgehalt und damit wohl dem entsprechend höheren Anteil an organisch gebundenem Phosphor, können die sehr niedrigen Phosphor-CAL-Gehalte (CAL=Calcium Acetat Lactat) im KPG Inneres Salzkammergut, Eisenwurzen zum Teil kompensiert werden. Der organische Phosphorpool wird im CAL-Auszug nicht erfasst.

Rund 85% der beprobten Flächen sind bei Kalium und rund 99% bei Magnesium als ausreichend bis sehr hoch versorgte Standorte einzustufen. Die Kalium-CAL-Gehalte liegen in den KPG des Mühlviertel mit Mittelwerten von 252 - 271 mg/kg signifikant höher als in den übrigen KPG mit durchschnittlichen Gehalten zwischen 125 - 156 mg/kg. Das kaliumreiche geogene bodenbildende Ausgangsgestein kann dafür primär als Ursache angeführt werden. Die Bewirtschaftung mit Milchviehhaltung führt in der Regel zu ausreichender Zufuhr an Kalium mit den Wirtschaftsdüngern, die Intensität spielt nur eine untergeordnete Rolle. Die niedrigsten Gehalte (125 mg/kg) finden sich im extensiven KPG Inneres

Salzkammergut, Eisenwurzen. Die signifikant höchsten Magnesium-Gehalte von 344 mg/kg liegen geogen bedingt im KPG Inneres Salzkammergut, Eisenwurzen vor, gefolgt vom Rieder Gebiet mit 252 mg/kg. Die übrigen KPG weisen einheitlich signifikant niedrigere Magnesium-Gehalte zwischen 180 bis 221 mg/kg auf, jedoch überwiegend in den hohen Versorgungsstufen.

Die Kationenaustauschkapazität hat einen unmittelbaren Zusammenhang mit dem Nährstoffspeichervermögen eines Bodens. Grundsätzlich wird zwischen der effektiven und potentiellen Kationenaustauschkapazität (KAK_{eff} und KAK_{pot}) unterschieden. Die KAK_{eff} beschreibt den Ist-Zustand beim aktuellen pH-Wert, die KAK_{pot} die maximal erreichbare Nährstoffbelegung bei pH-Wert über sieben. Mit den Daten wurden Regressionsgleichungen aufgestellt, welche zur Abschätzung der KAK_{eff} und KAK_{pot} bei bekanntem Tongehalt, pH-Wert und Humusgehalt herangezogen werden können. Das statistische Verfahren ergab, dass die KAK_{eff} bei einer Erhöhung von 1% Ton um 0,58 cmol/kg steigt. Eine Steigerung des pH-Wertes um eine Einheit erhöht die KAK_{eff} um 13,8 cmol/kg. Beim Humus bewirkt eine Erhöhung um ein Humusprozent einen Anstieg der KAK_{eff} von 1,66 cmol/kg. Die KAK_{pot} steigt bei einer Erhöhung von 1% Ton um 0,61 cmol/kg. Eine Steigerung des pH-Wertes um eine Einheit erhöht die KAK_{pot} um 9,93 cmol/kg. Beim Humus bewirkt eine Erhöhung um ein Humusprozent einen Anstieg der KAK_{pot} von 1,87 cmol/kg. Somit kann quantitativ abgeleitet werden, welche Standorteigenschaften und welche Maßnahmen die KAK beeinflussen: Die stabile Anhebung des pH-Wertes um 0,5 beziehungsweise 1,0 erhöht die KAK entsprechend, kann jedoch nur mit den regelmäßigen Kalkgaben aufrechterhalten werden. Bei der Erstellung von Regressionsgleichungen durch Auswahl der Proben nach der Einstufung des Säuregrades (stark sauer, schwach sauer, neutral bis alkalisch) nimmt die Bedeutung des Humusgehalts deutlich zu: Ein um 1% höherer Humusgehalt steigert die KAK_{eff} im stark sauren Bereich um knapp 1 cmol/kg, im schwach sauren Bereich um 2,16 und im neutralen Bereich um 3,20 cmol/kg. Die variablen Ladungsstellen der organischen Oberflächen werden im sauren Bereich überwiegend von den sauren H^+ -Protonen besetzt, im neutralen pH-Bereich sind diese fast vollständig von den Calcium- und Magnesium-Kationen verdrängt. Diese Analyse samt Schätzggleichungen wurden in vorliegender Masterthesis erstmalig publiziert und können zur Ermittlung der Bodenfruchtbarkeit auf oberösterreichischen Grünlandstandorten herangezogen werden.

Auf Basis von 21 Bodenproben, die mittels drei unterschiedlicher Verfahren untersucht wurden (Standarduntersuchungen und Elektro Ultra Filtration (EUF) nach den Richtlinien für die sachgerechte Düngung und Albrecht plus vom Geobüro Christophel), konnten die daraus abgeleiteten Dünge- und

Kalkungsempfehlungen gegenübergestellt und interpretiert werden. Wesentlich war die gute Übereinstimmung bei den Messwerten von pH-Wert und Humus. Bei den ausgegebenen Empfehlungen wurden die verschiedenen Ansätze sichtbar: Das Konzept ausreichender Nährstoffgehalte (Richtlinien für die sachgerechte Düngung) gegenüber dem Konzept eines „optimalen Bodens“ mit definierten Nährstoffverhältnissen (Albrecht plus), was zu unterschiedlichen Mengeneempfehlungen, vor allem bei Magnesium führt. Mangel- beziehungsweise überversorgte Standorte wurden zum größten Teil in gleichsinniger Weise erkannt, extrem divergierende Empfehlungen kommen vereinzelt vor.

Vor allem für Personen im Bereich der Bodenkunde, der Beratung, aber auch für die landwirtschaftliche Praxis könnte diese Arbeit von Interesse sein.

Abstract

In this master thesis, mainly grassland areas in Upper Austria were subjected to soil sampling. These samples were analysed by means of a chemical soil test and the results were evaluated. By reviewing the current state of knowledge in the field of soil testing, criterias for soil fertility were defined. In particular, cation exchange capacity, acidity, humus, clay and nutrient content in soils are addressed. About 1,800 soil sample results were quantified. The evaluation through statistical methods was based on the “Small-scale Production Zones” (SPZ) in Upper Austria and area differences were surveyed.

The Inner Salzkammergut, Eisenwurzen region differs significantly from the other SPZ due to the highest humus contents of 10.61% humus on average: especially in the Alpine foothills with average contents of 6.22% in the Grieskirchner-Kremsmünster area, 6.47% in the Rieder area, 7.96% in the Vöcklabruck area and 8.17% in the Upper Innviertel. In direct comparison with the Outer Salzkammergut - the second SPZ in the Pre-Alps - with an average of 8.43% humus, equally significant differences were found. This is due to the geographical location of the two areas in the Alps and the Alpine foothills, respectively, with different climatic conditions and precipitation levels. Bad Ischl (Inner Salzkammergut, Eisenwurzen): 8.6 °C annual mean temperature and 1,741 mm annual precipitation, Gmunden (Outer Salzkammergut): 9.3 °C annual mean temperature and 1,245 mm annual precipitation (source: measuring stations of the Central Institute for Meteorology and Geodynamics, 1981-2010). The humus content in the high altitudes of the Mühlviertel is on average 9.25% and differs significantly from the middle altitudes of the Mühlviertel with an average of 6.88% humus. The differences between the two areas can be explained by the altitude and the associated cooler weather in the high altitudes, the resulting lower cutting frequency can also be cited as a complex of causes. Freistadt (central locations of the Mühlviertel): 7.2 °C annual mean temperature and 757 mm annual precipitation, Weitersfelden (high locations of the Mühlviertel): 6.5 °C annual mean temperature and 890 mm annual precipitation (source: ZAMG measuring stations, 1981-2010).

The acidity of a soil is characterized by the pH value. For light grassland soils (less than 15% clay content) the optimal pH level is at least around 5, for medium-heavy sites (15 to 25% clay content) around 5.5. About 15% of the samples reach less than the minimum pH range. Mean pH values for all SPZ fall within a narrower range of 5.67 to 6.37, yet a number of significant differences are present: Inner Salzkammergut, Eisenwurzen also has a significantly higher pH value than Outer

Salzkammergut and all other SPZ. Mühlviertel's mean value of high altitudes is 5.67 and significantly lower than in the middle altitudes and the other SPZ. One reason for pH differences in these regions is the geogenic subsoil. The calcareous parent rock in the Alps and Alpine foothills releases calcium and thus stabilizes the pH value in the soil. Whereas the siliceous subsoil with granite and gneis in the Mühlviertel achieves the opposite effect and lowers the pH value in the topsoil. The lowest mean pH value is found in the high altitudes of the Mühlviertel with 5.67.

In case of phosphorus content, a tendency to undersupplied soils was found, with the lowest mean content of 21.2 mg/kg (level A: very low supply) in the Inner Salzkammergut, Eisenwurzen. In the Grieskirchner - Kremsmünster area and in the Rieder area with just over 50 mg/kg the highest mean values (level C: sufficient supply). Significant differences are still present between the middle locations of the Mühlviertel with 43.6 mg/kg and the other four SPZ with mean values between 32 - 37 mg/kg (low supply in each case). Because no geogenic causes can be used for the differences, it also reflects the different management intensity. The very low phosphorus CAL content (CAL=Calcium Acetate Lactate) in the Inner Salzkammergut, Eisenwurzen can be partly compensated by the highest humus content and thus probably the correspondingly higher proportion of organically bound phosphorus. The organic phosphorus pool is not included in the CAL extract.

For the sampled areas around 85% can be classified as sufficiently to very highly supplied sites for potassium and about 99% for magnesium. Potassium CAL contents are significantly higher in the Mühlviertel with mean values of 252 – 271 mg/kg than in the other SPZ with average contents between 125 - 156 mg/kg. The potassium-rich geogenic soil-forming parent rock can be cited as the primary cause for this high level. The management with dairy cattle generally leads to sufficient supply of potassium with the farm manures, the intensity, however, only plays a secondary role. The lowest contents (125 mg/kg) are found in the extensive region of the Inner Salzkammergut, Eisenwurzen. The significantly highest magnesium content of 344 mg/kg is found in the Inner Salzkammergut, Eisenwurzen, followed by the Rieder area with 252 mg/kg. The other SPZ uniformly have significantly lower magnesium contents ranging from 180 to 221 mg/kg, but predominantly in the high supply levels.

Cation exchange capacity has a direct relationship with the soil's nutrient storage capacity. Basically, a distinction is made between the effective and potential cation exchange capacity (CEC_{eff} and CEC_{pot}). The CEC_{eff} describes the actual state at the current pH, the CEC_{pot} the maximum achievable capacity occupied by the cations Ca, Mg, K and Na at pH value above seven. Regression equations were

established with the data which can be used to estimate the CEC_{eff} and CEC_{pot} at known clay content, pH value and humus content. The statistical procedure showed that CEC_{eff} increases by 0.58 cmol/kg for a 1% increase in clay. An one unit increase in pH increases the CEC_{eff} by 13.8 cmol/kg. For humus, an increase of 1% humus causes an increase in CEC_{eff} of 1.66 cmol/kg. CEC_{pot} increases by 0.61 cmol/kg with a 1% clay increase. An increase of one unit in pH increases the CEC_{pot} by 9.93 cmol/kg. For humus, an increase of 1% humus causes an increase in CEC_{pot} of 1.87 cmol/kg. Thus, it can be quantitatively deduced which site characteristics and which measures influence the CEC: The stable increase of pH by 0.5 and 1.0, respectively, increases CEC accordingly, but can only be maintained with the regular lime applications. When creating regression equations by selecting the samples according to the classification of acidity (strongly acid, weakly acid, neutral to alkaline), the importance of humus content increases significantly: a 1% higher humus content increases the CEC_{eff} in the strongly acid range by almost 1 cmol/kg, in the weakly acid range by 2.16 and in the neutral range by 3.20 cmol/kg. In the acidic range the variable charge sites of the organic surfaces are predominantly occupied by the acidic H^+ -protons, while in the neutral pH range these are almost completely displaced by the calcium and magnesium cations. In this master thesis this analysis including estimated equations is published as the first of its kind and can be used to determine the soil fertility on Upper Austrian grassland sites.

Based on 21 soil samples, which were examined by means of three different procedures (Standard tests and Electro Ultra Filtration according to the guidelines for proper fertilization and Albrecht plus conducted by Geobüro Christophel), the derived fertilization and liming recommendations from these tests were compared and interpreted. The matching measurements of pH values and humus were essential. The different approaches became visible in the recommendations issued: concept of sufficient nutrient contents versus the concept of an "ideal soil" with defined nutrient ratios, leading to different quantity recommendations, especially concerning magnesium. For the most part, deficient or oversupplied sites were recognised in the same way. Extremely divergent recommendations occurred only in isolated cases.

Especially for people working in the field of soil science, soil consulting or practicing agriculture this thesis could be highly interesting.

Danksagung

Mein größtes Dankeschön gilt meinem Betreuer Dr. Georg Dersch für die professionelle und konstruktive Zusammenarbeit. Des Weiteren bedanke ich mich bei DI Herbert Eigner samt Team für die laufenden Inputs im Bezug zur Bodenbeprobung. Danke auch an meinen Arbeitgeber, der Boden.Wasser.Schutz.Beratung der Landwirtschaftskammer Oberösterreich, für die finanzielle Unterstützung. In diesem Zusammenhang auch ein Danke an meine Arbeitskolleginnen und Kollegen für die laufenden Anregungen und für die Unterstützung. Außerdem Danke an meine Freunde für das Korrekturlesen der Masterthesis. Zu guter Letzt ein Danke an meine Partnerin für die emotionale und moralische Unterstützung und die geleistete Nachsicht für manch intensivere Schreibeinheiten, auch zur späteren Stunde.

Inhaltsverzeichnis

Ehrenwörtliche Erklärung	I
Kurzfassung	II
Abstract	VI
Danksagung	IX
1 Einleitung	1
1.1 Verfahren zur Bodenbewertung	4
1.2 Ziele	5
1.3 Forschungsfragen und Hypothesen	6
1.4 Motivation	8
1.5 Methoden	9
1.6 Übersicht über Gliederung der restlichen Arbeit	10
1.7 Definition der wesentlichen Basisbegriffe	10
2 Stand der Forschung/Stand der Technik	11
2.1 Bodenuntersuchungen	11
2.2 Bodenuntersuchungsmethoden	12
2.2.1 AGES	13
2.3 Ausgewählte Nährstoffe und Bodenparameter	14
2.3.1 pH-Wert	14
2.3.2 Humus	16
2.3.3 Bodenart und Bodenschwere	19
2.4 Ionenaustausch	20
2.4.1 Kationenaustausch	22
2.4.2 Kationenaustauschkapazität	24
2.5 Bodenversauerung	27
2.5.1 Bodenversauerung und Kationenbelag	28
2.5.2 Bodenstruktur und die Rolle des Calciums	29
2.5.3 Kalk	29
2.6 Conclusio Stand der Technik/Stand der Forschung	31
3 Material und Methoden	32
3.1 Datengrundlage Bildungsinitiative Grünland (BIGL)	32
3.2 Verwendete Methoden	33
3.3 Beschreibung der Daten	33
3.3.1 Grundsätze der Bodenbeprobung	33
3.3.2 Probencharakterisierung	34
3.4 Gliederung nach Produktionsgrundlagen	35
	<hr/>
	X

3.4.1	Gliederung nach geologischen Zonen	35
4	Dokumentation und Ergebnisse	38
4.1	Gliederung nach Parameter und Kleinproduktionsgebieten	38
4.1.1	Humus	38
4.1.2	pH-Wert	40
4.1.3	Phosphor	42
4.1.4	Kalium	44
4.1.5	Magnesium	46
4.1.6	Fazit Statistik der Bodenparameter nach Kleinproduktionsgebieten	48
4.2	Auswertung der Kationenaustauschkapazität	51
4.2.1	Calcium	56
4.2.2	Magnesium	57
4.2.3	Kalium	59
4.2.4	Natrium	61
4.2.5	Aluminium	62
4.2.6	Fazit Kationenbelegung	63
4.3	Weitere Parameter der Kationenaustauschkapazität	66
4.3.1	Humus	66
4.3.2	Tongehalt	68
4.3.3	Humus- und Tongehalt	69
4.4	Multiple Regressionsanalyse	71
4.4.1	Gliederung nach dem pH-Wert	75
4.5	Labor- und Methodenvergleich	77
4.5.1	AGES	79
4.5.2	Agrana	79
4.5.3	Geobüro Christophel	80
4.5.4	Vergleich der Messwerte	81
4.5.5	Vergleich der Düngungsempfehlungen	83
4.5.6	Fazit Messwerte und Düngungsempfehlungen	89
5	Fazit	90
6	Ausblick	96
	Literaturverzeichnis	97
	Abbildungsverzeichnis	102
	Tabellenverzeichnis	105
	Abkürzungsverzeichnis	107
	Anhang	109

1 Einleitung

Boden – „ein nicht vermehrbares Gut“ (Amelung et al., 2018, S. 8).

Unser Planet Erde hat einen durchschnittlichen Radius (=Strecke von der Erdoberfläche bis zum Erdmittelpunkt) von 6.370 Kilometer (km). Die Erdkruste - also der äußere Bereich - hat eine Dicke von meist fünf bis 40 km. Lediglich die äußerste Schicht dieser Erdkruste ist von Organismen (und auch den Menschen) als Lebensraum nutzbar. Diese Schicht ist somit der belebte Teil der Erdkruste und wird als „Boden“ bezeichnet. Die Mächtigkeit (=Dicke) von Böden ist sehr variabel und kann von wenigen Zentimetern (cm) bis zu mehreren Zehnermetern reichen. Betrachtet man diese Größenverhältnisse wird deutlich, „dass Böden die dünne und verletzbare Haut der Erde bilden, die besondere Aufmerksamkeit bedarf“ (Amelung et al., 2018, S. 2).

Die wichtigsten Bodenfunktionen sind Lebensraum-, Regelungs- und Nutzungsfunktion. Neben Luft und Wasser, ist der Boden eines der schützenswürdigsten Gütern der Menschheit (Amelung et al., 2018). Dies wurde bereits in der Bodencharta des Europarates von 1972 festgehalten. Dabei wurden in zwölf Punkten Richtlinien definiert, die den Schutz der Böden als Produktionsgrundlage sicherstellen sollten. Des Weiteren wurde die besondere Bedeutung der Böden für die Menschheit als Produktionsgrundlage in den Fokus gestellt (Europarat, 1972).

Darüber hinaus gibt es auch neuerliche Bemühungen und Strategien zum Schutz der Böden. Im europäischen Raum wurde 2021 die Bodenstrategie der Europäischen Union (EU-Bodenstrategie) für 2030 von der europäischen Kommission verabschiedet. Unter anderem wird darin auf die Wichtigkeit der Böden hingewiesen und dass diese dünne Schicht die Zukunft der Menschheit maßgeblich prägen wird. Durch den schwammartigen Aufbau können gesunde Böden zudem große Mengen an Wasser speichern und leisten somit einen unverzichtbaren Beitrag vor Überschwemmungen und Dürren. Zudem sind Böden der größte terrestrische (=die Landoberfläche betreffend) Kohlenstoffdioxid (CO₂)

1 Einleitung

– Speicher auf dem Planeten. Dies macht die Böden zu einem unverzichtbaren Verbündeten in Bezug auf Klimaschutz und Anpassungen an den Klimawandel¹.

Die Entstehung eines Bodens ist ein langandauernder Prozess und wird neben dem Ausgangsgestein, sowie Relief (= Form der Oberfläche als Ebene, Senke mit oder ohne Grundwassereinfluss, Hanglagen mit unterschiedlicher Neigung und Erosionsgefährdung) auch von der jeweiligen Vegetation und dem Klima maßgeblich beeinflusst. Im Wesentlichen sind terrestrische Böden nach unten durch festes oder lockeres Gestein begrenzt. Vereinfacht dargestellt bestehen Böden einerseits aus verschiedenen Mineralien in diversen Arten und Größen (= mineralische Substanz) und andererseits aus der organischen Substanz – dem Humus. Diese beiden Substanzen sind in den unterschiedlichen Böden in bestimmter Art und Weise im Raum zueinander angeordnet und bilden das sogenannte „Bodengefüge“. So entsteht ein charakteristisches Hohlraumssystem, welches sich wiederum aus Poren unterschiedlicher Größe zusammensetzt. Diese Poren sind entweder mit der Bodenluft oder mit der Bodenlösung (= Wasser und gelöste Stoffe) gefüllt. Des Weiteren sind in diesen Hohlräumen die Bodenorganismen beheimatet, welche den Boden selbst zu einem großen belebten Organismus machen. Erst durch den Bewuchs mit Pflanzen konnte sich das System Boden entwickeln und eine entsprechende Struktur aufbauen. Durch die Dauer dieses Bewuchses entwickelten sich die Böden in bestimmte Richtungen. Einen permanenten Bewuchs weisen beispielsweise Grünlandböden auf, wohingegen Ackerland durch einen nicht ständigen und wechselnden Bewuchs charakterisiert ist (Amelung et al., 2018).

Als „Bodenfruchtbarkeit“ wird im Allgemeinen die Fähigkeit eines Bodens verstanden, den Pflanzen als Wachstumsstandort zu dienen (Amelung et al., 2018). Von fruchtbaren Böden spricht man, wenn der Boden für das Wachstum der Pflanzen eine optimale Struktur aufweist und die Bodenlebewesen einen günstigen Lebensraum vorfinden. Durch den Eintrag von organischen Stoffen, insbesondere durch die Wurzelausscheidungen der Pflanzen, werden Umsetzungsprozesse im Boden durch biologische Aktivität gestartet. Diese Prozesse sollten durch eine möglichst lange Bodenbedeckung und eine ausgeglichene Zufuhr von organischen Stoffen auf einem ausreichenden Niveau gehalten werden, um eine ausreichende Nährstoff- und Wasserversorgung sicherzustellen. Die natürliche Bodenfruchtbarkeit, wozu ein intaktes Porensystem

¹ (COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS *EU Soil Strategy for 2030 Reaping the Benefits of Healthy Soils for People, Food, Nature and Climate*, 2021)

1 Einleitung

ohne Verdichtungen gehört, soll durch gezielte Bewirtschaftung bewahrt, oder optimaler Weise verbessert werden. Dies erfordert auch umfassendes Knowhow, um das komplexe System Boden zu verstehen und adäquat zu bewirtschaften (Baumgarten, 2021). Neben der Bodenfruchtbarkeit werden zudem bodenexterne Kriterien wie Klima, Pflanzenart, Bodenbearbeitung, Pflanzenschutz und Düngung zur Ermittlung der tatsächlichen Ertragsleistung eines Bodens als Standort für Kulturpflanzen herangezogen. Entscheidend ist es, die jeweilige Nutzungsart auf die Ertragsfähigkeit eines Bodens abzustimmen. Diese Fragestellung mussten sich bereits die Menschen aus der Steinzeit stellen: Lohnt es sich den Wald zu roden und die Fläche ackerbaulich zu nutzen? Auch in der römischen und griechischen Literatur wurde die Koinzidenz (=Zusammentreffen zweier Ereignisse) von Bodeneinteilung und Nutzungseignung bereits beschrieben (Amelung et al., 2018). Schätzungen gehen davon aus, dass im Jahr 2050 rund zehn Milliarden Menschen den Planeten Erde besiedeln werden. Der Boden als Fundament der menschlichen Nahrungskette, soll diese Menschen auch künftig noch ernähren. Über den Wert eines gesunden und somit fruchtbaren Bodens sind sich Expertinnen und Experten einig. Eine gezielte Anpassung und Verbesserung der Bewirtschaftung soll dazu beitragen, die Bodenfunktionen nachhaltig zu erhalten und zu verbessern. Um eine langfristige Bodendegradation (= Bodenverschlechterung) zu verhindern, bedarf es Anpassungsstrategien und gegebenenfalls geänderte Bewirtschaftungsmethoden. Eine Abnahme der Bodenfruchtbarkeit könnte die gesamte weltweite Ernährungssicherheit aufs Spiel setzen¹.

Insbesondere stellen Grünlandflächen eine wertvolle Ressource als Nahrungs- und Futtermittelanbaufläche dar. Vor allem sind es alpine Regionen, wo es wenig Alternativen zur Grünlandbewirtschaftung von Flächen gibt. Die futterbauliche Verwertung vom Grünland erfolgt überwiegend durch Wiederkäuer (Rinder, Schafe, Ziegen). Eine nachhaltige Grünlandnutzung trägt zudem dem Erhalt wichtiger Bodenfunktionen bei. Zudem werden Kohlenstoff im Boden gespeichert, eine hochwertige Nahrungsmittelproduktion gesichert, sowie Landschaften geschaffen, die einen hohen volkswirtschaftlichen Nutzen (Tourismus) für die Region stiften. Die Auseinandersetzung mit dem Boden in der Landwirtschaft war auch in gewisse Studieninhalte vom Masterlehrgang Agrar- und Technologiemanagement integriert. Im Modul „Strategien in Pflanzenschutz und Pflanzenernährung“ wurde die Nährstoffdynamik im Boden erörtert, sowie

¹ (COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS *EU Soil Strategy for 2030 Reaping the Benefits of Healthy Soils for People, Food, Nature and Climate*, 2021)

1 Einleitung

Düngungsmaßnahmen auf Basis von Bodenuntersuchungsergebnissen erarbeitet und geplant. Speziell im Bereich von Bodenuntersuchungen und einhergehender Düngeempfehlungen, kann die Digitalisierung einen Mehrwert schaffen. Dabei liegt der Fokus, der Pflanze das zu geben, was sie braucht. Dafür braucht es zuerst einen Blick in den Boden um die Standorteigenschaften zu bestimmen und in weiterer Folge richtige Maßnahmen abzuleiten. Weiters können auch Satellitendaten im Bereich des Precision Farming herangezogen werden. Es gilt jedoch allenfalls zu beachten, dass durch die Fernerkundung, lediglich die Antwort der Pflanzen auf den jeweiligen Boden abgebildet werden kann. Eine präzise Aussage über tatsächliche Bodenverhältnisse kann nur anhand von Bodenuntersuchungen getroffen werden. Dies wurde auch im Modul „Datentechnik und Precision Farming“ umfassend diskutiert. Dies sind Gründe für die Auseinandersetzung und Beschäftigung mit Grünlandböden in vorliegender Masterthesis.

Im Folgenden werden international übliche Methoden und Verfahren genannt, die es ermöglichen den Boden, beziehungsweise (bzw) den jeweiligen Standort zu bewerten.

1.1 Verfahren zur Bodenbewertung

Über die quantitative und qualitative Bewertung eines Bodens mussten sich, wie in der Einleitung beschrieben bereits die Menschen aus der Steinzeit beschäftigen. Dabei entstanden Siedlungen primär in jenen Regionen, wo ausreichend Wasser und fruchtbarer Boden zur Verfügung standen. Die menschliche Bewirtschaftung der Flächen führte auch zu Konflikten über den Bodenverbrauch. Global betrachtet gibt es mittlerweile eine Vielzahl an Methoden, welche die Eignung eines Standortes für eine landwirtschaftliche Nutzung zu bewerten versuchen. Wobei bei jeder dieser Methoden angemerkt werden muss, dass es sich um ein spezifisches Modell handelt, welches in einer bestimmten Region und Zeit entwickelt wurde. Hier wird eine Auswahl an international gängigen Verfahren genannt:

- Storie Index Rating (SIR)
- Fertility Capability Classification (FCC)
- Land Capability Classification (LCC)
- Land Suitability Classification (LSC)
- Agro-Ecological Zones
- Soil Quality Assessment

1 Einleitung

Bei all den genannten Verfahren geht es letztendlich um die quantitative Bewertung der Bodenproduktivität. Moderne Methoden beziehen auch die Umweltleistungen eines Bodens mit ein. So werden beispielsweise beim Soil Quality Assessment-Verfahren gewisse grundlegende Bodenfunktionen betrachtet und bewertet. Dies sind die Regulierung des Wasserhaushaltes, die Erhaltung der Tier- und Pflanzenwelt, Filterfunktion für Schadstoffe, die Erhaltung der Bodenstruktur und die Speicherung diverser Nährstoffe (Amelung et al., 2018). In Summe können diese Parameter wiederum als Bodenfruchtbarkeit zusammengefasst werden. In vorliegender Masterthesis werden verschiedene Kriterien für die Bodenfruchtbarkeit beschrieben und dabei auf ausgewählte Parameter bezuggenommen. In Österreich etablierten sich zwei Verfahren zur Bodenbewertung: Zum einen wird die österreichische Bodenkartierung durchgeführt und als elektronische Bodenkarte (eBOD) dargestellt. Zum anderen erfolgt die Bodenbewertung mittels Finanzbodenschätzung. Der Einsatz von den genannten zwei Verfahren – welche sich seit den 1950er Jahren in Österreich etablierten – zeigt auch den bereits damals wichtigen Stellenwert der Ernährungssicherheit.

Um die Ziele der EU-Bodenstrategie 2030 zu erreichen, bedarf es gemeinsamer Anstrengungen und Initiativen zum Erhalt der Bodenfruchtbarkeit. Eine Möglichkeit besteht darin, sich noch genauer mit der dünnen Haut unter unseren Füßen zu befassen. Die genaue Kenntnis über den jeweiligen Standort und Boden kann ein möglicher Teil der Lösung sein.

Mittels einer Bodenuntersuchung können wertvolle Informationen zum gegenwärtigen Zustand und die Produktivität des untersuchten Bodens generiert werden. Zudem dient sie als Basis für die Erstellung einer sachgerechten Düngungsempfehlung. Eine Labor-Bodenuntersuchung bringt eine Menge an Daten, die es im Kontext des jeweiligen Standortes, der angebauten Feldfrucht, sowie dem Ertragsniveau zu interpretieren gilt (Baumgarten, 2021).

1.2 Ziele

Vorliegende Masterthesis befasst sich im ersten Teil mit der umfassenden Darstellung und Bewertung der Bodenuntersuchungen auf Grünlandstandorten in Oberösterreich (OÖ). 1.811 Ergebnisse von Grünlandbodenproben stehen aus einem Projekt der Landwirtschaftskammer Oberösterreich (LK OÖ) zur Verfügung. Das Projekt Bildungsinitiative Grünland (BIGL) wurde 2020 aufgrund der Herausforderungen im Bereich des Grünlandes initiiert. Diese Herausforderungen sind mitunter auf die klimatische Veränderung und somit einhergehender

1 Einleitung

vermehrter Extremwetterereignisse (Starkniederschläge, Dürre) zurückzuführen. Am Projekt nahmen 441 Landwirtinnen und Landwirte aus OÖ teil. Ziel war, sich umfassend mit den eigenen Flächen auseinanderzusetzen und Lösungen für eine künftige Bewirtschaftung zu finden. Hierfür wurden von den Teilnehmerinnen und Teilnehmern auf den eigenen Grünlandflächen Bodenproben gezogen und im Labor der Abteilung Bodengesundheit und Pflanzenernährung (BGPE) der Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherheit (AGES) untersucht. Bei 782 Proben wurde die effektive Kationenaustauschkapazität (KAK_{eff}) und davon bei 443 ausgewählten Proben noch pH-Acetat und bei 299 Proben der Tongehalt nachuntersucht. Ziel dieser weiterführenden Analyse und dieser Masterthesis ist es, die potentielle Kationenaustauschkapazität (KAK_{pot}) nun auch auf Grünlandböden nach pH-Wert, Humusgehalt und Bodenschwere (Tongehalt) darzustellen. Diese Darstellung war bis dato nur bei Ackerböden möglich, da für diesen Sektor bereits ausreichend Datenmaterial zur Verfügung stand.

Für den zweiten Teil der Masterthesis wurden 21 Bodenproben zumeist von Ackerstandorten aus Österreich, an drei verschiedene Labore zur Untersuchung geschickt. Dabei handelte es sich um 15 bereits getrocknete und kleiner 2 Millimeter (mm) gesiebte Böden von den ALVA-Ringversuchsproben der letzten Jahre. Weitere sechs feldfrische, homogenisierte Proben von Ackerflächen wurden von der Boden.Wasser.Schutz.Beratung vorbereitet. Somit konnte sichergestellt werden, dass jedes der drei Labore den exakt gleichen Boden zur Analyse erhält. Der Vergleich von bestimmten Parametern und vor allem die resultierenden Düngungs- und Kalkungsempfehlungen werden dargestellt und bewertet.

1.3 Forschungsfragen und Hypothesen

Die Datengrundlage wurde bereits in 1.2 vorgestellt: Bodenuntersuchungsergebnisse von Grünland aus allen Produktionsgebieten und Regionen in OÖ. In vorliegender Arbeit wurde bei der ersten Forschungsfrage der Fokus auf die Bodenparameter Säuregrad (pH-Wert), pflanzenverfügbare Nährstoffgehalte von Phosphor, Kalium und Magnesium sowie Humusgehalt gelegt und wie folgt formuliert: Wie wirken sich geogene und klimatische Unterschiede auf die Bodenparameter pH-Wert, Humus-, Phosphor-, Kalium- und Magnesiumgehalt auf Grünlandöden in OÖ aus? Dabei wird die erste Hypothese geprüft: *Die unterschiedlichen geogenen und klimatischen Standortverhältnisse spiegeln sich primär in den Bodenparametern pH-Wert, Humus- und*

1 Einleitung

Magnesiumgehalt wider. Die regionale Bewirtschaftungsintensität wirkt sich auf die düngungsrelevanten Parameter Phosphor- und Kaliumgehalt aus.

Der Bodenparameter Kationenaustauschkapazität (KAK) wurde bislang an Praxisbodenproben vom Grünland nur in Einzelfällen untersucht. Mit dem BIGL-Projekt steht erstmals ein ausreichender Datenpool, inklusive aller damit zusammenhängenden Parameter (pH-Wert, pH-Acetat, Humus- und Tongehalt, Magnesium- und Kaliumgehalt) für die Bewertung der KAK zur Verfügung. Die zweite Forschungsfrage lautet: Welcher Zusammenhang besteht zwischen der effektiven und potentiellen KAK im Bezug zum pH-Wert, Ton- und Humusgehalt auf Grünlandböden in OÖ? Folgende Hypothese soll geprüft werden: *Die KAK wird wesentlich von den Bodenparametern pH-Wert, Humus- und Tongehalt bestimmt, die quantitativen Auswirkungen unterscheiden sich auch bei den deutlich höheren Humusgehalten von Grünland nicht von Ackerstandorten: Mit steigendem Tongehalt pro %-Punkt erhöht sich die KAK (in cmol/kg) um 0,5 und mit steigendem Humusgehalt pro %-Punkt um 2 Einheiten.*

Im Rahmen dieser Arbeit wurde neben der analytischen Bestimmung der KAK_{eff} auch die KAK_{pot} näherungsweise mittels pH-Acetat ermittelt. Dafür wurde folgende Hypothese geprüft: *Der pH-Wert allein ist ausreichend zur näherungsweisen Ermittlung der potentiellen KAK, wenn eine repräsentative Anzahl von entsprechenden pH-Acetat-Werten zur Ableitung des Zusammenhangs zur Verfügung stehen.* Mit steigendem pH-Wert nähert sich die KAK_{eff} der KAK_{pot} an und bei pH 7 entspricht die KAK_{eff} der KAK_{pot} , weil alle negativen Ladungsstellen am Austauscherkomplex mit positiv geladenen Kationen belegt sind. Daraus ergibt sich eine weitere Hypothese: *Mit steigendem pH-Wert trägt der Humusgehalt zunehmend stärker zur Steigerung der KAK_{eff} und KAK_{pot} bei, weil die variablen Ladungsstellen primär auf den organischen Oberflächen liegen, während auf den Tonmineralien überwiegend die permanenten Bindungsplätze überwiegen.*

Um Kenntnis über den Säuregrad, die Nährstoffgehalte und die Humusgehalte und so weiter, eines Standortes zu erlangen, ist es notwendig den Boden einer exakten chemischen Untersuchung zu unterziehen. Hierbei gibt es neben den Untersuchungsstellen, die nach den Verfahren, die in den Richtlinien für die sachgerechte Düngung, 8. Auflage (RSGD 8) genannt sind, weitere Anbieter, welche Bodenuntersuchungen durchführen. Da unterschiedliche Analysemethoden zur Anwendung kommen, soll in der dritten Forschungsfrage geklärt werden: Wie unterscheiden sich verschiedene Bodenuntersuchungsmethoden hinsichtlich Düngungs- und Kalkungsempfehlungen auf Ackerstandorten? Grundsätzlich können Landwirtinnen und Landwirte erwarten, dass die Ergebnisse einer

1 Einleitung

Bodenuntersuchung nach einer nachvollziehbaren Vorgehensweise und Methode ermittelt und bewertet wurden. Die Ansätze dafür können jedoch unterschiedlich sein. Häufig orientieren sich die Empfehlungen an validierten Feldversuchen oder in Richtung eines „optimalen Bodens“. Zur Interpretation der Ergebnisse sollte die Wissenschaft entsprechende Empfehlungen bereitstellen (siehe RSGD 8). Mit den Untersuchungsergebnissen werden konkrete Düngungs- und Kalkungsempfehlungen für die untersuchten Flächen ausgewiesen. Dies führt zu folgender Hypothese: *Aufgrund unterschiedlicher Strategien bei der Bewertung von Bodenuntersuchungen werden unterschiedlich hohe Düngungs- und Kalkungsempfehlungen ausgegeben, diese gehen grundsätzlich jedoch in dieselbe Richtung.*

1.4 Motivation

Wie in der Einleitung dargelegt ist die Entstehung von Böden, neben anderen Faktoren stark von dem jeweiligen Standort abhängig. Die große Diversität von Böden allein in OÖ ist in Abbildung 1 ersichtlich.

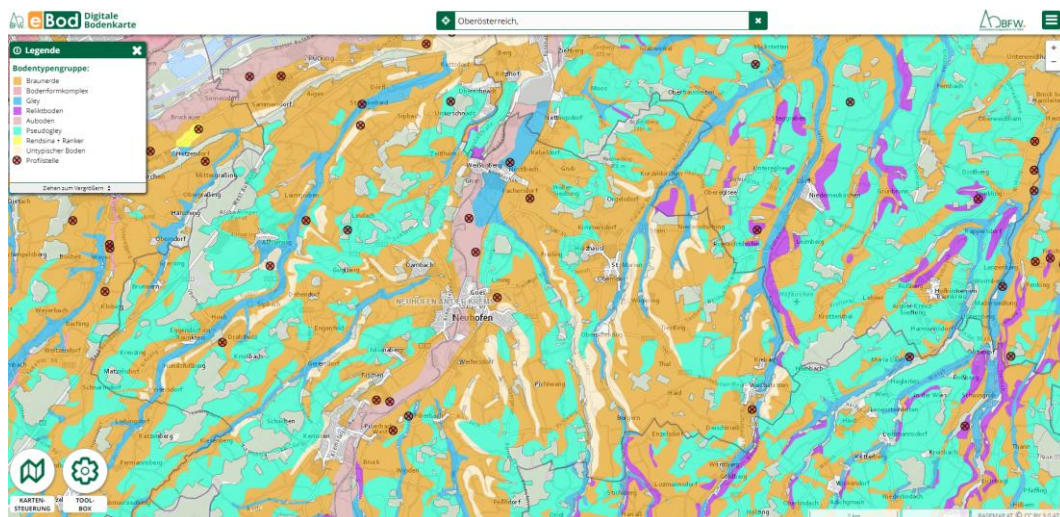


Abbildung 1: Auszug aus der elektronischen Bodenkarte über verschiedene Bodentypen in OÖ (Quelle: elektronische Bodenkarte.at).

Diese große Vielfalt an Böden wird bei der Bodenuntersuchung nur über die Einschätzung der standörtlichen Bodenschwere berücksichtigt. Der große Stichprobenumfang der untersuchten Flächen deckt die große Diversität der Böden in OÖ gut ab. Frühwirth stellte fest, dass die Landwirtinnen und Landwirte im Bereich des Grünlands vor massiven Herausforderungen stehen. Das Grünland leidet unter der Klimakrise und die Trockenheit speziell im Frühling und Sommer,

1 Einleitung

setzen den Futterflächen in OÖ massiv zu. Damit die Bäuerinnen und Bauern für die Zukunft gewappnet sind, bedarf es Anpassungsstrategien im Grünland (Frühwirth, 2019). Durch die Datenaufbereitung in praxistauglicher Form soll diese Masterthesis auch für Personen aus der landwirtschaftlichen Praxis von Nutzen sein, um die Flächen für künftige Bedingungen fit zu machen.

