

CvO Universität Oldenburg, Fakultät V, Institut für Biologie und
Umweltwissenschaften, AG Bodenkunde

Praktikumsskript „Bodenkunde“

Bodenkundliches Praktikumsskript zur Anleitung im Gelände und Labor im
Rahmen des Mastermoduls „Ecology of the Soil-Water-Plant-System“

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Lageplan	4
3	Probenahme, Probenvorbereitung und Analysen	5
4	Methoden	8
4.1	Bestimmung des Wassergehaltes, Poren- und Substanzvolumens, der Feldkapazität und Bodendichte ...	8
4.2	Herstellung einer Gleichgewichtsbodenlösung (GBL)	9
4.3	Bestimmung von Eisen und Mangan	10
4.4	Bestimmung von Ammonium und Nitrat (Nmin) (nach Kjeldahl)	11
4.5	Bestimmung von Sulfat.....	13
4.6	Bestimmung von der CO ₂ -Abgabe des Bodens (Bodenatmung).....	14
4.7	Bestimmung des Glühverlustes.....	15

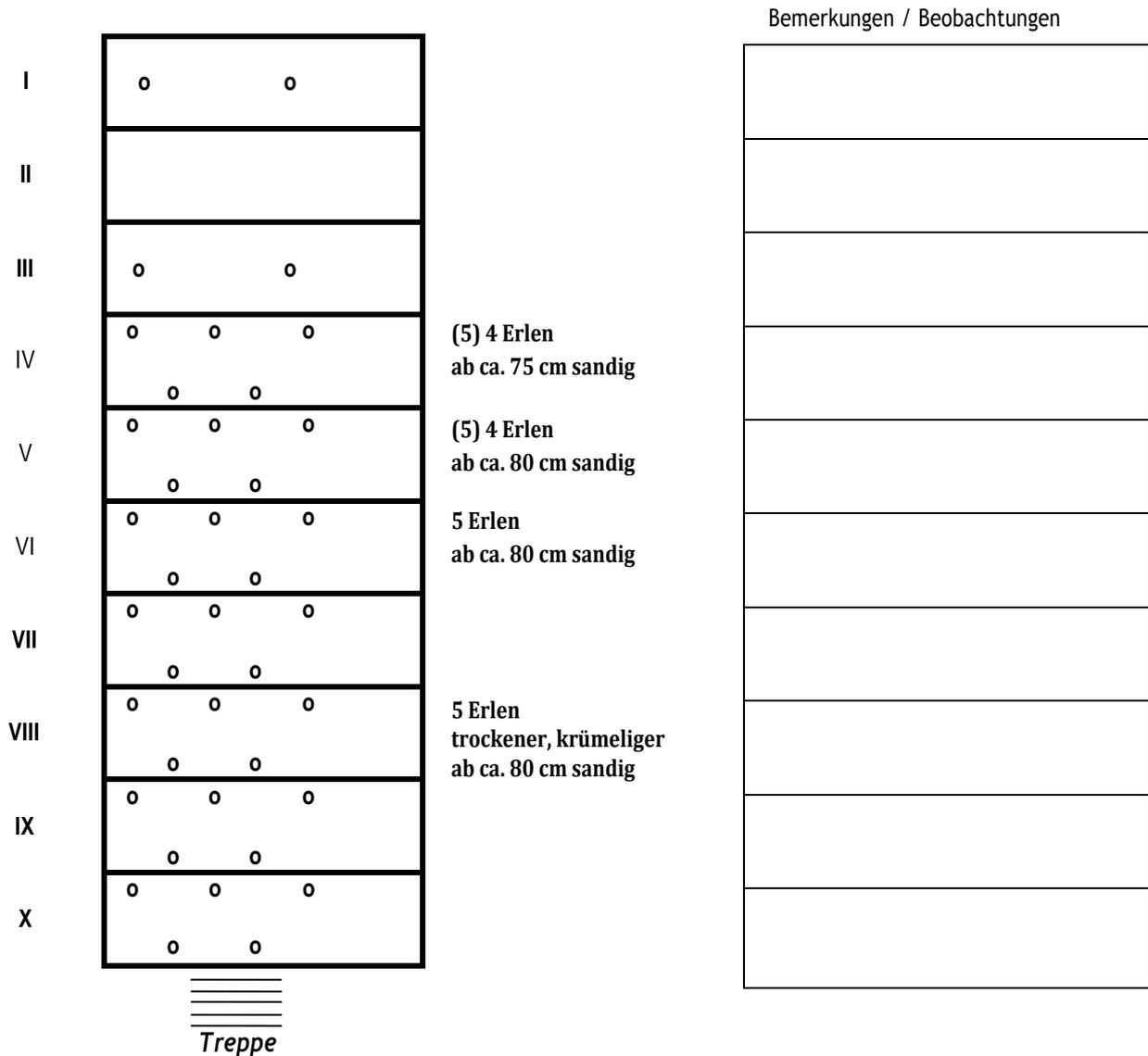
1 EINLEITUNG

Im Rahmen des Mastermoduls „Ecology of the Soil-Water-Plant-System“ (MM6) werden bodenkundliche, hydrologische und vegetationsökologische Geländeuntersuchungen und Laboranalysen von Boden-, Wasser- und Pflanzenproben durchgeführt. Die erzielten Ergebnisse sollen die bestehenden Kenntnisse über die einzelnen Ökosystemkomponenten vertiefen, ihre Zusammenhänge verdeutlichen sowie, mittels hydrologischer Modellierung, ökosystemare Prozessabläufe verdeutlichen.

Das hier vorliegende Skript dient als Grundlage für die im Rahmen des Moduls durchgeführten bodenkundlichen Untersuchungen. Es enthält neben Lageplan und Probenahmedesign die Beschreibung der für die Analysen notwendigen Methoden.

2 LAGEPLAN

Die nachfolgende Abbildung zeigt den Aufbau der Lysimeteranlage im Botanischen Garten der CvO Universität Oldenburg am Küpkersweg. Die Nummerierung der einzelnen Becken erfolgt von I bis X, beginnend mit X am Treppenaufgang. Beobachtungen zur Vegetation, Boden, Witterung, etc., die während der Beprobung gemacht werden, können in die rechte Tabelle eingetragen werden. Die Becken wurden im Unterboden mit Sand, darüber mit Niedermoortorf befüllt und mit Erlen bepflanzt.



