**Hochschule für nachhaltige Entwicklung (FH) Eberswalde** **2018**

**Fachbereich Wald und Umwelt**
**Studentisches Übungslabor; Haus 11, Raum 11.314**
**Bodenkunde/Chemie**
**A. Bruszies, Dipl.Ing.(FH)**
**E-Mail: andrea.bruszies@hnee.de**
**Tel.: 03334/ 657-185**

# -Laborpraktikumsanleitung-

## Bodenkundliche Laborpraktika für die Studiengänge:

- **Forstwirtschaft**
- **IFEM**
- **Landschaftsnutzung und Naturschutz**
- **Ökolandbau und Vermarktung**

**BODENKUNDLICHE PRAKTIKA**

**Zielstellung des Praktikums:** Das Praktikum dient der Ergänzung und Vertiefung der in den Vorlesungen Bodenkunde und Standortslehre gebotenen Lehrinhalte. Anhand ausgewählter Beispiele soll das Verständnis für Fragen der angewandten Bodenkunde erweitert werden. Damit verbunden ist die Vermittlung labortechnischer Kenntnisse, um während der praktischen beruflichen Tätigkeit einfache bodenchemische Untersuchungen ausführen und Laborbefunde interpretieren zu können.

Im Verlauf der Praktika werden für typische Bodenprofile sowohl chemische als auch physikalische Bodenparameter bestimmt.

**Inhalt/ Übungen**


| | | Seite |
|---|---|---|
| | **Bodenphysikalische Untersuchungen** | |
| 1 | Vorbereitung von Bodenproben für die Laboruntersuchung | 2 |
| 2 | Fingerprobe (Vorprüfung auf die Bodenart) | 3 |
| 3 | Anfertigung von Vergleichsröhrchen zur Abschätzung der Sandfraktionen im Boden (Hilfsmittel im Geländepraktikum) | 4 |
| 4 | Korngrößenbestimmung | 5 |
| 5 | Siebanalyse | 6 |
| 6 | Schlämmanalyse | 7 |
| 7 | Bestimmung des Porenvolumens (PV), der Trockenrohdichte (TRD) und der Wassergehaltes | 10 |
| 8 | Festsubstanzdichte | 12 |
| | **Chemische Untersuchungen** | |
| 9 | Wassergehalt | 13 |
| 10 | Glühverlust und Berechnung des Kohlenstoffgehaltes | 14 |
| 11 | pH-Wert in Wasser und Kaliumchlorid bzw. Calciumchlorid | 15 |
| 12 | Basenneutralisationskapazität (BNK) und Ermittlung des Kalkbedarfes | 16 |
| 13 | Carbonatgehalt | 18 |
| 14 | Lösliche und leicht austauschbare Elemente | 20 |
| 15 | Kationenaustauschkapazität | 22 |
| 16 | Chemische Leitfähigkeit | 26 |
| 17 | Maßeinheiten/Umrechnungen | 27 |
| 18 | Literaturangaben | 27 |


weitere Informationen zur Bodenkunde unter:

**http://www.forstliches-umweltmonitoring.de/Riek/Skripte%20FoWi**

## 1. Vorbereitung von Bodenproben für die Laboruntersuchung

Der erste Schritt zur Vorbereitung der Bodenproben ist das Trocknen. Man unterscheidet dabei zwischen lufttrockenen und absolut trockenen Proben.

Die chemische- oder physikalische Untersuchung der Böden erfolgt in der Regel am lufttrockenen (lutro) Feinboden <2 mm, dessen Restfeuchte von <5 % bei den Berechnungen vernachlässigt werden kann. Zur genauen Bestimmung des Wassergehaltes muss aber das Wasser komplett aus der Bodenprobe entfernt werden.
Gewisse Analysenparameter erfordern einen spezifischen Aufbereitungszustand (z.B. Nitratstickstoff, Schwermetalle u.a.), so dass sich der Bearbeiter vor Beginn der Arbeiten über die vorgesehenen Untersuchungen klar sein muss. Bei der Trocknung ist in besonderem Maße auf die Vermeidung von Kontaminationen zu achten.
Vor der Einwaage der Probe zur Analyse ist die Probe mit einem Messlöffel gut zu homogenisieren.

**Lufttrockene Proben (lutro):**
Die eingegangene Bodenprobe wird auf einer sauberen Unterlage gut durchmischt und durch flaches Ausbreiten über mehrere Tage (ca.3 - 4 Tage) in gut durchlüfteten Räumen getrocknet. Proben bindiger Böden sind dabei bereits im feuchten Zustand zu zerkrümeln. Die Proben sind während des Trocknungsvorganges mehrmals zu wenden und vor dem Einfluss von Staub, Schmutz, Säure- und Ammoniakdämpfen zu schützen. Anstelle dieser "echten" Lufttrocknung ist auch eine mehrstündige Trocknung in einem Ventilatortrockenschrank bei Temperaturen bis max. 35 °C möglich. Bei volumen- bzw. flächengerechter Entnahme muss die Gesamtprobe vor und nach der Trocknung gewogen werden

**Absolut trockene Proben (atro):**
Proben, bei denen der verbleibende Wassergehalt stört, sind absolut zu trocknen. Die Trocknung findet bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz im Trockenschrank statt. Die Probenmasse ist vor und nach der Trocknung zu bestimmen.

**Trennung Grob- und Feinboden (Vorsiebung 2 mm):**
Nach der Trocknung werden Steine und andere grobe Bestandteile ausgelesen und die Probe manuell durch ein 2mm-Prüfsieb gesiebt, wobei Klumpen und lockere organisch-mineralische Partikel durch das Sieb zu drücken sind. Bei stark verfestigten Proben (z.B. toniger Geschiebemergel) wird der Backenbrecher zur Vorzerkleinerung verwendet.

**Mahlen der Proben:**
Ist eine Mörserprobe notwendig (z.B. für die Bestimmung von Kohlenstoff, Stickstoff, Gesamtgehalte an Nährstoffen), so werden 20-30 g des lufttrockenen Feinbodens mit einer Mörser-, Kugel- oder Scheibenschwingmühle auf eine Korngröße von <0,1 mm zerkleinert. Für die Bestimmung von Schwermetallen oder Mikro-Nährelementen (besonders Fe, Mn, Cu, Zn, B) sind Mühlen mit Achat-Mahlgarnitur anzuwenden.

## 2. Fingerprobe-Bodenart

Die Bodenart kann im Gelände mittels Fingerprobe ermittelt werden. Die Bodenprobe wird so befeuchtet, dass beim Pressen kein Wasser austritt; sie befindet sich in "frischem" Zustand. Anschließend wird die Probe in den Handtellern gerollt, in der Handfläche zerrieben und zwischen Daumen und Zeigefinger gequetscht, um ihre Körnigkeit, Bindigkeit und Formbarkeit zu prüfen.

**Vereinfachter Bestimmungsschlüssel der Bodenart:**

| | |
|---|---|
| **1.** Versuch, die Probe zwischen den Handtellern zu einer bleistiftdicken Wurst auszurollen | |
| a) ausrollbar | zu 4 |
| b) nicht ausrollbar | zu 2 |
| **2.** Prüfen der Bindigkeit zwischen Daumen und Zeigefinger | |
| a) bindig, formbar, haftet am Finger | lehmiger Sand |
| b) nicht bindig | zu 3 |
| **3.** Zerreiben in der Handfläche | |
| a) in den Fingerrillen mehlig-stumpfe Feinsubstanz sichtbar | schluffiger Sand |
| b) in den Fingerrillen keine Feinsubstanz sichtbar | reiner Sand |
| **4.** Versuch, die Probe zu einer Wurst von halber Bleistiftstärke auszurollen | |
| a) ausrollbar | zu 10 |
| b) nicht ausrollbar | zu 5 |
| **5.** Prüfen der Bindigkeit zwischen Daumen und Zeigefinger | |
| a) bindig, haftet deutlich am Finger | zu 6 |
| b) nicht oder schwach bindig | zu 7 |
| **6.** Beurteilen von Feinsubstanz und Sandanteil | |
| a) wenig Feinsubstanz, nur klebrige Sandkörner ("Honigsand") | toniger Sand |
| b) viel Feinsubstanz, Sandkörner sicht – und fühlbar | stark sandiger Lehm |
| c) viel Feinsubstanz, samtartig – mehlig, kaum Sandkörner | schluffiger Lehm |
| **7.** Beurteilen von Bindigkeit und Sandanteil | |
| a) deutlich Sandkörner sicht – und fühlbar, nicht bindig | sandiger Schluff |
| b) deutlich Sandkörner sicht- und fühlbar, schwach bindig | sandig-lehmiger Schluff |
| c) nur wenige oder keine Sandkörner sicht- oder fühlbar | zu 8 |
| **8.** Beurteilen der Konsistenz | |
| a) samtartig – mehlig, nicht bindig | reiner Schluff |
| b) samtartig – mehlig, schwach bindig und formbar, keine Sandkörner | toniger Schluff |
| **10.** Beurteilen des Sandanteils | |
| a) Sandkörner gut sicht – und fühlbar, stark rissig | sandiger Lehm |
| b) Sandkörner nicht oder kaum fühlbar | zu 11 |
| **11.** Versuch, die Wurst zu einem Ring zu formen | |
| a) schlecht formbar, schwach glänzende Gleitfläche | schluffiger Ton |
| b) gut formbar | zu 12 |
| **12.** Beurteilen der Gleitfläche bei der Quetschprobe | |
| a) Gleitfläche stumpf bzw. sehr schwach glänzend | toniger Lehm |
| b) Gleitfläche glänzend | zu 13 |
| **13.** Prüfen zwischen den Zähnen | |
| a) Knirschen | lehmiger Ton |
| b) butterartige Konsistenz | reiner Ton |

## 3. Anfertigung von Vergleichsröhrchen zur Abschätzung der Sandfraktionen im Boden

(für Studenten der Studiengänge FOWI und IFEM)

Die reinen Sande lassen sich nach ihrem Fein-, Mittel- und Grobsandanteil weiter differenzieren. Dies kann wichtig sein, weil die Unterfraktionen des Sandes recht unterschiedliche Eigenschaften haben, die u.a. für die Beurteilung des Wasserhaushaltes von Bedeutung sind. Die Ansprache erfolgt am einfachsten unter Verwendung von hergestellten Vergleichsröhrchen mit den gesiebten Kornfraktionen (Erfahrung notwendig!).

Durch Vergleich des in der Handfläche ausgebreiteten Bodens mit den Fraktionen im Vergleichsröhrchen lassen sich die Anteile der einzelnen Sandfraktionen grob abschätzen, so dass die Bodenart bestimmt werden kann.

Vorschrift:

In ein dickwandiges kleines Reagenzglas werden, durch Pappscheiben oder Watte abgeteilt, folgende Fraktionen gefüllt:

| | | | |
|---|---|---|---|
| 2 | - | 0,63 mm | Grobsand |
| 0,63 | - | 0,2 mm | Mittelsand |
| 0,2 | - | 0,063 mm | Feinsand |
| <0,063 mm | | | Schluff und Ton |

Es sind die Siebdurchgänge aus der Übung zu nutzen.

**4. Korngrößenbestimmung**

Vorbetrachtung :
Zur genauen Bestimmung der Bodenart ist eine mechanische Analyse als Laboruntersuchung notwendig. Die Bestandteile des Bodens werden nach dem Durchmesser ihrer Teilchen fraktioniert.
Mit Hilfe der Nass- oder Trockensiebung lässt sich der Boden in Grob-, Mittel- und Feinsandfraktionen teilen (Fraktionen 2-0,063 mm), wobei die Nasssiebung immer die exakteren Ergebnisse liefert. Bei stark ton-und schluffhaltigen Böden führt die Trockensiebung zu Fehlern.

Zur Ermittlung der Schluff- und Tonfraktion (<0,063 mm) einer Bodenprobe kann die Siebanalyse nicht mehr angewandt werden, da die Herstellung entsprechender genauer Prüfsiebgewebe zu schwierig wäre und darüber hinaus bei sehr kleiner Maschenweite eine Nasssiebung auf Grund der Kohäsionskräfte nicht mehr möglich ist.