Im Bereich der verschiedenen Untersuchungsmethoden wurde in den letzten Jahren viel über die „richtige Bodenuntersuchung“ diskutiert (Vogt-Kaute, 2020). Mittlerweile gibt es einige Anbieter von Bodenuntersuchungen. Ob es „die richtige“ Methode gibt, kann in dieser Arbeit nicht erörtert werden, sehr wohl aber der Versuch eines Vergleiches von ausgewählten Methoden und den daraus abgeleiteten Nährstoffempfehlungen. Um für die Praxis einen groben Überblick zu schaffen, wurden Böden mit sehr unterschiedlichen Eigenschaften (Säuregrad, Bodenschwere, Humusgehalt, Nährstoffgehalte) ausgewählt und nach deren Analyse, die Empfehlungen verglichen. Damit kann die Diskussion zu den Bewertungen faktenbasiert für repräsentative Standorte erfolgen.

Ein Großteil der Arbeit wird sich mit den verschiedenen Parametern einer Bodenuntersuchung befassen und welche Zusammenhänge es mit der Bodenfruchtbarkeit gibt. Vor allem die KAK, der Säuregrad, der Ton-, Humus- und Nährstoffgehalt werden primär beleuchtet.

Der valide Datensatz soll schließlich aktuelle Ergebnisse im Bereich der Bodenuntersuchungen liefern und durch den Vergleich mit früheren Ergebnissen können Entwicklungstrends hinsichtlich Bodenqualität aufgezeigt werden. Letztendlich können die Daten in der landwirtschaftlichen Praxis, in der Beratung und auch in der Wissenschaft Verwendung finden.

1.5 Methoden

Mittels einer umfassenden Literaturrecherche soll der aktuelle Stand der Forschung/Stand der Technik im Umfeld des gewählten Themas ermittelt und dargestellt werden. Sämtliche Grünlandbodenproben wurden im Rahmen des BIGL-Projektes der LK OÖ gezogen, an die AGES versandt und nach den in den RSGD 8 genannten Verfahren und Methoden analysiert. Für den Laborvergleich von überwiegend Ackerstandorten wurden zudem zwei weitere Labore miteinbezogen: Das Untersuchungsverfahren nach Elektro Ultra Filtration (EUF), das auch in den RSGD 8 im Detail beschrieben ist und die Untersuchungen nach Albrecht Plus, die vom Geobüro Christophel angeboten werden. Die Auswertung

1 Einleitung

der Datensätze erfolgt quantitativ in Excel inklusive der Erstellung von Abbildungen und mittels Statistikprogramm IBM SPSS Statistics Version 26.

1.6 Übersicht über Gliederung der restlichen Arbeit

- Hauptteil der Arbeit
 - Darstellung des gegenwärtigen Stands des Wissens im Umfeld des gewählten Themas – Stand der Forschung/Stand der Technik
 - Bodenuntersuchungen/Untersuchungsmethoden
 - Beschreibung ausgewählter Bodenparameter
 - Material und Methoden
 - Beschreibung der Bodenproben und Darlegung der gewählten Methoden
 - Regionale Gliederung nach Kleinproduktionsgebieten
 - Dokumentation der Umsetzung des gewählten Lösungsansatzes – Dokumentation und Ergebnisse
 - Auswertung auf Ebene der Kleinproduktionsgebiete inklusive statistischer Verrechnung
 - Auswertung der Kationenaustauschkapazität
 - Multiple Regressionsanalyse der Kationenaustauschkapazität
 - Labor- und Methodenvergleich
- Fazit
 - Darstellung der gewonnenen Erkenntnisse aus den gemachten Erfahrungen
 - Abschließende Bewertung der Arbeit und Ausblick

1.7 Definition der wesentlichen Basisbegriffe

Kationenaustauschkapazität: charakterisiert das Austauschvermögen von Kationen wie Calcium, Magnesium, Kalium und Natrium von Böden

Humus: unter dem Begriff Humus wird die Summe der abgestorbenen organischen Substanz eines Bodens bezeichnet

pH-Wert: charakterisiert den Säuregrad von Böden, von sauer bis alkalisch

2 Stand der Forschung/Stand der Technik

2.1 Bodenuntersuchungen

Um Kenntnis über den gegenwärtigen Zustand und Produktivität eines Bodens zu erhalten, liefern chemische und physikalische Untersuchungen wertvolle Informationen. Auch sind diese Untersuchungen die Grundlage für eine sachgerechte Düngeempfehlung nach Nutzung und Bodenschwere (Grünland, Wein- oder Obstbau) und auf Acker: Je nach Ertragslage, Nährstoffbedarf und pH-Optimum der unterschiedlichen Feldfrüchte. Die chemischen Untersuchungen sollten in der Regel alle vier bis sechs Jahre auf derselben Fläche wiederholt werden, um Veränderungen bestimmter Bodeneigenschaften wie Nährstoffversorgung, pH-Wert oder Humusgehalt zu erkennen. Auf Basis dieses Wissens, können gezielte Maßnahmen zur Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit getroffen werden (Baumgarten, 2021).

Ein auf österreichische Verhältnisse abgestimmtes System stellt die Richtlinie für Sachgerechte Düngung im Ackerbau und Grünland dar. Die Grundlagen dafür liefern Feldversuche, welche in ganz Österreich durchgeführt werden. Die Richtlinien wurde vom Fachbeirat für Bodenfruchtbarkeit und Bodenschutz, der als beratendes Gremium für das Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus (BMLRT) agiert, erstellt. Dieser wissenschaftliche Beirat ist in §11 des österreichischen Gesundheits- und Ernährungssicherheitsgesetz (GESG 63/2002) verankert. Die Broschüre dient als Grundlage für die Bewertung von Bodenuntersuchungsergebnissen und stellt die Basis für eine sachgerechte Düngung dar. Die überarbeitete 8. Auflage (RSGD 8) stellt den aktuellen Stand der Wissenschaft dar und trägt zudem den Entwicklungen einer modernen Landwirtschaft Rechnung. Des Weiteren liefert sie auch die Basis für einen nachhaltigen und schonenden Umgang mit dem Boden und auch einer bedarfsgerechten Nährstoffversorgung der Pflanzen in der Landwirtschaft. Im Bereich der Bodenuntersuchungen liefert die Richtlinie eine profunde Interpretationsmöglichkeit. Sehr wohl wurden aber auch Grundlagen und Verfahren zur Bodenprobenentnahme, welche in Österreich im Ackerbau in der ÖNORM L 1055 und im Grünland in der ÖNORM L 1056 im Detail beschrieben sind, aufgelistet. (Baumgarten, 2021). Dies ist dem Umstand geschuldet, dass häufige Fehlerquellen bei Bodenuntersuchungen nicht in der Analytik an sich

2 Stand der Forschung/Stand der Technik

liegen, sondern oftmals bereits in einer unsachgemäßen Probennahme und der anschließenden Probenaufbereitung- bzw. aufbewahrung. Zudem stellt die Analytik bei einigen Parametern nur eine Momentaufnahme im Boden dar (Neuner, 2017).

Rühlicke unterstellt den Bodenuntersuchungen fünf Mindestanforderungen welche diese zu erfüllen haben:

- Eine enge Beziehung zur tatsächlichen Nährstoffaufnahme der Pflanze soll gewährleistet werden.
- Das Verfahren soll standardisiert sein und eine hohe Reproduzierbarkeit aufweisen.
- Die Methode und die Empfehlungen wurden in regionalen Feldversuchen getestet und validiert.
- Ein günstiges Preis-/Leistungsverhältnis für die Endkundinnen und den Endkunden.
- Die Empfehlungen sollen nachvollziehbar sein (Rühlicke, 2017).

Ziel einer jeden Bodenuntersuchung ist, die möglichst exakte Charakterisierung der Bodenparameter und Nährstoffe mit den realen Bedingungen. Hier spielen die Untersuchungsmethoden eine wesentliche Rolle (Baumgarten, 2021).

2.2 Bodenuntersuchungsmethoden

Im Bereich der Bodenuntersuchungen wurden weltweit verschiedenste Methoden erforscht und entwickelt, um die Zusammensetzung und auch die Verfügbarkeit von Nährstoffen in Böden zu analysieren und zu bewerten (Rühlicke, 2019a; Weidemann et al., 2020). Wie in 1.4 beschrieben, sind nicht nur die Böden in OÖ sehr divers, sondern weltweit. Dies hat zu einer Bodensystematik geführt, die alle vorkommenden Bodentypen- und -formen zu erfassen versucht. Diese Systematik wird in der Weltbodenkarte von 1974 (FAO-UNESCO 1974) detailliert beschrieben. Dementsprechend haben sich auf den verschiedenen Kontinenten, Ländern oder Regionen, verschieden Verfahren der Bodenuntersuchung etabliert, welche die standorttypischen Gegebenheiten am besten widerspiegeln (Amelung et al., 2018).

In Österreich werden in den RSGD 8 nur jene Untersuchungsverfahren und Berechnungsgrundlagen gelistet, welche in einer Vielzahl von Feldversuchen getestet und eingestuft wurden. In weiterer Folge wurden diese Verfahren entsprechend standardisiert und als ÖNORM oder auch im Methodenbuch des

2 Stand der Forschung/Stand der Technik

Verbandes der landwirtschaftlichen Untersuchungs- und Forschungsanstalten (VDLUFA) publiziert (Baumgarten, 2021). Diese kalibrierten Feldversuche, unter repräsentativen Versuchsbedingungen, sollen die standorttypischen Gegebenheiten berücksichtigen und zu entsprechend gesicherten Düngeempfehlungen führen (Rühlicke, 2019a; Weidemann et al., 2020). Laut Rühlicke sind Landwirtinnen und Landwirte gefordert, die verschiedenen Analysenmethoden, sowie deren Interpretation der Ergebnisse kritisch zu hinterfragen (Rühlicke, 2019a). Der Hinweis zur Anlage von Düngefenstern (=Verzicht auf eine bestimmte Düngungsmaßnahme auf einer kleinen Teilfläche), findet sich häufig in Fachzeitschriften. Grund dafür ist, die Wirkung zumindest nach Augenschein zu bewerten, besser wäre auch noch eine kleine Probeernte durchzuführen (Rusch et al., 2022).

Wie in 1.3 beschrieben wird in der Masterthesis auch eine Forschungsfrage mit einem Vergleich verschiedener Bodenuntersuchungsverfahren bearbeitet. Beim Laborvergleich wurden drei Labore mit unterschiedlichen Analysemethoden ausgewählt welche in 4.5 näher beschrieben werden. Die Masterthesis basiert zum größten Teil auf den Ergebnissen der Bodenuntersuchungen des BIGL-Projektes, wo die Proben in der AGES nach den in den RSGD 8 genannten Methoden analysiert wurden. Aus diesem Grund werden im Folgenden diese Methoden und Verfahren beschrieben.

2.2.1 AGES

Das Bodenlabor der AGES verwendet die in den RSGD 8 genannten Untersuchungsverfahren, die in zahlreichen Feldversuchen kalibriert wurden und weist eine analytische Verlässlichkeit auf. Angaben zur Wiederholbarkeit, Vergleichbarkeit oder zur Messunsicherheit sind dafür notwendig. Das akkreditierte Labor nimmt jährlich an Ringversuchen teil, wobei die Verfahren an Testböden mit unterschiedlichen Eigenschaften und Stoffgehalten geprüft werden. Probenvorbereitung: Nach Vergabe einer internen Kennzeichnung der Probe erfolgt die Trocknung bei maximal 40 °C für zwei bis vier Tage. Danach wird das Bodenmaterial durch Siebe zerkleinert. Die Maschenweite der Siebe beträgt 2 mm, dadurch wird nur die Fraktion des Feinbodens (unter 2 mm) untersucht. Je nach Untersuchung erfolgt eine Einwaage des Materials von 1 bis 10 Gramm (g) Feinboden. Somit beziehen sich die Ergebnisse der Bodenuntersuchung auf getrockneten Feinboden (Dersch, 2022).

Die für die Untersuchungen in der AGES, nach RSGD 8 verwendeten Verfahren einzelner Parameter, sind in Tabelle 1 ersichtlich. Dabei wurden nur jene Parameter ausgewählt, auf welche in der Masterthesis Bezug genommen wird.

2 Stand der Forschung/Stand der Technik

Parameter	Verfahren
Grunduntersuchung: pH-Wert, pflanzenverfügbare Anteile an Kalium und Phosphor	ÖNORM EN 15933, ÖNORM L 1087
Pflanzenverfügbares Magnesium	ÖNORM L 1093 oder CAT-Extraktion
Effektive Kationenaustauschkapazität, austauschbare Kationen Ca, Mg, K, Na, Al, Fe, Mn, H ⁺	ÖNORM L 1086-1
Humusgehalt	ÖNORM L 1080
Tongehalt oder Bestimmung der Korngrößenklassen	ÖNORM L 1061-2

Tabelle 1: Ausgewählte Bodenuntersuchungsparameter und -Verfahren (Quelle: RSGD 8 S.22+23).

2.3 Ausgewählte Nährstoffe und Bodenparameter

Nach einer durchgeführten Bodenuntersuchung liegen die Ergebnisse meist in schriftlicher Form vor. Diese werden nach der jeweiligen standörtlichen Bodenschwere und Nutzung (Grünland, Ackerbau und teilweise nach angebauten Feldfrüchten) nach den RSGD 8 bewertet. Im Folgenden werden ausgewählte Parameter vorgestellt.

2.3.1 pH-Wert

Das Wort pH setzt sich aus den lateinischen Wörtern *potentia Hydrogenii* zusammen, was so viel heißt wie „die Kraft des Wasserstoffs“. Der pH-Wert gibt Auskunft über das Verhältnis der sauer wirkenden positiven Wasserstoffionen (H⁺) und den alkalischen Hydroxidionen (OH⁻) (Weidemann et al., 2020). Darüber hinaus, lässt sich vom pH-Wert auf die Entstehung und die daraus resultierenden chemischen Eigenschaften eines Bodens schließen. Der pH-Wert ist einer der zentralsten Kenngrößen zur Einschätzung der Bodenfruchtbarkeit. An diesem Wert wird mitunter die Eignung eines Bodens als Pflanzenstandort oder als Lebensraum für Bodenlebewesen abgeleitet (Amelung et al., 2018). Auch für die Verfügbarkeit von Nährstoffen ist der pH-Wert wesentlich und deswegen bei der Interpretation des Analyseergebnis besonderes Augenmerk zu schenken (siehe Abbildung 2).

2 Stand der Forschung/Stand der Technik

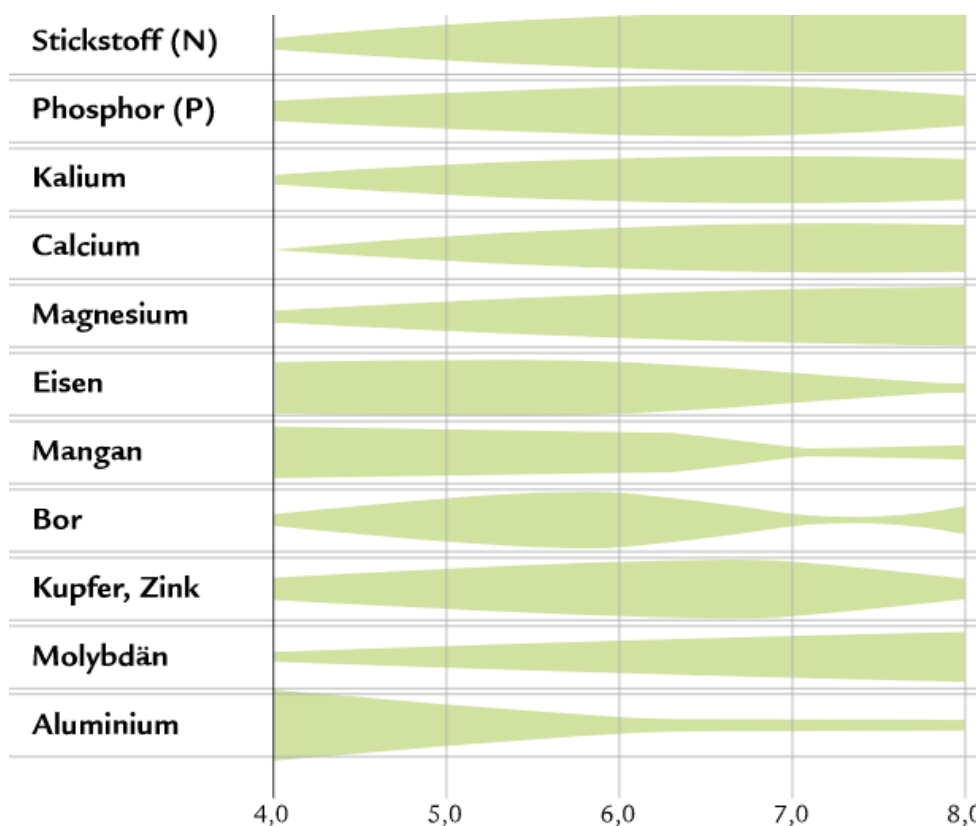


Abbildung 2: Verfügbarkeit ausgewählter Nährstoffe, sowie Aluminium in Abhängigkeit vom pH-Wert (CaCl_2) des Bodens – je breiter der Balken, desto besser die Nährstoffverfügbarkeit (Quelle: Hauert HBG Dünger AG, Das wichtigste zur Düngung).

Wie in Abbildung 2 ersichtlich, nimmt die Verfügbarkeit der meisten Nährstoffe mit sinkendem pH-Wert deutlich ab. Außer bei den Nährstoffe Eisen (Fe) und Mangan (Mn), sowie beim toxisch wirkenden Aluminium (Al), bei diesen Nährstoffen nimmt die Verfügbarkeit mit sinkendem pH-Wert zu.

Je nach Bodenschwere und Kulturart, gibt es ein anzustrebendes pH-Optimum (siehe Tabelle 2), welches durch gezielte Düngungsmaßnahmen – beispielsweise mit einer Kalkung – erreicht werden kann (siehe 2.5.3) (Baumgarten, 2021). Der Großteil der österreichischen Böden liegt im leicht sauren bis neutralen pH-Bereich zwischen 5,6 bis etwa 7,0. Verursacht wird die natürliche Versauerung der Böden durch Einträge von Protonen aus dem Regenwasser oder durch bodeninterne Prozesse. Ein zweiter Grund für die Versauerung ist dem Umstand geschuldet, dass bei vielen chemische Reaktionen Protonen – dabei vor allem positiv geladene Kationen, wie Calcium (Ca^{2+}) und Magnesium (Mg^{2+}) - verbraucht und diese dann mit dem Sickerwasser ausgewaschen werden. Diese stehen somit dem Boden

2 Stand der Forschung/Stand der Technik

nicht mehr zu Verfügung und der Boden kann nicht mehr ausreichend Säuren puffern (siehe auch 2.5) (Amelung et al., 2018).

Bodenschwere*	Acker		Grünland
	Hafer, Roggen, Kartoffel	Übrige Kulturen	
Leicht	> 5,0	> 5,5	Um 5,0
Mittel	> 5,5	> 6,0	Um 5,5
Schwer	> 6,0	> 6,5	Um 6,0

*Einstufung der Bodenschwere gemäß Tabelle 4

Tabelle 2: Anzustrebende pH-Werte (CaCl₂) in Abhängigkeit von Bodenschwere und Kultur (Quelle: RSGD 8, Seite 32).

Die Messung des pH-Wertes erfolgt in der Standardmethode mittels einer 0,01 molaren Calciumchlorid-Lösung (CaCl₂). Diese Methode hat den Vorteil, relativ konstant gegenüber Schwankungen von Konzentrationen oder Volumsänderungen in der Messsuspension zu sein. Zugleich wird damit eine Bodenlösung simuliert, wie sie in den Ackerböden des gemäßigt-humiden Klimabereichs vorherrscht. Eine weitere Möglichkeit zur Ermittlung des pH-Wertes ist die Messung in destilliertem Wasser (H₂O). Die dritte Möglichkeit ist die pH-Messung in einer 1 molaren Kaliumchlorid-Lösung (KCl) (Weidemann et al., 2020). Laut Rühlicke ist bei der Interpretation der Werte von unterschiedlichen Methoden Vorsicht geboten: Bei der Analyse im destillierten H₂O werden ausschließlich die Protonen in einer Bodenlösung erfasst und somit nur die aktuelle Acidität eines Bodens. CaCl₂ zeigt hingegen die potentielle Acidität eines Standortes mit teilweisem Protonenaustausch. Dabei liegen die Werte meist 0,3-1 Einheiten unter dem pH (H₂O) – erst ab pH 7 und darüber besteht kein Unterschied mehr zwischen den Methoden. Bei der Bestimmung in KCl werden alle Protonen im Boden ausgetauscht und somit liegen hier die Werte 0,9 Einheiten unter pH (H₂O) (Rühlicke, 2017, 2019a). Dies ist bei der Interpretation einer Bodenuntersuchung unbedingt zu beachten, denn ansonsten kann der pH-Wert schnell falsch eingeschätzt werden und die nachfolgenden Düngungsmaßnahmen am Ziel vorbeischießen (Weidemann et al., 2020). Die in der Literatur angegebenen unterschiedlichen pH-Werte werden in 4.5.4.2 anhand der 21 Bodenproben überprüft.

2.3.2 Humus

Als „Humus“ wird im Allgemeinen die gesamte Masse der abgestorbenen organischen Substanz eines Bodens bezeichnet. Zur organischen Substanz eines

2 Stand der Forschung/Stand der Technik

Bodens zählen alle pflanzlichen, mikrobiellen und tierischen Stoffe und deren Metabolite (=Umwandlungsprodukte). Auch die eingebrachten organischen Stoffe, wie Kompost oder Stallmist zählen zur organischen Masse. Die Stoffe befinden sich jeweils in unterschiedlichen Stadien des Abbaus und der Umwandlung, daher ist die stoffliche Zusammensetzung der organischen Substanz sehr heterogen. Die aktuelle Theorie beschreibt die Humusbildung als Prozess der Speicherung und Einlagerung von organischer Substanz - in unterschiedlichen Abbaugraden - in die Bodenstruktur. Ältere Humuskonzepte mit der Einbeziehung von Huminstoffen – speziell Huminsäuren – werden aktuell sehr kritisch betrachtet (Amelung et al., 2018; Lehmann & Kleber, 2015). In einer aktuellen Untersuchung von Gerzabek et. al (2022), wurde mittels einer molekularen Modellierung versucht, die Bedeutung der organischen Substanz samt deren Wechselwirkungen zu analysieren. Dabei zeigte sich, dass die Hauptfaktoren für die Stabilität der organischen Substanz Wasserstoffbrücken und Kationenbrücken sind. Die modellierten Humusaggregate weisen dabei Eigenschaften auf, die jenen der Huminsäuren sehr ähnlich sind. Diese huminsäureähnlichen Aggregatmodelle sind in der Bodenlösung stabil, wobei diese Stabilität stark von der jeweiligen Umgebung abhängig ist. Somit wurden sowohl die gängige Sichtweise der Huminsäuren als kleine Moleküle, als auch die aktuelle Theorie als molekulare Strukturen in Einklang gebracht (Gerzabek et al., 2022).

Die Stabilität der organischen Substanz lässt sich anhand des Verhältnisses von Kohlenstoff (C) zu Stickstoff (N) (=C/N-Verhältnis) festmachen. Je enger das C/N-Verhältnis im Boden, desto rascher erfolgt der Abbau der organischen Substanz. Dieser Prozess wird auch als „Mineralisation“ bezeichnet. Das anzustrebende Optimum vom C/N-Verhältnis liegt in etwa bei 10:1 (Baumgarten, 2021).

Die laboratorische Bestimmung des Humusgehalts erfolgt anhand der Elementaranalyse nach trockener Verbrennung gemäß ÖNORM L 1080 (siehe Tabelle 1). Im ersten Schritt dieser Methode wird zunächst der organische Kohlenstoff (C_{org}) ermittelt. Der durchschnittliche Gehalt an C der organischen Substanz beträgt 58 Prozent (%). Basierend auf diesem Wert ergibt sich für die Umrechnung auf den Humusgehalt ein Faktor rund 1,72 (=1 dividiert durch 0,58). Somit muss der C_{org} – Gehalt mit 1,72 multipliziert werden, um rechnerisch auf den Humusgehalt zu schließen. Die Einheit des Humusgehaltes wird meist in % oder in Gramm je Kilogramm (g/kg) Feinboden angegeben. Tabelle 3 zeigt die Einstufung der Humusgehalte für Acker- und Grünlandböden (Baumgarten, 2021).

	Gehaltsklasse A niedrig	Gehaltsklasse C mittel	Gehaltsklasse E hoch
Ackerland	< 2 %	2 - 4,5 %	> 4,5 %
Grünland	< 4,5 %	4,5 – 9 %	> 9 %

Tabelle 3: Einstufung des Humusgehalts für Acker- und Grünlandböden (Quelle RSGD 8, S. 26).

Im Zusammenhang mit der Bodenfruchtbarkeit spielt der Humusgehalt eine ganz wesentliche Rolle. Beispielhaft sind an dieser Stelle die Verbesserungen der Bodenstruktur, des Speichervermögens für Wasser und Nährstoffe, sowie der biologischen Aktivität zu nennen. Für den Erhalt fruchtbarer und somit gesunder Böden, sowie den Erhalt der Produktivität nimmt der Humus eine Schlüsselposition ein (Baumgarten, 2021).

2.3.2.1 Exkurs Klima

Immer wieder wird die zusätzliche Kohlenstoffspeicherung als Humus im Boden als relevanter Beitrag zur zum Klimaschutz angeführt. Da mit einer Steigerung des Humusgehalts, mehr C im Boden gebunden und somit die CO₂-Belastung in der Atmosphäre gesenkt werden kann. Häufig ist jedoch der Humusgehalt stark von der jeweiligen Bodenart abhängig: Schwere tonreiche Böden weisen bei gleichen klimatischen Bedingungen und der gleichen Menge an Kohlenstoffzufuhr meist höhere Humuswerte auf als Sand- oder Schluffböden (Amelung et al., 2018). Somit gibt es je nach Standortbedingungen auch gewisse natürliche Humusobergrenzen, welche nur durch permanente Zufuhr von C in Form von organischem Material überschritten werden können. Endet diese Zufuhr, wird sich der Humusgehalt wieder auf den standorttypischen Wert – das sogenannte „Humusgleichgewicht“ – einstellen. Dieses entwickelte sich im Laufe der Pedogenese (=Bodenentstehung) für den spezifischen Standort und kann dauerhaft nur schwer gesteigert werden. Durch falsche Bewirtschaftung kann sich der Humusgehalt jedoch rasch abbauen, womit auch Stickstoffverluste einhergehen können (Amelung et al., 2018; Baumgarten, 2021). In einer Studie von Wiesmeier et al. (2020) wurden verschiedene Kriterien definiert, die bei der Kohlenstoffbindung im Boden zu berücksichtigen sind. Der C_{org}-Gehalt im Humus wird durch verschiedene Bodenorganismen entweder in „neue Biomasse eingebaut oder unter CO₂-Freisetzung veratmet“ (Wiesmeier et al., 2020, S. 2). Um den C_{org}-Gehalt langfristig vor einem mikrobiellen Abbau zu schützen, muss dieser entweder in

Bodenaggregate eingeschlossen werden, an Tonminerale stabilisiert oder andere, leichter abbaubare Verbindungen stattdessen verstoffwechselt werden. Auch hier wird dem langfristigen Fließgleichgewicht - bei annähernd konstanten Umweltbedingungen - zwischen Eintrag organischen Materials und Abbau der organischen Substanz eine große Bedeutung zugeschrieben. Durch eine Änderung des Klimas oder eine abgeänderte Bewirtschaftung kann dieses Gleichgewicht verschoben werden. Unter „C-Sequestrierung“ wird die klimawirksame Speicherung von zusätzlichem C aus der Atmosphäre im Boden verstanden. Dies bedeutet, nicht nur den C_{org} im Boden zu erhalten und zu speichern, sondern durch Humusaufbau CO_2 -Emissionen ausgleichen und langfristig im Humus zu speichern. Auch hier wird auf die große Diversität von Böden hingewiesen. Aufgrund der unterschiedlichen Eigenschaften haben Böden auch ein unterschiedlich großes Speicherpotential an C. Diese Unterschiede können auch durch eine Optimierung der Bewirtschaftung nicht vollständig ausgeglichen werden (Wiesmeier et al., 2020). Somit bedarf es einer kritischen und standortspezifischen Betrachtung und Bewertung des Kohlenstoffspeichervermögens eines Bodens. Zudem braucht es eine nüchterne und objektive Betrachtung der Potentiale von CO_2 -Speicherung in der Landwirtschaft.

2.3.3 Bodenart und Bodenschwere

Grundvoraussetzung für die Bodenbildung ist die Verwitterung von Gesteinen. Im Laufe dieser Verwitterung werden Gesteinsmassen immer weiter zerkleinert, bis diese schließlich in Form von Bruchstücken und in weiterer Folge als Körner vorliegen. Diese Körner weisen unterschiedliche Größen auf, welche hinsichtlich ihres Durchmessers sehr stark variieren können (Amelung et al., 2018). Die Methode zur Bestimmung der Korngrößen ist in Tabelle 1 abzulesen. Die Klassifizierung der Korngrößen erfolgt in drei Kategorien: Sand (S), Schluff (U) und Ton (T) gemäß ÖNORM L 1050. Das Verhältnis dieser Korngrößen charakterisiert die jeweilige Bodenart, welche in der bodenkundlichen Kartieranleitung in einem Korngrößendreieck veranschaulicht wird. Wobei die Spitzen des Dreiecks für die Korngrößen S, U und T stehen (siehe Abbildung 3). In der Bezeichnung der Bodenart taucht auch der Name Lehm (L) auf, welcher jedoch keine eigenständige Korngröße ist, sondern vielmehr eine Mischung aus S, U und T. Die Bodenart wird oft auch als „Bodenschwere“ bezeichnet, dabei gilt: Je höher der Tongehalt, desto schwerer der Boden (siehe Tabelle 4) (Baumgarten, 2021).

2 Stand der Forschung/Stand der Technik

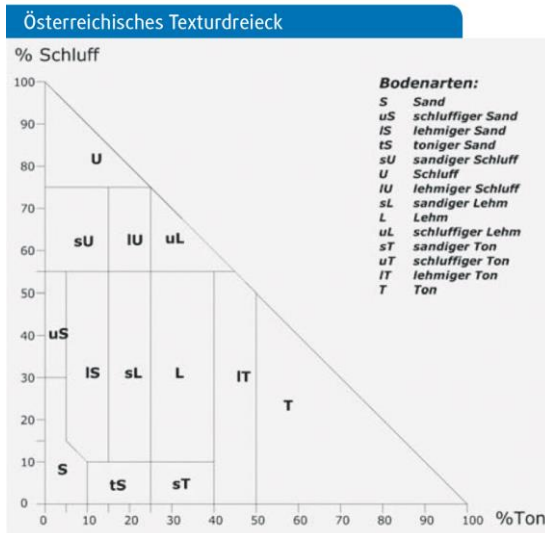


Abbildung 3: österreichisches Texturdreieck (Quelle: ÖNORM L1050).

Bodenschwere	Tongehalt	Bodenart (vgl. Abbildung 3)
Leicht	< 15 %	S, uS, IS, sU
Mittel	15 – 20 %	tS, U, IU, sL
Schwer	> 25 %	L, uL, sT, IT, T

Tabelle 4: Einstufung der Bodenschwere nach Tongehalt oder der Bodenart (Quelle RSGD 8, S. 25).

Zur alleinigen Bestimmung des Tongehalts eines Bodens kann auch die Bestimmung der Dichte einer Bodensuspension durch die sogenannte „Spindelmethode“ erfolgen (Baumgarten, 2021).

2.4 Ionenaustausch

Um wachsen zu können müssen Pflanzen Nährstoffe aufnehmen. Dafür eine wesentliche Rolle spielt jene Funktion des Bodens als Ionenaustauscher. Die Aufnahme von Nährstoffen durch die Pflanzen erfolgt durch Austauschprozesse von Wurzel mit den Bodenpartikeln und der Bodenlösung (Dersch & Spiegel, 2018). Aus chemisch - bodentechnischer Sicht bedeutet Ionenaustausch „die unspezifische Adsorption von Ionen an entgegengesetzt geladene Oberflächen“ (Amelung et al., 2018, S. 174). Diese Ionen werden durch elektrostatische Kräfte (sogenannte „Coulomb-Kräfte“) einerseits an die Oberfläche von Bodenpartikel

2 Stand der Forschung/Stand der Technik

gebunden und können andererseits, von anderen Ionen aus der Bodenlösung wieder ausgetauscht werden (Amelung et al., 2018). Der Großteil der Bodenpartikel hat eine elektrostatische Ladung an ihren Oberflächen. Bei Böden in den gemäßigten Klimaregionen sind vorwiegend negative Ladungsplätze vorhanden. Das bedeutet, diese Böden können vorwiegend Ionen speichern, die eine positive Ladung aufweisen (=Kationen) (Dersch, 2016). Somit wird deutlich, was die Adsorption von Ionen an der entgegengesetzten Oberfläche meint. Der Ionenaustausch ist zudem abhängig von der jeweiligen Größe der Oberfläche der Bodenpartikel. Insbesondere kleine Bodenpartikel, welche jedoch eine große spezifische Oberfläche besitzen, zeigen sich hier als besonders aktiv. Als Beispiel werden hier wiederum die Korngrößen aus 2.3.3 angeführt. Betrachtet man eine Reifraktion eines Tonteilchens unter einem dreidimensionalen Mikroskop, kann dieses unter optimalen Bedingungen – ohne jegliche Verdichtung – eine spezifische Oberfläche von bis zu 200 Quadratmeter je Gramm (m^2/g) erreichen (siehe Abbildung 4). Zum Vergleich hat Schluff eine spezifische Oberfläche von $1 \text{ m}^2/\text{g}$ und ein Sandteilchen nur $0,1 \text{ m}^2/\text{g}$. Bis zu $1000 \text{ m}^2/\text{g}$ kann die innere Oberfläche der organischen Substanz, bei ungestörter Struktur erreichen (Amelung et al., 2018).

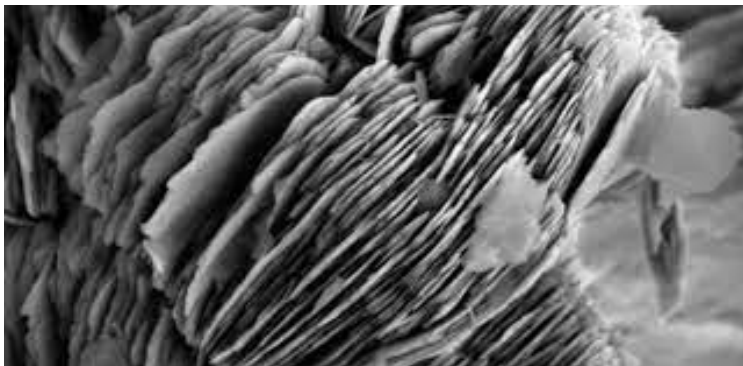


Abbildung 4: Das Schichtgefüge einer Tonfraktion (Kaolinit) unter dem Mikroskop (Quelle: Dr. Krakow Rohstoffe GmbH aus BGR-Fachkonferenz "Gewinnung und Verarbeitung von Kaolin und Feldspatrohstoffen in Deutschland", Hannover 28. November 2017).

Da Kationen an die Bodenpartikel mehr oder weniger stark gebunden sind, sind diese weitestgehend vor einer Auswaschung geschützt. Zudem können Pflanzen diese Nährstoffe in Abhängigkeit von der jeweiligen Bindungsstärke in unterschiedlichem Maß aufnehmen (Dersch, 2016). Zu den basisch wirkenden (= pH hebend) Kationen zählen Calcium (Ca^{2+}), Magnesium (Mg^{2+}), Kalium (K^+) und Natrium (Na^+), wohingegen Al, Fe, Mn und Wasserstoffionen (H^+) sauer wirken (= pH senkend) (Baumgarten, 2021).

2.4.1 Kationenaustausch

Der Austausch von Kationen findet an der Oberfläche von Bodenpartikel (Bodenkolloiden, Ton-Humus-Komplexen) statt und ist zudem vollständig reversibel (=umkehrbar). Ausgetauscht werden stets die gleichen Mengen an Ladungen – man spricht von „ladungsbalanciert“. Limitiert ist dieser Prozess nur durch den Austausch der Kationen zwischen der Bodenlösung und der Größe der Oberfläche des Austauschers. Sehr schnell kann sich an der äußeren Oberfläche des Austauschers ein chemisches Gleichgewicht mit der Bodenlösung einstellen. Somit ist vor allem die innere Oberfläche – die Zwischenschichten – der Bodenpartikel für eine stetig laufende, langsame Diffusion der Kationen bedeutend. Hier sind es vor allem die Tonminerale, welche aufgrund ihrer großen spezifischen Oberfläche den Kationenaustauschprozess begünstigen. Die Bindung der Kationen an die jeweilige Austauschoberfläche hängt im Wesentlichen von zwei Faktoren ab: Der Wertigkeit (=Ladung, gekennzeichnet durch hochgestelltes + oder -) und der Ionengröße. Grundsätzlich kann festgehalten werden, je höher die Wertigkeit des Kations, desto stärker wird es durch die „Coulomb-Kräfte“ von der negativen Ladungsoberfläche des Austauschers angezogen. Exemplarisch sind hier folgende Kationen anzuführen: $\text{Na}^+ < \text{Mg}^{2+} < \text{Al}^{3+}$ (Amelung et al., 2018). Des Weiteren sind die Kationen – unabhängig von ihrer Wertigkeit – mit einer angelagerten Schicht aus Wassermolekülen umgeben. Diese Hülle muss, ehe sich das Kation an den Austauscher anlagern kann, abgestreift werden. Der Kationenaustausch ist sehr komplex und von mehreren Faktoren abhängig. Somit lässt sich dieser Vorgang sehr schwer und wenn nur in theoretischen Modellen berechnen (Rühlicke, 2019a).

2.4.1.1 Die Vorstellung des idealen Bodens

Die Frage nach dem idealen Boden ist kein Phänomen des letzten Jahrzehnts. Bereits Mitte des 20. Jahrhunderts beschäftigten sich amerikanische Bodenforscher mit der Frage, der optimalen Verhältnisse an Kationen im Boden. Dabei wurden aus Versuchen von Bear&Toth (1948) mit kationengesättigten Tonen und zwanzig Böden aus New Jersey die Werte aus Tabelle 5 abgeleitet. Laut Rühlicke interpretierten daraus viele Leserinnen und Leser, dass optimales Pflanzenwachstum nur bei den bestimmten Verhältnissen möglich sei. $\text{Ca}:\text{Mg} = 6,5:1$, $\text{Mg}:\text{K} = 2:1$ und $\text{Ca}:\text{K} = 13:1$ (siehe Tabelle 5) (Rühlicke, 2019b).

2 Stand der Forschung/Stand der Technik

Sättigung eines idealen Bodens			
Ca [%]	Mg [%]	K [%]	H ⁺ [%]
65	10	5	20

Tabelle 5: Optimale Sättigung des Bodens mit ausgewählten Kationen (Bear&Toth 1948).

