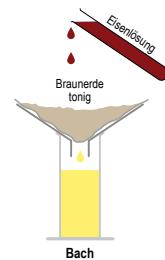




# Ökologische Untersuchungen in Laubwäldern am Edersee in Hessen über 35 Jahre (1989-2024)



# **Ökologische Untersuchungen in Laubwäldern am Edersee in Hessen über 35 Jahre (1989-2024)**

Wiesbaden, 2025

Impressum

ISSN 2512-9724

ISBN 978-3-89026-940-5

Naturschutzskripte 9

**Ökologische Untersuchungen in Laubwäldern am Edersee in Hessen über 35 Jahre  
(1989–2024)**

Autoren: Dr. Ulrich Kirschbaum, Dipl. Ing. Horst Heck und Dr. Ute Windisch

Redaktion: Lars Möller (HLNUG)

Layout: Martina Schaffner (HLNUG)

Titelbild: © Dr. Ulrich Kirschbaum

Herausgeber, © und Vertrieb:

Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie

Rheingaustraße 186

65203 Wiesbaden

Telefon: 0611 69 39-111

Telefax: 0611 69 39-555

E-Mail: [vertrieb@hlnug.hessen.de](mailto:vertrieb@hlnug.hessen.de)

**[www.hlnug.de](http://www.hlnug.de)**

## Inhalt

<b>Vorwort des Herausgebers</b> .....	<b>5</b>
<b>Vorwort der Autorinnen und Autoren</b> .....	<b>6</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>8</b>
<b>2 Das Untersuchungsgebiet</b> .....	<b>9</b>
<b>3 Methoden</b> .....	<b>11</b>
3.1 Untersuchungen zur Krautschicht des Waldes .....	11
3.2 Bodenkundliche Untersuchungen im Gelände .....	12
3.3 Bodenkundliche Untersuchungen im Labor .....	13
3.4 Untersuchungen zum Mikroklima .....	16
3.5 Darstellung der Ergebnisse .....	18
<b>4 Ergebnisse und Diskussion</b> .....	<b>19</b>
4.1 Artenzahlen und Zeigerwerte der Untersuchungsflächen .....	19
4.1.1 Faktor Licht .....	20
4.1.2 Faktor Feuchte des Bodens .....	21
4.1.3 Faktor Reaktion (Säuregrad des Bodens) .....	22
4.1.4 Faktor Stickstoff (Nährstoffversorgung) .....	23
4.2 Standortcharakterisierung anhand der Zeigerwerte .....	25
4.2.1 Beschreibung des Standortes „Bachquellmulde“ .....	25
4.2.2 Beschreibung des Zechstein-Standortes „Carbonat“ .....	26
4.2.3 Beschreibung des Standortes „Buntsandstein“ .....	27
4.2.4 Beschreibung des Standortes „Grauwacke“ .....	28
4.3 Geologische Entwicklung und Bodenentwicklung im Untersuchungsraum Nieder-Werbe/Edersee .....	30
4.4 Bodenkundliche Untersuchungen im Gelände .....	34
4.4.1 Bach-Standort .....	32
4.4.2 Carbonat-Standort .....	34
4.4.3 Buntsandstein-Standort .....	36
4.4.4 Grauwacken-Standort .....	36
4.5 Bodenkundliche Untersuchungen im Labor .....	38
4.5.1 Aktueller Wassergehalt .....	38
4.5.2 Maximale Wasserkapazität und Humusgehalt .....	38
4.5.3 pH-Wert und Kalkgehalt .....	40
4.5.4 Fulvo- und Huminsäuregehalte .....	42
4.5.5 Stabilität von Bodenkrümeln .....	43
4.5.6 Nachweis des Ladungssinnes von Bodenkolloiden .....	44
4.5.7 Kationenadsorption an Bodenkolloide und ihr Austausch .....	45
4.5.8 Aktivität der Bodenmikroorganismen (Katalaseaktivität) .....	49
4.5.9 Stickstoffgehalte .....	50
4.5.10 Phosphatgehalte .....	52
4.5.11 Saprovere Organismen (Bodenbakterien, Grobzerkleinerer) .....	53
4.6 Zusammenfassende Betrachtung der Remineralisierungsprozesse .....	53
4.7 Langfristige Beobachtungen .....	55
4.8 Untersuchungen zum Mikroklima (siehe hierzu auch [21, 26, 27]) .....	55
4.8.1 Darstellung der Mikroklima-Parameter .....	55
4.8.1.1 Licht .....	56
4.8.1.2 Temperatur .....	58
4.8.1.3 Wind .....	60
4.8.1.4 Relative Luftfeuchte .....	61
4.8.1.5 Evaporation .....	63

<b>5 Zusammenfassung der ökologischen Beziehungen .....</b>	<b>64</b>
<b>6 Literaturverzeichnis .....</b>	<b>66</b>
<b>7 Anhang .....</b>	<b>68</b>
7.1 Artenliste der Krautschicht des Untersuchungsstandortes „Bach“ .....	68
7.2 Artenliste der Krautschicht des Untersuchungsstandortes „Carbonat“ .....	71
7.3 Artenliste der Krautschicht des Untersuchungsstandortes „Buntsandstein“ .....	73
7.4 Artenliste der Krautschicht des Untersuchungsstandortes „Grauwacke“ .....	74

## Vorwort des Herausgebers



Das Lore-Steubing-Institut, welches beim Hessischen Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) angesiedelt ist, trägt die Vision der ökologischen Pionierin Lore Steubing weiter. Daher kamen auch die Autorinnen und Autoren dieser Publikation, Dr. Ulrich Kirschbaum, Dipl. Ing. Horst Heck und Dr.

Ute Windisch, auf das HLNUG als Herausgeber für ihre Ergebnisse der ökologischen Untersuchungen in Laubwäldern zu.

Bereits als Studierende – damals noch im Rahmen ihres Studiums unter Anleitung von Lore Steubing – führten die Autorinnen und Autoren ökologische Untersuchungen in Laubwäldern nördlich des Edersees durch. Noch Jahrzehnte später setzten sie die Untersuchungen, zum Teil zusammen mit Lore Steubing, fort, schufen so eine Langzeituntersuchung und trugen schließlich die Ergebnisse in dieser Publikation zusammen.

Prof. em. Dr. Dr. h. c. Lore (eigentlich Eleonore) Steubing gilt als Pionierin der ökologischen Forschung und gründete das erste botanische Institut mit ökologischer Ausrichtung in der BRD. Neben dem Forschen war es ihr ein besonderes Anliegen Umweltwissenschaft zu vernetzen und ökologisches Wissen zu verbreiten. Sie trug daher wesentlich zur

Gründung der Gesellschaft für Ökologie (GfÖ) bei. Als Würdigung ihrer Verdienste trägt das Lore-Steubing-Institut für Naturschutz und Biodiversität in Hessen (kurz: Lore-Steubing-Institut – LSI) ihren Namen. Ziel des LSI ist es, das ökologische Fachwissen aller hessischen Forschungseinrichtungen zu bündeln und Wissenschaft und Akteure der Naturschutzpraxis zu verbinden.

Das LSI ist ein Zusammenschluss des HLNUG, der Universitäten Gießen, Darmstadt, Marburg, Kassel und Frankfurt am Main, der Hochschule Geisenheim University sowie der Senckenberg Gesellschaft für Naturforschung. Es ist der bundesweit erste institutionenübergreifende Biodiversitätsforschungsverbund unter direkter Einbindung einer technisch-wissenschaftlichen Umweltbehörde.

Ich freue mich Ihnen die Ergebnisse der ökologischen Langzeituntersuchungen in Laubwäldern am Edersee über 35 Jahre zur Verfügung stellen zu können und die Vision von Lore Steubing mit dem LSI weiterzuverfolgen. Ein besonderer Dank geht an die Autorinnen und Autoren für die gute Zusammenarbeit. Ich wünsche Ihnen viel Freude beim Lesen.

Wiesbaden, Dezember 2025

Prof. Dr. Thomas Schmid  
Präsident des Hessischen Landesamtes für Naturschutz,  
Umwelt und Geologie



## Vorwort der Autorinnen und Autoren

Im Jahr 1975 wurde auf Initiative von Frau Prof. Dr. Dr. h. c. L. Steubing (Gießener Institut für Pflanzenökologie) und anderen Instituten der Justus-Liebig-Universität in Nieder-Werbe/Edersee in einem alten Forsthaus eine Ökologische Forschungsstation eingerichtet. Das Haus bot Wohnmöglichkeiten und Arbeitsplätze für Studierende (Abb. 1).

Von Beginn an wurden hier mehrtägige pflanzenökologische Praktika an ausgewählten Untersuchungsstandorten in den Laubwäldern nördlich des Edersees durchgeführt. (Diese Standorte befinden sich direkt an der Nordgrenze des später gegründeten Nationalparks Kellerwald). Als die Forschungsstation 2003 geschlossen wurde, fand sich eine neue Bleibe im Sport- und Studienheim der Universität Marburg, im nicht weit entfernten Ort Asel (Vöhl).

Dem Menschen ist ökologisches Denken in Netzen aus evolutionären Gründen fremd; für sein Überleben war lineares Denken wichtiger (wenn der Löwe kommt, musst du schnell auf den nächsten Baum). Überlegungen, ob andere Strategien eventuell auch zielführend sein könnten, hätten in der Regel durch Tod sofort zur Beendigung der entsprechenden Genbahn geführt. Erst relativ spät kam mit Alexander von Humboldt vor 250 Jahren die Erkenntnis hinzu, „dass alles mit allem zusammenhängt“. Der Mensch von heute ist gefordert, diese Netzbeziehungen möglichst zu durchschauen, um in einer komplexen Welt zu überleben. Vorrangiges Ziel der Praktika war (und ist) es, die Studierenden mit diesem Denken vertraut zu machen.



**Abb. 1:** Ökologische Forschungsstation in Nieder-Werbe



**Abb. 2:** Prof. Dr. Dr. h. c. L. Steubing; 2002 zu Gast bei einem ökologischen Praktikum in Nieder-Werbe

Einer der Gründe für die Wahl von Laubwaldstandorten für derartige Praktika lag in der Tatsache begründet, dass unsere Laubwälder (und ihre Krautschicht) wegen der vergangenen Eiszeit relativ artenarm sind und somit das Beziehungsgefüge zwischen den einzelnen Umweltfaktoren sich überschaubarer darstellt als z. B. in einer Stadt mit ihren vielfältigen ökologischen Nischen.

Nach ihrem Eintritt in den Ruhestand haben wir, als Schüler von Prof. Steubing, diese Untersuchungen an der heutigen Technischen Hochschule Mittelhessen (THM) von 1980 bis 2024 fortgeführt und die Ergebnisse der Langzeituntersuchungen in der vorliegenden Publikation zusammengefasst. Unsere Lehrerin hat die Erhebungen bis in das neue Jahrtausend hinein begleitet (Abb. 2).

Wir widmen diese Arbeit unserer verehrten Lehrerin, **Prof. Dr. Dr. h. c. Lore Steubing**.

## 1 Einleitung

Im Rahmen von jeweils fünftägigen ökologischen Geländepraktika für angehende Umweltingenieure der THM werden seit 1980 in jedem Praktikum vier geologisch unterschiedliche Laubwaldstandorte am Edersee (Nordhessen) untersucht. Ziel der Untersuchungen ist es, den Studierenden das Beziehungsgefüge zwischen der Krautschicht des Waldes sowie den geologischen Verhältnissen, dem Boden und dem Mikroklima näherzubringen. Die Krautschicht wurde ausgewählt, weil sie sich spontan (d.h. ohne menschlichen Einfluss – ihren natürlichen Bedürfnissen entsprechend) ansiedelt. Die Waldbäume werden in Deutschland hingegen in der Regel vom Menschen angepflanzt – zuweilen entgegen ihren natürlichen Ansprüchen.

Mitte des 20. Jahrhunderts war die Idee der Verwendung von Zeigerpflanzen für die ökologische Beurteilung eines Standortes von ELLENBERG entwickelt worden [1, 2]. Sie sollte rasch Aussagen über wichtige Umwelteigenschaften (z. B. Licht, Temperatur, Feuchtigkeit, Säuregehalt und Nährstoffangebot des Bodens) machen, wenn aus Zeit- und Kostengründen technische Messungen nicht infrage kämen. Inwieweit diese biologischen Aussagen mit den Ergebnis-

sen technischer Messungen übereinstimmen, war Gegenstand unseres Forschungsansatzes.

Die Umgebung im Norden des Edersees eignet sich u.a. deshalb besonders gut für derartige Untersuchungen, weil sich dort die geologischen und damit auch die Bodenverhältnisse auf engem Raum drastisch ändern und alle Untersuchungsstandorte fußläufig zu erreichen sind. Weitere Kriterien für die Wahl des Praktikumsortes und die Art des Praktikums waren:

- Praktisches Arbeiten im Gelände und Labor, fernab von den Möglichkeiten der Hochschule
- Längere Beschäftigung mit einem Thema (im Gegensatz zu den ständig wechselnden Lehrveranstaltungen im Semesteralltag)
- Kennenlernen des komplexen Gefüges und des Zusammenspiels ökologischer Faktoren in einem Ökosystem
- Weiterentwicklung der Sozialkompetenz der Teilnehmenden durch Übernahme von Verantwortung bei den sozialen und wissenschaftlichen Anforderungen des Praktikums

## 2 Das Untersuchungsgebiet

Aus geologischer Sicht liegt das Untersuchungsgebiet am Ostrand des Rheinischen Schiefergebirges bzw. dessen östlichstem Ausläufer, dem Kellerwald. An dessen Nordgrenze, am Edersee, treten sowohl silikatische und carbonatische Gesteine aus dem Erdaltertum (Paläozoikum) als auch silikatische aus dem Erdmittelalter (Mesozoikum) zutage; siehe die Übersichtskarte (Abb. 3).

In der Karte der naturräumlichen Gliederung Deutschlands ist das Untersuchungsgebiet im „Hessischen Bergland“ verortet. Als der Nationalpark Kellerwald auf die Nordseite des Edersees ausgeweitet wurde, kamen unsere Untersuchungsgebiete direkt an dessen Nordgrenze zu liegen.

Die vier Untersuchungsstandorte lassen sich, wie folgt, charakterisieren (Abb. 4):

- Beim **Standort 1 („Bach“)** handelt es sich um eine Bachquellmulde, deren Boden eine Mischung aus Verwitterungsmaterial der anstehenden Grau-

wacke (sauer, nährstoffarm) und durch Erosion von oben abgerutschem Material des Zechsteinkalkes (hoher pH-Wert, basenreich) darstellt. Der Boden ist tiefgründig (mehrere Meter dick) und infolge einer Quelle stets optimal mit Wasser versorgt. Infolge leichter Hangneigung ist Staunässe nur selten zu erwarten.

- **Standort 2 („Grauwacke“)** ist ein stark nach Westnordwest geneigter Hang und sehr flachgründig. Bereits in 25 cm taucht Verwitterungsschutt auf und darunter sehr bald die dort anstehende Grauwacke. Wegen der Beschattung durch den dichten Baumbestand ist Wassermangel eher nicht zu erwarten. Der siliziumreiche, sandige Boden ist sauer und nährstoffarm. Der Wind weht das anfallende Laubmaterial den steilen Hang hinunter, so dass es kaum Chancen gibt, die Nährstoffsituation durch Remineralisierung zu verbessern.
- **Standort 3 („Buntsandstein“)** ist eine nahezu ebene Lichtung mit wenigen alten Rotbuchen. Es

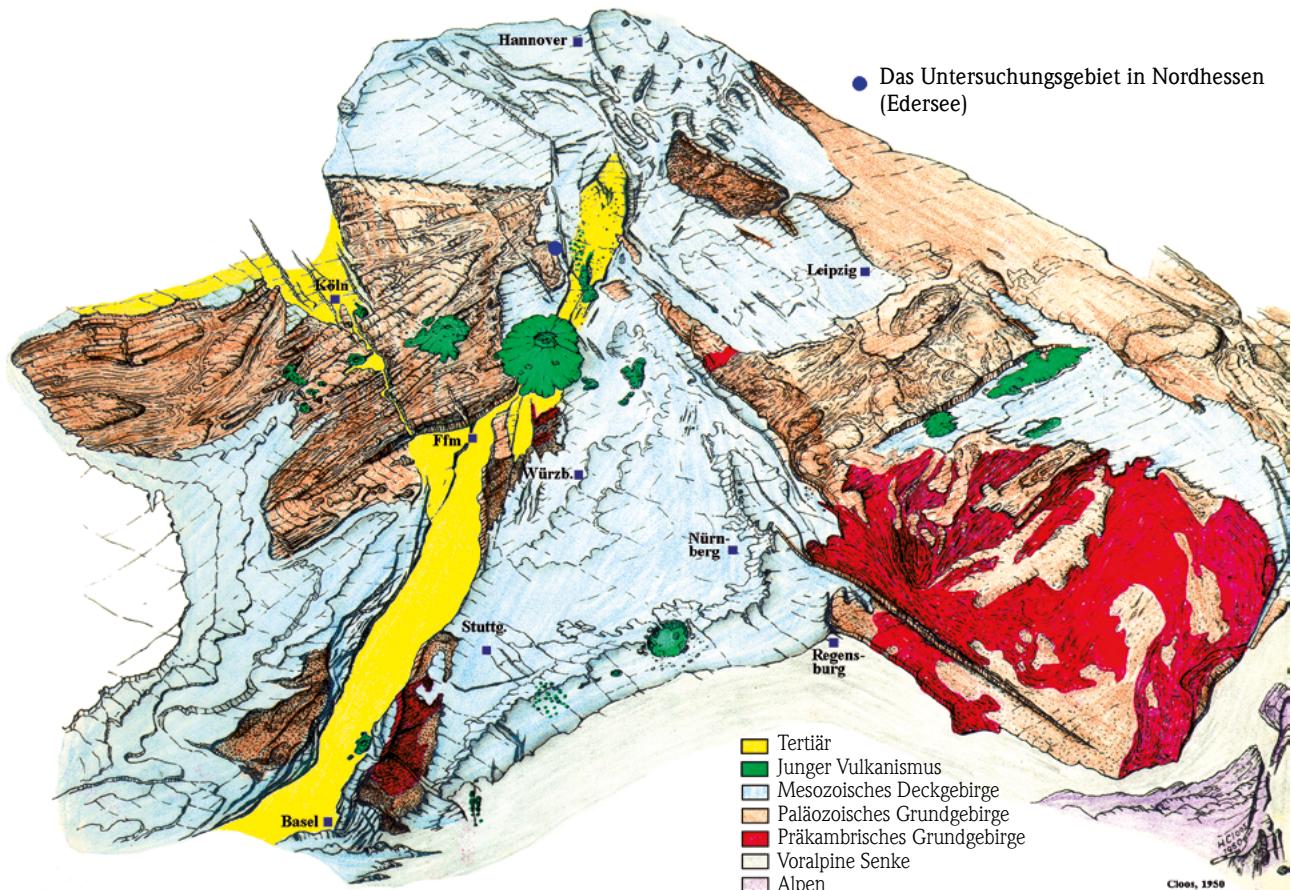


Abb. 3: Geologische Karte von Mitteleuropa (mit Lage des Untersuchungsgebietes) [3]

handelt sich hierbei um eine ursprüngliche Mulde mit einem Durchmesser von etwa 50 Metern, die sich während des letzten Glazials mit von oben herabfließendem Buntsandsteinlockermaterial mit einer Mächtigkeit von bis zu 1 m füllte (periglaziale Solifluktionserde). Der Boden ist mittelgründig, sandig, sauer, wasserdurchlässig und extrem nährstoffarm. Darunter steht Zechsteinkalk an.

- Am ebenfalls annähernd ebenen **Standort 4 („Carbonat“)** befindet sich im Untergrund Zechsteinkalk. Der aufliegende Boden wurde während der letzten Eiszeit immer wieder durch Bodenfließen abgetragen; heute ist der A-Horizont nur ca. 25 bis 30 cm stark – also flachgründig. Der hohe Kalkgehalt macht den Boden potentiell fruchtbar; dem steht jedoch der sehr wasserdurchlässige Kalk im Untergrund entgegen (Wasserhaushaltsprobleme).

Die Erhebungen wurden an den vier ausgewählten Standorten jeweils im Mai/Juni (Blütezeit vieler Waldbodenpflanzen) durchgeführt; meist in zwei bis drei aufeinanderfolgenden Praktika (je nach Studiendenzahl der jeweiligen Semester). Voraussetzung für die Teilnahme war u. a. das Absolvieren einer zweistündigen Ökologievorlesung (um sicherzustellen, dass die Praktikanten auf theoretische Vor-

kenntnisse zurückgreifen konnten). Zusätzlich wurde ihnen weiterführende Fachliteratur zum Thema empfohlen (siehe Kapitel Literatur).

Die angewendeten Untersuchungsmethoden waren einfache Feld- und Labormethoden, geschuldet der nur fünfjährigen Praktikumszeit und den begrenzten technischen Möglichkeiten vor Ort. Bei diesen Untersuchungen ging es nicht in erster Linie um die absoluten Werte, sondern eher darum, die verschiedenen Untersuchungsstandorte miteinander vergleichen zu können. Daher wurde an den Methoden über den gesamten Zeitraum (fast) nichts verändert.

Begleitet (und überprüft) wurden die maximal 16 Teilnehmer eines jeden Praktikums bei ihrer Arbeit von den Autoren, um Messfehler und Fehlinterpretationen zu minimieren. Obwohl derartige Fehler nicht ganz zu vermeiden sind, kann dennoch – aufgrund der vielen und jahrelangen Paralleluntersuchungen – von einem aussagekräftigen Gesamtergebnis ausgegangen werden.

Seit 1989 liegt digital auswertbares Datenmaterial vor – also seit 35 Jahren. Insgesamt konnten die Ergebnisse von insgesamt 65 Praktika in die Auswertungen einbezogen werden.

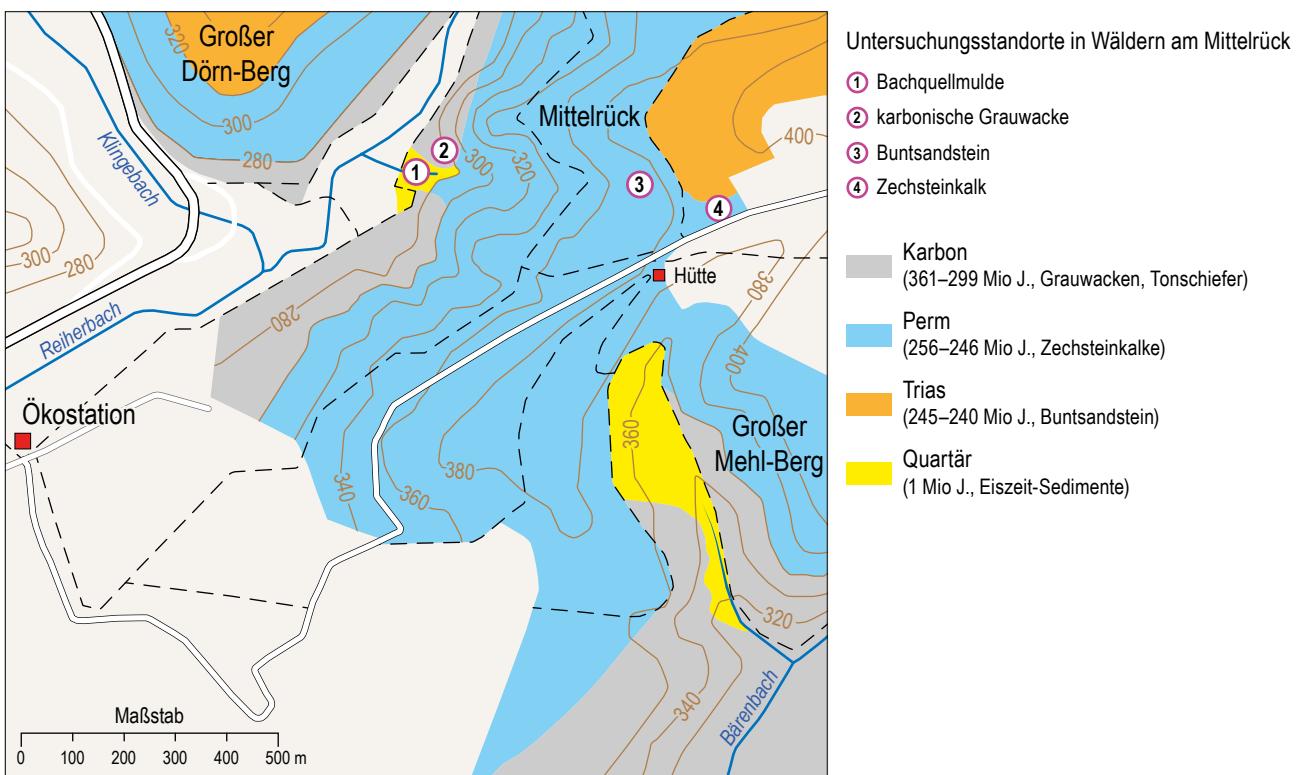


Abb. 4: Topographie, Geologie und Lageskizze der Untersuchungsstandorte bei Nieder-Werbe (nach [4], verändert)

## 3 Methoden

Die Untersuchungsmethoden stammen – sofern nicht anders angegeben – aus STEUBING & FANGMEIER [5]. Die

Abbildungen zu den Experimenten wurden in der Regel verändert.

### 3.1 Untersuchungen zur Krautschicht des Waldes

Die Untersuchungen der Krautschicht und der Bodenparameter wurden während der 35 Jahre stets auf den gleichen, oben genannten, Flächen durchgeführt.

Am ersten Praktikumstag wurden bei einer Geländebegehung die vier Untersuchungsstandorte aufgesucht und jedem Untersuchungsareal drei bis vier Studierende zugeordnet. Erstes Untersuchungsobjekt war die Erfassung der Krautschicht der vier Areale, mit einer Fläche von jeweils annähernd 1 500 m<sup>2</sup> (Abb. 5). Unter der Krautschicht des Waldes versteht man die Pflanzen bis ca. 1 m Höhe (v.a. Kräuter, Gräser, Moose, Farne, Heckenpflanzen und Jungbäume, die sich spontan angesiedelt haben). Die Bestimmung erfolgte nach [6, 7, 8, 9]. Als zusätzliche Bestimmungshilfe erhielten die Praktikanten Artenlisten der vier Standorte (siehe Anhang).

Notiert wurde lediglich das Vorkommen der Pflanzenarten – nicht ihre Häufigkeit.

Der Bestimmung der Zeigerwerte liegt die Arbeit von [2] zugrunde. Jeder Pflanzenart wird ein bestimmter Zeigerwert zugeordnet, der ihre Ansprüche an die Lichtversorgung (Lichtzahl), die Bodenfeuchte (Feuchtezahl), die Bodenreaktion (Reaktionszahl) und die Bodenstickstoffversorgung (Stickstoff-/Nährstoffzahl) ausdrückt, wobei 1 = geringste ..... und 9 = höchste Konzentration des Faktors bedeutet (siehe Anhang). Nach der Vegetationsaufnahme lassen sich aus dem Vorkommen der Arten mittlere Zeigerwerte für jeden Standort berechnen (und daraus schließlich jeweils arithmetische Mittelwerte aus ca. 65 Praktika).

Dem Faktor „Temperatur“ wurde zu Beginn der Untersuchungen keine Bedeutung beigemessen, weil er für alle Standorte als gleich und außerdem als ± konstant angesehen wurde; folglich wurde er nicht mit erfasst; ein Fehler, wie sich im Nachhinein angesichts des Klimawandels herausstellte.



**Abb. 5:** Erfassung der Krautschicht des Waldes

## 3.2 Bodenkundliche Untersuchungen im Gelände

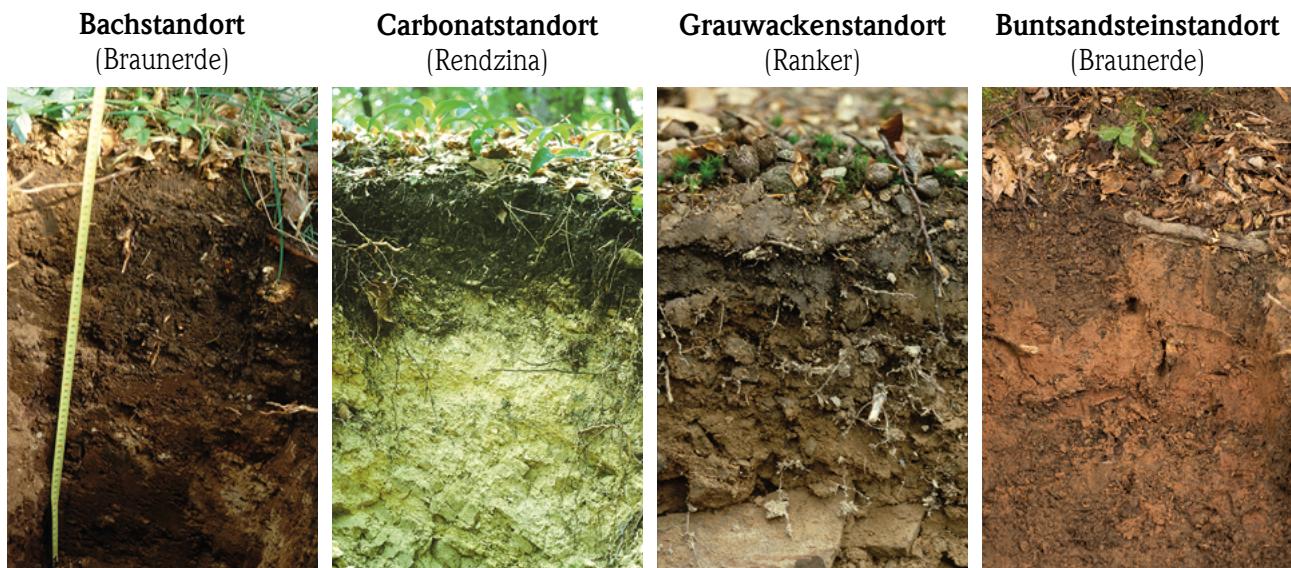


Abb. 6: Die Bodentypen der vier Untersuchungsstandorte

Es wurde an jedem Standort ein Bodenprofil gegraben. Anhand der Horizontabfolge erfolgte die Bestimmung des Bodentyps (Abb. 6).

Mittels Fingerprobe konnte im A-Horizont eine Abschätzung der Bodenart durchgeführt werden; sie ermöglicht eine (orientierende) Aussage über die jeweiligen Anteile von Sand, Schluff und Ton [10, 11]. Weiterhin wurde anhand der Schwärzung des Bodens der Humusgehalt angesprochen: hellgrau (humusarm) – grau – dunkelgrau – schwarzgrau – schwarz (stark humos).



Abb. 7: Indikation des Boden-pH-Wertes mit dem Hellige-pH-Meter

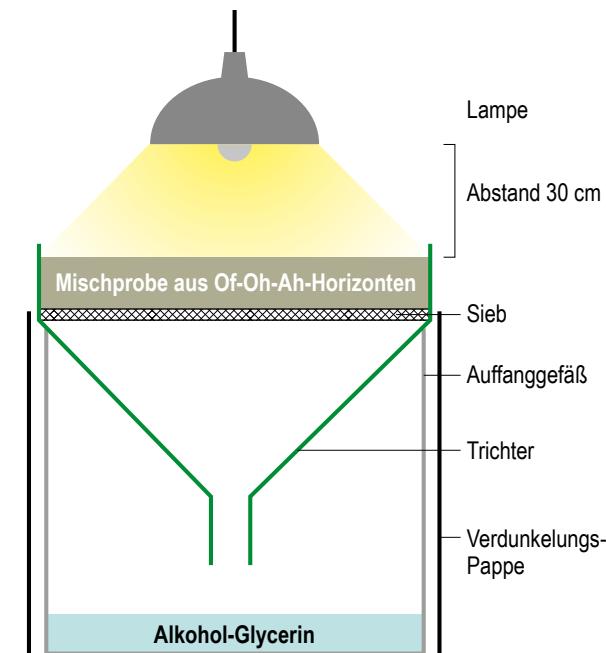
Eine erste Indikation des pH-Wertes erfolgte vor Ort im Oberboden mit Hilfe des Hellige-pH-Meters (Abb. 7), um bereits im Gelände den Säuregrad der Böden abschätzen zu können.

Humusgehalt und pH-Wert konnten später im Labor genauer bestimmt werden (s. u.).

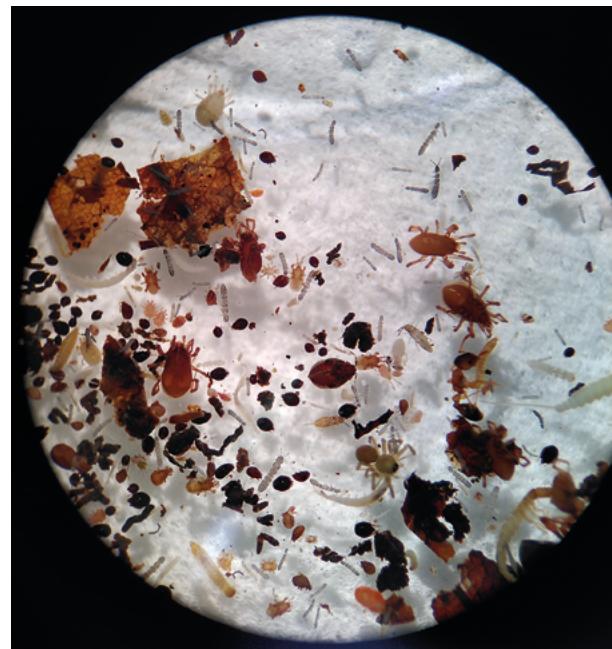
Vor Ort wurden auch Mächtigkeit, Struktur und Zersetzunggrad der organischen Streuauflage (Ol – Of – Oh) begutachtet. Deren Struktur erlaubt die Bestimmung der Humusform und damit erste Aussagen über die Tätigkeit der Destruenten (Zersetzer/Remineralisierer).