Erläuterung:

o Erle (Stand (2009) bzw. 2011)

Die Angaben über Vegetation und Substrat beruhen auf Aufnahmen im Rahmen der Voruntersuchung (März 2009).

3 PROBENAHME, PROBENVORBEREITUNG UND ANALYSEN

Die Durchführung der Beprobung und das weitere Vorgehen im Labor sind im Folgenden chronologisch aufgeführt. Die erste Beprobung erfolgt bei wassergesättigten Lysimeterbecken. Nach der ersten Beprobung werden die Wasserstände in den Becken in unterschiedlichen Tiefen eingestellt (voll, halb voll, leer). Die zweite Beprobung und Untersuchung erfolgt nach mehreren Wochen der Wasserstandsänderung.

Erste Beprobung (gesättigter Zustand)

Tag 1

Gelände / Probenahme

Für die bodenkundliche Analyse werden Bodenproben aus den Lysimeterbecken für das Labor entnommen. Einige Parameter werden darüber hinaus direkt vor Ort bestimmt.

Messungen vor Ort:

- Bodentemperatur im Pürckhauer in allen Tiefen (s.u.)
- Bodentemperatur im Oberboden an fünf Punkten, verteilt über das Lysimeterbecken (pro Pkt. Messung in zwei Tiefen)
- pH-Werte im Pürckhauer in allen Tiefen (s.u.)
- Redox-Potential im Pürckhauer in allen Tiefen (s.u.)

Probenahme:

- pro Lysimeterbecken werden 3 Stechzylinderproben aus dem Oberboden (in ca. 5-10 cm Tiefe) entnommen (→ Wassergehalt etc.)
- pro Lysimeterbecken werden 3 Pürckhauer-Beprobungen durchgeführt und in folgenden Tiefen Temperatur, pH-Wert und Redox-Potential (zur Umrechnung auf Wasserstoff-Bezugselektrode müssen zu dem Messwert 250 mV addiert werden) bestimmt:

0 - 30 cm

30 - 60 cm

60 - (90) cm (bis zum rein mineralischen Untergrund)

und nach der Bestimmung der Parameter werden die jeweiligen Tiefenabschnitte zu einer Mischprobe (luftdicht verpackt) zusammengeführt (zur weiteren Verwendung für Eisen- Mangan- und Sulfatmessung, sowie Nmin-Bestimmung).