In den letzten Jahren haben Laserpartikelanalyser die Schlämmanalyse der Fraktion <0,063 mm (z.B. Sedimentierverfahren nach Atterberg, Pipettenanalyse nach Köhn, Aräometermethode u.a.) bei der Korngrößenbestimmung des Feinbodens weitgehend abgelöst. Das Messprinzip der Geräte basiert auf der Beugung und Brechung der Laserstrahlen an den in Suspension befindlichen Partikeln. Die althergebrachten Schlämmverfahren nutzen die unterschiedlichen Sedimentationsgeschwindigkeiten in Abhängigkeit vom Teilchendurchmesser und der Dichte der Bodenmasse. Zugrunde liegt dieser Bestimmung das **Stoke`sche Gesetz.**

## Korngrößenfraktion des Feinbodens

| **Äquivalentdurchmesser** | | **Fraktion** | **Unterfraktion** | **Kurzzeichen** |
|---|---|---|---|---|
| **in µm** | **in mm** | | | |
| **< 2,0** | **< 0,002** | **Ton** | | **T** |
| < 0,2 | <0,0002 | | Feinton | fT |
| 0,2 - 0,6 | 0,0002 -0,0006 | | Mittelton | mT |
| 0,6 - 2,0 | 0,0006 - 0,002 | | Grobton | gT |
| **2 - 63** | **0,002 - 0,063** | **Schluff** | | **U** |
| 2 - 6,3 | 0,002 - 0,0063 | | Feinschluff | fU |
| 6,3 - 20 | 0,0063 - 0,02 | | Mittelschluff | mU |
| 20 - 63 | 0,02 - 0,063 | | Grobschluff | gU |
| **63 -2000** | **0,063 - 2,0** | **Sand** | | **S** |
| 63 - 200 | 0,063 - 0,2 | | Feinsand | fS |
| 63 - 125 | 0,063 - 0,125 | | feiner Sand (Feinstsand) | ffS |
| 200 - 630 | 0,2 - 0,63 | | Mittelsand | mS |
| 630 -2000 | 0,63 - 2,0 | | Grobsand | gS |

- 1 m = 1000 mm = 1000 000 µm
- 1 mm = 0,001 µm, 1 mm = 1 x $10^{-3}$m, 1 µm = 1 x $10^{-6}$ m
- Umrechnung mm in µm : geteilt durch 1000

Sand = Siebanalyse
Schluff und Ton = Schlämmanalyse bzw. Laserpartikelanalyser

## 5. Siebanalyse

Prinzip:
Trockensiebung der Bodenprobe mit Hilfe von Handsiebsätzen oder Siebmaschine und quantitative Ermittlung der einzelnen Bodenfraktionen durch Wägung.
**Siebgrößen je nach gewünschtem Detailgrad:**

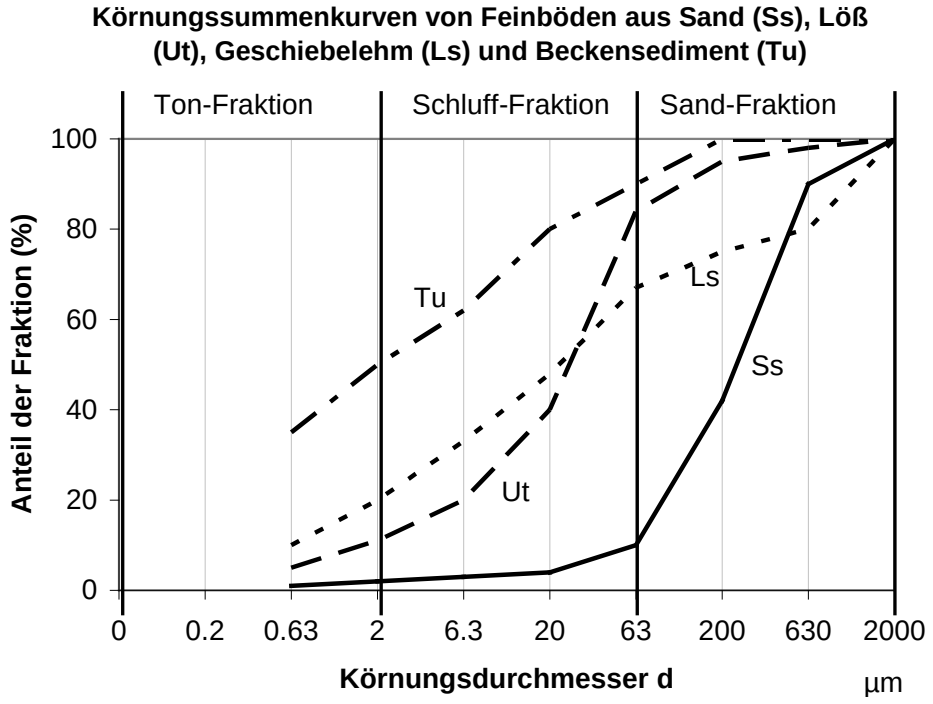
- **1 mm; 0,63 mm; 0,2 mm; 0,125 mm; 0,063 mm**
- **0,63 mm; 0,2 mm; 0,063 mm**

Durchführung:
20 oder 50 g lufttrockener Feinboden (<2 mm) werden auf der Analysenwaage auf 0,1 mg genau eingewogen und vorhandene Klumpen sind vorsichtig durch Druck auf den Boden zu zerkleinern. Die Probe wird 10 - 15 min. mit einer automatischen Siebmaschine (nähere Beschreibung siehe Gerätevorschrift) durchgesiebt. Die auf den Sieben verbliebenen Rückstände werden mit Hilfe eines Pinsels vorsichtig in tarierte (vorgewogene) Wägeschiffchen überführt (die noch im Drahtsieb steckenden Körnchen vorsichtig mit Pinsel zurückdrücken, gehören zum Siebrückstand) und auf der Analysenwaage ausgewogen.
Bei Verwendung von Handsiebsätzen erfolgt die Siebung von ca.2-3 min jeweils nur mit einem Sieb. Es ist mit der größten Siebgröße (1 mm) zu beginnen. Der Siebrückstand wird wie oben beschrieben ausgewogen. Der Siebdurchgang ist dann der weiteren Siebung mit dem nächst kleinerem Sieb zuzuführen. Der nach der letzten Siebung (0,063 mm Siebgröße) entstandene Durchgang ist ebenfalls auszuwägen (= Ton + Schluff).

Berechnung der einzelnen Siebfraktionen:

$$\text{Siebfraktion (\%)} = \frac{\text{ausgewogener Rückstand (g)}}{\text{Gesamtbodeneinwaage (20 bzw. 50 g)}} \times 100\ \%$$

Auswertung:
Der prozentuale Anteil der Siebfraktionen ist zu berechnen und die Korngrößenverteilung als **Summenkurve bzw. tabellarisch (Summe <u>aller</u> <u>aufaddierten Anteile</u>, deren Körnungsdurchmesser kleiner oder gleich d ist)** darzustellen. Dabei sind die Siebgrößen als x-Achse und die prozentuale Verteilung der einzelnen Siebfraktionen als y-Achse darzustellen. Die graphische Darstellung kann am Rechner oder per Hand erfolgen.



## 6. Schlämmanalyse zur Bestimmung von Schluff- und Tonanteil (Fraktion <0,063 mm als Summe)

Prinzip :

Für die Körnungsart ist der Gesamtanteil an Schluff und Ton (Summe U+T) maßgebend. Er wird als Differenz Bodeneinwaage – Gesamtanteil Sand bestimmt. Die Bodenprobe wird in Natriumpyrophosphatlösung dispergiert (feinverteilt), der Sandanteil dann über ein Sieb (Siebgröße 0,063 mm) abgetrennt und gravimetrisch bestimmt. Die Methode stellt eine Schnellbestimmung für die Bestimmung der Schluff- und Tonanteile dar.

Die völlige Dispergierung des Bodens wird durch Mischen mit Na-pyrophosphat erreicht. Dabei werden die Bindemittel (Kalk, Kieselsäure, Fe/Al-Sesquioxide, organische Stoffe) gelöst und die Bodenaggregate in ihre Primärpartikel zerlegt. Bei humosem Boden ist zusätzlich die Zerstörung der organischen Substanz nötig (Behandlung mit Wasserstoffperoxid).

Durchführung:

20 g Feinboden (<2 mm) werden mit 15 ml Natriumpyrophosphat-Lösung und ca. 200 ml dest. Wasser (destilliertes Wasser mit einer Leitfähigkeit $<5 \times 10^{-6}$ S/cm$^{-1}$) versetzt und 6 Minuten mit einem Motorrührer in einem 800 ml Becherglas gerührt.

Nach der Dispergierung wird der Sandanteil der Probe über ein Sieb (ca. 100 mm Durchmesser und einer Maschenweite von 0,063 mm) von den feineren Fraktionen getrennt. Das Filtrat (Fraktion <0,063 mm) wird verworfen.

Der Siebrückstand (Sandanteil) muss mit wenig dest.Wasser vollständig in ein Wägeglas (vorher getrocknet, gewogen und beschriftet) überführt, bei 105 °C im Trockenschrank über Nacht getrocknet und anschließend ausgewogen werden.

Ansatz der Lösung: Natriumpyrophosphat-Lösung: $Na_4P_2O_7$-Lsg., 0,1 mol/l: 223 g $Na_4P_2O_7 \times 10\ H_2O$ werden in dest. Wasser unter Erwärmen gelöst und auf 5 l aufgefüllt.

Berechnung :

$$\% \text{ U+T} = \frac{100\ \% \times (\text{Einwaage in g} - \text{Auswaage Sandanteil in g})}{\text{Einwaage in g}} = (20\ \text{g} - \text{Auswaage Sandanteil in g}) \times 5$$

Einwaage = 20 g

Durch eine anschließende Siebanalyse (Übung 7) der gesamten Auswaage des Sandanteils können die einzelnen Sandfraktionen ermittelt werden.

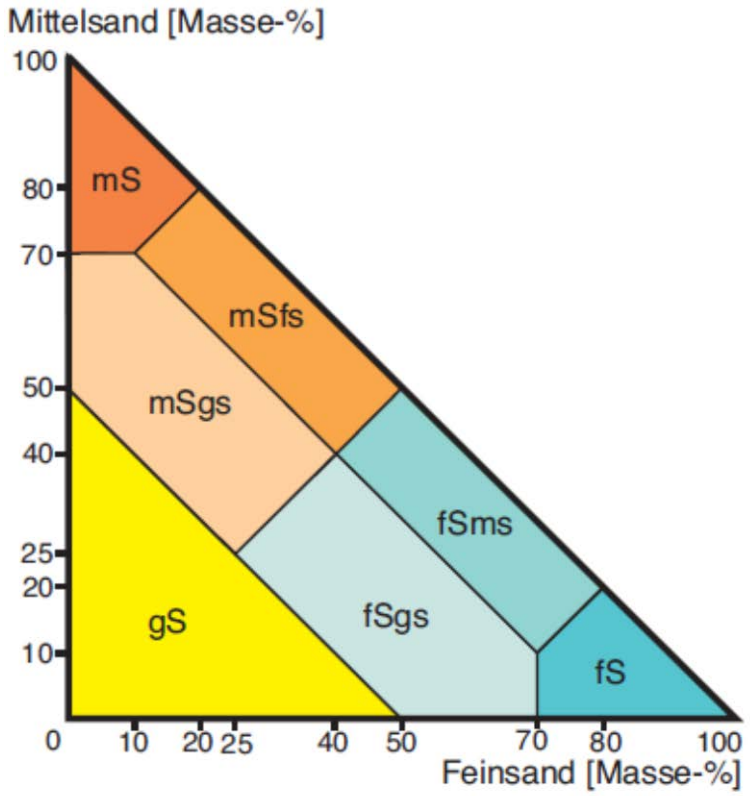
Auswertung der Korngrößenbestimmung:

Es sind die Prozente an Sand (>0,063 mm), Schluff (0,063-0,002 mm) und Ton (<0,002 mm) zu berechnen und mit Hilfe des Dreieckskoordinatensystems (siehe Seite 10) die Bodenart zu bestimmen.

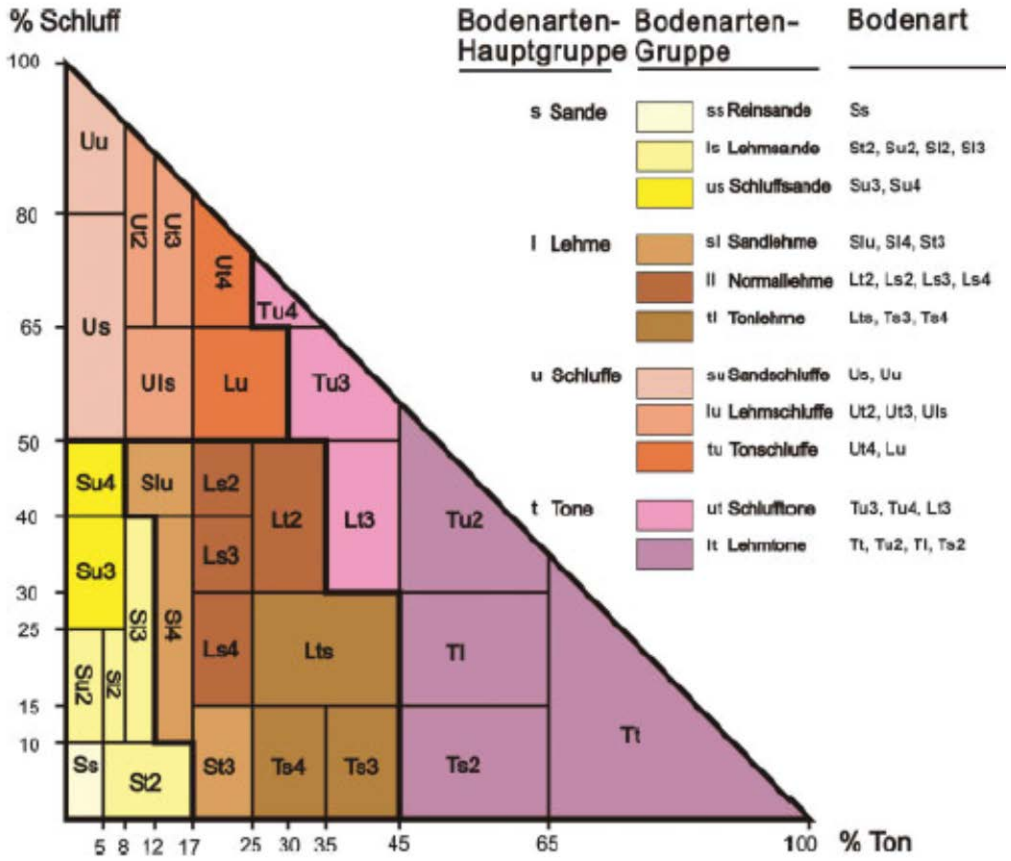
**% Sand + % Schluff + % Ton = 100 % Gesamtbodeneinwaage**

1.Berechnung der Summe des Sandanteils in % = 100 % Gesamtbodeneinwaage – (U+T) in %