Weiterhin erfolgte eine Entnahme von Laubstreu für die Erfassung der saprovoen Organismen (Grobzerkleinerer) mittels Berlese-Apparatur: Im Labor wird die Streu auf ein Sieb in einem Trichter ausgebreitet und darüber eine Lampe angebracht (Abb. 8). Sie treibt die Tiere aus der Streu nach unten, wo sie in eine Alkohol-Glycerinlösung fallen. Nach vier Tagen wird mithilfe von Stereoluppen und (orientierender) Bestimmungsliteratur untersucht, welche Tiergruppen sich in der Laubstreu aufhalten (Abb. 9).

Eine wissenschaftliche Bestimmung war hierbei weder angedacht, noch möglich. Vielmehr ging es bei diesem Versuch darum, den Studierenden die Augen für die Vielzahl von solchen, die Remineralisierung der toten organischen Substanz vorbereitenden Lebewesen im Boden, zu öffnen.



**Abb. 8:** Berlese-Apparatur zur Erfassung der saprovoen Organismen



**Abb. 9:** Blick in die Stereolupe auf saprovoe Organismen (Foto: Christos Ott)

Darüber hinaus erfolgte an jedem Standort mit Hilfe von Bodenstechern die Gewinnung einer Mischprobe des Oberbodens (A-Horizont) für spätere Bodenuntersuchungen im Labor. (An jedem Standort wurden jeweils 10 Einzelproben an repräsentativen Stellen entnommen, in einem Eimer von Steinen, Wurzeln und Laub befreit und gut durchmischt).

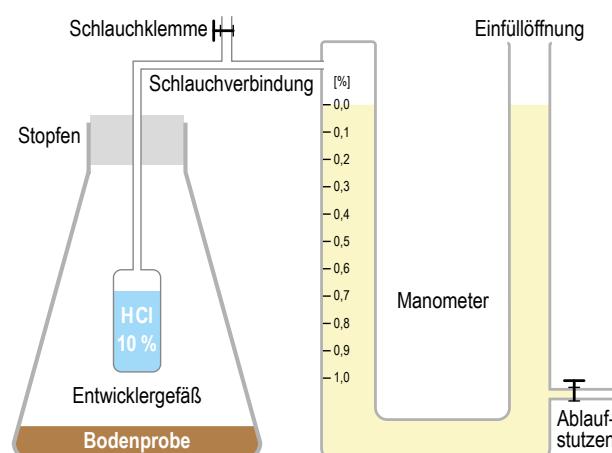
Die Bezeichnung „Labor“ sollte hier nicht zu Fehldeutungen einladen. Alle für die Praktika notwendigen Geräte und Chemikalien wurden von uns von der THM in Gießen zur Unterkunft im Untersuchungsgebiet transportiert und dort in Räumen ohne die laborübliche Infrastruktur aufgebaut. (Lediglich Strom und ein Wasserbecken waren vor Ort vorhanden).

### 3.3 Bodenkundliche Untersuchungen im Labor

Ein zweckmäßiges Bodenlabor mit robusten Geräten wird für die Dauer des Praktikums in den Räumlichkeiten der Unterkunft aufgebaut.

Mit den im Gelände entnommenen Böden – gesiebt durch ein 2 mm-Sieb – werden im weiteren Verlauf des Praktikums folgende Untersuchungen durchgeführt:

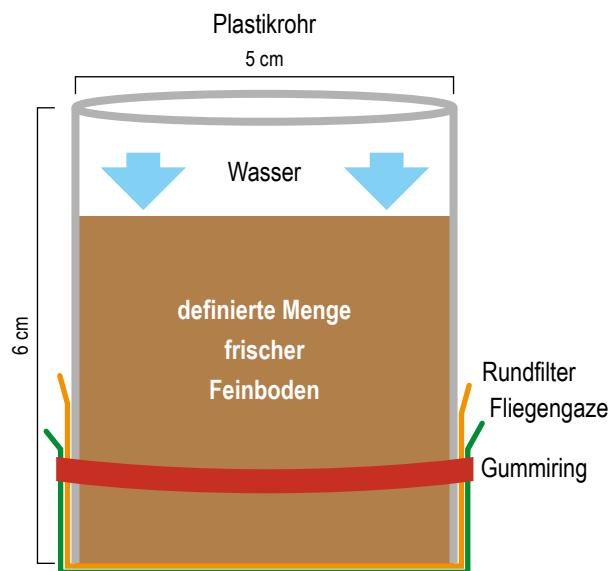
- **pH-Messung:** Eine definierte Frischbodenmenge (FB) wird mit KCl-Lösung vermischt und mittels pH-Elektrode gemessen.
- **Bestimmung des Kalkgehaltes:** mit dem Passon-Gerät (Abb. 10): In ein Entwicklergefäß wird eine definierte Menge Trockenboden (TB) gefüllt. Im Gefäß befindet sich eine definierte Menge HCl.



**Abb. 10:** Bestimmung des Kalkgehaltes mit dem Passon-Gerät

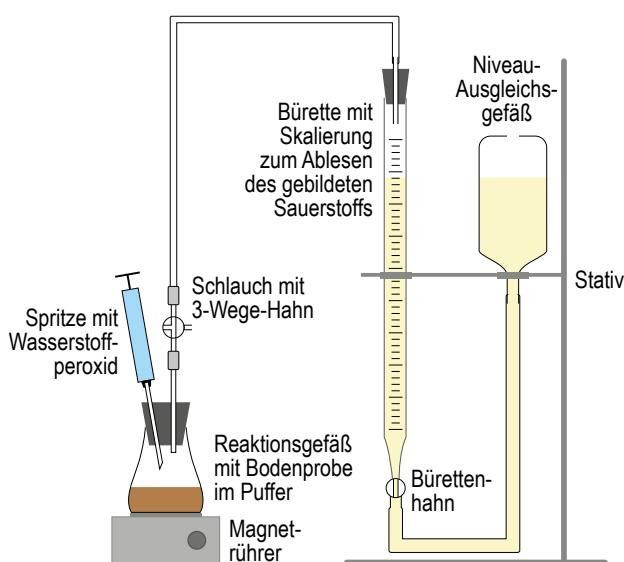
Das Gefäß ist luftdicht mit einem Manometer verbunden. Gießt man die HCl über den Boden, entwickelt sich – je nach Kalkmenge –  $\text{CO}_2$ , das den Flüssigkeitspegel im Manometer verändert. Aus der Menge des gebildeten Kohlendioxids lässt sich dann der Kalkgehalt berechnen.

- **Bestimmung des aktuellen Wassergehaltes (%)**: gravimetrischer Vergleich zwischen Frisch- und Trockenboden
- **Bestimmung der maximalen Wasserkapazität gestörter Bodenproben (%)**: gravimetrischer Vergleich von Trockenboden und voll wasserge-sättigtem Boden (Abb. 11)

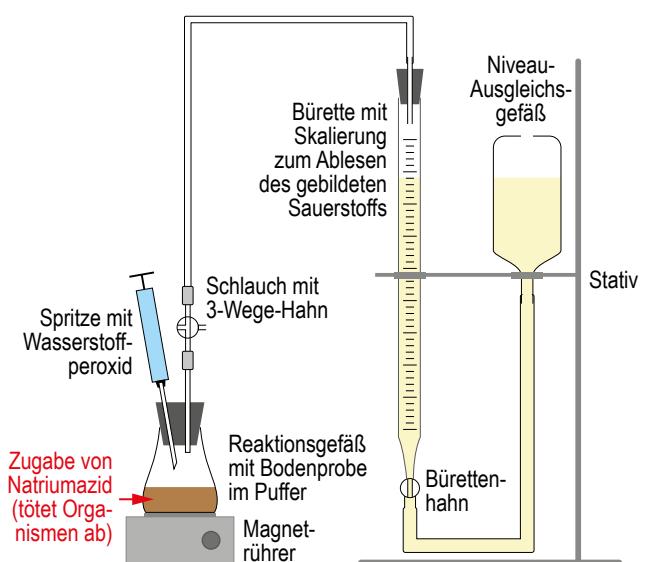


**Abb. 11:** Bestimmung der maximalen Wasseraufnahmekapazität

- **Bestimmung des Humusgehaltes (%)**: gravimetrisch; nach Erhitzung des Trockenbodens auf 600 °C
- **Bestimmung von  $\text{NO}_3\text{-N}$  (mg/100 g TG)**: photometrisch, mit Lange-Schnelltests (FB)
- **Bestimmung von  $\text{NH}_4\text{-N}$  (mg/100g TG)**: photometrisch, mit Lange-Schnelltests (FB)
- **Bestimmung von  $\text{P}_2\text{O}_5$  (mg/100 g TG)**: photometrisch, mit Lange-Schnelltests (FB)
- **Bestimmung der Katalase-Aktivität (ml  $\text{O}_2$ /g TG)**: mittels Katalase-Apparatur (Abb. 12) Mithilfe dieser Untersuchung wird die Aktivität der aeroben Bodenorganismen erfasst. Pflanzenwurzeln und größere Bodentiere werden durch Sieben entfernt, so dass hier vor allem die Tätigkeit der Bakterien und Pilze (Destruenten) gemessen wird. Prinzip: In ein Probenglas wird eine Frischboden-densuspension gegeben. Die Suspension wird mit  $\text{H}_2\text{O}_2$  (Wasserstoffperoxid) aus einer Spritze versetzt. Eine Minute lang wird das Gemisch gerührt. Anschließend wird der gebildete Sauerstoff an der Bürette abgelesen. Auch nicht lebende Bodenbestandteile (z. B. Kalk) können zur Freisetzung von  $\text{O}_2$  führen (Fehler). Daher wird zusätzlich ein Kontrollversuch mit durch  $\text{NaN}_3$  abgetöteten Organismen durchgeführt.



**Abb. 12:** Bestimmung der Katalase-Aktivität (nur Aerobier)



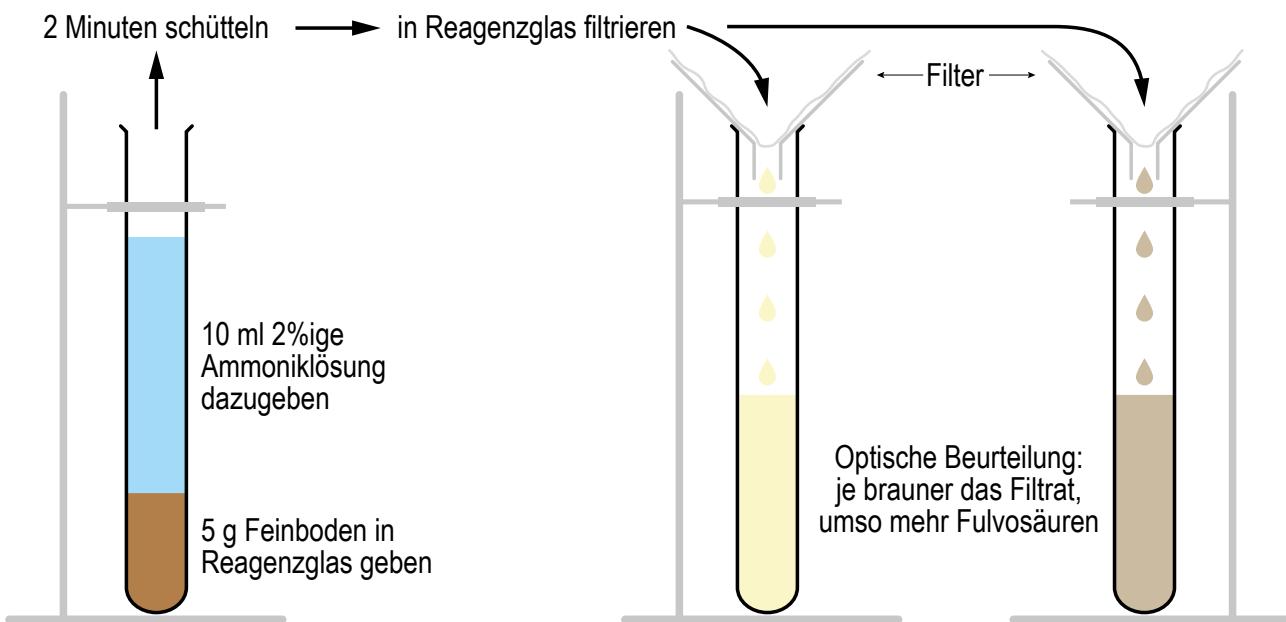


Abb. 13: Nachweis von Fulvosäuren durch Filtration

- **Nachweis von Fulvosäuren:** Diese sind Zwischenprodukte beim Abbau toter organischer Substanz. Mit einem Filtrationsversuch (Frischboden, Abb. 13) wird das Vorhandensein von Fulvosäuren optisch beurteilt [10].
- **Abschätzung der Krümelstabilität:** Beobachtung des Zerfalls durch standardisiertes, kreisförmiges Schwenken von Bodenkrümeln (FB) in Wasser (Abb. 14) [12]

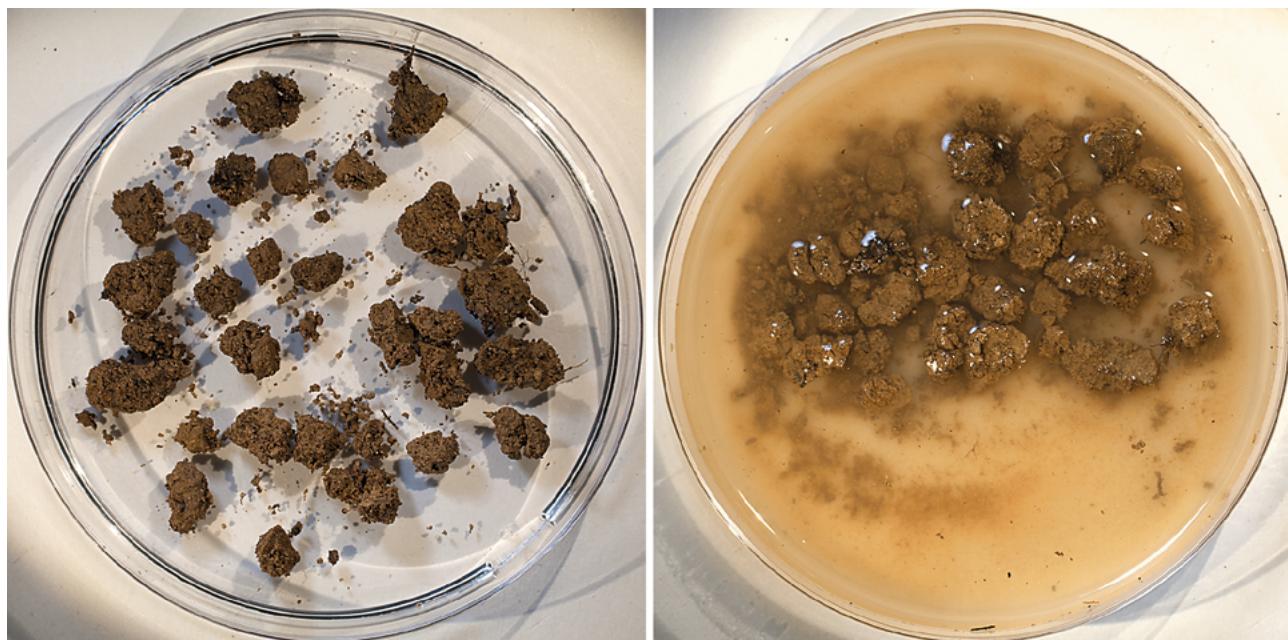


Abb. 14: Bewertung der Krümelstabilität. Von jedem Standort werden 30 Frischbodenkrümel von etwa gleicher Größe in Petrischalen gelegt. Anschließend werden die Schalen gleichzeitig vorsichtig mit Wasser befüllt, bis die Krümel bedeckt sind. Dann werden alle Schalen gleichartig zwanzigmal geschwenkt und darauf die Zerfallserscheinung verglichen.

- **Abschätzung der Eisen-Adsorption, der Fe-Auswaschung durch Wasser, sowie der Fe-Auswaschung durch Säure:** optische Bewertung (Abb. 15) [13]
- **Nachweis des Ladungssinnes von Bodenkolloiden:** optische Bewertung [14].

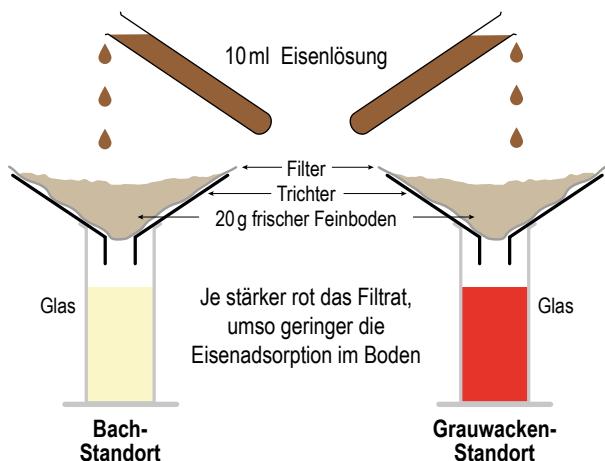


Abb. 15: Abschätzung der Kationen-Adsorption durch Filtration

Jeweils 20 g Frischboden werden für jeden Standort in zwei mit Filter versehene Trichter gegeben. Über einen wird eine negativ geladene (anionische) Eosin-Lösung (10 ml), über den zweiten Boden eine positiv geladene (kationische) Methylenblau-Lösung getropft. Anschließend wird die Farbe der Filtrate mit denen der übrigen Standorte verglichen und interpretiert (Abb. 16).

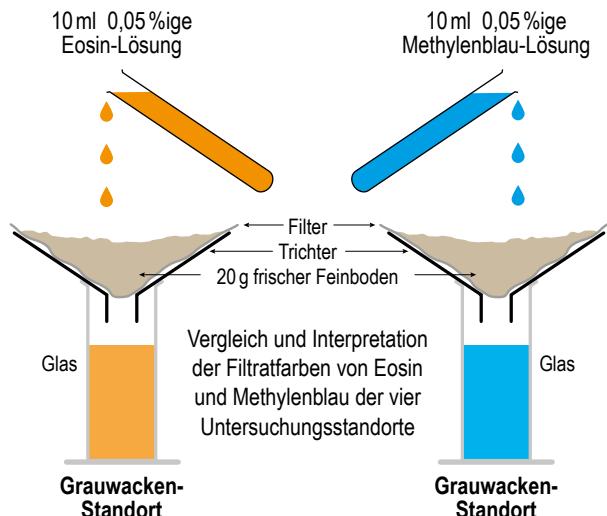


Abb. 16: Nachweis des Ladungssinnes von Bodenkolloiden

### 3.4 Untersuchungen zum Mikroklima

Die Untersuchungen zum Mikroklima wurden während der 35 Jahre an unterschiedlichen Orten jeweils im Wald und auf Wiesen durchgeführt; im Wald möglichst im Schatten großer Rotbuchen; Messungen jeweils von 5 bis 22 Uhr; sie erfolgten zu jeder vollen Stunde (Abb. 17).

Folgende Messungen wurden vorgenommen:

- Abschätzung des Bewölkungsgrades (%)
- Messung der Lichtintensität mit dem Luxmeter
- Kontinuierliche Messung der Lichtintensität mit einem Luxmeter mit Datenspeicher (Testo) (Messung alle 3 min)

- Messung der Temperaturen in -15, -5, 0, 30 und 130 cm; unterirdisch mithilfe von Bodenthermometern, oberirdisch mit Aspirations-Psychrometer nach Assmann (Abb. 17, Abb. 18)
- Messung der relativen Luftfeuchte mit Aspirations-Psychometern nach Assmann in 5, 30 und 130 cm (Abb. 18); Auslesen der relativen Luftfeuchte mit Hilfe der „trockenen“ und „feuchten“ Temperatur in einer Psychometertafel (Lambrechts Graphische Psychometertafel, Nr. 771b)
- Messung des Windweges (km/h) in 200 cm: mit einem Schalenkreuzanemometer
- Messung der Evaporation (ml/h) in 5, 30 und 130 cm: mit Piche-Evaporimetern (Abb. 18)

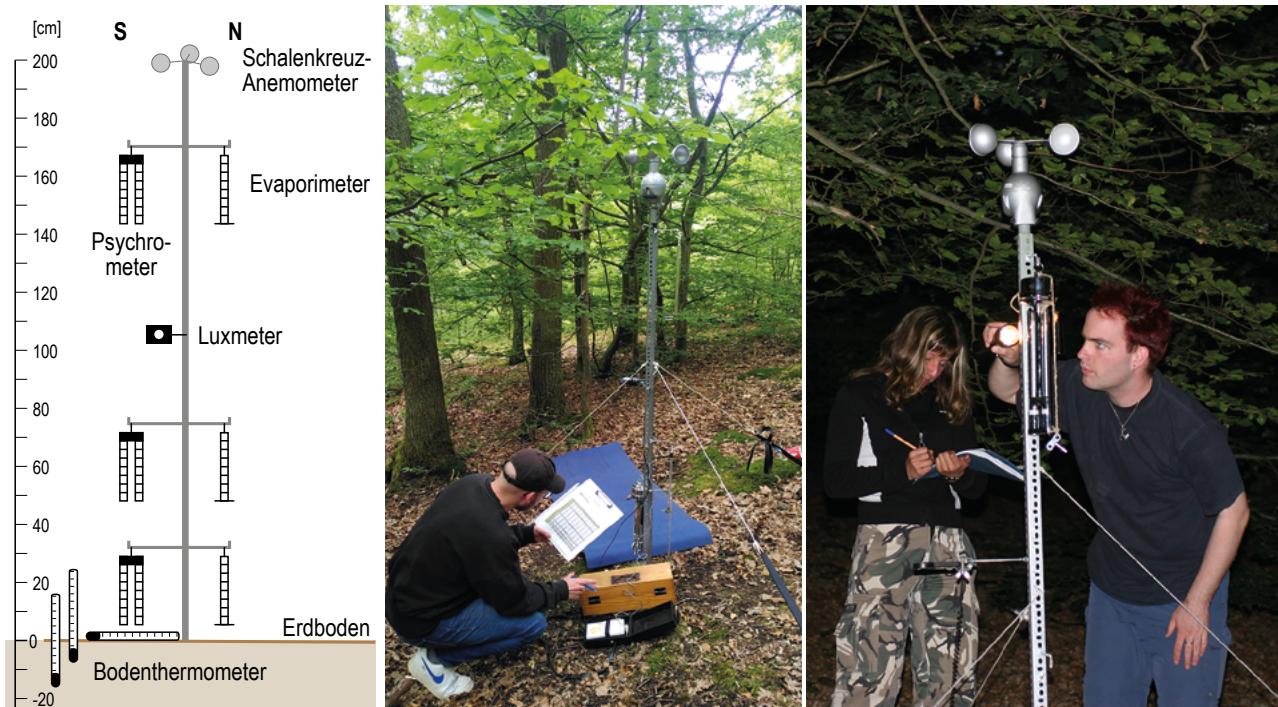


Abb. 17: Mikroklimamessungen

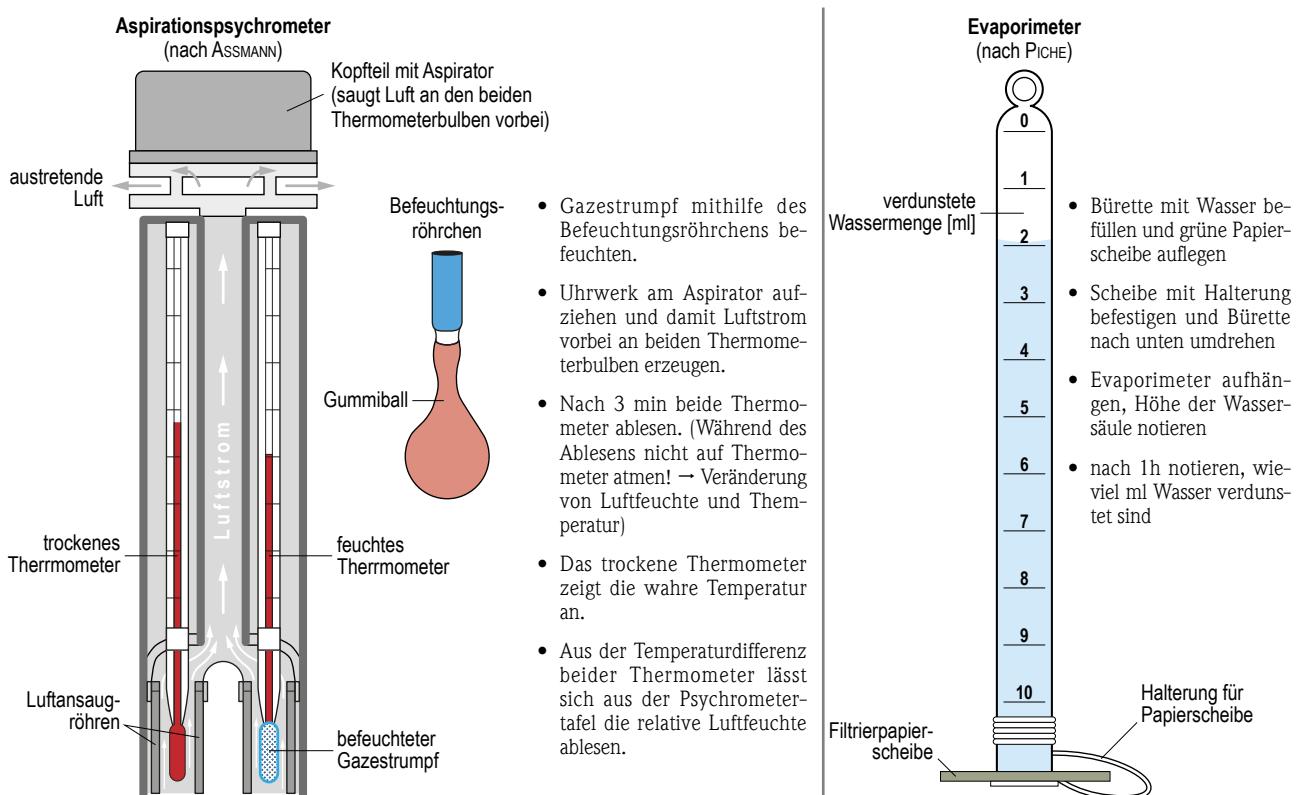
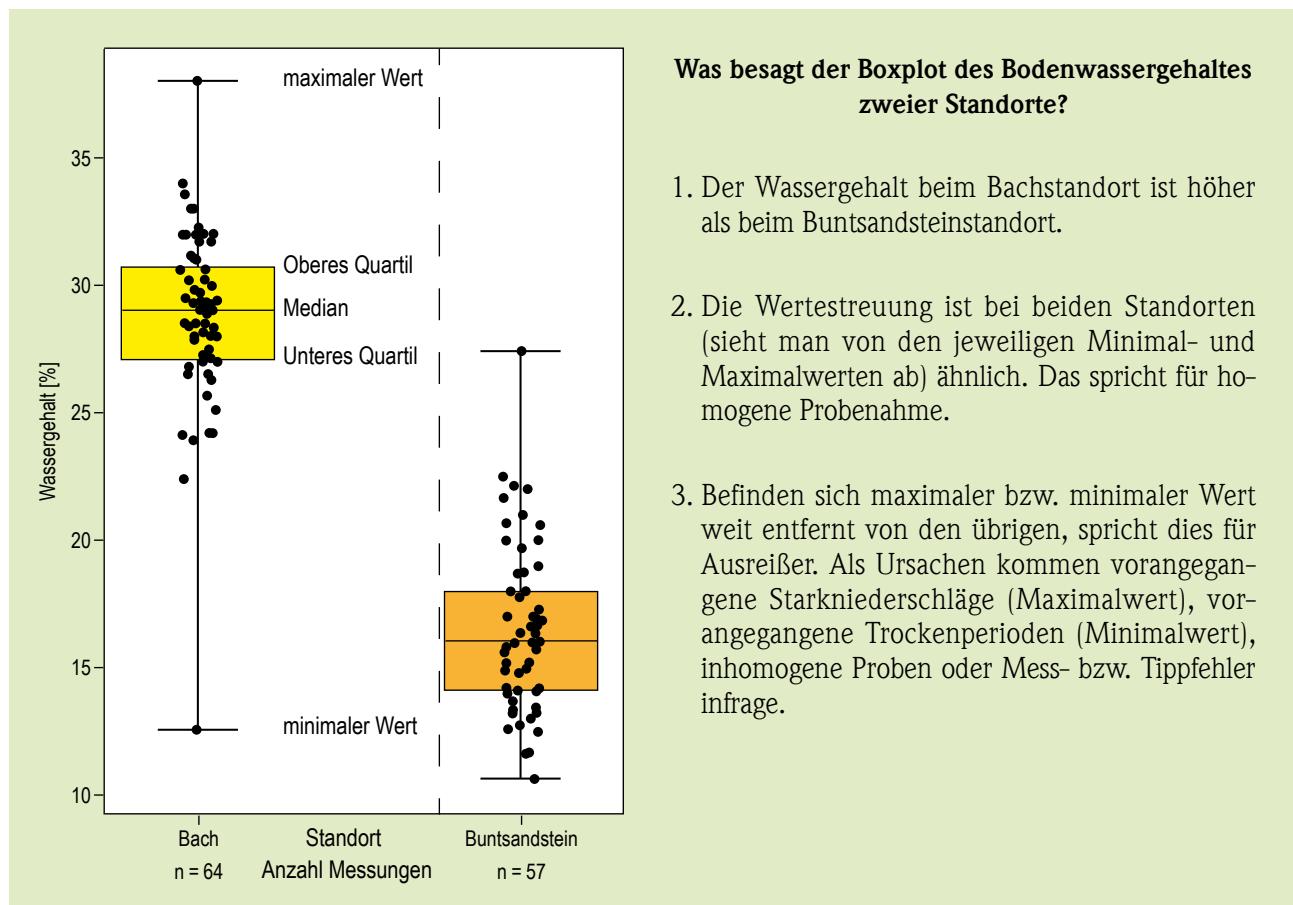


Abb. 18: Messungen von Temperatur, Luftfeuchte und Evaporation

### 3.5 Darstellung der Ergebnisse

Die Ergebnisse werden zum Teil in sogenannten Boxplots (auch Box-Whisker-Plots) dargestellt. Diese ermöglichen es, die Lage und Streuung der Werte einer Stichprobe zu veranschaulichen. Dargestellt werden vier Quartile, die jeweils 25 % der Daten abgrenzen. Der Bereich der Box umschließt die mittleren 50 %

der Werte. Die Querlinie in der Box ist der Median. Die Hälfte der Werte befindet sich über dem Median, die andere Hälfte darunter. In Abb. 19 wird an einem Beispiel dargestellt, wie die Boxplots interpretiert werden können.



**Abb. 19:** Erläuterungen zu den Boxplots am Beispiel der mittleren Wassergehalte zweier Standorte

## 4 Ergebnisse und Diskussion

Es werden die Ergebnisse von (maximal) 65 Praktika von 1989 bis 2024 dargestellt und diskutiert.

### 4.1 Artenzahlen und Zeigerwerte der Untersuchungsflächen

Bei einer ersten Begehung der vier Untersuchungsflächen erschienen diese den Praktikumsteilnehmern alle ähnlich (Zitat: „Laubwaldstandorte“). Bei Betrachtung der Krautschicht wurde jedoch deutlich, dass sich der Bach- und der Carbonatstandort hinsichtlich Bedeckungsgrad und Artenzahl der Krautschicht deutlich von den anderen beiden Untersuchungsflächen (Buntsandstein, Grauwacke) unterscheiden. Daher werden im Folgenden immer diese zwei Standorte den beiden übrigen gegenübergestellt.

Einen ersten Eindruck über die Unterschiedlichkeit der untersuchten Standorte vermitteln die Artenzahlen der Krautschicht (Abb. 20). Während am Bachstandort im Mittel 34 (gesamt 82) Arten aufgenommen wurden und beim Carbonatstandort 27 (gesamt 79), sind es beim Buntsandsteinstandort lediglich 11 (34) – also deutlich weniger als die Hälfte – und beim Standort „Grauwacke“ sogar im Mittel nur 7 (15) Arten. Diese Zahlen lassen bereits vermuten, dass die vier Untersuchungsareale hinsichtlich ihrer Eigenschaften für die Existenz der Krautschichtpflanzen höchst unterschiedlich sein müssen.

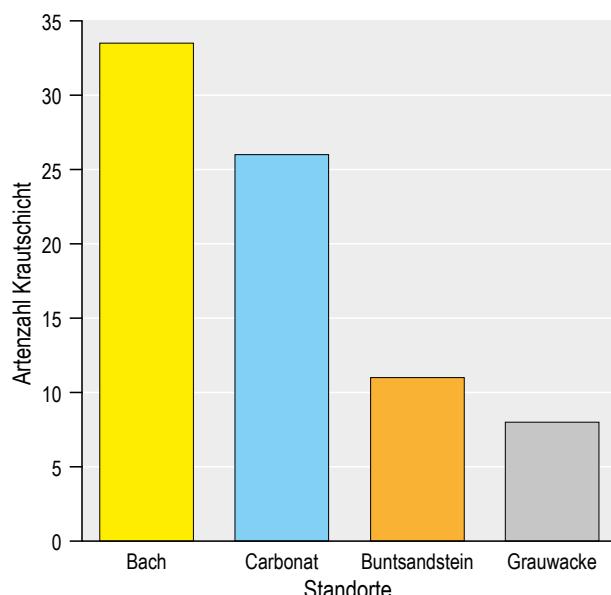


Abb. 20: Mittlere Artenzahlen der Krautschicht

Die Darstellung der Artenzahlen (und folgend auch die der mittleren Zeigerwerte) in Boxplots stellt die Variationsbreite der Ergebnisse aus den einzelnen Praktika dar (Abb. 21).

Folgende Ursachen für die Schwankungen der Artenzahlen eines Standortes über die 35 Jahre hinweg werden angenommen:

- Die Abgrenzung der Aufnahmeflächen erfolgt in jedem Praktikum neu und wird von jeder Gruppe durch eine Einschätzung der Homogenität im Gelände vorgenommen. Wenn die Flächen auch im Wesentlichen identisch waren, sind kleinere Abweichungen mit Variation der Artenzusammensetzung möglich.
- Die Vegetation kann aufgrund der Witterung in den Untersuchungsjahren unterschiedlich weit fortgeschritten sein. Als mögliche Folge sind einige Frühblüher (z. B. Scharbockskraut) zum Praktikumstermin nicht mehr zu finden, gehen nicht in die Artenliste ein und tragen somit ihren Zeigerwert nicht bei.