- pro Lysimeterbecken werden 3 Bodenproben aus dem Oberboden (obersten 10 cm) entnommen und zu einer Mischprobe (luftdicht verpackt) vereinigt (zur weiteren Verwendung für die Bestimmung der Bodenatmung).

Labor / Probenvorbereitung

- Wassergehalt etc.: Stechringe wiegen und aufsättigen
- Nmin-Extrakt (Ammonium und Nitrat) herstellen und aktuellen Wassergehalt bestimmen
- alle Beutelproben (luftdicht verschlossen) in den Kühlschrank stellen

Die für die unterschiedlichen Methoden zum Teil anzusetzenden Lösungen werden größtenteils zur Verfügung gestellt (Absprache).

Tag 2

Eisen, Mangan und Sulfat:

- ca. 50-100 g Bodenmaterial zügig einwiegen, aktuellen Wassergehalt bestimmen und direkt zentrifugieren (20 Minuten bei 10.000 U/min; bei 2. Beprobung statt direktem Zentrifugieren eine GBL nach 4.2 herstellen)

Eisen, Mangan:

- einen Teil der Lösungen ansäuern (s. Methode; Mn und Fe bleiben auf diese Weise als (MNO_4^-) und (Fe^{3+}) in Lösung) und in den Kühlschrank stellen

Sulfat:

- Bestimmung des Sulfatgehaltes in der nicht angesäuerten, restlichen Lösung

Bodenatmung:

- Ansetzen des Versuches mit 3 Parallelen (plus Blindprobe) (Ansatz: 2 Tage stehenlassen), aktuellen Wassergehalt bestimmen

Wassergehalt etc.:

- Rückwaage der Stechzylinder und trocknen

Tag 3

Eisen, Mangan:

- Messung der Eisen- und Mangangehalte am AAS

Wassergehalt etc.:

- Rückwaage der Stechzylinder (inklusive Ringgewicht etc. → Tara) und Verwendung des getrockneten Materials für die Bestimmung des Glühverlustes

Glühverlust:

- Bestimmung des Glühverlustes

Nmin:

- Bestimmung des Nmin-Gehaltes (Ammonium und Nitrat) (Destillation)

Tag 4**Bodenatmung:**

- Bestimmung der Bodenatmung

Berechnung der bisher gemessenen Parameter und Auswertung der Ergebnisse.

A) Zweite Beprobung (nach Wasserstandregulierung)

Die Beprobung erfolgt wie unter A). Abweichend von dem dort beschriebenen Vorgehen muss der Boden bei der Durchführung der pH- und Redox-Potentialmessung je nach Feuchtezustand mit O₂-freiem Wasser angefeuchtet werden (immer Bestimmung im wässrigen Milieu). Darüber hinaus ist in der Regel die Herstellung einer BGL notwendig, um genügend Flüssigkeit für die Eisen- Mangan- und Sulfatbestimmung zu bekommen.

4 METHODEN

4.1 Bestimmung des Wassergehaltes, Poren- und Substanzvolumens, der Feldkapazität und Bodendichte

Grundlagen

Das **Substanzvolumen** ist der Anteil an mineralischer und organischer Substanz eines bestimmten Bodenvolumens, das **Porenvolumen** ist der entsprechende Anteil an Hohlräumen unterschiedlicher Größe und Gestalt, das Wasser und Luft gefüllt ist.

Unter **Bodendichte (dB)**, auch Trockenraumgewicht oder Lagerungsdichte genannt, versteht man das Verhältnis der trockenen Bodenmasse zum Bodenvolumen. Die Bodendichte ist abhängig von der Dichte der festen Substanz und vom Porenvolumen. Sie stellt zusammen mit dem Bodenvolumen eine wichtige Kenngröße des Bodengefüges dar. Ihre Werte liegen bei Mineralböden häufig zwischen $1,3$ und $1,5 \text{ g cm}^{-3}$ und bei organischen Böden um $0,15 \text{ g cm}^{-3}$. Die Dichte der festen mineralischen Bestandteile (**dF = Dichte der Festsubstanz**), also ohne Berücksichtigung des Porenvolumens weist dagegen bei Dominanz von Quarz eine häufige Dichte von ca. $2,65 \text{ g cm}^{-3}$ auf; besteht sie aus organischer Substanz, ist dF ca. $1,3 \text{ g cm}^{-3}$.