2.Berechnung des Schluffanteils in % = (U+T) in % – T in %




**Unterteilung der Bodenart „reiner Sand" (Ss) (nach Möglichkeit der Geländeansprache bezogen auf 100 % Sand)**




**Feinbodenartendiagramm mit Klassifikation auf verschiedenen Niveaus**

**Grenzwerte der Bodenarten (Anteile der Fraktionen) aus Bodenkundlicher Kartieranleitung KA5**

| Bodenartenuntergruppen | Kurzzeichen | Kornfraktionen (Mass-%) | | |
|---|---|---|---|---|
| | | Ton | Schluff | Sand |
| reiner Sand | Ss | 0 - 5 | 0 - 10 | 85 - 100 |
| schwach schluffiger Sand | Su2 | 0 - 5 | 10 - 25 | 70 - 90 |
| schwach lehmiger Sand | Sl2 | 5 - 8 | 10 - 25 | 67 - 85 |
| mittel lehmiger Sand | Sl3 | 8 - 12 | 10- 40 | 48 - 82 |
| schwach toniger Sand | St2 | 5 - 17 | 0 - 10 | 73 - 95 |
| mittel schluffiger Sand | Su3 | 0 - 8 | 25 - 40 | 52 - 75 |
| stark schluffiger Sand | Su4 | 0 - 8 | 40 - 50 | 42 - 60 |
| schluffig-lehmiger Sand | Slu | 8 - 17 | 40 - 50 | 33 - 52 |
| stark lehmiger Sand | Sl4 | 12 - 17 | 10 - 40 | 43 - 78 |
| mittel toniger Sand | St3 | 17 - 25 | 0 - 15 | 60 - 83 |
| schwach sandiger Lehm | Ls2 | 17 - 25 | 40 - 50 | 25 - 43 |
| mittel sandiger Lehm | Ls3 | 17 - 25 | 30 - 40 | 35 - 53 |
| stark sandiger Lehm | Ls4 | 17 - 25 | 15 - 30 | 45 - 68 |
| schwach toniger Lehm | Lt2 | 25 - 35 | 30 - 50 | 15 - 45 |
| sandig-toniger Lehm | Lts | 25 - 45 | 15 - 30 | 25 - 60 |
| stark sandiger Ton | Ts4 | 25 - 35 | 0 - 15 | 50 - 75 |
| mittel sandiger Ton | Ts3 | 35 - 45 | 0 - 15 | 40 - 65 |
| reiner Schluff | Uu | 0 - 8 | 80 - 100 | 0 - 20 |
| sandiger Schluff | Us | 0 - 8 | 50 - 80 | 12 - 50 |
| schwach toniger Schluff | Ut2 | 8 - 12 | 65 - 92 | 0 - 27 |
| mittel toniger Schluff | Ut3 | 12 - 17 | 65 - 88 | 0 - 23 |
| sandig-lehmiger Schluff | Uls | 8 - 17 | 50 - 65 | 18 - 42 |
| stark toniger Schluff | Ut4 | 17 - 25 | 65 - 83 | 0 - 18 |
| schluffiger Lehm | Lu | 17 - 30 | 50 - 65 | 5 - 33 |
| mittel toniger Lehm | Lt3 | 35 - 45 | 30 - 50 | 5 - 35 |
| mittel schluffiger Ton | Tu3 | 30 - 45 | 50 - 65 | 0 - 20 |
| stark schluffiger Ton | Tu4 | 25 - 35 | 65 - 75 | 0 - 10 |
| schwach sandiger Ton | Ts2 | 45 - 65 | 0 - 15 | 20 - 55 |
| lehmiger Ton | Tl | 45 - 65 | 15 - 30 | 5 - 40 |
| schwach schluffiger Ton | Tu2 | 45 - 65 | 30 - 55 | 0 - 25 |
| reiner Ton | Tt | 65 - 100 | 0 - 35 | 0 - 35 |

**Untergliederung der Bodenartenuntergruppen « reiner Sand » (Ss)**

| Bezeichnung | Kurzzeichen | Kornfraktion (Masse- %) | | |
|---|---|---|---|---|
| | | Feinsand | Mittelsand | Grobsand |
| Feinsand | fS | 70 - 100 | 0 - 20 | 0 - 20 |
| mittelsandiger Feinsand | fSms | 40 - 80 | 10 - 50 | 0 - 20 |
| grobsandiger Feinsand | fSgs | 25 - 70 | 0 - 40 | 20 - 50 |
| Mittelsand | mS | 0 - 20 | 70 - 100 | 0 - 20 |
| feinsandiger Mittelsand | mSfs | 10 - 50 | 40 - 80 | 0 - 20 |
| grobsandiger Mittelsand | mSgs | 0 - 40 | 25 - 70 | 20 - 50 |
| Grobsand | gS | 0 - 50 | 0 - 50 | 50 - 100 |

## 7. Bestimmung des Porenvolumens (PV), der Trockenrohdichte (TRD) und des Wassergehaltes

Vorbetrachtung:
Die Böden bestehen aus Körnern verschiedener Größe und Form, die ein gegebenes Volumen mit ihrer Masse nie vollständig ausfüllen. Die verschiedenen Ausfüllungsgrade kann man entweder durch den Anteil an Hohlräumen (= Poren) beschreiben oder durch die ebenfalls unterschiedliche Bodendichte (einschließlich der Poren).
Das Gesamtporenvolumen (auch Porosität) ist die Summe aller Hohlräume im Bodengefüge und setzt sich aus den wasser- und luftführenden Hohlräumen eines Bodens zusammen. Das Gesamtporenvolumen (ebenso die Dichte) ist von der Körnung und Kornform, dem Gehalt der Böden an organischer Substanz sowie von pedogenen Prozessen und vom Bodengefüge abhängig. Im Allgemeinen findet man eine Zunahme mit abnehmender Korngröße, die teils auf zunehmende Abweichungen von der Kugelform, teils auf zunehmende Einflüsse von Oberflächenkräften zurückzuführen ist. Dies gilt besonders für die Korngrößenfraktion Ton.
Das Gesamtporenvolumen gilt als Maß für die Bodenstruktur und eignet sich zur Kontrolle von Strukturveränderungen des Standortes. Von besonderer ökologischer Relevanz ist die Einteilung des Porenvolumens in Grob- Mittel- und Feinporen. Das Verhältnis von nutzbarer Feldkapazität (Mittel- und Feinporen) und Feldkapazität zu Luftkapazität und Grobporenvolumen bringt neben der Wasserversorgung auch den Grad der Durchlüftung zum Ausdruck, was besonders bei schweren Böden von entscheidender Bedeutung für das Wachstum der Kulturpflanzen sein kann.

typische Porenvolumen verschiedener Böden

| *Böden* (humusfrei) | *Porenvolumen (%)* | *Richtwerte* | *Porenvolumen (%)* |
|---|---|---|---|
| Sand | 32,5 | Sande | 56 - 36 % |
| Lehm | 34,5 | Lehme | 55 - 30 % |
| Schwerer Lehm | 44,1 | Schluffe | 56 - 38 % |
| Toniger Lehm | 45,3 | Tone | 65 - 35 % |
| Lehmiger Ton | 47,1 | | |
| Schwerer Ton | 52,9 | | |

Allgemeine Tendenz in Abhängigkeit von der Bodenart:

| | |
|---|---|
| Substanzvolumen | S > L > U > T |
| Porenvolumen | T > U > L > S |
| Grobporen | S > L, U > T |
| Mittelporen | L, U > T > S |
| Feinporen | T > U > L > S |

Prinzip:
Zur Bestimmung der bodenphysikalischen Parameter Rohdichte, Trockenrohdichte und den daraus rechnerisch ermittelbaren bodenphysikalischen Parametern muss der Boden in ungestörter Lagerung untersucht werden. Zu diesem Zweck benutzt man Stechzylinder aus gehärtetem Stahl, die in den Boden eingeschlagen werden.

Durchführung:
Ermittlung der Trockenraummasse:
Ein Stechzylinder mit einem Volumen von 100 $cm^3$, wird unter Vermeidung starker Erschütterungen und bei geglätteter Bodenfläche horizontal in den zu untersuchenden Bodenhorizont (in einer angelegten Profilgrube) eingetrieben und danach vorsichtig ausgegraben. An beiden Seiten wird der Boden glatt abgeschnitten und die Probe rasch in einen Probebeutel überführt.

Nach der Wägung der Bodenprobe erfolgt in einem vorbereiteten Becherglas, dessen Leermasse zuvor ermittelt wurde, die Trocknung (24 h im Trockenschrank bei 105 °C). Nach Abkühlung im Exsikkator erfolgt die Rückwägung (e).

Berechnung:

1) Rohdichte in $g/cm^3$ = $\frac{\text{Frischmasse des Bodens in g}}{\text{Stechzylindervolumen* in } cm^3}$ = $\frac{c}{100^*}$ $g/cm^3$ $c = a - b$

2) Trockenrohdichte in $g/cm^3$ = (Lagerungsdichte) $\frac{\text{Trockenmasse des Bodens in g}}{\text{Stechzylindervolumen* in } cm^3}$ = $\frac{d}{100^*}$ $g/cm^3$ $d = e - b$

3) Porenvolumen in % = 100 – (Trockenraumdichte in $g/cm^3$ : Festsubstanzdichte in $g/cm^3$ x 100 )

4) Wasser in Vol. % = $\frac{\text{Frischmasse in g} - \text{Trockenmasse in g}}{\text{Volumen des Zylinders* in } cm^3}$ x 100 = c – d

5) Luft in Vol. % = Porenvolumen in % – Wasservolumen in %

typische Richtwerte der Festsubstanzdichte in $g/cm^3$:

| | |
|---|---|
| mineralische Böden | 2,60 - 2,75 |
| basenreiche Silikatböden | >2,7 |
| reiner Quarzsand | 2,63 |
| humifizierte org. Substanz | variiert um 1,4 |
| schwach - mäßig humoser Oberboden | 2,4 - 2,65 |
| humusreiche Böden | <2,5 |

ERLÄUTERUNGEN:

a- Masse Stechzylinder mit Boden und Deckeln vor der Trocknung in g
b- Masse Stechzylinder bei 105 °C getrocknet in g
c- Frischmasse des Bodens in g vor der Siebung c = a – c
d- Trockenmasse des Bodens in g vor der Siebung d = e – b
e- Masse Stechzylinder mit Boden und Deckel nach der Trocknung in g
r- Trockenraumdichte in $g/cm^3$
s- Festsubstanzdichte in $g/cm^3$ (muss an einer Parallelprobe ermittelt werden, siehe Übung 8)
*- Anzahl der Stechzylinder-Wiederholungen beachten

Anmerkung: Die Rückwägung des Zylinders (Ergebnis -e-) kann erst am nächsten Tag erfolgen.

## 8. Bestimmung der Festsubstanzdichte (früher spezifisches Gewicht) der Bodensubstanz

(für Studenten der Studiengänge FOWI und IFEM)

Vorbetrachtung :
Zur Feststellung des Porenvolumens im natürlich gelagerten Boden benötigt man als Berechnungsfaktor die Festsubstanzdichte der festen Bodensubstanz. Es wird allgemein ausgedrückt in **Masseeinheit pro Volumeneinheit in g/cm$^3$**.
Aus den Werten der Festsubstanzdichte lassen sich gewisse Schlüsse über die Zusammensetzung des Bodens ziehen.

Richtwerte der Festsubstanzdichte in g/cm$^3$:

| | |
|---|---|
| mineralische Böden | 2,60 - 2,75 |
| basenreiche Silikatböden | >2,7 |
| reiner Quarzsand | 2,63 |
| humifizierte org. Substanz | variiert um 1,4 |
| schwach - mäßig humoser Oberboden | 2,4 - 2,65 |
| humusreiche Böden | <2,5 |

Prinzip:
Die Bestimmung beruht auf der Berechnung des Quotienten aus Substanzmasse in g und dem Substanzvolumen in cm$^3$. Es wird das Volumen einer bestimmten Bodenmasse ermittelt. Als Substanzmasse wird die Bodenprobe (atro = 100 % trocken) eingesetzt, während die Messung des Volumens indirekt mit einer gut benetzenden Flüssigkeit erfolgt.

Durchführung:
Für diese Bestimmung wird ein Teil der getrockneten Stechzylinderprobe (lutro Feinerde < 2 mm), welche für die Ermittlung der Trockenraumdichte (siehe Bestimmung des Porenvolumens, Seite 11) benötigt wird, genommen. Der Wassergehalt wird an einer separaten Probe untersucht.
In einem trockenen, gewogenen 50 ml Messkolben (Masse A) wird etwa zu einem Drittel des Volumens getrocknete und gemörserte Bodensubstanz mit einem Pulvertrichter eingefüllt und gewogen (Masse B). Dann gibt man aus einer Bürette Ethylalkohol zunächst bis zum halben Volumen dazu. Durch schräges Rollen und seitliches Klopfen ist für eine einwandfreie Benetzung der Bodenteilchen und für das Austreten der Luftblasen zu sorgen. Danach füllt man den Kolben mit Ethylalkohol bis zum Eichstrich auf und liest das verbrauchte Volumen (V) an der Bürette ab.

Berechnung:

$$\text{Festsubstanzdichte g/cm}^3 = \frac{\text{Bodenmasse (g)}}{\text{Bodenvolumen (cm}^3\text{)}}$$

Bodenmasse: Differenz Kolbenmasse mit Boden und Leermasse des Kolbens
(Masse B – Masse A)
Bodenvolumen: Differenz des Kolbenvolumens (50 cm$^3$) und verbrauchtem Volumen aus der Bürette;
die Differenz entspricht dem Volumen der eingewogenen Bodenmasse
(50 cm$^3$ – V cm$^3$)

## 9. Bestimmung des Wassergehaltes

(Alternative Bestimmung des Wassergehaltes für Bodenproben, die nicht mit dem Stechzylinder genommen wurden.)

Vorbetrachtung:
Um vergleichbare Untersuchungsergebnisse zu erhalten, müssen alle am naturfeuchten oder lufttrockenen (lutro) Boden ermittelten Werte auf den trockenen (atro) Boden bezogen werden. Jeder bodenkundlichen Untersuchung geht daher eine Bestimmung des Wassergehaltes parallel.