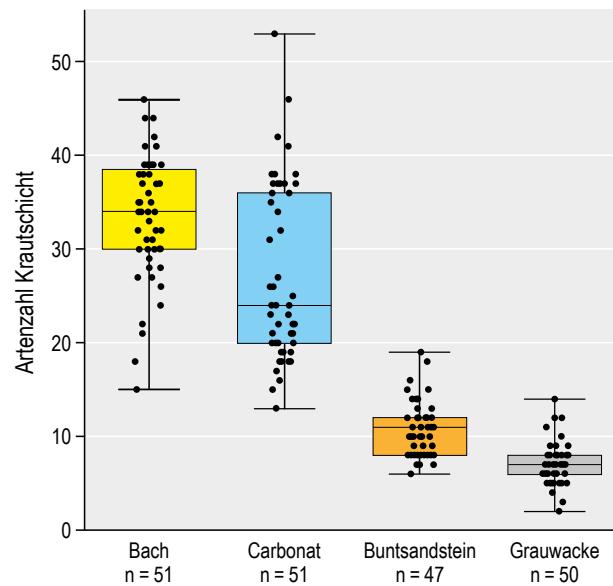


Abb. 21: Boxplots der mittleren Artenzahlen der Krautschicht

- Als Anfänger können die Studierenden selbst bei fachkundiger Anleitung durch die Lehrenden un auffällige Arten übersehen oder einzelne Exemplare falsch bestimmen. Hin und wieder sind auch botanisches Vorwissen, unterschiedliche Sorgfalt oder Ausdauer mögliche Ursachen für eine kürzere oder eine längere Artenliste.

Die Schwankungen der Artenzahlen (Abb. 21) sind insbesondere an den Standorten Bach und Carbonat auffällig hoch. Von den genannten Gründen spielt hier sicherlich die unterschiedliche Abgrenzung der Untersuchungsflächen eine große Rolle, denn auch die unmittelbare Umgebung der Standorte Bach und

Carbonat ist artenreich, so dass bei einer Verschiebung der Aufnahmefläche einige Arten in die Fläche aufgenommen werden können, die bei anderen Praktika nicht berücksichtigt worden sind. Artenzahlen von unter 20 am Bach, die zweimal gefunden wurden, sind nicht plausibel, aber im Nachhinein nicht mehr überprüfbar.

Wie sich im Folgenden zeigen wird, spielen die Unterschiede im Lichtangebot, bei der Bodenfeuchte, beim pH-Wert des Bodens und insbesondere auch beim Faktor Nährstoffangebot eine entscheidende Rolle für die vorkommenden Pflanzenarten.

#### 4.1.1 Faktor Licht

Der Faktor Licht ist für die Krautschicht des Waldes in zweierlei Hinsicht bedeutsam: Einerseits reguliert er den Temperaturhaushalt (kurzwelliges Sonnenlicht wird – sobald es auf eine Oberfläche trifft – in langwellige Wärmestrahlung umgewandelt), andererseits dient das Sonnenlicht als Energielieferant für die Photosynthese. Greift die Temperatur über die RGT-Regel in das Stoffwechselgeschehen der Organismen ein, so wirkt das am Waldboden meist geringe Sonnenlicht als Liebig'scher Minimumfaktor für die Photosynthese (und somit für das Wachstum) der Pflanzen. Weil alle vier Untersuchungsflächen Waldstandorte sind – und somit ähnliche Bedingungen aufweisen – ist davon auszugehen, dass der Faktor Licht hinsichtlich der ökologischen Unterschiedlichkeit der einzelnen Areale eine eher untergeordnete Rolle spielen dürfte.

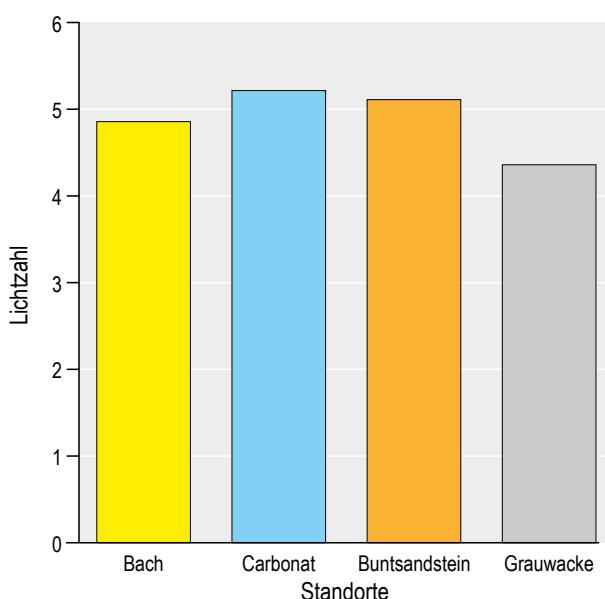


Abb. 22: Mittlere ungewichtete Lichtzahlen

Da im Praktikum aus Zeit- und Kapazitätsgründen keine kontinuierlichen Mikroklimadaten an den vier Untersuchungsstandorten erhoben (und mit den mittleren Lichtzeigerwerten verglichen) werden konnten, beschränkt sich dieses Kapitel auf die Darstellung der Zeigerwerte.

Die Lichtzahl der Waldpflanzen gibt die Ansprüche der Arten der Kraut- und Strauchsicht zur Zeit der vollen Belaubung der Bäume wieder. Es zeigt sich das erwartete Ergebnis (Abb. 22): Alle vier Standorte liegen hinsichtlich der Lichtzahl verhältnismäßig dicht beieinander, da es sich in allen Fällen um Buchenwaldstandorte handelt. Der dichte Baumbestand am Standort Grauwacke bei nordwestlicher Exposition ist verantwortlich für den niedrigsten Zeigerwert und damit Mitursache für die geringe Artenzahl in der

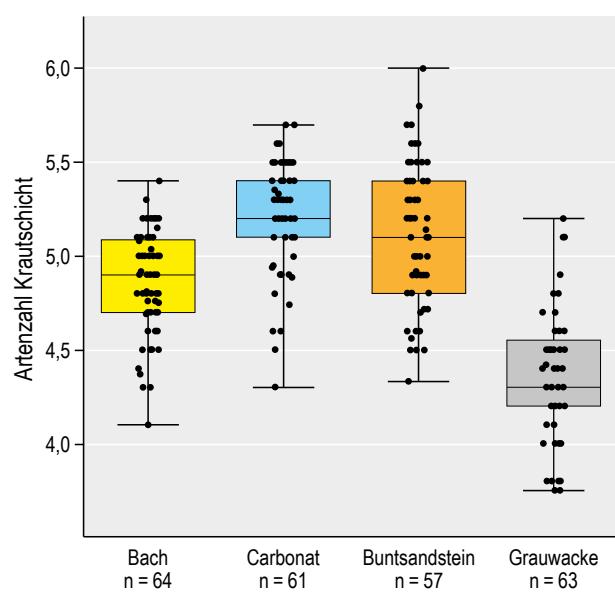


Abb. 23: Boxplots der mittleren Lichtzahlen

Krautschicht dieses Standortes (vgl. Abb. 20). Der Carbonat-Standort ist nach Süden exponiert, was zu einer vergleichsweise hohen Lichtzahl führt.

Die gefundenen mittleren Lichtzahlen weisen eine relativ hohe Streuung auf (Abb. 23); das gilt insbesondere für die Standorte Buntsandstein und Grauwacke. An beiden Standorten werden vor Ort besondere Bedingungen angetroffen, die die Streuung erklären können:

- Am Standort „Buntsandstein“ werden durch die darauf befindliche Wildfütterung standorttypische Arten (z. B. Ampfer-Arten) eingebracht. Diese Arten etablieren sich nicht dauerhaft. Da der

Standort jedoch insgesamt artenarm ist, können wenige dieser „Störarten“ den mittleren Zeigerwert verändern.

- Am Standort „Grauwacke“ werden durch die höher gelegenen, kalkbeeinflussten, Gebiete gelegentlich standorttypische Arten (z. B. Schwarzer Holunder, Große Brennnessel) temporär begünstigt – durch kalkreiches Niederschlagswasser, das vom darüber befindlichen Zechsteinkalk herabrinnt (Abb. 42). Auch hier kann beobachtet werden, dass diese Arten sich nicht dauerhaft ansiedeln, aber an dem artenarmen Standort in manchen Jahren Einfluss auf die mittleren Zeigerwerte nehmen.

## 4.1.2 Faktor Feuchte des Bodens

Die Bodenfeuchte hat für das Wachstum der Krautschicht eine große Bedeutung. Einerseits sind die Pflanzen auf ein  $\pm$  gleichmäßiges Wasserangebot für ein optimales Wachstum angewiesen, andererseits kann ein Zuviel an Bodenwasser zu anaeroben Verhältnissen führen, die sowohl den Pflanzenwurzeln als auch der sonstigen Bodenlebewelt Probleme bereiten. Wassermangel ist auf jeden Fall ein das Leben der Krautschicht begrenzender Liebig'scher Minimumfaktor.

Die Feuchte ist vor allem vom Niederschlagsangebot abhängig – und damit sehr raschem Wechsel unterworfen (allerdings, wegen der unmittelbaren Nachbarschaft der vier Standorte, für alle etwa gleich).

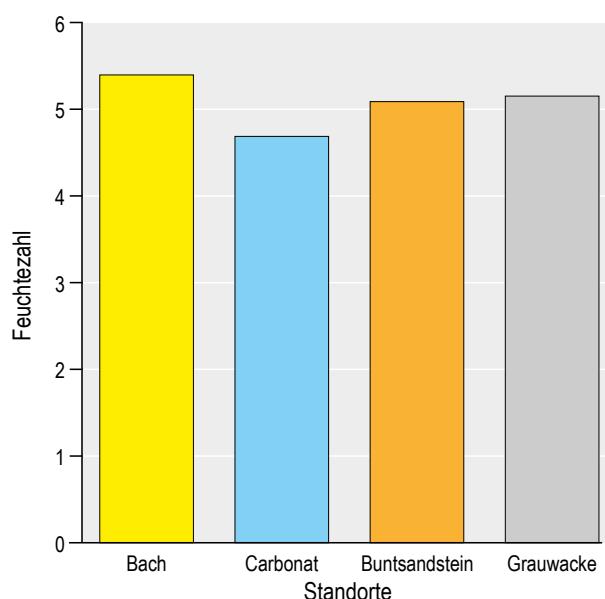


Abb. 24: Mittlere ungewichtete Feuchtezahlen

Unsere technischen Messungen des Wassergehaltes sind also wenig repräsentativ. Sie beschränken sich, streng genommen, auf den Tag der Bodenentnahme. Zusätzliche Variationen der Bodenfeuchte sind durch das Wasserhaltevermögen der unterschiedlichen Böden zu erwarten. Dieses ist wiederum u. a. vom Humusgehalt und der Bodenart abhängig, weshalb auch diese Faktoren erfasst wurden.

Die Ellenberg'sche Feuchtezahl beschreibt das Vorkommen der Pflanzen in der Abfolge der Bodenfeuchtigkeit von trocken bis nass. Hier werden zunächst die mithilfe der vorhandenen Krautschichtpflanzen gewonnenen mittleren Feuchtezahlen wiedergegeben (Abb. 24). Sie sind ökologisch repräsentativer als

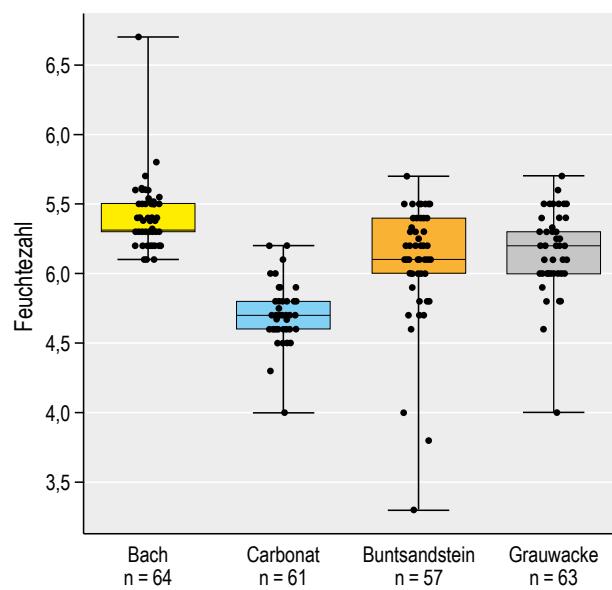


Abb. 25: Boxplots der mittleren Feuchtezahlen

die technisch gewonnenen Momentanwerte, weil sich die Pflanzen an die durchschnittlichen Feuchtebedingungen ihres meist mehrjährigen Lebens anpassen müssen.

Beim Faktor Bodenfeuchte schneidet der Carbonatstandort am schlechtesten ab – vermutlich eine Folge seiner Südexposition und der Tatsache, dass der im Untergrund befindliche Zechsteinkalk extrem wasserdurchlässig ist. Diese Verhältnisse lassen zeitweilige Wassermangelprobleme für die hier existierenden Krautschichtpflanzen vermuten – vor allem

im Sommer mit seinen höheren Temperaturen. Am besten schneidet hinsichtlich ihrer Feuchtezahl die Bachquellmulde ab, die ganzjährig gute Bodenfeuchtwerte erwarten lässt. Die Standorte Buntsandstein und Grauwacke nehmen eine mittlere Stellung zwischen den beiden Erstgenannten ein.

Die Befunde spiegeln sich auch in der Darstellung der Boxplots wider (Abb. 25). Die Schwankungen sind relativ gering und bestätigen darüber hinaus den Unterschied der Standorte Bach und Carbonat bezüglich der langfristigen Wasserversorgung der Pflanzen.

### 4.1.3 Faktor Reaktion (Säuregrad des Bodens)

pH-Werte, wie sie in unseren Böden gefunden werden, sind zwar für die Pflanzen selbst nicht direkt wirksam (toxisch); indirekt spielen sie jedoch für ihre Existenzmöglichkeiten eine wichtige Rolle (Abb. 26).

- Die chemischen Verwitterungsprozesse, die für die Freisetzung von Nährstoffionen aus dem Ausgangsgestein verantwortlich sind, nehmen mit ansteigendem pH-Wert ab.
- Ebenso nimmt die Mobilisierung/Verlagerung von Eisen und (toxischem) Aluminium ab.
- Auch die Verlagerung von Mangan geht mit steigendem pH-Wert zurück.
- Zunehmende Mobilisierung ist hingegen bei Ca und Mg zu erwarten.
- Viele wichtige Nährstoffionen werden im mittleren pH-Bereich verfügbar.
- Gleches gilt auch für biotische Faktoren, wie Humifizierung und die biotische Aktivität insgesamt.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass pH-Werte zwischen 5,5–6,5 (also im leicht sauren Bereich) optimal für die Krautschicht und die remineralisierenden Pilze und Bakterien im Boden sind. Bei pH-Werten < 4 ist für viele der betroffenen Bodenorganismen der Minimumswert für ihr Überleben erreicht – und das dauerhaft (siehe dazu auch [15]).

Im Gegensatz zu den Faktoren Licht und Wasser zeichnet sich der Säuregrad des Bodens durch eine außerordentliche Konstanz aus. Da er im Wesentlichen vom bodenbildenden Ausgangsgestein abhängt, sind Änderungen hinsichtlich dieses Faktors nicht zu erwarten. (Es sei denn durch menschengemachten Eintrag von Säuren – saurer Regen – oder durch Kal-

kung von Waldstandorten; letzteres ist bei unseren Standorten nicht geschehen).

Da sich die vier Standorte hinsichtlich der geologischen Ausgangssituation deutlich unterscheiden (s. u.), ist davon auszugehen, dass dieser Faktor sowohl die Artenzahl als auch den Bedeckungsgrad der Untersuchungsstandorte mit Pflanzen maßgeblich beeinflusst.

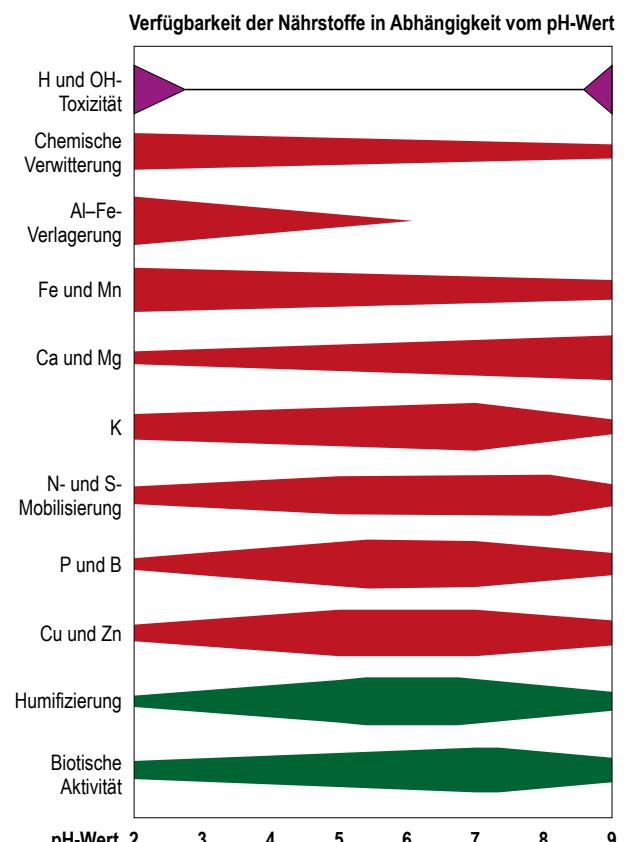


Abb. 26: pH-Wirkungen im Boden, verändert [10]

Die Reaktionszahlen der Krautschicht erlauben eine Aussage über den Säuregrad des Bodens. Hier ist eine deutliche Zweiteilung bei den Untersuchungsstandorten zu erkennen (Abb. 27): Während die Bach- und die Carbonatfläche Zeigerwerte um 7 (von 9) erreichen, finden sich die entsprechenden Reaktionszahlen beim Buntsandstein und der Grauwacke bei ca. 3. Wie oben ausgeführt, spielt der Säuregrad des Bodens u. a. eine wichtige Rolle bei der Mobilität der Nährstoffionen und bei der Remineralisierung der toten organischen Substanz – die beiden letztgenannten Standorte sind hier klar benachteiligt.

Wie diese Reaktionszahlen mit den technisch gemessenen pH-Werten korrelieren, wird weiter unten im Text dargestellt.

Der Boxplot zu den Reaktionszahlen (Abb. 28) lässt eine sehr geringe Wertestreuung erkennen; ein Hinweis auf die Konstanz dieser Werte. Die relativ hohe

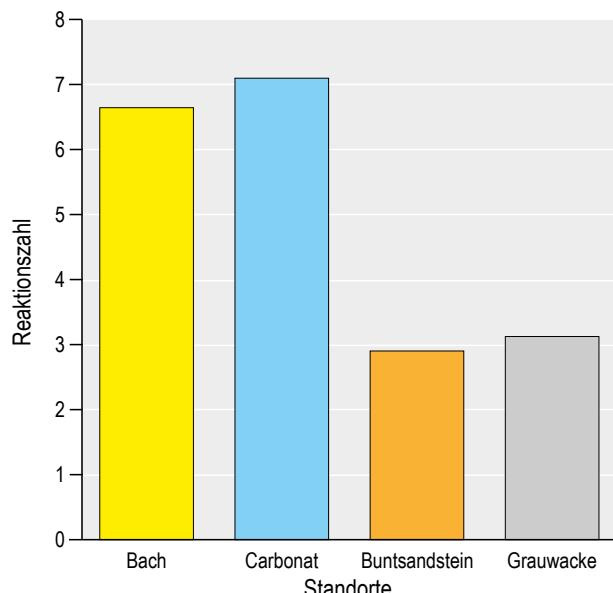


Abb. 27: Mittlere ungewichtete Reaktionszahlen

Streuung der Werte beim Standort Grauwacke lässt sich vermutlich folgendermaßen erklären: Der Standort weist bei den jährlichen Kartierungen der Krautschicht stets die geringsten Artenzahlen auf. Kommen hier nun sporadisch Arten mit untypisch hohen Zeigerwerten hinsichtlich der Reaktion vor (z. B. Kletten-Labkraut, Hain-Rispengras; siehe Anhang), so führt das zu einer erhöhten Streuung. Solche Arten treten – wie weiter oben bereits ausgeführt – gelegentlich in schmalen Rinnen auf, die bei Starkregen kalkreiches Niederschlagswasser vom darüber liegenden Zechsteinkalk zum Grauwackenstandort bringen – und dort den „natürlichen“ pH-Wert verfälschen. Diese – standortuntypischen – Arten können sich nicht dauerhaft auf dem sauren Boden etablieren, verfälschen aber den Durchschnittswert nicht unbedeutlich. Wir haben diese Arten bewusst nicht aus den entsprechenden Vegetationsaufnahmen gelöscht, um den Studierenden zu zeigen, welche „Fehler“ bei Arbeiten im Gelände auftreten können.

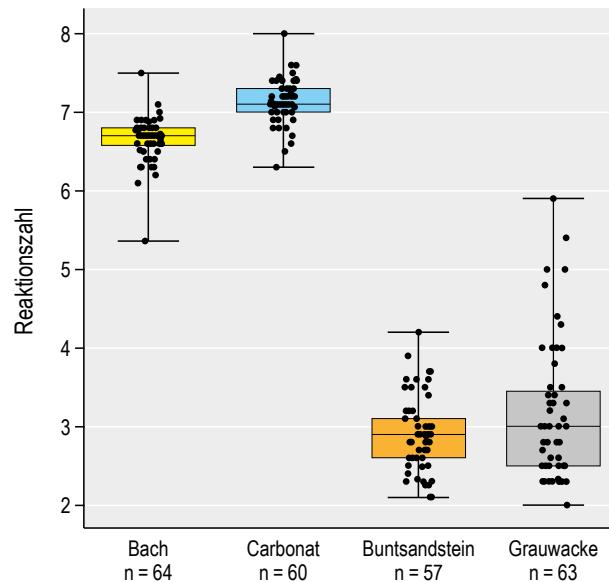


Abb. 28: Boxplots der mittleren Reaktionszahlen

#### 4.1.4 Faktor Stickstoff (Nährstoffversorgung)

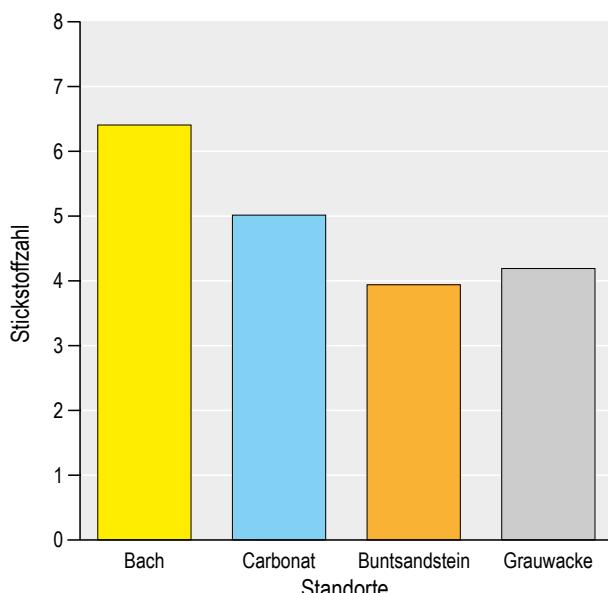
Das Nährstoffangebot spielt neben dem Licht-, Temperatur- und Wasserangebot ebenfalls eine bedeutsame Rolle hinsichtlich der Existenzmöglichkeiten für die Pflanzen der Krautschicht. (ELLENBERG [2] synonymisiert die Begriffe Stickstoff- und Nährstoffzahl, weil  $\text{NO}_3/\text{NH}_4$  die quantitativ wichtigsten Nährstoffe sind). Das Angebot an Nährsalzen ist einerseits von den chemischen Eigenschaften des Ausgangsgesteins

abhängig (primäres Angebot), zum anderen aber auch von der Rückverwandlung der in der Biomasse inkorporierten Nährstoffe. Dort liegen sie als organische Makromoleküle in Form der Kohlenhydrate, Lipide, Proteine und Nukleinsäuren vor. Ihre Remineralisierung in die chemischen Ausgangssubstanzen durch die Destruenten stellt eine sekundäre Nährstoffquelle für die nachwachsenden Pflanzen dar. Im Verlauf der

Evolution haben sich unter den Krautschichtpflanzen Spezialisten für nährstoffarme, nährstoffreiche und für mittlere Nährstoffangebote herausgebildet. Aus der Zusammensetzung der Krautschichtpflanzen eines Untersuchungsstandortes lassen sich also mittlere Zeigerwerte für die Nährstoffsituation errechnen. Sie vermitteln eine Vorstellung vom durchschnittlichen Nährstoffangebot auf der jeweiligen Fläche.

Während die mittleren Zeigerwerte für den Grauwacken- und Buntsandsteinstandort eine stickstoffarme bis mäßige Situation für die Krautschicht ausweisen, wird für die Carbonatfläche eine mäßige und für die Bachquellmulde sogar eine mäßige bis stickstoffreiche Situation angezeigt (Abb. 29).

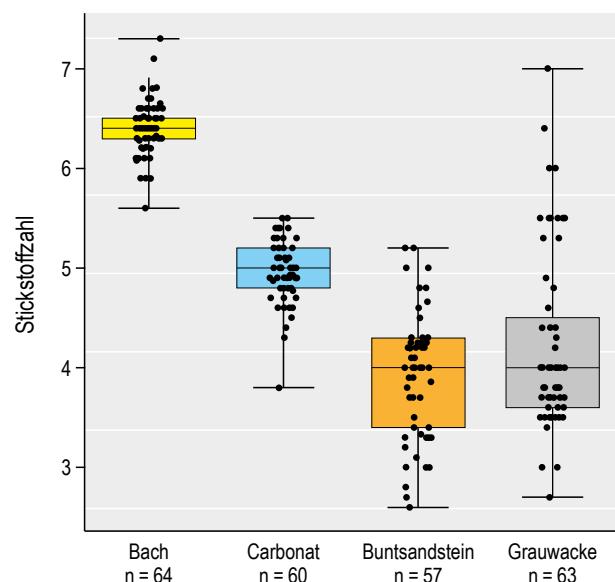
Es wird im weiteren Verlauf der Arbeit diskutiert werden, wie es zu dieser unterschiedlichen Ausgangslage kommt. Hier sei schon einmal darauf hingewiesen, dass die Unterschiede u.a. auf die unterschiedlichen pH-Werte der Böden zurückzuführen sind.



**Abb. 29:** Mittlere ungewichtete Stickstoffzahlen

Die relativ breite Streuung beim Buntsandsteinstandort (Abb. 30) dürfte auf folgende schon weiter oben beschriebene Besonderheit dieser Untersuchungsfläche zurückgehen: Einige Jahre nach Beginn unserer Erhebungen wurde vom Jagdpächter auf diesem Areal ein Wildfütterungsplatz eingerichtet. Das hatte zur Folge, dass dort immer wieder Fäkalien von Tieren abgesetzt wurden, die zu einer kurzzeitigen Verbesserung der Bodenqualität – und damit zur temporären Einwanderung von Nährstoffzeigerpflanzen führte.

Die Streuung am Grauwackenstandort hat hingegen natürliche Ursachen. Hier wird in kleinen Rinnen bei Starkregen gelegentlich kalkreiches Wasser vom darüber liegenden Carbonatstandort auf die Grauwacke gespült, was dort zu einer zeitweiligen Verbesserung der Nährstoffsituation führt (s.o.). Zwar wurden die Praktikumsteilnehmer von uns angewiesen, sich sowohl bei der Pflanzenaufnahme als auch bei der Entnahme der Bodenprobe von dem über der Grauwacke liegenden Zechsteinkalk möglichst fernzuhalten. Das scheint jedoch in einigen Fällen nicht ausreichend eingehalten worden zu sein.



**Abb. 30:** Boxplots der mittleren Stickstoffzahlen

## 4.2 Standortcharakterisierung anhand der Zeigerwerte

Anhand der Zeigerwerte, die die mittlere, langfristige Situation der vier Umweltfaktoren beschreiben, las-

sen sich die Standorte folgendermaßen charakterisieren.

### 4.2.1 Beschreibung des Standortes „Bachquellmulde“

Dieser Standort befindet sich in einer Mulde im Bereich des Grauwacken-Standortes, schwach (ca. 5°) nach NW geneigt (Abb. 31).

Er weist folgende Merkmale auf:

- Die Ellerberg'schen Lichtzahlen zeigen einen Halbschattenstandort, in dem die Pflanzen nur selten im vollen Licht stehen.



*Paris quadrifolia*



*Alliaria petiolata*



*Ajuga reptans*



*Geranium robertianum*

**Abb. 31:** Krautschicht der Bachquellmulde (mit einigen Zeigerarten)

- Die Feuchtezahlen deuten auf einen Frischbodenstandort mit Tendenz zum Feuchtboden hin.
- Die Reaktionszahlen sagen aus, dass der Boden ein Standort für Schwachsäure- bis Schwachbasenzeiger ist.
- Die Stickstoffzahlen zeigen an, dass es sich bei diesem Areal um einen stickstoff- und nährstoffreichen Boden handelt.

Diese rundum günstigen Bedingungen weisen die Bachquellmulde als besten der vier untersuchten Flächen aus, was die Artenvielfalt bestätigt, welche hier mit durchschnittlich 34 Species sehr groß ist. Im Vergleich zu den übrigen Standorten ist der Bedeckungsgrad in der Krautschicht sehr hoch (> 75 %).

#### 4.2.2 Beschreibung des Zechstein-Standortes „Carbonat“

Der Standort Carbonat befindet sich an der Schulter des Mittelrücks (Abb. 32) in leichter Hanglage (Steigung ca. 5°). Seine Ausrichtung nach Südsüdosten bewirkt von allen Standorten die längste und intensivste Sonneneinstrahlung. Er trägt einen mäßig starken Waldbewuchs.

Am Standort wurden in der Strauch- und Krautschicht im Durchschnitt 27 Arten gefunden; davon allein sechs Orchideenarten. Es handelt sich hier überwiegend um Arten, die mit zeitweiliger Trockenheit zureckkommen und auf eine nur mäßige Stickstoffversorgung angewiesen sind.



*Ophrys insectifera*



*Cephalanthera rubra*



*Primula veris*



*Aquilegia vulgaris*

**Abb. 32:** Krautschicht des Standorts Carbonat (mit einigen Zeigerarten)

Trotz der hohen Artenzahl ist der Bedeckungsgrad der Krautschicht mit ca. 15 % relativ gering.

Anhand der einzelnen Zeigerwerte können folgende Aussagen getroffen werden:

- Die Lichtzahlen zeigen an, dass es sich um einen Halbschatten-Standort handelt.
- Die Feuchtezahlen deuten darauf hin, dass sich im Bereich des Carbonatwaldes bevorzugt Fri-

schezeiger befinden; es ist jedoch auch mit zeitweiliger Trockenheit im Boden zu rechnen (er ist im Vergleich der deutlich trockenste Standort).

- Die Reaktionszahlen besagen, dass der Boden schwach sauer bis schwach basisch, niemals aber stark sauer ist (höchster Wert von allen vier Standorten).
- Der Stickstoffwert charakterisiert den Carbonat-Wald als mäßig nährstoffreichen Standort.

### 4.2.3 Beschreibung des Standortes „Buntsandstein“

Der Buntsandstein-Standort befindet sich in etwa gleicher Höhe wie der Carbonat-Standort (Abb. 33). Es handelt sich hierbei um eine nach SW exponierte, leicht schräge (ca. 10°) Fläche auf dem Grat des Mittelrücks, von ca. 50 m Durchmesser. Er zeichnet sich durch sehr lichten Baumbestand aus (Hain). Es kom-

men die gleichen Arten in der Krautschicht vor, wie am Grauwacken-Standort, allerdings ist die mittlere Artenzahl (11) geringfügig und der Bedeckungsgrad (< 10 %) deutlich höher; vermutlich eine Folge des höheren Lichtangebotes.



*Luzula luzuloides*



*Deschampsia flexuosa*



*Viola riviniana*

Abb. 33: Krautschicht des Standorts Buntsandstein

Anhand der Zeigerwerte ist er folgendermaßen zu charakterisieren:

- Die Lichtzahlen weisen ihn als am besten belichteten Standort aus. Neben Halbschatten- kommen hier auch Halblichtpflanzen vor. Die relative Beleuchtung dürfte selten < 20 % sein.
- Die Feuchtezahlen deuten auf einen mittelfeuchten Boden hin, die Krautschichtarten sind als Frischezeiger einzustufen .
- Die Reaktionszahlen zeigen an, dass es sich hier um sauren Boden handelt. Gegenüber der Bachquellmulde bzw. dem Carbonatstandort ist der Zeigerwert mehr als halbiert!
- Aus den Stickstoffzahlen ist zu ersehen, dass ein nährstoffärmer Boden vorliegt. Anhand der vor-

kommenden Pflanzen ist er als nährstoffärmer Standort einzustufen.

Auffallend ist, dass die Rotbuchen am Standort offenbar ideale Bedingungen vorfinden und starke Wüchsigkeit aufweisen (siehe Standortbild). Dieser scheinbare Widerspruch lässt sich damit erklären, dass die Wurzeln von ausgewachsenen Exemplaren von *Fagus sylvatica* offenbar bis unter den nährstoffarmen Buntsandsteinboden in den basenreichen Zechsteinkalk vorzudringen vermögen und sich dort mit den erforderlichen Nährstoffionen versorgen. (Siehe entsprechende Erläuterungen im Kapitel Geologie). Diese Quelle ist allerdings der von uns untersuchten Krautschicht verwehrt, weil sie mit ihren Wurzeln nicht tief genug hinabreicht.