Die Forscher berichteten, dass ein optimiertes Pflanzenwachstum über einen großen Bereich an Nährstoffverhältnissen abzuleiten ist. Auch in Untersuchungen von William Albrecht wurde festgestellt, dass Böden eine hohe Calciumsättigung brauchen, um Pflanzen optimales Wachstum zu ermöglichen. Das sogenannte „Balanced Soil Konzept“ definiert optimale Kationenverhältnisse für die effizienten Abläufe chemischer, physikalischer und biologischer Prozesse im Boden. Die ungünstige Wirkung vom stark sauren pH-Wert des Bodens auf das Pflanzenwachstum, insbesondere die Stickstofffixierung bei Leguminosen wird unzureichend einbezogen. Die Forschungen ergaben, dass die im Boden stattfindenden Prozesse und die natürliche Bodenfruchtbarkeit nicht durch bestimmte Kationenverhältnisse beeinflusst wird. Die ausschließliche Fokussierung auf das „Balanced Soil Konzept“ führt zu einer ineffizienten Ressourcennutzung in der Landwirtschaft (Kopittke & Menzies, 2007). In den Abbildungen zur KAK in dieser Arbeit ist daher immer der pH-Wert zur Veranschaulichung der Zusammenhänge als unabhängige Variable auf der X-Achse enthalten.

In weiterer Folge entwickelten sich immer neue Ansätze eines optimalen Basensättigungskonzeptes, welche in folgender Tabelle 6 zusammengefasst werden. Nicht selten fehlt die Angabe, ob sich die Prozentangaben auf die effektive oder potentielle KAK beziehen.

Autor	Basensättigung		
	Ca [%]	Mg [%]	K [%]
Graham 1959	65-85	6-12	2-5
Albrecht 1975	60-75	10-20	2-5
Baumgarten 2021	75-90	5-15	2-5

Tabelle 6: Unterschiedliche Angaben von verschiedenen Autoren für die optimale Sättigung des Bodens mit ausgewählten Kationen (Quelle: verändert nach Rühlicke, 2019b).

Rühlicke fasst zusammen, dass die Angaben von verschiedenen Autoren mehr oder weniger stark differieren (Rühlicke, 2019b).

Ein weiterer Ansatz interpretiert die Kationenverhältnisse nur als momentanen ökologischen Zustand eines Bodens. Diese Verhältnisse sind reine Rechenwerte die in weiten Grenzen variieren, für die Pflanzen jedoch unbedeutend sind. Pflanzen würden dadurch weder einen Nutzen tragen, noch einen Schaden erleiden, wenn diese Verhältnisse nicht dem avisierten Optimum entsprechen. Viele Böden – welche von den anzustrebenden Verhältnissen stark abweichen – würden dennoch optimale Erträge liefern (Weidemann et al., 2020).

Fasst man alle Ionen zusammen, welche ein Boden speichern und an die Pflanzen abgeben kann wird von der „Austauschkapazität“ (AK) gesprochen (Dersch & Spiegel, 2018). Da wie in 2.4.1 beschrieben, vor allem die Kationen von Bedeutung sind wird im Folgenden die KAK beschrieben.

2.4.2 Kationenaustauschkapazität

Zum einen werden die Kationen adsorptiv gebunden und somit vor einer Auswaschung geschützt, zum anderen auch in einer Form zur Verfügung gestellt, welche die Pflanzen nutzen können. Diese beiden bedeutenden Faktoren fasst die KAK zusammen und ist somit einerseits eine Möglichkeit zur Standortcharakterisierung und andererseits auch ein Instrument zur Einschätzung der Bodenfruchtbarkeit (Weidemann et al., 2020). Die KAK ist somit eine Möglichkeit, das komplexe System Boden und seine Eigenschaften zu beurteilen. Des Weiteren wird auch die gesamte Nährstoffdynamik im Boden von der KAK beeinflusst (Thiere et al., 2013). Da in der KAK jene Ionen erfasst werden, welche an den Oberflächen der Ton- und Humuspartikel gebunden sind, wird die KAK wesentlich vom pH-Wert und der Zusammensetzung des Bodens beeinflusst. Vor allem die Gehalte an Humus und Ton sind entscheidend. Humose, tonhaltige Böden haben durch die hohe Sorptionskraft (siehe 2.4), eine wesentlich höhere KAK als beispielsweise humusarme Sandböden (Baumgarten, 2021). Sowohl Humus- als auch Tonteilchen haben eine negative Ladung. Unterschiede gibt es jedoch aufgrund des Faktors pH-Wert: Die negative Ladung der Tonminerale ist überwiegend unabhängig vom pH-Wert, diese Ladung wird daher als „permanente Ladung“ bezeichnet. Bei den Humusteilchen hat der pH-Wert jedoch Einfluss auf die negative Ladung, daher „variable Ladung“. Aufgrund dessen wird bei der KAK zwischen der KAK_{eff} und der KAK_{pot} unterschieden (Dersch, 2016). Eine schematische Darstellung der Ladungen und der KAK ist in Abbildung 5 ersichtlich.

2 Stand der Forschung/Stand der Technik

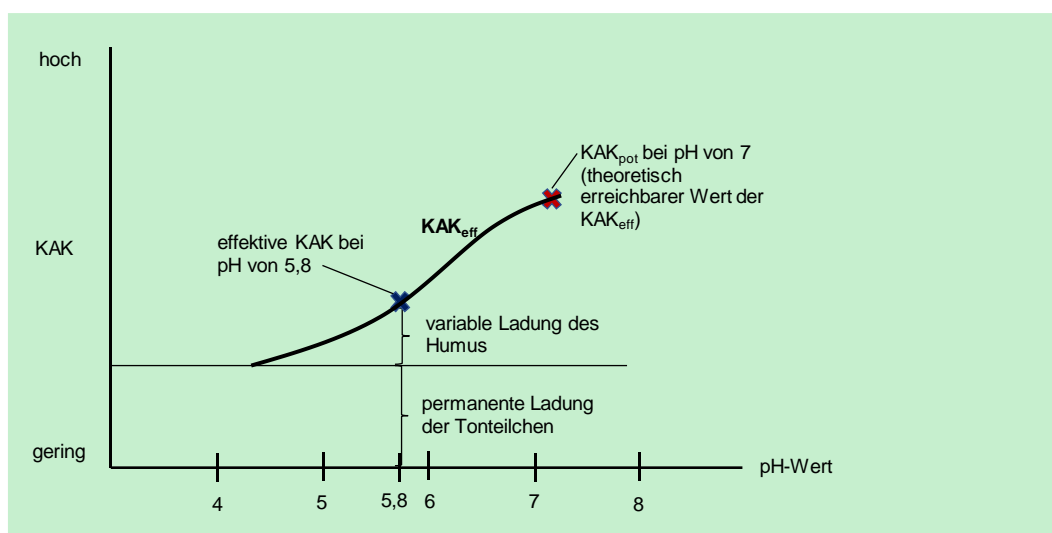


Abbildung 5: Schematische Darstellung der effektiven und potentiellen KAK und der Zusammenhang mit variabler und permanenter Ladung (Quelle: eigene Darstellung).

Grundsätzlich wird die AK eines Bodens in centimol Ionenäquivalent pro kg Boden (cmol/kg), oder in millimol Ionenäquivalent pro 100 Gramm Boden (mmol/100 g) angegeben (Baumgarten, 2021).

2.4.2.1 Effektive Kationenaustauschkapazität (KAK_{eff})

Die Bestimmung der KAK_{eff} erfolgt gemäß ÖNORM 1086-1 (siehe Tabelle 1). Dabei wird in einer ungepufferten Bariumchlorid-Lösung beim aktuellen pH-Wert des Bodens extrahiert (0,1 M $BaCl_2 \times 2H_2O$ im Verhältnis 1:20) (Baumgarten, 2021). Bei der KAK_{eff} wird die Summe der Ladungen aller austauschbaren Kationen (Ca, Mg, K, Na, Al und H^+), beim aktuellen pH-Wert des Bodens bestimmt (Amelung et al., 2018). Also jene Menge der Kationen, welche ein Boden beim jeweiligen pH-Wert binden kann. Ändert sich der pH-Wert im Boden, verändert sich auch die KAK_{eff} . Dabei gilt: Mit steigendem pH-Wert, steigt auch die KAK_{eff} und umgekehrt (Rühlicke, 2019a). Die KAK_{eff} kann – sofern Ton- und Humusgehalt bekannt sind – für österreichische Ackerstandorte mit pH-Werten über 6,5 anhand folgender Formel näherungsweise abgeschätzt werden: $KAK_{eff} [cmol/kg] = (Humusgehalt [\%] \times 2) + (Tongehalt [\%] / 2)$ (Baumgarten, 2021). In der Auswertung von Danneberg (1999) wurden anhand einer multiplen Regressionsanalyse zahlreiche Schätzequationen berechnet, welche zur Ermittlung der KAK aus dem Gehalt an Humus und Ton abgeleitet werden (Danneberg, 1999). Auf Grundlage dieser Auswertung wird in 4.4 erstmalig auch für oberösterreichische Grünlandböden diese Analyse durchgeführt.

2 Stand der Forschung/Stand der Technik

Auch besteht die Möglichkeit die absoluten austauschbaren Mg^{2+} und K^+ - Kationen rein rechnerisch aus den Gehalten an Mg (aus $CaCl_2$ -Methode) und K (aus CAL-Methode) zu ermitteln. Beide Methoden erfassen überwiegend die austauschbare Fraktion. Dies wurde auch durch Auswertungen von Ringversuche bestätigt, woran zwanzig Bodenlabore teilgenommen haben. Bei Mg liegt die statistische Bestimmtheit bei fast 94%, bei K bei 98% (Dersch, 2017).

2.4.2.2 Potentielle Kationenaustauschkapazität (KAK_{pot})

Im Vergleich zur KAK_{eff} , wird bei der KAK_{pot} das maximale Austauschvermögen an Kationen eines Bodens bestimmt (Weidemann et al., 2020). Diese wird in einer gepufferten Lösung bei pH 7 bis 8 bestimmt. Auf sauren Böden gilt KAK_{eff} kleiner KAK_{pot} , da eine Steigerung des pH-Wertes auf 7 bis 8 automatisch eine Zunahme der variablen negativen Ladungsplätzen zur Folge hat und somit mehr Kationen gebunden werden können (Amelung et al., 2018). Ab einem pH-Wert größer 7 werden die negativen Ladungsplätze am Humus ausschließlich mit basischen Kationen belegt (Dersch, 2016). Bei pH-Werten kleiner 5 werden die sauer wirkenden Kationen (siehe 2.4) stärker adsorbiert (Baumgarten, 2021). Auf humosen, sauren Sandböden ist dieser Unterschied besonders groß, da hier der Anteil an variablen Ladungen an der gesamten Oberflächenladung stark dominiert. Mit der KAK_{pot} lässt sich somit ermitteln, welchen Wert die KAK_{eff} theoretisch durch eine Optimierung des pH-Wertes maximal erreichen kann. Vor allem aber dient die KAK_{pot} als quantitatives Kriterium zur Klassifikation eines Bodens (Amelung et al., 2018).

Da der Großteil der Böden im leicht sauren Bereich angesiedelt ist, ist es ökologisch sinnvoller die Basensättigung auf die KAK_{eff} zu beziehen. Grund dafür ist, dass für die KAK_{pot} generell ein pH-Wert von 7 im Boden notwendig ist, und dieser auf vielen Böden nicht nachhaltig erreicht und dauerhaft gehalten werden kann (Baumgarten, 2021). Eine volle Ausschöpfung dieser Kapazität ist oftmals nicht möglich und somit die KAK_{pot} als Berechnungsgrundlage für Düngeempfehlungen nur unter bestimmten Bedingungen (zum Beispiel bei Böden um pH 7) sinnvoll (Weidemann et al., 2020).

Für die KAK ist die Quantität und Qualität des Austauschkomplexes entscheidend. Maßgeblich dafür ist neben der Bodenart – hierbei vor allem der Tongehalt –, sowie der Humusgehalt und Säuregrad eines Bodens. Die KAK spielt besonders in der Bodenkunde eine wichtige Rolle, da die Böden teilweise massiven Schwankungen unterliegen. An dieser Stelle ist der Waldboden zu erwähnen, wo pH-Werte von extrem sauer bis alkalisch zu finden sind. Nichts desto trotz gewinnt die Bestimmung der KAK auch in der landwirtschaftlichen Bodenuntersuchung

2 Stand der Forschung/Stand der Technik

(Acker- und Grünlandstandorte) immer mehr an Bedeutung und erfreut sich zunehmendem Interesse (Dersch & Spiegel, 2018).

Aktuell gibt es acht verschiedene Austauscherglösungen zur Bestimmung der KAK, wobei vier dieser Methoden in der landwirtschaftlichen Bodenuntersuchung gebräuchlich sind. Diese werden in Tabelle 7 zusammengefasst.

Verfahren/Methode	Beispiel Anbieter/Labor
0,1 M Bariumchlorid	ÖNORM 1086-1 (siehe Tabelle 1)
1 M Ammoniumchlorid	VDLUFA
3 M Ammoniumacetat	Albrecht/Kinsey- Geobüro Christophel
0,4 M Lithiumchlorid	Unterfrauner

Tabelle 7: Methoden zur Bestimmung der KAK und Beispiele für Anbieter dieser Methoden (Quelle: Rühlicke, 2019b).

Laut Rühlicke liefert jede dieser Methoden, entsprechend der Bindungsstärke des Austauscher-Kations, unterschiedliche Ergebnisse, wodurch sie nur bedingt miteinander vergleichbar sind (Rühlicke, 2019b).

Da die KAK die Summe aller negativen Ladungen eines Bodens definiert, werden umgekehrt die Summe aller positiven Oberflächenladungen als „Anionenaustauschkapazität“ (AAK) eines Bodens bezeichnet. Auch unter sehr sauren pH-Werten eines Bodens ist die Summe an positiven Ladungsoberflächen sehr gering, weshalb die AAK im Vergleich zur KAK wesentlich kleiner ist und somit eine geringere Bedeutung hat (Amelung et al., 2018). Aus diesem Grund wird die AAK in dieser Arbeit nicht näher erörtert.

2.5 Bodenversauerung

Wie in 2.3.1 beschrieben, sind der Großteil der österreichischen Böden im leicht sauren pH-Bereich angesiedelt. Eine Bodenversauerung kann viele Ursachen haben, doch chemisch betrachtet findet stets derselbe Prozess statt: Es kommt zu einer Anreicherung von sauren H^+ -Ionen in der Bodenlösung (Dersch, 2016). H^+ -Quellen können Einträge durch Niederschläge, Bildung von Kohlensäure durch Bodenatmung, Abgabe von organischen Säuren, aber auch die Abgabe von H^+ durch die Pflanzenwurzeln sein (Amelung et al., 2018). Diese H^+ Ionen verdrängen die basischen Kationen von ihren negativ geladenen Plätzen an der

Humusoberfläche. In weiterer Folge liegen diese in gelöster Form in der Bodenlösung vor und können in tiefere Bodenschichten verlagert oder zur Gänze ausgewaschen werden. Somit sinkt neben dem pH-Wert auch der Gehalt der KAK_{eff} , da diese Kationen nicht mehr adsorbiert werden (Dersch, 2016). Die Geschwindigkeit in der ein Boden versauert, hängt zudem von der Fähigkeit des Bodens ab, Säureeinträge abzupuffern. Das sogenannte „Puffersystem“ eines Bodens bezeichnet im Grunde die chemischen Reaktionen, wo die sauren Kationen neutralisiert werden (Amelung et al., 2018). Hierfür haben insbesondere Carbonate eine große Bedeutung als Puffersubstanzen. Das in den RSGD 8 verwendete Verfahren zur analytischen Bestimmung des Carbonatgehalts ist der Tabelle 1 zu entnehmen. Die Angabe des Carbonatgehalts erfolgt in % und wird folgendermaßen eingestuft: <1% als gering, 1 bis 5% als mittel und >5% als hoch. Bei einem geringen Carbonatgehalt ist eine Düngung mit Kalk zu empfehlen (Baumgarten, 2021).

2.5.1 Bodenversauerung und Kationenbelag

Durch die Bodenversauerung ändert sich auch die Sättigung des Austauschers grundlegend. In gemäßigten Klimazonen – bei überwiegend schwach sauren Böden –, dominiert meist Ca mit einem Anteil von > 80% an der KAK_{eff} . Mg findet man meist in einem deutlich geringeren Maß von in etwa 5-15%, gefolgt von K (2-5%) und Na (<1%). Diese Belegung ist stark vom jeweiligen Standort abhängig und kann dabei stark variieren. Hohe Mg-Gehalte sind vor allem auf basischem Ausgangsgestein zu finden, da hier vermehrt Mg-Silicate freigesetzt werden. Auch tonreiche Böden weisen höhere Mg-Anteile auf. Hohe Na-Gehalte sind vor allem in Küstennähe, aufgrund des Salzgehaltes im Meer zu finden. Aber auch in Österreich nach den Wintermonaten, wo Straßen durch Streusalz von Eis befreit werden, ist in Straßennähe und Abflusswegen in den umliegenden Bereich oftmals ein erhöhter Na-Gehalt im Boden festzustellen. Neben den H^+ -Ionen steigt durch zunehmende Bodenversauerung auch der Gehalt an Al an der KAK_{eff} . Unter einem pH-Wert von 5,0 nimmt die Al-Sättigung stark zu (siehe Abbildung 2). Dadurch werden wiederum die basischen Kationen verdrängt. Zu hohe Gehalte an Al-Ionen in der Bodenlösung wirken für die meisten Feldfrüchte toxisch, wodurch es zu einem gehemmten Wurzelwachstum kommen kann. Dies wiederum könnte Phosphatmangel und eine erhöhte Anfälligkeit für Trockenstress für die Pflanzen bedeuten, da aufgrund des gehemmten Wurzelwachstums weniger Nährstoffe und Wasser aufgenommen werden können. Grundsätzlich sind die basischen Kationen essentielle Nährstoffe für die Pflanzen, aber auch für den Boden von großer Bedeutung (Amelung et al., 2018).

2.5.2 Bodenstruktur und die Rolle des Calciums

Sowohl Humus als auch Tonteilchen haben eine negative Oberflächenladung und können somit nicht direkt miteinander verbunden werden. Es braucht also eine positiv geladene Brücke, um die beiden Partikel zu stabilisieren. Diese Aufgabe übernimmt das Calciumion und neutralisiert hierbei die negative Ladung des Tonteilchens, als auch jene des Humuspartikels. Diese Brückenbildung des Ca von Ton und Humus wird als „Ton-Humus-Komplex“ bezeichnet (siehe Abbildung 6). Diese Verbindung ist wesentlich für eine entsprechende Aggregatstabilität und somit einer stabilen Bodenstruktur (=Krümelgefüge) verantwortlich. In weiterer Folge verbessern sich Bodeneigenschaften, wie der Wasser- und Lufthaushalt, aber auch die Aktivität des Bodenlebens wird gefördert. Die bessere Bodenstruktur wirkt sich letztendlich auch auf das Pflanzenwachstum und die Nährstoffaufnahme positiv aus. Somit ist eine ausreichende Ca-Versorgung einerseits für die ausreichende Ca-Sättigung am Austauscher wichtig, andererseits leistet sie auch einen wesentlichen Beitrag zur Verbesserung der Bodenstruktur und letztendlich zum Erhalt der Bodenfruchtbarkeit (Amelung et al., 2018; Baumgarten, 2021).

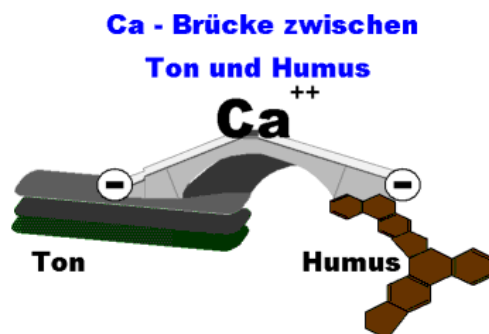


Abbildung 6: Calcium als Brücke zwischen Ton und Humus – „Ton-Humus-Komplex“ (Quelle: Bodengesundheitsdienst).

2.5.3 Kalk

Um den pH-Wert eines Bodens zu erhöhen, müssen neutralisationsfähige basische Stoffe zugeführt werden. Einer dieser Stoffe ist der Kalk, welcher in Form von Kalkstein, Mergel oder Dolomit in sehr vielen Regionen der Erde, als Ausgangsgestein vieler Böden in der Natur zur Verfügung steht. In der Erdkruste ist Ca eines der am häufigst vorkommenden Elemente – an fünfter Stelle. Aufgrund nicht ausreichender Mobilisation von Ca aus dem Ausgangsgestein, muss bei sauren Standorten eine externe Zufuhr von Kalk stattfinden. Diese Maßnahme hat sich schon seit längerer Zeit bewährt und dient zugleich der Strukturverbesserung des Bodens. Zudem begünstigt das Ca den Austausch der sauren Kationen und erhöht somit die Basensättigung (Amelung et al., 2018). Durch Kalkung sinkt die

2 Stand der Forschung/Stand der Technik

H⁺-Konzentration im Boden. Die dadurch frei gewordenen Ladungsstellen werden von den positiven Kationen (Ca und Mg) besetzt und somit erhöht sich auch die KAK_{eff}. Um die KAK_{eff} um eine Einheit (cmol/1000g Boden) zu erhöhen, müssen 200,4 mg Ca oder 121,6 mg Mg oder 391 mg K pro kg Boden zusätzlich an den negativen Ladungsstellen andocken und zumeist auch dafür eingebracht werden (Dersch, 2016). Dies entspricht bei einer Trockenrohdichte des Bodens von 1,5 g/cm³, einer Reinnährstoffmenge von rund 900 kg Calcium (1.259 kg CaO), 540 kg Magnesium (895 kg MgO) und 1.760 kg Kalium (2.129 kg K₂O) pro Hektar, bezogen auf eine Tiefe von 30 cm (Rühlicke, 2019b; Weidemann et al., 2020). Bei der Kalkempfehlung wird zwischen Erhaltungskalkung und Verbesserungskalkung unterschieden. Die Erhaltungskalkung dient zum Ausgleich der natürlich stattfindenden Versauerung. Wohingegen die Verbesserungskalkung zum Einstellen des von der jeweiligen Nutzungsart und Bodenart abhängigen pH-Optima dient (siehe 2.3.1). Diese ist nur auf Basis einer vorhergehenden Bodenuntersuchung durchzuführen. Der Kalkbedarf wird unter Einbeziehung des pH-Wertes in einer Calcium-Acetat-Lösung (pH-Ac) ermittelt. Eine Calciumacetat-Lösung hat einen pH-Wert von 7,2-7,6. Wird nun Boden zugegeben, wird ein Teil der H⁺-Ionen gebunden und der pH-Wert fällt. Dieser Abfall des pH-Wertes ist dem Kalkbedarf des Bodens proportional und die erforderliche Kalkmenge kann rechnerisch bestimmt werden (Baumgarten, 2021). Der Effekt einer regelmäßigen Kalkung wurde auch anhand eines Versuches aus der Steiermark nachgewiesen. Hier wurde durch eine jährliche Reinkalkmenge von 1.200 kg CaO pro Hektar, der pH-Wert im Oberboden (0 bis 30 cm) von 5,6 auf 6,7 angehoben. Dieser Wert blieb unabhängig von der jeweiligen Kalkart auf diesem Niveau. Gleichzeitig konnte auch eine Steigerung der KAK_{eff} um 4,5 cmol/kg festgestellt werden, weil die Ladungsplätze am Humus nun von den Ca-Ionen, anstatt der sauren Kationen belegt werden. Dieser Anstieg ist ausschließlich durch die Erhöhung des austauschbaren Ca von 13,7 auf 18,5 cmol/kg – also eine Erhöhung von 83% auf 88% des Ca an der Basensättigung am Austauscher – begründet. Somit kann festgehalten werden, dass eine regelmäßige Kalkung, in Abhängigkeit vom pH-Wert, eine Verbesserung der KAK bewirkt (Dersch, 2017; Dersch & Spiegel, 2018).

2.6 Conclusio Stand der Technik/Stand der Forschung

Der Begriff Bodenfruchtbarkeit kommt nahezu bei jedem der ausgewählten Parameter im Kontext einer Bodenuntersuchung vor. Die zentrale Bedeutung fruchtbarer und gesunder Böden wurde bereits in der Einleitung umgehend beleuchtet und wird durch die Zusammenhänge des komplexen System Bodens nochmals unterstrichen. Die Vorgänge im Boden sind in ständiger Wechselwirkung, umso mehr lohnt sich der genaue Blick in den Boden durch eine Bodenuntersuchung. Dabei sind die Grundsätze einer sachgerechten Probenziehung und Aufbereitung - um valide Werte zu erhalten - unbedingt zu beachten. In Bezug auf das Thema: Kriterien für Bodenfruchtbarkeit in Zusammenhang mit der KAK, Säuregrad, Humus-, Ton- und Nährstoffgehalt, wurden die Ansätze von verschiedenen Literaturquellen berücksichtigt und dargestellt. Sehr viele der ausgewählten Parameter haben einen direkten oder indirekten Einfluss auf die Bodenfruchtbarkeit. In der Auswertung der Daten werden hierzu nur bestimmte Größen herangezogen und analysiert.

Im Kontext zu den formulierten Forschungsfragen kann folgendes festgehalten werden: Deutlich wurden die unterschiedlichen Ansätze zwischen KAK_{eff} und KAK_{pot} dargestellt. Für die Fragestellung über den Zusammenhang dieser beiden Parameter wird vor allem der Bezug zum pH-Wert als wichtig eingestuft. Des Weiteren findet sich in der gesichteten Literatur zum Stand der Forschung überwiegend Ansätze aus dem Ackerbau. Doch auch für Grünlandflächen sind in Anbetracht der künftigen Herausforderungen für Landwirtinnen und Landwirte fundierte Informationen von Bedeutung, was für die umfassende Auswertung auf Grünlandböden in OÖ spricht. Nicht nur der pH-Wert, sondern auch der Ton- und Humusgehalt haben laut Stand der Forschung Auswirkungen auf die beiden KAK-Größen. Dieser Zusammenhang wird für Grünlandböden in OÖ quantifiziert

3 Material und Methoden

Durch die Ausarbeitung der Forschungsfragen und Aufstellung der Hypothesen wurden durch Literaturrecherche passende Methoden gewählt. Die gewählten Methoden werden in 3.2 genauer beschrieben. Die Umsetzung des gewählten Lösungsansatzes erfolgte durch Einsatz von Datenanalyseinstrumenten. Bei der Darstellung der Ergebnisse wurden passende Diagrammtypen gewählt. In der Datenbeschreibung werden die Grundsätze einer Bodenbeprobung, sowie die quantitative Probencharakterisierung dargestellt. Aufgrund des heterogenen Datensatzes wurde in der Masterthesis nach dem regionalen Kriterium „Kleinproduktionsgebiet“ (KPG) ausgewertet. Die konkrete Realisierung und Dokumentation werden an späterer Stelle in Kapitel 4 gezeigt.

3.1 Datengrundlage Bildungsinitiative Grünland (BIGL)

Die Herausforderungen, welche der Klimawandel für die österreichische Landwirtschaft bringt, sind omnipräsent. Auch die Grünlandwirtschaft ist davon betroffen und um darauf adäquat zu reagieren, bedarf es eines entsprechenden Wissens rund um die Pflanzenbestände samt Böden. Hierzu wurde für Grünlandwirtinnen und Grünlandwirte im Jahr 2020 von der LK OÖ das BIGL-Projekt initiiert. Daran beteiligten sich 441 Bäuerinnen und Bauern aus OÖ und setzten sich ein Jahr lang intensiv mit ihren Grünlandflächen auseinander. Ein Schwerpunkt im Projekt lag auch in der Ausarbeitung eines einzelbetrieblichen Konzeptes, in welchem eine Ziehung von Bodenproben am eigenen Betrieb durchgeführt wurde (Landwirtschaftskammer Oberösterreich, 2021). Die Bodenproben wurden im Bodenlabor der AGES nach den RSGD 8 genannten Verfahren auf die Parameter Phosphor (P), K, Mg, pH-Wert, Humus und KAK untersucht. Insgesamt wurden 1.811 Proben analysiert, wobei bei 782 auch die KAK_{eff} untersucht wurde. Von jenen 782 Proben wurde für diese Masterthesis noch bei 299 Proben der Tongehalt und bei 443 der pH-Acetat nachuntersucht. Diese Nachuntersuchung der Parameter war die Grundlage dafür, auch auf Grünlandböden die KAK nach Humusgehalt, pH-Wert und Bodenschwere darzustellen. Jene Landwirtinnen und Landwirte, welche eine Bodenuntersuchung in Auftrag gaben, unterzeichneten am Erhebungsbogen auch eine Datenschutzvereinbarung (siehe Abbildung 7). Durch diese Zustimmung wurde die

3 Material und Methoden

Weiterverarbeitung der Daten seitens der LK OÖ möglich und somit auch die Verwendung für diese Masterthesis.

Datenschutzerklärung:

Ich stimme zu, dass diese Daten einschließlich der Bodenuntersuchungsergebnisse von der Landwirtschaftskammer OÖ. für Beratung und statistische Zwecke verwendet werden. Eine Veröffentlichung oder Weitergabe an Dritte erfolgt ausschließlich in anonymisierter Form ohne einzelbetrieblichen Bezug.

Mit der Unterschrift erklären Sie sich einverstanden, daß Ihre Daten gemäß Datenschutzgesetz 2000 automationsgestützt verwendet werden.

Eingangsdatum:
Projektnummer:

Unterschrift

Abbildung 7: Die Datenschutzerklärung am Erhebungsbogen des Auftrages zur Bodenuntersuchung im BIGL-Projekt (Quelle: LK OÖ).

3.2 Verwendete Methoden

Die betriebsspezifischen Ergebnisse der Bodenuntersuchungen wurden im ersten Schritt gesammelt, im Tabellenkalkulationsprogramm Microsoft Excel aufbereitet und strukturiert. Bei der Eingabe wurden die Werte auf Plausibilität geprüft. Unvollständige oder fehlerhafte Ergebnisse wurden gestrichen, um eine profunde Auswertung zu gewährleisten. Des Weiteren wurden die betrieblichen Bodendaten je nach Betriebsadresse dem entsprechendem Haupt- und Kleinproduktionsgebiet zugeordnet. Die statistische Auswertung der Daten wurden mit dem Programm IBM SPSS Statistics Version 26 durchgeführt. Für die varianzanalytische Auswertung der Bodenparameter wurde die Prozedur „General Linear Model“ verwendet. Bei den Variablen wurden die Parameter pH-Wert, P, K, Mg und Humus geprüft. Bei den Vergleichen der KPG wurde im Anschluss der Test auf signifikante Differenzen mittels eines multiplen Mittelwertvergleiches nach Student-Newman-Keuls durchgeführt. Eine detaillierte Beschreibung der verwendeten Rechenprozeduren ist im Anhang zu finden.

3.3 Beschreibung der Daten

Im Folgenden werden die Grünlandbodenproben beschrieben. Dabei werden die Grundsätze der Bodenbeprobung sowie eine quantitative Probencharakterisierung erörtert.

3.3.1 Grundsätze der Bodenbeprobung

Die Bodenprobenziehung erfolgte durch die Landwirtinnen und Landwirte. Für das korrekte Ziehen einer Bodenprobe wurden die Teilnehmerinnen und Teilnehmern vorab über den korrekten Vorgang unterrichtet, um aufgrund bereits falscher Probenziehung unplausible Werte möglichst auszuschließen.

3 Material und Methoden

Für ein aussagekräftiges und valides Analysenergebnis ist eine korrekte Probenahme Grundvoraussetzung. Im Grünland beträgt die Beprobungstiefe 10cm. Die Probe sollte repräsentativ für den beprobten Boden sein. Somit muss versucht werden, möglichst einheitliche Flächen abzugrenzen. Nach Auswahl einer geeigneten Fläche werden mindestens 25 gut verteilte Einzelproben zu einer Durchschnittsprobe vereinigt. Dabei gilt es zu beachten, dass die Größe des beprobten Feldes fünf Hektar nicht überschreitet. Atypische Stellen wie Maulwurfshügeln, Feldmietenplätze, Tränkestellen und dergleichen, dürfen nicht beprobt werden, um die Durchschnittsprobe nicht zu verfälschen. Grundsätzlich erfolgt die Probennahme am Grünland im Frühjahr vor der ersten Düngung. Die Probennahme wird mittels Bodenstecher (siehe Abbildung 8) durchgeführt. Die Einzelproben werden in einem sauberen Gefäß gesammelt und durchmischt, Pflanzenreste oder Steine sollten hierbei gleich aussortiert werden. Im Anschluss wird die Mischprobe (circa 500 g) in eine wasserbeständige Verpackung gefüllt, beschriftet und samt Erhebungsbogen an die Untersuchungsstelle versandt (Baumgarten, 2021).



Abbildung 8: Ziehung einer Bodenprobe am Grünland mittels Bodenstecher (Quelle: Falkensteiner).

3.3.2 Probencharakterisierung

Insgesamt wurden 1.811 Grünlandproben gezogen und analysiert. Bei allen Proben wurden pH-Wert, Humus und die pflanzenverfügbaren Nährstoffe P, K und Mg bestimmt. Weiters wurde bei 782 Proben die KAK_{eff} bestimmt, sowie bei den sauren Proben zusätzlich der pH-Acetat-Wert zur Ermittlung des Bedarfes für die

3 Material und Methoden

Verbesserungskalkung. Um bei einer ausreichenden Anzahl von Proben die umfassende Bewertung der KAK (inklusive der potentiellen KAK) durchzuführen, wurde bei fast 300 Proben auch der Tongehalt und bei 443 Proben der pH im Acetatauszug nachuntersucht. Daraus ergibt sich die verfügbare Anzahl von Parametern (siehe Tabelle 8).

Parameter	Verfügbare Anzahl
BIGL-gesamt	1.811
pH-CaCl ₂	1.811
pH-Acetat	443
P, K, Mg	1.811
Humus	1.811
KAK _{eff}	782
Tongehalt (Spindelmethode)	299

Tabelle 8: Verfügbare Probenanzahl ausgewählter Parameter aus dem BIGL-Projekt.

3.4 Gliederung nach Produktionsgrundlagen

Aufgrund des großen Datensatzes und der damit verbundenen heterogenen Grundgesamtheit der Parameter wurden die Daten wie folgt strukturiert:

3.4.1 Gliederung nach geologischen Zonen

Wie bereits in 1.4 erwähnt, sind die Böden in Österreich sehr heterogen. Die natürlichen und landwirtschaftlichen Produktionsgegebenheiten in Österreich variieren je nach Standort mehr oder weniger stark. Aus diesem Grund wurde von der vormaligen Bundesanstalt für Agrarwirtschaft (nun Bundesanstalt für Agrarwirtschaft und Bergbauernfragen (BAB)) Österreich in acht Hauptproduktionsgebiete (HPG) und diese wiederum in 87 Kleinproduktionsgebiete (KPG) gegliedert (siehe Abbildung 9). Die in OÖ befindlichen HPG sind das Wald- und Mühlviertel, die Voralpen und das Alpenvorland. Die Unterteilung wurde anhand von langjährigen Geodaten durchgeführt, welche die landwirtschaftlichen Gegebenheiten in Österreich relativ gut widerspiegeln. Des Weiteren wurden Betriebstypen, Verwaltungsgrenzen,

3 Material und Methoden

klimate Zonen, sowie verschiedene Betriebsformen bei der Typisierung der KPG berücksichtigt. Bei der Betrachtung der Gebiete müssen diese unterschiedlichen Produktionsgrundlagen berücksichtigt werden (Statistik Austria, 2021; Wagner, 1990).

Landwirtschaftliche Haupt- und Kleinproduktionsgebiete Österreichs
Gebietsstand 01.01.2021

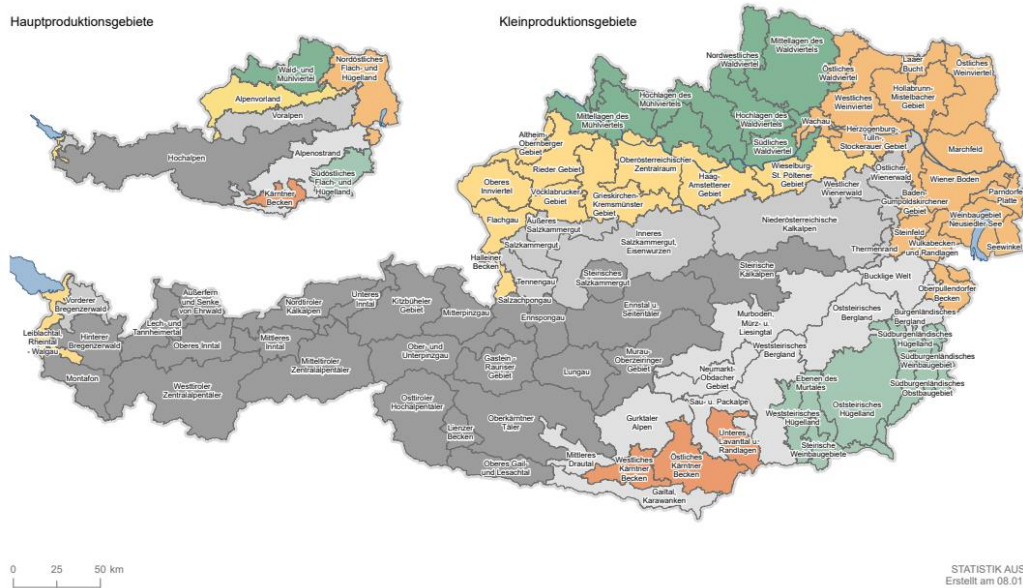


Abbildung 9: Landwirtschaftliche Haupt- und Kleinproduktionsgebiete in Österreich - Stand: 01.01.2021 (Quelle: Statistik Austria).

In Anlehnung an die Gebiete aus Abbildung 9 wurden die BIGL-Bodenproben den oberösterreichischen KPG zugeordnet. Abbildung 10 zeigt einen Überblick über diese Auswertung. Demnach wird deutlich, dass knapp 56% der Proben aus den beiden Gebieten des Mühlviertels stammen. Rund 19% stammen aus den beiden Regionen des Salzkammerguts. Alle weiteren Gebiete haben einen Anteil von unter 10% an der Gesamtprobenanzahl.

3 Material und Methoden

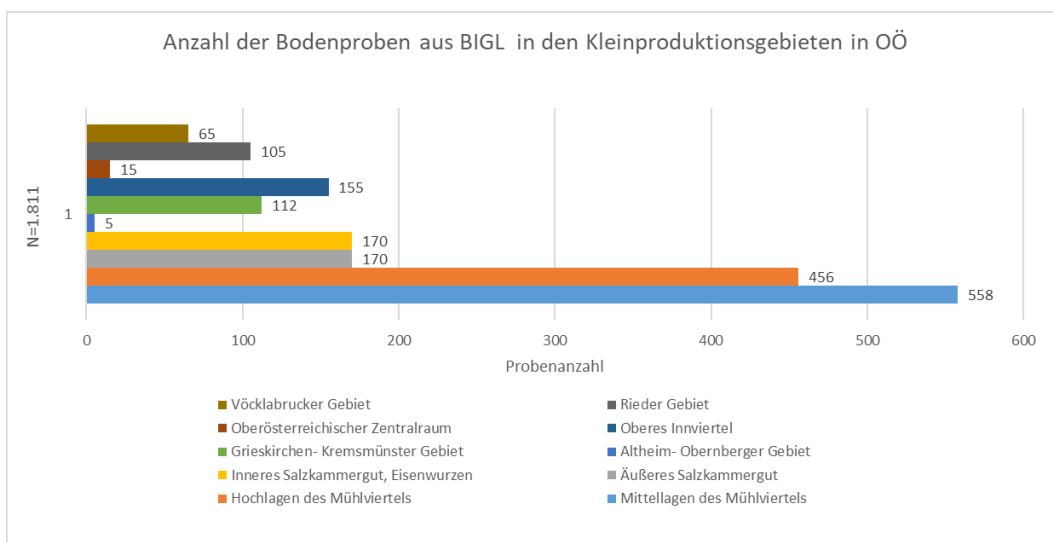


Abbildung 10: Einteilung der BIGL-Bodenproben nach den KPG in OÖ.

Aufgrund der geringen Probenanzahl im oberösterreichischen Zentralraum und dem Altheim-Obernberger Gebiet wurden diese in weiterer Folge aus der Auswertung ausgeklammert. Somit beziehen sich die folgenden Grafiken auf die restlichen 1.791 Proben aus jenen Gebieten, wo eine höhere Anzahl an Proben zu Verfügung steht.

4 Dokumentation und Ergebnisse

In diesem Kapitel wird die Umsetzung des gewählten Lösungsansatzes dokumentiert und beschrieben, sowie die daraus generierten Ergebnisse dargestellt und erörtert.