Prinzip:
Ein Aliquot der Bodenmischprobe wird bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz* getrocknet. Nach dem Abkühlen im Exsikkator über einem Trockenmittel wird die Probe erneut gewogen und der Trocknungsverlust als die im Boden vorhandene Wassermenge (Feuchtigkeit) ermittelt.

Ausführung:
Wägegläser werden beschriftet, bei 105 °C im Trockenschrank 1 Stunde vorgetrocknet, im Exsikkator abgekühlt und gewogen (Masse 1).
1-20 g der zu untersuchenden Mischbodenprobe sind auf der Analysenwaage (auf 1 mg genau) in ein Wägegläschen einzuwägen (Masse 2) und bei geöffnetem Deckel im Trockenschrank bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz* zu trocknen. Im Anschluss ist die Probe im Exsikkator bei geschlossenem Deckel abzukühlen und zurückzuwägen (Masse 3 = atro Boden). Alle Wägungen erfolgen mit Deckel.

Berechnung des Wassergehaltes in %

M1 = Masse Wägegläschen mit Deckel in g
M2 = Einwaage Boden vor der Trocknung in g
M3 = Auswaage Boden nach der Trocknung in g (M1 abziehen)

$$\% \text{ Wassergehalt} = \frac{(\text{g Einwaage (vor Trocknung)} - \text{g Boden (nach Trocknung)})}{\text{g Einwaage (vor Trocknung)}} \times 100$$

% Trockenmassegehalt = 100 – % Wassergehalt

(Grundlage der Berechnung: **Einwaage : 100 % = (Einwaage - Auswaage)* : X %,** *Feuchtigkeit in der Probe)

Anmerkung:

- Soll das Ergebnis der Bodenuntersuchung auf absolut trockenen Boden umgerechnet werden, so sind die im lufttrockenen oder naturfeuchten Boden ermittelten Werte wie folgt umzurechnen:

| | | | |
|---|---|---|---|
| z.B. | 5,00 mg Stickstoff (N)/ 100 g *lutro Boden und 90 % Trockenmassegehalt* | $\frac{\text{5,00 mg N/100 g lutro Boden} \times 100\ \%}{\text{90 \% Trockenmassegehalt}}$ = | 5,55 mg N/100 g im *atro Boden* |

- Gewichtskonstanz*: In bestimmten Zeitabständen (z.B.1 h) werden die Proben dem Trockenschrank entnommen, im Exsikkator abgekühlt, gewogen und erneut im Trockenschrank getrocknet. Gewichtskonstanz ist erreicht, wenn die Ergebnisse der Auswaagen unverändert bleiben. Im Grundpraktikum werden die Trocknungszeiten auf ein Minimum (1 h) reduziert.

## 10. Bestimmung des Glühverlustes

Vorbetrachtung:
Mit dieser Methode lässt sich der Gehalt an organischer Substanz (= Gesamthumus) von carbonatfreien Sandböden ermitteln. Die organische Substanz entspricht dem beim Glühen erlittenen Gewichtsverlust. In stark carbonathaltigen Böden täuscht allerdings der $CO_2$-Verlust der Karbonate und in ton- und gipsreichen Böden die Abgabe des hygroskopisch gebundenen Wassers (Kristallwasser) einen höheren Gehalt an Humus vor. Etwa 58 % der org. Substanz stellen den konventionellen Kohlenstoff dar, so dass vom ermittelten Gehalt an organischer Substanz mit Hilfe des sich ergebenen Faktors (1,724) der Kohlenstoffgehalt ermittelt werden kann.

Prinzip:
Veraschung einer auf 0,001 g (1mg) eingewogenen Probe bei 550 °C bis zur Massekonstanz. Der Glühverlust entspricht der im Boden vorhandenen organischen Substanz. Humusproben werden in den kalten Ofen eingesetzt und 4 Stunden geglüht.

Durchführung:
Porzellantiegel werden im Muffelofen eine ½ Stunde geglüht, im Exsikkator abgekühlt und gewogen (M1). Dann werden ca. 10-15 g lufttrockener Boden in die Tiegel auf 1 mg genau eingewogen (M2). Anschließend glüht man die Proben bis zur Massekonstanz (Mineralböden ca. 2,0 h, Auflagen ca. 4 h) im Muffelofen bei 550 °C, kühlt im Exsikkator ab und wägt aus (M3). Die Masse des Tiegels (M1) ist von M3 abzuziehen. Auflagen und humusreiche Proben sind in den kalten Ofen zu stellen.

Berechnung:

- **% Glühverlust** = $\frac{\text{(g Einwaage (lufttr.) – g Boden (geglüht)}}{\text{g Einwaage (lufttr.)}} \times 100$

M1 = Masse des Tiegels in g
M2 = Einwaage (lutro) in g
M3 = Auswaage g Boden - M1

Korrekturfaktor für ton- und gipsreiche Böden: Subtraktion von 0,1 % je % Ton
Subtraktion von 0,26 % je % $CaSO_4$
Bei ton- bzw. gipsreichen, aber humusarmen Proben ist dieses Verfahren jedoch zu grob.

- **% organischer Kohlenstoffgehalt = Glühverlust in % / Faktor**

Faktor: 1,724 (Achtung: Bei ausgewählten Standorten kann der Faktor zwischen 1,4 – 2,0 schwanken)

- **Kohlenstoff/Stickstoff-Verhältnis C/N** = $C_{org}$ in % / N in %

Das C/N-Verhältnis (wobei sich das Verhältnis immer auf den organischen Kohlenstoff bezieht) ist ein Maß für die Zersetzbarkeit der Streu sowie für biotische Aktivität. Die Mikrobentätigkeit ist gehemmt, wenn nicht genügend Boden-N für den Aufbau der Körpersubstanz zur Verfügung steht. Unter natürlichen Bedingungen wird die Streu umso rascher abgebaut, je stickstoffreicher sie ist.

< 20: N-Bedarf der Mikroorganismen (MO) für den Aufbau ihrer Körpersubstanz gedeckt; deshalb deutliche Freisetzung von organisch gebundenem Stickstoff bei der Humusumsetzung; MO selbst leicht zersetzbar, da vorwiegend aus leicht abbaubaren (N-reichen) Stoffen bestehend → MULL
> 25: zunehmende Hemmung des mikrobiellen Substanzabbaus
> 30: mikrobielle Immobilisierung von N durch organische Bindung → Entstehung von Rohhumus

N- und C-Vorräte im eff. Wurzelraum (org. Auflage und Mineralboden) und C/N-Verhätnis (AK STANDORTSKARTIERUNG 1996)

| $C_{org}$/(t/ha) | < 50 | < 100 | < 200 | < 400 | > 400 |
|---|---|---|---|---|---|
| $N_t$ (t/ha) | < 2,5 | < 5 | < 10 | < 20 | > 20 |
| Bewertung | sehr gering | gering | mittel | hoch | sehr hoch |

| $C_{org}$/N | < 10 | 10 – 12 | 12 – 16 | 16 – 20 | 20 – 25 | 25 – 35 | > 35 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Bewertung | sehr eng | eng | mäßig eng | mittel | mäßig weit | weit | sehr weit |

Anmerkung:
Erfolgt die Bestimmung von C und N am CNS-Elementaranalysator, so ist bei carbonathaltigen Böden der C-Gehalt zu korrigieren. Vom Gesamtkohlenstoffgehalt ist der anteilmäßige Kohlenstoff des Carbonates abzuziehen (% $CaCO_3$ x 0,12 = % C im Carbonat).

## 11. pH-Wert in Wasser und Kalium- bzw. Calciumchlorid

Vorbetrachtung:
Der pH-Wert eines Bodens, der mit vielen Eigenschaften der Böden in mehr oder weniger enger Beziehung steht, ist eine der wichtigsten Kenngrößen der Böden. Er ist eine Maßzahl für die aktuelle Wasserstoffionenkonzentration in der Bodenlösung und kennzeichnet die saure, neutrale oder alkalische Reaktion eines Bodens. Seine Angabe spielt eine große Rolle bei der Beurteilung phys., chem. und biolog. Prozesse im Boden sowie bei der Einschätzung des Bodens als Pflanzenstandort. Der pH-Wert lässt Aussagen über die effektive Kationenaustauschkapazität ($KAK_{eff}$ bzw.$AK_e$) und die relative Verfügbarkeit von Nährelementen zu. Der optimale pH-Wert hängt von einer Reihe von ökologisch wirksamen Bodeneigenschaften ab, die unterschiedlich auf die Veränderung des pH-Wertes reagieren. Hierzu gehören die toxische Wirkung von Al, die Verfügbarkeit von Makro- und Mikronährstoffen sowie von Schwermetallen, die Streuzersetzung/Bildung von Humusformen und das Bodengefüge.
Die Bestimmung des pH-Wertes erfolgt in **Wasser (aktuelle Azidität)** oder einer **Salzlösung** [Calcium- oder Kaliumchlorid] **(potenzielle Azidität)**, wobei die Gegebenheiten in der Salzlösung eher der natürlichen Bodenlösung mit ihrem Ionengehalt entsprechen als destilliertes Wasser. Bei der Bestimmung in Wasser werden nur die dissoziierten H-Ionen in der Bodenlösung erfasst. Durch Austausch mit den Kationen eines Salzes (K oder Ca) gelangt ein Teil der am Bodenaustauscher haftenden H- und Al-Ionen in die Bodenlösung, wodurch ein kleinerer pH-Wert als in Wasser ermittelt wird. → $[Al(OH_2)_6]^{3+} \rightarrow [AL(H_2O)_5OH]^{2+} + H^+$

Prinzip :
Messung der $H^+$-Ionen-Aktivität ($H_3O^+$ = Hydronium-Ion) -ausgedrückt als deren negativer dekadischer Logarithmus pH = -lg $c_{H^+}$ z.B. pH 4 = $10^{-4}$ mol $H^+$/ l = ca. 0,0001 g $H^+$/l - des Bodens in Lösung.
Seine Bestimmung wird in einer Suspension von Boden in Salzlösung von neutraler Reaktion (Kaliumchlorid = KCl 1,0 mol/l) oder in Wasser im Verhältnis 1: 2,5 (Boden + Wasser) auf elektrometrischem Wege mit einem pH-Meter durchgeführt. Die Abmessung der Bodenmenge erfolgt bei Mineralböden gewichtsmäßig und bei Humus, Moorböden, Gärtnerischen Erden oder Substraten in feuchtem Zustand volumenmäßig. Als Abschätzungsmethode ist auch eine kolorimetrische Bestimmung mit Farbindikatoren oder pH-Indikatorpapier möglich.

Probenvorbereitung:
Mineralböden lufttrocknen und durch Prüfsieb, 2 mm Maschenweite, Moorböden, Gärtnerischen Erden und Substrate in frischem Zustand durch Plastiksieb, 5 mm Maschenweite, reiben.

Durchführung :
1. $pH_{H_2O}$ – aktuelle Azidität

Zwischen 5 und 20 g lufttrockenen Mineralboden einwiegen bzw. 20 ml von humusreichen (z.B.Moor-) Böden, Gärtnerischen Erden oder Substraten im feuchten Zustand in ein 150 ml Becherglas mit Messgefäß einmessen. Zur Einwaage bzw. zum eingemessenen Volumen mit einem 100 ml Messzylinder die 2,5 fache Menge destilliertem Wasser hinzugeben. Das Gemisch bleibt mindestens 1 h (im Grundpraktikum 10 Minuten) stehen, wobei während dieser Zeit zweimal mit einem Glasstab gründlich umzurühren ist. Im Anschluss ist der $pH_{H_2O}$ mit pH-Indikatorpapier, Hellige Pehameter und einem Labor-pH-Messgerät zu messen.
2. $pH_{KCl}$ bzw. $pH_{CaCl2}$ – potentielle Azidität
Siehe Durchführung $pH_{H_2O}$. Die Messung erfolgt mit der 2,5fachen Menge 1molarer Kalium- bzw. Calciumchloridlösung
(z.B. 1 mol/l = 74,56 g KCl/l) mit einem Labor-pH-Messgerät

Allgemeine Einstufung der Bödenreaktion (AK STANDORTKARTIERUNG 2003)

| $pH_{Salz}$ | 3,0 | 4,0 | 5,0 | 6,0 | 6,5 | 7,0 \| | 7,0 | 7,5 | 8,0 | 9,0 | 10,0 | 11,0 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | ----------**sauer**---------- | | | | | | **neutral**---------- | | | | **alkalisch**---------- | | |
| | äus-serst | sehr stark | stark | mittel | schwach | sehr schwach | **neu-tral** | sehr schwach | schwach | mittel | stark | sehr stark | äus-serst |

Pufferbereiche nach ULRICH et al. (1979)

| Pufferbereich | Karbonat | Silikat | Austauscher | Aluminium | Aluminium/ Eisen | Eisen |
|---|---|---|---|---|---|---|
| pH-Bereich | > 6,2 | 6,2 – 5,0 | 5,0 – 4,2 | 4,2 – 3,8 | 3,8 – 3,0 | < 3,0 |

## 12. Basenneutralisationskapazität (BNK) und Ermittlung des Kalkbedarfes

(für Studenten der Studiengänge FOWI und IFEM)

Vorbetrachtung:

Böden versauern, weil ihnen mehr Protonen (Wasserstoffionen) zugeführt werden als sie neutralisieren (abpuffern) können. Ursache ist, dass basische Reaktionsprodukte des Neutralisationsvorganges (z.B.$HCO_3^-$) ausgewaschen werden, was in feuchten (humiden) Klimaten mit ihrem vorwiegend nach unten gerichteten Wasserfluss begünstigt wird. In trockenen (ariden) Gebieten findet dagegen eine Anreicherung freigesetzter Basen in den Böden statt.