#### 4.2.4 Beschreibung des Standortes „Grauwacke“

Am nordnordwestlich exponierten Steilhang (ca. 45°) über der paläozoischen Grauwacke kommen im Durchschnitt der 65 Erhebungen nur sieben Krautschicht-Arten vor (Abb. 34). Dies ist mit Abstand die geringste Artenzahl aller Standorte; der Bedeckungsgrad am Boden ist mit < 10 % ebenfalls sehr gering.

Die Charakterisierung lautet wie folgt:

- Die Lichtzahlen sagen aus, dass sich im Wald über der Grauwacke bevorzugt Schattenpflanzen bzw. Halbschattenpflanzen aufhalten. Die relative Beleuchtung wird in der Regel bei 5–10 % liegen. Im Vergleich ist dies der Standort mit dem geringsten Lichtangebot, was auch dem subjektiven Eindruck des Auges entspricht.
- Die Feuchtezahlen deuten auf einen Standort hin, an dem es zu keiner Zeit zu Wasserhaushaltsproblemen für die Pflanzen kommt.
- Die Reaktionszahlen zeigen an, dass es sich hier um sauren Boden handelt. Gegenüber der Bachquellmulde bzw. dem Carbonatstandort ist der Zeigerwert mehr als halbiert!
- Aus den Stickstoffzahlen ist zu ersehen, dass ein nährstoffärmer Boden vorliegt.

Eine zusammenfassende Darstellung der ökologischen Gegebenheiten mit Hilfe der existierenden natürlichen Vegetation lässt folgende Besonderheiten erkennen:

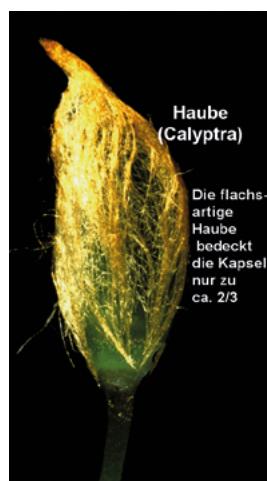
Die auf den ersten (und ungeschulten) Blick als gleichartige Waldökosysteme erscheinenden vier Standorte weisen charakteristische Unterschiede auf. Während die Bachquellmulde im Sinne des Liebig'schen Minimumgesetzes eine ausgeglichene pflanzenökologische Situation widerspiegelt, erscheint der Carbonatstandort – zumindest zeitweilig – als trockenheitsgefährdet. Die Standorte Buntsandstein und Grauwacke sind untereinander ähnlich. Sie heben sich von den zuvor genannten durch sehr niedrige Bodenreaktions- und Nährstoffwerte ab.

Die genannten Unterschiede treten bei einer Entfernung von lediglich ca. 500 m zwischen den beiden voneinander am weitesten entfernten Standorten auf. Diese Tatsache erscheint paradox und es stellt sich die Frage, ob eine Beurteilung mit Hilfe von lebenden „Messinstrumenten“ zu richtigen Ergebnissen führt. Dazu bedarf es weitergehender Untersuchungen und Erklärungen.

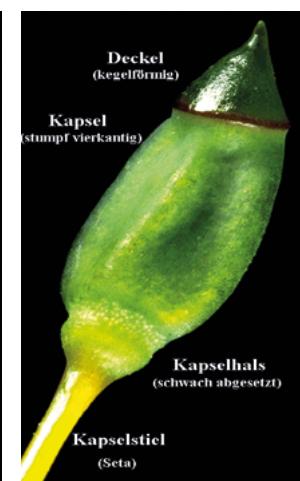
Um der Ursache für die o. g. Unterschiede auf den Grund zu gehen, wurden an allen vier Standorten „vor Ort“ bodenkundliche Untersuchungen durchgeführt. (Die Krautschicht des Waldes ist in starkem Maß von der Qualität des Bodens abhängig). Damit diese Unterschiede besser einzuordnen sind, wird zunächst ein kurzer Abriss über die geologische Situation des Untersuchungsgebietes gegeben. (Von den anstehenden Gesteinen wird die Bodenbildung maßgeblich beeinflusst).



*Atrichum undulatum*



*Polytrichum formosum (mit Kapseldetails)*



*Luzula luzuloides*

**Abb. 34:** Krautschicht des Standorts Grauwacke (mit Zeigerarten)

## 4.3 Geologische Entwicklung und Bodenentwicklung im Untersuchungsraum Nieder-Werbe/Edersee

Die Umgebung von Nieder-Werbe zeichnet sich durch große geologische Vielfalt aus (Abb. 35). Die folgende Darstellung zeigt in groben Zügen die geologische Entwicklung der vergangenen 360 Millionen Jahre auf [16, 17].

Im Erdaltertum (Paläozoikum), während des gesamten Unter-Karbons, vor ca. 361–323 Mio. Jahren, befand sich das Gebiet um Nieder-Werbe im Bereich eines Meeres. Im S existierte zu dieser Zeit ein Gebirge, die Mitteldeutsche Kristallinschwelle, im NNW der Old-Red-Kontinent. Von diesen Gebirgen wurde das verwitterte Material – vor allem durch Flüsse und Suspensionsströme – in die Senke abgelagert und dort in tiefere Meeresregionen transportiert.

Diese, über lange Zeiträume andauernde, Sedimentation führte zur Aufschüttung von 500 bis 1000 m hohen Geröll-, Sand- und Tonschichten am Meeresboden. Durch den Eigendruck und Ausfällung von bindigem Material im Meerwasser wurden diese Schichten zusammengedrückt, verkittet und verfestigt (Diagenese); aus den Geröllen entstanden Konglomerate, aus Mischmaterial Grauwacke, aus sandi-

gem Ausgangsmaterial Sandstein und aus Ton wurde Tonstein.

Im Oberen Karbon (vor ca. 323–299 Mio. Jahren) wurde dieser Meeresboden durch die variszische Gebirgsbildung emporgepresst. So gelangten die Sand- und Tonsteine des Nieder-Werber Raumes unter erhöhte Temperaturen und Drücke. Dementsprechend kam es hier zu Faltungs-, Schieferungs- und Überschiebungerscheinungen. Dies hatte zur Folge, dass aus den Gesteinen häufig geschieferte Abkömmlinge entstanden. Durch die Gebirgsbildung wurden die Schichten aus ihrer horizontalen Lage z. T. schräg gestellt (Abb. 42).

Während des gesamten Ober-Karbons und Unter-Perms (Rotliegendes) war der Nieder-Werber Raum Abtragungsgebiet, so dass aus dieser Zeit keine neuen Gesteinsbildungen festzustellen sind; ein erheblicher Teil der unterkarbonischen Schichten wurde abgetragen.

Im Oberen Perm (Zechstein) senkte sich ganz Mitteleuropa von Norden nach Süden fortschrei-

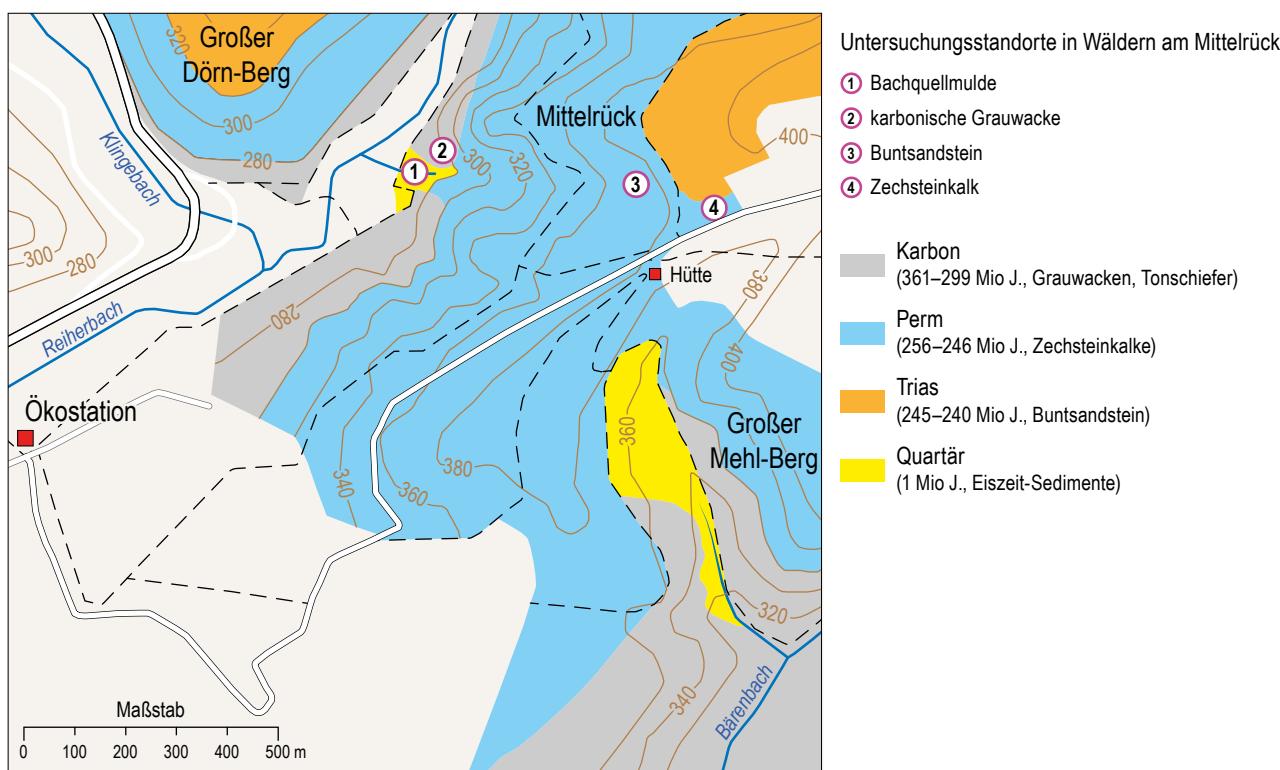
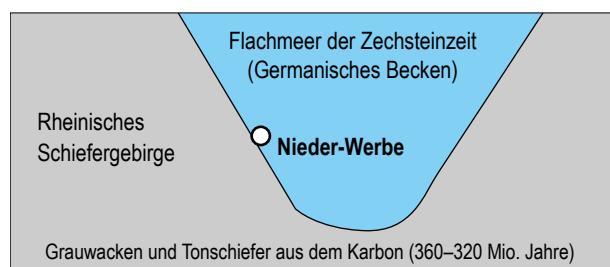


Abb. 35: Geologische Verhältnisse in den Waldgebieten um Nieder-Werbe

tend, allmählich ab. Aus dem Gebiet der heutigen Nordsee überflutete ein sehr flaches Meer die Senke (Abb. 36). Nieder-Werbe lag, infolge von Schwankungen des Meeresspiegels, teilweise im Randbereich, teils auch direkt an der Küste.

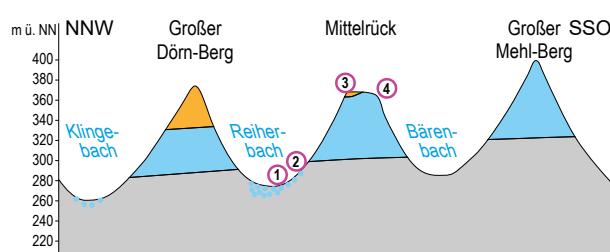
In diesem flachen Meer entstanden bei subtropischen Temperaturen im küstennahen Bereich carbonatische Materialien, die v.a. durch kalkbildende Algen, Muscheln, Moostierchen und – vereinzelt – Korallen und Seelilien aufgebaut wurden. Es kam zur Bildung von kompakten Kalkbänken, die aus den Resten dieser Organismen bestehen. An der Grenzschicht zum darunterliegenden unterkarbonischen Gestein drang der im Meerwasser gelöste Kalk z.T. in die Grauwacken und Tonschiefer ein.



**Abb. 36:** Schematische Darstellung der geologischen Situation am Edersee im Ober-Perm (Zechstein) vor ca. 256–246 Mio. Jahren



**Abb. 37:** Geologische Situation am Edersee in der Unteren Trias (Buntsandstein-Formation) vor ca. 245–240 Mio. Jahren. (Die schematische Profil-Darstellung berücksichtigt nicht die Faltung bzw. Schräglage der Schichten durch tektonische Ereignisse). Alle im Untersuchungsgebiet vorhandenen Gesteine gehören zur Gruppe der Ablagerungsgesteine (Sedimentite).



**Abb. 38:** Heutiges Querprofil durch das Gebiet nördlich von Nieder-Werbe (Schema)

An der Wende zwischen Paläozoikum und Mesozoikum, in der Unteren Trias (Buntsandstein) erfuhr das Nieder-Werber Gebiet eine erneute Umgestaltung: Das Meer trocknete über weite Zeiträume aus, das Becken aber blieb bestehen (es weitete sich sogar noch erheblich nach Süden aus). So wurde aus den umgebenden Gebirgen weiterhin über Jahrtausende hinweg (vor allem sandiges) Material hinein transportiert und abgelagert; es bildeten sich dicke Sandsteinschichten über dem Zechsteinkalk aus (Abb. 37). Da dieser Prozess in einem oligotrophen (nährstoffarmen) Milieu ablief, färbten sich die Sandsteine rot. (Die Farbe ist auf eine dünne Hämatithülle zurückzuführen, die die Oberfläche der Quarzkörner bzw. Schluffkörner umgibt). Es entstand der Buntsandstein.

Seit Auffüllung des Beckens ist der Nieder-Werber Raum kaum mehr marin gewesen. (Geringmächtige Sedimente aus dem Muschelkalk sind längst wieder abgetragen worden). Kleinere Hebungsorgänge in diesem Bereich (bzw. Absenkung der weiteren Umgebung) führen seit ca. 220 Mio. Jahren dazu, dass die Region Abtragungsgebiet ist: Es bildete sich ein Fließgewässersystem aus, das zunächst vor allem die Buntsandsteinschichten abtrug. Dies geschah besonders im Südteil des Untersuchungsgebietes, da die Bäche zur im Süden befindlichen Eder hin entwässern. In diesem Bereich ist der Buntsandstein fast gänzlich abgetragen und die darunterliegenden Zechsteinkalke treten zutage.

Im Tertiär (vor ca. 65 Mio. Jahren) begann sich die afrikanische Kontinentalplatte gegen Europa zu schieben; die alpidische Gebirgsbildung setzte verstärkt ein. Als Folge der tektonischen Unruhe im Alpenraum wurde auch unser Untersuchungsgebiet nochmals leicht angehoben; die Reliefenergie nahm zu, wodurch die Fließgewässer eine verstärkte Erosionskraft erhielten. Daraus resultierte eine beschleunigte Eintiefung der Bäche: Reiher- und Klingenbach haben in ihrem (südlichen) Unterlauf den Buntsandstein sowie den Zechsteinkalk durchschnitten und sind dort mittlerweile im Bereich der unterkarbonischen Grauwacken und Tonschiefer angelangt (Abb. 38). Teilweise haben sie sich auch schon bis ca. 20 m in diese eingesägt. Die Hänge sind – vor allem im Kalk – extrem steil, da die Eintiefung mit großer Geschwindigkeit erfolgte.

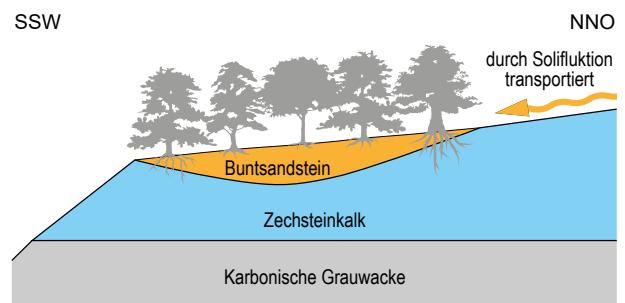
Legt man einen Schnitt von Westnordwest nach Ostsüdost durch Abb. 35 (siehe dort), so ergibt sich ein Profil, wie es in Abb. 38 dargestellt ist: Während

auf dem Großen Dörnberg noch der Buntsandstein liegt, ist er vom Mittelrücken fast und vom Großen und Kleinen Mehlberg vollständig abgetragen worden. Klinge- und Reiherbach beginnen gerade, sich in die unterkarbonischen Schichten (Grundgebirge) einzutiefen. Dagegen hat der Bärenbach sich bis heute schon mindestens 30 m tief in das Grundgestein (Grauwacke, Tonschiefer) gesägt, weil im SSO alle Formationen etwas höher über NN liegen als im NNW. In den Bachtälern vermischt sich von den Hängen abgetragenes Grob- und v.a. Feinmaterial. Das Buntsandsteinmaterial ist inzwischen weitgehend hinwegtransportiert worden (in Richtung Nordsee). Im Sediment des Reiherbaches findet sich überwiegend kalkhaltiges Material, da er sich noch kaum in das Grundgestein eingegräst hat; im Bachbett des Bärentalbaches liegt dagegen kaum noch Material aus dem Zechstein, da die Erosionsbasis sich schon zu weit vom Kalk entfernt hat.

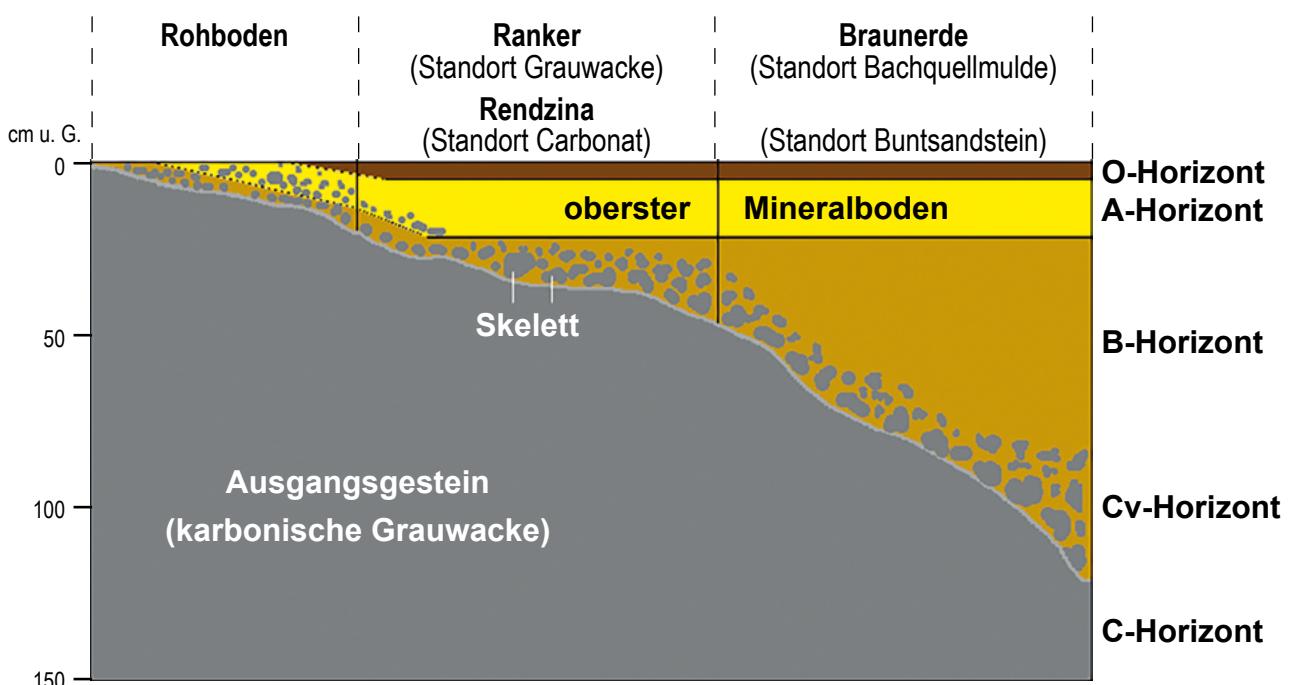
Während der Eiszeit (Pleistozän; seit ca. 1,6 Mio. Jahren) war das Untersuchungsgebiet zwar nicht vom Eis bedeckt, der Boden an den steilen Hängen aber rutschte infolge von Solifluktion (Bodenfließen) weitgehend in die Bachtäler ab; an den Hängen blieb oft nur der anstehende Fels mit dem grobsteinigen Verwitterungsmaterial übrig.

In der (aktuellen) Zwischeneiszeit – seit ca. 15 000 Jahren – bildeten sich aus diesem Ausgangsmaterial durch physikalische, chemische und biologische Prozesse junge Böden aus, die vielfach nur als maximal 10–50 cm dicke Horizonte auf dem Ausgangsgestein liegen.

Eine besondere Situation stellt sich am Standort 3 (Buntsandstein) dar: Wie aus der geologischen Karte (Abb. 35) zu ersehen ist, befindet sich dort kein anstehender Buntsandstein mehr; er wurde vor vielen Jahrtausenden abgetragen. Im Pleistozän rutschten durch Solifluktion Bodenbestandteile vom nordöstlich gelegenen Buntsandstein in südwestliche Richtung den Hang hinab und blieben als ca. ein Meter



**Abb. 39:** Transport von Bodenmaterial aus dem anstehenden Buntsandstein in eine Mulde des Zechsteinkalkgebietes durch Bodenfließen (Solifluktion) während der Eiszeit



**Abb. 40:** Entwicklungsschema von Bodentypen an den vier Untersuchungsstandorten

dicke Schicht in einer Bodenmulde am Standort 3 auf dem dort anstehenden Zechsteinkalk liegen (Abb. 39) [18]. Hier steht also heute eine periglaziale Solifluktionserde an (sie ist allochthon; d.h., nicht aus dem anstehenden Gestein entstanden).

Die geologische Ausgangssituation hat in mehrfacher Weise Auswirkungen auf die Bodenbildung:

- Die verschiedenen Ausgangsgesteine verwittern unterschiedlich rasch und führen zu extrem unterschiedlichen Böden (die kalkhaltigen Gesteine aus dem Zechstein verwittern zu basenreichen Böden mit günstigen pH-Werten; die quarzreichen Grauwacken des Karbons und die Buntsandsteine der Trias bringen außerordentlich nährstoffarme und saure Böden hervor).
- Infolge der Steilheit der Hänge kommt dort die Erosion nicht zum Erliegen; dadurch wird hier die Entwicklung tiefgründiger Böden verhindert (Neubildung und Abtragung halten sich die Waage).
- Das von oben nach unten sedimentierte Feinmaterial bleibt teilweise auf den hangabwärts folgenden – geologisch verschiedenen – Bereichen liegen und beeinflusst dort die Bodenbildung.

- Im Zechsteinkalk werden mit dem Niederschlag Kalksalze ausgewaschen. Dieses Wasser tritt an der Grenze zur Grauwacke diffus oder als Quellen aus und beeinflusst so ebenfalls die (an sich sauren) Böden über den Grauwacken und Ton-schiefern.

Die Entwicklung der Böden im Bereich der Untersuchungsstandorte bei Nieder-Werbe nach dem letzten Glazial lief etwa nach folgendem Schema ab (Abb. 40) [19]: Befindet sich über dem anstehenden Gestein lediglich grober Verwitterungsschutt (Skelett; Cv-Horizont) mit wenig Feinboden, spricht man von einem Rohboden. Dieser ist kleinräumig auch im Untersuchungsgebiet vorhanden (auf Bergkuppen, nackten Felsen). Schreitet die Verwitterung fort und bildet sich eine ca. spätentiefe Mineralbodenschicht aus (A-Horizont), so spricht man in der Bodenkunde von einem Ranker – sofern das Ausgangsgestein silikatischer Natur ist. Befindet sich im Untergrund carbonatisches Gestein, entsteht eine Rendzina. Ist die Verwitterung noch weiter fortgeschritten und der Feinbodenanteil über dem Skelett beträgt mehrere Dezimeter, so bildet er einen farblich und stofflich vom A-Horizont zu unterscheidenden B-Horizont aus. Solche Böden werden als Braunerden bezeichnet. Liegt auf dem Oberboden tote organische Substanz auf (was im Wald die Regel ist), so wird diese Schicht als O-Horizont bezeichnet.

		<b>Rohhumus</b>		<b>Moder</b>		<b>Mull</b>	
		Humus-lagen					
Boden-horizont		OI	Unzersetzte Laubstreu	L			
Of			Laub fleckig, Blätter kleben teilweise zusammen (Fermentationsschicht)	F	Unzersetzte Laubstreu	L	
Oh			(Humusschicht)	H	Fermentationsschicht	F	Unzersetzte Laubstreu
Ah	Oberster Mineralboden	H	A	Humusschicht vermischt mit Mineralboden	H	A	Boden-oberfläche
Ae	Mineralboden hell infolge von Ionenauswaschung		B	Mineralboden braun infolge von Ioneneinwaschung	B	Laubstreu stark zerkleinert (Humusschicht)	H
C	Anstehendes Gestein		C	Anstehendes Gestein	C	Mineralboden braun infolge von Ioneneinwaschung	Anstehendes Gestein

Abb. 41: Waldhumusformen und Bodenhorizonte; verändert [21]

Die organische Auflage wird von den Destruenten (Remineralisierer; v. a. Pilze, Bakterien) im Verlauf der Zeit wieder in ihre anorganischen Ausgangsprodukte zurückverwandelt. Unter günstigen Bedingungen geschieht das rasch (innerhalb eines Jahres) [20]. Dann ist die Auflage nur wenige cm stark und besteht lediglich aus den im Herbst gefallenen Blättern und abgestorbenen Resten der Krautschicht. Liegt eine derartig dünne Schicht vor, spricht man von Mull als Humusform (Abb. 41). Werden die Destruenten in ihrer Tätigkeit durch ungünstige Bedingungen gehemmt (u. a. niedrige Temperatur, Wassermangel oder Staunässe, niedriger pH-Wert des Bodens), bildet sich in der organischen Substanz eine dreigeteilte Schichtung aus: Oben liegt die unzersetzte Streu des Vorjahres (L = Litter). Darunter findet sich die Fermentationsschicht (F), erkennbar daran, dass die braune Laubstreu Verfärbungen (helle Flecken) und Verklebungen der Blätter durch weiße Pilzfäden aufweist. Schließlich folgt nach unten die Humusschicht (H), in der die Zersetzung so weit fortgeschritten ist,

dass man die Struktur des Ausgangsmaterials nicht mehr erkennen kann. Ist diese schwarze Schicht plattig brechend und alle drei Schichten sind zusammen mehrere Dezimeter stark, so wird diese Form als Rohhumus bezeichnet. Sie ist ein Hinweis darauf, dass es viele Jahre dauern kann, bis die organische Auflage wieder remineralisiert ist – und erst dann den nachwachsenden Pflanzen erneut als wasserlösliche Nährsalze zur Verfügung steht. Eine Zwischenform zwischen Mull und Rohhumus wird als Moder bezeichnet (Abb. 41).

Die Entwicklung der Böden hängt im Wesentlichen von folgenden Faktoren ab:

- Ausgangsgestein
- Klima (Temperatur, Niederschläge)
- Hangneigung
- Zur Verfügung stehende Zeit

## 4.4 Bodenkundliche Untersuchungen im Gelände

### 4.4.1 Bach-Standort

Bei der Bachquellmulde, die sich am Fuß des Mittelrücks befindet, wäre an sich wegen der Einwehung von Laub von oben (sowie der hohen Anzahl von abgestorbenen Krautschichtindividuen der eigenen Fläche) ein dicker O-Horizont zu erwarten gewesen. In der Realität wurde aber bei unseren alljährlich im späten Frühjahr stattfindenden ökologischen Praktika nie mehr als eine ca. 1 cm starke Auflage aus dem Laub des letzten Herbstanes (O) vorgefunden. Damit ist hier die Humusform als L-Mull (Abb. 41) zu bezeichnen, ein Hinweis auf optimale Abbau- bzw. Remineralisierungs-Bedingungen.

Das Bodenprofil zeigte einen ca. 20 cm mächtigen, wenig humosen (und damit wegen der fehlenden Schwärzung optisch schlecht erkennbaren) A-Horizont. Darunter fand sich ein >1 m mächtiger „verbraunter“ B-Horizont; der darunterliegende C-Horizont konnte wegen der Tiefgründigkeit des Bodens nicht ergraben werden. Als Bodentyp wurde am Bach-Standort eine allochthone Braunerde angesprochen, die während des Glazials durch Solifluktion (Bodenfließen) aus darüberliegendem Buntsandstein-, Zechsteinkalk- und Grauwackenverwitterungsmate-

rial entstanden war (einige Steinfunde im ausgegraben Boden belegen diese Vermutung; der Prozess setzt sich bis heute fort). Die Bodenart ergab nach der Fingerprobe einen lehmigen Ton; wegen der geringen Schwärzung wurde der A-Horizont alsmäßig humos eingeschätzt; der pH-Wert lag zwischen 6 und 7. Bei der HCl-Probe kam es zu schwachem Aufbrausen, was auf Kalkanteile im Boden hinwies.

Auf der Grundlage dieser Erkenntnisse lassen sich auch hier die von den standorttypischen Pflanzen gemachten „Aussagen“ bestätigen:

- Der Wasserhaushalt ist wegen der austretenden Quellen ganzjährig optimal.
- Im Lufthaushalt könnten infolge Porenschlusses durch Wasserübersättigung (v. a. im Frühjahr) leicht anaerobe Verhältnisse auftreten und damit den mikrobiellen Abbau zwar nicht zum Erliegen bringen, ihn aber verlangsamen (Wechsel vom aeroben zum anaeroben Abbau). Infolge des relativ hohen Kalkgehaltes wird diese Gefahr aber verringert. Selbst wenn derartige Verhältnisse gelegentlich auftreten sollten, so sind sie doch eher

im Winterhalbjahr mit seinen niedrigen Temperaturen und der damit verbundenen geringeren Verdunstung zu erwarten; zum Sommer hin wird der Abbau der toten organischen Substanz sicher nie beeinträchtigt.

- Daraus ergeben sich für den Nährstoffhaushalt ideale Bedingungen: Die Destruenten finden einen günstigen pH-Wert, reichlichen Nachschub an toter organischer Substanz (von oben und vom eigenen Standort), sowie ganzjährig gute Wasser-

haushaltsbedingungen vor. Dies erklärt den totalen Abbau der gesamten jährlich anfallenden Nekromasse und die fehlende Schwärzung des A-Horizontes. Hinzu kommen günstige Nachschubbedingungen von Kationen aus dem kalkhaltigen Feinmaterial des Bodens, weil der geringere pH-Wert (im Vergleich zum Carbonat-Standort) die Freisetzung der Nährstoffionen nicht erheblich behindern kann (siehe auch die Resultate entsprechender Versuche im Labor).

#### 4.4.2 Carbonat-Standort

Am Carbonat-Standort fand sich eine verhältnismäßig dicke Laubauflage (7–10 cm). Im Gegensatz zu den beiden unten beschriebenen Flächen (Buntsandstein/Grauwacke) sind hier die Schichten undeutlicher abgegrenzt, so dass die Humusform als typischer Moder (Kalkmoder) eingestuft werden konnte.

Im Profil zeigte sich ein ca. 20 cm mächtiger, schwarz gefärbter und gut durchwurzelter A-Horizont über ca. 40 cm starkem, sandig ausgeprägtem Cv und darunter liegendem Zechsteinkalk. Der autochthone Bodentyp mit A–C-Profil über carbonatischem Ausgangsgestein ist eine Rendzina. Als Bodenart wurde mittels Fingerprobe ein lehmiger Schluff mit sehr guter Krümelstruktur diagnostiziert. Die starke Schwärzung des A-Horizontes wies auf einen hohen Humusgehalt hin. Der pH-Wert des Bodens lag bei > 7. Im Gegensatz zu den übrigen Böden ergab eine HCl-Probe ein andauerndes Aufbrausen, belegte demzufolge einen hohen Kalkgehalt.

Auch an diesem Standort lassen sich die durch die Pflanzen ermittelten Charakteristika des Standortes verifizieren:

- Am Carbonat-Standort herrschen infolge der guten Krümelstruktur des Bodens ideale Lufthaushaltsbedingungen.
- Infolge des hohen Humusgehaltes besitzt er eine gute Wasserkapazität, so dass er nach Niederschlag noch eine Zeitlang feucht bleibt. Dieser positive Aspekt wird aber durch folgende Tatsachen, zumindest zeitweilig, relativiert: Wegen der Lage an der Hangkuppe gibt es keine Wasserzufluss von weiter oberhalb; das Niederschlagswasser stößt nach seinem Durchtritt durch den humosen

A-Horizont auf eine extrem wasserdurchlässige Kalksandschicht und darunter auf den ebenso durchlässigen Zechsteinkalk. Erschwerend kommen noch die leichte Südlage, der lichte Baumbestand sowie die verhältnismäßig gute Windzugängigkeit des Standortes hinzu. Daher muss davon ausgegangen werden, dass am Carbonat-Standort der Wasserhaushalt bestenfalls als mäßig einzustufen ist – und dass sich die Verhältnisse zum Sommer hin noch verschlechtern. Unter diesen Umständen ist zu erwarten, dass die Remineralisierer in der an sich günstigsten Jahreszeit (Sommer → RGT-Regel) ihre Aktivität weitgehend einstellen müssen.

- Unter Berücksichtigung dieses Fakts muss auch der Nährstoffhaushalt als eher mäßig eingestuft werden (meso- bis oligotroph), weil die Destruktion zeitweilig zum Erliegen kommt. Auch die Nachlieferung von Nährsalzen aus dem Ausgangsgestein wird sich wegen des hohen pH-Wertes und des hohen Humusgehaltes als nicht optimal erweisen, weil wegen der geringen Anzahl an Protonen kaum Ionenaustausch stattfinden kann und außerdem die riesigen inneren und äußeren Oberflächen des humosen A-Horizontes ein außerordentlich gutes Bindungsvermögen für Kationen aufweisen.

An dieser Stelle muss allerdings hervorgehoben werden, dass der Minimumfaktor „Wassermangel“ nicht permanent vorhanden ist, so dass sich die ökologische Situation an diesem Standort wesentlich günstiger darstellt als bei den beiden weiter unten beschriebenen (Buntsandstein-, Grauwackenstandort).