4.1 Gliederung nach Parameter und Kleinproduktionsgebieten

Die Gruppierung der KPG in den Boxplotgrafiken wurde aufgrund deren Zuordenbarkeit in ein HPG gewählt. Dabei gilt: Die beiden Gebiete des Mühlviertels zählen zum HPG Wald- und Mühlviertel, die beiden Regionen des Salzkammerguts zu den Voralpen und alle weiteren zum Alpenvorland. In den Statistiktabelle wurde die Anordnung aufgrund der besseren Lesbarkeit nach aufsteigendem Mittelwert gewählt. Nach dem multiplen Mittelwertvergleichstest nach Student-Newman-Keul werden homogene Untergruppen generiert, welche sich mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5% nicht signifikant unterscheiden. Bei der Interpretation der Ergebnisse ist zu beachten, dass in den Statistiktabelle jene Mittelwerte welche zur selben homogenen Untergruppe gehören, mit demselben Buchstaben (a, b, c, d, e) gekennzeichnet wurden. Bei Mittelwerten, welche mehreren Gruppen zugeordnet sind, stehen mehrere Buchstaben dabei.

4.1.1 Humus

In Abbildung 11 ist die Verteilung der Humusgehalte in den ausgewählten KPG ersichtlich. Die Punkte in der Grafik geben die jeweilige Probenanzahl an. Zudem wurden die Humusgehalte gemäß Tabelle 3 für Grünlandböden unterteilt (Gehaltsklassen A, C und E). Der Median der gesamten Proben liegt exakt bei 7,17% Humus und somit im Bereich der Gehaltsklasse C. Im Inneren Salzkammergut, Eisenwurzen befinden sich über 25% der Proben im hohen Humusbereich der Gehaltsklasse E. Anzustreben ist jedenfalls den Humusgehalt durch gezielte Bewirtschaftungsmaßnahmen auf den Flächen mittel- und langfristig zu erhalten oder zu verbessern. Die vielseitigen Vorteile eines - für den jeweiligen Standort - angepassten Humusgehalts sind im Kapitel 2.3.2 ausführlich beschrieben.

4 Dokumentation und Ergebnisse

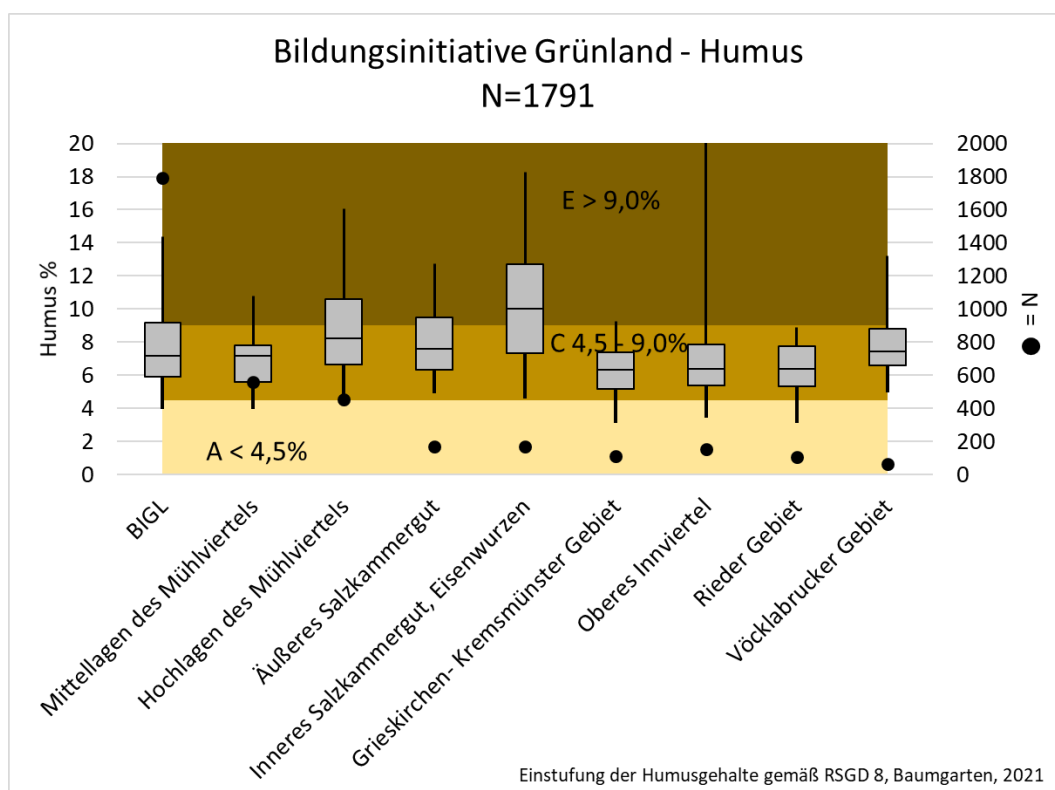


Abbildung 11: Verteilung der Humusgehalte der KPG in OÖ, inklusive Darstellung der Humusgehaltseinstufungen und Probenanzahl.

In Tabelle 9 ist die statistische Auswertung der Humusgehalte in den KPG ersichtlich. Das Innere Salzkammergut, Eisenwurzen hat einen signifikant höheren Humusgehalt als das Äußere Salzkammergut und alle weiteren KPG. Ein möglicher Faktor für die Unterschiede im Salzkammergut könnte die Lage des Äußeren Salzkammerguts sein. Dieses ist als Übergangsbereich zwischen den Alpen und dem Alpenvorland situiert und reicht somit geografisch nicht so tief in die Alpen wie das Innere Salzkammergut. Die unterschiedlichen klimatischen Verhältnisse werden zudem eine Rolle spielen. Auch die beiden Gebiete des Mühlviertels weisen einen signifikant unterschiedlichen Humusgehalt auf, wobei in den Mittellagen ein niedriger Humusgehalt als in den Hochlagen vorliegt. Die Unterschiede zwischen den beiden Gebieten können aufgrund der Höhenlage und somit der kühleren Witterung in den Hochlagen begründet werden. Das Grieskirchner-Kremsmünster Gebiet, das Rieder Gebiet sowie die Mittellagen des Mühlviertels unterscheiden sich bei den Humusgehalten nicht signifikant.

4 Dokumentation und Ergebnisse

KPG	Mittel	s	95% Konfidenzbereich		Sign.
			Untergrenze	Obergrenze	
Grieskirchner – Kremsmünster Gebiet	6,22	1,84	5,50	6,94	a
Rieder Gebiet	6,47	1,83	5,72	7,21	a
Mittellagen des Mühlviertels	6,88	2,09	6,55	7,20	a
Vöcklabrucker Gebiet	7,96	2,56	7,01	8,90	b
Oberes Innviertel	8,17	6,22	7,56	8,79	b
Äußeres Salzkammergut	8,43	4,07	7,84	9,01	b, c
Hochlagen des Mühlviertels	9,25	4,92	8,90	9,61	c
Inneres Salzkammergut, Eisenwurzen	10,61	4,57	10,02	11,19	d

Tabelle 9: Statistik des Humusgehalts (%) nach KPG.

4.1.2 pH-Wert

Abbildung 12 zeigt die Verteilung der pH-CaCl₂ Werte in den ausgewählten KPG. Die Einstufung der Bodenreaktion (stark sauer bis alkalisch) wurde gemäß RSGD 8 durchgeführt. Die Punkte in der Grafik geben die jeweilige Probenanzahl an. Der Median der gesamten Proben liegt exakt bei pH 5,89. In den Hochlagen des Mühlviertels liegt ein Teil der Proben bereits im sauren pH-Bereich. Gemäß Tabelle 2 ist für leichte Grünlandböden ein pH-Wert um 5 und für mittelschwere Böden ein pH-Wert um 5,5 anzustreben. Schwere Böden, mit über 25% Tongehalt, kommen im Datensatz faktisch kaum vor. Größtenteils befinden sich die Proben in dem für das Grünland angepassten schwach sauren pH-Bereich. Gemäß RSGD 8 sollten je nach Bodenschwere und Standort bestimmte pH-Werte angestrebt werden. Bei Unterschreiten dieses Bereiches werden gezielte Maßnahmen

4 Dokumentation und Ergebnisse

empfohlen. Um den pH-Wert zu heben, ist eine Kalkdüngungsmaßnahme das gängige Mittel zur Wahl (siehe auch 2.3.1 und 2.5.3) (Baumgarten, 2021).

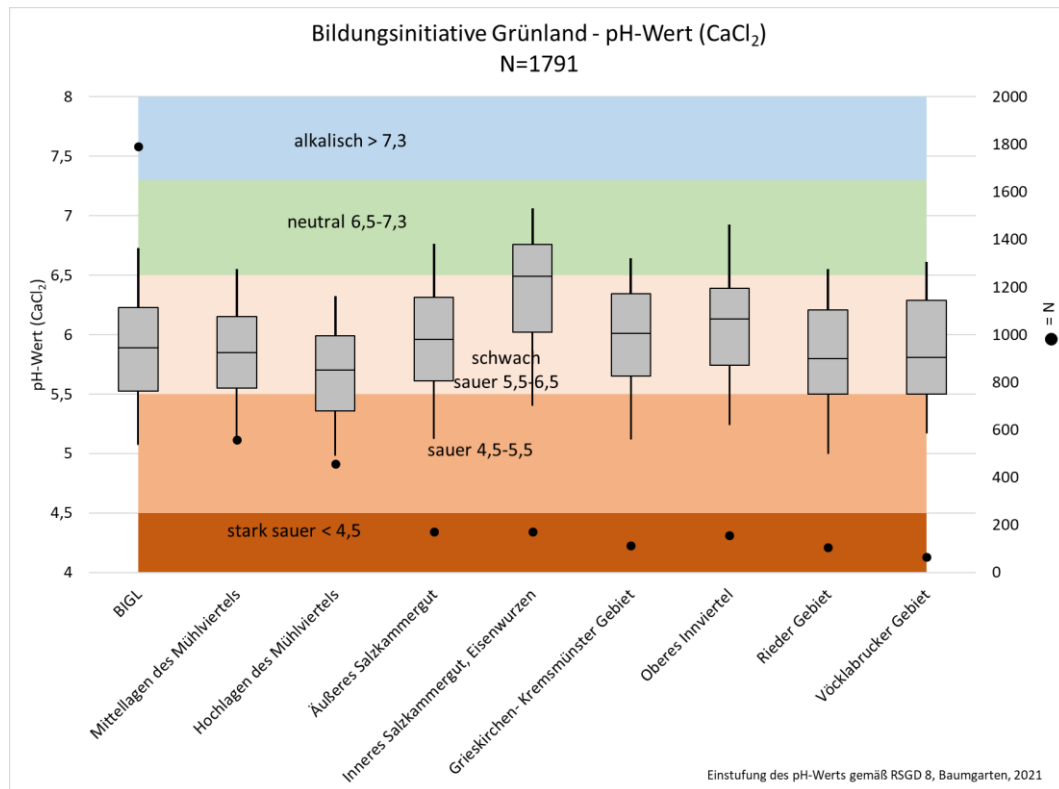


Abbildung 12: Verteilung der pH-Werte (CaCl₂) der KPG in OÖ, inklusive Darstellung der Einstufung der Bodenreaktion und Probenanzahl.

Tabelle 10 zeigt die pH-Wert Statistik der KPG. Auch beim pH-Wert weist das Innere Salzkammergut einen signifikant höheren Wert als das Äußere Salzkammergut und alle weiteren KPG auf. Der Mittelwert der Hochlagen des Mühlviertels liegt exakt bei 5,67 und ist signifikant niedriger als in den Mittellagen und alle anderen KPG. Laut Wagner (1990) wird das kalkhaltige Ausgangsgestein im Inneren Salzkammergut, Eisenwurzen der Grund für den Unterschied sein. Wohingegen der Untergrund mit Granit und Gneis im Mühlviertel den gegenteiligen Effekt erzielt und den pH-Wert im Oberboden senkt (Wagner, 1990). Auch das Obere Innviertel weist einen signifikanten Unterschied zu den übrigen KPG auf.

4 Dokumentation und Ergebnisse

KPG	Mittel	s	95% Konfidenzbereich		Sign.
			Untergrenze	Obergrenze	
Hochlagen des Mühlviertels	5,67	0,42	5,63	5,72	a
Rieder Gebiet	5,82	0,47	5,73	5,91	b
Mittellagen des Mühlviertels	5,85	0,44	5,81	5,88	b, c
Vöcklabrucker Gebiet	5,86	0,50	5,75	5,97	b, c
Äußeres Salzkammergut	5,95	0,49	5,88	6,02	b, c
Grieskirchner-Kremsmünster Gebiet	5,97	0,47	5,89	6,06	c
Oberes Innviertel	6,08	0,51	6,01	6,15	d
Inneres Salzkammergut, Eisenwurzen	6,37	0,51	6,30	6,44	e

Tabelle 10: Statistik des pH-Wertes nach KPG.

4.1.3 Phosphor

In der Abbildung 13 ersichtlich sind die Phosphorgehalte der Proben in den KPG. Die Punkte in der Grafik geben die jeweilige Probenanzahl an. Zudem wurden die Phosphorgehalte gemäß RSGD 8 für Grünlandböden unterteilt (Gehaltsklassen A bis D). Wobei bezüglich Nährstoffversorgung folgendes gilt: A=sehr niedrig, B=niedrig, C=ausreichend und D=hoch. Der Median aller Proben liegt bei 32,7 mg P/1000g und somit in Gehaltsklasse B. Auffällig ist hier das Innere Salzkammergut, wonach über 50% der Proben in der Gehaltsklasse A zu finden sind und somit eine sehr niedrige Phosphorversorgung vorliegt. Wobei hier angemerkt werden muss, dass diese Region zugleich die höchsten Humusgehalte aufweist.

Die niedrigen Phosphorgehalte können über die höheren Humusgehalte abgedeckt werden, da hierbei ein Teil des Phosphors organisch gebunden ist und die CAL-Methode diesen Phosphor-Pool nicht erfasst (Steffens et al., 2010). Im Gegensatz dazu, liegen im Rieder Gebiet über 25% der Proben in C und ebenso über 50% der Proben in Gehaltsklasse D. Auch im Grieskirchner Gebiet sind rund

4 Dokumentation und Ergebnisse

ein Viertel der Proben in C zu finden. Die Phosphorversorgung der Grünlandöden kann somit in den verschiedenen Gebieten in OÖ als sehr heterogen betrachtet werden. Um ein optimales Pflanzenwachstum zu gewährleisten, sollte jedenfalls auf Standorten mit sehr geringen Phosphorgehalten eine Ergänzungsdüngung erfolgen.

Gemäß RSGD 8 bilden die anfallenden Wirtschaftsdünger bei Grünlandbetrieben den Großteil der Nährstoffversorgung mit Hauptnährstoffen ab. Eine mineralische Ergänzungsdüngung ist nur bei Unterschreiten der Gehaltsklasse C notwendig (Baumgarten, 2021). Da dies bei sehr vielen der beprobten Standorte der Fall ist, sollten entsprechende Maßnahmen geplant und durchgeführt werden, um die Phosphorvorräte im Boden zu füllen.

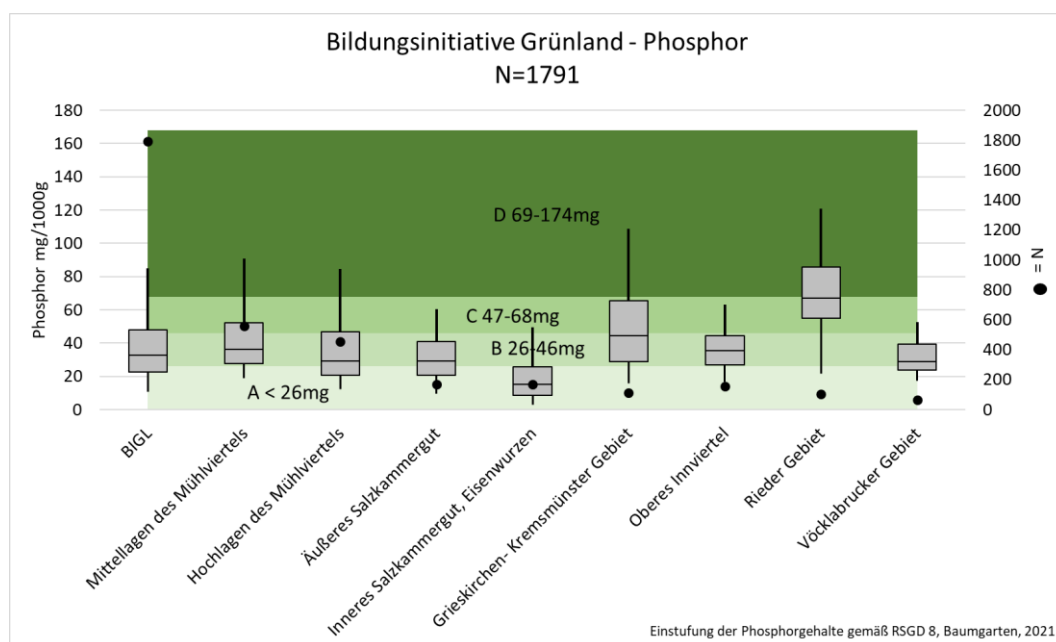


Abbildung 13: Verteilung der Phosphorgehalte der KPG in OÖ, inklusive Darstellung der Einstufung der Phosphorgehaltsklassen und Probenanzahl.

In Tabelle 11 wurden die statistische Auswertung des Phosphorgehalts der KPG dargestellt. Das Innere Salzkammergut, Eisenwurzen weist im Mittel von 21,23 mg P/1000g einen signifikant geringeren Gehalt auf, als alle übrigen KPG. Auch die Mittellagen des Mühlviertels unterscheiden sich von allen KPG signifikant. Die höchsten Phosphorwerte mit über 50 mg P/1000g wurden im Rieder Gebiet, gefolgt vom Grieskirchner-Kremsmünster Gebiet festgestellt, welche sich untereinander nicht signifikant unterscheiden.

4 Dokumentation und Ergebnisse

KPG	Mittel	s	95% Konfidenzbereich		Sign.
			Untergrenze	Obergrenze	
Inneres Salzkammergut, Eisenwurzen	21,23	21,60	17,63	24,82	a
Äußeres Salzkammergut	31,92	16,86	28,34	35,51	b
Vöcklabrucker Gebiet	32,12	12,03	26,32	37,92	b
Hochlagen des Mühlviertels	36,36	23,25	34,17	38,55	b
Oberes Innviertel	36,98	16,77	33,23	40,74	b
Mittellagen des Mühlviertels	43,61	25,71	41,63	45,59	c
Grieskirchner- Kremsmünster Gebiet	50,75	30,01	46,34	55,17	d
Rieder Gebiet	51,70	33,91	47,13	56,26	d

Tabelle 11: Statistik der Phosphorgehalte (mg P/1000g) nach KPG.

4.1.4 Kalium

Beim Pflanzennährstoff Kalium zeigt die Auswertung in Abbildung 14 die Verteilung der Proben in den KPG. Die Punkte in der Grafik geben die jeweilige Probenanzahl an. Zudem wurden die Kaliumgehalte wie die Phosphorgehalte gemäß RSGD 8 für Grünlandböden unterteilt. Ergänzt wurde noch die Gehaltsklasse E (=sehr hoch), da im Gegensatz zu Phosphor ein Teil der Proben in dieser Gehaltsklasse zu finden sind. Der Median aller Proben liegt bei 164,76 mg K/1000g und somit in Gehaltsklasse C. Auffällig sind die zwei Gebiete des Mühlviertels, bei denen in etwa die Hälfte der Proben in der hohen Gehaltsklasse D einzustufen sind. Auch diese Werte sind aufgrund des kristallinen Ausgangsgestein erklärbar. Alle weiteren KPG finden sich größtenteils in der als ausreichend eingestuften Nährstoffversorgung der Gehaltsklasse C.

Die Empfehlungen für eine Kaliumdüngung auf Grünlandböden gemäß RSGD 8 sind analog zu Phosphor zu bewerten. Aufgrund der hohen Kaliumgehalte in den Wirtschaftsdüngern von rinderhaltenden Betrieben, ist auf Grünlandböden eine ausreichend hohe Kaliumversorgung zumeist sichergestellt. Um hohe

4 Dokumentation und Ergebnisse

Kaliumgehalte im Futter zu vermeiden, sollten maximal 100 kg Kalium pro Hektar und Düngegabe ausgebracht werden (Baumgarten, 2021). Die in der Auswertung festgestellten Gehalte an Kalium erfordern grundsätzlich keine Ergänzungsdüngung. Einzelne unterversorgte Standorte sollten jedoch über eine Kaliumdüngung jedenfalls nachdenken.

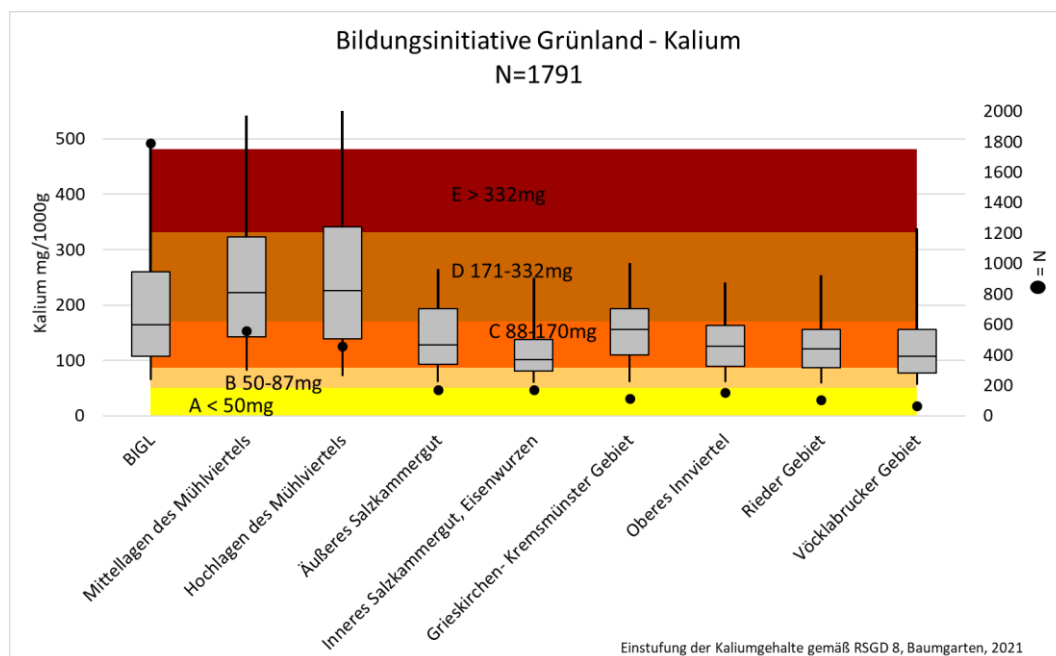


Abbildung 14: Verteilung der Kaliumgehalte der KPG in OÖ, inklusive Darstellung der Einstufung der Kaliumgehaltsklassen und Probenanzahl.

Tabelle 12 zeigt die Statistik der Kaliumgehalte in den KPG. Die beiden Gebiete des Mühlviertels sind mit einem Kaliumgehalt von über 250 mg K/1000g in derselben homogenen Gruppe zu finden und unterscheiden sich signifikant von allen übrigen KPG. Die übrigen KPG unterscheiden sich untereinander nicht signifikant, wobei die im Mittel geringsten Kaliumgehalte im Inneren Salzkammergut, Eisenwurzen festgestellt wurden.

4 Dokumentation und Ergebnisse

KPG	Mittel	s	95% Konfidenzbereich		Sign.
			Untergrenze	Obergrenze	
Inneres Salzkammergut, Eisenwurzen	124,65	77,53	104,90	144,40	a
Rieder Gebiet	128,94	58,97	103,89	153,99	a
Oberes Innviertel	131,87	59,27	111,25	152,49	a
Vöcklabrucker Gebiet	133,81	84,58	101,97	165,65	a
Äußeres Salzkammergut	146,47	68,30	126,78	166,16	a
Grieskirchner-Kremsmünster Gebiet	156,08	64,33	131,82	180,34	a
Mittellagen des Mühlviertels	252,37	144,52	241,50	263,24	b
Hochlagen des Mühlviertels	270,76	183,25	258,74	282,78	b

Tabelle 12: Statistik der Kaliumgehalte (mg K/1000g) nach KPG.

4.1.5 Magnesium

Abbildung 15 zeigt die Verteilung der Magnesiumgehalte in den ausgewählten KPG. Die Einstufung der Gehaltsstufen wurde gemäß RSGD 8 durchgeführt wobei die Einstufung der Nährstoffversorgung (A bis E) analog zu Phosphor und Kalium gesehen wird. Die Punkte in der Grafik geben die jeweilige Probenanzahl an. Der Median der gesamten Proben liegt exakt bei 191,90 mg Mg/1000g und somit im oberen Bereich der Gehaltsklasse D. Fast alle der Proben sind in den beiden Stufen D und E zu finden, was auf eine hohe Magnesiumversorgung des Bodens schließen lässt. Die hohen Magnesiumgehalte in oberösterreichischen Grünlandböden sind geogen, aufgrund des Ausgangsgesteins der Böden bedingt.

Gemäß RSGD 8 ist auf Grünlandböden mit Gehaltsstufen D und E keine mineralische Magnesiumdüngung erforderlich. Aufgrund von Wechselwirkungen mit Kalium sollte ein Kalium zu Magnesium-Verhältnis im Boden von 1,7-5 zu 1 angestrebt werden. Außerhalb dieses Bereiches kann es zu Mangelsymptomen der Pflanzen kommen (Baumgarten, 2021). In der Auswertung werden die

4 Dokumentation und Ergebnisse

unterschiedlichen Magnesiumgehalte in den einzelnen KPG in OÖ deutlich. Eine zusätzliche Magnesiumdüngung ist auf keinen der beprobten Standorte notwendig. Im Gegenteil, bei überversorgten Böden sollte darauf geachtet werden, keine zusätzlichen Magnesiumdünger einzusetzen, da es zu Lasten des anzustrebenden Kalium : Magnesiumverhältnisses gehen könnte.

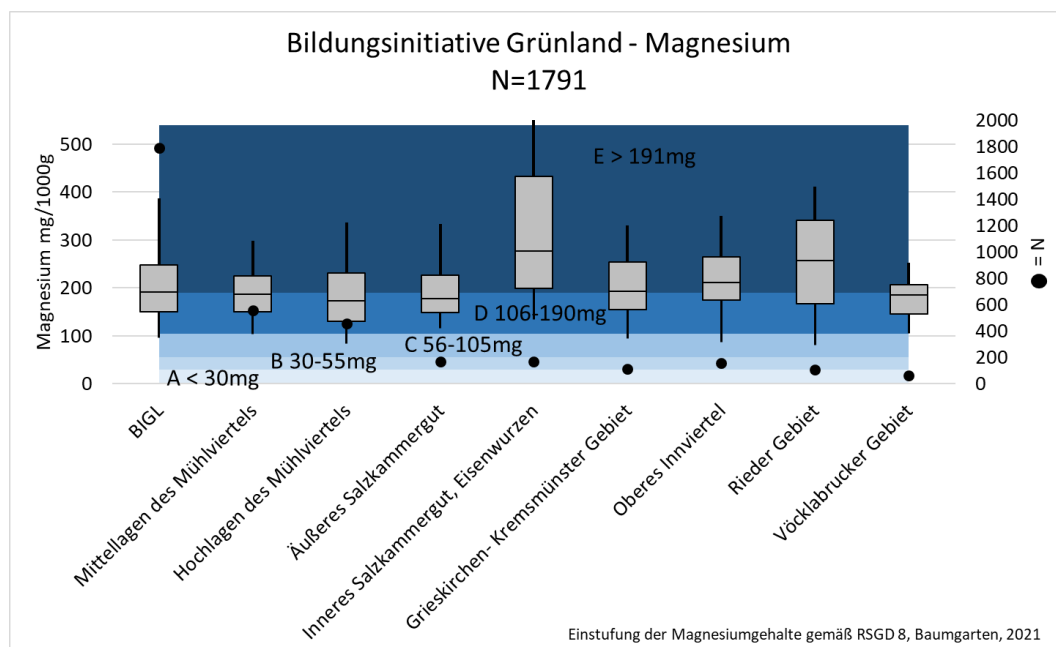


Abbildung 15: Verteilung der Magnesiumgehalte der KPG in OÖ, inklusive Darstellung der Einstufung der Magnesiumgehaltsklassen und Probenanzahl.

Tabelle 13 zeigt die Statistik der Magnesiumgehalte in den KPG. Im Mittel beträgt der Magnesiumgehalt im Inneren Salzkammergut, Eisenwurzen exakt 344,23 mg Mg/1000g und ist somit signifikant höher als in den übrigen KPG. Diese hohen Magnesiumgehalte gründen aufgrund des magnesiumhaltigen Kalkgesteins im Gebiet. Auch das Rieder Gebiet unterscheidet sich beim Magnesiumgehalt signifikant von den weiteren. Die im Mittel niedrigsten Magnesiumgehalte weist das Vöcklabrunner Gebiet mit 179,81 mg Mg/1000g auf. Die beiden Regionen des Mühlviertels unterscheiden sich bei diesem Parameter nicht signifikant.

4 Dokumentation und Ergebnisse

KPG	Mittel	s	95% Konfidenzbereich		Sign.
			Untergrenze	Obergrenze	
Vöcklabrucker Gebiet	179,81	46,83	156,90	202,72	a
Hochlagen des Mühlviertels	187,81	78,71	179,16	196,46	a
Mittellagen des Mühlviertels	193,45	66,94	185,63	201,27	a, b
Äußeres Salzkammergut	196,77	73,04	182,60	210,93	a, b
Grieskirchner-Kremsmünster Gebiet	204,20	78,64	186,75	221,66	a, b
Oberes Innviertel	220,89	78,03	206,06	235,73	b
Rieder Gebiet	251,72	103,19	233,69	269,74	c
Inneres Salzkammergut, Eisenwurzen	344,23	199,96	330,02	358,44	d

Tabelle 13: Statistik der Magnesiumgehalte (mg Mg/1000g) nach KPG.

4.1.6 Fazit Statistik der Bodenparameter nach Kleinproduktionsgebieten

Die Heterogenität des Datensatzes wurde anhand der durchgeführten Gliederung und der statistischen Verrechnung deutlich. Durch das Zusammenfassen von möglichst homogenen Gruppen lassen sich einzelne Parameter besser miteinander vergleichen und Signifikanzen von einzelnen Gruppen darstellen. Um einen Überblick über die Entwicklung der Bodenparameter zu erhalten, bedarf es einer langjährigen Betrachtung. Diese wurde anhand verschiedener Bodenuntersuchungsprojekte in OÖ von 2009-2020 in Tabelle 14 dargestellt. Es wurden ausschließlich Werte von Untersuchungen nach RSGD 8 der AGES zum Vergleich herangezogen. Ausgewählt wurden die beiden KPG des Mühlviertels (Mittellagen- und Hochlagen), da diese Gebiete jeweils am intensivsten beprobt wurden und somit ein großer Stichprobenumfang (=N) vorliegt.

4 Dokumentation und Ergebnisse

Ausgewählte Parameter und Unterscheidung zwischen Mittellagen- und Hochlagen des Mühlviertels		Landesbodenuntersuchung 2009 N=2852	Vorbeugender Grundwasserschutz auf Grünland 2017-2018 N=6094	BIGL 2020 N=1014
		Mediane		
pH-CaCl ₂	Mittellagen	5,62	5,47	5,85
	Hochlagen	5,55	5,48	5,70
Humus %	Mittellagen	5,65	6,04	7,17
	Hochlagen	7,08	7,41	8,23
P mg/kg	Mittellagen	34	28	36
	Hochlagen	34	29	30
K mg/kg	Mittellagen	220	156	222
	Hochlagen	233	175	226
Mg mg/kg	Mittellagen	<i>Keine Daten verfügbar</i>	165	186
	Hochlagen		150	174

Tabelle 14: Vergleich der Mediane ausgewählter Parameter in den beiden KPG des Mühlviertels (Mittellagen und Hochlagen) aus der Landesbodenuntersuchung 2009, vorbeugender Grundwasserschutz auf Grünlandflächen in OÖ 2017-2018 und BIGL 2020 (verändert nach Dersch et al., 2013).

Bei der Darstellung in Tabelle 14 muss grundsätzlich festgehalten werden, dass sich die Betriebe an der Landesbodenuntersuchung 2009 und beim BIGL Projekt 2020 freiwillig beteiligten. Bei der österreichischen Agrarumweltmaßnahme vorbeugender Grundwasserschutz auf Grünland in OÖ, waren teilnehmende Betriebe verpflichtet, pro angefangene fünf Hektar eine Bodenprobe zu ziehen. Aufgrund dieser Tatsache und des größeren Stichprobenumfangs könnten diese Werte die Realität im Mühlviertel am ehesten abbilden. Die jeweils höheren Gehalte 2009 und 2020 können damit begründet werden, dass sich an diesen Projekten eher intensivere Betriebe beteiligten und wenig bis kaum Proben von extensiveren Grünlandstandorten stammen. Grundsätzlich zeigen die festgestellten Werte der Untersuchungen ähnlich verlaufende Tendenzen. Beispielsweise wurde bei allen drei Untersuchungen in den Hochlagen des

4 Dokumentation und Ergebnisse

Mühlviertels ein höherer Humusgehalt als in den Mittellagen festgestellt. Grund für die höheren Humuswerte in den Hochlagen des Mühlviertels dürfte - wie bereits in 4.1.1 beschrieben - die Höhenlage und der damit verbundenen kühleren Witterung sein. Ziel ist es, den Humusgehalt auf den Flächen mittel- und langfristig zu erhalten bzw. zu verbessern.

Der höhere Humusgehalt auf Grünlandböden in den beprobten obersten 10 cm ist im Vergleich zu Ackerland, aufgrund der intensiveren Durchwurzelung und der ganzjährigen Bodenbedeckung gegeben. Zudem stellt der Bodenabtrag von fruchtbarem Bodenmaterial durch Wassererosion auf Grünland ein geringeres Problem dar (Strauss et al., 2020). Im Bereich des Humus zeigt die Auswertung einen positiven Trend: In den Jahren 2009 bis 2020 wurde im Mühlviertel auf Grünlandböden, trotz Intensivierung der Nutzung kein Humusabbau betrieben. Dies ist auch auf eine angepasste Bewirtschaftung mit ausreichender Nährstoffversorgung zurückzuführen. Bezüglich Bodenfruchtbarkeit ist diese Entwicklung positiv zu bewerten.

Der Säuregrad der beiden Gebiete weist sehr geringe Unterschiede auf. Aufgrund des silikatischen Ausgangsgestein Granit und Gneis, sind die Böden im Mühlviertel im schwach sauren pH-Bereich zu finden. Diese Werte liegen für Grünlandböden und für die jeweilige Bodenart der Region im anzustrebenden Bereich.

Hinsichtlich der Nährstoffversorgung von Phosphor und Kalium der beiden KPG kann folgendes festgehalten werden: Die Phosphorgehalte sind in beiden Regionen im Mittel als niedrig (Stufe B 26 – 46 mg P/kg), die Kaliumgehalte als hoch (Stufe D 171 – 332 mg K/kg) einzustufen. Diese Gehalte zeigen sich im Betrachtungszeitraum als relativ konstant. Auch hier spiegelt sich das Bild der intensiveren Betriebe wider. 2009 und 2020 werden im Mittel jeweils höhere Phosphor- und Kaliumgehalte festgestellt. Dies ist auf die damit verbundenen größeren Mengen an ausgebrachten Wirtschaftsdüngern bzw. mit der mineralischen Ergänzungsdüngung erklärbar.

4.2 Auswertung der Kationenaustauschkapazität

Im nächsten Schritt der Auswertung wurde auf die Forschungsfrage: Welcher Zusammenhang zwischen effektiver und potentieller KAK auf Grünlandböden in OÖ im Bezug zum pH-Wert, Ton- und Humusgehalt besteht, Bezug genommen.

Es wurde die Hypothese geprüft: *Der pH-Wert allein ist ausreichend zur näherungsweise Ermittlung der potentiellen KAK, wenn eine repräsentative Anzahl von entsprechenden pH-Acetat-Werten zur Ableitung des Zusammenhangs zur Verfügung stehen.*

Eingangs wurden die 443 gemessenen pH-CaCl₂ und pH-Acetat Werte miteinander verglichen. Das Bestimmtheitsmaß R² liegt bei rund 0,78. Somit können 78% der Streuung des pH-Acetat Gehaltes (y), mittels folgender Formel aus dem pH-CaCl₂ (x) berechnet werden: $y=0,3187x + 4,5388$ (siehe Abbildung 16). Dadurch konnten bei den insgesamt 1.811 pH-CaCl₂ Werten, analog auch der pH-Acetat errechnet werden, da dieser nur bei 443 Proben gemessen wurde.

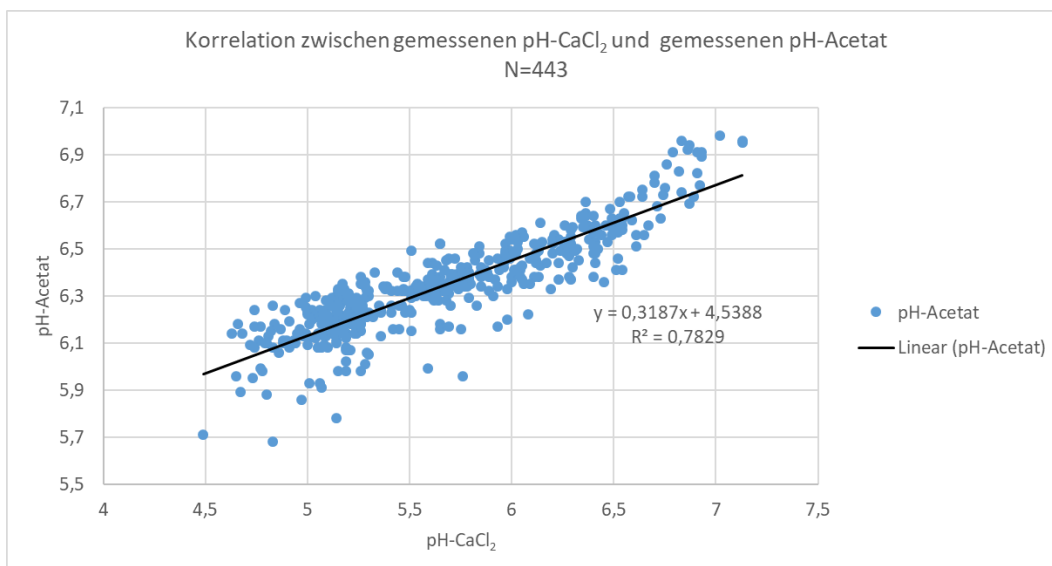


Abbildung 16: Korrelation zwischen pH-CaCl₂ und pH-Acetat.