Die verschiedenen Böden verfügen über eine unterschiedliche Kapazität, Säuren abzupuffern, die **Säureneutralisationskapazität (SNK).** In dem Maße, wie diese mit der Zeit verbraucht wird, erwirbt der Boden die Fähigkeit, Basen zu neutralisieren, die **Baseneutralisationskapazität (BNK).** Mit zunehmender Versauerung, d.h. Verlust von SNK, baut sich also BNK auf. Nach ihr bemisst sich z.B. die Menge an Kalk als Base, die notwendig ist, um die bei der Versauerung gebildete Bodenacidität zu neutralisieren und so den pH-Wert anzuheben. Die Größe der BNK ist vom Tongehalt der Böden abhängig, weil in erster Linie auf den großen Oberflächen der Tonminerale Al-hydroxid-Ionen gebunden sind, die die in der Bodenlösung frei vorhandenen H-Ionen puffern und so die Säure mit der ihnen eigenen Säurestärke speichern. Huminstoffreiche Horizonte weisen im gesamten pH-Bereich höhere BNK als Mineralböden auf.

Prinzip:

BNK ist die Äquivalentsumme aller Säuren, die mit einer starken Base bis zu einem vorher festgelegten Äquivalentpunkt titriert werden können. Im Boden gibt sie die Säuremenge an, die innerhalb einer bestimmten Zeitspanne bis zu einem bestimmten pH-Wert mit Basen reagiert.

Zur Bestimmung wird eine diskontinuierliche Titrationskurve erstellt, aus der die verbrauchten Basenäquivalente abgelesen werden können und die unterschiedliche Art der Pufferung erkennbar ist. Für die Bestimmung ist die Verwendung unterschiedlicher Basen (z.B. $CaCO_3$, $Ca(OH)_2$, $CaCl_2$, NaOH) möglich.

Bestimmung:

- Probenmaterial
  -luftgetrockneter Boden <2 mm

- Reagenzien
  -NaOH- und $CaCl_2$-Lösungen in den Konzentrationen 10, 20, 50, 100 und 200 $mmol_C$ /l = mmol IÄ/l

-**$CaCl_2$-Lösungen***: Aus der Stammlösung von 2 N $CaCl_2$ (147,03 g $CaCl_2$ x $2H_2O$/1000 ml dest. $H_2O$) werden 5; 10; 25; 100 und 200 ml entnommen und zu je 1 l mit dest. $H_2O$ verdünnt (Lösung1-5)*

-**NaOH-Lösungen****: Aus der Stammlösung von 8 N NaOH (160 g NaOH/500 ml dest. $H_2O$) werden 1,25; 2,5; 6,25; 12,5 und 25,0 ml entnommen und zu je 1 l mit dest. $H_2O$ verdünnt (Lösung 1-5)**

- Ansatz der Probelösungen
  –Zur Ermittlung der BNK werden 6 Punkte der Titrationspunkte ermittelt. Dazu wird der Boden in 100 ml Plastikflaschen mit unterschiedlichen Konzentrationen an $CaCl_2$* und NaOH** (siehe untere Tabelle), die nacheinander zugegeben werden, 18 h in der Schüttelmaschine geschüttelt. Nach dem Absetzen des Bodens wird der pH-Wert in der überstehenden Lösung mit einer pH-Elektrode gemessen.

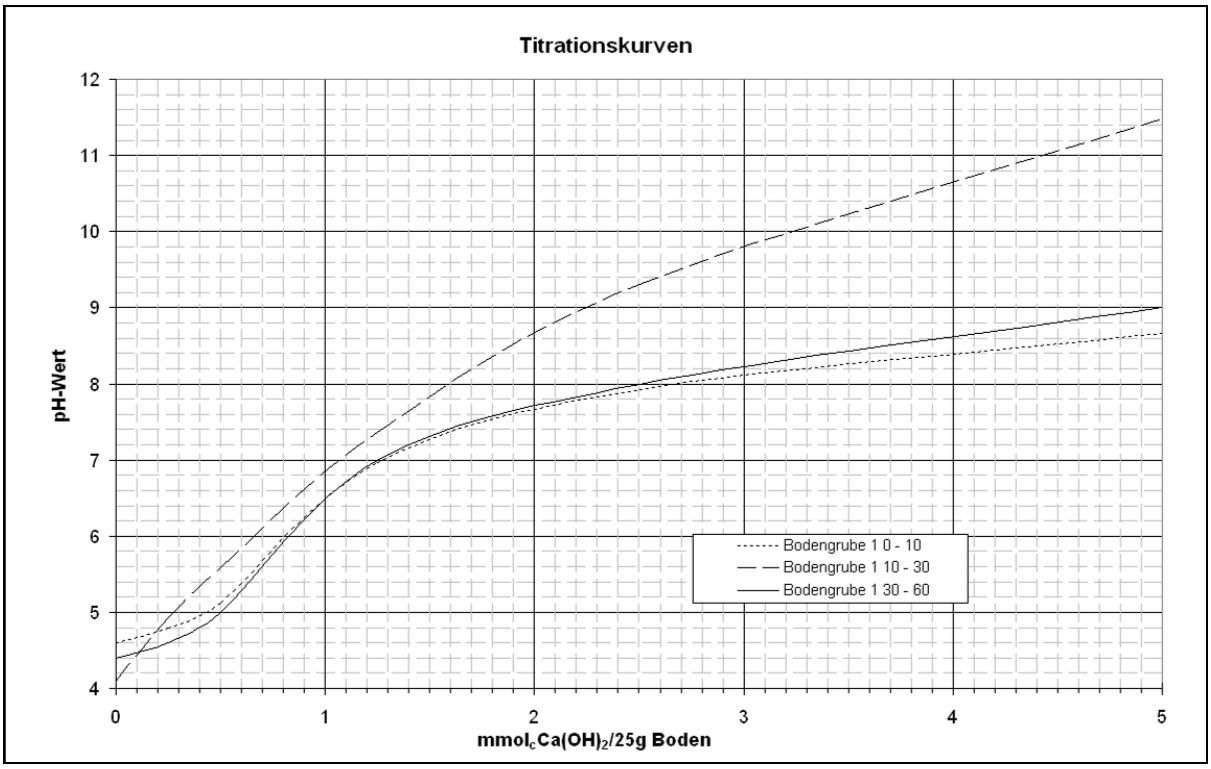
Ansatz der 6 Titrationspunkte für Mineralboden

| Titrations-punkte | Probe 0 | Probe 1 | Probe 2 | Probe 3 | Probe 4 | Probe 5 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| MB°<br>H° | 50 g<br>20 g | 50 g<br>20 g | 50 g<br>20 g | 50 g<br>20 g | 50 g<br>20 g | 50 g<br>20 g |
| $CaCl_2$* | 100 ml $H_2O$ | 50 ml Lös.1 | 50ml Lös. 2 | 50ml Lös. 3 | 50ml Lös. 4 | 50ml Lös. 5 |
| NaOH** | ---- | 50 ml Lös.1 | 50ml Lös. 2 | 50ml Lös. 3 | 50ml Lös. 4 | 50ml Lös. 5 |
| **Es liegen folgende $Ca(OH)_2$ – Konzentrationsstufen vor:** | | | | | | |
| $Ca(OH)_2$ $mmol_C$ in 25g Boden | 0,0 | 0,25 | 0,5 | 1,25 | 2,5 | 5,0 |

**°MB- Mineralboden, H- Humus**

Auswertung:

Bei der Auswertung werden die pH-Werte gegen die zugesetzte $Ca(OH)_2$-Menge aufgetragen und die Messpunkte linear verbunden. Mit Hilfe nachfolgender Tabelle kann aus der Titrationskurve direkt die zu düngende $CaCO_3$-Menge ablesen werden. Bei einer Trockenraumdichte, die von 1,0 g/cm$^3$ abweicht (z.B. Trockenraumdichte 1,2 g/cm$^3$, Wert x 1,2) sowie bei skeletthaltigen Böden (z.B. Skelettanteil 10 %, Wert x 0,9, dies ergibt sich aus (100 % Bodenmasse - 10 % Skelettanteil) / 100 % = 0,9)) müssen die Ergebnisse korrigiert werden.




Umrechnungstabelle für äquivalente Kalkmengen in verschiedene Einheiten
(Feinbodenanteil = 1; Trockendichte = 1 g/cm$^3$)

| **Beispiele** | | | | | | **UF°** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| mmol$_C$ $Ca(OH)_2$/25g Boden | 0,25 | 0,50 | 1,25 | 2,50 | 5,0 | **x 1** |
| mmol$_C$ $Ca(OH)_2$/kg Boden* | 10 | 20 | 50 | 100 | 200 | **x 40** |
| g $CaCO_3$/ kg Boden* | 0,5 | 1,0 | 2,5 | 5,0 | 10 | **x 2** |
| kg $CaCO_3$/ (ha x dm)* | 500 | 1000 | 2500 | 5000 | 10000 | **x 2000** |
| kg CaO/ (ha x dm)* | 280 | 560 | 1400 | 2800 | 5600 | **x 1120 aktuell** |

* bei der Erstellung von Humus-Titrationskurven (10 g Bodeneinwaage) Werte x 2,5

° UF: Umrechnungsfaktor von mmol$_C$ /25 g Boden (Ablesewert aus der Titrationskurve) in die anderen Einheiten

Beispiel: X-Wert aus Kurve x Trockenraumdichte x ((100 - % Skelettanteil) / 100) x 1120 = kg CaO/ (ha x dm)*

**Umrechnung von mmolc $Ca(OH)_2$ /kg Boden (in g $CaCO_3$ Boden)**

Massenanteil (ω) in g = X mmolc $Ca(OH)_2$ /kg / Wertigkeit $Ca(OH)_2$ x Molmasse $CaCO_3$ in g/mmol

Beispiel: ω in g = 10 mmolc $Ca(OH)_2$ /kg / 2 x 100/1000 $CaCO_3$ in g/mmol
= 0,5 g $CaCO_3$/kg Boden

**Umrechnung auf Horizontmächtigkeit (1 dm = 10 cm):**

a: 0-10 cm: kg CaO/ (ha x dm) x 1
b: 10-30 cm: kg CaO/ (ha x dm) x 2
c: 30-60 cm: kg CaO/ (ha x dm) x 3

Ermittlung von Summen: 0 - 10 cm = a 0 - 30 cm = a + b 0 - 60 cm = a + b + c

## 13. Bestimmung des Carbonatgehaltes ($CaCO_3$) im Boden

Vorbetrachtung:
Carbonate treten gesteinsbildend vor allem als Kalkstein und Marmor (meist $CaCO_3$) und (seltener) als Dolomit ($CaCO_3 \circ MgCO_3$) auf. Niederungsböden enthalten oft auch 1-2 % $FeCO_3$ (Siderit). In der Nähe von Kupfervorkommen (z.B. Mansfelder Land) spielt $CuCO_3$ eine Rolle. In Salzböden der Steppen und Wüsten können sich auch $Na_2CO_3$ und $NaHCO_3$ anreichern. Vorräte an Calcium im Boden beeinflussen die Aciditätsverhältnisse, die Gefügeeigenschaften und die Bodenentwicklung. Calcium wirkt neutralisierend auf entstehende Säuren und als 2-fach positives Kation flockend auf die Bodenkolloide.
Im carbonathaltigen Boden ist Calcium überwiegend an Carbonaten gebunden, so dass die $CO_2$-Entwicklung eines Bodens (nach Zugabe von Salzsäure) ein Maß für seinen Vorrat an Calcium darstellt. Da das weniger verbreitete Magnesium in seiner Wirkung im Boden dem Calcium ähnlich ist, erfolgt aus Zweckmäßigkeitsgründen auch bei dolomitischen Böden die Berechnung in $CaCO_3$.
Die Carbonatbestimmung dient ferner der Korrektur des Kohlenstoffgehaltes, welcher durch Elementaranalyse ermittelt wurde.

Prinzip:
Aus den Carbonaten des Bodens entwickelt sich nach Zugabe von Salzsäure (HCl) Kohlendioxid ($CO_2$). An der Stärke der Gasentwicklung kann man qualitativ den Carbonatgehalt abschätzen (siehe untere Tabelle).
Das Gas kann auch aufgefangen und volumetrisch gemessen werden. Unter Berücksichtigung des Luftdruckes und der Temperatur lässt sich daraus der Gehalt an $CaCO_3$ bzw. CaO errechnen.
$CaCO_3+2HCl$ ------> $CaCl_2+H_2O+CO_2\uparrow$

### Qualitative Ermittlung des Carbonatgehaltes

Dient als Feldmethode zur Kennzeichnung des Kalkgehaltes sowie als Vortest zur Abschätzung der Einwaage für die quantitative Bestimmung mit der SCHEIBLER-Apparatur.

Durchführung:
Eine Spatelspitze lufttrockener Boden wird auf einem Uhrglas mit einigen Tropfen 10%iger HCl versetzt. Je nach Stärke des Aufschäumens wird ein ungefährer Carbonatgehalt entsprechend der ausliegenden Tabelle geschätzt und die Einwaagemenge für die quantitative Bestimmung abgeleitet.