### 4.4.3 Buntsandstein-Standort

Zunächst erfolgte eine Beurteilung der Streu-Auflage (O-Horizont) hinsichtlich der Dicke und der Schichtung. Daraus ergaben sich für den Buntsandstein-Standort folgende Erkenntnisse:

Er weist eine dicke Laubschicht (>15 cm) auf, die allerdings infolge der guten Windzugängigkeit des Haines größtenteils abgeweht wird. Es waren drei deutlich voneinander abgegrenzte Schichten (Ol-Of-Oh) zu erkennen, wobei Oh sich als plattig und brechbar erwies. Nach dieser Beobachtung handelt es sich hierbei um einen Moder mit Tendenz zu Rohhumus (Abb. 41).

Im Profil zeigte sich keine Horizontierung im Mineralboden (wird von der Rotfärbung durch Eisen überdeckt); der Bodentyp ist an diesem Standort eine Braunerde. Auf dem Waldstück finden sich überall faustgroße Buntsandsteinbrocken. Abgesehen von der Rötung des Buntsandsteinbodens durch Eisen, war keine Graufärbung zu erkennen, was eine Einstufung als „humusarm“ zwingend erscheinen ließ. Der pH-Wert zeigte im Oberboden <4 an, womit sich die Säurezeiger der Krautschicht (z.B. Waldbürttenmoos, Weiße Hainsimse, Drahtschmiele, Gemeine Glockenheide) erklären lassen. Nach unten nimmt der pH-Wert allerdings zu und erreicht in ca. 1m Tiefe Werte >6. Darunter folgt ein C-Horizont, der mit HCl aufbraust, also carbonatischer Natur ist. Wie im Kapitel „Geologie“ erläutert wurde, handelt es sich hierbei um eine allochthone periglaziale Solifluktionserde aus dem nördlich angrenzenden Buntsandsteingebiet. Sie wurde als Braunerde angesprochen. Als Bodenart erfolgte eine Charakterisierung als sandig-schluffiger Lehm.

Fasst man diese geologisch-bodenkundlichen Resultate zusammen, so werden auch hier die von den Pflanzen-Zeigerwerten vorgestellten Ergebnisse bestätigt:

- Der Wasserhaushalt des Standortes ist mäßig, weil einerseits der fehlende Humus die Wasser-

kapazität beeinträchtigt. In die gleiche Richtung wirkt der hohe Sandanteil (verwittertes Buntsandsteinmaterial) und der darunter vorhandene – wasserdurchlässige – Zechsteinkalk. Hinzu kommen die Lage am Bergrücken, die einen Wasserzufluss von oben verhindert, sowie die offene, windige Situation.

- Die niedrigen pH-Werte werden durch das anstehende Buntsandsteinmaterial erklärt. Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass die Zeigerwerte (hier: Reaktionszahl) an allen vier Standorten (und auch über die 35 Jahre des Untersuchungszeitraums hinweg) immer gut mit den gemessenen pH-Werten übereinstimmen (Abb. 51). Dies ist plausibel, weil beide Werte eine Langzeitsituation beschreiben.
- Bezüglich des schlechtesten Zeigerwertes für die Nährstoffsituation lassen sich ebenfalls aus den bodenkundlichen Ergebnissen Erklärungen finden: Das Ausgangsgestein des Bodenmaterials (Buntsandstein) verwittert zu basenarmen Böden, weil Buntsandstein überwiegend aus Quarz besteht. Wie die dicke Humusauflage belegt, findet an diesem Standort darüber hinaus kaum Remineralisierung statt. Ursache hierfür ist der ganzjährig vorhandene Minimumsfaktor pH-Wert < 4. Unter diesen Bedingungen finden die bakteriellen Destruenten kaum Überlebensmöglichkeiten. Hinzu kommt die ungünstige Wasserhaushaltssituation, sowie die Tatsache, dass ein Teil der Laubauflage in tiefere Lagen abgeweht wird. Außerdem finden sich am Standort überwiegend schwer zersetzbare Blätter von Rotbuche und Eiche, sowie einiger junger Fichten.

Das Paradoxon der starkwüchsigen Rotbuchen lässt sich mit der Tatsache erklären, dass diese – im Gegensatz zur Krautschicht – in der Lage sind, mit ihren tief reichenden Wurzeln den unter dem Buntsandsteinboden anstehenden Zechsteinkalk „anzupfen“ und dadurch die erforderlichen Ionen für ihre Stoffwechselbedürfnisse zu gewinnen (Abb. 39).

### 4.4.4 Grauwacken-Standort

Die geologisch-bodenkundlichen Erhebungen am Grauwackenstandort führen zu ähnlichen Resultaten wie beim Buntsandstein-Hain. Hier ist die Laubauflage nicht ganz so dick, aber die Schichtung in Ol-Of-

Oh ist ebenfalls zu erkennen. Als Humusform wurde ein Moder mit Tendenz zum Rohhumus ermittelt. Das Profil legte einen sehr skelettreichen, flachgründigen A-C-Boden frei (Bodentyp Ranker, mit ca. 15

cm dickem, humusarmem A-Horizont über ca. 10 cm Cv; s. Abb. 40. Das anstehende Gestein wurde als leicht geschieferter, karbonische Grauwacke identifiziert. Die Bodenart ist ein schluffiger Lehm, der durch Verwitterung aus der Grauwacke – also autochthon – entstanden ist. Aufgrund fehlender Schwärzung/Graufärbung ist auch dieser Boden als humusarm einzustufen. Der pH-Wert lag, wie beim Buntsandstein-Standort, unter 4.

- Der Wasserhaushalt wurde – trotz der starken Hanglage – als ganzjährig ausreichend eingestuft (Abb. 43), weil einerseits die schiefrige Grauwacke als wenig wasserdurchlässig zu beurteilen ist, andererseits aber auch, weil an der Grenze zum darüber liegenden, wasserdurchlässigen Zechsteinkalk ständig Wasser in Form kleiner Quellen oder auch diffus austritt (Abb. 42).
- Die niedrigen Reaktionszahlen der Pflanzen werden auch hier durch den niedrigen pH-Wert bestätigt (Abb. 51).
- Dieser, immer vorhandene, Liebig'sche Minimumfaktor erklärt auch den geringen Zeigerwert für Stickstoff: Wenngleich der Luft- und Wasserhaushalt dieses Standortes besser ist als beim Buntsandstein und auch die Laubzufuhr von oben gegeben ist, können diese positiven Faktoren nichts gegen den niedrigen pH-Wert ausrichten. Die geringfügig höhere Nährstoffzahl (Abb. 29)

wird vermutlich daher resultieren, dass mit dem hangaufwärts austretenden Wasser geringe Kalkmengen in den Grauwackenstandort einsickern.

Zusammenfassend lässt sich feststellen: Die ökologischen Verhältnisse der vier Waldstandorte lassen sich mit Hilfe der Vegetationsaufnahme hinreichend genau darstellen; eine Ergänzung durch geologisch-bodenkundliche Erhebungen mit geringem technischem Aufwand „vor Ort“ verstärkt und bestätigt die Aussagen, die sich mit Hilfe der Zeigerwerte der Krautschichtpflanzen machen lassen.

Da die angehenden Umweltingenieure aber während ihres Studiums überwiegend technische Messungen durchzuführen und zu interpretieren gewohnt sind, wurden einige der vor Ort erfassten Boden-Parameter anschließend im Labor mit chemisch-physikalischen Methoden überprüft bzw. ergänzt. Hierzu gehören u. a. Messungen der Wasserkapazität, des Wasser-, des Kalk- und des Humusgehaltes, des pH-Wertes, der Konzentration an Nitrat- und Ammonium-Stickstoff, des Kationen-Bindungsvermögens, sowie die Erfassung der bodenbiologischen Aktivität.

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse dieser Messungen wiedergegeben und es wird diskutiert, ob (und gegebenenfalls wie) sie die Aussagen der Zeigerwerte bestätigen – bzw. ihnen widersprechen.



Abb. 42: Steinbruch mit (wasserdurchlässigem) Zechsteinkalk über geschieferter Grauwacke

## 4.5 Bodenkundliche Untersuchungen im Labor

In diesem Abschnitt geht es bei vielen der Versuche darum, die Prozesse der Remineralisierung der toten organischen Substanz zu verstehen und abzuschätzen, welche der vier Untersuchungsstandorte die günstigsten und welche eher ungünstige Vorausset-

zungen für den sekundären Nährsalznachschub aufweisen.

Die Werte beziehen sich jeweils auf den A-Horizont, aus dem die Mischprobe entnommen wurde.

### 4.5.1 Aktueller Wassergehalt

Der aktuelle Boden-Wassergehalt ist stark abhängig von der Regenmenge, die vor der Messung an den Stellen der Bodenprobenahme aufgetreten ist. Da diese von Jahr zu Jahr (aber auch von Tag zu Tag) starken Schwankungen unterliegt, ist ein Vergleich des aktuellen Wassergehaltes mit der Feuchtezahl nicht angebracht (Abb. 43), da der erstere einen momentanen Wert darstellt, während der Zeigerwert Feuchte die Wasserhaushaltsbedingungen über ei-

nen längeren Zeitraum widerspiegelt. Entsprechend hoch ist demzufolge auch die Streuung der Werte (Abb. 44). An diesem Beispiel lässt sich zeigen, dass technische Messwerte und biologische Erhebungen zu unterschiedlichen Aussagen führen können. Der aktuelle Wassergehalt ist für die ökologische Charakterisierung eines Untersuchungsstandortes wenig brauchbar; hier ergeben die Zeigerwerte aussagekräftigere Resultate.

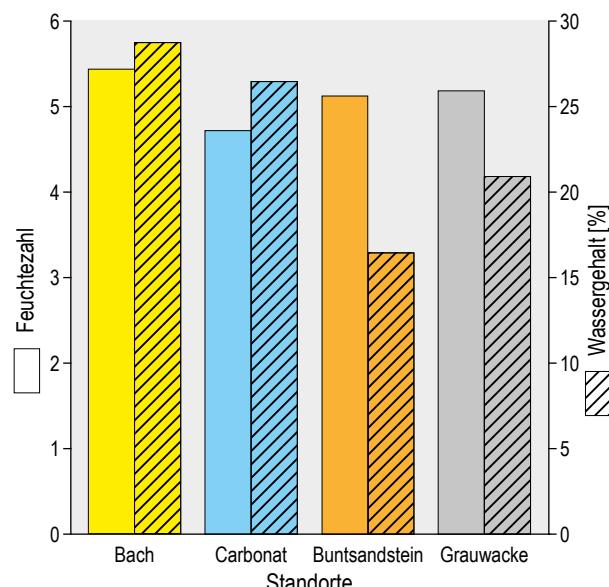


Abb. 43: Vergleich der Boden-Wassergehalte mit der Feuchtezahl der Krautschicht

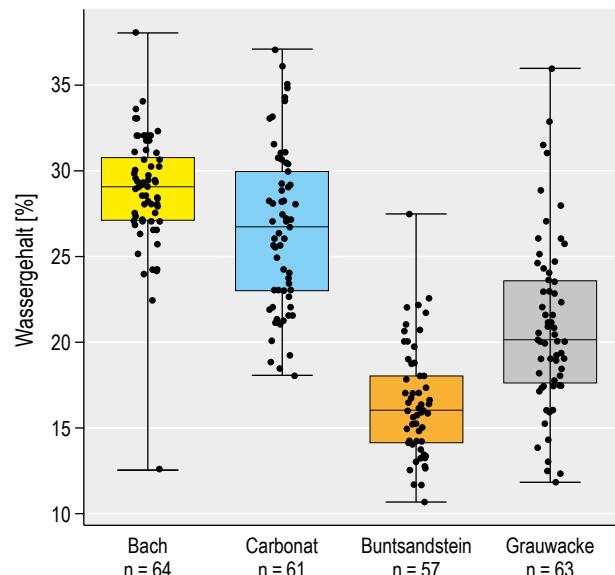


Abb. 44: Boxplots der Boden-Wassergehalte

### 4.5.2 Maximale Wasserkapazität und Humusgehalt

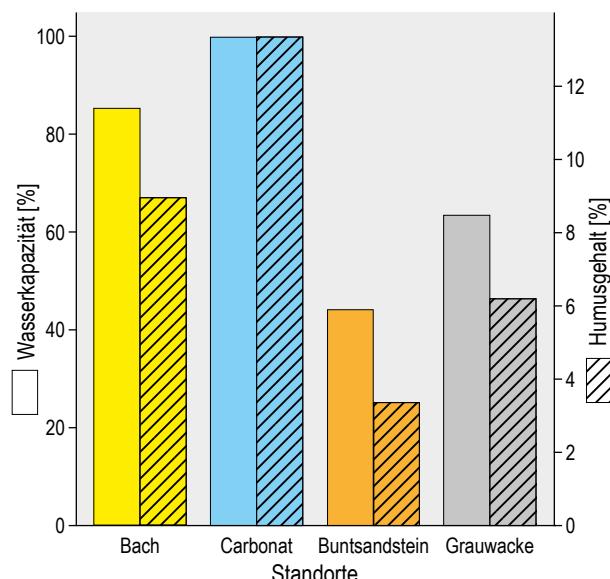
Die maximale Wasserkapazität – und in begrenztem Umfang auch der aktuelle Wassergehalt – sind abhängig von der Bodenart (Korngrößenzusammensetzung) und vom Humusgehalt des Bodens, da Humus wegen seiner großen inneren und äußeren Oberflächen die Eigenschaft besitzt, Wasser in hohem Ausmaß speichern zu können. Dieser Zusammenhang wird aus Abb. 45 ersichtlich: Je höher der Humus-

gehalt, umso besser ist die Wasserkapazität. Die Wasserkapazität (Wasserhaltevermögen) entscheidet wiederum darüber, wie lange sich das Wasser nach einem Regen im Oberboden halten kann (und damit der Krautschicht und den Destruenten zur Verfügung steht), ehe es schließlich verdunstet bzw. nach unten versickert.

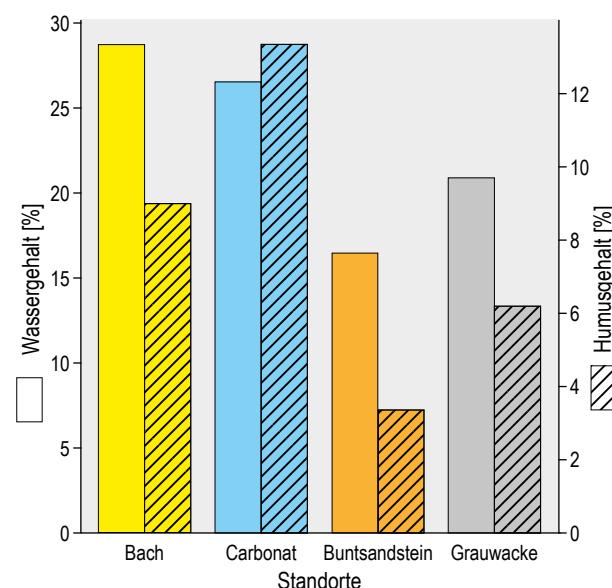
Der weitaus höchste Humusgehalt liegt am Carbonatstandort vor, was vor allem mit der geringen Destruententätigkeit in der sommerlichen Trockenphase zu erklären ist: In dieser Zeit sind die Mikroorganismen nicht in der Lage, die tote organische Substanz bis zu den mineralischen Endprodukten umzuwandeln; der Humus verharrt als Zwischenprodukt, weil Wassermangel ein absoluter Minimumfaktor für ihre Tätigkeit ist. Das „Versprechen“ auf Zufuhr von sekundär gebildeten Nährstoffionen wird während der sommerlichen Trockenheit an diesem Standort nicht eingelöst. Im Frühjahr hingegen, zumindest in der Zeit unserer Untersuchungen, kann der Humus

– wegen geeigneter Temperaturen und noch ausreichendem Wasser im Boden (Abb. 43) – remineralisiert werden.

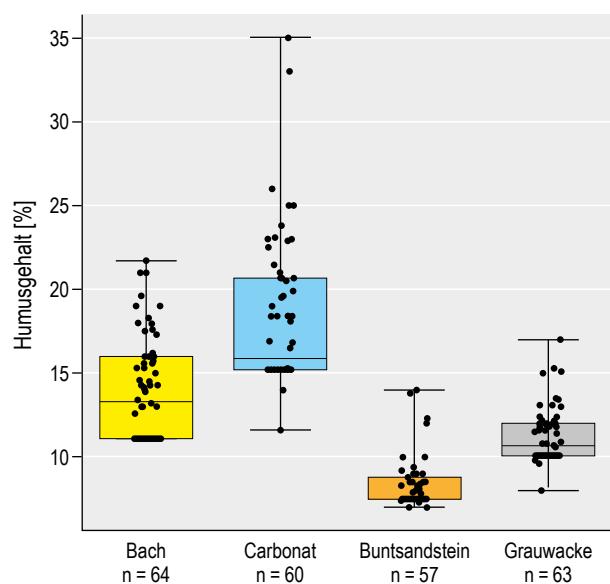
Am Bachstandort ist der Humusgehalt trotz der starken Laubeinweihung niedriger als am Carbonatstandort, weil die organische Auflage dank der überwiegend günstigen Feuchtebedingungen im Boden für den Abbau der Laubstreu durch die Mikroorganismen im Sommer sehr rasch remineralisiert wird. Beim Grauwacken- und Buntsandstein-Standort verhindert der ganzjährig niedrige pH-Wert als Liebigscher Minimumfaktor einen Abbau der organischen



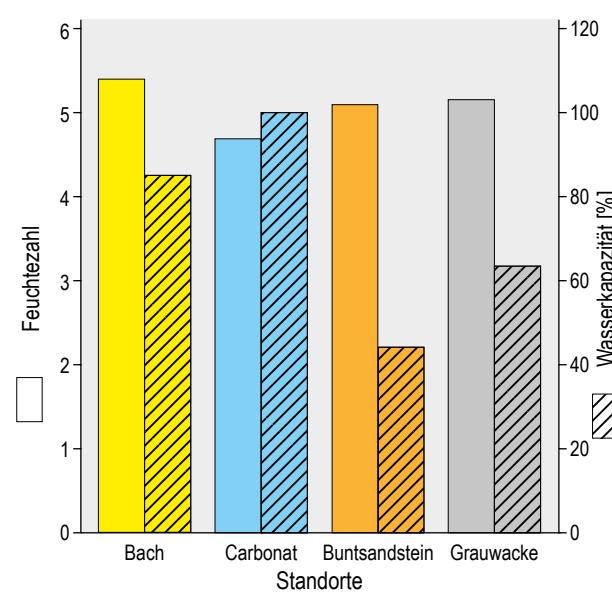
**Abb. 45:** Vergleich der Wasserkapazität mit den Humusgehalten



**Abb. 46:** Vergleich der Wassergehalte mit den Humusgehalten



**Abb. 47:** Boxplots der Humusgehalte



**Abb. 48:** Vergleich der Feuchtezahl mit der Wasserkapazität

Substanz fast vollständig; es wird kaum Feinhumus gebildet, der in den Oberboden eingearbeitet und dann remineralisiert werden könnte.

Für alle Untersuchungsstandorte zeigt sich die Abhängigkeit des Wasserhaltevermögens (Wasserkapazität) von der jeweils vorhandenen Humusmenge.

Aus Abb. 46 geht hervor, dass eine vergleichbare Abhängigkeit der Wassergehalte mit dem vorhandenen Humus nicht gegeben ist; die ermittelte Wassermenge im Boden ist vor allem vom Niederschlag der vorangegangenen Zeit abhängig.

Die starke Schwankung der Humusgehalte am Carbonatstandort (Abb. 47) hat vermutlich folgende Ursache: Bei der Probenahme wurde versehentlich nicht nur A-Horizont, sondern zusätzlich ein Teil des humusreichen O-Horizontes in die Bodenprobe verbracht. Dies betrifft jedoch nur zwei Werte, die bei

der Mittelung der Humusgehalte unbedeutend sind.

Auch der Vergleich der Feuchtezahl der Krautschicht mit der Wasserkapazität der untersuchten Flächen zeigt keine Beziehung zwischen den beiden Messgrößen (Abb. 48). Offenbar ist die Feuchtezahl weder vom aktuellen Wassergehalt noch von der Wasserkapazität abhängig. Ersteres war zu erwarten, weil der Gehalt eine Momentansituation beinhaltet. Da aber die Wasserkapazität sich nicht ständig ändert, wäre hier eher eine Korrelation zwischen den beiden Parametern zu erwarten gewesen. Vermutlich spiegelt die Feuchtezahl ein Konglomerat unterschiedlicher Einflussgrößen wider. Dazu gehören sicher die Gesamt-niederschlagsmenge im Leben der Krautschichtpflanzen, sowie deren Verteilung über den Jahresverlauf. Weiterhin spielen die Faktoren Temperatur, Wind, Verdunstung (sowie auch das Wasserhaltevermögen des Bodens) eine Rolle.

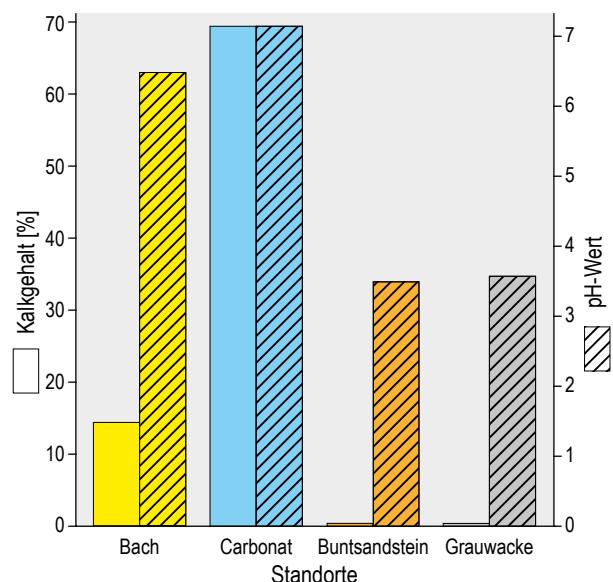
### 4.5.3 pH-Wert und Kalkgehalt

Wie bereits im Kapitel 3.3.3 ausgeführt wurde, kommt dem Säuregrad des Bodens eine entscheidende Rolle für die Existenzmöglichkeiten von Pflanzen und Mikroorganismen zu: Optimal ist der leicht saure bis subneutrale Bereich (Abb. 26).

Die Bodenreaktion wirkt sich u.a. auf die Bodenstruktur, die Humifizierung und vor allem auf die Nährstoffmobilisierung aus: Bei niedrigem pH-Wert wird viel toxisches  $Al^{3+}$  freigesetzt; die Nährstoff-Ionen  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $K^{+}$ ,  $PO_4^{3-}$  und  $MgO$  treten ebenfalls in die wässrige Phase über und werden in unserem humiden Klima ins Grundwasser ausgewaschen. Bei zu hohen pH-Werten hingegen werden  $Fe^{3+}$ ,  $Mn^{2+}$  und  $PO_4^{3-}$  sowie Spurenelemente in schwerlöslicher Form festgelegt, wodurch die Verfügbarkeit für Pflanzen abnimmt. Bezieht man alle Parameter ein, erweist sich ein pH-Wert zwischen 5,5 und 6,5 als bester Kompromiss zwischen den teilweise gegensätzlichen „Anforderungen“ der einzelnen Größen. Bei pH-Werten unter pH 4 enden für die meisten Detrituenten – vor allem die Bakterien – die Überlebensmöglichkeiten.

In Abb. 49 sind die im Labor gemessenen pH-Werte der vier Standorte neben den entsprechenden Kalkgehalten aufgetragen. (Zur Verwendung des arithmetischen Mittels von pH-Werten des Bodens siehe [22]). Es zeigen sich gravierende Unterschiede zwi-

schen den hohen pH-Werten vom Carbonat- und vom Bachstandort einerseits und extrem niedrigen Werten der Buntsandstein- und der Grauwackenfläche andererseits. Beim Carbonatareal ist der hohe Kalkgehalt des Ausgangsgesteins (Zechsteinkalk) als Ursache deutlich erkennbar. Beim Bach ist es die Quelle, die von oberhalb aus dem Zechsteinkalk ständig carbonatreiches Wasser (und Feinboden) von oben in



**Abb. 49:** Vergleich der mittleren Kalkgehalte mit den mittleren pH-Werten

den Grauwackenbereich einträgt (siehe hierzu auch Abb. 42). Weder der Buntsandstein- noch der Grauwackenstandort können von dieser Zufuhr kalkreichen Wassers profitieren. (Beim Grauwackenstandort haben wir versucht, den Einfluss des Kalkes zu verhindern, indem wir einen ca. 10 m breiten Grenzstreifen zum Zechsteinkalk bei unseren Untersuchungen gemieden haben).

Man kann aus Abb. 49 erkennen, dass Kalkgehalt und pH-Wert miteinander korrelieren.

Der Kalk reagiert mit den Säuren im Boden und neutralisiert sie, wodurch der pH-Wert ansteigt.

Der Carbonatboden (pH = 7,1) weist einen mittleren Kalkgehalt von 69 % auf. Dieser hohe Kalkanteil führt im Boden zur Bildung von stabilen Calciumhumatkrümeln, die einerseits die gute Krümelstruktur des Standortes begründen und damit zu einem günstigen Lufthaushalt im Boden sowie zu einer guten Durchwurzelbarkeit führen. Andererseits sind sie aber auch für die mäßige Nährstoffversorgung der Pflanzen mitverantwortlich, weil die Humuskrümel eine sehr hohe Bindungskapazität für die Nährstoff-Kationen besitzen und sie nicht den Pflanzenwurzeln zur Verfügung stellen. Außerdem verlangsamen sie wegen ihrer Stabilität den Abbau durch die Remineralisierer (siehe Versuch zur Krümelstabilität, Abb. 53).

An zweiter Stelle folgt der Bachstandort (pH = 6,5) mit 14 % Kalkgehalt. Der pH-Wert von 6,5 liegt im

Optimalbereich für die Aktivität der Destruenten; hier kann also ein rascherer Abbau der toten organischen Substanz angenommen werden. Dass der Bachstandort trotz seiner Lage über silikatischem Grundgestein einen recht hohen pH-Wert aufweist, hängt auch damit zusammen, dass, infolge von Solifluktion, Feinmaterial vom höher gelegenen Carbonatgestein heruntergebracht wird und dort liegen bleibt.

Die beiden sauren Standorte Grauwacke und Buntsandstein sind fast kalkfrei, wobei in niederschlagsreichen Jahren am Grauwackenstandort wegen der Auswaschung von oben gelegentlich sehr geringe Kalkgehalte (bis 0,3 %) gemessen wurden. Dieser Umstand dürfte auch für den geringfügig höheren pH-Wert gegenüber dem Buntsandsteinstandort verantwortlich sein. Für beide Standorte gilt: Wegen des geringen Kalkgehaltes fehlen wichtige, primär vorhandene, Nährsalze. Der extrem niedrige pH-Wert verhindert darüber hinaus als konstanter Minimumsfaktor eine funktionierende Destruententätigkeit.

Die höhere Streuung der pH-Werte am Bachstandort (Abb. 50) ist auf einen ungleichmäßigen Kalkeintrag von oben auf das Untersuchungsareal zurückzuführen.

Wie aus Abb. 51 zu ersehen ist, stimmen die Reaktionszahlen der Krautschicht gut mit den gemessenen pH-Werten überein. Das ist verständlich, weil die pH-Werte im Boden über lange Zeiträume ± konstant sind und die Pflanzen sich auf diesen, für ihre

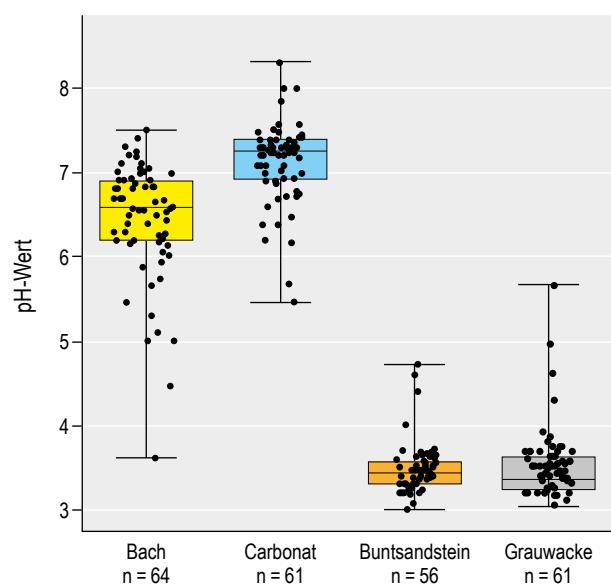


Abb. 50: Boxplots der pH-Werte

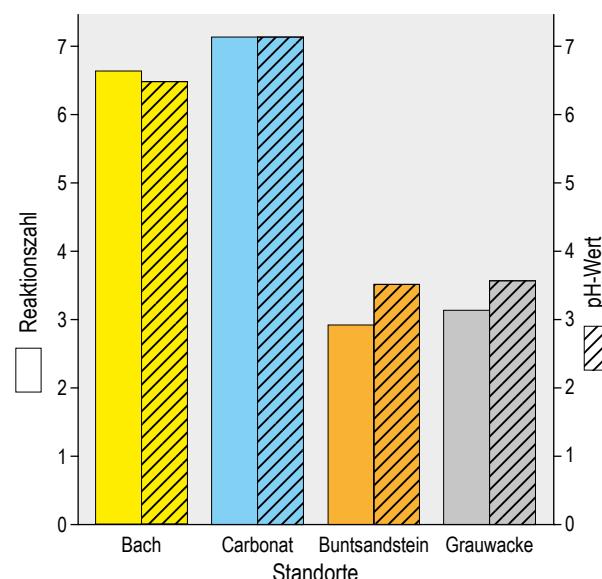


Abb. 51: Vergleich der mittleren Reaktionszahlen mit den mittleren pH-Werten

Existenz wichtigen, Faktor möglichst genau einstellen müssen. Beide Ergebnisse bestätigen sich also im Hinblick auf ihre Richtigkeit. Man könnte sogar

sagen, dass man auf die Messung des Boden-Säuregrades verzichten kann, weil die Pflanzen ihn hinreichend genau anzeigen.

#### 4.5.4 Fulvo- und Huminsäuregehalte

Fulvo- und Huminsäuren sind Abbau- bzw. Zwischenprodukte auf dem Weg der Remineralisierung toter organischer Substanz (z. B. Laubstreu; [15]). Fulvosäuren entstehen unter sauren Bedingungen, bei geringer Destruentenaktivität. Unter günstigen Bedingungen werden sie über weitere Zwischenprodukte schließlich zu Nährsalzen abgebaut. Da sie jedoch ein geringes Bindungsvermögen für die Nährstoffionen besitzen – und teilweise wasserlöslich sind – werden sie in unserem humiden Klima (Wasserstrom im Jahresmittel nach unten gerichtet) leicht ausgewaschen und stehen somit für eine weitere Umsetzung nicht mehr zur Verfügung.

Auf basenreichen Böden werden hingegen verstärkt die hochmolekularen Huminsäuren gebildet, welche zur Entstehung der sogenannten Ton-Humus-Komplexe führen; diese besitzen eine hohe Bindungsfähigkeit für Kationen und sind daher wertvoll für die Nährstoffversorgung der Pflanzen.

Es wurde ermittelt, dass in den Proben des Bach- und Carbonatstandortes kaum Fulvosäuren vorhanden sind (Abb. 52). Daher wird davon ausgegangen, dass sich aus den Fulvosäuren unter den höheren pH-Werten dieser Standorte reichlich wasserunlösliche Huminsäuren gebildet haben, die im Wurzelbereich der Krautschicht verbleiben und dort remineralisiert werden. Bei den Proben des Buntsandstein- und des Grauwackenstandortes wurde hingegen eine hohe Konzentration von Fulvosäuren nachgewiesen. Dies bedeutet für die an sich schon nährstoffarmen Standorte einen zusätzlichen Nachteil, weil die Zwischenprodukte des Humusabbaus in das Grundwasser ausgewaschen werden. Auch hinsichtlich dieser Zwischenprodukte der Remineralisierung sind die letztgenannten Untersuchungsflächen also benachteiligt.

Die Ergebnisse resultieren aus dem Farbvergleich der vier Untersuchungsstandorte (optische Beurteilung; siehe bei „Methoden“): Je brauner das Filtrat ist, umso mehr Fulvosäuren enthält es.