Daneben ist die Wasserkapazität eine wichtige ökologische Größe. Als einfaches Maß dafür lässt sich die "**Feldkapazität**" oder "maximale Wasserkapazität" bestimmen, d.h. der Wassergehalt, den ein Boden gegen die Schwerkraft zu halten vermag (Haftwasser), der mit der hier angewandten Methode näherungsweise bestimmt werden kann.

Die Bestimmung der o.g. Größen kann nur an ungestörten Proben vorgenommen werden. Stechzylinder mit einem konstanten Volumen von 100 cm^3 sind üblich. Durch Trocknung bei 105°C wird das im Porensystem gebundene Wasser ausgetrieben (fester gebundenes Wasser gehört definitionsgemäß zum Substanzvolumen), aus dem verbleibenden Gewicht der festen Partikel und dem spez. Gewicht können dann sowohl Substanz- als auch Porenvolumen errechnet werden.

Durchführung

Feldfrische mit 100 cm^3 Stechzylinder genommene Proben mit Stechzylinder wiegen (**Frischgewicht**).

Proben auf einer Seite mit einem Rundfilter, auf der anderen Seite mit Deckel verschließen und mit dem Rundfilter auf ein Gitter setzen. Mit dem Gitter bis zu etwa $1/3$ der Höhe des Stechrings ins Wasser setzen. Nach etwa 1-2 Tagen ist der Boden wassergesättigt (Wasserglanz an der Bodenoberfläche). Die Proben mit dem Gitter aus dem Wasser herausnehmen und ca. 30 Min. abtropfen lassen. Danach die Probe wiegen (**Nassgewicht**). Die Probe bei 105°C trocknen, im

Exsikkator auskühlen lassen und erneut wiegen (**Trockengewicht**). Den Stechring reinigen und leer wiegen (**Tara**).

Berechnung

Wassergehalt [Vol.%, g] = Frischgewicht [g] - Trockengewicht [g]

Feldkapazität [Vol.%, g] = Nassgewicht [g] - Trockengewicht [g]

Substanzvolumen [Vol.%] =
$$\frac{\text{Trockengewicht [g]} - \text{Tara[g]}}{\text{Dichte der Festsubstanz [g cm}^{-3}\text{]}}$$

Bodendichte [g cm⁻³] =
$$\frac{\text{Trockengewicht [g]} - \text{Tara[g]}}{\text{Volumen des Stechzylinders [cm}^3\text{]}}$$

Porenvolumen [Vol.%] = 100 % - Substanzvolumen [%]

Luftvolumen [Vol.%] = 100 % - Wassergehalt [%] - Substanzvolumen [%]

4.2 Herstellung einer Gleichgewichtsbodenlösung (GBL)

Geräte und Reagenzien

Zentrifugenbecher (Tischzentrifuge), PE-Trichter, Filtrierpapier Blaubandfilter, 50ml PE-Flaschen, kleine Glasgefäße oder Porzellantiegel für die Wassergehaltsbestimmung, destilliertes Wasser

Durchführung

Ca. 50-100 g feldfrischen Boden in einen 250 ml Zentrifugenbecher geben und bei der 1. Beprobung direkt ohne weitere Wasserzufuhr zentrifugieren (gesättigte Proben). Bei der 2. Beprobung (trockenere Proben) unter Zugabe von sauerstofffreiem, destilliertem Wasser solange unter N₂-Atmosphäre verrühren bis ein cremiger Brei entsteht. Die Oberfläche sollte glänzend aussehen, jedoch kein Wasser überstehen. Um später eine Berechnung auf Trockenboden durchführen zu können, muss von dem angerührten Brei eine kleine Menge abgenommen werden und davon der aktuelle Wassergehalt bestimmt werden. Das Verhältnis Wasser / Boden sollte idealerweise 0,8 ml g⁻¹ Trockenboden nicht überschreiten (ULRICH & KHANNA, 1971). Durch Trocknung kann man das tatsächliche Verhältnis ermitteln. Die Becher werden dann mit Parafilm gegen Verdunstung geschützt und unter gelegentlichem Umrühren 24h stehen gelassen. Anschließend 20 Min. bei

10.000 U/min zentrifugieren und den Überstand in 50 ml PE-Flaschen abfiltrieren. In dieser Lösung wird dann sofort Sulfat bestimmt (siehe Methode). O₂-freies Wasser wird zur Verfügung gestellt.