Qualitative Bewertung des Carbonatgehaltes (nach KA5)

| Substratarten (Kennzeichnung im Feld 42)[2] Hauptgruppe/Gruppe | | Untergruppe | | Carbonatgehalt ($CaCO_3$-Äquivalent, Kennzeichnung im Feld 46) | | | $CO_2$-Entwicklung und ihre Wirkung bei bindigen Feinbodenarten[1] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Kurz-zeichen | Bezeich-nung | Kurz-zeichen | Bezeich-nung | Kurz-Zeichen | Bezeichnung | in Masse-% | |
| ohne | ohne | | | | | 0 bis < 2 | |
| | | ohne | ohne | | | 0 bis < 0,5 | |
| | | | | c0 | carbonatfrei | 0 | keine Reaktion |
| | | | | c1 | sehr carbonatarm | < 0,5 | sehr schwache Reaktion, nicht sichtbar, nur hörbar |
| | | (c)... | Kalk führend | c2 | carbonatarm | 0,5 bis < 2 | schwache Reaktion, kaum sichtbar |
| e... | Carbonat... | | | | | 2 bis < 75 | |
| | | c... | Kalk... | | | 2 bis < 25 | |
| | | | | c3 | carbonathaltig | 2 bis < 10 | nicht anhaltendes Aufbrausen |
| | | | | c3.2 | schwach carbonathaltig | 2 bis < 4 | schwache, nicht anhaltende, jedoch sichtbare Bläschenbildung durch $CO_2$-Entwicklung |
| | | | | c3.3 | mittel carbonathaltig | 4 bis < 7 | deutliche, nicht anhaltende Bläschen-bildung durch $CO_2$-Entwicklung |
| | | | | c3.4 | stark carbonathaltig | 7 bis < 10 | starkes, nicht anhaltendes Aufschäumen durch $CO_2$-Entwicklung |
| | | | | c4 | carbonatreich | 10 bis < 25 | starkes, anhaltendes Schäumen je nach zugegebener HCl-Menge; bei Carbonatgehalten > 10% mit der HCl-Probe im Allgemeinen keine weitere Unterteilung möglich |
| | | ...c | ...kalk | | | 25 bis < 75 | |
| | | | | c5 | sehr carbonatreich | 25 bis < 50 | |
| | | | | c6 | extrem carbonatreich | 50 bis < 75 | |
| e | Carbonat | | | | | ≥ 75 | |
| | | c | Kalk | c7 | Carbonat | ≥ 75 | |

[1] Bei nicht bindigen Böden im Allgemeinen stärkere Reaktionen bei gleichem Carbonatgehalt
[2] Kennzeichnung der Gehaltsklasse durch Kombination des Kurzzeichens mit dem Feinboden

ACHTUNG: Dolomit reagiert sehr langsam mit Salzsäure und nebelt (Bildung kleinster Gasbläschen).

**Quantitative Bestimmung der Carbonate mit der SCHEIBLER-Apparatur**

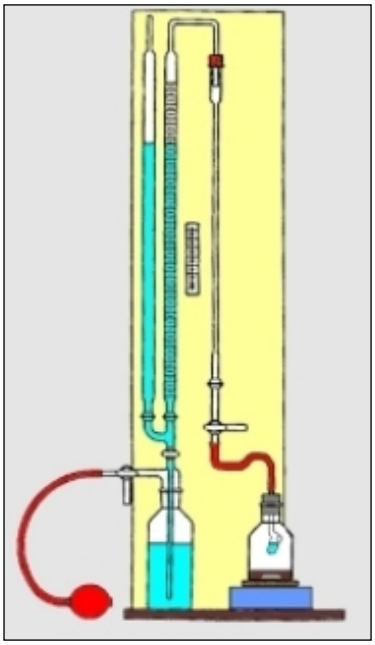
Durchführung:
Durch die Vorprobe mit einigen Tropfen HCl-Lösung wird die erforderliche Einwaage abgeleitet. Je nach dem im qualitativen Versuch abgeschätzten $CaCO_3$-Gehalt sind 1-5 g des gemörserten lufttrockenen Feinbodens (< 2 mm) einzuwägen und in das Entwicklungsgefäß der Scheibler-Apparatur zu füllen. Dazu gibt man 20 ml destilliertes Wasser. Für jede Serie sind zwei Bestimmungen der Blindwertlösung (20 ml destilliertes Wasser) und zwei Referenzproben (0,100 g Calciumcarbonat und 20 ml destilliertes Wasser) vorzubereiten. Bei Proben mit hohem Gehalt an organischer Substanz sollte mehr Wasser zugegeben werden.

Messung:
Die Messungen an Probe, der Blindwertlösung und dem als Referenzmaterial eingesetzten Calciumcarbonat müssen simultan in einem Raum durchgeführt werden, in dem Temperatur und Druck während der Messung nur wenig schwanken. Blindwertlösungen und Referenzproben sind zufällig über die Probeneinheiten verteilt zu messen.
Die weitere Verfahrensweise ist der Geräteanleitung an der Scheibler-Apparatur zu entnehmen.

Berechnung:
Die Volumenänderung des durch die Probe ($V_1$), die Calciumcarbonatreferenzproben ($V_2$) und die Blindproben ($V_3$) freigesetzten Gases berechnen, indem der Ausgangswert des kalibrierten Rohres vom Messwert subtrahiert wird.
Den Carbonatgehalt der Probe nach folgender Formel berechnen:

$$CaCO_3[g/kg] = 1000 \bullet \frac{m_2 \bullet (V_1 - V_3)}{m_1 \bullet (V_2 - V_3)} \text{ oder } CaCO_3[\%] = 100 \bullet \frac{m_2 \bullet (V_1 - V_3)}{m_1 \bullet (V_2 - V_3)}$$

Dabei ist:
$m_1$ Probeneinwaage, in g;
$m_2$ Mittlere Masse der Calciumcarbonatreferenzprobe, in g;
$V_1$ Volumen des Kohlenstoffdioxids aus der Reaktion der Untersuchungsprobe, in ml;
$V_2$ Mittleres Volumen des Kohlenstoffdioxids aus der Reaktion der Calciumcarbonatreferenzproben, in ml;
$V_3$ Volumenänderungen der Blindwertlösungen (dieser Wert kann negativ sein), in ml;



Skizze der Scheibler-Apparatur (www.lfe-bayern.de)

Hinweis:
Für sehr genaue Messungen verwendet man den CNS-Analysator. Dabei wird mit der 1. Messung der Gesamtkohlenstoffgehalt gemessen. Für die 2. Messung wird wahlweise der organische Kohlenstoff durch Erhitzen bei 450°C im Muffelofen oder der anorganische Kohlenstoff durch Abrauchen mit Salzsäure entfernt. Mit der 2. Messung erhält man je nach Methode den Gehalt an organischen bzw. anorganischen Kohlenstoff, der dann entsprechend in den Carbonatgehalt umgerechnet werden kann.

## 14. Bestimmung der Konzentration löslicher und leicht austauschbarer Elemente (Pflanzenverfügbare Nährstoffe)

Vorbetrachtung:
Von der in Böden enthaltenen Gesamtmenge an Pflanzennährstoffen ist meist ein nur sehr kleiner Teil unmittelbar pflanzenverfügbar. Die Nährstoffe liegen in den Böden in folgender Form vor: (a) als Salze, (b) adsorbiert bzw. austauschbar an der Oberfläche von anorganischen und organischen Adsorbentien, (c) in schwer austauschbarer Form in den Zwischenschichten von Tonmineralien, (d) in der organischen Substanz, oft als Komplex wie bei den Schwermetallen, (e) in der Biomasse, (f) immobil als Gitterbaustein in Silikaten und okkludiert (verschlossen) in Eisen- und Manganoxiden. Pflanzen können Nährstoffe aus dem Boden nur aufnehmen, wenn sie in der Bodenlösung als Ionen oder teilweise niedermolekulare organische Verbindungen (organische Säuren und deren Salze) vorliegen. Die Verfügbarkeit eines Nährstoffes ist von verschiedenen Faktoren wie z.B. Konzentration in der Bodenlösung, Vorrat im Wurzelraum, Nachlieferungsrate in die Bodenlösung u.a. abhängig. Die Bestimmung der Verfügbarkeits-Fraktionen erfolgt vorwiegend durch Extraktion mit Extraktionsmitteln unterschiedlicher Aggressivität, um verschiedene Bindungs-Formen zu erfassen und die Aneignungskraft der Pflanzenwurzeln nachzuahmen. Es gibt zahlreiche Methoden für die Analyse verschiedener Nährelemente, die unterschiedliche Bedingungen und Extraktionsmittel erfordern. Um die Vergleichbarkeit der Untersuchungsergebnisse auch über einen längeren Zeitraum zu garantieren, sind die Extraktionsbedingungen gleichbleibend zu gestalten. Bei der Untersuchung von forstlichen Böden an der HNE wird die Extraktion und Perkolation mit Ammoniumchlorid bevorzugt, während für landwirtschaftliche Untersuchungen in der Regel auf die Calciumdoppellactat-Methode zurückgegriffen wird.

Prinzip:
Beim Schütteln des Bodens mit 0,5 mol/l Ammoniumchloridlösung (bzw. Calciumdoppellactatlösung) werden die Kationen und Phosphationen des Bodens gegen Ammonium-/Calciumionen bzw. Lactationen ausgetauscht und in Lösung gebracht. Nach Filtration der Bodenlösung lassen sich die Konzentrationen der in Lösung gegangenen Ionen spektroskopisch (z.B. Plasmaspektrometer – ICP, Atomabsorptionsspektrometer – AAS) oder photometrisch (Flammenphotometer, Filterphotometer u.a.) bestimmen.

Durchführung:
10 g lufttrockener Mineralboden, 5 g humoser Boden oder 2 g Humus, jeweils Feinboden der Siebfraktion <2 mm werden auf der Analysenwaage auf 1 mg genau in 500ml-Weithals-Plastikflaschen eingewogen. Mit einem 100 ml Messzylinder sind genau 100 ml Extraktionslösung (Ammoniumchloridlösung bzw. Calciumdoppellactatlösung) zuzugegeben, die Flaschen fest zu verschließen und anschließend 1 h in der Überkopfschüttelmaschine bei 30 U/Min. zu schütteln. Danach werden die Proben über Trichter und Papierfilter (Rundfilter 589/3) in 100 ml Erlenmeyerkolben filtriert. Dabei sind die ersten 10-20 ml des Filtrats zu verwerfen. Falls das Filtrat trüb durchläuft, ist unter Verwendung des gleichen Filters nochmals zu filtrieren. Die Filtrate sind in gerätespezifische Messröhrchen zu füllen.

Messung und Berechnung:
1. Die Messung der Elemente (bis zu 18) erfolgt entweder durch Fachpersonal am ICP (Plasmaspektrometer) des ZÖ-Labors oder am AAS (Atomabsorbtionsspektrometer) des LÖ-Labors. Die Ergebnisse werden in der Einheit µg/g = mg Element/kg Boden (geteilt durch 10 = mg/100 g Boden) ausgegeben.

2. Die Konzentration des ortho-Phosphates in mg/l Lösung wird am Photometer im Landschaftsökologischen Labor bzw. im Studentenübungslabor bestimmt. Eine spezielle Vorschrift liegt am Gerät aus.
Umrechnung in mg Element/100g Boden = Ergebnis in mg/l x 10 / Einwaage in g

Bewertung der kurz- und mittelfristig verfügbaren Vorräte im effektiven Wurzelraum (organische Auflage und Mineralboden) als Vielfaches der durchschnittlichen Nährstoffvorräte von Baumhölzern (K = 400 kg/ha, Ca = 400 kg/ha und Mg = 100 kg/ha; nach AK STANDORTSKARTIERUNG; 2003)

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| K (kg/ha) | 200 | 400 | 600 | 800 | 1200 | 1600 | |
| (Faktoren) | ($^1/_2$) | (1) | (1,5) | (2) | (3) | (4) | |
| Ca (kg/ha) | 200 | 400 | 800 | 2000 | 4000 | 8000 | |
| (Faktoren) | ($^1/_2$) | (1) | (2) | (5) | (10) | (20) | |
| Mg (kg/ha) | 50 | 100 | 200 | 500 | 1000 | 2000 | |
| (Faktoren) | ($^1/_2$) | (1) | (2) | (5) | (10) | (20) | |
| Bewertung | sehr gering | gering | gering/mittel | mittel | mittel/hoch | hoch | sehr hoch |

## Übersicht über die Nährelemente des Bodens

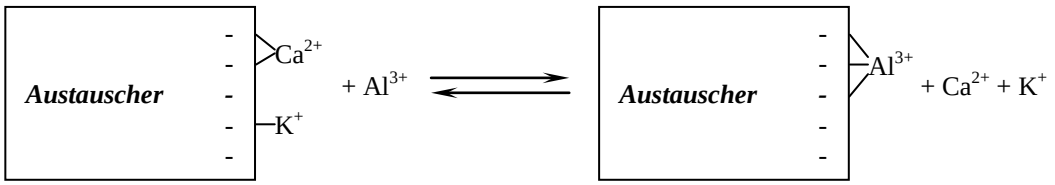
| Elemente | | Ionen-Form bei der Aufnahme | Wichtigste Quellen | Häufige Gesamt-Gehalte |
|---|---|---|---|---|
| **Haupt-nähr-ele-mente** | Stickstoff N | $NO_3^-$ $NH_4^+$ | org. Substanz, $N_2$ der Atmosph. | 0,03–0,3% |
| | Phosphor P | $H_2PO_4^-$ $HPO_4^{2-}$ $(PO_4^{3-})$ | Ca-, Al-, Fe-Phosphate | 0,01–0,1% |
| | Schwefel S | $SO_4^{2-}$ | Fe-Sulfide, Ca- Sulfat | 0,01–0,1% |
| | Kalium K | $K^+$ | Glimmer, Illit, K-Feldspäte | 0,2–3,0% |
| | Calcium Ca | $Ca^{2+}$ | Ca-Feldspäte, Augite, Hornblenden, Ca-Carbonate, Ca-Sulfat | 0,2–1,5% [1]) |
| | Magnesium Mg | $Mg^{2+}$ | Augite, Hornblenden, Olivin, Biotit, Mg-Carbonate | 0,1–1,0% [2]) |
| **Spu-ren-nähr-ele-mente** | Bor B | $H_2BO_3^-$ $(HBO_3^{2-})$ $(B(OH)_4^-)$ | Turmalin, akzessorisch in Silikaten und Salzen | 5–100 ppm |
| | Molybdän Mo | $MoO_4^{2-}$ | akzessorisch in Silikaten und Fe- u. Al-Oxiden und -Hydroxiden | 0,5–5 ppm |
| | Chlor Cl | $Cl^-$ | diverse Chloride | 50– >1000 ppm |
| | Eisen Fe | $Fe^{2+}$ $Fe^{3+}$ | Augite, Hornblenden, Biotit, Olivin, Fe-Oxide, Fe-Hydroxide | 0,5–4,0% [3]) |
| | Mangan Mn | $Mn^{2+}$ $(Mn^{3+})$ | Manganit, Pyrolusit, akzessorisch in Silikaten | 200–4000 ppm |
| | Zink Zn | $Zn^{2+}$ | Zn-Phosphat, Zn-Carbonat, Zn-Hydroxid, akzessorisch in Silikaten | 10–300 ppm |
| | Kupfer Cu | $Cu^{2+}$ $(Cu^+)$ | Cu-Sulfid, Cu-Sulfat, Cu-Carbonat, akzessorisch in Silikaten | 5–100 ppm |