Fulvosäuregehalt im Vergleich der Untersuchungsstandorte

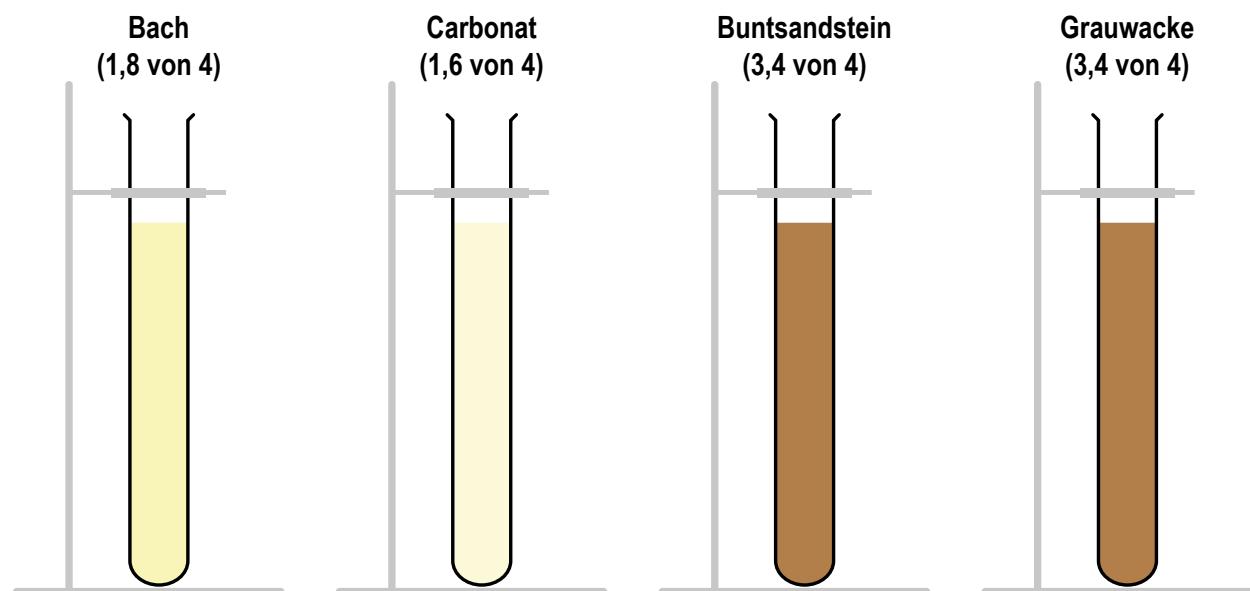


Abb. 52: Nachweis von Fulvosäuren

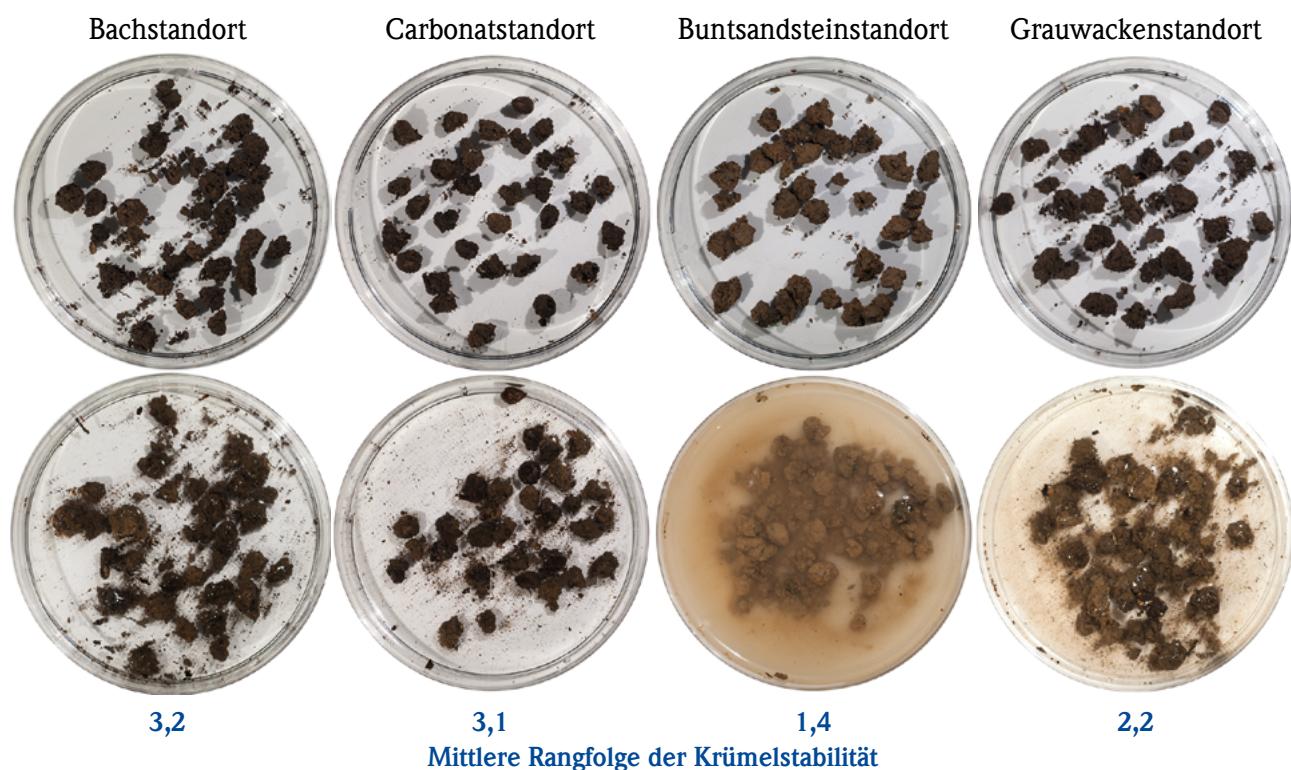
## 4.5.5 Stabilität von Bodenkrümeln

Die Krümelstruktur eines Bodens ist ebenfalls von Bedeutung für das Pflanzenwachstum [15]: Befinden sich im Boden Krümel von wenigen Millimetern Durchmesser, so bewirkt dies eine lockere Struktur, die es den Pflanzenwurzeln erleichtert, den Boden zu durchdringen. Wichtiger noch ist jedoch die Auswirkung der Krümel auf die Gasaustauschmöglichkeiten von Wurzeln (und Bodentieren, sowie Mikroorganismen); je mehr Krümel vorhanden und je stabiler sie sind, umso besser ist der Lufthaushalt des Bodens. Instabile Krümel neigen bei Niederschlag dazu, an der Bodenoberfläche zu zerfallen – der Boden verschlämmt und bildet eine luftundurchlässige Kruste aus. Im Boden befindliche, auskeimende Samen haben zusätzlich Schwierigkeiten, diese harte Kruste zu durchdringen, ans Licht zu gelangen und Photosynthese zu betreiben.

Die unterschiedliche Stabilität der Krümel bei Regen-Simulation zeigt Abb. 53. (Die Abbildung stellt ein typisches Beispiel dar; die mittlere Krümelstabilität im Vergleich der vier Standorte ist in blauer Schrift eingefügt). Während die aus Calciumhumaten bestehenden Krümel vom Bach- und Carbonatstandort kaum Zerfallserscheinungen aufweisen, ist die Auflösung beim Grauwacken- (und noch stärker beim Buntsandsteinstandort) deutlich zu sehen.

Auch bei diesem Faktor schneiden Bach- und Carbonatstandort wegen ihrer höheren Kalkgehalte und pH-Werte wieder besser ab als die beiden sauren (kalkarmen) Standorte.

Eine weitere Eigenschaft dieser Bodenkolloide ist ihre große innere und äußere Oberfläche; sie spielt in den folgenden Abschnitten eine bedeutende Rolle (siehe dort).



**Abb. 53:** Vergleich der mittleren Rangfolge der Krümelstabilität (1–4) an den vier Untersuchungsstandorten (oben trocken, unten in Wasser geschwenkt; repräsentatives Beispiel)

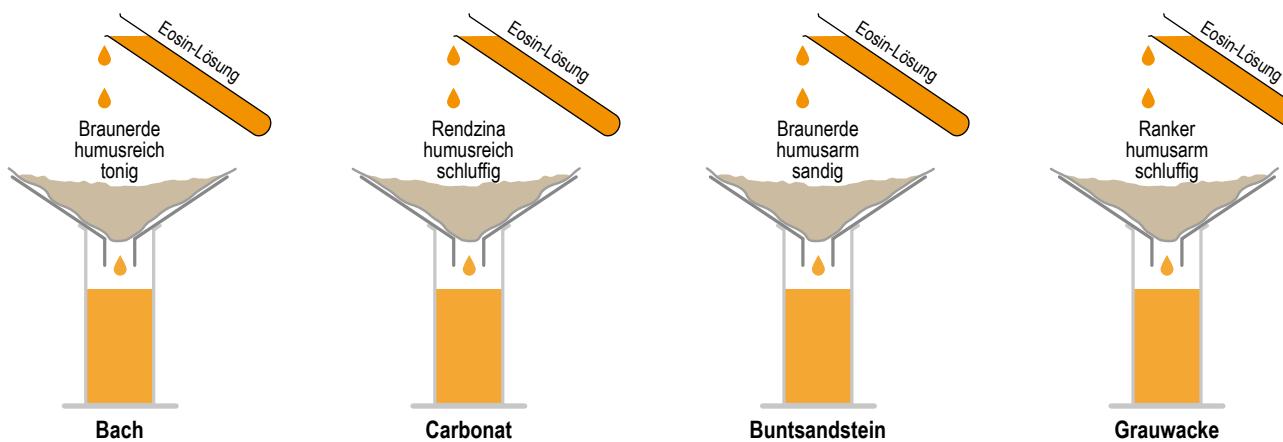
## 4.5.6 Nachweis des Ladungssinnes von Bodenkolloiden

Ton-Humus-Komplexe besitzen an ihren großen Oberflächen zahlreiche, vorwiegend negative Ladungen, die durch Kationen oder  $H^+$ -Ionen abgepuffert sind (Abb. 58). Dieser Ladungssinn lässt sich durch folgenden Versuch nachweisen (Abb. 54): Gießt man über die vier Böden eine negativ geladene (anionische), orangefarbene Eosin-Lösung, so werden diese nicht vom Boden adsorbiert, weil negative Teile sich gegenseitig abstoßen. Die Folge ist, dass das unter dem Boden aufgefangene Filtrat dem der Ausgangslösung farblich gleicht.

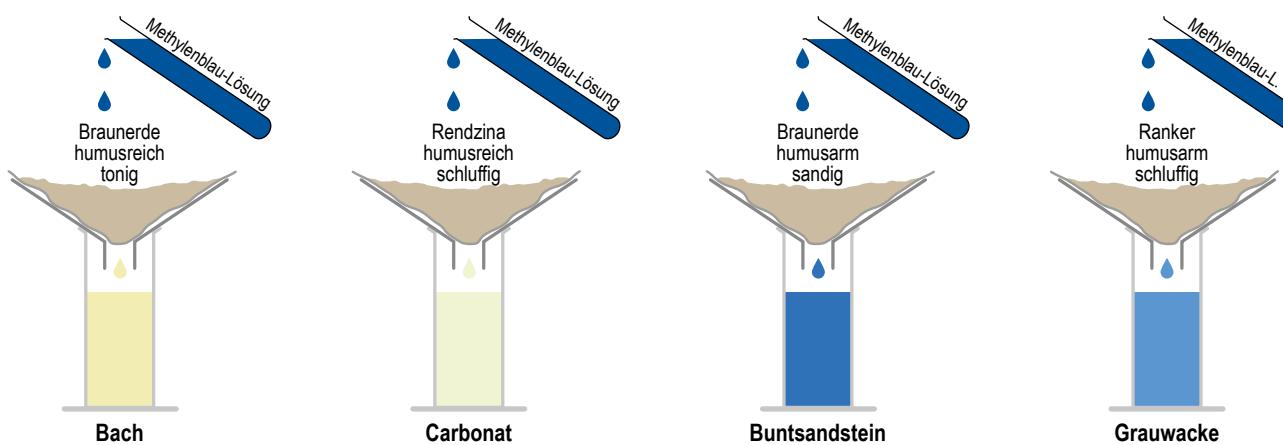
Gießt man hingegen über die vier Böden eine positiv geladene (kationische) Methylenblau-Lösung, so wird diese vom jeweiligen Boden umso stärker zurückgehalten, je höher der Anteil von Oberflächen mit negativer Ladung ist. Dies ist beim Bach- und

beim Carbonatstandort sehr deutlich zu erkennen: Beide Lösungen sind fast wasserhell, was bedeutet, dass sie das positiv geladene Kation fast vollständig an sich binden. Sie besitzen also freie, negativ geladene, Oberflächen, die in der Lage sind, Kationen (wie z. B. die wichtigen Pflanzennährstoffe  $Ca^{2+}$ ,  $K^+$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$ ,  $Na^+$ ,  $NH_4^+$  u. a.) temporär zu adsorbieren und diese dann an die Pflanzen allmählich abzugeben.

Anders sieht es bei den beiden sauren Standorten Buntsandstein und Grauwacke aus. Sie haben vergleichsweise kleinere Oberflächen (sie sind sandig und humusarm; es fehlen ihnen die oben erwähnten Bodenkolloide). Deshalb sind sie nur in sehr eingeschränktem Maß dazu in der Lage, vorhandene oder zugeführte Kationen an sich zu binden – sie bleiben nährstoffarm.



Die negativ geladenen Bodenkolloide stoßen die negativ geladenen Eosin-Moleküle ab; sie treten fast komplett unterhalb des Bodens wieder aus.



Die negativ geladenen Bodenkolloide binden die positiv geladenen Methylen-Moleküle an sich. Je mehr freie Bindungsstellen, umso mehr blaue Moleküle werden zurückgehalten (helles Filtrat).

Die negativ geladenen Bodenkolloide binden die positiv geladenen Methylen-Moleküle an sich. Je weniger freie Bindungsstellen, umso weniger blaue Moleküle werden zurückgehalten (blaues Filtrat).

**Abb. 54:** Nachweis des Ladungssinnes von Bodenkolloiden

## 4.5.7 Kationenadsorption an Bodenkolloide und ihr Austausch

Pflanzenverfügbare (in Wasser gelöste) Nährstoff-Ionen gelangen auf zwei Hauptwegen in die Böden. Einerseits können sie vom Ausgangsgestein stammen, aus dem die Böden entstanden sind.

Eine sekundäre Zufuhr kann durch Zersetzung (Remineralisierung) der im Wald vorhandenen toten organischen Substanz zustande kommen, sofern die Destruenten (Pilze, Bakterien) ihre diesbezügliche Arbeit erfolgreich abschließen können. Wie bereits im Kapitel 3.3 erläutert, sind Buntsandstein und Grauwacke Ausgangsgesteine, die bei Verwitterung zu Böden kaum für Pflanzen wichtige Nährstoffe freisetzen – sie führen also zu nährstoffarmen Böden. Darüber hinaus haben es die Remineralisierer auf beiden letztgenannten Böden wegen der niedrigen pH-Werte schwer, die tote organische Substanz in die mineralischen Nährstoffe zurückzuverwandeln.

Der hier dargestellte Versuch eignet sich dazu, exemplarisch die Nährstoffsituation der vier Böden sichtbar zu machen. Dazu wird ein rot zu färbendes Kation – im Beispiel das zu den Hauptnährstoffen gehörige  $Fe^{3+}$  – über eine definierte Bodenmenge gegossen (siehe die folgenden Abbildungen).

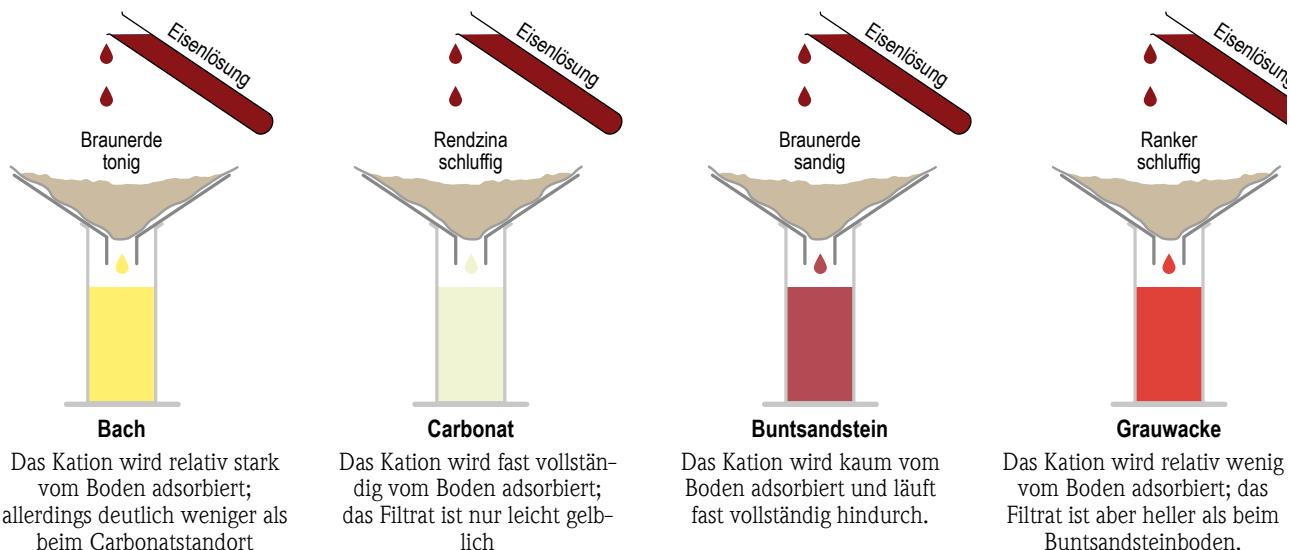
Gießt man die rote Lösung des Kations über den Buntsandsteinboden (Abb. 55), sickert der Großteil davon durch den Boden hindurch – das heißt, der

Boden ist kaum in der Lage, den Nährstoff zu binden; er verschwindet (von den Pflanzen ungenutzt) in größere Bodentiefen oder ins Grundwasser; ähnlich wenig Bindungsvermögen zeigt der Grauwackenboden. In der Praxis bedeutet dies eine ständige Verarmung an Nährstoffen der beiden Böden unter mittel-europäischen Klimaverhältnissen, weil der Weg des Niederschlagswassers bei uns im Jahresmittel nach unten gerichtet ist (humides Klima).

Beim Bach- und Carbonatstandort kommt nach der Passage der Flüssigkeit im Auffanggefäß eine deutlich klarere Lösung an – ein Zeichen dafür, dass diese Böden besser in der Lage sind, die Nährstoffionen festzuhalten. Sie gehen dem Boden also nicht verloren und sind potentielle Nachschublieferanten für die darauf wachsenden Pflanzen. Verursacht wird diese positive Reaktion durch den großen Anteil negativ geladener Oberflächen der humusreichen und wenig sandigen Böden beider Standorte.

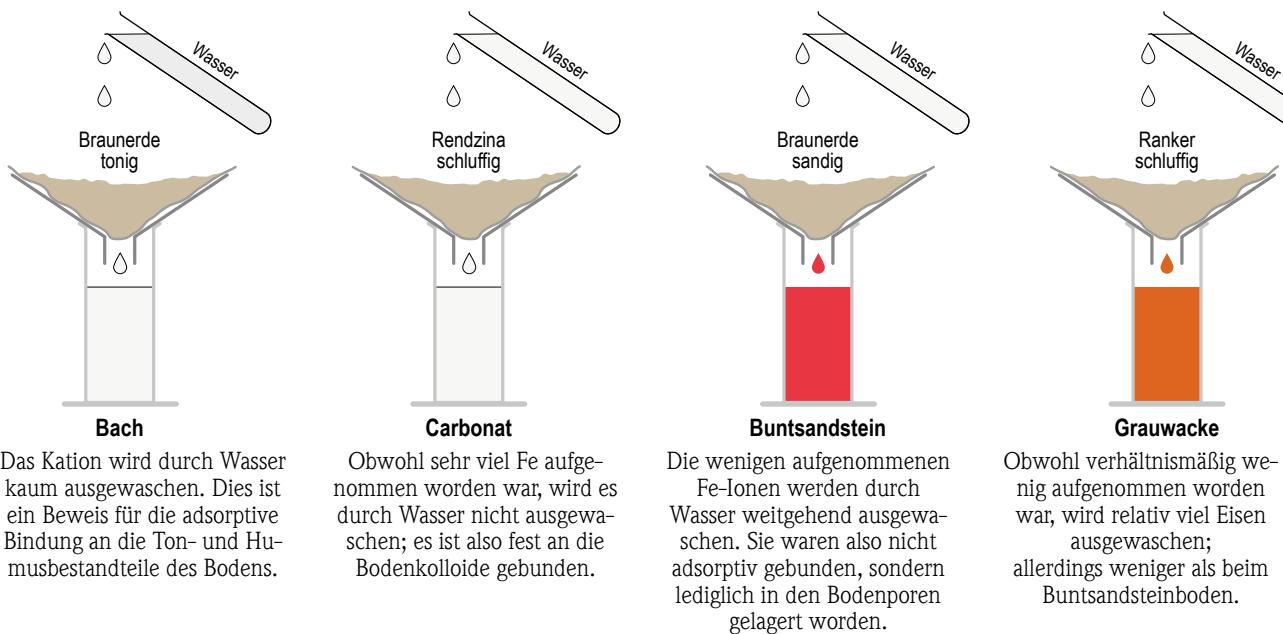
Im nächsten Versuch wird Regen simuliert (Abb. 56). Hierbei zeigt sich, dass das wenige gebundene Eisen im Buntsandsteinboden (und – etwas abgeschwächt – auch im Grauwackenboden) durch Niederschlag ausgewaschen wird. Die ohnehin nur geringen im Boden verbliebenen Mengen werden in tiefere Schichten ausgewaschen, wo sie den Krautschichtpflanzen nicht mehr zur Verfügung stehen.

### 1. Die Böden werden mit einer rotbraunen Eisenlösung übergossen (Simulation der Zufuhr eines Kations)



**Abb. 55:** Adsorptionsvermögen der Böden der vier Standorte – Zugabe von Eisenlösung

## 2. Die Böden werden mit Wasser übergossen (Simulation von Auswaschung durch Niederschlag)



**Abb. 56:** Adsorptionsvermögen der Böden der vier Standorte – Wasserzugabe

Bach- und Carbonatböden, hatten im Vorversuch viel Eisen fest an sich gebunden – v. a. die Humus- und Tonbestandteile mit ihren großen, negativen Oberflächen sind dazu in der Lage; sie geben es durch Regen nicht ab – das Filtrat bleibt völlig klar.

Die sauren Böden des Buntsandsteins und der Grauwacke geben das zugeführte Nährstoffion nach wenigen Regengüssen vollständig ab. Das ist kurzfristig (solange noch etwas vorhanden ist), positiv für das Pflanzenwachstum, langfristig leidet die Krautschicht jedoch sehr bald an Nährstoffmangel.

Beim Bach- bzw. beim Carbonatboden stellt sich die Problematik umgekehrt dar: Sie speichern zwar viele Nährsalze, geben sie aber nicht an die Pflanze weiter. Ursache dafür ist die oben erwähnte große, (negativ geladene) Oberfläche der Bodenkolloide; an diese binden sich viele Pflanzennährstoffe, weil sie positiv geladen sind, so auch in unserem Beispiel das Eisen.

Abhilfe schafft der Ionenaustausch (Abb. 57, Abb. 58): Durch Zufuhr von Säure wird Wasserstoff ( $H^+$ ) frei und gegen das an den Bodenpartikeln haftende Kation (im Beispiel  $Fe^{3+}$ ) ausgetauscht, es gelangt in das Bodenwasser und wird in dieser Form von den Pflanzenwurzeln aufgenommen. In unserem Versuch reichte allerdings die schwache Citronensäure nicht aus, um das Eisen vom Carbonatboden

Obwohl sehr viel Fe aufgenommen worden war, wird es durch Wasser nicht ausgewaschen; es ist also fest an die Bodenkolloide gebunden.

Die wenigen aufgenommenen Fe-Ionen werden durch Wasser weitgehend ausgewaschen. Sie waren also nicht adsorptiv gebunden, sondern lediglich in den Bodenporen gelagert worden.

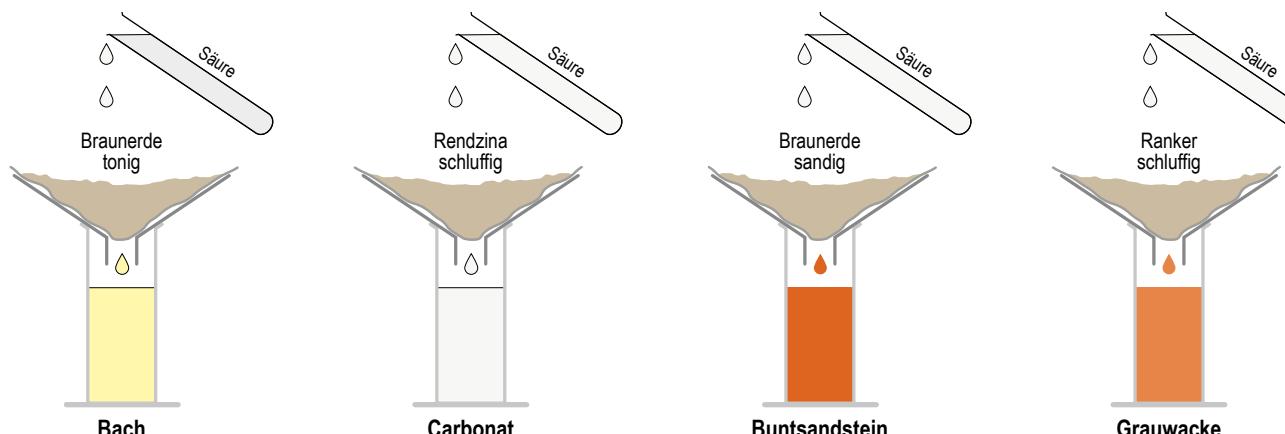
Obwohl verhältnismäßig wenig aufgenommen worden war, wird relativ viel Eisen ausgewaschen; allerdings weniger als beim Buntsandsteinboden.

in nennenswertem Umfang in kurzer Zeit abzulösen. Hier sind stärkere Säuren oder mehr Zeit vonnöten, um den Pflanzen genügend Kationen zur Verfügung zu stellen.

Der Buntsandstein- und der Grauwackenboden verlieren durch Zufuhr von Säure auch noch den letzten Rest an Kationen und verarmen damit vollends. Dies erwies sich während der Zeit des „sauren Regens“ als zusätzliches Handicap für die an sich schon sauren Böden des Grauwacken- und des Buntsandsteinstandortes. (In manchen Gebieten Deutschlands versuchten die Forstbehörden durch Kalkeintrag über Helikopter diesen Negativtrend abzumildern).

Eine genauere Vorstellung von den Vorgängen beim Kationenaustausch vermittelt Abb. 58. Pflanzenwurzeln scheiden Säuren aus (z. B. Kohlensäure  $H_2CO_3$ ; ein Produkt des bei der Zellatmung abgegebenen Kohlendioxids, das sich mit Wasser zu Kohlensäure umwandelt). Wird von dieser der Wasserstoff ( $H^+$ ) abgespalten, setzt er sich an eine freie, negativ geladene Stelle eines Bodenkolloids. Sind alle negativ geladenen Oberflächen von Bodenkrümeln durch positiv geladene Kationen besetzt, verdrängen die  $H^+$ -Ionen die Kationen. Diese gelangen dadurch in das Bodenwasser und können von der Pflanzenwurzel aufgenommen werden. Da die Kohlensäure eine schwache Säure ist, wird nur relativ wenig  $H^+$  frei, so dass auch nur relativ wenige Kationen abgelöst – und

### 3. Die Böden werden mit einer schwachen Säure übergossen (Simulation von H<sup>+</sup>-Zufuhr durch wurzelbürtige Säuren oder durch sauren Regen)



Bei Anwesenheit von Säuren gibt der Boden einen Teil des gebundenen Eisens ab.

**Fazit:** der Boden nimmt viele Ionen auf. Sie werden durch Auswaschung nicht, durch Ionenaustausch in geringem Umfang abgelöst. Somit stehen den Pflanzen genügend Nährstoffe zur Verfügung, die sie durch wurzelbürtige Säuren freisetzen können,

Das Filtrat bleibt wasserhell; Fe<sup>3+</sup> ist also so fest an die Bodenpartikel gebunden, dass selbst schwache Säuren es nicht herauslösen können.

**Fazit:** Der Boden nimmt viele Ionen auf, gibt sie aber weder durch Wasser noch durch Säuren ab.

Somit haben auch die Pflanzen Probleme, an die fest gebundenen Ionen heranzukommen.

Die wenigen noch verbliebenen Fe-Ionen werden durch Ionenaustausch (H<sup>+</sup> ⇌ Fe<sup>3+</sup>) ausgewaschen.

**Fazit:** Der Boden nimmt wenige Ionen auf und gibt die wenigen durch Wasser bzw. Säuren leicht wieder ab. Sie gelangen mit dem Niederschlag ins Grundwasser.

Somit stehen den Pflanzen an diesem Standort kaum Nährstoffe zur Verfügung.

Das Kation wird relativ wenig vom Boden adsorbiert; das Filtrat ist aber heller als beim Buntsandsteinboden.

**Fazit:** Der Boden nimmt verhältnismäßig wenige Ionen auf und gibt davon relativ viele durch Auswaschung bzw. Ionenaustausch ab.

Somit stehen für die Pflanzen nur wenig Nährstoffe zur Verfügung.

**Abb. 57:** Kationenaustausch der Böden der vier Standorte

somit sogleich von der Pflanze aufgenommen werden, bevor sie mit dem Niederschlagswasser nach unten ausgewaschen werden könnten.

#### Fazit aus den Filtrationsversuchen:

Die Buntsandstein- und Grauwackenböden sind sandig (Sand besitzt kleine Oberflächen), es mangelt ihnen an Tonbestandteilen (große Oberflächen), sowie an Humus (große innere und äußere Oberflächen). Folgerichtig können sie vorhandene (oder hinzugefügtes) Nährstoffe nicht gut festhalten. Hinzu kommt, dass beide Böden sauer sind (pH-Werte: 3,5 bzw. 3,6) so dass im Ionenaustausch von vornherein größere Mengen an Kationen ausgetauscht (abgelöst) werden. Zudem sind sie auch noch benachteiligt, weil die Remineralisierer – aufgrund des geringen pH-Wertes der Böden – ihre Arbeit nicht optimal zu Ende zu bringen vermögen. Derart (hinsichtlich der Nährstoffsituation) ungünstige Bodenverhältnisse erlauben es nur wenigen Spezialisten, auf den sauren und nährstoffarmen Böden zu überleben. Hierzu gehören z.B. Bergplatterbse, Drahtschmiele, Heidebeere, Heidekraut, Waldbürstenmoos sowie die Weiße Hainsimse (vgl. Abb. 33, Abb. 34 und Anhang).

Beim Bach- und dem Carbonatboden verhindern große Oberflächen (Ton-Humuskomplexe) und höhere pH-Werte der Böden (pH-Werte: 6,5 bzw. 7,1) eine frühzeitige Auswaschung der Nährsalze.

Wie die Versuche zeigen, ist hinsichtlich der Nährstoffversorgung die beste Situation beim Boden der Bachquellmulde gegeben. Die Remineralisierungsrate ist hoch und Nährionen werden in großem Umfang produziert. Sie werden fest an die Bodenpartikel gebunden und durch Niederschlag nicht ausgewaschen. Im Vergleich zum Carbonatstandort vermag der Bachstandort aber die Kationen bei Zufuhr von Säure nicht mehr vollständig zu halten; einige Moleküle werden im Austausch gegen Wasserstoff abgelöst und der Bodenlösung zugeführt. Auf diese Weise erhalten die Pflanzen – wohldosiert – eine ständige Nährstoffzufuhr, ohne die Gefahr starker Auswaschung (der Ablösungsprozess kann von den Pflanzenwurzeln durch Bildung und Abgabe von Säuren selbst nach Bedarf gesteuert werden; siehe Abb. 58). Folgerichtig finden sich dort die höchste Artenvielfalt und der höchste Bedeckungsgrad in der Krautschicht. Auf der Bachquellmulde wachsen viele „Gutbodenanzeiger“, wie Buschwindröschen, Einblütiges Perl-

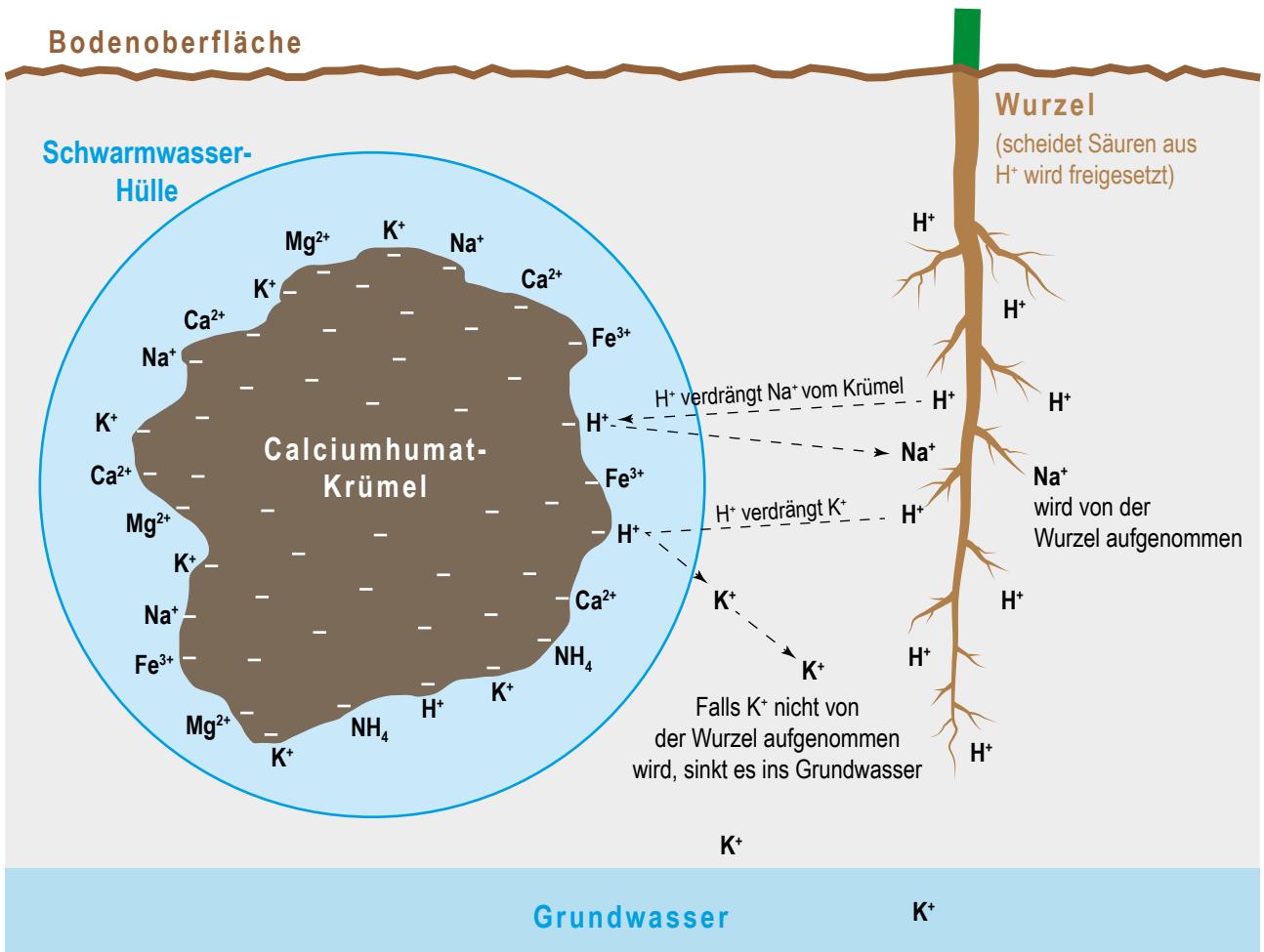


Abb. 58: Austausch von Kationen gegen  $H^+$ -Ionen

gras, Große Brennnessel, Gundelrebe, Kletten-Labkraut, Knoblauchsrauke, Kriechender Günsel, Ruprechts-Storcheschnabel, Walderdbeere, Waldmeister, (Abb. 31 und Anhang).