Ulrich, B. & Khanna, P.K. (1971): Göttinger Bodenkdl. Berichte 19, S.121 ff.

4.3 Bestimmung von Eisen und Mangan

Reagenzien

HNO₃

Durchführung

Für die Bestimmung von Eisen und Mangan werden 5 ml der Bodenlösung bzw. GBL mit 175 µl HNO₃ (konz.) versetzt. Die Salpetersäure verhindert ein Ausflocken von Fe und Mn im neutralen-basischen pH-Bereich.

Die Messung erfolgt am Atomabsorptionsspektrometer (AAS).

Die Eichreihen werden aus vorhandenen Stammlösungen (100 mg l⁻¹) angesetzt und mit der gleichen Menge HNO₃ versetzt.

Eichreihe Fe: 1; 2,5; 5 und 10 mg l⁻¹

Eichreihe Mn: 0,5; 1; 2 und 4 mg l⁻¹

Berechnung der Konzentration bezogen auf Trockenbodengewicht

Beispiel:

Gemessene Konzentration (AAS): 2,5 mg l⁻¹ (oder µg ml⁻¹) Fe

Über Bestimmung des Wassergehaltes der GBL ergibt sich das Wasser-Bodenverhältnis, z.B.

0,75 ml g⁻¹

Verdünnung: 1 : 10

Berechnung:

Gemessene Konzentration [mg l⁻¹] * Wasser-Bodenverhältnis [ml g⁻¹ ≙ l kg⁻¹] (* Verdünnung)

Hier: 2,5 mg l⁻¹ * 0,75 l kg⁻¹ * 10 = 18,8 mg Fe kg⁻¹ Trockenboden

4.4 Bestimmung von pflanzenverfügbarem Ammonium und Nitrat (N_{min}) (nach Kjeldahl)

Reagenzien

1 % KAl(SO₄)₂-Lösung: 18.4 g KAl(SO₄)₂ x 12 H₂O l⁻¹

Faltenfilter

2 % Borsäure: 20 g H₂BO₃ l⁻¹

Indikator-Gebrauchslösung: Mischindikator 1:50 mit 2 % Borsäure verdünnen (frisch ansetzen, da nur einen halben Tag haltbar).

0.005 N H₂SO₄

MgO-Pulver; Devardas-Reagenz

Eichlösung: 0,8004 g NH₄NO₃ = 0.01 M NH₄-N l⁻¹ und 0.01 M NO₃-N l⁻¹

Sollverbrauch: 1 ml 0.01 M (=n) NH₄NO₃-Lsg. müssen nach der Destillation bei der Titration jeweils 2 ml 0.005 N H₂SO₄ verbrauchen.

Durchführung

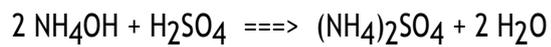
50 g feldfrischen Feinboden in 250 ml PE-Flaschen einwiegen (Wassergehalt parallel bestimmen) und mit 50 ml KAl(SO₄)₂-Lsg. versetzen. 30 Min. über Kopf schütteln und über Faltenfilter in kleine PE-Flaschen filtrieren (nicht nachwaschen). 1 ml der Eichlösung bzw. 20 ml des Filtrats oder der Wasserprobe in einen Rundkolben pipettieren und (direkt vor dem Destillieren) mit drei Spatelspitzen Magnesiumoxid versetzen. In einen 100 ml Erlenmeyerkolben 5 ml Indikatorlösung pipettieren und unter die Apparatur stellen. Den Rundkolben in die Destille einhängen und mit dem Programm 1 50 ml überdestillieren lassen. Einen 2. Erlenmeyerkolben mit 5 ml Indikatorlösung versetzen und gegen den 1. Erlenmeyerkolben austauschen. In den Rundkolben eine 2g-Portion der Devardas-Legierung geben. Erneut (Programm 2) 50 ml überdestillieren lassen. Die Vorlagen mit den Destillaten mit 0,005 N H₂SO₄ bis zum Farbumschlag zurücktitrieren.

Zur Ermittlung eines Blindwertes, der von den Titrationswerten abgezogen werden muss, wird die oben beschriebene Destillation mit Kaliumaluminiumsulfatlösung bzw. Aqua dest. (bei Wasserproben) durchgeführt.