Die gemessenen Werte wurden anschließend den berechneten Werten mittels eines Zweistichproben-t-Tests bei abhängigen Stichproben gegenübergestellt. Die Nullhypothese wurde bestätigt, demnach weisen die berechneten und gemessenen Werte keinen signifikanten Unterschied auf. Die ermittelte Formel zur Berechnung ist somit für die ausgewählten oberösterreichischen leichten und mittelschweren Grünlandböden zulässig. Im pH-CaCl₂ Bereich von 5,5-6,5 besteht

4 Dokumentation und Ergebnisse

annähernd ein linearer Zusammenhang. Die Berechnung des pH-Acetat in diesem Bereich ist statistisch abgesichert. Ab einem pH-CaCl₂ von 6,5 ist es nicht notwendig den pH-Acetat zu ermitteln, da auf diesen Böden ohnehin kein Aufkalkungsbedarf besteht. Zudem nähert sich die KAK_{eff} zunehmend der KAK_{pot} an. Unter pH-CaCl₂ von 5,5 bei mittelschweren und unter pH-CaCl₂ 5 bei leichten Grünlandböden, ist ohnehin gemäß RSGD 8 eine analytische Bestimmung des pH-Acetat zur Ermittlung der Kalkdüngungsmenge empfohlen (siehe auch *Tabelle 2*). Die KAK_{pot} wird in der Standardmethode analytisch mittels einer pH >7 eingestellten gepufferten BaCl₂-Lösung bestimmt (Baumgarten, 2021). Laut Aichberger (1993), kann diese auch durch Aufsummierung der KAK_{eff} und den aus dem pH-Acetat errechneten, dissoziierbaren H⁺-Ionen (H⁺diss.) näherungsweise abgeschätzt werden ($KAK_{eff} + H^{+diss.} = KAK_{pot}$). Dabei hat sich für Ackerböden eine recht gute Übereinstimmung (Korrelationskoeffizient $R=0,90$ und hochsignifikant) mit der analytischen Bestimmung gezeigt. Die Übereinstimmung am Grünland, mit $R=0,69$, wurde als nicht zufriedenstellend bewertet und erfordert zusätzlichen Untersuchungsaufwand (Aichberger, 1993). Die Auswertung erfolgte in Anlehnung an die von Danneberg (1999) entwickelten Regressionsgleichungen zur Abschätzung der Austauschkapazität auf landwirtschaftlichen Böden in Ostösterreich. In dieser Studie wurden sowohl verschiedene Bodenparameter als auch Bodenarten und Bodentypen entsprechend kategorisiert und gruppiert (Danneberg, 1999).

Durch den vorliegenden Datensatz an Grünlandbodenproben werden somit auch weiterführende Untersuchungen im Grünlandbereich durchgeführt.

Zuerst wurden die Ergebnisse nach Schachtschabel (1951) - welche die Abhängigkeit der H⁺diss.-Ionen mit dem pH-Acetat beschreiben - gesichtet und in *Tabelle 15* dargestellt. In der Originalliteratur wurden die H⁺diss. noch in der früheren Einheit mval/100 g Boden angegeben. Diese Einheit entspricht exakt der derzeit aktuellen Einheit cmol H⁺/kg Boden (Schachtschabel, 1951).

4 Dokumentation und Ergebnisse

pH-Acetat	cmol H ⁺ /kg Boden	pH-Acetat	cmol H ⁺ /kg Boden
7,2	0	6,12	8
6,87	1	6,07	9
6,7	2	6,03	10
6,57	3	5,99	11
6,43	4	5,96	12
6,33	5	5,93	13
6,25	6	5,9	14
6,17	7	5,88	15

Tabelle 15: cmol H⁺ bei bestimmten pH-Acetat Gehalten (verändert nach Schachtschabel, 1951, S. 14).

Die Werte aus Tabelle 15 wurden anschließend als Funktionen in Abbildungen dargestellt. Entscheidend ist die Aufteilung der Formel in zwei pH-Acetat Bereiche: 6,57 – 7,2 in Abbildung 17 und 5,88 – 7,2 in Abbildung 18. Grund dafür ist die hohe Bestimmtheit im erstgenannten Bereich mit $R^2=1$.

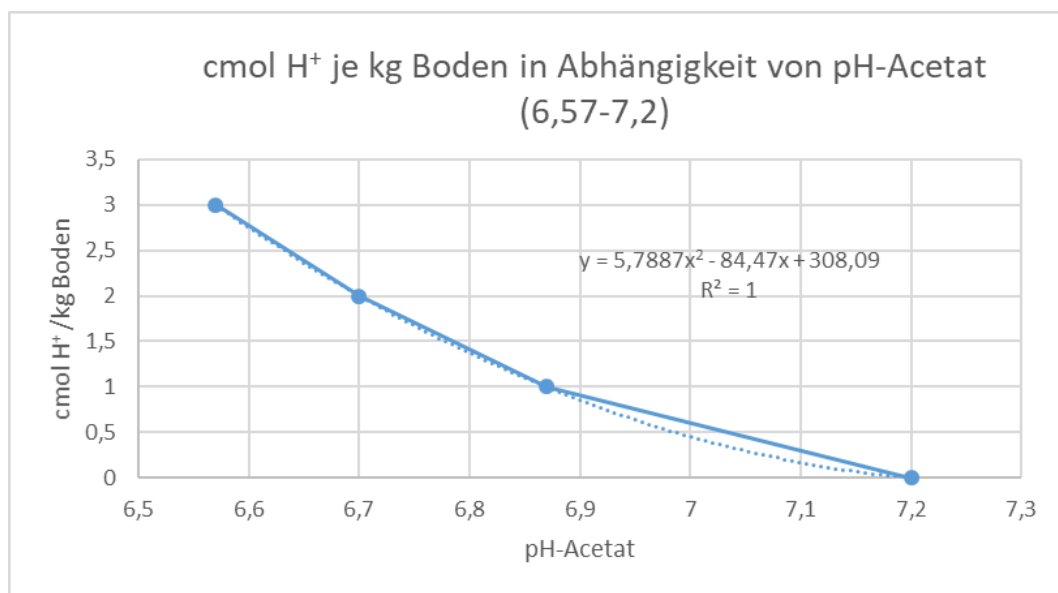


Abbildung 17: Darstellung der cmol H⁺ im pH-Acetat Bereich von 6,57 – 7,2.

4 Dokumentation und Ergebnisse

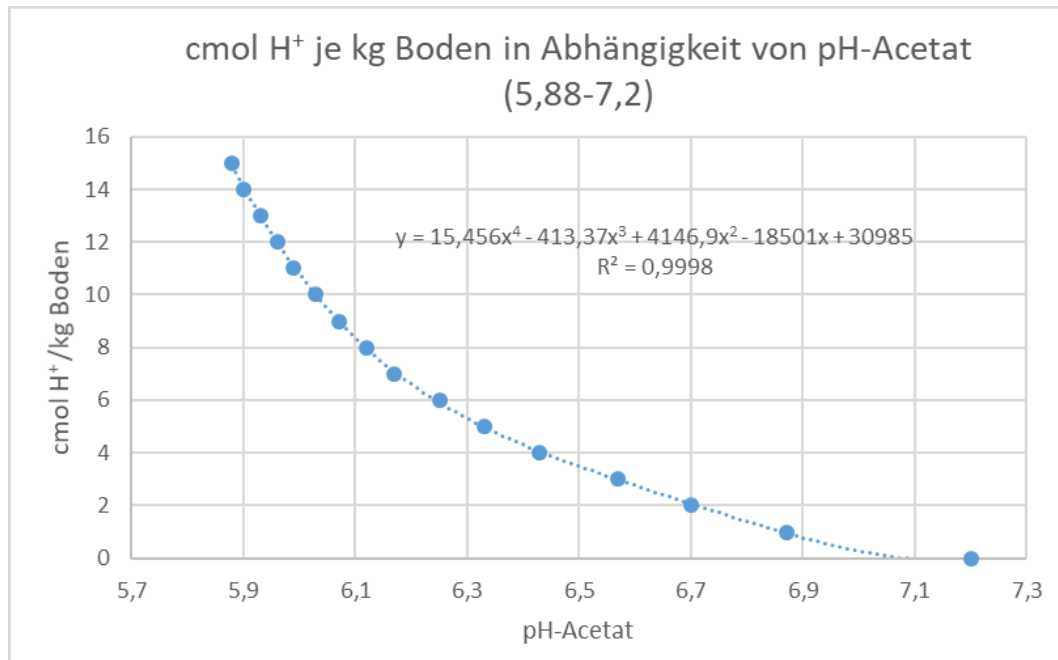


Abbildung 18: Darstellung der cmol H⁺ im pH-Acetat Bereich von 5,88 – 7,2.

Somit ergibt sich für die Berechnung der H⁺ (y) aus dem pH-Acetat (x) folgende Formel: (6,57-7: $y = 5,7887x^2 - 84,47x + 308,09$) (unter 6,57: $y = 15,456x^4 - 413,37x^3 + 4146,9x^2 - 18501x + 30985$)

Aus dem berechneten und gemessenen pH-Acetat wurde die H⁺-Formel mittels eines Zweistichproben-t-Tests bei abhängigen Stichproben gegenübergestellt. Die Nullhypothese konnte damit bestätigt werden, demnach weisen die H⁺-Ionen aus berechneten und gemessenen pH-Acetat Werten, keinen signifikanten Unterschied auf. Die ermittelte Formel zur Berechnung ist somit für die ausgewählten Grünlandstandorte zulässig.

Mit dieser Formel wurden nun die H⁺diss. aus den errechneten pH-Acetat Werten ermittelt und so konnte bei den gesamten 782 Proben, wo die KAK_{eff} analysiert wurde, auch die KAK_{pot} mit der genannten Formel: $KAK_{\text{eff}} + H^{\text{diss.}}$, berechnet werden. Den engen Zusammenhang der KAK_{pot} aus dem berechneten und dem gemessenen pH-Acetat verdeutlicht die grafische Darstellung der Abbildung 19.

4 Dokumentation und Ergebnisse

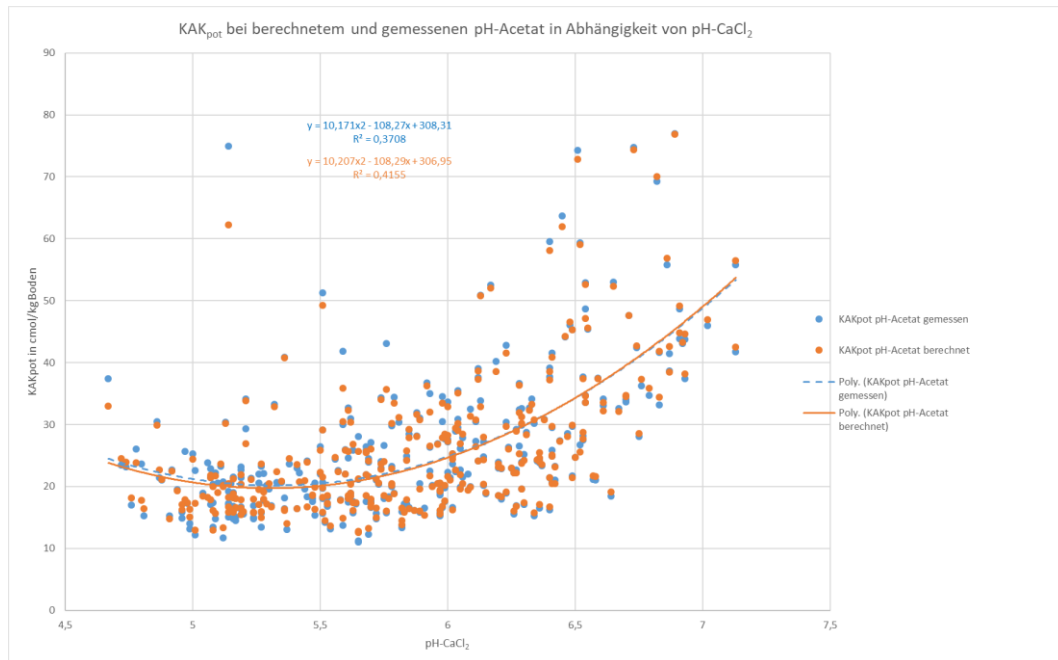


Abbildung 19: Zusammenhang zwischen der KAK_{pot} bei berechnetem und gemessenen pH-Acetat.

Es kann somit festgehalten werden, dass die Berechnung aufgrund der engen Korrelation zwischen berechnetem und gemessenen pH-Acetat auf die KAK_{pot} zulässig ist.

Abbildung 20 stellt den Zusammenhang zwischen der KAK_{eff} und KAK_{pot} grafisch dar. Während im stark sauren Bereich bei pH 5, die KAK_{eff} nur 63% der KAK_{pot} erreicht, sind es bei pH 6 bereits 83%. Die exponentielle Zunahme der KAK im neutralen pH-Bereich wird wesentlich durch die überdurchschnittlich hohen Humusgehalte dieser Probenauswahl (ab pH 6,5 durchschnittlich 10,2% Humus) bestimmt. Bei etwa gleich hohen Humusgehalten im gesamten pH-Bereich würde die Kurve abflachen (siehe Abbildung 5). Die höheren Humusgehalte im neutralen pH-Bereich werden in der Regressionsanalyse (siehe 4.4) detaillierter beleuchtet, dabei standen nur eine begrenzte Auswahl an Proben zur Verfügung. Auch Aichberger (1993) stellte bei 218 untersuchten Grünlandböden fest, dass im Vergleich zu Ackerböden die mittleren Gehalte der KAK (ab 20 cmol/kg) auf Grünland dominieren. Der pH-Wert, sowie ein angepasster Humusgehalt, werden dabei als wesentliche Einflussgrößen genannt (Aichberger, 1993).

4 Dokumentation und Ergebnisse

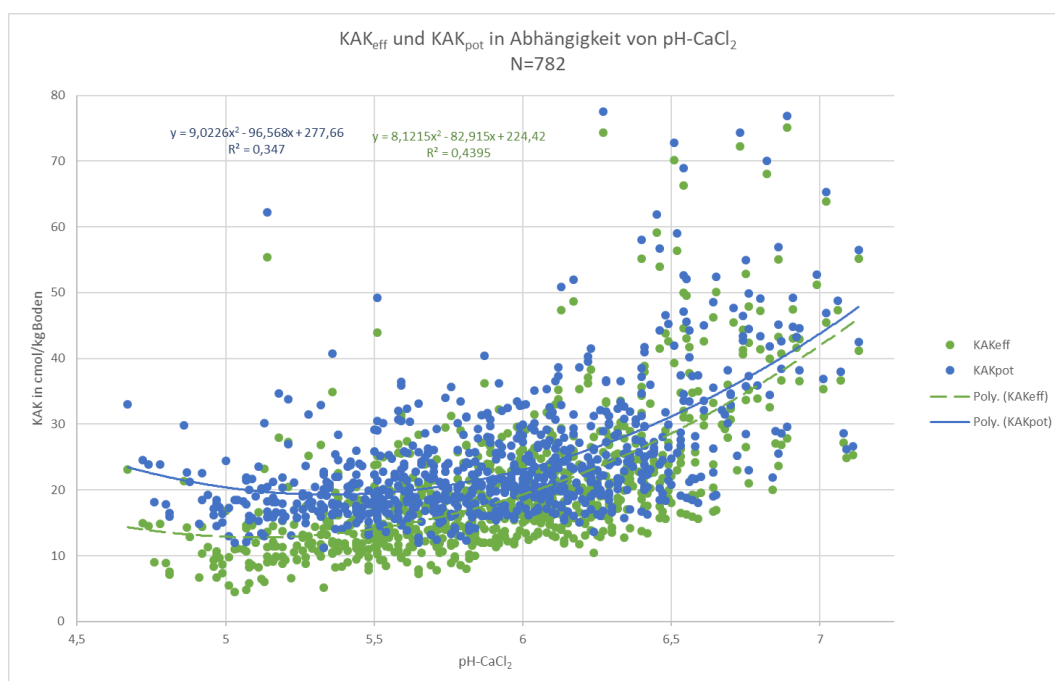


Abbildung 20: KAK_{eff} und KAK_{pot} in Abhängigkeit von pH-CaCl₂.

In der weiteren Auswertung werden die einzelnen Elemente der KAK beleuchtet und als Abbildungen grafisch dargestellt.

4.2.1 Calcium

Tabelle 16 zeigt die Calciumbelegung in % bei unterschiedlichen pH-CaCl₂ Bereichen an KAK_{eff} und KAK_{pot}.

pH-CaCl ₂	% Ca an KAK _{eff}	% Ca an KAK _{pot}
< 5,5	77,0	50,0
>=5,5 <=6,5	81,0	66,2
> 6,5	84,7	79,3

Tabelle 16: Calciumsättigung an KAK_{eff} und KAK_{pot} bei ausgewählten pH-CaCl₂ Bereichen.

Im Durchschnitt aller Proben beträgt die Calciumsättigung 80,6% an der KAK_{eff} und 64,5% an der KAK_{pot}. Somit liegt der Schnitt genau im anzustrebenden Bereich aus Tabelle 6 von 75-90%. Bei niedrigen pH-Werten nimmt auch die Calciumsättigung an der KAK deutlich ab. Je neutraler der pH-Wert, desto ähnlicher die Belegung von Ca an der KAK_{eff} und KAK_{pot} (siehe Abbildung 21).

4 Dokumentation und Ergebnisse

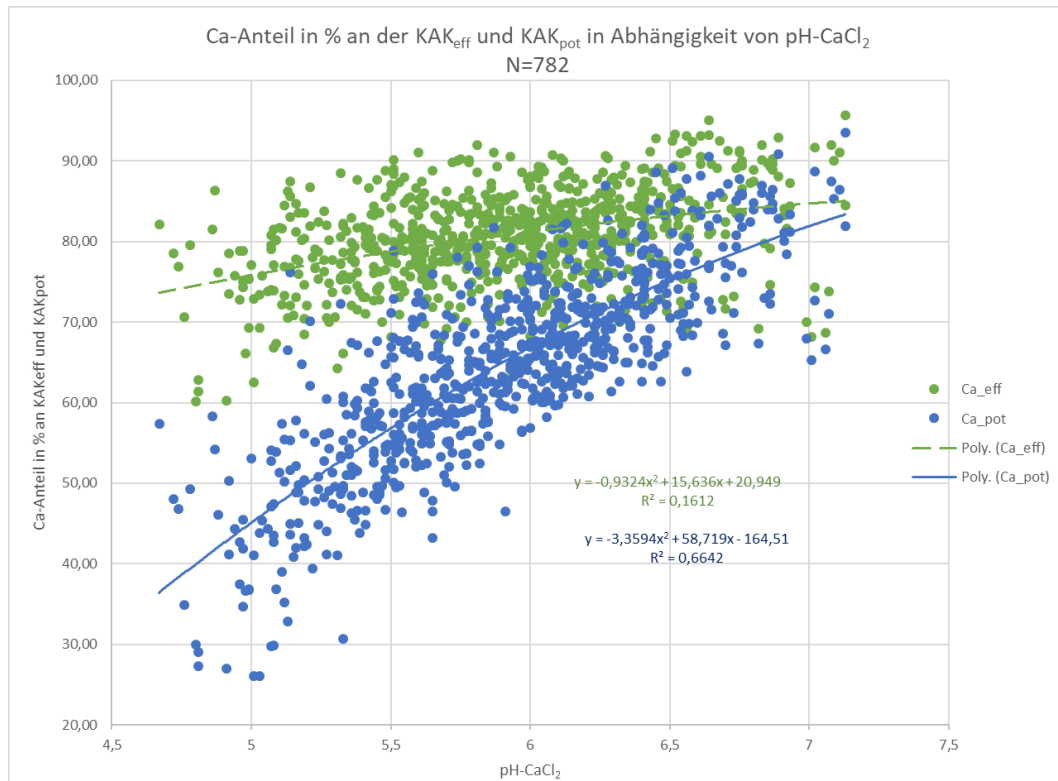


Abbildung 21: Anteil an Calcium an der KAK_{eff} und KAK_{pot} , in Abhängigkeit von $pH-CaCl_2$.

4.2.2 Magnesium

Tabelle 17 Tabelle 16 zeigt die Magnesiumbelegung in % bei unterschiedlichen $pH-CaCl_2$ Bereichen an KAK_{eff} und KAK_{pot} . Der gemäß RSGD 8 anzustrebende Bereich von 56-105 mg Mg/kg (Gehaltsklasse C), wurde in der Auswertung aufgrund der geringen Probenanzahl in diesem Bereich (siehe 4.1.5), um den unteren Bereich der Gehaltsklasse D erweitert. Somit wurde die Magnesiumbelegung an der KAK auch für jene Proben dargestellt, die sich im Bereich von 56 bis 148 mg Mg/kg befinden. Zudem wurde der jeweilige Stichprobenumfang (N) angegeben.

4 Dokumentation und Ergebnisse

pH-CaCl ₂	% Mg an KAK _{eff}	% Mg an KAK _{eff} in Gehaltsklasse C + unterer Bereich D (56-148 mg/kg)	% Mg an KAK _{pot}	% Mg an KAK _{pot} in Gehaltsklasse C + unterer Bereich D (56-148 mg/kg)
< 5,5	13,6 (N=157)	11,90 (N=72)	8,8	6,98
>=5,5<=6,5	13,7 (N=533)	9,82 (N=88)	11,2	7,40
> 6,5	13,2 (N=92)	5,80 (N=9)	12,4	5,29

Tabelle 17: Magnesiumsättigung an KAK_{eff} und KAK_{pot} bei ausgewählten pH-CaCl₂ Bereichen und Darstellung der Sättigung bei Proben in Gehaltsklasse C und unterer Bereich von D. Der Stichprobenumfang N ist für KAK_{pot} gleichermaßen gültig.

Im Durchschnitt aller Proben beträgt die Magnesiumsättigung 13,7% an der KAK_{eff} und 10,8% an der KAK_{pot}. Somit liegt auch hier der Schnitt genau im anzustrebenden Bereich aus Tabelle 6 von 5-15%. Aufgrund der geringen Anzahl an Proben (N=9) bei pH > 6,5 und unter Einstufung in die Gehaltsklasse, muss die geringe Magnesiumsättigung in diesem Bereich gesondert betrachtet werden. Die Magnesiumsättigung an der KAK_{eff} ist im Vergleich zu Ca eher pH-Wert unabhängig. Hier ändert sich der Anteil an Mg mit dem pH-Wert kaum. Auch bei Mg gilt: Je neutraler der pH-Wert, desto ähnlicher die Belegung von Mg an der KAK_{eff} und KAK_{pot} (siehe Abbildung 22).

4 Dokumentation und Ergebnisse

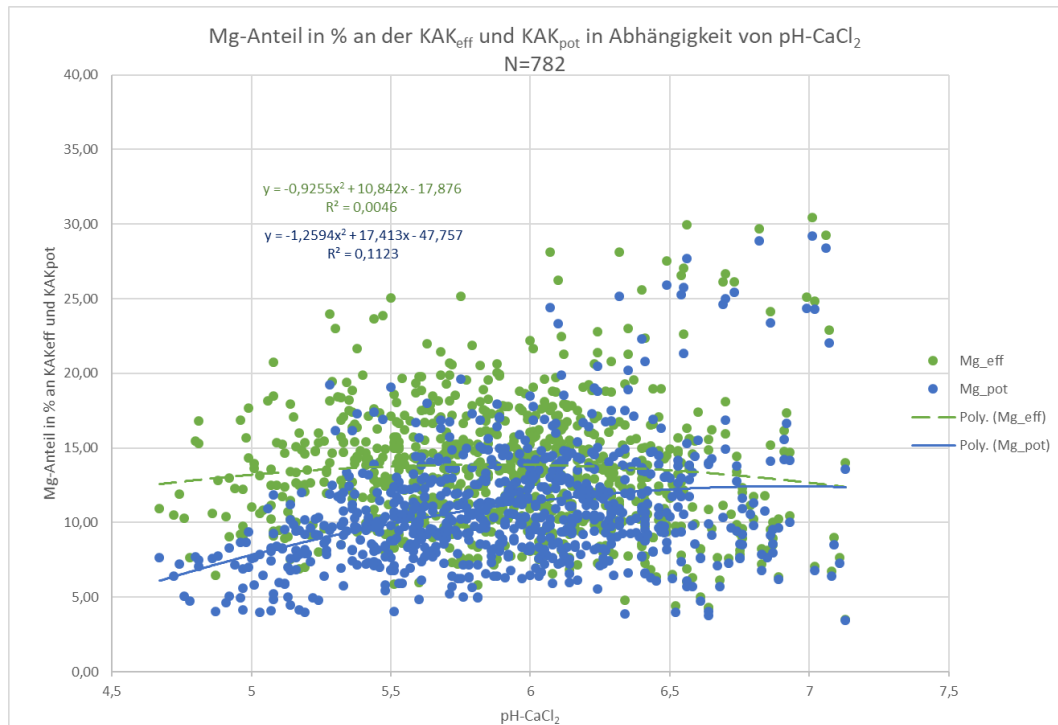


Abbildung 22: Anteil an Magnesium an der KAK_{eff} und KAK_{pot} , in Abhängigkeit von $pH-CaCl_2$.

Durch die Einhaltung des für Grünland anzustrebenden pH-Wertes im Bereich von 5,0 auf leichten- und um 5,5 auf mittleren Böden (siehe Tabelle 2), können in Relation vor allem deutlich mehr Ca-Ionen, aber auch Mg-Ionen austauschbar gebunden werden. Dies trägt zur Verbesserung der Bodenstruktur und somit zu einer verbesserten Wasserinfiltration bei (Dersch et al., 2021).

4.2.3 Kalium

Tabelle 18Tabelle 16 zeigt die Kaliumbelegung in % bei unterschiedlichen $pH-CaCl_2$ Bereichen an KAK_{eff} und KAK_{pot} . Zusätzlich wurde die Kaliumbelegung an der KAK auch, nach dem gemäß RSGD 8 anzustrebenden Bereich von 88-170 mg K/kg (Gehaltsklasse C) dargestellt und der jeweilige Stichprobenumfang (N) angegeben.

4 Dokumentation und Ergebnisse

pH-CaCl ₂	% K an KAK _{eff}	% K an KAK _{eff} in Gehaltsklasse C (88-170 mg/kg)	% K an KAK _{pot}	% K an KAK _{pot} in Gehaltsklasse C (88-170 mg/kg)
< 5,5	4,6 (N=157)	3,22 (N=70)	2,9	2,03
>=5,5<=6,5	3,9 (N=533)	2,15 (N=172)	3,1	1,70
> 6,5	1,7 (N=92)	1,09 (N=38)	1,6	1,02

Tabelle 18: Kaliumsättigung an KAK_{eff} und KAK_{pot} bei ausgewählten pH-CaCl₂ Bereichen und Darstellung der Sättigung bei Proben in Gehaltsklasse C. Der Stichprobenumfang N ist für KAK_{pot} gleichermaßen gültig.

Im Durchschnitt aller Proben beträgt die Kaliumsättigung 3,8% an der KAK_{eff} und 2,9% an der KAK_{pot}. Somit liegt auch hier der Schnitt genau im anzustrebenden Bereich aus Tabelle 6 von 2-5%. Die Kaliumanteile an KAK_{eff} und KAK_{pot} liegen in beiden Fällen sehr knapp beieinander. Lediglich im sehr sauren pH-Bereich gibt es Unterschiede. Diese sind jedoch in der landwirtschaftlichen Praxis kaum relevant, da für Grünland ohnehin eine ausreichend hohe Kaliumversorgung aus dem Boden gegeben ist (siehe 4.1.4). Die geringe Kaliumsättigung bei pH >6,5 und der Gehaltsklasse C, muss aufgrund des geringen Stichprobenumfanges (N=38) in diesem Bereich gesondert betrachtet werden. Abbildung 23 zeigt den grafischen Zusammenhang zwischen der Kaliumbelegung an der KAK_{eff} und KAK_{pot} in Abhängigkeit vom pH-Wert.

4 Dokumentation und Ergebnisse

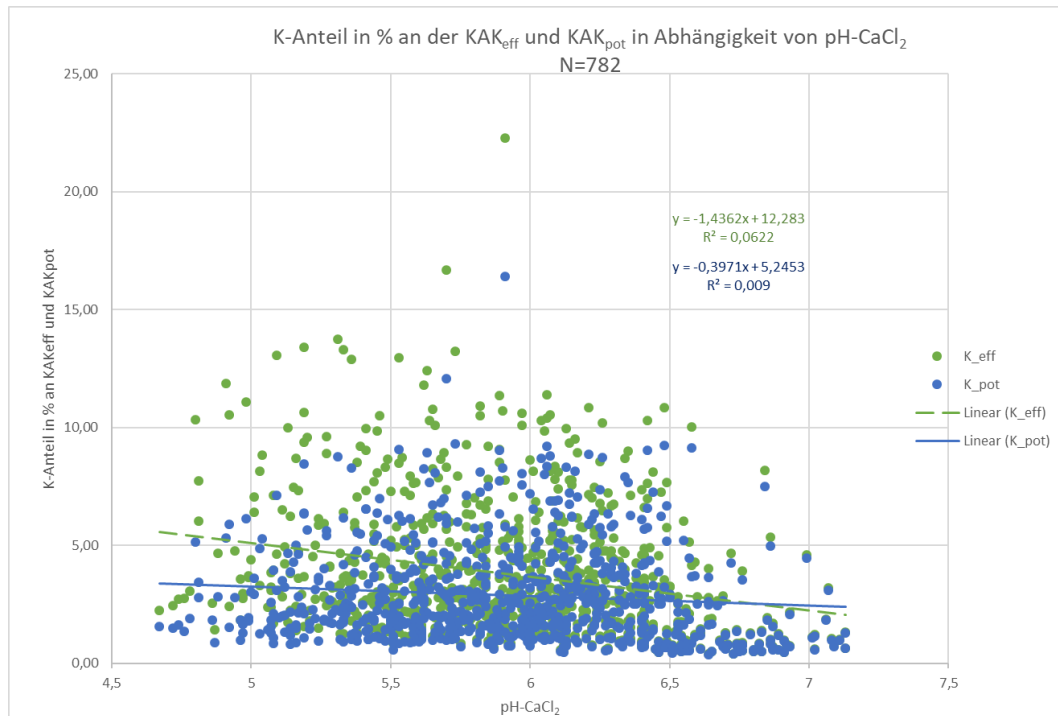


Abbildung 23: Anteil an Kalium an der KAK_{eff} und KAK_{pot} , in Abhängigkeit von pH-CaCl_2 .

4.2.4 Natrium

Da der Natriumanteil an der KAK sehr untergeordnet ist, wird für den Nährstoff keine genaue Aufschlüsselung bezüglich Natriumsättigung durchgeführt. Im Durchschnitt aller Proben beträgt die Natriumsättigung 0,5% an der KAK_{eff} und 0,4% an der KAK_{pot} . Abbildung 24 zeigt den grafischen Zusammenhang zwischen der Natriumbelegung an der KAK_{eff} und KAK_{pot} in Abhängigkeit vom pH-Wert.

4 Dokumentation und Ergebnisse

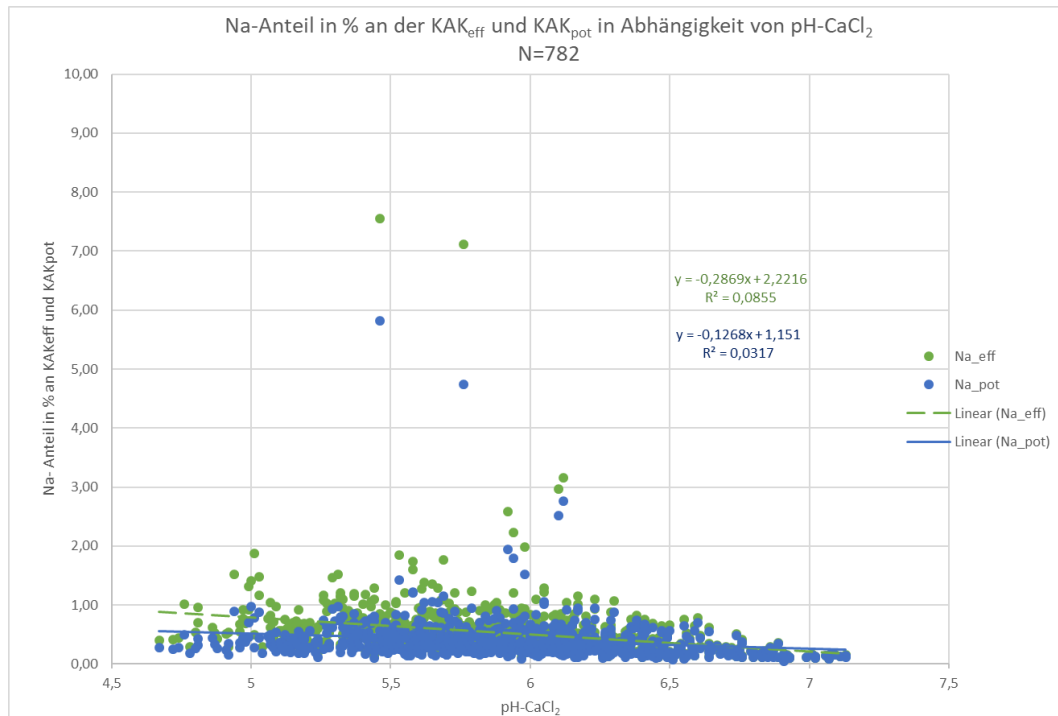


Abbildung 24: Anteil an Natrium an der KAK_{eff} und KAK_{pot} in Abhängigkeit von $pH-CaCl_2$.

Laut RSGD 8, liegt in den meisten Böden der Natriumanteil an der KAK zumeist unter 1%, da Na sehr schwach am Sorptionskomplex gebunden ist. Erhöhte Natriumgehalte im Boden weisen auf eine Versalzung hin und sind bei straßennahen Standorten aufgrund des Streusalzeffekts nach dem Winter oder in sehr trockenen Gebieten im Osten Österreichs zu finden. Die Natriumversorgung von Wiederkäuern sollte über eigene Futterangebote (z.B. Lecksteine) sichergestellt werden. Eine zusätzliche Natriumdüngung der Böden wird nur sehr vereinzelt empfohlen und stellt daher eher die Ausnahme dar (Baumgarten, 2021).

4.2.5 Aluminium

Der Anteil an austauschbaren Aluminium-Ionen an der KAK_{eff} gibt Rückschluss über die Versauerung des Bodens. Auf Ackerböden, über pH-Wert von 5,5 liegt deren Anteil an der KAK_{eff} nahezu immer unter 1%. Bei einem pH-Wert unter 5 sind etwa 4% und bei Unterschreiten des pH-Wertes von 4,75 sind in etwa 8% der KAK_{eff} mit Aluminium-Ionen belegt (Dersch et al., 2021). Im Durchschnitt aller beprobten Grünlandstandorte beträgt die Aluminiumsättigung 0,56% an der KAK_{eff} . Im pH-Bereich 4,9 bis 5,1, sind rund 5,1% der KAK_{eff} mit Aluminium-Ionen belegt. Im pH-Bereich 5,1 bis 5,3 reduziert sich diese Belegung auf rund 2%. Diese Werte entsprechen somit annähernd den Ergebnissen auf Ackerstandorten. Abbildung

4 Dokumentation und Ergebnisse

25 verdeutlicht grafisch den Zusammenhang zwischen der Aluminiumbelegung an der KAK_{eff} und dem pH-Wert.

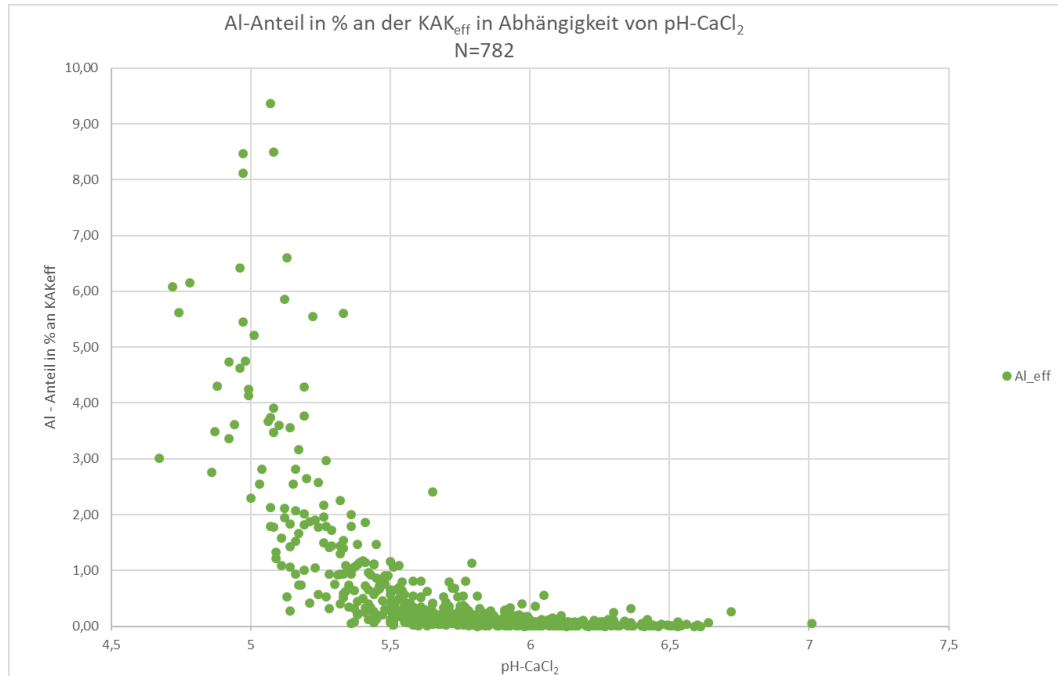


Abbildung 25: Anteil an Aluminium an der KAK_{eff} in Abhängigkeit von pH-CaCl_2 .

4.2.6 Fazit Kationenbelegung

Erfasst man alle für die KAK wesentlichen Ionen und stellt diese im Bezug zur jeweiligen Sättigung am Austauscher dar, erhält man die Basensättigung. Diese setzt sich aus den Ionen Ca, Mg, K und Na zusammen. Die Al, Fe und Mn-Ionen sind in einem so untergeordneten Ausmaß am Austauscher zu finden, sodass sie in der Auswertung faktisch keine Bedeutung haben. Einzelne Proben mit erhöhten Werten müssen separat betrachtet und entsprechend interpretiert werden. Die Basensättigung, in Abhängigkeit vom pH-Wert, ist in Abbildung 26 ersichtlich. Dementsprechend nimmt die Basensättigung mit sinkendem pH-Wert deutlich ab. Im Durchschnitt aller Proben beträgt die Basensättigung 98,6% an der KAK_{eff} . Unter pH-Wert von 5,5 beträgt diese noch rund 96%.

4 Dokumentation und Ergebnisse

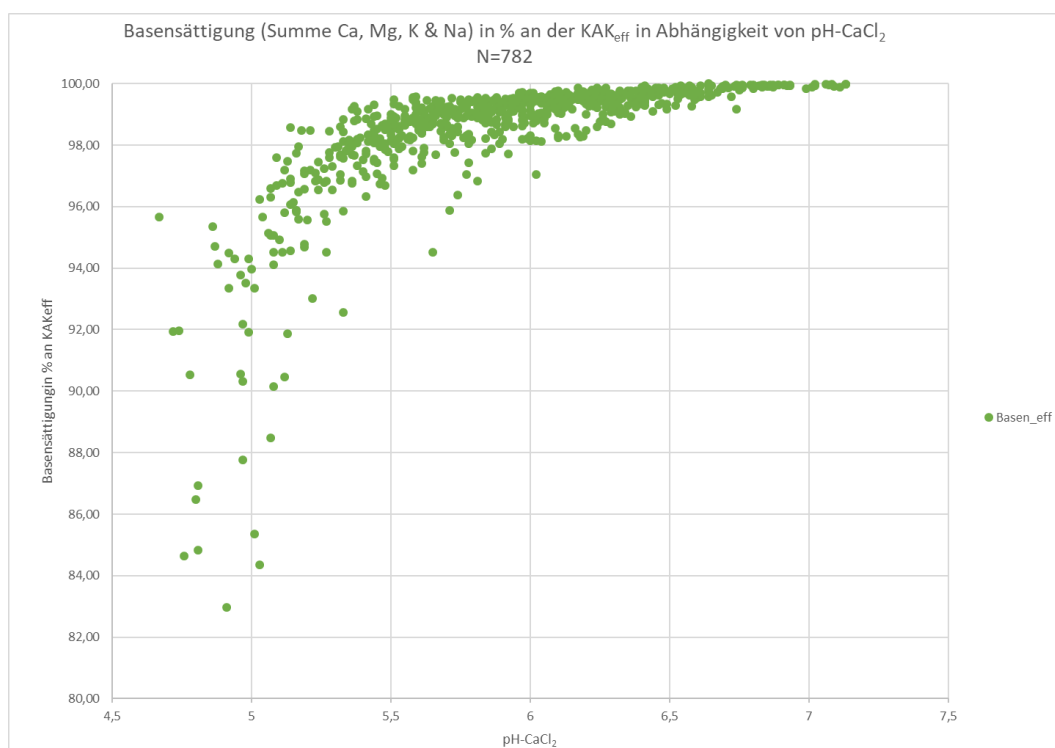


Abbildung 26: Basensättigung der KAK_{eff} in Abhängigkeit von $pH-CaCl_2$.