Im Carbonatboden liegt der Humus in einer besonders stabilen Form vor. Huminsäuren bilden mit mehrwertigen Kationen (z. B.  $Ca^{2+}$ ) schwerlösliche Verbindungen (Humate) [20], die mikrobiell schwer abbaubar sind. Dadurch wird der Humusaufbau begünstigt. Der Carbonatboden (der zumindest zeitweilig, aufgrund von sommerlicher Austrocknung, weniger remineralisiert), hat infolge seines hohen Humusgehaltes und der damit verbundenen großen

Anzahl negativ geladener Bindungsstellen ein sehr gutes Adsorptionsvermögen für Kationen, so dass es hier nicht zur Auswaschung kommt. Die Zahl freier (nicht durch die positiv geladenen Kationen besetzter) Bindungsstellen ist offenbar so groß, dass auch die Zufuhr von Säure ( $H^+$ ) nicht zur gewünschten Ablösung der Nährionen führt. Solche Böden werden als „geizig“ bezeichnet und erlauben nur solchen Pflanzen ein Überleben, die mit mäßigem Nährstoffangebot zureckkommen (z. B. Braunrote Ständelwurz, Echte Schlüsselblume, Fliegen-Ragwurz, Kronwicke, Rotes Waldvöglein, Süßholz-Tragant, Wald-Akelei, Zypressen-Wolfsmilch; siehe Abb. 32 und Anhang).

## 4.5.8 Aktivität der Bodenmikroorganismen (Katalaseaktivität)

Der Katalasenachweis ist ein wichtiger Parameter zur Abschätzung der aeroben Mikroorganismen-(Remineralisierer-)tätigkeit: Das Enzym Katalase hat die Funktion, das bei der Zellatmung entstehende  $H_2O_2$  zu entgiften. Der anaerobe Abbau wird demzufolge nicht miterfasst. In Abb. 59 ist zu sehen, dass die Katalaseaktivität im Boden des Carbonatstandortes am größten ist, gefolgt von der des Bach- und der des Grauwackenstandortes. Der Buntsandsteinstandort schneidet am schlechtesten ab.

Eigentlich wäre am Bachstandort die höchste Katalaseaktivität zu erwarten gewesen, da die Destruenten hier allgemein die günstigsten Bedingungen vorfinden. (Dafür sprechen auch die Zeigerwerte „Nährstoff“ (Bach: 6,4, Carbonat: 5,0) sowie der – im Vergleich zum Carbonatstandort – wesentlich höhere Bedeckungsgrad der Krautschicht (Bach 75 %, Carbonat 15 %). Wie jedoch bereits erwähnt wurde, kann die bodenbiologische Aktivität am Bach – vor allem im Frühjahr (dem Zeitpunkt unserer Messungen) – durch einen hohen Wassergehalt und eine damit verbundene schlechtere Erwärmbarkeit des Bodens gehemmt werden, während sie am Carbonatstandort infolge der dort schon recht hohen Bodentemperaturen, bei noch ausreichendem Wasserdargebot, aufgrund der RGT-Regel begünstigt wird. Weiterhin ist es denkbar, dass der Bachstandort aufgrund der Bachnähe und des hohen Tonanteils im Boden zum Zeitpunkt unserer Messungen (Mai/Juni) gelegent-

lich leicht anaerobe Verhältnisse aufweist, was den – effektiveren – aeroben Abbau einschränkt. Dieser Nachteil wird sich jedoch im Verlauf des Sommers (mit seinen höheren Temperaturen und geringerem Wassergehalt) zu einem Vorteil umwandeln: In der warmen Jahreszeit fährt der Bachstandort (bei stets ausreichendem Wassergehalt) seine mikrobiologische Aktivität hoch – dagegen leidet der Carbonatboden dann unter Wassermangel und hat sein diesbezügliches Maximum längst überschritten.

Die beiden Standorte mit niedrigem pH-Wert des Bodens schneiden erwartungsgemäß hinsichtlich ihrer Katalaseaktivität schlechter ab; der dauerhaft vorhandene Minimumfaktor hemmt die Mikroorganismentätigkeit und lässt für diese Standorte eine deutlich geringe Remineralisierung der Nekromasse erwarten.

Die Katalaseaktivität schwankt (mit Ausnahme des schlechtesten Standortes Buntsandstein) von Jahr zu Jahr stark (Abb. 60). Dies lässt sich mit den von Jahr zu Jahr wechselnden mikroklimatischen Bedingungen zum Zeitpunkt des jeweiligen Praktikums erklären. Auch methodische Gründe führen zu Variationen der Messwerte: In den ersten Jahren wurde das Schwenken der Lösung durch Schütteln des Reaktionsgefäßes per Hand durchgeführt, später kamen Magnetrührer zum Einsatz, die die Schwankungen der Messwerte reduzierten.

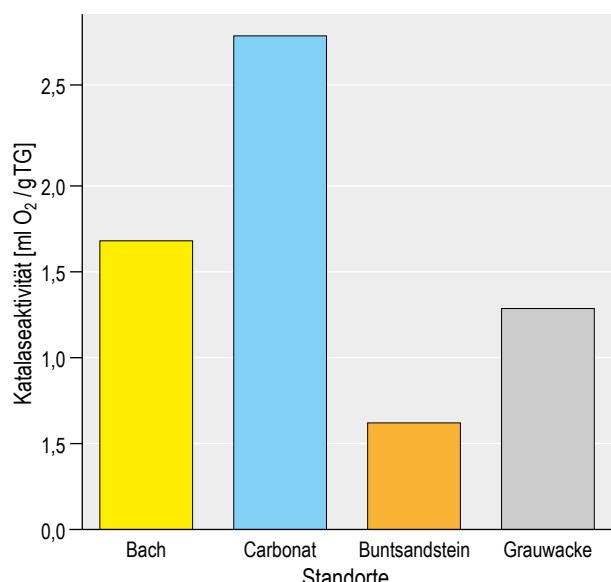


Abb. 59: Mittelwerte der Katalaseaktivität

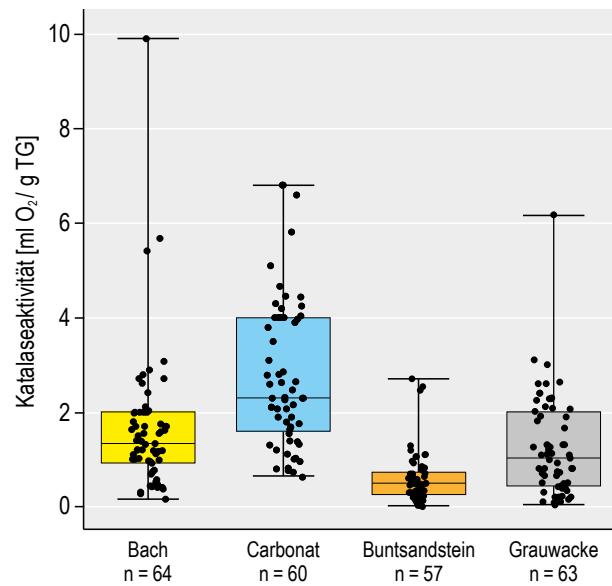


Abb. 60: Boxplots der Katalaseaktivität

Berücksichtigt werden muss bei dieser Untersuchungsmethode noch, dass – neben den an der Remineralisierung beteiligten Bakterien und Pilzen – lebende Feinwurzeln und Makroinvertebraten ebenfalls Zellatmung betreiben und dadurch der

Wert bei allen Standorten stets etwas zu hoch ausfällt. Da der zur Messung verwendete Boden durch ein Feinsieb (2 mm Durchmesser) weitgehend von Feinwurzeln und Bodentieren befreit wurde, dürfte dieser Fehler allerdings gering ausfallen.

## 4.5.9 Stickstoffgehalte

Die weiter oben betrachteten Zeigerwerte der Pflanzen für den Nährstoffhaushalt geben die langfristige Situation der Nährstoffverfügbarkeit wieder (Abb. 29). Es wurde nun untersucht, wie weit die aktuell während der Praktika gemessenen Konzentrationen der Pflanzennährstoffe mit den Zeigerwerten übereinstimmen.

Beim Abbau der Streu entsteht aus den Zellproteinen zunächst der Pflanzennährstoff Ammonium. Das Ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) ist ein Kation und als solches im Boden an Ton- und Humusteilchen gut adsorbierbar. Daher sind die Ammoniumkonzentrationen an den humusreichen Standorten Bach und Carbonat deutlich höher als an denen des Buntsandsteins und der Grauwacke (Abb. 61). Sie erreichen die höchsten Werte am Carbonatstandort, da hier besonders reichlich Calciumhumate vorliegen, an die Ammonium-Ionen gebunden werden können. Die starke Bindung des Kations könnte an dieser kalkreichen Untersuchungsfläche die Umsetzung zu Nitrat verzögern. (Siehe hierzu auch die Resultate der Untersuchungen zur Krümelstabilität, Kap. 4.5.5 und zur Kationenadsorption an Bodenkolloide, Kap. 4.5.7).

Das Ammonium wird weiter zu Nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ) nitrifiziert. Wie rasch dieser Schritt abläuft, hängt von den jeweils vorliegenden Bedingungen ab. Am Carbonatstandort liegen im Untersuchungszeitraum zwar günstige Bedingungen für die Destruenten vor, jedoch ist die weitere Nitrifizierung des Ammoniums aufgrund der starken Adsorptionskräfte des Carbonatbodens für Kationen reduziert.

Die nitrifizierenden Bodenbakterien profitieren am Bachstandort von der gleichmäßigen Bodenfeuchte, so dass die Umwandlung zu Nitrat hier vergleichsweise gut ist. Am Carbonatstandort wurden ebenfalls höhere Nitratkonzentrationen als an der Grauwacke und am Buntsandstein erreicht. Auch hier war im Messzeitraum in vielen Jahren die Bodenfeuchte zum Zeitpunkt unserer Messungen Ende Mai/Anfang Juni noch ausreichend für nitrifizierende Bakterien. Aus der Tatsache, dass die Nitratkonzentrationen am Bach deutlich über denen des Carbonatstandortes liegen, lässt sich schließen, dass die Bedingungen für den mikrobiellen Abbau am Bach dauerhaft günstig sind.

In Jahren mit trockeneren Frühsommern wirkt sich auch der Wassermangel auf der südexponierten Carbonatfläche hemmend auf die Destruenten hinsichtlich ihrer Umsetzungsgeschwindigkeit von Ammonium zu Nitrat aus. An den Standorten Buntsandstein und Grauwacke führte der geringere Ammonium-Vorrat und der für die Destruententätigkeit ungünstige saure Boden zu deutlich geringeren Nitratkonzentrationen.

Die mineralischen Stickstoffverbindungen Ammonium und Nitrat können beide von Pflanzen als Nährstoffe aufgenommen werden (Abb. 62). Wegen der festen Bindung des Ammoniums an die Bodenkolloide müssen die Pflanzenwurzeln jedoch direkt zu den Bodenkolloiden hinwachsen, um das Kation durch Säure-Ausscheidungen abzulösen.  $\text{NO}_3^-$  hingegen ist im Bodenwasser gelöst und diffundiert selbstständig zu den Wurzeln.  $\text{NH}_4^+$  ist also schlechter pflanzenverfügbar als Nitrat.

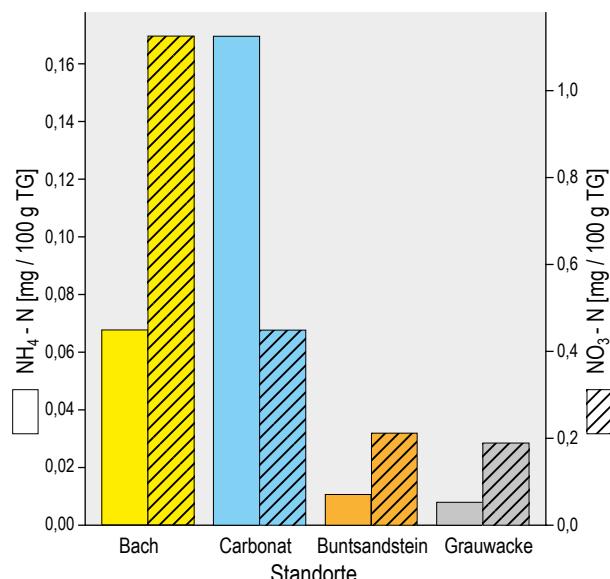
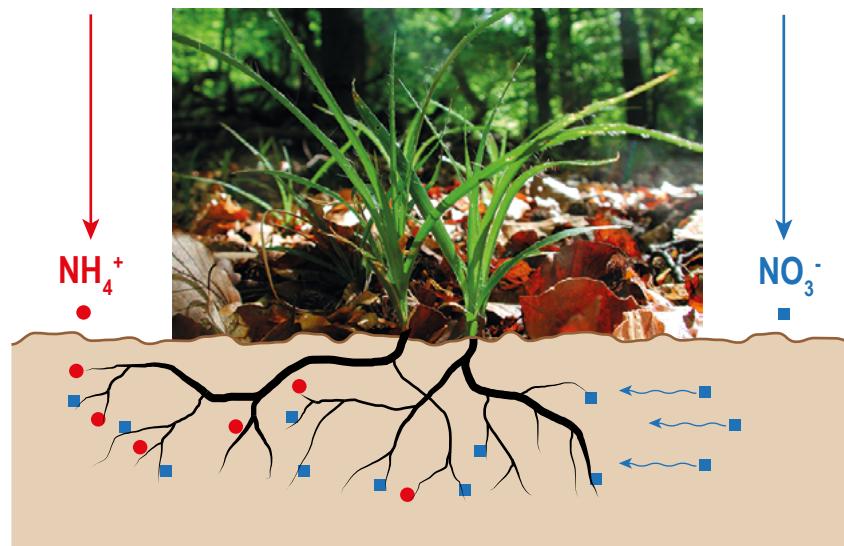


Abb. 61: Vergleich der mittleren Ammonium- und Nitratstickstoffwerte

Folgende Ionen können aufgenommen werden:

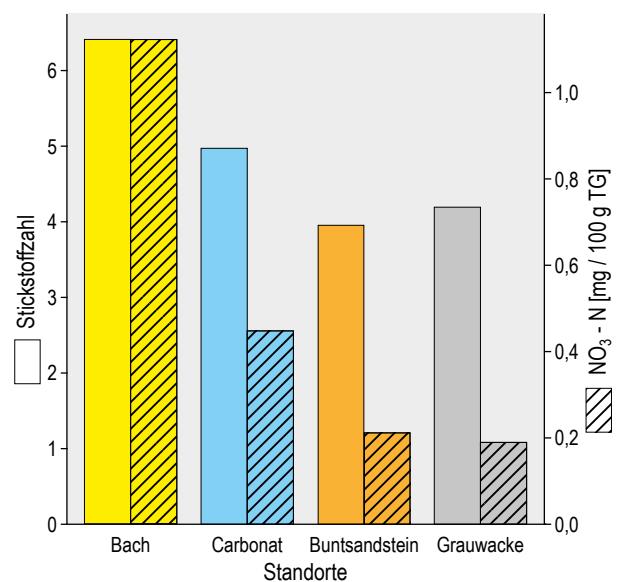
**Ammoniumstickstoff ( $\text{NH}_4^+$ )**  
ist als Kation an Bodenkolloide (Ton-Humuskomplexe) gebunden. Um an diesen unbeweglichen Nährstoff zu gelangen, muss die Wurzel zu ihm hinwachsen.



**Nitratstickstoff ( $\text{NO}_3^-$ )**  
ist als Anion im Bodenwasser gelöst und daher frei beweglich; es wird passiv an die Wurzel herangeführt und ist so rasch verfügbar.

**Abb. 62:** Aufnahme von Mineralstickstoff in die Pflanze

Die Nitratkonzentrationen stimmen gut mit den Nährstoffzeigerwerten überein (Abb. 63). Wie bereits oben erläutert, ist  $\text{NO}_3^-$  das Endprodukt der Nitrifikation. Es stellt gewissermaßen den Pool dar, aus dem die Pflanzen ihren Stickstoffbedarf hauptsächlich befriedigen. Es ist leichter verfügbar als Ammonium aufgrund des in der Regel raschen Abbaus des Ammoniums, und es ist in wesentlich höherer Konzentration im Boden vorhanden. Folgerichtig reagiert die von uns untersuchte Krautschicht am stärksten auf dieses Nährstoffion.



**Abb. 63:** Vergleich der Stickstoffzahlen der Krautschicht mit den Nitratstickstoffwerten

## 4.5.10 Phosphatgehalte

Die mittleren Phosphatgehalte verhalten sich ähnlich wie die Katalase-Aktivität und die Ammoniumgehalte (Abb. 59 und Abb. 61): Die höchsten Werte finden sich am Carbonatstandort, gefolgt von der Bachquellmulde; die niedrigsten Gehalte finden sich wiederum in den Böden der beiden sauren und nährstoffarmen Areale (Abb. 64).

Phosphate werden bei der Verwitterung des anstehenden Gesteins freigesetzt und gelangen durch die Prozesse der Bodenbildung in den Boden, wo sie als Hauptnährstoffe von Pflanzen aufgenommen werden. Im Nährstoffkreislauf wird das Phosphat durch Remineralisierung der absterbenden Biomasse immer wieder neu zur Verfügung gestellt. Es reichert sich dadurch im Oberboden an [24] und steht den Pflanzen erneut zur Verfügung. Phosphate sind im Boden wenig mobil, werden also auch kaum ausgewaschen. (Ausnahme: saure, quarzreiche Böden [15], die auch aus diesem Grund geringere Phosphatkonzentrationen im A-Horizont aufweisen. Dies trifft bei unseren Untersuchungen auf den Grauwacken- und den Buntsandsteinstandort zu. Hinzu kommt hier noch die geringere Remineralisierung wegen der pH-bedingten Hemmung der Mikroorganismen).

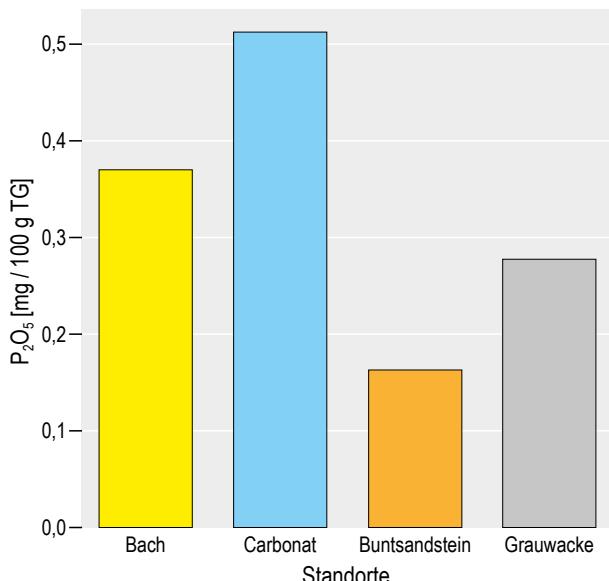


Abb. 64: Mittlere Phosphatgehalte

Phosphate können von Pflanzenwurzeln – wie alle Nährionen – nur in gelöster Form aus dem Bodenwasser aufgenommen werden. Da sie schlecht löslich und somit wenig mobil sind, spielen die Mikroorganismen in unmittelbarer Wurzelnähe eine wichtige Rolle bei der Phosphorversorgung der Pflanzen. Wurzeln nehmen das Phosphat nur bis zu einer Entfernung von ca. 1–2 mm aus dem Boden auf [20]. Die Durchwurzelung des Bodens ist demzufolge bei der Umwandlung von anorganischen (von uns gemessen) in organische Phosphorverbindungen von entscheidender Bedeutung. Mikroorganismen enthalten wie alle Lebewesen Phosphor, z. B. zum Aufbau ihrer Nukleinsäuren und des Adenosintriphosphats (ATP). Die in den Praktikumsversuchen gefundene höhere mikrobielle Aktivität am Bach- und Carbonatstandort begünstigt die Phosphatversorgung der Pflanzen.

Am Bachstandort wäre aufgrund der größten Biomasse der Krautschicht die höchste Phosphatnachlieferung im Oberboden zu erwarten. Dass sie hier geringer ist als am Carbonatstandort, kann damit erklärt werden, dass die sekundäre Phosphatnachlieferung von der Aktivität der Remineralisierer abhängt. Da diese zum Zeitpunkt unserer Untersuchungen am Carbonatstandort am höchsten war (siehe Abb. 59), wird verständlich, warum diese Fläche die höchsten Phosphatwerte aufweist. Es ist also davon auszugehen, dass die erheblich größere Bedeckung der Krautschicht am Bach dem Boden deutlich mehr Phosphat entnommen und in seine Biomasse eingebaut hat als auf der Carbonatfläche. Wie allerdings bereits bei der Beschreibung der Katalaseaktivität ausgeführt wurde, ist diese Situation nicht repräsentativ für die gesamte Vegetationsperiode: Im Sommer holt der Bachstandort gegenüber dem Carbonat-Areal auf und überholt ihn schließlich, weil dann bei ihm die Zufuhr von anorganischem Phosphat aus der Remineralisierung der Nekromasse ihren Höhepunkt hat.

Die höheren Werte auf der Carbonatfläche könnten weiterhin mit der starken Bindungskraft des Kalkbodens für Phosphate zusammenhängen [25], die gewährleistet, dass vorhandenes Phosphat nicht verloren geht („geiziger Boden“).

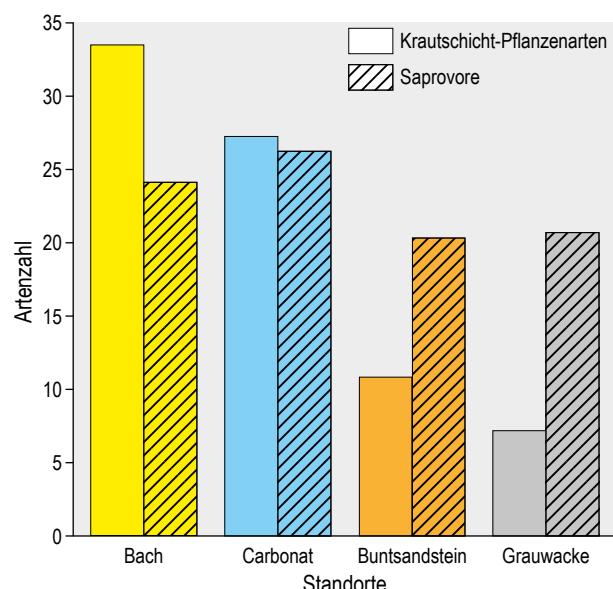
#### 4.5.11 Saprovere Organismen (Bodenstile, Grobzerkleinerer)

Aus zeitlichen Gründen war eine quantitative Erfassung und Bestimmung der saprovere Organismen in der Oh-Ah-Schicht nicht möglich. Dennoch sollten die Studierenden einen Einblick in die vielfältige Welt der Grobzersetzer von Streumaterial im Boden gewinnen. (Sie spielen insofern eine Rolle bei der Remineralisierung der toten organischen Substanz, als sie die Nekromasse fressen, wieder ausscheiden und damit deren Oberfläche vergrößern. Dies erleichtert wiederum die biochemische Umsetzung durch die Mikroorganismen).

Zu diesem Zweck wurden die Bodentiere mit Hilfe von Berlese-Apparaturen aus der organischen Bodenauflage ausgetrieben und dann unter dem Stereomikroskop mit Hilfe eines bebilderten Bestimmungsschlüssels [23] den großen systematischen Gruppen zugeordnet (z. B. Rundwürmer, Ringelwürmer, Milben und andere Spinnentiere, Krebstiere, Springschwänze und echte Insekten).

Selbst bei diesem semiquantitativen Vorgehen zeigten sich die gleichen Unterschiede zwischen den einzelnen Standorten (Abb. 65): Bach- und Carbonatstand-

ort haben nicht nur weitaus mehr Pflanzenarten aufzuweisen; auch die tierische Bodenlebewelt ist vielgestaltiger als bei den beiden sauren Standorten.



**Abb. 65:** Vergleich der Krautschicht-Pflanzenarten mit den Boden-Tierarten (Saprovere)

#### 4.6 Zusammenfassende Betrachtung der Remineralisierungsprozesse

Der Prozess der Remineralisierung ist komplex und störungsanfällig. Am besten wird er verständlich, wenn man ihn mit der Fertigstellung eines Hauses vergleicht. Beim Hausbau müssen viele Spezialisten (Handwerker) koordiniert und zeitlich abgestimmt zusammenarbeiten, damit zunächst der Rohbau und dann der Innenausbau zu einem erfolgreichen Ende geführt werden kann. Verspätet sich z. B. der Elektriker, muss der Verputzer auf ihn warten, ehe er mit seiner Arbeit beginnen kann; das gilt auch für alle, die danach arbeiten wollen – der Ausbau verzögert sich. Fällt der Elektriker ganz aus, kann kein (nach heutigem Verständnis) funktionsfähiges Haus fertiggestellt werden – es bleibt eine Bauruine.

Ganz ähnliche Abläufe sind auch bei der Umwandlung toter organischer Materie in Minerale zu beobachten. Die „Handwerker“ sind hier zuerst die Makroinvertebraten (u.a. Regenwürmer und Insektenlarven), die z. B. abgestorbene Pflanzenblätter durch Fressen in kleinere Bruchstücke umwandeln

(Abb. 66), dadurch deren Oberfläche vergrößern und den nachfolgenden „Handwerkern“ (Bakterien und Pilze) den biochemischen Umwandlungsprozess erleichtern. Unter den letzteren gibt es eine Vielzahl von Spezialisten, die Teilaufgaben beim vielgestalti-



**Abb. 66:** Ausfressen der Interkostalfelder durch saprovere Organismen

gen Remineralisierungsprozess übernehmen. Wie in Abb. 65 gezeigt wurde, ist die Zahl der saprovoaren Tierarten an den Untersuchungsstandorten Buntsandstein und Grauwacke am niedrigsten – das bedeutet schon dadurch ungünstigere Ausgangsbedingungen für die Remineralisierung.

In den folgenden Abbildungen wird der Prozess des weiteren Abbaus der energiereichen organischen Substanzen zu den Nährsalzionen am Beispiel des Ausscheidungsproduktes einer Assel mittels eines Schemas noch etwas detaillierter dargestellt. In einem Krümel (Abb. 67) befinden sich beispielhaft einige Abbauprodukte von Lipiden, Kohlenhydraten und Nukleinsäuren (unvollständig). Die Assel hat diese Makromoleküle z. B. durch Fraß eines abgestorbenen Blattes aufgenommen und im Verlauf ihres Verdauungsprozesses enzymatisch in kleinere Moleküle zerlegt; diese finden sich im Kot wieder.

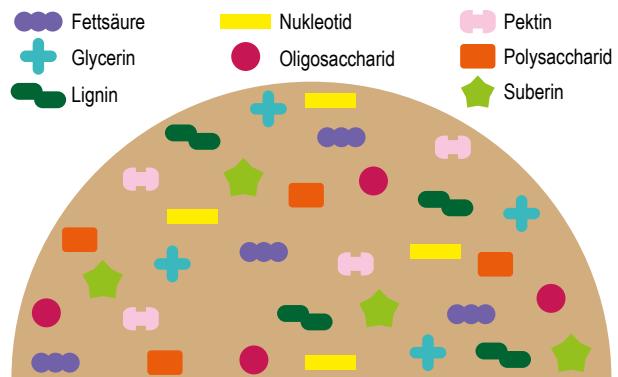
Wie aus Abb. 68 ersichtlich wird, beginnt nun ein auf einen Vielfachzucker spezialisiertes Bakterium mit dem Abbau dieses Polysaccharids.

Für den Abbau der einzelnen Bausteine (Aufzählung unvollständig) ist jeweils ein spezialisierter „Handwerker“ (Bakterien, Pilze) mithilfe spezieller Enzyme zuständig. Im Beispiel verstoffwechselt ein Bakterium ein Polysaccharid (z. B. Stärke). Nach dem Abbau ist dieses nicht mehr vorhanden.

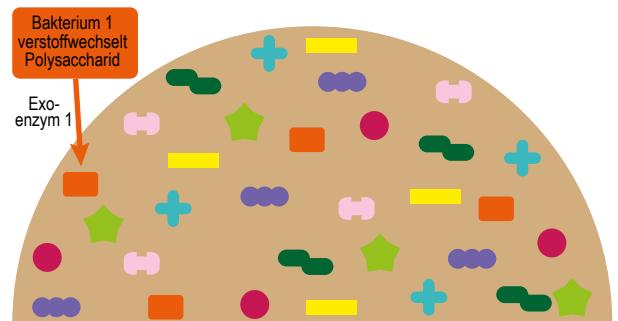
Nachdem Polysaccharid abgebaut wurde, ist der Weg frei für den Abbau eines zweiten Bausteins (Suberin) durch einen darauf spezialisierten „Handwerker“ (siehe Abb. 69).

Erst nachdem weitere Bausteine durch andere Bakterien weggeräumt wurden (Pektin, Glycerin), ist der Weg frei für das erste Bakterium, ein weiteres Polysaccharidmolekül abzubauen (Abb. 70).

Aus den Abbildungen (Abb. 67 bis Abb. 70) wird deutlich, dass für die komplette Remineralisierung des Kotkrümels **alle** daran beteiligten Bakterien und Pilze vorhanden und arbeitsfähig sein müssen. Wird einer der „Handwerker“ in seiner Arbeit gestört, führt das zur Verlangsamung des Umbaus; fällt er ganz aus, kann der gesamte Prozess zum Erliegen kommen. Als Störungs-/Hemmungsfaktoren kommen v. a. ein niedriger pH-Wert, Temperaturunst, Wassermangel oder Wasserüberschuss (→ Sauerstoffmangel im Boden), schwer zersetzbare Nekromasse, aber auch toxische Stoffe infrage. Manche davon wir-



**Abb. 67:** Kotkrümel einer Assel (Schema; Zusammensetzung unvollständig)



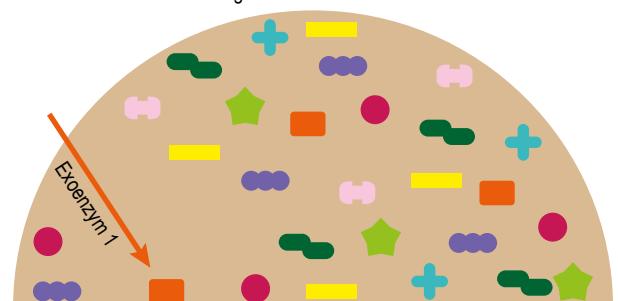
**Abb. 68:** Abbau eines Bausteins (Polysaccharid) durch ein spezielles Exoenzym



**Abb. 69:** Abbau von Suberin (Korkstoff)



Erst nachdem weitere Bakterien „ihre“ Bausteine abgebaut haben, kann Bakterium 1 wieder tätig werden.



**Abb. 70:** Abbau eines weiteren Polysaccharid-Bausteins

ken nur temporär andere dauerhaft; letztere führen gewöhnlich zum Abbruch der Remineralisierung und damit zur Nährstoffverarmung im Boden.

Bei unseren Untersuchungen im Praktikum erwies sich vor allem der niedrige pH-Wert beim Grauwacke- und beim Buntsandsteinstandort als dauerhaft limitierender Faktor. Temporäre Ungunst durch Temperaturungunst oder Wasser- bzw. Sauerstoffmangel führte zu zeitweiliger Verlangsamung der Abbauprozesse beim Carbonat- bzw. beim Bachstandort.

Eine wichtige Erkenntnis des Praktikums war, dass die biologischen Ergebnisse (Zeigerwerte) und die Resultate messtechnischer Untersuchungen sich gegenseitig ergänzen und in der Regel auch gegenseitig stützen – und damit ihre Richtigkeit wahrscheinlich machen. Dort, wo Diskrepanzen zwischen den Ergebnissen beider Verfahren bestehen, lassen sie sich in der Regel mit der unterschiedlichen Aussagefähigkeit der eingesetzten Methoden erklären (z.B. Kurzfrist-/Langzeitaussage).

## 4.7 Langfristige Beobachtungen

Da unsere Untersuchungen sich über den Zeitraum von 35 Jahren erstreckten, lag der Gedanke nahe, dass es über diese lange Zeit zu Veränderungen biotischer und abiotischer Faktoren gekommen sein könnte. Unsere diesbezüglichen Nachforschungen erbrachten jedoch bei den Zeigerwerten der Krautschicht keine statistisch signifikanten Unterschiede. Zwar hat sich im Verlauf der Jahre das Artenspektrum leicht verändert. Dies führte jedoch nicht dazu, dass man z.B. bei der durchschnittlichen Feuchte oder beim Nährstoffangebot einen An- oder Abstieg der Werte nachweisen konnte.

Ähnlich verhielt es sich auch bei den mit Hilfe technischer Methoden untersuchten Bodenparametern – hier waren ebenfalls keine signifikanten Veränderungen nachweisbar.

Wir schließen daraus, dass entweder der Untersuchungszeitraum zu kurz war oder dass es in unserem kaum durch Menschen beeinflussten Ökosystem am Edersee drastische Veränderungen nicht gegeben hat oder dass die untersuchten Böden eventuelle Veränderungen abgepuffert haben.

## 4.8 Untersuchungen zum Mikroklima (siehe hierzu auch [21, 26, 27])

Um die besonderen ökologischen Gegebenheiten von Waldökosystemen hinsichtlich ihrer mikroklimatischen Situation besser verstehen zu lernen, führen die Studierenden während des Praktikums an einem Tag Mikroklimamessungen durch.