[1]) mit Ausnahme von Kalk-Böden
[2]) mit Ausnahme von Dolomit-Böden
[3]) mit Ausnahme von Fe-Anreicherungshorizonten

## 15. Kationenaustauschkapazität

Vorbetrachtung:
Mineralische und organische Bodenpartikel mit großer spezifischer Oberfläche (vor allem Tonminerale, Metalloxide und -hydroxide und Huminstoffe (COOH- Gruppe)) vermögen gasförmige und gelöste Stoffe an ihrer Oberfläche anzulagern, zu adsorbieren. Adsorbiert werden sowohl neutrale Moleküle, wie z.B. $H_2O$, $N_2$, $O_2$, $CO_2$, $SO_2$ und viele Organika, als auch Kationen und Anionen. Ein verbreiteter Typ der Adsorption in Böden ist die Adsorption von Kationen an negativ geladenen Bodenbestandteilen. Sie ist stets mit der Desorption einer äquivalenten Menge anderer Kationen verbunden (d.h. unter Berücksichtigung der Wertigkeit z.B. $6K^+$ gegen $3Ca^{2+}$ oder $2Al^{3+}$) die in die Bodenlösung übertreten. Diesen Vorgang nennt man Kationenaustausch. Wichtigste austauschbare Kationen sind Ca-, Mg-, K-, Na- sowie Al- und H-Ionen, außerdem geringe Mengen an $NH_4$- und Fe-Ionen sowie in Spuren Mn-, Cu- und Zn-Ionen.

***Beispiel**:*




Die austauschbaren Kationen bilden den Kationenbelag der Böden, ihre Summe die Kationenaustauschkapazität (KAK) in $mmol_C$/100 g*. Die Höhe der KAK ist von der Zusammensetzung der zu ihrer Bestimmung angewandten Austauschlösung abhängig. Insbesondere steigt sie meist mit deren pH-Wert an. Man unterscheidet zwischen potentieller KAK ($KAK_{pot}$ bzw. $Ak_p$) (Bestimmung bei pH 7-7,5) und effektiver KAK ($KAK_{eff}$ bzw. $Ak_e$) (Bestimmung beim bodeneigenen pH-Wert).
Durch die Sorption werden Kationen in Böden in einer Form gehalten, aus der sie nur im Austausch gegen andere Kationen in die Bodenlösung übertreten und erst dann verlagert oder von Pflanzenwurzeln aufgenommen werden können. Die Böden haben durch die Kolloide die Fähigkeit, Kationen, aber auch viele andere Stoffe, im Kreislauf Boden-Pflanze zu halten oder zumindest verzögert an benachbarte Ökosysteme (z.B. Gewässer) weiterzugeben.
Der Anteil der verschiedenen Kationen am Sorptionskomplex ist abhängig vom Charakter des sorbierenden Körpers, der Art und der Konzentration der Kationen in der Bodenlösung. Eine Versauerung des Bodens wird durch höhere Sorptionswerte der H-Ionen und entsprechend geringe Anteile der Basen angezeigt.
Die Bestimmung der Sorptionsverhältnisse vermittelt Hinweise auf den Vorrat eines Bodens an pflanzenaufnehmbaren Nährstoffen und damit auf den Grad seiner Fruchtbarkeit. Die Kenntnis der Sorptionsverhältnisse gestattet ferner geeignete Rückschlüsse auf Düngungsmaßnahmen mit Ca-, K- und Mg-Düngern.

Begriffserläuterung :

S- Wert - Ist die Menge an austauschbar gebundenen basischen Kationen (sorbierte Basen) $Ca^{2+}$, $Mg^{2+}$, $K^+$, $Na^+$; angegeben in $mmol_c$*/100 g atro Boden.

H- Wert - Ist die Menge an austauschbar gebundenen sauren Kationen $H^+$, $Al^{3+}$, $Fe^{3+}$, $Mn^{2+}$ angegeben in $mmol_c$/100 g atro Boden.

T- Wert - Kationenaustauschkapazität (KAK) - ist die Summe an basischen und sauren Kationen, die eine bekannte Bodenmenge unter bestimmten Bedingungen austauschbar binden kann.
T = S + H-Wert in $mmol_c$/100 g atro Boden

BS (%) - Basensättigung (BS) (früher V-Wert) -- Ist der prozentuale Anteil der austauschbaren basischen Kationen (S-Wert) an der Gesamtmenge der austauschbaren Kationen (T-Wert = KAK).
Ist ein quantitatives Maß für den Sättigungsgrad eines Bodens an basischen Kationen gegenüber der Gesamtmenge an Kationen.
Beispiel: 60 % BS = 60 % des Kationenbelages bestehen aus Ca-, Mg-, K-, Na-Ionen und ca. 40 % aus H-, Al-, Fe- und Mn-Ionen

* $mmol_c$ /100 g (c von charge = Ladung) ----- veraltet mval/100 g

**Bestimmung:**

1.Bestimmung der $KAK_{pot}$
Die Böden werden mehrfach mit einer auf pH 7-8 eingestellten, gepufferten Salzlösung behandelt (z.B. 0.1 M $BaCl_2$-Triäthanolamin-Lösung nach Mehlich oder 1 M $NH_4$-Acetat-Lösung) und die ausgetauschten Kationen in der Austauschlösung bestimmt.
*Anmerkung: Diese Bestimmung wird im Praktikum nicht durchgeführt.*

2.Bestimmung der $KAK_{eff}$
Die Böden werden beim jeweiligen pH-Wert des Bodens mit einer ungepufferten Salzlösung (z.B. $NH_4Cl$) behandelt und die ausgetauschten Kationen in der Austauschlösung bestimmt.
*Anmerkung: Diese Bestimmung wird im Praktikum durchgeführt.*

Durchführung der Bestimmung $KAK_{eff}$ in carbonatfreien Böden

Prinzip:
Beim Schütteln des Bodens mit 0,5 mol/l Ammoniumchloridlösung werden die Kationen des Bodens gegen Ammoniumionen ausgetauscht und in Lösung gebracht. Nach Filtration der Bodenlösung ist die Konzentration der in Lösung gegangenen Ionen spektroskopisch (Plasmaspektrometer (ICP), Atomabsorptionsspektrometer (AAS), Flammenphotometer, Filterphotometer u.a.) zu bestimmen und in Ionenäquivalente umzurechnen. Die Summe der Ionenäquivalente ist die $KAK_{eff.}$ Die Protonenkonzentration ($H^+$) kann aus der Differenz der pH-Werte vor und nach der Extraktion errechnet werden.

Reagenzien:
Extraktionslösung - 134,0 g Ammoniumchlorid ($NH_4$ Cl) mit dest. Wasser zu 5 l Wasser lösen.

Durchführung:
Die Bestimmung deckt sich mit Übung 16 (nur zusätzlich pH -Bestimmung!).
Vor Beginn der Untersuchung ist von der Ammoniumchloridlösung der pH-Wert (= $pH_0$) zu bestimmen. Diese Lösung ist 24 Stunden vor der Untersuchung anzusetzen.
10 g luftrockener Mineralboden, 5 g humoser Boden oder 2 g Humus, jeweils Feinboden der Siebfraktion <2 mm werden auf der Analysenwaage auf 1mg genau in 500 ml Weithals-Plastikflaschen eingewogen. Mit einem 100 ml Messzylinder sind genau 100 ml Extraktionslösung (0,5 mol/l Ammoniumchloridlösung) zuzugegeben, die Flaschen fest zu verschließen und anschließend 1 h in der Überkopfschüttelmaschine bei 30 U/Min. zu schütteln. Danach werden die Proben über Trichter und Papierfilter (Rundfilter 589/3) in 100 ml Erlenmeyerkolben filtriert. Dabei sind die ersten 10-20 ml des Filtrats zu verwerfen. Falls das Filtrat trüb durchläuft, ist unter Verwendung des gleichen Filters nochmals zu filtrieren. Die Filtrate sind in gerätespezifische Messröhrchen zu füllen und der Messung zuzuführen. Des Weiteren erfolgt eine Bestimmung des pH-Wertes (= $pH_P$), der mit Boden geschüttelten Lösung.

Messung:
1. Die Messung der Elemente (K, Ca, Mg, Na, Al, Fe, Mn) erfolgt durch Fachpersonal am ICP (Plasmaspektrometer). Die Ergebnisse werden in µg/g (mg/1000g) ausgegeben.
2. Die pH-Werte zur Ermittlung der $H^+$-Konzentration sind mit einem Labor-pH-Messgerät zu bestimmen.

Berechnung:

1.Auswertung per Rechnerprogramm
Für die Berechnung der $KAk_{eff}$ in $mmol_c$/100 g Boden ist die Summe der Kationenäquivalente (IÄ) und der Protonenäquivalente pro 100 g Boden notwendig . Die Berechnung kann mit Hilfe des Computerprogramm´s „Berechnung Basensättigung“ erfolgen.
Siehe unter:
**http://www.forstliches-umweltmonitoring.de/Riek/sites/default/files/files/Bodenauswertungsprogramm.xls**

$KAk_{eff} = IÄ_{Na} + IÄ_K + IÄ_{Ca} + IÄ_{Mg} + IÄ_{Mn} + IÄ_{Al} + IÄ_{Fe} + IÄ_H$ ($mmol_c$/100 g Boden)*

*$mmol_c$ --- früher mval

2. Auswertung der Daten von Hand

a) Berechnung der Kationenäquivalente pro 100 g Boden

Die ausgetauschten Kationen Na, K, Ca, Mg, Mn, Al, Fe und H* werden in **Ionenäquivalente (IÄ)** umgerechnet.

$$\text{IÄ (mmol}_c\text{ /100 g)} = \frac{\text{Konzentration des Elementes in µg/g Boden (Ergebnisse der } NH_4Cl\text{-Extraktion)}}{\text{Äquivalentmasse x 10}}$$

Äquivalentmassen für die Berechnung der IÄ ($mmol_c$ /100 g):
$Na^+$ = 22,99; $K^+$ = 39,10; $Ca^{2+}$ = 20,04; $Mg^{2+}$ = 12,16; $Al^{3+}$ = 8,99; $Fe^{3+}$ = 18,62; $Mn^{2+}$ = 27,47

Die molare Äquivalentmasse (früher Äquivalentgewicht) , Quotient aus Atommasse und Wertigkeit eines chem. Elements, die Menge eines Stoffes, die ein Mol Wasserstoff (= 1,008 g) ersetzen oder abgeben kann.

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Bsp.: | 1. $H^+$: | rel. Atommasse = 1,008 | Wertigkeit = 1 | Äquivalentmasse = 1,008/ 1 = 1,008 |
| | 2. $Ca^{2+}$ | rel. Atommasse = 40,08 | Wertigkeit = 2 | Äquivalentmasse = 40,08/ 2 = 20,04 |

***Berechnung der $H^+$-Protonenäquivalente in µmolc /g**
**und Abzug (Korrektur) der $H^+$- IÄ, die durch Hydrolyse des Aluminiums entstehen**

$$IÄ_H = \frac{\left(10^{-pH_P} - 10^{-pH_0}\right)\cdot V \cdot 1000}{EW \cdot 0{,}88} - \frac{c(Al)_L \cdot V}{EW \cdot M(Al)\cdot\left(1+\frac{10^{-pH_P}}{10^{-5{,}85}}\right)}$$

bzw. bei EW=10g und $c(Al_{ges.})$ in µg/g

$$IÄ_H = \left(10^{-pH_P} - 10^{-pH_0}\right)\cdot 1{,}136\cdot 10^4 - \frac{c(Al)_B \cdot 0{,}03706}{\left(1+\frac{10^{-pH_P}}{10^{-5{,}85}}\right)}$$

**$IÄ_H$ in $µmol_c$ /g geteilt durch 10 = $IÄ_H$ in $mmol_c$ /100 g Boden**

| | |
|---|---|
| $IÄ_H$ | Protonenäquivalent in $µmol_c$ /g |
| $pH_0$ | pH-Wert der reinen Ammoniumchloridlösung (muss 24 h vor der Bestimmung angesetzt werden) |
| $pH_P$ | pH-Wert der extrahierten und filtrierten Probelösung |
| $c(Al)_L$ | Aluminium-Konzentration im Extrakt in mg/l |
| $c(Al)_B$ | Aluminium-Gehalt (austauschbar) in der Bodenprobe in µg/g (mg/l x V/ EW = µg/g) |
| M(Al) | Molmasse Aluminium in g/mol (26,98 g/mol) |
| F=0,88 | Aktivitätskoeffizient |
| $10^{-5,85}$ | Gleichgewichtskonstante des Al-Hydrolyse-Gleichgewichts |
| V | Gesamtvolumen der Extraktionslösung in ml (100 ml) |
| EW | Einwaage der Bodenprobe in g (10g) |

b) Berechnung der $KAK_{eff}$ in $mmol_c$ /100 g Boden

$KAk_{eff} = IÄ_{Na} + IÄ_K + IÄ_{Ca} + IÄ_{Mg} + IÄ_{Mn} + IÄ_{Al} + IÄ_{Fe} + IÄ_H$ ($mmol_c$ /100 g Boden)

c) Berechnung der Basensättigung (BS) in %

$$BS = \frac{IÄ_{Na} + IÄ_K + IÄ_{Ca} + IÄ_{Mg} \text{ in mmol}_c\text{ /100 g}}{KAK_{eff} \text{ in mmol}_c\text{/100 g}} \times 100\ (\%)$$