Prinzip der Methode

Durch das Kochen und die Zugabe von MgO (und der damit verbundenen pH-Erhöhung) wird das in der Probe vorhandene Ammonium in Form von Ammoniak ausgetrieben und sammelt sich in der Vorlage. Nach der Destillation des Ammoniums wird das in der Probe befindliche Nitrat durch die Zugabe von Devardas-Legierung zu Ammonium reduziert, das in die 2. Vorlage destilliert wird.

Bei der Titration findet folgende Reaktion statt:



Der Farbindikator schlägt von grün im Alkalischen über grau zu violett im Sauren um.

Weitere Erläuterungen erfolgen an der Apparatur.

Berechnung

Umrechnungsfaktor N (gilt nur für o.g. Konzentration der Schwefelsäure):

2 ml $\text{H}_2\text{SO}_4 \equiv 0,01 \text{ mol/l NH}_4 \text{ N}$
1 ml $\text{H}_2\text{SO}_4 \equiv 0,005 \text{ mol/l NH}_4 \text{ N}$
molare Masse N = 14 g/mol
1 ml $\text{H}_2\text{SO}_4 \equiv 0,07 \text{ g/l}$
x = 0,07 mg N / 1 ml H_2SO_4

Rechenweg (für Frischboden):

N Erlenmeyerkolben:
2 ml $\text{H}_2\text{SO}_4 * 0,07 \text{ mg N / ml H}_2\text{SO}_4 = 0,14 \text{ mg N}$
Konzentration Rundkolben:
(0,14 mg / 20 ml) = 0,007 mg /ml
Verdünnung Extraktionsmittel:
0,007 mg/ml * 50 ml = 0,35 mg
Bezug auf Einwaage Boden:
0,35 mg / 50 g = 0,007 mg/g
Umrechnen in mg/kg:
0,007 mg/g * 1000 = **7 mg/kg**

Beispiel: Umrechnung auf Trockenboden:

(Wassergehalt: 72,7%)

10,17 mg $\text{NO}_3\text{-N kg}^{-1}$ (Frischboden) \rightarrow 37,24 mg $\text{NO}_3\text{-N kg}^{-1}$ (Trockenboden)

((Einwaage [g] / TS [g]) * Konzentration (hier: 10,17 mg $\text{NO}_3\text{-N kg}^{-1}$))

4.5 Bestimmung von Sulfat

Grundlagen

Sulfationen reagieren mit BaCl_2 unter Bildung von unlöslichem BaSO_4 , das durch die Gelatine in Suspension bleibt.

Reagenzien

Bariumchlorid-Gelatine-Lösung: 2,5 g gemahlene weiße Gelatine in 600 ml Aqua bidest. bei 40°C lösen, 60 ml 1N HCl und 20 g $\text{BaCl}_2 \times 2 \text{H}_2\text{O}$ zugeben und auf 1000 ml mit Aqua bidest. auffüllen. Die restliche Trübe durch Zentrifugieren (10 Min bei 10000 U/min) entfernen. Danach zur Konservierung 1 ml Chloroform zugeben. Diese Lösung wird zur Verfügung gestellt.

Eichlösung: 1000 mg SO_4 - Stammlösung: 1,4787 g $\text{Na}_2\text{SO}_4/\text{l}$

Eichreihe: 20; 50; 100; 150; 200; 250; 300 mg $\text{SO}_4\text{-l}^{-1}$

(diese Lösungen werden zur Verfügung gestellt)

Durchführung

Je nach zu erwartender Sulfatkonzentration 0,1 bis 1,0 ml Probelösung bzw. 1 ml Eichlösung in Reagenzgläser pipettieren, auf ein Volumen von 7,5 ml mit Aqua dest. auffüllen und 2,5 ml BaCl_2 -Gelatine zugeben (Blindwert nicht vergessen). Die Proben gut schütteln und nach 10 Min bei 492 nm im Photometer messen.

Berechnung

Im Fotometer werden Extinktionen gemessen. Aus den Extinktionen der Eichreihe erfolgt mit Excel eine Regression über „Trend.“ Die daraus ermittelte Sulfat-Konzentration der Lösung wird wie in dem Beispiel für Fe über die Verdünnung als $\mu\text{g Sulfat g}^{-1}$ Boden (=mg kg^{-1} Boden) berechnet.