Die empfohlenen pH-Werte für den jeweiligen Grünlandstandort sind aus Sicht einer effizienten Nährstoffaufnahme für die Pflanzen jedenfalls zu beachten. Eine regelmäßige Überprüfung durch eine gezielte Bodenuntersuchung kann hierfür wertvolle Informationen liefern. Zudem hilft eine Bodenuntersuchung mögliche Ungleichgewichte im Boden zu erkennen und entsprechende Maßnahmen in die richtige Richtung zu setzen.

Durch die Bestimmung der KAK können weitere Schlüsse gezogen werden: Es wird das Nährstoff-Speichervermögen eines Standortes und die Anteile der einzelnen Nährstoffe erfasst. Zugleich können Tendenzen einer Versauerung (erhöhte Al-Anteile), aber auch einer Versalzung (erhöhte Na-Anteile), festgestellt werden (Dersch et al., 2021). Die dargestellten Werte von oberösterreichischen Grünlandböden stellen einen repräsentativen Überblick über die Situation der KAK auf Grünlandstandorten in OÖ dar. Als Tortendiagramm dargestellt ergeben sich aus der Analyse der einzelnen Nährstoffanteile an der KAK_{eff} und KAK_{pot} folgende Aufteilung, welche als Mittelwerte über die gesamten Daten zu interpretieren ist (siehe Abbildung 27).

4 Dokumentation und Ergebnisse

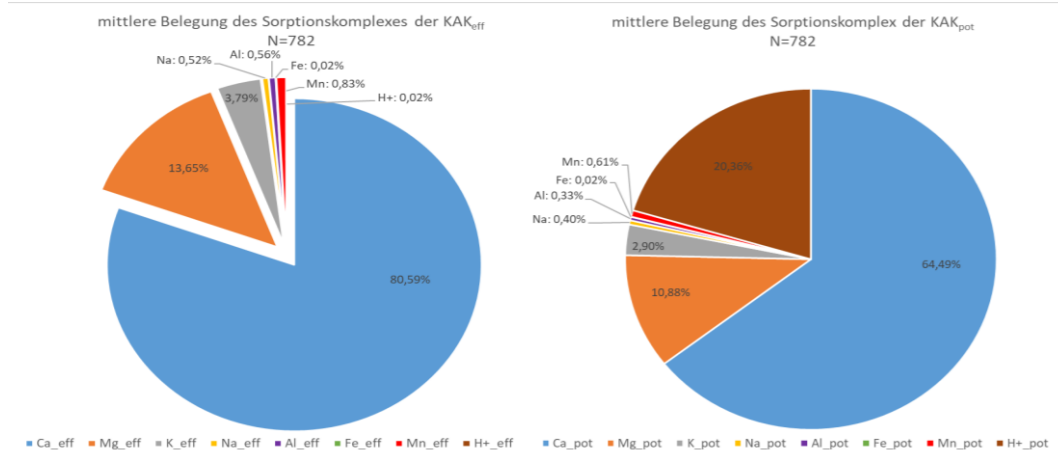


Abbildung 27: Nährstoffanteile und H⁺-Ionen im Mittel der BIGL-Daten an der KAK_{eff} (links) und KAK_{pot} (rechts).

Durch den Vergleich von KAK_{eff} und KAK_{pot} kann die maximale Nährstoffspeicherkapazität eines Bodens gut abgeschätzt werden. Wobei die KAK_{eff} den wirksamen Nährstoffspeicher am Anteil der Gesamtkapazität beim aktuellen pH-Wert beschreibt. Somit wird die Ist-Situation über die Nährstoffverteilung am Sorptionskomplex widergespiegelt, wohingegen die KAK_{pot} die Summe aller negativen Ladungsplätze erfasst. Dabei werden neben der aktuell wirksamen KAK_{eff} auch jene Ladungsplätze erfasst, welche im sauren pH-Bereich von den H⁺-Ionen blockiert werden (siehe Abbildung 28). Diese Grafik zeigt auch den Effekt einer Bodenversauerung. Bei sinkendem pH-Wert steigt die H⁺-Konzentration eines Bodens und zugleich sinkt die KAK_{eff}. Bei pH-Werten von Böden größer 7,2 – sind auf Grünlandböden in Österreich selten – werden keine negativen Ladungsplätze von den H⁺-Ionen mehr belegt und dadurch nähern sich die KAK_{eff} und KAK_{pot} zueinander an (Dersch et al., 2021).

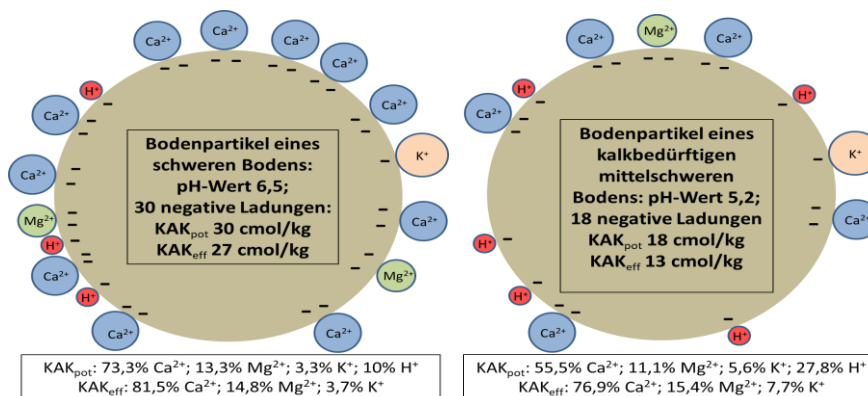


Abbildung 28: Vereinfachte Darstellung der KAK: links ein ausgewogenes Verhältnis mit nur geringem Anteil an H⁺-Ionen. Rechts ein erhöhter Anteil an H⁺-Ionen, diese senken den pH-Wert und besetzen rund 28% der KAK_{pot} (Quelle: Dersch&Haslmayr).

4.3 Weitere Parameter der Kationenaustauschkapazität

Neben der bereits erörterten Auswirkung des pH-CaCl₂ auf die KAK, werden im Folgenden weitere Bodenparameter beschrieben, welche sich auf die KAK auswirken können. Die KAK hat einen unmittelbaren Zusammenhang mit dem Speichervermögen des Bodens. So lautet die Hypothese: *Die KAK wird wesentlich von den Bodenparametern pH-Wert, Humus- und Tongehalt bestimmt, die quantitativen Auswirkungen unterscheiden sich auch bei den deutlich höheren Humusgehalten von Grünland nicht von Ackerstandorten: Mit steigendem Tongehalt pro %-Punkt erhöht sich die KAK (in cmol/kg) um 0,5 und mit steigendem Humusgehalt pro %-Punkt um 2 Einheiten.*

4.3.1 Humus

Wie in 2.4.2 beschrieben, hat der Humusgehalt einen wesentlichen Einfluss auf die Sorptionskraft eines Bodens. Dies soll anhand des vorliegenden Datensatzes auch für oberösterreichische Grünlandböden überprüft werden. In Abbildung 29 wurden die KAK_{eff} und KAK_{pot} bei den jeweiligen Humusgehalten aufgetragen. Anhand der beiden linearen Trendlinien zeigt sich eindeutig, dass mit steigendem Humusgehalt sich auch die KAK entsprechend erhöht. Da hierbei kein Einfluss des pH-Wertes berücksichtigt wurde, ist die KAK_{pot} höher als die KAK_{eff}.

4 Dokumentation und Ergebnisse

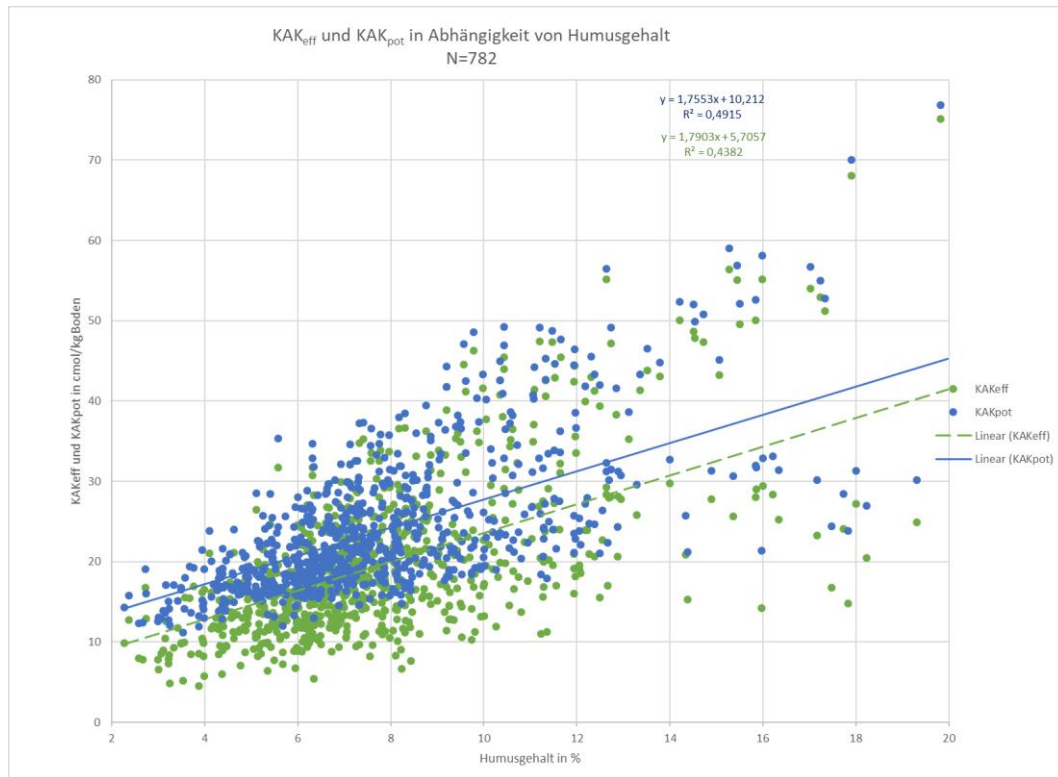


Abbildung 29: Darstellung der KAK_{eff} und KAK_{pot} in Abhängigkeit vom Humusgehalt.

Um den Einfluss des Humusgehalts genauer einzustufen, wurden in Anlehnung an die RSGD 8 gemäß Tabelle 3 die Humusgehalte für Grünlandböden entsprechend kategorisiert. Ergänzt wurde, aufgrund teilweiser sehr hoher Humusgehalte, die Stufe $\geq 14\%$ Humus. Abbildung 30 zeigt die Auswertung der gruppierten Humusgehalte auf die KAK_{eff} in Abhängigkeit von pH-CaCl₂. Hierbei werden die Unterschiede der einzelnen Gruppen deutlich: Beispielsweise beträgt die KAK_{eff} bei pH-Wert von 5,7 und bei Humus unter 4,5%, rund 10 cmol/kg; zwischen 9 und 14% rund 20 cmol/kg und bei über 14% bereits rund 32 cmol/kg.

4 Dokumentation und Ergebnisse

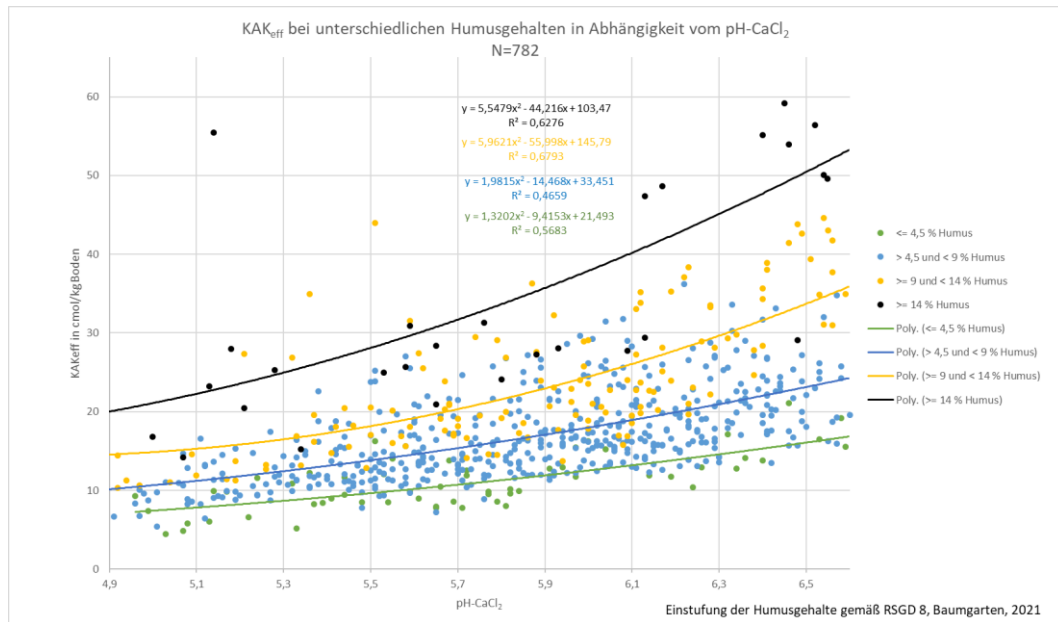


Abbildung 30: Darstellung der KAK_{eff} bei unterschiedlichen Humusgehalten in Abhängigkeit von pH-CaCl_2 .

4.3.2 Tongehalt

Gemäß 2.4.2 wird neben dem Humusgehalt auch der Gehalt an Ton, als wesentlicher Parameter bezüglich Einflusses auf die KAK genannt. Dieser Einfluss soll anhand der vorliegenden 299 Datensätze an Grünlandbodenproben - mit Bestimmung des Tongehalts mittels der Spindelmethode - überprüft werden. In Abbildung 31 ist diese Auswertung ersichtlich. Aufgetragen wurden die Gehalte der KAK_{eff} und KAK_{pot} bei den jeweiligen Tongehalten. Es zeigt sich, dass kein Einfluss des Tongehalts auf die KAK vorliegt, das Bestimmtheitsmaß (R^2) ist 0,00. Eine mögliche Interpretation dieses Ergebnisses liegt in der permanenten Ladung der Tonminerale, siehe Abbildung 5 gemäß 2.4.2. Durch diese Tatsache kann festgehalten werden, dass in der alleinigen Betrachtung des Tongehaltes kein unmittelbarer Einfluss auf die KAK besteht.

Diese Hypothese kann auch anhand von Erkenntnissen aus der Literatur bestätigt werden: Demnach hat der Humusgehalt einen wesentlich größeren Einfluss auf die KAK als der Tongehalt. Innerhalb der Tonfraktion gibt es jedoch Unterschiede aufgrund der Art der Tonminerale, die hier nicht im Detail mit der einfachen Tonbestimmung erfasst wurden.

4 Dokumentation und Ergebnisse

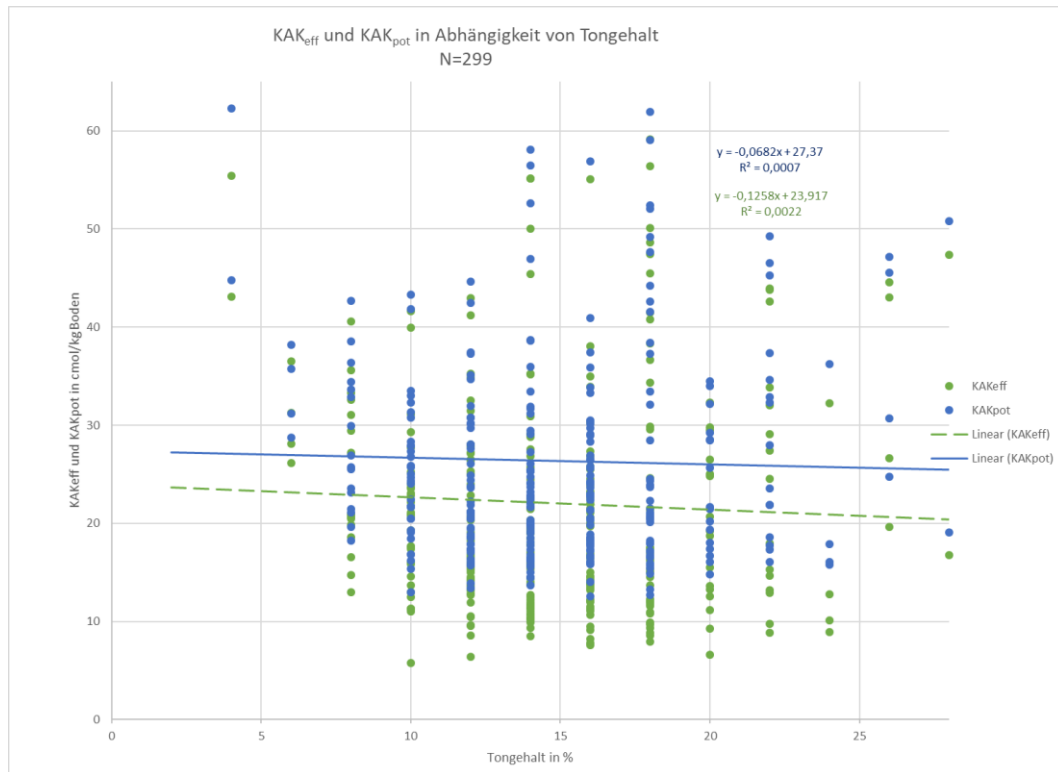


Abbildung 31: Darstellung der KAK_{eff} und KAK_{pot} in Abhängigkeit vom Tongehalt.

4.3.3 Humus- und Tongehalt

Um mögliche Wechselwirkungen von Ton und Humus zu erkennen, wurden die beiden Parameter miteinander verknüpft. Dabei wurde für Humus, aufgrund des eingeschränkten Stichprobenumfangs, eine angepasste Einstufung vorgenommen. Die Tongehalte wurden für Grünlandböden laut Tabelle 4, gemäß RSGD 8 gruppiert. Da sich in den 299 Datensätzen überwiegend Proben unter 25% Ton befinden, wurde die Unterscheidung zwischen leichten Böden (unter 15% Ton) und mittleren Böden (15-25% Ton), gewählt (siehe Abbildung 32).

4 Dokumentation und Ergebnisse

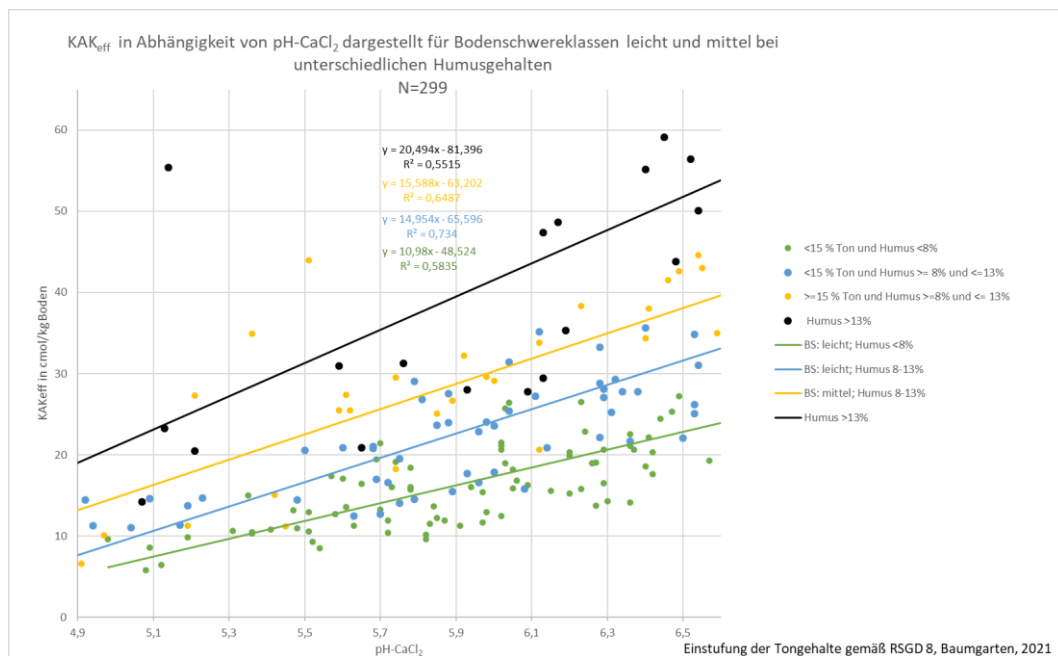


Abbildung 32: Der Einfluss des pH-CaCl₂ auf die KAK_{eff}, für die beiden Bodenschwerklassen leicht und mittel, bei unterschiedlichen Humusgehaltsbereichen.

Als wesentliche Unterscheidung können die beiden Bereiche: leicht, 8-13% Humus (blau) und mittel, 8-13% Humus (gelb), herangezogen werden. Demnach liegt die KAK_{eff} trotz gleichen Humusbereiches, bei mittleren Böden um rund 5 cmol/kg höher, als bei leichten Böden.

Dieser Effekt ist auf die Wechselwirkung zwischen Ton und Humus zurückzuführen. Demnach werden Humuspartikel durch die sogenannte Lebendverbauung und Calciumbrücken (siehe 2.5.2) mit Tonpartikel verbunden und somit stabilisiert. Die dabei gebildete stabile Verbindung wird als „Ton-Humus-Komplex“ bezeichnet. Durch dieses Zusammenspiel entsteht, die für die Bodenfruchtbarkeit wesentliche Krümelstruktur eines Bodens (Amelung et al., 2018). Da der Tongehalt eines Bodens einen wesentlichen Einfluss auf dessen Humusgehalt hat, kann somit festgehalten werden, dass sich der Tongehalt indirekt auch auf die KAK auswirkt.

Mit der folgenden multiplen Regressionsanalyse gehen alle Parameter mit den konkreten Messwerten ein.

4.4 Multiple Regressionsanalyse

In Anlehnung an die Studie von Danneberg (1999), zur Abschätzung der austauschbaren Kationen auf landwirtschaftlichen Böden Ostösterreichs mittels Regressionsgleichungen, wurde nun erstmalig auch für oberösterreichische Grünlandstandorte, eine multiple Regressionsanalyse zur Beschreibung der KAK durchgeführt (Danneberg, 1999). Zielsetzung dieser Auswertung ist, zu ermitteln, welchen Einfluss der pH-Wert, der Ton- und Humusgehalt auf die KAK_{eff} und KAK_{pot} haben, sowie die KAK mittels Regressionsgleichungen abzuschätzen. Für diese Analyse wurde die Datengrundlage von oberösterreichischen Grünlandböden aus dem BIGL-Projekt herangezogen. Die statistische Auswertung wurde mittels dem Statistikprogramm IBM SPSS.Statistic 26 und seiner Prozedur Regression durchgeführt. Die detaillierten Angaben zu den verwendeten Rechenprozeduren sind dem Anhang zu entnehmen.

Laut Danneberg (1999), ist die Anwendbarkeit einer multiplen Regressionsanalyse auf das theoretische Vorhandensein einer Normalverteilung der Daten gebunden. Diese Voraussetzung ist bei Bodendaten häufig nicht gegeben, da aber die meisten statistischen Tests sehr robust gegenüber einer solchen Verletzung der Forderung einer Normalverteilung sind, wurde das Verfahren angewandt (Danneberg, 1999).

Bei der angewandten multiplen Regressionsanalyse ist zu beachten, dass die KAK jeweils die abhängige Variable darstellt. Die unabhängigen Variablen sind der pH-Wert, der Ton- und Humusgehalt. Der Stichprobenumfang von 299 Proben ergibt sich aus der Tatsache, dass bei diesen Proben die Parameter KAK, Humus, pH-Wert und Tongehalt vollständig vorliegen.

Die Regressionsgleichung für die Abschätzung der KAK_{eff} sowie der KAK_{pot} bei bekanntem Tongehalt, pH-Wert und Humusgehalt hat die Form:

$$Y = C + B_1 \cdot X_1 + B_2 \cdot X_2 + B_3 \cdot X_3$$

In Tabelle 19 sind die einzelnen Variablen der Gleichung beschrieben.

4 Dokumentation und Ergebnisse

Variable	Beschreibung
Y	KAK als unabhängige Variable in cmol/kg
C	Konstante
B ₁	Regressionskoeffizient für den Tongehalt
X ₁	Tongehalt in %
B ₂	Regressionskoeffizient für den pH-Wert
X ₂	pH-Wert
B ₃	Regressionskoeffizient für den Humusgehalt
X ₃	Humusgehalt in %

Tabelle 19: Beschreibung der Variablen für die Regressionsgleichungen zur Abschätzung der KAK.

Tabelle 20 zeigt die Mittelwerte und die Standardabweichung (s) der beiden KAK-Größen. Dargestellt ist die KAK in cmol/kg als abhängige Variable sowie der Tongehalt, pH-Wert und Humusgehalt als unabhängige Variablen. Der Mittelwert der KAK_{eff} beträgt demnach 22,06 cmol/kg und bei KAK_{pot} 26,67 cmol/kg. Bei den unabhängigen Variablen besteht aufgrund desselben Datensatzes kein Unterschied beim Mittelwert und s zwischen KAK_{eff} und KAK_{pot}.

	KAK _{eff} (N=299)		KAK _{pot} (N=299)	
	Mittel	s	Mittel	s
KAK (cmol/kg)	22,06	12,25	26,67	11,61
Ton (%)	14,78	4,53	14,78	4,53
pH-Wert	5,91	0,54	5,91	0,54
Humus (%)	8,52	4,70	8,52	4,70

Tabelle 20: Deskriptive Statistikkennzahlen (Mittelwert und Standardabweichung (s)) der KAK_{eff} und KAK_{pot}.

Wie in Tabelle 21 ersichtlich, wurde bei der KAK_{eff} für das Modell ein Bestimmtheitsmaß von $R^2=0,803$ festgestellt. Somit kann über 80% der Streuung der KAK_{eff} mittels der drei Variablen pH-Wert, Ton- und Humusgehalt erklärt

4 Dokumentation und Ergebnisse

werden. Es wurde festgestellt, dass die KAK_{eff} bei einer Erhöhung von 1% Ton um 0,58 cmol/kg steigt. Eine Steigerung des pH-Wertes um eine Einheit erhöht die KAK_{eff} um 13,8 cmol/kg. Beim Humus bewirkt eine Erhöhung um ein Humusprozent einen Anstieg der KAK_{eff} von 1,66 cmol/kg (siehe Tabelle 22)

ANOVA ^a : Model Summary R ² =0,803						
Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	35750,113	3	11916,704	398,538	,000 ^b
	Residual	8790,898	294	29,901		
	Total	44541,011	297			
a. Dependent Variable: KAK_cmol_eff						
b. Predictors: (Constant), Humus, pH-Wert, Ton						

Tabelle 21: Statistische Kennzahlen der KAK_{eff} .

Coefficients ^a					
Model		Unstandardized Coefficients		t	Sig.
		B	Std. Error		
1	(Constant)	-82,309	3,890	-21,160	0,000
	Ton	0,582	0,073	7,958	0,000
	pH-Wert	13,813	0,600	23,027	0,000
	Humus	1,665	0,070	23,729	0,000
a. Dependent Variable: KAK_cmol_eff					

Tabelle 22: Regressionskoeffizienten der KAK_{eff} .

Somit ergibt sich folgende Regressionsgleichung zur Abschätzung der KAK_{eff} :

$$Y_{\text{eff}} = - 82,309 + 0,582 \cdot X_1 + 13,813 \cdot X_2 + 1,665 \cdot X_3$$

4 Dokumentation und Ergebnisse

Wie in Tabelle 23 ersichtlich, wurde bei der KAK_{pot} für das Modell ein Bestimmtheitsmaß von $R^2=0,798$ festgestellt. Somit kann rund 80% der Streuung der KAK_{pot} mittels der drei Variablen pH-Wert, Ton- und Humusgehalt erklärt werden. Es wurde festgestellt, dass die KAK_{pot} bei einer Erhöhung von 1% Ton um 0,607 cmol/kg steigt. Eine Steigerung des pH-Wertes um eine Einheit erhöht die KAK_{pot} um 9,925 cmol/kg. Beim Humus bewirkt eine Erhöhung um ein Humusprozent einen Anstieg der KAK_{pot} von 1,874 cmol/kg (siehe Tabelle 24).

ANOVA ^a : Model Summary $R^2=0,798$						
Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	31967,377	3	10655,792	387,632	,000 ^b
	Residual	8081,898	294	27,489		
	Total	40049,275	297			
a. Dependent Variable: KAK_cmol_pot						
b. Predictors: (Constant), Humus, pH-Wert, Ton						

Tabelle 23: Statistische Kennzahlen der KAK_{pot} .

Coefficients ^a					
Model		Unstandardized Coefficients		t	Sig.
		B	Std. Error		
1	(Constant)	-56,879	3,730	-15,250	0,000
	Ton	0,607	0,070	8,646	0,000
	pH-Wert	9,925	0,575	17,256	0,000
	Humus	1,874	0,067	27,848	0,000
a. Dependent Variable: KAK_cmol_pot					

Tabelle 24: Regressionskoeffizienten der KAK_{pot} .

Somit ergibt sich folgende Regressionsgleichung zur Abschätzung der KAK_{pot} :

$$Y_{pot} = - 56,879 + 0,607 \cdot X_1 + 9,925 \cdot X_2 + 1,874 \cdot X_3$$

4 Dokumentation und Ergebnisse

Die aus der multiplen Regressionsanalyse gewonnenen Daten stimmen mit den Auswertungen von 4.3 gut überein. So wurde beispielsweise beim Humusgehalt aus den 782 Proben eine Veränderung der KAK_{eff} von 1,7903 cmol/kg, bei einer Steigerung von einem Humusprozent festgestellt. Das R^2 lag hierbei jedoch nur bei 0,44 (siehe 4.3.1 bzw. Abbildung 29).

Gemäß Danneberg (1999), wurden in weiterer Folge die pH-Werte gruppiert und als Bandbreiten dargestellt. Um eine einheitliche Gruppierung zu gewährleisten, wurde die Einstufung in Anlehnung an die pH-Bereiche aus Tabelle 16 vorgenommen.

4.4.1 Gliederung nach dem pH-Wert

Die Aufteilung der Proben in drei pH-Bereiche ergibt in allen Fällen noch eine ausreichende Besetzung (N). In Tabelle 25 sind die statistischen Kennzahlen der Bereiche ersichtlich. Daraus ergibt sich im Mittel eine Steigerung der KAK_{eff} von 14,08 cmol/kg im niedrigsten pH-Bereich, auf 40,45 cmol/kg im höchsten pH-Bereich. Der Tongehalt erweist sich als relativ stabil, wohingegen der Humusgehalt in den ersten beiden pH-Bereichen auf einem konstanten Niveau von 8,19 bis 8,33% liegt. Erst ab $\text{pH} > 6,55$ steigt der Humusgehalt im Schnitt auf über 10,5% an. Die Werte der KAK_{pot} sind analog zu jenen der KAK_{eff} zu interpretieren.

	pH $\leq 5,55$		pH $> 5,55 \leq 6,55$		pH $> 6,55$	
	N=80		N=187		N=32	
	Mittel	s	Mittel	s	Mittel	s
KAK_{eff} (cmol/kg)	14,08	7,50	22,43	10,02	40,45	13,81
KAK_{pot} (cmol/kg)	21,37	8,66	26,40	10,05	42,04	13,75
Ton (%)	16,03	4,55	14,32	4,27	14,69	5,78
Humus (%)	8,19	6,37	8,33	3,79	10,58	4,18

Tabelle 25: Deskriptive Statistik Kennzahlen der KAK_{eff} und KAK_{pot} bei unterschiedlichen pH-Bereichen. Die Werte des Ton- und Humusgehalts sind für beide KAK-Größen gültig

Die Regressionsgleichung für die Abschätzung der KAK_{eff} , sowie der KAK_{pot} bei bekanntem Ton- und Humusgehalt für bestimmte pH-Bereiche hat die Form:
$$Y = C + B_1 \cdot X_1 + B_3 \cdot X_3$$

4 Dokumentation und Ergebnisse

Tabelle 26 zeigt die Kenndaten der Regressionskoeffizienten Ton und Humus bei Gruppierung des pH-Wertes in drei Bereiche. Durch diese Aufteilung ergab sich für den pH-Bereich >6,55 ein deutlich höheres R von 0,950, demnach $R^2=0,903$ bei KAK_{eff} sowie $R=0,955$, also $R^2=0,912$ bei KAK_{pot} . Für die restlichen zwei pH-Bereiche fallen hingegen die Werte für R bis auf ein Minimum von 0,774 bei KAK_{eff} , was einem R^2 von nur mehr 0,598 entspricht. Grundsätzlich wurde festgestellt, dass die Regressionskoeffizienten für Humus mit sinkendem pH-Wert abnehmen. Der Grund dafür besteht in der Tatsache, dass sich im sauren pH-Bereich mehr dissoz. H^+ -Ionen am Austauschere befinden (siehe 2.5). Bei pH-Werten über 6,55 entspricht ein Zuwachs von einem Humusprozent, eine Erhöhung der KAK_{eff} um 3,12 cmol/kg. Hingegen im sauren pH-Bereich unter 5,55, nur noch 0,98 cmol/kg pro Humusprozent. Die permanente Ladung der Tonminerale (siehe 2.4.2 bzw. Abbildung 5), ist die Ursache für die wesentlich geringere Abhängigkeit von Ton zum pH-Wert.

pH-Bereich	N	KAK_{eff}				KAK_{pot}			
		R	C	Ton	Humus	R	C	Ton	Humus
<=5,55	80	0,774	-1,940	0,500	0,977	0,875	0,702	0,637	1,277
>5,55 <=6,55	187	0,813	-4,332	0,612	2,160	0,859	-1,256	0,595	2,296
>6,55	32	0,950	4,287	0,158	3,197	0,955	5,162	0,196	3,212

Tabelle 26: Regressionskoeffizienten für Ton und Humus bei KAK als abhängige Variable bei unterschiedlichen pH-Bereichen, inkl. Stichprobenumfang (N) und Korrelationskoeffizienten (R).

Somit ergeben sich folgende Regressionsgleichungen zur Abschätzung der KAK_{eff} und KAK_{pot} am Beispiel für den pH-Bereich 5,55 bis 6,55:

$$Y_{eff} = -4,332 + 0,612 \cdot X_1 + 2,160 \cdot X_3$$

$$Y_{pot} = -1,256 + 0,595 \cdot X_1 + 2,296 \cdot X_3$$

Fasst man die generierten Erkenntnisse aus der multiplen Regressionsanalyse zusammen, kann festgestellt werden, dass sich die Auswirkungen einer Veränderung des pH-Wertes, des Humusgehalts oder des Tongehalts auf die KAK mit einer zuverlässigen Genauigkeit abschätzen lassen. Es wird jedoch darauf verwiesen, dass die analytische Bestimmung ausschließlich für oberösterreichische Grünlandstandorte durchgeführt wurde. Mittels der ermittelten

Schätzgleichungen kann sowohl die KAK_{eff} , als auch die KAK_{pot} näherungsweise abgeschätzt werden. Der Tongehalt, der Humusgehalt als auch der pH-Wert müssen dafür bekannt sein. Diese Daten und Ergebnisse wurden in dieser Masterthesis in der Form erstmalig publiziert und können für die Bestimmung der Bodenfruchtbarkeit auf oberösterreichischen Grünlandböden herangezogen werden.

4.5 Labor- und Methodenvergleich

Die genannten Ergebnisse bezogen sich bislang ausschließlich auf Grünlandböden aus OÖ. Die chemische Bodenuntersuchung wurde bei diesen Proben ausschließlich nach den in den RSGD 8 genannten Methoden durchgeführt. Darüber hinaus gibt es noch weitere Organisationen und Labore, welche eine Bodenuntersuchung anbieten. Da sich bei den verschiedenen Laboren auch die Analysemethoden unterscheiden, soll in einer weiteren Forschungsfrage geklärt werden, ob und in welchem Ausmaß sich verschiedene Bodenuntersuchungsmethoden hinsichtlich Düngungs- und Kalkungsempfehlungen auf Ackerstandorten in Österreich unterscheiden. Dazu wurde getrocknetes und gesiebtes Bodenmaterial aus Bodenproben eines Ringversuches an drei Labore zur Analyse versandt. Damit wurde sichergestellt, dass jedes Labor das exakt gleiche Material zur Untersuchung erhalten hat, somit sind die Analysewerte, insbesondere jedoch die darauf basierenden Düngungs- und Kalkungsempfehlungen vergleichbar und bewertbar. Anhand dieses Vergleiches soll folgende Hypothese geklärt werden: *Aufgrund unterschiedlicher Strategien bei der Bewertung von Bodenuntersuchungen, werden unterschiedlich hohe Düngungs- und Kalkungsempfehlungen ausgegeben, diese gehen grundsätzlich jedoch in dieselbe Richtung.* Es wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass es sich bei den Proben überwiegend um Ackerstandorte aus Österreich handelt. Die ausgewählten Proben decken einen weiten Bereich von unterschiedlichen Bodeneigenschaften und Nährstoffgehalten ab. Eine Übersicht über die Mediane und Spannweiten der Proben ist in Tabelle 27 ersichtlich. Es wurden die Ergebnisse nach Methoden gemäß RSGD 8 dargestellt.

4 Dokumentation und Ergebnisse

	Humus [%]	Ton [%]	P (CAL) [mg/kg]	K (CAL) [mg/kg]	Mg (CaCl ₂) [mg/kg]	CaCO ₃ [%]	pH-Wert CaCl ₂
Median	3,11	15,6	65	113	122	0,4	6,35
Minimum	1,51	6,4	11,8	28,7	29	0,01	3,24
Maximum	16,8	46,6	238	390	340	18,4	7,59

Tabelle 27: Übersicht über die Mediane und Spannweiten ausgewählter Bodenparameter – untersucht nach den Methoden gemäß RSGD 8.

In Summe konnten 21 Proben für den Vergleich herangezogen werden. Die Auswahl der drei Labore erfolgte aufgrund der Verschiedenheit in der Analysemethodik. Tabelle 28 zeigt einen kurzen Überblick über die gewählten Institutionen samt Methoden.

Institution	AGES	Agrana	Geobüro Christophel
Methoden	<p>P und K: CAL (Calcium-Acetat-Lactat-Extrakt)</p> <p>pH-Wert: CaCl₂ (Calcium Chlorid) + Calciumacetat-Lösung (pH-Ac)</p> <p>Mg: Methode nach Schachtschabel</p> <p>Humus: Elementaranalyse nach trockener Verbrennung</p>	<p>EUf (Elektro-Ultra-Filtration)</p>	<p>Albrecht Plus (eine detaillierte Beschreibung der verwendeten Analysemethoden ist nicht öffentlich zugänglich)</p>
Besonderheit	<p>Einteilung in Gehaltsklassen (A-E) bei P, K, Mg und Kalkzustand</p>	<p>Fraktionierung der Nährstoffe in</p> <p>1. direkt pflanzenverfügbar</p> <p>2. Nachlieferungspotenzial des Bodens</p>	<p>Analyse der KAK + Basensättigungsverhältnisse Ca/Mg, Ca/K, Mg/K</p>

4 Dokumentation und Ergebnisse

Ziel	Gehaltsklasse C erreichen	Erreichung der optimalen Verhältnisse im Boden → im Gleichgewicht
Überprüfung	Überprüfung durch zahlreiche, mehrjährige Feldversuche	Keine Überprüfung durch Feldversuche

Tabelle 28: Überblick über die ausgewählten Bodenuntersuchungsmethoden samt Beschreibung.

Im Folgenden werden die ausgewählten Institutionen genannt und die Analytik – sofern öffentlich zugänglich – beschrieben.

4.5.1 AGES

Die für Österreich in den RSGD 8 definierten Verfahren zur chemischen Bodenuntersuchung wurden bereits in 2.2.1 ausführlich beschrieben und bei den Methoden wird auf Tabelle 1 verwiesen.