*Auswertung:*

Bewertung der $KAK_{pot}$ (AK STANDORTSKARTIERUNG, 2003)

| *$mmol_c$/100g* | < 2,5 | < 5 | < 10 | < 20 | < 40 | < 80 | > 80 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Bewertung | sehr gering | gering | gering/mittel | mittel | mittel/hoch | hoch | sehr hoch |

Einstufung der $KAK_{eff}$ von Waldböden (AK STANDORTSKARTIERUNG, 2003)

| *$mmol_c$/100g A-Horizont* | < 1,5 | < 4 | < 7 | < 12 | < 24 | < 48 | > 48 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *$mmol_c$/100g B/C-Horizont* | < 1,0 | < 3 | < 6 | < 12 | < 24 | < 48 | > 48 |
| Bewertung | sehr gering | gering | gering/mittel | mittel | mittel/hoch | hoch | sehr hoch |

Einstufung der $KAK_{eff}$ im effektiven Wurzelraum (AK STANDORTSKARTIERUNG, 2003)

| *$kmol_c$/ha* | < 50 | < 100 | < 250 | < 500 | < 1000 | < 2000 | > 2000 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Bewertung | sehr gering | gering | gering/mittel | mittel | mittel/hoch | hoch | sehr hoch |

Bewertung der Elastizität bezüglich der Säurebelastung auf der Grundlage der Basensättigung (Wolf & Riek, 1997)

$BS = (Ca + Mg + K + Na) / KAK_{eff} \cdot 100$ [%]

| Basensättigung | < 5 | 5 - 15 | 15 - 30 | 30 - 50 | 50 - 70 | 70 - 85 | > 85 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Elastizität | sehr gering | gering | mäßig | mittel | mäßig hoch | hoch | sehr hoch |

Näherungsweise Ableitung der Basensättigung aus einfachen Felddaten ($pH_{KCl}$, Humusgehalt)

| *pH-Wert* | *2,5 – 3,0* | *3,0 – 3,5* | *3,5 – 4,0* | *4,0 – 4,5* | *4,5 – 5,0* | *5,0 – 5,5* | *>5,5* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| BS [%] (1) | 10 (>5) | 15 | 30 | 60 | 90 | 95 | 100 |
| BS [%] (2) | 10 (>5) | 15 | 20 | 30 | 70 | 90 | 100 |

(1): gültig für humose Bodenhorizonte (Oberboden)

(2): gültig für humusfreie bis schwach humose Bodenhorizonte (Unterboden)

Sorptionsverhältnisse im Oberboden einiger Böden unter Acker und Wald

| | pH ($CaCl_2$) | $C_{org}$ (%) | $KAK_{pot}$ ($mmol_c\ kg^{-1}$) | $KAK_{eff}$ | Sättigung (% von $KAK_{eff}$) Al | Ca | Mg | K | Na |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Böden unter Acker (Mitteleuropa) | | | | | | | | | |
| Parabraunerde (Löß, Straubing) | 6,3 | 1,4 | 170 | 140 | 0 | 80 | 15 | 5 | < 1 |
| Schwarzerde (Löß, Hildesheim) | 7,2 | 1,6 | 180 | 180 | 0 | 90 | 9 | 0,5 | 0,4 |
| Pelosol (Liaston, Franken) | 6,7 | 2,4 | 220 | 170 | 0 | 83 | 8 | 9 | 0 |
| Böden unter Wald (Mitteleuropa) | | | | | | | | | |
| Podsol (Granit, Bayer. Wald) | 2,6 | 11,7 | – | 68 | 65 | 22 | 6 | 5 | 2 |
| Pseudogley(Löß, Bonn) | 3,8 | 5,7 | 184 | 54 | 69 | 13 | < 2 | 6 | 11 |
| Braunerde (Löß/Bims, Vogelsberg) | 2,9 | 19,8 | 600 | 120 | 85 | 5,8 | 4,2 | 5,0 | 0 |
| Böden anderer Klimate | | | | | | | | | |
| Vertisol (Sudan) | 6,8 | 0,9 | 452 | 470 | 0 | 71 | 25 | 0,4 | 3,8 |
| Andisol (Hawaii) | 4,5 | 11,7 | 531 | 133 | 3,7 | 71 | 20 | 3,8 | 2,2 |
| Oxisol (Brasilien) | 3,5 | 2,8 | 130 | 26 | 89 | 2,7 | 3,5 | 3,1 | 1,2 |
| Ultisol (Puerto Rico) | 3,5 | 3,3 | 256 | 72 | 72 | 15 | 8,3 | 2,8 | 1,4 |
| Aridisol (Arizona, USA) | 9,9 | 0,4 | 364 | – | 0 | 45 | 5,5 | 2,5 | 47 |

1 $mmol_c$/kg = 0,1 $mmol_c$/100 g

## 16. Chemische Leitfähigkeit in Wasser und Boden

Vorbetrachtung:
Böden enthalten eine gewisse Menge an Mineralsalz in der Bodenlösung. Der natürliche Salzgehalt wird bei Kulturböden oft durch Düngungsmaßnahmen (z.B. Mineraldünger, Mineralisierung von Wirtschaftsdüngern - z.B.Stallmist - oder anderen organ. Substanzen) beträchtlich erhöht. In versalzten Böden sind vor allem KCl, NaCl, $Na_2SO_4$ und $Na_2CO_3$, z. T. auch $CaCl_2$, Nitrate und Borate vertreten.
Die natürliche oder künstliche Salzanreicherung wirkt pflanzenschädlich, wenn sie etwa **0,1 % Mineralsalz** im Boden übersteigt. Dabei spielt allerdings auch der Kolloidgehalt bzw. die nutzbare Wassermenge des Bodens, die Bodenart, Empfindlichkeit der Kulturpflanzen u.a. eine Rolle. Fruchtbare Kulturböden weisen nur Salzgehalte von zwischen 0,02 % und 0,05 % auf.

Prinzip:
Einfacher als durch Eindampfen und Wägen bestimmt man den Salzgehalt von Wasserproben und Bodenextrakten auf indirektem Wege durch Messung der elektrischen Leitfähigkeit, da der elektrische Strom durch Wasser umso besser geleitet wird, je höher die Ionenkonzentration im Wasser ist.
Mit steigendem Elektrolytgehalt einer Lösung sinkt bekanntlich deren Widerstand, so dass ihre elektrische Leitfähigkeit entsprechend wächst. Der elektrische Widerstand „R“ wird in Ohm gemessen, während die Leitfähigkeit „C“ als Kehrwert des Widerstandes C = 1/R definiert und in „Siemens“ ausgedrückt wird.

Bodenproben:
10 g Feinboden der Siebfraktion <2 mm werden auf der Analysenwaage in ein Wägeschiffchen auf 1 mg genau in 500 ml Plastikflaschen eingewogen. Mit einem Messzylinder sind 100 ml dest. Wasser zuzugeben und die Proben 1 h in der Überkopfschüttelmaschine zu schütteln. Im Anschluss ist die Probe über Papierfilter in 100 ml Erlenmeyerkolben zu filtrieren. Eventuell trüb ablaufende Filtrate müssen mehrmals unter Verwendung desselben Filters filtriert werden. Für die Filtration verwendet man die Rundfilter MN 619 de bzw. bei sehr trüben Filtraten Membranfilter.

Messung der Leitfähigkeit:
Die Messung der Leitfähigkeit erfolgt entsprechend der Gerätebeschreibung in $mS*cm^{-1}$ (Millisiemens/cm) oder $\mu S*cm^{-1}$ (Mikrosiemens/cm).

Berechnung des Salzgehaltes in Bodenproben (nicht für Wasserproben!):
Es erfolgt eine Umrechnung des Leitfähigkeitswertes in den Salzgehalt des Bodens, ausgedrückt als mg KCl (Basis: spez. Leitfähigkeit einer 0,01 molaren KCl-Lösung von $14{,}12 \times 10^{-4}$ S/cm bei 25 °C)

**$w_{Sa}$(Salzgehalt) = k x C x $F_t$ (mg/100 g Boden)**
K - abgelesener Messwert in $10^{-4}$ S /cm bei 25 °C
C - Zellkonstante (Anstieg der Eichgeraden)
Zellkonstante C steht auf der Elektrode (z.B. 0,609/cm) und muss am Messgerät eingestellt sein; dann C = 1 bei der Berechnung)
$F_t$ - Faktor zur Umrechnung in den Salzgehalt (als mg KCl/100 g Boden) bei 25 °C **= 52,80** und bei einem Verhältnis Boden zu Wasser von 1 + 10 (m + V)

Berechnungsbeispiel:
1. der Messwert wird in 10-4 S/cm umgerechnet, z.B. 53 µS/cm = $53 \times 10^{-6}$ S/cm = $0{,}53 \times 10^{-4}$ S/cm
wSa= 0,53 x 1 x 52,8 = 27,98 mg/100 g Boden
Der Salzgehalt beträgt 27,98 mg/100 g Boden (berechnet als KCl).

2.Umrechnung in %

$$\% \text{ Salzgehalt} = \frac{\text{Salzgehalt (mg/100 g)} \times 100\ \%}{100 \text{ g} \times 1000\ ^*} = \frac{27{,}98 \text{ (mg/100 g)}}{1000} = 0{,}028\ \%$$

*Umrechnung von mg in g

Wasserproben:
Die frischen Proben sind durch die Rundfilter MN 619 de bzw. bei sehr trüben Filtraten Membranfilter zu filtrieren, sofort zu messen und es ist die Leitfähigkeit in $mS*cm^{-1}$ oder $\mu S*cm^{-1}$ anzugeben.

## 17. Maßeinheiten/ Umrechnungen

Umrechnung mol:

| | |
|---|---|
| mmol | = Millimol ($10^{-3}$ mol) |
| $mmol_c$ | = Millimol ($10^{-3}$mol) /Ionenladung, c von charge = Ladung |
| | = mval (alter Begriff), 10mval = 10 $mmol_c$ = 10 mmol Ionenäquivalent (IÄ) |
| $cmol_c$ | = Centimol ($10^{-2}$mol) /Ionenladung, c von charge = Ladung |
| | 1 $cmol_c$ $kg^{-1}$ = 10 $mmol_c$ /kg = 1$mmol_c$ /100 g, |
| mval | = Milliäquivalent, 10 mval /kg = 10 $mmol_c$/kg = |
| | 10 mval/kg (c- Wertigkeit von 1) = 10 mmol/kg |
| Pa | = Pascal ($10^{-5}$ bar) |
| ppm | = parts per million, mg/kg = mg/l |

Umrechnung von mg/l in µg/g Boden = x Volumen Extrakt in ml / Einwaage Boden in g

1 Morgen = 5000 $m^2$ = ½ ha
1 Hektar = 10000 $m^2$

Umrechnungen %:

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| % | = g/100 g | | | |
| % x 10 | = g/kg | = mg/g | | |
| % x 1000 | = mg/100 g | | | |
| % x 10 000 | = mg/kg | = µg/ g | = kg/t | |
| mg/l : 10 000 | = % | | | |
| mg/kg : 10 000 | = % | | | |
| mg/kg : 10 | = mg/100 g | = 1000 µg/100 g | = 10 mg/kg | = 10 µg/g |

Beispiel: 10 % Ca im Boden = 10 g Ca/100 g Boden = 100 g/kg = 0,1 g/g = 100 mg/g = 100 000 mg/kg
= 100 000 µg/g

Horizontvorräte am Beispiel Kohlenstoff [C] in t/ha:

1. Humusauflage: C-Gehalt [%] x Auflagemasse [t/ha] / 100
   Auflagemasse [t/ha] = Trockenmasse [g] / (Fläche Stechrahmen [3 $dm^2$] x Anzahl der Wiederholungen)
2. Mineralboden: C-Gehalt [%] x Bodenmasse [t/ha] / 100
   Bodenmasse[t/ha] = Horizontmächtigkeit [cm] x Lagerungsdichte[$g/cm^3$] x 100 x (1-Skelettanteil [%] / 100)
   Lagerungsdichte ($\rho_B$) [$g/cm^3$] = Trockenmasse [g] vor Siebung / (Volumen Stechzylinder [$cm^3$] x Anzahl der Zylinder)

## 18. Literaturangaben


Praktikum zur Bodenkunde und Pflanzenernährung, Band 2, K.Schaller, Forschungsanstalt Geisenheim, Geisenheim (1993)

Bodenkundliches Praktikum, 2., neubearbeitete Auflage, E.Schlichting , H.-P. Blume, K.Stahr, Blackwell Wissenschafts-Verlag, Berlin-Wien (1995)

Methodenbuch Band 1 Die Untersuchung von Böden, G.Hoffmann, VDLUFA-Verlag. Darmstadt, Darmstadt 1991

Lehrbuch der Bodenkunde, P.Schachtschabel, H.-P.Blume u.a., Enke Verlag, Stuttgart 2010

Bodenkundliche Kartieranleitung, 5. Aufl., Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden unter Leitung F. Sponagel, Hannover 2005

Bodenuntersuchung im Gelände. München 1950, Fabry, R.