4.6 Bestimmung von der CO₂-Abgabe des Bodens (Bodenatmung)

Grundlagen

Infolge der Atmung von Organismen der Bodenfauna (Bakterien, Pilzen, Kleinlebewesen) und der Wurzelatmung geben Böden CO₂ an die Atmosphäre ab („Bodenatmung“). Die Höhe der CO₂-Abgabe ist u.a. abhängig von der Populationsdichte der Organismen und der Durchwurzelungsintensität und somit ein Maß für die biotische Aktivität eines Bodens.

Die im Labor ermittelte CO₂-Abgabe lässt sich allerdings nicht auf die Situation am Standort übertragen, da zum einen die Wurzelatmung fehlt und wichtige Parameter wie Wassergehalt, Temperatur und Gefüge verändert sind.

Geräte und Reagenzien

0,2 M NaOH (Natronlauge), 0,2 M HCl (Salzsäure), Phenolphthaleinlösung, Parafilm, Weckgläser

Durchführung

100 g Frischboden (parallel dazu den aktuellen Wassergehalt der Probe bestimmen) werden in ein Weckglas eingewogen. In die Mitte des Weckglases wird ein Becherglas mit 20 ml 0,2 M NaOH und 2 Tropfen Phenolphthaleinlösung gestellt. Das Weckglas wird mit einem Glasdeckel und Parafilm luftdicht verschlossen. Der Boden wird nun 24 Std. bei 25°C inkubiert (hier: 2 Tage bei Raumtemperatur). Parallel dazu einen Blindversuch (ohne Boden) laufen lassen.

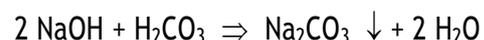
Nach Ende der Inkubationszeit wird in die NaOH-Lösung unter langsamem Rühren mit Hilfe einer Bürette 0,2 M HCl bis zum Entfärben der Probe (pH 7) getropft.

Reaktion im Weckglas:

Das aus dem Boden entweichende CO₂ löst sich in wässriger Lösung.



Anschließend reagiert H₂CO₃ mit NaOH, wobei Na₂CO₃ ausfällt.



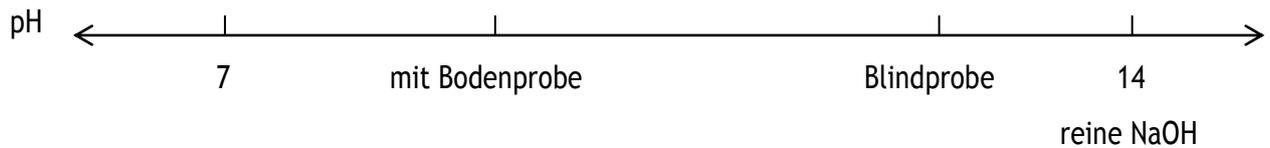
Bei dieser Reaktion sinkt der pH-Wert der NaOH ab.

Reaktion bei Titration:

Nach Beendigung des Versuchs wird die NaOH Lösung des Versuchsansatzes und der Blindprobe mit HCl auf einen definierten pH-Wert (hier pH 7) titriert.



pH-Wertbereiche der NaOH-Lösungen im Versuch



Anhand des aktuellen Wassergehalts wird das Trockengewicht des eingesetzten Bodens bestimmt und die CO₂-Abgabe pro kg Trockenboden und Stunde berechnet.

Berechnung

$$\text{mg CO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ h}^{-1} = \frac{[\text{mmol HCl (Blindwert)} - \text{mmol HCl (Probe)}] \times 44}{2 \times \text{Zeit [h]} \times \text{Einwaage [kg]}}$$

4.7 Bestimmung des Glühverlustes

Durchführung

Etwa 5 g 105°C getrockneter (absolut trockener) Feinboden (EINWAAGE) wird in einen bis zur Gewichtskonstanz getrockneten und ausgewogenen Porzellantiegel (TARA) eingewogen. Anschließend wird die Probe bei 430°C im Muffelofen bis zur Gewichtskonstanz (ca. 3 Std.) geglüht und nach dem Abkühlen im Exsikkator nochmals gewogen (RÜCKWAAGE).

Berechnung

$$\text{Rückwaage [g]} - \text{Tara [g]} = \text{Aschegewicht [g]}$$

$$\text{Einwaage [g]} - \text{Aschegewicht [g]} = \text{Glühverlust [g]}$$

$$\text{Glühverlust [\%]} = \frac{\text{Glühverlust [g]}}{\text{Einwaage [g]}} \times 100$$