4.5.2 Agrana

Hier wird das Verfahren Elektro-Ultra-Filtration (EUF) angewandt. Die EUF-Methode ist entsprechend standardisiert und im Methodenbuch der VDLUFA publiziert. Sie wurde anhand von empirischen Versuchen kalibriert, wobei die exakte Analytik und Interpretation in den RSGD 8 genannt und beschrieben werden. Somit kann diese Methode gemäß RSGD 8, auch zur Charakterisierung der Nährstoffgehalte im Boden verwendet werden. Die Besonderheit dieser Methode besteht darin, in einer Suspension (= Stoffgemisch aus Flüssigkeit und Feststoff) von Boden in Wasser - mit einem Verhältnis von 1:10 - eine elektrische Spannung anzulegen und dadurch der Bodenprobe die Nährstoffe zu entziehen. Hierbei wird Spannung, Temperatur und Zeit variiert und somit werden Nährstofffraktionen mit unterschiedlicher Bindungsstärke gewonnen. Eine schematische Darstellung einer EUF-Zelle ist in Abbildung 33 ersichtlich. Diese Bindungsstärke korreliert auch mit der für die Pflanzen verfügbaren Nährstoffform. Nährstoffe der 1. Fraktion sind für die Pflanzen leicht verfügbar, wohingegen Stoffe der 2. Fraktion eher das Nachlieferungsvermögen aus dem Boden charakterisieren (Baumgarten, 2021).

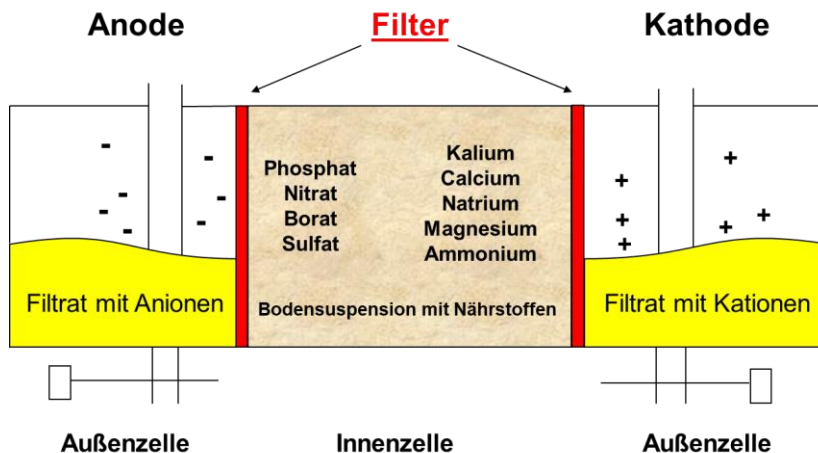


Abbildung 33: Schema einer EUF-Zelle (Quelle: Agrana Research&Innovation Center).

In der Grunduntersuchung werden die Gehalte an Nitrat, organischer Stickstoff, P, K, Ca, Schwefel, Na und Bor analysiert. Darüber hinaus kann der pH-CaCl₂ anhand des Calciumgehalts abgeleitet werden. Weiters wird die Untersuchung des Humusgehalts, der Spurenelemente, sowie die Berechnung der KAK angeboten (Eigner, 2022).

4.5.3 Geobüro Christophel

Es wird nach Methoden und Bewertungen unter der Bezeichnung Albrecht Plus vorgegangen. Dies wurde von William A. Albrecht, Professor für Bodenkunde an der Universität Missouri, entwickelt. Bei dem Verfahren werden die Nährstoffe nicht in Gehaltsklassen wie beispielsweise bei CAL eingeteilt, sondern die Bodenfruchtbarkeit wird über die Verhältnisse der Kationen zueinander definiert. Diese befinden sich an den Austauscherteilchen wie den Tonmineralen oder der organischen Substanz im Boden. Die Analyse der KAK erfolgt in dem Verfahren standardmäßig, da diese als Grundlage für die Düngeempfehlung gesehen wird. Darüber hinaus werden neben den Reinnährstoffmengen auch die konkrete Düngerform als Düngeempfehlung genannt (Rühlicke, 2019a; Weidemann et al., 2020). Das Grundgerüst der Analyse bildet die KAK, sowie die Sättigungen der basischen Kationen (Ca, K, Mg und Na). Diese werden als Ist-Wert gemessen und jeweilige Zielbereiche (Soll-Wert) definiert. Auch gewisse Nährstoffverhältnisse sollen aufgrund von Wechselwirkungen und Antagonismen (=Gegensätze) angestrebt werden. Neben der pH-Bestimmung im H₂O und KCl, werden weiters der Carbonatgehalt, Stickstoff-Nachlieferung, Phosphor (verfügbar und Vorrat), Schwefel, Humus, sowie Spurenelemente und bei Bedarf die Bodenart ausgewiesen. Bei den konkreten Düngeempfehlungen werden Prioritäten definiert,

4 Dokumentation und Ergebnisse

welche Maßnahme man als erstes umsetzen sollte. Grundsätzlich steht die Bodendüngung und der Ausgleich der Nährstoffverhältnisse im Fokus des Verfahrens (Geobüro Christophel, 2019).

Nach der Beschreibung der Verfahren werden im folgenden Kapitel konkrete Ergebnisse präsentiert.

4.5.4 Vergleich der Messwerte

Im ersten Schritt wurden die schriftlichen Bodenuntersuchungsergebnisse digitalisiert und in Excel aufbereitet und sortiert. Die ausgegebenen Messwerte ausgewählter Parameter der einzelnen Untersuchungen werden im Folgenden näher beschrieben. Bei der Darstellung der folgenden Abbildungen ist zu beachten, dass die Gliederung nach dem Standardverfahren der RSGD 8 (grüne Balken) gewählt wurde. Das heißt, in den Abbildungen wurden die Proben aufsteigend nach den Messwerten der AGES sortiert. Bei der Interpretation der Werte muss vor allem die Probennummer drei gesondert betrachtet werden, da es sich hier um einen sehr sauren Waldboden handelt. Dieser wurde mitaufgenommen, um festzustellen wie sich Extremwerte auf die Messergebnisse und die Empfehlungen auswirken.

4.5.4.1 Humus

In Abbildung 34 wurden die Humusgehalte der 21 Proben verglichen und grafisch dargestellt. Dabei zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung der gemessenen Humuswerte von allen drei Laboren. Die Unterschiede der beiden standardisierten Verfahren, gründen in den unterschiedlichen Verbrennungstemperaturen zur Bestimmung des Humusgehalts. Gemäß ÖNORM L1080 kann der organische Kohlenstoff bei Verbrennungstemperaturen zwischen 650°C (AGES) und 550°C (gemäß dem Methodenbuch der VDLUFA) bestimmt werden, was von der Agrana neben dem EUF-Verfahren verwendet wird. Im Schnitt werden beim Geobüro um 0,45% höhere Humusgehalte ausgewiesen.

4 Dokumentation und Ergebnisse

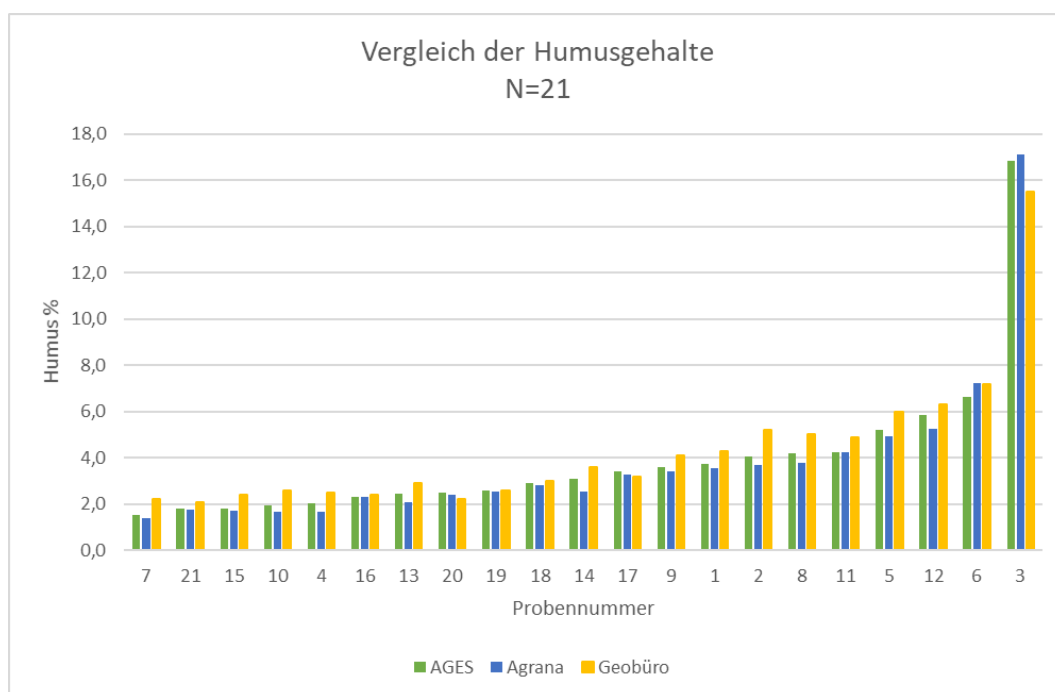


Abbildung 34: Vergleich der 21 Proben anhand der gemessenen Humusgehalte in %.

4.5.4.2 pH-Wert

Wie bereits in 2.3.1 beschrieben, gibt es bei der Bestimmung des pH-Wertes drei verschiedene Methoden. In Abbildung 35 werden die drei Verfahren und die in der Literatur angegebenen Unterschiede anhand der 21 Proben überprüft und dargestellt. In der Standardmethode wird der pH-Wert in CaCl_2 bestimmt. Dieses Verfahren kommt in der AGES (grüne Balken) zur Anwendung. Im Geobüro wird der pH-Wert sowohl im H_2O (roter Balken) als auch im KCl (gelber Balken) ausgewiesen. Im Vergleich zur Standardmethode wurden in vorliegender Untersuchung im H_2O im Schnitt um 0,3 Einheiten höhere pH-Werte gemessen, im KCl im Schnitt 0,27 Einheiten geringere pH-Werte ausgewiesen. Der Vergleich der 21 Messwerte unterstreicht somit die Angaben aus 2.3.1.

4 Dokumentation und Ergebnisse

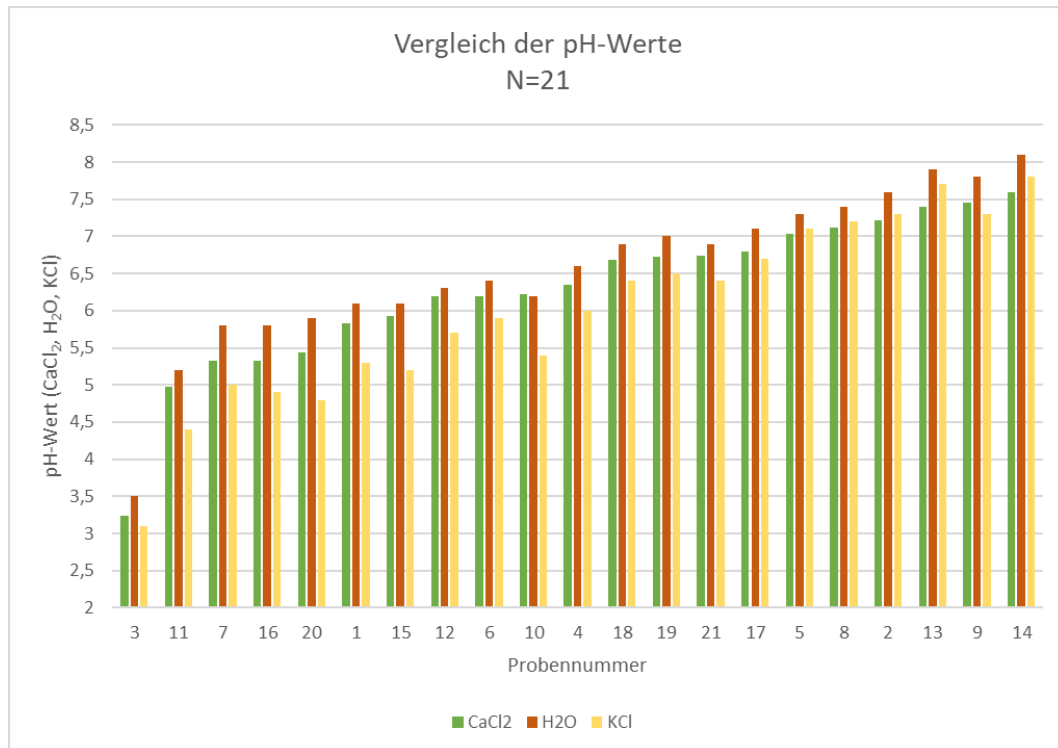


Abbildung 35: Vergleich der 21 Proben anhand der gemessenen pH-Werte.

4.5.5 Vergleich der Düngungsempfehlungen

In weiterer Folge wurden auch die jeweiligen Düngungsempfehlungen gegenübergestellt. Zu beachten ist hierbei, dass sich die Mengenangaben jeweils auf die Reinnährstoffmengen beziehen. Die in 4.5.3 empfohlenen Düngerformen beim Geobüro wurden auf die Reinnährstoffmengen umgerechnet, damit ein Vergleich gezogen werden kann. Um bei allen drei Laboren den gleichen Bezug zu gewährleisten, wurden zur Erstellung der Düngungsempfehlung die Angaben standardisiert. Als Vorfrucht wurde Wintergerste gewählt, wobei das Stroh vom Feld abgefahren wurde. Die Düngungsempfehlung bezieht sich jeweils auf die Kultur Körnermais, mit einer Ertragserwartung von elf Tonnen Trockenmasse pro Hektar. Eine Kalkung wurde in den letzten Jahren nicht durchgeführt. Bei der Darstellung der folgenden Grafiken ist zu beachten, dass die Gliederung nach dem Verfahren gemäß RSGD 8 (grüne Balken), gewählt wurde. Das heißt, in den Abbildungen wurden die Proben aufsteigend, nach der empfohlenen Düngemengen der AGES, entsprechend sortiert. Bei Phosphor und Kalium handelt es sich um Netto-Empfehlungen, es wird nur die Nährstoffmenge ausgewiesen, die entsprechend der Abfuhr von elf Tonnen Körnermais pro Hektar zu ergänzen ist.

4 Dokumentation und Ergebnisse

4.5.5.1 Phosphor

In der Abbildung 36 ersichtlich ist die Gegenüberstellung der empfohlenen Düngungsmenge beim Nährstoff Phosphor in kg P_2O_5 /ha. Dabei zeigt sich, ausgenommen einiger Proben, eine recht gute Übereinstimmung der empfohlenen Düngungsmenge. Die höhere Phosphorempfehlung seitens der Agrana bei Probe 14 ist begründbar mit einem festgestellten geringen Gehalt an leicht verfügbarem Phosphor der 1. Fraktion, jedoch einem erhöhten Wert an Calcium in der 2. Fraktion. Bei Probe 12 wurde nur entsprechend den RSGD 8 von der AGES eine Empfehlung ausgegeben. Grund dafür ist die Einstufung in Gehaltsklassen, dabei ergeben sich bei manchen Proben Grenzbereiche bei verschiedenen Verfahren. In diesem Fall wurde die Probe seitens der AGES noch in Gehaltsklasse C, seitens der Agrana bereits in D eingestuft. Auffällig ist die Probe 8, dabei wird nur vom Geobüro eine Menge von 130 kg P_2O_5 /ha ausgegeben. Beim Geobüro wird bei einigen Proben keine Düngung mit P_2O_5 empfohlen. Bei den Proben 2 und 5 wird von keinem Labor eine Phosphordüngung empfohlen.

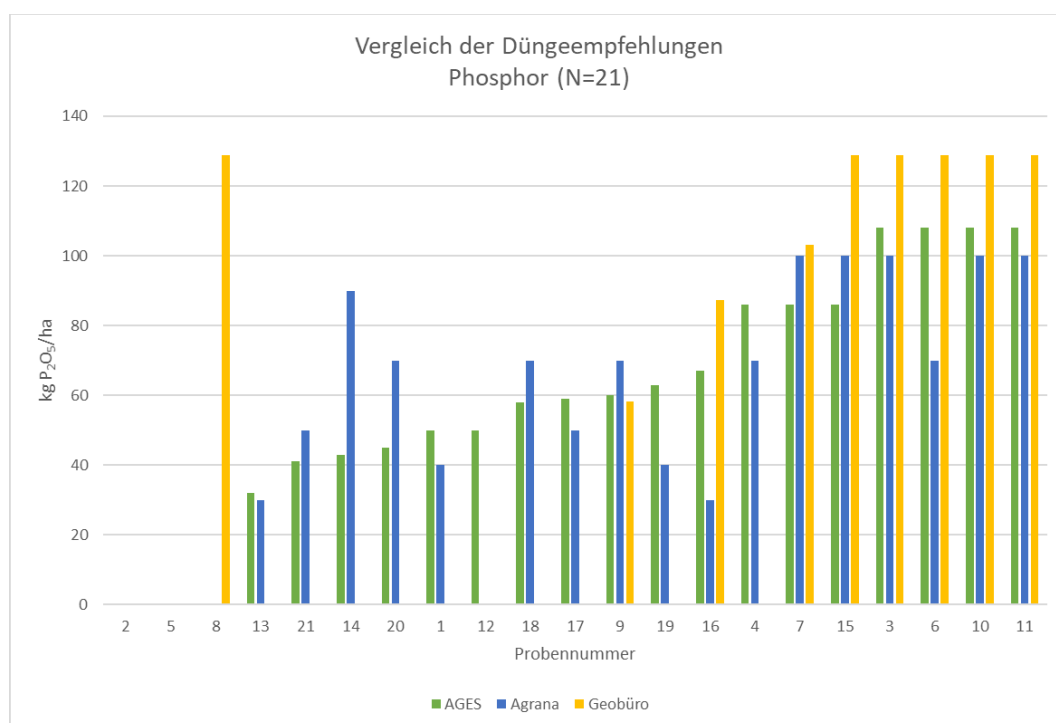


Abbildung 36: Vergleich der Düngungsempfehlungen der 21 Proben beim Nährstoff Phosphor in kg P_2O_5 /ha.

4.5.5.2 Kalium

Abbildung 37 zeigt den Vergleich der empfohlenen Düngemenge beim Nährstoff Kalium in kg K_2O /ha. Von keinem der Labore wurde beiden Proben 1 und 19 eine

4 Dokumentation und Ergebnisse

Düngung mit Kalium ausgegeben. Bei den Proben 8, 9 und 13 wird ausschließlich vom Geobüro eine Kaliumdüngung empfohlen. Tendenziell verlaufen die Empfehlungen in die gleiche Richtung. Insbesondere nach den RSGD 8, wirkt sich die Darstellung als Netto-Empfehlung deutlich aus, weil der Kaliumbedarf für das Maisstroh bei hoher Ertragslage mit 150 kg K₂O bewertet wird. Bei den Empfehlungen vom Geobüro Christophel wird darauf hingewiesen, dass hohe Nährstoffmengen im Verlauf der nächsten zwei bis drei Jahre auszubringen sind.

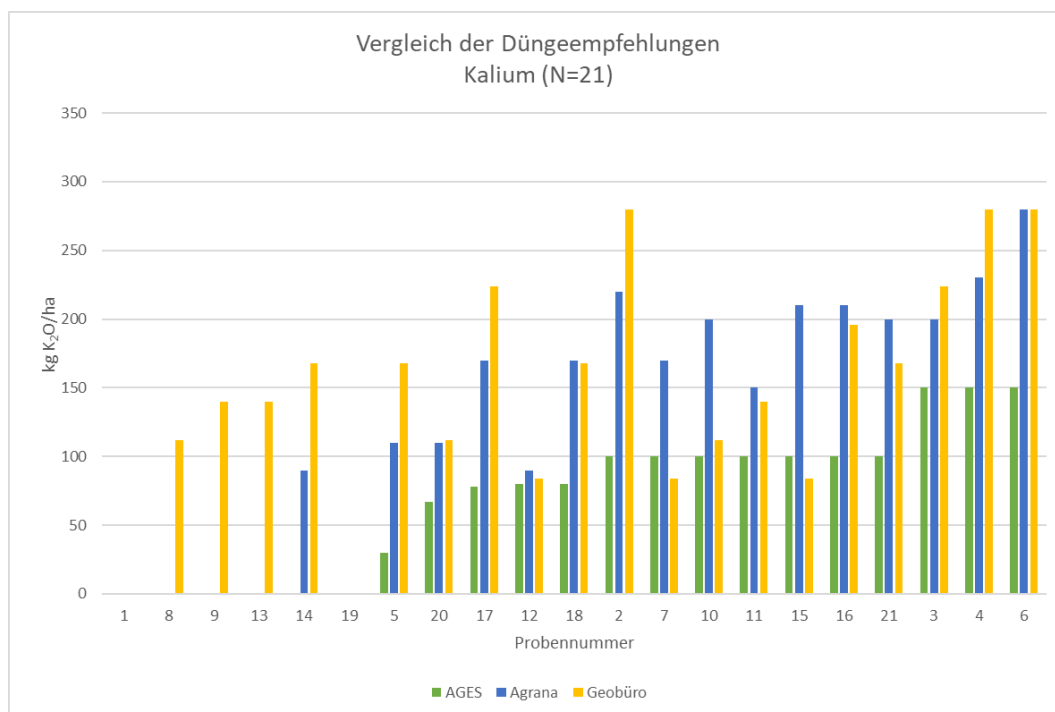


Abbildung 37: Vergleich der Düngungsempfehlungen der 21 Proben beim Nährstoff Kalium in kg K₂O/ha.

4.5.5.3 Magnesium

In der Abbildung 38 wurde der Vergleich der Magnesiumdüngungsempfehlungen in kg MgO/ha gezogen und dargestellt. Hier zeigt sich ein recht uneinheitliches Bild: Vom Geobüro werden teilweise sehr hohe Düngemengen an MgO empfohlen. Diese gründen in der Erreichung optimaler Nährstoffverhältnisse. Zu beachten sind dabei jedenfalls die Angaben am Erläuterungsbogen zu den Bodenuntersuchungen, wonach sehr hohe Düngemengen (Proben 1, 3, 7, 11 16 und 20) auf die nächsten zwei bis drei Jahre aufzuteilen sind. Die Proben 3 und 11 wurden aufgrund der hohen Werte mit einer Fußnote versehen, da ansonsten die grafische Darstellung unübersichtlich werden würde. Bei der AGES und Agrana werden nach den RSGD 8 bei etwa zwei Drittel der Proben keine Mg-Gaben empfohlen, bei den übrigen Standorten werden Düngermengen an MgO von 10 –

4 Dokumentation und Ergebnisse

70 kg/ha pro Jahr angegeben. Diese empfohlenen Jahresmengen können zu praxisgerechten Gaben (Düngung etwa alle zwei bis drei Jahre) zusammengefasst werden und gelten für die folgenden vier bis sechs Jahre, bis zur nächsten Bodenuntersuchung.

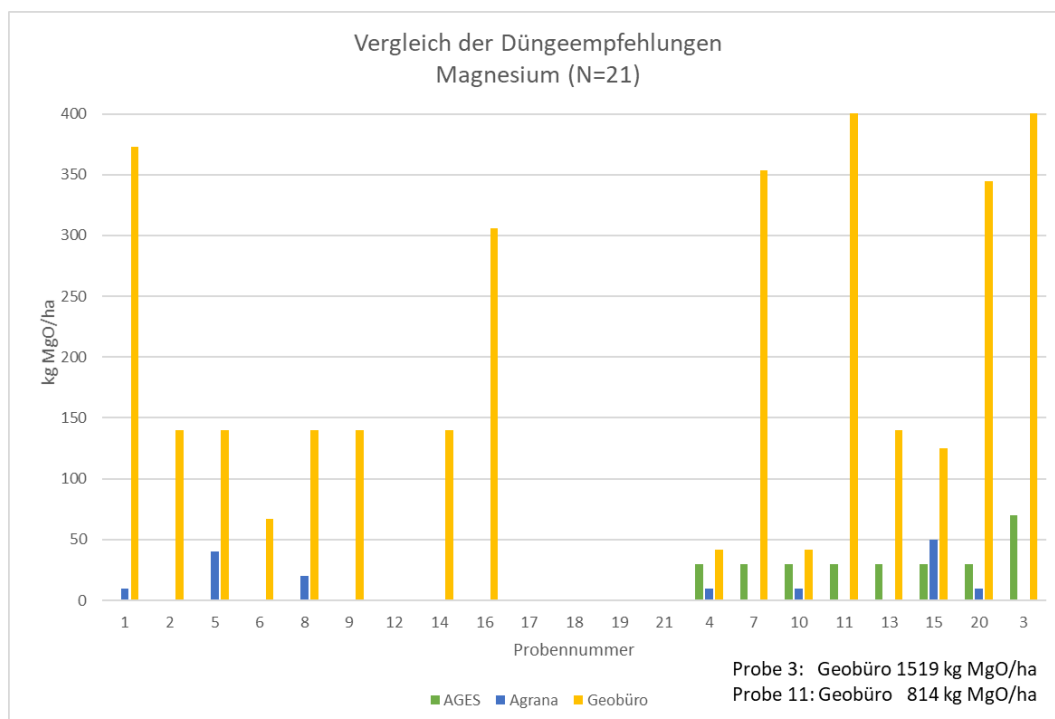


Abbildung 38: Vergleich der Düngungsempfehlungen der 21 Proben beim Nährstoff Magnesium in kg MgO/ha.

4.5.5.4 Calcium

Die Düngung mit Calcium in Form von Kalk hat vor allem einen bodenverbessernden Effekt und wirkt sich besonders auf den pH-Wert aus (siehe 2.5.2 und 2.5.3). Zudem ist Calcium aber auch ein Nährstoff für die Pflanzen. Abbildung 39 zeigt die empfohlenen Reinnährstoffmengen in kg CaO/ha der 21 Proben. Grundsätzlich wird die Kalkdüngung (als CaO berechnet) von allen Verfahren als Maßnahme, welche auf zwei bis drei Jahre aufgeteilt und in die jeweilige Fruchtfolge einfließen soll, angesehen.

Bezüglich der Calciumempfehlung wird bei den standardisierten Verfahren gemäß den RSGD 8 und EUF, zudem die Herkunft der Bodenprobe (vor allem vom Wald- und Mühlviertel), die Bodenart und die Hauptkulturen in der Fruchtfolge berücksichtigt (siehe auch Tabelle 2). Beispielsweise haben die Kulturen Hafer, Roggen oder Kartoffeln geringe Ansprüche an den pH-Wert. Bei Kartoffeln wirkt sich ein niedriger pH-Wert günstig auf die Vermeidung von Schorfproblemen aus.

4 Dokumentation und Ergebnisse

In den RSGD 8 wird darauf verwiesen, dass CaO Mengen von über 1,5 Tonnen pro Hektar auf leichten Böden und über 2 Tonnen pro Hektar auf mittelschweren bis schweren Böden, im Abstand von zwei Jahren auf mehrere Gaben aufzuteilen sind. (Baumgarten, 2021). Die CaO-Empfehlung der Agrana bei den Proben 4, 6, 10, 12 und 15 bis 21 ist aufgrund des niedrigen Calciumwertes der 2. Fraktion und somit einem tendenziell carbonatarmen Boden gegeben. Je niedriger der EUF-Calcium-Wert ist, umso höher ist der Kalkbedarf (DLG e.V. Fachzentrum Landwirtschaft, 2021). In Kalkdüngungsversuchen im Gefäß und Feld von Schaup (1988), Lemme (2014) und Fischer (2016), konnte die Wirkung der Kalkdüngung auf Ertrag und Nährstoffaufnahme und Einfluss auf andere Nährstoffe im Boden gezeigt werden. In diesem Zusammenhang wird auch auf die bessere Phosphorverfügbarkeit durch eine Kalkung verwiesen, da Eisen- und Aluminium-Phosphate in Lösung gehen (Fischer, 2016; Lemme, 2014; Schaup, 1988). Die Probe 3 wurde aufgrund des hohen Wertes seitens der AGES mit einer Fußnote versehen, da ansonsten die grafische Darstellung unübersichtlich werden würde.

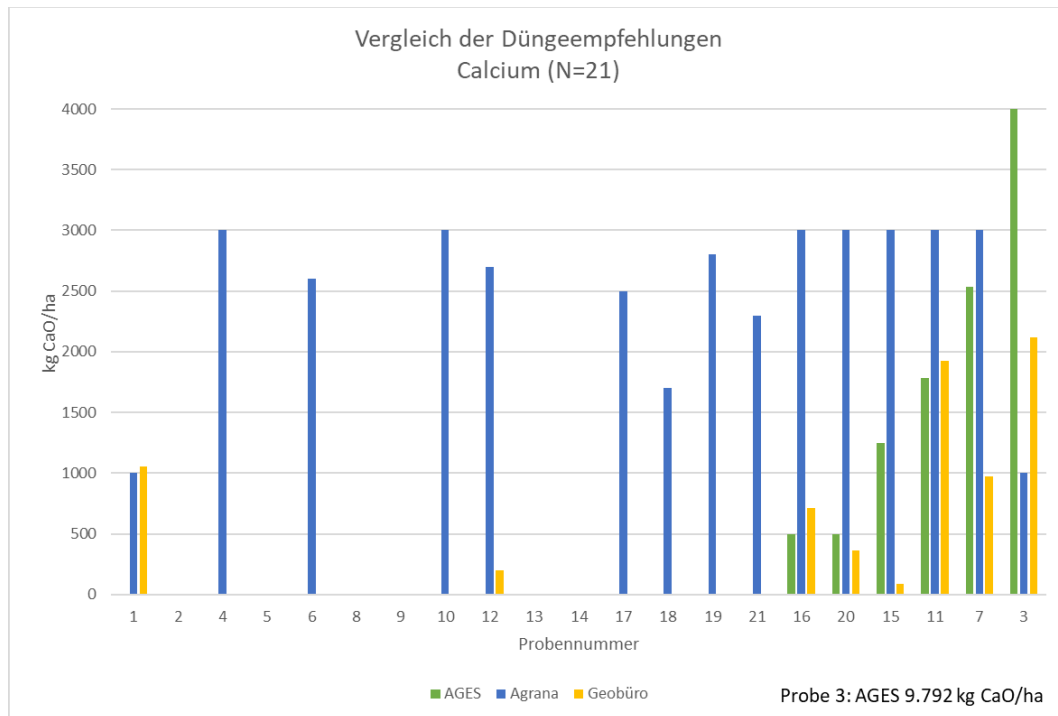


Abbildung 39: Vergleich der Düngungsempfehlungen der 21 Proben beim Nährstoff Calcium in kg CaO/ha.

4.5.5.5 Schwefel

Der Nährstoff Schwefel hat eine gewisse Wechselwirkung mit Stickstoff. Schwefel unterstützt Pflanzen bei der Stickstoffaufnahme und erfüllt auch ähnliche Aufgaben für die Pflanze (Amelung et al., 2018). Das Geobüro weist konkrete

4 Dokumentation und Ergebnisse

Schwefeldüngungsempfehlungen aus. Dabei wird zwischen wasserlöslichen Sulfatschwefel und elementarem Schwefel unterschieden (siehe Abbildung 40). Auffällig sind die teilweise sehr hohen Empfehlungen bei gewissen Proben mit in Summe über 200 kg Schwefel je Hektar. Höhere Düngungsmengen mit Schwefel sollten nach persönlicher Auskunft des Gebüros auf zwei bis drei Jahre aufgeteilt werden. Weiters muss angemerkt werden, dass sich die Schwefelmengen aufgrund der Schwefelgehalte auch aus anderen empfohlenen Düngemitteln ergeben. Als Beispiel: Kaliumsulfat enthält neben 50% K_2O auch gleichzeitig 18% Sulfatschwefel.

Gemäß RSGD 8 wird bei Körnermais eine Schwefeldüngung zwischen 25 und 50 kg Schwefel pro Hektar empfohlen. Bei Raps liegt die Schwefelempfehlung mit 30-60 kg/ha etwas höher, für Getreide und Leguminosen mit 10–30 kg/ha niedriger. Bei der regelmäßigen Ausbringung von Wirtschaftsdüngern kann auf Grünland zumeist eine ausreichende Schwefelversorgung sichergestellt werden. Andernfalls kann die Schwefelversorgung über Mehrnährstoffdünger erfolgen. Zu beachten ist, dass zu hohe Schwefelgaben – deutlich über dem Pflanzenentzug – von Böden häufig nicht ausreichend gespeichert werden können. Dies führt dazu, dass die wasserlösliche Sulfatform, auch rasch bis ins Grundwasser ausgewaschen werden kann (Baumgarten, 2021). Vor allem im österreichischen östlichen Trockengebiet, wird Sulfat mit dem Beregnungswasser in den Boden eingetragen und kann ins Grundwasser ausgewaschen werden (Brielmann et al., 2018).

4 Dokumentation und Ergebnisse

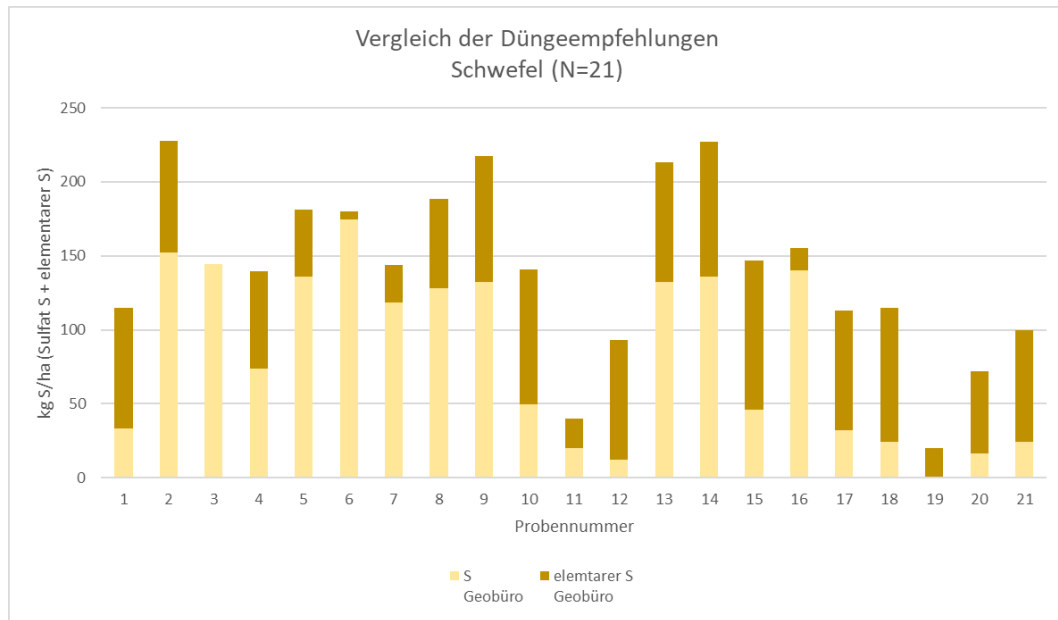


Abbildung 40: Düngeempfehlungen der 21 Proben vom Geobüro in kg S/ha, inklusive Unterscheidung zwischen Sulfatschwefel und elementarem Schwefel.

4.5.6 Fazit Messwerte und Düngeempfehlungen

Bei den dargestellten gemessenen Humusgehalten der drei Labore wurden sehr ähnliche Werte festgestellt. Dies ist als äußerst positiv zu bewerten, da der Humusgehalt einen sehr bedeutenden Parameter einer Bodenuntersuchung darstellt. Bei den pH-Werten wurden faktisch die gleichen Abweichungen von den unterschiedlichen Verfahren (CaCl_2 , H_2O und KCl), gegenüber der in der Literatur angegebenen Werte festgestellt. Auch diese sind somit gut miteinander vergleichbar. Wesentlich größer waren die Unterschiede bei den angegebenen Düngeempfehlungen: Bei den Nährstoffen Phosphor und Kalium verliefen die Tendenzen zwar in die gleiche Richtung, jedoch wurde bei einigen Proben eine stark differierte Empfehlung ausgegeben. Sehr markant traten die unterschiedlichen Ansätze bei der Magnesiumempfehlung zu Tage. Hierbei wurden durchwegs vom Geobüro wesentlich höhere Düngungsmengen empfohlen. Die Kalk-Empfehlungen sind durchwegs vergleichbar, wobei seitens der Agrana bei manchen Proben eine CaO -Düngung empfohlen wurde, wohingegen die anderen Labore hier keine CaO -Empfehlung ausgaben.

5 Fazit

Die Bodenfruchtbarkeit nimmt eine Schlüsselposition zur Bewertung von landwirtschaftlich genutzten Böden ein. Sie erfasst alle für das Pflanzenwachstum wesentlichen Parameter im Boden und vereint zudem die Bedeutung des Bodens als Lebensraum-, Regelungs- und Nutzungsfunktion. Die Bewertung der Bodenfruchtbarkeit kann anhand international gängiger Methoden durchgeführt werden. Doch ist es vielmehr die regionsspezifische Betrachtung der Böden, die genauere Kenntnis über das komplexe System Boden vom jeweiligen Standort bringt. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass Böden aufgrund ihrer Entstehung sehr divers in ihren Eigenschaften sind. Einen Einfluss auf die Pedogenese haben vor allem Ausgangsgestein, Klima, Bewuchs, aber auch menschliche Eingriffe. Aufgrund dessen, wurde in vorliegender Arbeit der Fokus auf das Bundesland OÖ gelegt. Auch in diesem abgegrenzten geografischen Bereich differieren die Böden stark. Eine noch spezifischere Betrachtung auf Basis der KPG erschien aus diesem Grund sinnvoll. Zur Betrachtung wurden Bodenprobenergebnisse aus einem Projekt der LK OÖ im Bereich des Grünlandes herangezogen. Das Projekt wurde 2020 aufgrund der Herausforderungen für Landwirtinnen und Landwirte, die der Klimawandel mit sich bringt, initiiert. Der verwendete Datensatz an Grünlandbodenproben aus OÖ deckt die Diversität der Böden gut ab. Durch die Sichtung der Literatur im Umfeld der gewählten Forschung, konnten die wichtigsten Parameter zur Bewertung der Bodenfruchtbarkeit von landwirtschaftlichen Böden erfasst und umfassend beleuchtet werden. Diese Parameter werden mittels einer chemischen Bodenuntersuchung nach standardisierten Labormethoden festgestellt. Neben dem Humusgehalt, dem Säuregrad, sowie dem Tongehalt - welcher die Bodenschwere definiert - ist die KAK von Böden eine der zentralsten Kenngrößen der Bodenfruchtbarkeit. Besonders die KAK rückt zusehends ins Interesse der Bodenbewertung und Nährstoffversorgung. Zugleich liefert sie auch Rückschlüsse über Nährstoffverhältnisse, steht jedoch in enger Korrelation mit dem Humusgehalt, Tongehalt und Säuregrad eines Bodens. Der Schwerpunkt auf die KAK wurde deshalb gesetzt, da auf Grünlandböden bis dato wenig Untersuchungen in diesem Bereich durchgeführt wurden.

5 Fazit

Im Folgenden werden die genannten Forschungsfragen und die aufgestellten Hypothesen abschließend bewertet:

In der ersten Forschungsfrage wurden Auswirkungen von geogenen und klimatischen Unterschieden auf die Bodenparameter pH-Wert, Humus-, Phosphor-, Kalium- und Magnesiumgehalt auf Grünlandböden in OÖ quantifiziert. Dazu wurde die Datengrundlage aus dem Grünlandprojekt herangezogen. Die aufgestellte Hypothese lautete: *Die unterschiedlichen geogenen und klimatischen Standortverhältnisse spiegeln sich primär in den Bodenparametern pH-Wert, Humus- und Magnesiumgehalt wider. Die regionale Bewirtschaftungsintensität wirkt auf die düngungsrelevanten Parameter Phosphor- und Kaliumgehalt.*

Im ersten Schritt wurden die Grünlandbodenproben ihrem zugehörigem KPG zugeordnet. Dabei stellte sich heraus, dass in zwei Regionen ein zu geringer Stichprobenumfang gegeben war und diese Gebiete somit in der weiteren Betrachtung ausgeschlossen wurden. In weiterer Folge wurde aufgrund des heterogenen Datensatzes, eine Gliederung nach KPG angewandt. Dabei wurden die Parameter pH-Wert, Humus-, Phosphor-, Kalium- und Magnesiumgehalt ausgewertet. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die ausgewählten Parameter teilweise deutliche Unterschiede in den verschiedenen KPG in OÖ aufweisen. Somit kann die aufgestellte Hypothese wie folgt beantwortet werden:

- Beim Humus wurde bei der überwiegenden Probenanzahl ein dem Standort angepasstes, ausreichend hohes Humusniveau festgestellt. Es muss an dieser Stelle zudem angemerkt werden, dass Grünlandböden aufgrund des ständigen Bewuchses und der geringeren Bodenbeprobungstiefe (bis 10 cm) einen höheren Humusgehalt als Ackerböden aufweisen. Der Humusgehalt zeigt signifikante Unterschiede, welche auf die klimatischen Bedingungen zurückzuführen sind: Die höchsten Gehalte sind in den kühleren Hochlagen des Mühlviertels und im inneralpinen Bereich im KPG Inneres Salzkammergut, Eisenwurzen zu finden. In den räumlich anschließenden KPG, Oberes Innviertel und Vöcklabrucker Gebiet im Südwesten, liegen die Humusgehalte auch noch signifikant über den drei übrigen KPG (Rieder Gebiet, Grieskirchen-Kremsmünster und Mittellagen des Mühlviertels). Die geringere Schnitthäufigkeit in den kühleren Regionen und Höhenlagen im Vergleich zum Alpenvorland und den Mittellagen des Mühlviertels kann zusätzlich als zusammenhängende Ursache angeführt werden.
- Auch beim pH-Wert, welcher den Säuregrad eines Bodens charakterisiert, konnten Signifikanzen einzelner KPG im eher niedrigen, aber auch im

5 Fazit

tendenziell höheren pH-Bereich festgestellt werden. Grundsätzlich befindet sich der Großteil der beprobten Böden im schwach sauren pH-Bereich von 5,5 - 6,5. Vor allem das bodenbildende Ausgangsgestein wirkt sich auf den pH-Wert aus, mit höheren Werten (schwach sauer bis neutral) insbesondere im KPG Inneres Salzkammergut, Eisenwurzen und niedrigeren Werten (schwach sauer bis stark sauer) in den KPG des Mühlviertels. Das kalkhaltige Material aus dem Alpenvorland und den Voralpen erhöht den pH-Wert, wohingegen der Granit- und Gneisuntergrund im Mühlviertel den Säuregrad senkt. Durch die darauf abgestimmten Kalkungsmaßnahmen befinden sich die Böden jedoch fast durchwegs in den anzustrebenden optimalen Säuregradbereichen.

- Im Bereich der Phosphorgehalte zeigen die ausgewählten Grünlandstandorte tendenziell eine Unterversorgung. Dabei sind die Unterschiede überwiegend auf die unterschiedliche Bewirtschaftungsintensität zurückzuführen: Die niedrigsten Werte finden sich im KPG Inneres Salzkammergut, Eisenwurzen und die höchsten Gehalte in den KPG Grieskirchen-Kremsmünster und Rieder Gebiet, in denen auch der Anteil an Ackerland höher ist und wohl zusätzlich mineralische Dünger auf dem Betrieb eingesetzt werden. Ein Zusammenhang mit den bodenbildenden Formationen ist nicht ableitbar.
- Bei den sehr stark differierenden Kaliumgehalten (im Mittel von 124 bis 270 mg/kg), sind vor allem die hohen Gehalte von Böden der KPG des Mühlviertels auffällig. Die Werte sind im Mühlviertel vom kaliumhaltigen bodenbildenden Substrat signifikant erhöht, in den anderen Regionen spiegelt sich die unterschiedliche Bewirtschaftung nicht signifikant wider. Auf die tendenziellen Unterschiede mit den niedrigsten Gehalten im KPG Inneres Salzkammergut, Eisenwurzen und den höheren im KPG Grieskirchen-Kremsmünster im Zusammenhang mit dem unterschiedlichen Tierbesatz wird verwiesen.
- Die Magnesium-Gehalte befinden sich überwiegend in der ausreichenden Stufe C und darüber. Der geogene Einfluss ist die wesentliche Ursache für die Unterschiede, insbesondere für die erhöhten Gehalte im KPG Inneres Salzkammergut, Eisenwurzen und im Rieder Gebiet. Diese Standorte brauchen keine externe Zufuhr von Magnesium in Form von Düngemitteln.
- Einen Überblick über die Entwicklung der genannten Bodenparameter auf Grünlandböden wurde anhand von oberösterreichischen Bodenuntersuchungsprojekten aus den Jahren 2009, 2017-2018 und 2020 dargestellt. Trotz Veränderung der Bewirtschaftungsintensität konnte beispielsweise der Humusgehalt in den betrachteten Gebieten des

5 Fazit

Mühlviertels erhalten bzw. leicht gesteigert werden. Die Beobachtung einer Veränderung der Bodenparameter ist nur über einen längeren Zeitraum (mindestens fünf Jahre) sinnvoll, da die komplexen Wechselwirkungen in Böden eine gewisse „Umstellzeit“ beanspruchen. Die aufgestellte Hypothese kann in jedem Fall verifiziert werden, da die geogenen Standortunterschiede und verschiedene Ausgangsgesteine zu unterschiedlichen Nährstoffgehalten im Boden führen. Zudem haben die Standortbewirtschaftung, sowie die klimatischen Bedingungen in den Regionen einen wesentlichen Einfluss.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde neben der analytischen Bestimmung der KAK_{eff} , auch die KAK_{pot} näherungsweise mittels pH-Acetat ermittelt. Dafür wurde folgende Hypothese geprüft: *Der pH-Wert allein ist ausreichend zur näherungsweisen Ermittlung der potentiellen KAK, wenn eine repräsentative Anzahl von entsprechenden pH-Acetat-Werten zur Ableitung des Zusammenhangs zur Verfügung stehen.* Zur Beantwortung dieser Hypothese wurde im ersten Schritt der pH-Acetat, sowie die H^+ -Ionen für jene Proben, wo kein Messergebnis vorlag, berechnet. Dafür wurden statistisch abgesicherte Gleichungen entwickelt, welche für den ausgewählten Datensatz zur Anwendung kamen. Zur Ermittlung der KAK_{pot} wurden die ermittelten H^+ -Ionen mit der gemessenen KAK_{eff} aufsummiert. Durch die grafische Darstellung der KAK_{eff} und der KAK_{pot} wurde deren Zusammenhang veranschaulicht. Die rechnerische Ermittlung der KAK ist aufgrund der engen Korrelation zwischen berechneten und gemessenen pH-Acetat auf die KAK_{pot} auf oberösterreichischen Grünlandböden zulässig. Somit kann auch die aufgestellte Hypothese verifiziert werden.

Eine weitere Forschungsfrage wurde formuliert: Welcher Zusammenhang besteht zwischen der effektiven und potentiellen KAK im Bezug zum pH-Wert, Ton- und Humusgehalt auf Grünlandböden in OÖ? Mit steigendem pH-Wert nähert sich die KAK_{eff} der KAK_{pot} an und bei pH 7 entspricht die KAK_{eff} der KAK_{pot} , weil alle negativen Ladungsstellen am Austauscherkomplex mit positiv geladenen Kationen belegt sind. Daraus ergab sich eine weitere Hypothese: *Mit steigendem pH-Wert trägt der Humusgehalt zunehmend stärker zur Steigerung der KAK_{eff} und KAK_{pot} bei, da die variablen Ladungsstellen primär auf den organischen Oberflächen liegen, während auf den Tonmineralien überwiegend die permanenten Bindungsplätze überwiegen.* Diese Hypothese kann wie folgt beantwortet werden: Neben dem pH-Wert, hat der Humusgehalt den größten Einfluss auf die KAK. Bei der alleinigen Betrachtung des Tongehalts wurde faktisch kein Einfluss auf die KAK festgestellt. Erst durch Verknüpfung von Humusgehalt mit dem Tongehalt wurde deren Auswirkung deutlich. Demnach wurde festgestellt, dass bei gleichen

5 Fazit

Humusgehalten, jedoch mit verschiedenen Tongehalten im Schnitt die KAK um 5 cmol/kg bei mittelschweren Böden höher ist als bei leichten Böden. Durch Literaturrecherche konnte der Grund dafür festgestellt werden: Demnach liegt die Ursache dafür am „Ton-Humus-Komplex“. Dabei wird eine Wechselwirkung zwischen Ton und Humus beschrieben. Humuspartikel eines Bodens werden durch die sogenannte „Lebendverbauung“ und Calciumbrücken mit Tonpartikel verbunden und stabilisiert. Der Tongehalt hat somit einen direkten Einfluss auf den Humusgehalt eines Bodens und somit auch einen indirekten Einfluss auf die KAK.

In weiterer Folge wurde eine multiple Regressionsanalyse zur genauen Abschätzung der Auswirkung von Ton, Humus und pH-Wert auf die KAK_{eff} und KAK_{pot} durchgeführt um folgende Hypothese: *Die KAK wird wesentlich von den Bodenparametern pH-Wert, Humus- und Tongehalt bestimmt, die quantitativen Auswirkungen unterscheiden sich auch bei den deutlich höheren Humusgehalten von Grünland nicht von Ackerstandorten: Mit steigendem Tongehalt pro %-Punkt erhöht sich die KAK (in cmol/kg) um 0,5 und mit steigendem Humusgehalt pro %-Punkt um 2 Einheiten*, wie folgt zu beantworten: Das statistische Verfahren ergab, dass die KAK_{eff} bei einer Erhöhung von 1% Ton um 0,58 cmol/kg steigt. Eine Steigerung des pH-Wertes um eine Einheit erhöht die KAK_{eff} um 13,8 cmol/kg. Beim Humus bewirkt eine Erhöhung um ein Humusprozent einen Anstieg der KAK_{eff} von 1,66 cmol/kg. Die KAK_{pot} steigt bei einer Erhöhung von 1% Ton um 0,61 cmol/kg. Eine Steigerung des pH-Wertes um eine Einheit erhöht die KAK_{pot} um 9,93 cmol/kg. Beim Humus bewirkt eine Erhöhung um ein Humusprozent einen Anstieg der KAK_{pot} von 1,87 cmol/kg. Mit den gewonnenen Daten wurden Regressionsgleichungen aufgestellt, welche eine Abschätzung der KAK_{eff} und KAK_{pot} bei bekanntem Tongehalt, pH-Wert und Humusgehalt ermöglichen. Durch die Aufteilung in verschiedene pH-Bereiche, konnten in manchen Bereichen noch bessere Bestimmtheitsmaße erzielt werden. Diese Analyse samt Schätzgleichungen wurden in diesem Maßstab in vorliegender Masterthesis erstmalig publiziert und können zur Ermittlung der Bodenfruchtbarkeit auf oberösterreichischen Grünlandstandorten herangezogen werden. Auch diese aufgestellte Hypothese wird verifiziert.

Letztendlich wurde ein Vergleich von verschiedenen Bodenuntersuchungsmethoden bearbeitet. Da in der Praxis bei der chemischen Bodenuntersuchung unterschiedliche Analysemethoden zur Anwendung kommen, wurde in der dritten Forschungsfrage geklärt: Wie unterscheiden sich verschiedene Bodenuntersuchungsmethoden hinsichtlich Düngungs- und Kalkungsempfehlungen auf Ackerstandorten? Folgende Hypothese wurde geprüft: *Aufgrund unterschiedlicher Strategien bei der Bewertung von Bodenuntersuchungen werden unterschiedlich hohe Düngungs- und*

5 Fazit

Kalkungsempfehlungen ausgegeben, diese gehen grundsätzlich jedoch in dieselbe Richtung. Um diese Fragestellung zu beantworten, wurden für die Masterthesis 21 Bodenproben an drei verschiedene Anbieter unter standardisierten Angaben versandt. Im ersten Schritt wurden die festgestellten Messwerte der Analysenergebnisse verglichen. Dabei zeigte sich beim **Humusgehalt** eine sehr zufriedenstellende Übereinstimmung der Verfahren. Aufgrund des hohen Stellenwertes von Humus ist dieses Ergebnis sehr positiv zu bewerten. Beim **pH-Wert** wurden faktisch die gleichen Abweichungen von den unterschiedlichen Verfahren (CaCl₂, H₂O und KCl), gegenüber den in der Literatur angegebenen Werten festgestellt, auch diese sind somit gut miteinander vergleichbar. Bei den **Nährstoffen Phosphor und Kalium** verliefen die Tendenzen zwar in die gleiche Richtung, jedoch wurde bei einigen Proben sehr unterschiedliche Empfehlungen ausgegeben. Das kann einerseits auf die Düngung nach Gehaltsstufen (mit großen Auswirkungen auf die Düngungshöhe an den jeweiligen Grenzbereichen) zurückgeführt werden, andererseits auf die Einbeziehung des nachlieferbaren Nährstoff-Vorrats. Bei den **Magnesiumempfehlungen** stach vor allem die Strategie eines „optimalen Bodens“ heraus, daher wurden seitens des Geobüros hohe Düngungsmengen empfohlen. Dies wird auf das Bestreben des Erreichens von optimalen Nährstoffverhältnissen im Boden zurückzuführen sein. Die **CaO-Empfehlungen** sind durchwegs vergleichbar, wobei die Einbeziehung von nachlieferbaren Vorräten Unterschiede verursachen können.

Auch diese aufgestellte Hypothese wurde für die meisten Nährstoffe bestätigt, jedoch nicht für Magnesium.

6 Ausblick

Zusammenfassend war die intensive Auseinandersetzung mit der Beprobung landwirtschaftlicher Böden sehr spannend und aufschlussreich. Die Prozesse und Wechselwirkungen in Böden sind sehr komplex und mit Sicherheit noch nicht zur Gänze erforscht. Die Bedeutung einer standortangepassten Bewirtschaftung mit spezifischer Betrachtung des Bodens wird vom Autor als enorm wichtig eingeschätzt. Um auf künftige Bedingungen adäquat zu reagieren, bedarf es einer Pflanzenproduktion auf Basis von Bodenwissen. Die gewonnenen Erfahrungen können sowohl in der landwirtschaftlichen Praxis, in der Beratung, als auch in der Wissenschaft verwendet werden. Vor allem die Abschätzung der KAK mittels Schätzgleichungen, wurden in diesem Umfang für Grünlandböden noch nicht publiziert. Die bodenchemische Sichtweise der wesentlichen Parameter einer Bodenuntersuchung wurde für Grünlandböden in OÖ umfassend beleuchtet und dokumentiert. Neben der chemischen Bodenuntersuchung sollten physikalische, aber auch biologische Analysen durchgeführt werden, um den Funktionszustand eines Bodens zu bewerten. Daraus ergeben sich folgende, weiterführende Fragestellungen:

- Welchen Einfluss haben bodenphysikalische Parameter auf die Bodenfruchtbarkeit (Verdichtungen, Wasserinfiltration, usw.)?
- Wie kann die Bedeutung des Bodenlebens quantifiziert werden?



Abbildung 41: „Der Boden ist unser wertvollstes Gut – schützen wir ihn!“ (Falkensteiner, 2020, S. 14) (Bildquelle: Falkensteiner).

Literaturverzeichnis

Aichberger, K. (1993). *Oberösterreichischer Bodenkataster Bodenzustandsinventur 1993*. <https://www.land-oberoesterreich.gv.at>

Amelung, W., Blume, H.-P., Fleige, H., Horn, R., Kandeler, E., Kögel-Knabner, I., Kretschmar, R., Stahr, K., Wilke, B.-M., Gauer, J., Gaiser, T., Stoppe, N., Thiele-Bruhn, S., Tippkötter, R., & Welp, G. (2018). *Scheffer/Schachtschabel Lehrbuch der Bodenkunde* (17., überarb. u. erg. Aufl. 2018 Edition). Springer Spektrum.

Baumgarten, A. (2021). *Richtlinie für Sachgerechte Düngung im Ackerbau und Grünland. Anleitung zur Interpretation von Bodenuntersuchungsergebnissen in der Landwirtschaft* (Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus, Hrsg.; 8. Aufl.).

Brielmann, H., Grath, J., Humer, F., Rosmann, T., Schartner, C., Scheidleder, A., Wemhöner, U., Zieritz, I., Stadler, E., Legerer, P., Schubert, G., & Philippitsch, R. (2018). *Hydrochemie und Hydrogeologie der österreichischen Grundwässer und deren natürliche Metall- und Nährstoffgehalte (Update GEOHINT 2018)* (S. 183).

COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS *EU Soil Strategy for 2030 Reaping the benefits of healthy soils for people, food, nature and climate*, (2021). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52021DC0699>

- Danneberg, O. H. (1999). Regressionsgleichungen zur Abschätzung der Summe der austauschbaren Kationen in den landwirtschaftlich genutzten Böden Ostösterreichs. *Die Bodenkultur*, 50(2), 71–81.
- Dersch, G. (2016). Kationen-Austauschkapazität. Welche Informationen sind für die Praxis ableitbar? *Landwirt - Die Fachzeitschrift für die bäuerliche Familie*, 24/2016, 44–45.
- Dersch, G. (2017). Kationen-Austauschkapazität. Was bringt sie in der Praxis? *Landwirt - Die Fachzeitschrift für die bäuerliche Familie*, 3/2017, 40–41.
- Dersch, G. (2022, Januar 26). *Bodenanalyse-Methoden und ihre Aussagekraft: Anleitung zur Interpretation von Bodenuntersuchungsergebnissen in der Landwirtschaft*. Ackerbautage - Bio Austria Bauertage 2022, Online.
- Dersch, G., Haslmayr, H.-P., & Falkensteiner, P. (2021). Bodenuntersuchung: Die Kationen-Austauschkapazität (KAK) auf Grünland in Oberösterreich. *Der Bauer - Boden.Wasser.Schutz.Blatt*, 3/2021, 21–23.
- Dersch, G., & Spiegel, H. (2018). Bodenuntersuchung: Die Kationen-Austauschkapazität (KAK) im Vergleich zu den Standard-Verfahren. Der Nährstoffspeicher im Boden. *LOP Landwirtschaft ohne Pflug*, 07/2018(24. Jahrgang), 36–42.
- Dersch, G., Spiegel, H., Hösch, J., Haslmayr, H.-P., & Baumgarten, A. (2013). *Humusgehalt, Säuregrad und pflanzenverfügbare Phosphor- und Kaliumgehalte auf Acker- und Grünland in Oberösterreich*: https://info.bmlrt.gv.at/dam/jcr:9f8ff40d-e081-4ac5-8a0e-b8c3b4d874cc/44_Auswertungen%20der%20Bodenuntersuchungsaktion%20Ober%C3%B6sterreich.pdf
- DLG e.V. Fachzentrum Landwirtschaft (Hrsg.). (2021). DLG-Merkblatt 456: Hinweise zur Kalkdüngung. *DLG Merkblatt*, 2, 28.
- Eigner, H. (2022, Januar 26). *Die Elektro-UltraFiltrations-Methode*. Ackerbautage - Bio Austria Bauertage 2022, Online.

- Europarat. (1972). Die Europäische Boden-Charta. *Natur und Land (vormals Blätter für Naturkunde und Naturschutz)*, 5, 132–133.
- Falkensteiner, P. (2020). Dem Boden Druck nehmen. *Österreichische Bauernzeitung*, 39, 14.
- Fischer, S. (2016). *Einfluss einer Kalkung auf Phosphor und Kalium in Lössböden und Zuckerrüben*. Fakultät für Agrarwissenschaften der Georg-August-Universität Göttingen.
- Frühwirth, P. (2019). *Niederschläge und Temperaturen während der Vegetationsperiode in den Grünlandregionen Oberösterreich 1989–2018*. (1. Auflage, November 2019).
- Geobüro Christophel. (2019). *Erläuterungsbogen zu Ihren Bodenproben-Ergebnissen*.
- Gerzabek, M. H., Aquino, A. J. A., Balboa, Y. I. E., Galicia-Andrés, E., Grančič, P., Oostenbrink, C., Petrov, D., & Tunega, D. (2022). A contribution of molecular modeling to supramolecular structures in soil organic matter#. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 185(1), 44–59. <https://doi.org/10.1002/jpln.202100360>
- Kopittke, P. M., & Menzies, N. W. (2007). A Review of the Use of the Basic Cation Saturation Ratio and the “Ideal” Soil. *Soil Science Society of America Journal*, 71(2), 259–265. <https://doi.org/10.2136/sssaj2006.0186>
- Landwirtschaftskammer Oberösterreich. (2021). *Pressemitteilung: Grünlandbewirtschaftung steht zunehmend unter Druck*.
- Lehmann, J., & Kleber, M. (2015). The contentious nature of soil organic matter. *Nature*, 528(7580), 60–68. <https://doi.org/10.1038/nature16069>
- Lemme, H. (2014). *Einfluss einer Kalkung auf EUF extrahierbares und pflanzenverfügbares Phosphat sowie Phosphatfraktionen im Boden*. Fakultät für Agrarwissenschaften der Georg-August-Universität Göttingen.
- Neuner, K.-H. (2017). *Informationen zur Düngung* (Neuaufgabe 2017).

- Rühlicke, G. (2017, März 8). *Bewertung alternativer Bodenuntersuchungsmethoden*. Workshop LK-Düngeexperten, Schicklberg.
- Rühlicke, G. (2019a). Kationenaustauschkapazität: Kationenverhältnisse sind kein Wachstumsfaktor. *DLG kompakt*, 2/2019, 1–2.
- Rühlicke, G. (2019b, Oktober 16). *Möglichkeiten und Mythen in der Bodenuntersuchung als Grundlage nachhaltiger Pflanzenernährung*.
- Rusch, K., Mann, T., Höcker, S., Schraml, M., & Möller, K. (2022). Dauerhaft weniger Stickstoffe einsetzen? *DLG Mitteilungen*, 5/2022, 56–59.
- Schachtschabel, P. (1951). Die Bestimmung von S-Wert, T-Wert und Sättigungsgrad. *Zeitschrift Für Pflanzenernährung, Düngung, Bodenkunde*, 53(1), 7–20. <https://doi.org/10.1002/jpln.19510530103>
- Schaup, A. (1988). *Einfluss gesteigerter Carbokalkgaben auf die EUF-Ca-Fraktion*. 1, 92–115.
- Statistik Austria. (2021, Januar 8). *Landwirtschaftliche Haupt- und Kleinproduktionsgebiete*.
https://www.statistik.at/web_de/statistiken/index.html.
https://www.statistik.at/web_de/klassifikationen/regionale_gliederungen/landwirtschaftliche_haupt_und_kleinproduktionsgebiete/index.html
- Steffens, D., Leppin, T., Luschin-Ebengreuth, N., Min Yang, Z., & Schubert, S. (2010). Organic soil phosphorus considerably contributes to plant nutrition but is neglected by routine soil-testing methods. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 173(5), 765–771. <https://doi.org/10.1002/jpln.201000079>
- Strauss, P., Schmaltz, E., Krammer, C., Zeiser, A., Weinberger, C., Kuderna, M., & Dersch, G. (2020). *Bodenerosion in Österreich – Eine nationale Berechnung mit regionalen Daten und lokaler Aussagekraft für ÖPUL* (Bundesamt für Wasserwirtschaft, Hrsg.).

- Thiere, J., Deumlich, D., & Altermann, M. (2013, Oktober). *Die Kennzeichnung der Kationenaustauschkapazität (KAK) für landwirtschaftliche Nutzflächen*. Jahrestagung der DBG 2013: Böden - Lebensgrundlage und Verantwortung, Rostock. <https://eprints.dbges.de/960/>
- Vogt-Kaute, W. (2020). Vergleich verschiedener Bodenuntersuchungen und Düngempfehlungen. *Naturland Nachrichten*, 02/2020, 41–43.
- Wagner, K. (1990). *Neuabgrenzung landwirtschaftlicher Produktionsgebiete in Österreich* (Bundesanstalt für Agrarwirtschaft, Hrsg.). Österreichischer Agrarverlag.
- Weidemann, C., Mühling, K. H., & Biernat, L. (2020, Mai 26). Welche Methode für die Bodenanalyse? *Getreidemagazin - Die Fachzeitschrift für Spezialisten*, 3/2020(26. Jahrgang), 14–17.
- Wiesmeier, M., Meyer, S., Paul, C., Helming, K., Don, A., Franko, U., Steffens, M., & Kögel-Knabner, I. (2020). *CO₂-Zertifikate für die Festlegung atmosphärischen Kohlenstoffs in Böden: Methoden, Maßnahmen und Grenzen*. <https://doi.org/10.20387/BonaRes-F8T8-XZ4H>

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Auszug aus der elektronischen Bodenkarte über verschiedene Bodentypen in OÖ (Quelle: elektronische Bodenkarte.at).....	8
Abbildung 2: Verfügbarkeit ausgewählter Nährstoffe, sowie Aluminium in Abhängigkeit vom pH-Wert (CaCl_2) des Bodens – je breiter der Balken, desto besser die Nährstoffverfügbarkeit (Quelle: Hauert HBG Dünger AG, Das wichtigste zur Düngung).	15
Abbildung 3: österreichisches Texturdreieck (Quelle: ÖNORM L1050).	20
Abbildung 4: Das Schichtgefüge einer Tonfraktion (Kaolinit) unter dem Mikroskop (Quelle: Dr. Krakow Rohstoffe GmbH aus BGR-Fachkonferenz "Gewinnung und Verarbeitung von Kaolin und Feldspatrohstoffen in Deutschland", Hannover 28. November 2017).	21
Abbildung 5: Schematische Darstellung der effektiven und potentiellen KAK und der Zusammenhang mit variabler und permanenter Ladung (Quelle: eigene Darstellung).	25
Abbildung 6: Calcium als Brücke zwischen Ton und Humus – „Ton-Humus-Komplex“ (Quelle: Bodengesundheitsdienst).	29
Abbildung 7: Die Datenschutzerklärung am Erhebungsbogen des Auftrages zur Bodenuntersuchung im BIGL-Projekt (Quelle: LK OÖ).	33
Abbildung 8: Ziehung einer Bodenprobe am Grünland mittels Bodenstecher (Quelle: Falkensteiner).	34
Abbildung 9: Landwirtschaftliche Haupt- und Kleinproduktionsgebiete in Österreich - Stand: 01.01.2021 (Quelle: Statistik Austria).	36
Abbildung 10: Einteilung der BIGL-Bodenproben nach den KPG in OÖ.....	37
Abbildung 11: Verteilung der Humusgehalte der KPG in OÖ, inklusive Darstellung der Humusgehaltseinstufungen und Probenanzahl.....	39
Abbildung 12: Verteilung der pH-Werte (CaCl_2) der KPG in OÖ, inklusive Darstellung der Einstufung der Bodenreaktion und Probenanzahl.	41
Abbildung 13: Verteilung der Phosphorgehalte der KPG in OÖ, inklusive Darstellung der Einstufung der Phosphorgehaltsklassen und Probenanzahl.	43
Abbildung 14: Verteilung der Kaliumgehalte der KPG in OÖ, inklusive Darstellung der Einstufung der Kaliumgehaltsklassen und Probenanzahl.....	45

Abbildung 15: Verteilung der Magnesiumgehalte der KPG in OÖ, inklusive Darstellung der Einstufung der Magnesiumgehaltsklassen und Probenanzahl.	47
Abbildung 16: Korrelation zwischen pH-CaCl ₂ und pH-Acetat.....	51
Abbildung 17: Darstellung der cmol H ⁺ im pH-Acetat Bereich von 6,57 – 7,2.....	53
Abbildung 18: Darstellung der cmol H ⁺ im pH-Acetat Bereich von 5,88 – 7,2.....	54
Abbildung 19: Zusammenhang zwischen der KAK _{pot} bei berechnetem und gemessenen pH-Acetat.	55
Abbildung 20: KAK _{eff} und KAK _{pot} in Abhängigkeit von pH-CaCl ₂	56
Abbildung 21: Anteil an Calcium an der KAK _{eff} und KAK _{pot} , in Abhängigkeit von pH-CaCl ₂	57
Abbildung 22: Anteil an Magnesium an der KAK _{eff} und KAK _{pot} , in Abhängigkeit von pH-CaCl ₂	59
Abbildung 23: Anteil an Kalium an der KAK _{eff} und KAK _{pot} , in Abhängigkeit von pH-CaCl ₂	61
Abbildung 24: Anteil an Natrium an der KAK _{eff} und KAK _{pot} in Abhängigkeit von pH-CaCl ₂	62
Abbildung 25: Anteil an Aluminium an der KAK _{eff} in Abhängigkeit von pH-CaCl ₂	63
Abbildung 26: Basensättigung der KAK _{eff} in Abhängigkeit von pH-CaCl ₂	64
Abbildung 27: Nährstoffanteile und H ⁺ -Ionen im Mittel der BIGL-Daten an der KAK _{eff} (links) und KAK _{pot} (rechts).....	65
Abbildung 28: Vereinfachte Darstellung der KAK: links ein ausgewogenes Verhältnis mit nur geringem Anteil an H ⁺ -Ionen. Rechts ein erhöhter Anteil an H ⁺ -Ionen, diese senken den pH-Wert und besetzen rund 28% der KAK _{pot} (Quelle: Dersch&Haslmayr).	65
Abbildung 30: Darstellung der KAK _{eff} und KAK _{pot} in Abhängigkeit vom Humusgehalt.	67
Abbildung 31: Darstellung der KAK _{eff} bei unterschiedlichen Humusgehalten in Abhängigkeit von pH-CaCl ₂	68
Abbildung 32: Darstellung der KAK _{eff} und KAK _{pot} in Abhängigkeit vom Tongehalt.	69

Abbildung 33: Der Einfluss des pH-CaCl ₂ auf die KAK _{eff} , für die beiden Bodenschwerklassen leicht und mittel, bei unterschiedlichen Humusgehaltsbereichen.	70
Abbildung 34: Schema einer EUF-Zelle (Quelle: Agrana Research&Innovation Center).	80
Abbildung 35: Vergleich der 21 Proben anhand der gemessenen Humusgehalte in %.....	82
Abbildung 36: Vergleich der 21 Proben anhand der gemessenen pH-Werte.....	83
Abbildung 37: Vergleich der Düngungsempfehlungen der 21 Proben beim Nährstoff Phosphor in kg P ₂ O ₅ /ha.....	84
Abbildung 38: Vergleich der Düngungsempfehlungen der 21 Proben beim Nährstoff Kalium in kg K ₂ O/ha.	85
Abbildung 39: Vergleich der Düngungsempfehlungen der 21 Proben beim Nährstoff Magnesium in kg MgO/ha.....	86
Abbildung 40: Vergleich der Düngungsempfehlungen der 21 Proben beim Nährstoff Calcium in kg CaO/ha.....	87
Abbildung 42: Düngungsempfehlungen der 21 Proben vom Geobüro in kg S/ha, inklusive Unterscheidung zwischen Sulfatschwefel und elementarem Schwefel.....	89
Abbildung 43: „Der Boden ist unser wertvollstes Gut – schützen wir ihn!“ (Falkensteiner, 2020, S. 14) (Bildquelle: Falkensteiner).....	96

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Ausgewählte Bodenuntersuchungsparameter und -Verfahren (Quelle: RSGD 8 S.22+23).....	14
Tabelle 2: Anzustrebende pH-Werte (CaCl_2) in Abhängigkeit von Bodenschwere und Kultur (Quelle: RSGD 8, Seite 32).....	16
Tabelle 3: Einstufung des Humusgehalts für Acker- und Grünlandböden (Quelle RSGD 8, S. 26).....	18
Tabelle 4: Einstufung der Bodenschwere nach Tongehalt oder der Bodenart (Quelle RSGD 8, S. 25).	20
Tabelle 5: Optimale Sättigung des Bodens mit ausgewählten Kationen (Bear&Toth 1948).	23
Tabelle 6: Unterschiedliche Angaben von verschiedenen Autoren für die optimale Sättigung des Bodens mit ausgewählten Kationen (Quelle: verändert nach Rühlicke, 2019b).....	23
Tabelle 7: Methoden zur Bestimmung der KAK und Beispiele für Anbieter dieser Methoden (Quelle: Rühlicke, 2019b).....	27
Tabelle 8: Verfügbare Probenanzahl ausgewählter Parameter aus dem BIGL-Projekt.	35
Tabelle 9: Statistik des Humusgehalts (%) nach KPG.....	40
Tabelle 10: Statistik des pH-Wertes nach KPG.....	42
Tabelle 11: Statistik der Phosphorgehalte (mg P/1000g) nach KPG.	44
Tabelle 12: Statistik der Kaliumgehalte (mg K/1000g) nach KPG.....	46
Tabelle 13: Statistik der Magnesiumgehalte (mg Mg/1000g) nach KPG.....	48
Tabelle 14: Vergleich der Mediane ausgewählter Parameter in den beiden KPG des Mühlviertels (Mittellagen und Hochlagen) aus der Landesbodenuntersuchung 2009, vorbeugender Grundwasserschutz auf Grünlandflächen in OÖ 2017-2018 und BIGL 2020 (verändert nach Dersch et al., 2013).	49
Tabelle 15: cmol H^+ bei bestimmten pH-Acetat Gehalten (verändert nach Schachtschabel, 1951, S. 14).	53
Tabelle 16: Calciumsättigung an KAK_{eff} und KAK_{pot} bei ausgewählten pH- CaCl_2 Bereichen.	56

Tabelle 17: Magnesiumsättigung an KAK_{eff} und KAK_{pot} bei ausgewählten pH- $CaCl_2$ Bereichen und Darstellung der Sättigung bei Proben in Gehaltsklasse C und unterer Bereich von D. Der Stichprobenumfang N ist für KAK_{pot} gleichermaßen gültig.....	58
Tabelle 18: Kaliumsättigung an KAK_{eff} und KAK_{pot} bei ausgewählten pH- $CaCl_2$ Bereichen und Darstellung der Sättigung bei Proben in Gehaltsklasse C. Der Stichprobenumfang N ist für KAK_{pot} gleichermaßen gültig.....	60
Tabelle 19: Beschreibung der Variablen für die Regressionsgleichungen zur Abschätzung der KAK.....	72
Tabelle 20: Deskriptive Statistikkennzahlen (Mittelwert und Standardabweichung (s)) der KAK_{eff} und KAK_{pot}	72
Tabelle 21: Statistische Kennzahlen der KAK_{eff}	73
Tabelle 22: Regressionskoeffizienten der KAK_{eff}	73
Tabelle 23: Statistische Kennzahlen der KAK_{pot}	74
Tabelle 24: Regressionskoeffizienten der KAK_{pot}	74
Tabelle 25: Deskriptive Statistikkennzahlen der KAK_{eff} und KAK_{pot} bei unterschiedlichen pH-Bereichen. Die Werte des Ton- und Humusgehalts sind für beide KAK-Größen gültig.....	75
Tabelle 26: Regressionskoeffizienten für Ton und Humus bei KAK als abhängige Variable bei unterschiedlichen pH-Bereichen, inkl. Stichprobenumfang (N) und Korrelationskoeffizienten (R).....	76
Tabelle 27: Übersicht über die Mediane und Spannweiten ausgewählter Bodenparameter – untersucht nach den Methoden gemäß RSGD 8.	78
Tabelle 28: Überblick über die ausgewählten Bodenuntersuchungsmethoden samt Beschreibung.....	79

Abkürzungsverzeichnis

%	Prozent
°C	Grad Celsius
AAK	Anionenaustauschkapazität
AGES	Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherheit
AK	Austauschkapazität
Al	Aluminium
ALVA	Arbeitsgemeinschaft für Lebensmittel-, Veterinär- und Agrarwesen
BAB	Bundesanstalt für Agrarwirtschaft und Bergbauernfragen
BGPE	Abteilung für Bodengesundheit und Pflanzenernährung
BIGL	Bildungsinitiative Grünland
BMLRT	Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus
bzw	beziehungsweise
C	Kohlenstoff
Ca	Calcium
CaCl ₂	Calciumchlorid-Lösung
CAL	Calcium Acetat Lactat
CaO	Calciumoxid
cm	Zentimeter
cm ³	Kubikzentimeter
cmol	Centimol
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
C _{org}	organischer Kohlenstoff
eBOD	elektronische Bodenkarte
EU	Europäische Union
EUF	Elektro Ultra Filtration
FAO	Food and Agricultural Organization
Fe	Eisen
g	Gramm
H ⁺	Wasserstoffionen
H ⁺ diss	dissoziierbare Wasserstoffionen
H ₂ O	Wasser
ha	Hektar
HPG	Hauptproduktionsgebiet
K	Kalium
K ₂ O	Kaliumoxid
KAK	Kationenaustauschkapazität
KAK _{eff}	effektive Kationenaustauschkapazität
KAK _{pot}	potentielle Kationenaustauschkapazität
KCl	Kaliumchlorid-Lösung

kg	.....	Kilogramm
km	.....	Kilometer
KPG	.....	Kleinproduktionsgebiet
L	.....	Lehm
LK OÖ	.....	Landwirtschaftskammer Oberösterreich
m ²	.....	Quadratmeter
Mg	.....	Magnesium
MgO	.....	Magnesiumoxid
mm	.....	Millimeter
mmol	.....	Millimol
Mn	.....	Mangan
N	.....	Stickstoff
Na	.....	Natrium
OH ⁻	Hydroxidionen
OÖ	.....	Oberösterreich
P	.....	Phosphor
P ₂ O ₅	.....	Phosphorpentoxid
RSGD 8	.....	Richtlinien für sachgerechte Düngung im Ackerbau und Grünland, 8. Auflage
S	.....	Sand
SPZ	.....	Small-scale Production Zones
T	.....	Ton
U	.....	Schluff
VDLUFA	.....	Verband der landwirtschaftlichen Untersuchungs- und Forschungsanstalten
ZAMG	.....	Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik

Anhang

Im Folgenden werden die verwendeten Rechenprozeduren des Statistikprogramms IBM SPSS.Statistic 26 erläutert:

General Linear Model:

```
GLM pH_Wert P_CAL K_CAL MG_Schacht Humus BY KPG  
/METHOD=SSTYPE(3)  
/INTERCEPT=INCLUDE  
/POSTHOC=KPG(SNK)  
/PRINT=DESCRIPTIVE ETASQ PARAMETER  
/CRITERIA=ALPHA(.05)  
/DESIGN= KPG.
```

Means for groups in homogeneous subsets are displayed. Based on observed means. The group sizes are unequal. The harmonic mean of the group sizes is used. Type I error levels are not guaranteed.

Estimated Marginal Means (Konfidenzbereich für Mittelwerte):

```
/EMMEANS=TABLES(KPG) COMPARE ADJ(LSD)  
/PRINT=DESCRIPTIVE ETASQ OPOWER PARAMETER TEST(SSCP) GEF  
/CRITERIA=ALPHA(.05)  
/DESIGN= KPG.
```

REGRESSION:

```
/DESCRIPTIVES MEAN STDDEV CORR SIG N  
/MISSING LISTWISE  
/STATISTICS COEFF OUTS R ANOVA CHANGE  
/CRITERIA=PIN(.05) POUT(.10)  
/NOORIGIN  
/DEPENDENT KAK_cmol_eff  
/METHOD=ENTER Ton pH_Wert Humus.
```

- Bei Auswahl nach Säurestufen (stark, schwach sauer und neutral):

REGRESSION

```

/DESCRIPTIVES MEAN STDDEV CORR SIG N
/MISSING LISTWISE
/STATISTICS COEFF OUTS R ANOVA CHANGE
/CRITERIA=PIN(.05) POUT(.10)
/NOORIGIN
/DEPENDENT KAK_cmol_eff
/METHOD=ENTER Ton Humus.

```

In beiliegendem Datenträger (CD) finden sich ergänzende Inhalte im Bezug zur verwendeten Literatur, sowie Screenshots von verwendeten Internetquellen:

- Aichberger, K. 1993_oberösterreichischer Bodenkataster_1993
- Dersch, G. 2022_Bio Austria Bauerntage_26.01.2022
- Eigner, H. 2022_Bio Austria Bauerntage_26.01.2022
- Geobüro Christophel 2019 - Erläuterungsbogen zu Ihren Bodenproben Ergebnissen
- Ruehlicke, G. 2017_Bewertung alternativer Bodenuntersuchungsmethoden_08.03.2017
- Ruehlicke, G. 2019b_Möglichkeiten und Mythen einer Bodenuntersuchung_16.10.2019
- Schachtschabel, P. 1951

Des Weiteren liegt die Original Masterthesis als pdf. Format bei.