Beim Mikroklima handelt es sich laut Definition um das Klima in bodennahen Luftschichten bzw. um das

Witterungsgeschehen in einem abgegrenzten Raum. Die Messungen wurden jeweils an zwei Standorten – Wald und Wiese – durchgeführt, um die unterschiedlichen ökologischen Bedingungen vergleichen zu können. Die folgenden Ausführungen stellen markante Veränderungen während des Messzeitraumes (von 5–22 Uhr) und wichtige Unterschiede zwischen den beiden Standorten dar.

## 4.8.1 Darstellung der Mikroklima-Parameter

(am Beispiel einer Tagesmessung, 12.06.2014)

Neben den pflanzenökologischen und bodenkundlichen Parametern wurden an jedem der 65 Praktikumstermine an einem Tag wichtige mikroklimatische Größen im Laubwald und auf einer Wiese stündlich erfasst. Auf diese Weise können ihre Veränderungen im Tagesverlauf beobachtet werden.

Im Gegensatz zu den erstgenannten Parametern gab es beim Mikroklima keine festen Untersuchungsorte; hier wurde in jedem Jahr ein anderer, möglichst repräsentativer, Standort ausgesucht. Für den Waldstandort wurde stets eine Fläche unter einer ausgewachsenen Buche gewählt, weil die Buche unter den Laubbäumen jene Art ist, die den stärksten Schatten am Waldboden hervorbringt.

Es würde den Rahmen dieser Publikation sprengen, die Ergebnisse aller 65 Messtage wiederzugeben. Da sich die Unterschiede zwischen Wald und Freiland am deutlichsten an einem Strahlungstag erkennen lassen, wird hier lediglich ein typisches Beispiel wiedergegeben. Der Messtag war überwiegend sonnig, mit gelegentlich vorbeiziehenden Wolken und einem kurzen Regenschauer (gegen 17 Uhr).

### 4.8.1.1 Licht

Ein wesentlicher, für die Pflanzen existentieller, Faktor ist das Licht; er bestimmt am unmittelbarsten die Photosyntheserate und damit die Biomasseproduktion. Entscheidend ist in diesem Zusammenhang, ob es den Pflanzen der Krautschicht gelingt, den Kompensationspunkt im Mittel dauerhaft zu überschreiten. Pflanzen bauen bei ihrer Zellatmung – ebenso wie die Tiere – ständig energiereiche Kohlenstoffverbindungen (Kohlenhydrate, Proteine und Lipide) ab, die sie zuvor mit Hilfe der Photosynthese produziert haben. Überwiegt die Leistung der lichtabhängigen Photosynthese diejenige der Zellatmung, baut die Pflanze Biomasse auf; der Kompensationspunkt wird überschritten. Ist hingegen die Zellatmung stärker (z. B. wegen Lichtmangels), wird ihre Biomasse abgebaut; sie „verhungert.“ Für Pflanzen am (schattigen) Waldboden besteht also die anspruchsvolle Aufgabe, den Kompensationspunkt über längere Zeiträume zu überschreiten, um wachsen zu können.

Abb. 71 zeigt den kontinuierlichen Verlauf der Lichtintensität des hier beschriebenen Tages (Messung alle 3 min). Es ist zu erkennen, dass das Licht im Tagesverlauf temporären Schwankungen durch Wolken unterliegt, ansonsten aber dem Lauf der Sonne folgt. Geht man davon aus, dass „normale“ Pflanzen ab ca. 3 000 Lux ihren Kompensationspunkt überschreiten, so wird deutlich, dass die Pflanzen auf der Wiese von etwa 6:00 bis 20:30 Uhr einen Bio-

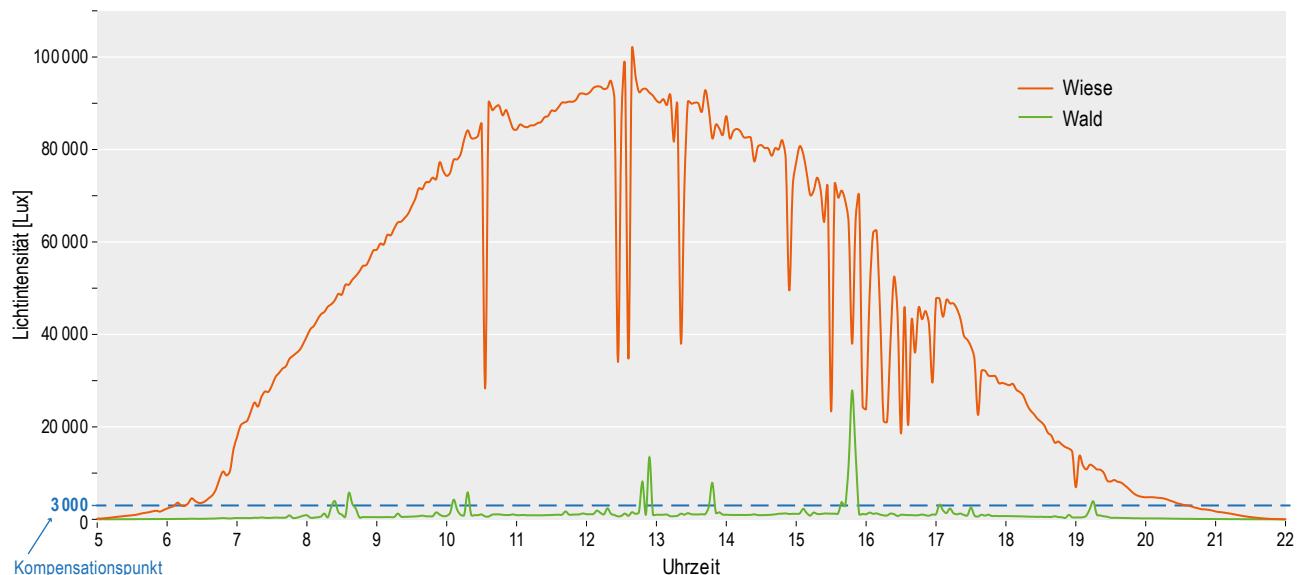


Abb. 71: Vergleich der Lichtintensität auf einer Wiese und in einem Laubwald in Nieder-Werbe (kontinuierliche Messung)

massezuwachs erwirtschaften können, weil in diesem Zeitraum der Kompensationspunkt überschritten wird. Dies gilt für die Krautschicht des Waldes nur an wenigen kurzen Momenten (und diese auch nur zwischen 8:00 und 18:30 Uhr), und zwar dann, wenn Lücken im Blätterdach Lichtflecken am Waldboden entstehen lassen. Diese wenigen produktiven Zeiträume würden den sogenannten Lichtpflanzen nicht ausreichen; sie müssten – wegen ständiger Unterschreitung des Kompensationspunktes – dauernd Biomasse abbauen und schließlich absterben. Hinzu kommt noch die Tatsache, dass der ausgewählte Messtag ein Sonnentag mit überdurchschnittlichem Lichtangebot war. Erst spezielle Anpassungsmechanismen (siehe unten) erlauben es den Schattenpflanzen des Waldes, trotz dieser widrigen Bedingungen, zu überleben.

Selbst, wenn nur alle Stunde eine Messung stattfindet, bleibt der Unterschied zwischen den Lichtintensitäten an den beiden Standorten deutlich (Abb. 72). Während auf der Wiese mittags Spitzenwerte von 88 000 Lux erreicht werden, liegen die höchsten Werte im Wald bei nur ca. 1 000 Lux. Man kann also feststellen, dass die maximalen Lichtintensitäten der beiden Standorte fast um den Faktor 100 auseinander liegen; im Tagesmittel empfängt der Waldboden im Buchenwald mit seinem dichten Blätterdach nur ca. 2–5 % der Lichtintensität der Wiese.

Tagesmittelwerte der Lichtintensität [Lux]:

**Wald: 823**      **Wiese: 38297**

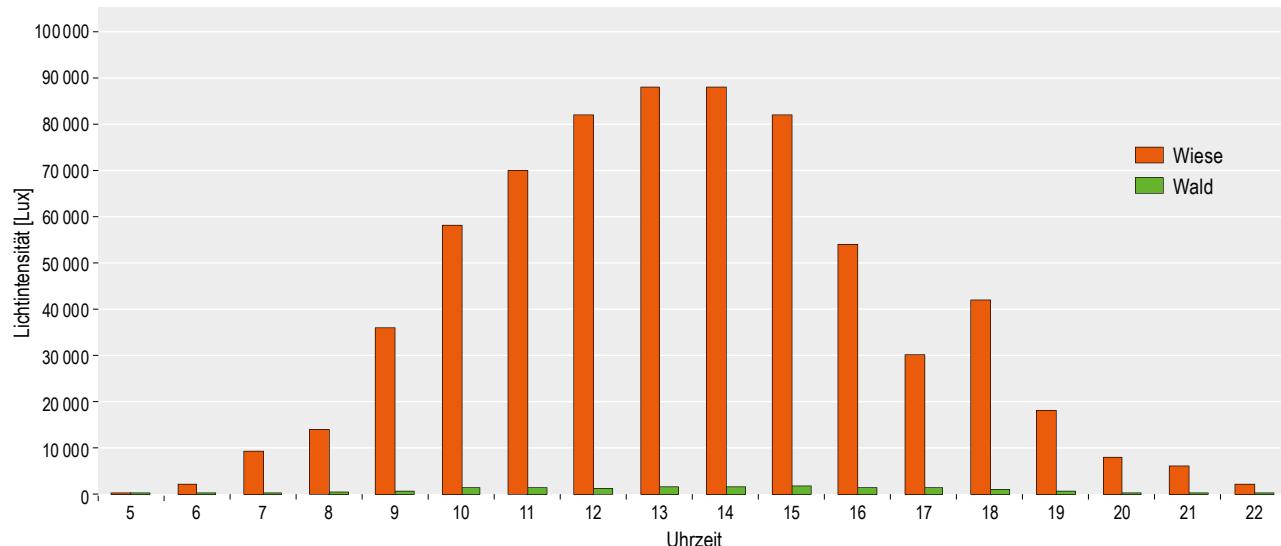
**(Lichtintensität im Wald: Nur ca. 2 %!)**

Diese Tatsache erfordert von der Krautschicht des Waldes erhebliche Anpassungen an die ungünstigen Lichtbedingungen. Die hohe Lichtintensität auf der Wiese bereitet keine Probleme, solange die relative Luftfeuchte hoch und genügend Bodenwasser vorhanden ist.

Die Waldbodenpflanzen müssen hingegen über Eigenschaften/Mechanismen verfügen, die ihnen ein Überleben trotz der sehr geringen Lichtintensität ermöglichen: Sie müssen ihren Kompensationspunkt drastisch erniedrigen. Solche Anpassungen sind v.a.:

- Erniedrigung des Kompensationspunktes durch:
  - » Ausbildung großflächiger, dünner Blätter (Vergrößerung der photosynthetisch aktiven Fläche; → besonders augenfällig bei den Blättern junger Rotbuchen, die im Schatten erwachsener Bäume stehen)
  - » Optimierung der Blattstellung (z. B. wechselständig, kreuzgegenständig, quirlständig → verhindert gegenseitige Beschattung)
  - » Ausbildung einer dünnen Cuticula (→ lässt mehr Licht hindurch)
  - » Ausbildung einer nur einschichtigen Epidermis (→ lässt mehr Licht hindurch)
  - » Verlagerung und Konzentration der Chloroplasten in das Palisadenparenchym (obere Schicht eines Blattes)

- Frühblüte: Während das Laub der Bäume noch nicht dicht ist, ist die Lichtintensität am Boden



**Abb. 72:** Vergleich der Lichtintensität auf einer Wiese und in einem Laubwald in Nieder-Werbe

relativ hoch (ca. 50 % der Intensität im Freiland; im Juni nur noch <10 %). Dies nutzen die Frühblüher durch Vorverlegen ihres Vegetationszyklus in die Monate März/April aus).

Diese Anpassungsstrategien werden allerdings mit Anpassungspreisen „bezahlt“ (z. B. geringere Toleranz gegenüber Spätfrösten, geringere Widerstandsfähigkeit gegenüber mechanischen Faktoren → Wind, erhöhte Austrocknungsgefahr). Wie noch dargestellt werden wird, müssen diese „Preise“ wegen der ausgeglichenen mikroklimatischen Situation im Wald in der Realität jedoch nicht „gezahlt“ werden.

Die hier wiedergegebenen Tagesmittelwerte sind repräsentativ für die Lichtverhältnisse im Wald und im Freiland. Die niedrige Lichtintensität im Wald ist die Folge der Beschattung durch die Bäume. In einem dichten Buchenwald kommen oft nur 1–5 % des Lichtgenusses von Freilandflächen an. Wer hier überleben wollte, musste sich an diese lichtschwachen Bedingungen anpassen. Problematisch für die daran adaptierte Krautschicht des Waldes sind Lichtflecken am Boden, hervorgerufen z. B. durch Umfallen/Umsägen von Einzelbäumen. Sind diese Flecken groß, kommt es dort im Verlauf des Tagesgangs der Sonne zu (u. U. stundenlangen) drastischen Änderungen bei der Lichtintensität und – damit verbunden – zu Änderungen der Temperatur und der Luftfeuchte: Die an gleichmäßige Bedingungen adaptierten Bodenpflanzen überstehen den damit verbundenen Stress in der Regel nicht. Daher sind solche Lichtflecken am Waldboden oft frei von Krautschichtpflanzen.

#### 4.8.1.2 Temperatur

Die Waldtemperaturen gehen im Tagesverlauf im Prinzip mit dem Verlauf der Sonneneinstrahlung einher, sind jedoch in verschiedenen Höhen unterschiedlich.

Wie aus Abb. 73 zu ersehen ist, sind die Temperaturen im Boden über den gesamten Messzeitraum nahezu konstant. Die Werte über dem Boden hingegen folgen weitgehend dem Verlauf der Lichtwerte; sie liegen allerdings ebenfalls relativ dicht beieinander.

Diese Beobachtungen lassen sich folgendermaßen erklären (Abb. 74): Tagsüber trifft die kurzwellige Lichtstrahlung der Sonne auf das Blätterdach des Waldes, wird dort in langwellige Wärmestrahlung umgewandelt und zum großen Teil wieder in die Atmosphäre zurückgestrahlt (Reflexion). Nur ein kleiner Teil des Sonnenlichtes tritt durch das Blätterdach hindurch, erreicht den Waldboden und wird dort in Wärme umgewandelt. Ein Teil davon dringt in den Boden ein (der ein schlechter Wärmeleiter ist) und erwärmt diesen. Ein anderer wird an der Bodenoberfläche reflektiert und pendelt nun zwischen dem Boden und der Unterseite des Blätterdaches hin und her. Daher liegen auch die Temperaturen der Luft relativ dicht beieinander. Wegen der geringen Lichtstrahlung, die den Waldboden erreicht, sind alle Temperaturen vergleichsweise niedrig (im Vergleich mit der Freilandfläche, siehe Abb. 76).

Fehlt die Sonne – morgens und abends/nachts – findet nur noch Reflexion statt; die Lufttemperaturen sinken unter jene des Bodens (Abb. 73).

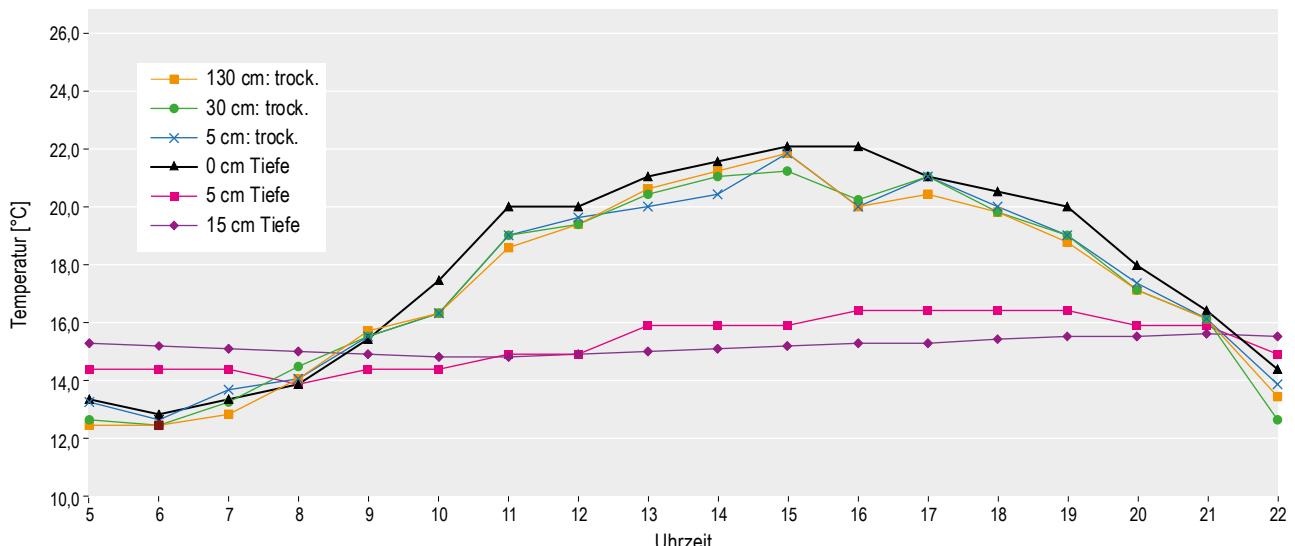


Abb. 73: Verlauf der Temperaturen in einem Laubwald in Nieder-Werbe

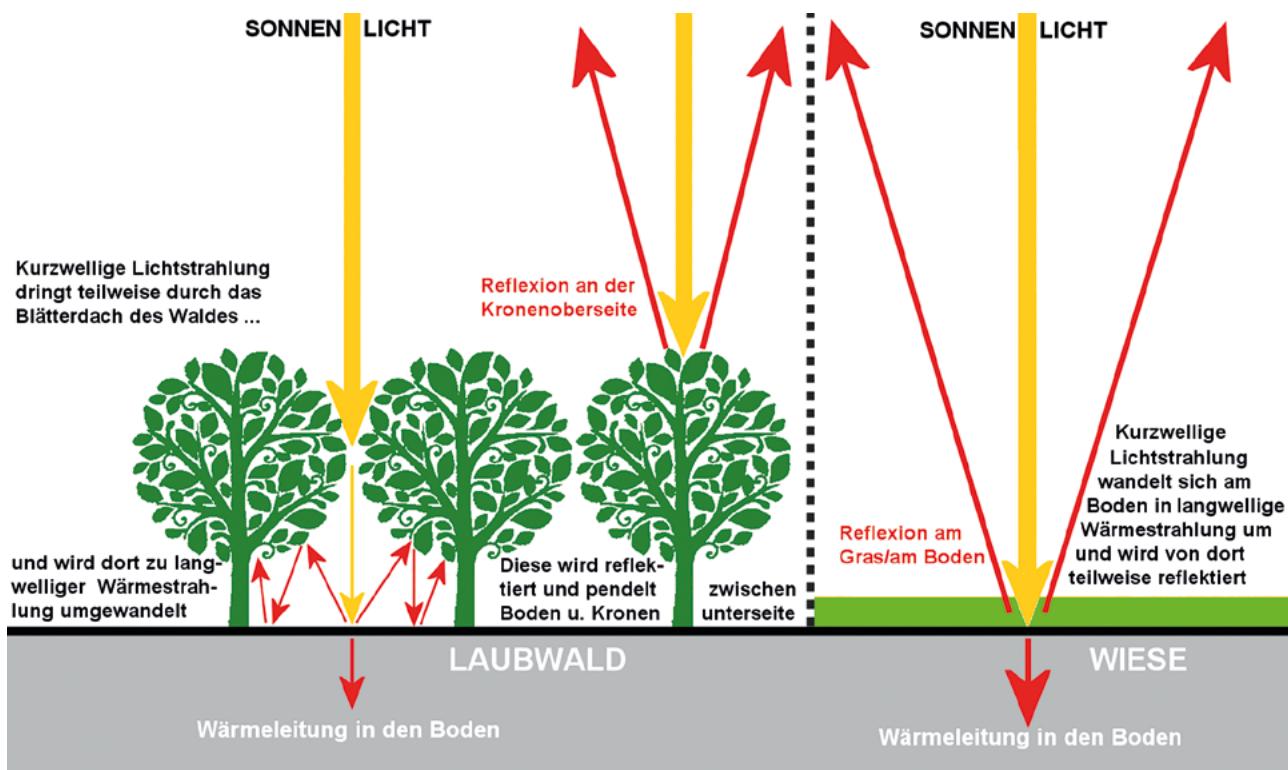


Abb. 74: Vergleich der Temperaturrentwicklung in einem Laubwald und einer Wiese an einem Strahlungstag (Schema)

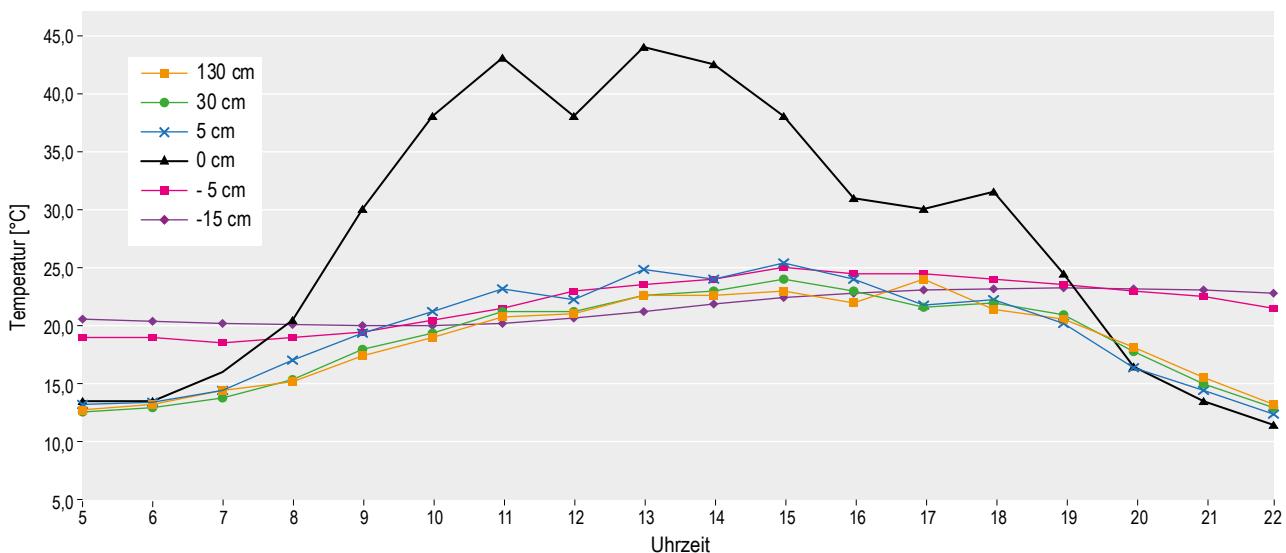


Abb. 75: Verlauf der Temperaturen auf einer Wiese in Nieder-Werbe

In Abb. 75 ist der Tagesgang der Temperaturen auf einer Wiese wiedergegeben. Die Kurven verlaufen ähnlich wie im Wald – allerdings auf einem höheren Niveau. Dies erscheint zunächst einmal positiv (RGT-Regel → erhöhter Stoffwechsel), erweist sich jedoch auch als problematisch, weil die Pflanzen leicht unter Wasserstress geraten können. Bemerkenswert ist der steile Anstieg der Temperatur direkt über dem Boden. Wie aus Abb. 74 zu ersehen ist, gibt es auf der Wiese eine stärkere Sonneneinstrah-

lung, so dass sich der Boden hier besonders stark erwärmt. Pflanzen und Mikroorganismen sind auf der Wiese einer wesentlich stärkeren Temperaturamplitude ausgesetzt, die sie unter Stress setzt.

Während die Lufttemperaturen auf der Wiese bereits gegen 19 Uhr unter jene des Bodens sinken, tritt diese Umkehrung im Wald erst zwei Stunden später ein – eine Folge des ausgeglichenen Mikroklimas im Wald.

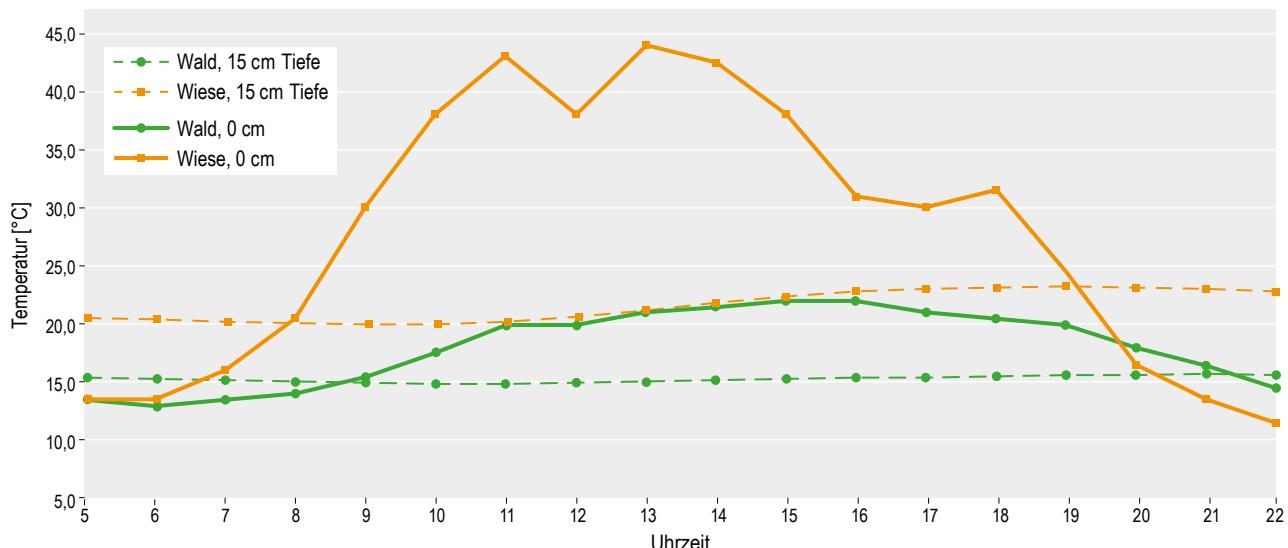


Abb. 76: Vergleich der Temperaturen auf einer Wiese und in einem Laubwald in Nieder-Werbe

Wie aus Abb. 76 zu ersehen ist, weist die Temperatur an der Bodenoberfläche der Wiese im Tagesverlauf den größten Anstieg auf, da die (kurzwellige) Sonnenstrahlung dort in (langwellige) Wärmestrahlung umgewandelt wird. Dies ist beim Wald nicht zu beobachten, da hier kaum direktes Sonnenlicht auf den Boden gelangt. Die Amplitude ist auf der Wiese wesentlich größer (ca. 30 °C im Tagesverlauf) als im Wald (ca. 7 °C). Dies bedeutet für Wiesenpflanzen eine erhöhte Stresssituation. Eine derartig große Temperaturveränderung innerhalb eines Tages erfordert von der bodennahen Krautschicht beträchtliche Anpassungsbemühungen. Im Boden hingegen verläuft die Temperatur – ähnlich wie im Wald – weitgehend konstant, so dass für die Krautschichtwurzeln (und die Bodenorganismen) keine besonderen Anpassungsstrategien erforderlich sind, sich mit Temperaturschwankungen auseinanderzusetzen.

Tagesmittelwerte der Bodentemperaturen [°C]:

**Wald:** in 15 cm Tiefe: 15,3  
in 5 cm Tiefe: 15,3  
in 0 cm Tiefe: 18,0

**Wiese:** in 15 cm Tiefe: 21,6  
in 5 cm Tiefe: 21,6  
in 0 cm Tiefe: 27,5

Tagesmittelwerte der Lufttemperaturen [°C]:

**Wald:** in 5 cm: 17,5  
in 30 cm: 17,4  
in 130 cm: 17,3

**Wiese:** in 5 cm: 19,4  
in 30 cm: 18,8  
in 130 cm: 18,7

Die Tagesmittelwerte der Bodentemperaturen liegen im Wald um ca. 6 °C unter jenen der Wiese. Dies bedeutet für die Bodenorganismen eine deutliche Verlangsamung ihrer Stoffwechselprozesse. (Bei einer Reduktion in dieser Größenordnung ist von einer Halbierung der metabolischen Aktivität auszugehen). Weil die Lufttemperaturen lediglich um 1–2 Grad unter jenen der Wiese liegen, ist für die Krautschicht eine solche Verringerung ihrer Aktivität nicht zu erwarten.

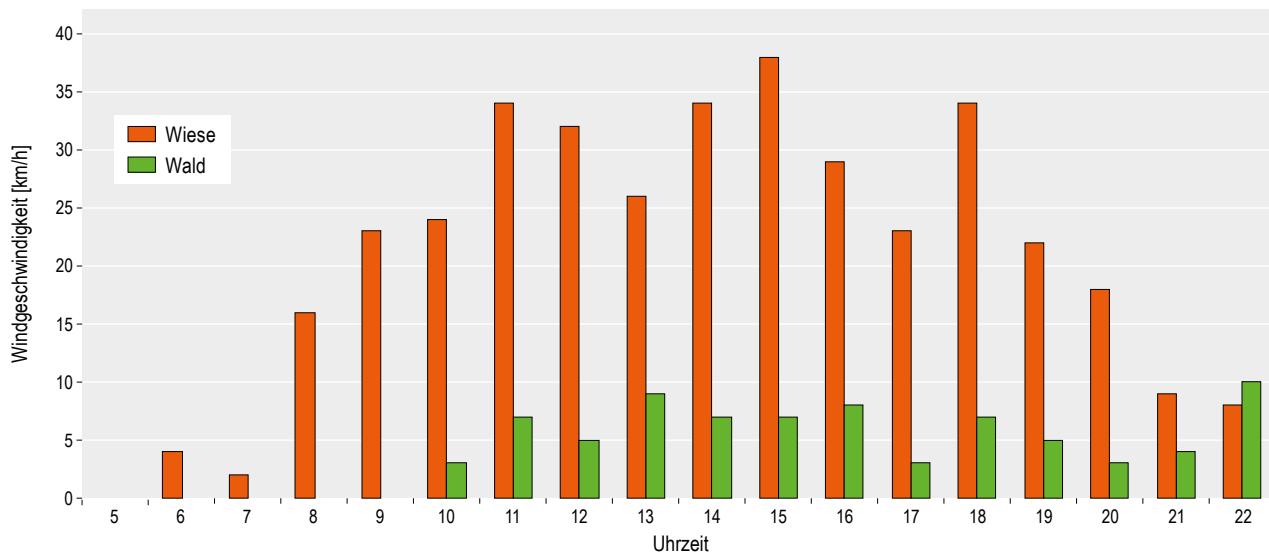
#### 4.8.1.3 Wind

Bei der Windmessung wurde mit einem Schalenkreuzanemometer der Windweg in m/h gemessen.

Wind hat für die Vegetation vor allem über seine mechanische Wirkung Einfluss; darüber hinaus trägt er das für die Photosynthese nötige CO<sub>2</sub> an die Blätter heran. Schließlich ist auch noch sein Einfluss auf die Transpiration von Bedeutung.

Vergleicht man die Messwerte von Wiese und Wald, so stellt man fest, dass die Tagesgänge ähnlich sind, nicht aber die Höhe der Messwerte (Abb. 77).

Der Windweg im Wald beträgt zu jedem Messzeitpunkt nur etwa 2 % der Wiesenwerte. Das hat damit zu tun, dass auf einer Wiese der Wind ungehindert



**Abb. 77:** Vergleich des Windweges auf einer Wiese und in einem Laubwald in Nieder-Werbe

wehen kann, ohne von Bäumen gebremst zu werden. Im Wald dagegen, wo die Bäume zum Teil sehr dicht stehen, wird der Wind schon am Waldrand von den dort vorhandenen Büschen und Sträuchern gebremst. Deshalb hat die Krautschicht im Wald hinsichtlich des Windes andere Anpassungsmechanismen entwickeln können als auf der Wiese: Für die Blätter der Schattenpflanzen im Wald besteht aufgrund der niedrigeren Windgeschwindigkeit nicht die Gefahr der mechanischen Beschädigung. Sie können es sich also „erlauben“, große, dünne Blätter ohne starkes Festigungsgewebe auszubilden → Energieersparnis und eine größere photosynthetisch aktive Fläche. Würden diese Pflanzen auf einer Wiese stehen, könnten sie aufgrund des mangelhaften Transpirationsschutzes, der dünnen Cuticula und der relativ großen Blätter dort nicht überleben. Wiesenpflanzen sind ständig der Gefahr des Austrocknens ausgesetzt, weswegen sie eine dicke Cuticula und kleine Blätter besitzen müssen. Oft findet man gerade auf Wiesen verschiedenartigste Gräser, die aufgrund ihrer schmalen, schwertförmigen Blätter die Transpirationsfläche relativ klein halten können.

Tagesmittelwerte des Windweges [m/h]:

**Wald: 4,6                    Wiese: 22,1**  
**(Windweg im Wald: Nur ca. 2%!)**

#### 4.8.1.4 Relative Luftfeuchte

(Die relative Luftfeuchtigkeit wurde in 5 cm, 30 cm und 130 cm Höhe über dem Boden mit einem Psychrometer gemessen).

Auch die Tagesgänge der relativen Luftfeuchte veranschaulichen die mikroklimatischen Unterschiede zwischen den Standorten Wiese und Wald.

#### Wald

Im Wald ist die relative Luftfeuchtigkeit in allen drei Höhen den ganzen Tag über ungefähr gleich hoch (Abb. 78). Der Grund dafür ist, dass die Faktoren Temperatur und Wind im Wald – gleichgültig in welcher Höhe – einen geringeren Einfluss haben als auf einer Wiese. Im Wald herrschen in der Regel niedrigere Temperaturen und Windgeschwindigkeiten vor. Die relative Luftfeuchtigkeit liegt bis 7 Uhr ± konstant bei 90 bis 95 %. Ab 7 Uhr nimmt sie stetig ab, bis sie um 16 Uhr ein Minimum von ca. 35 % erreicht. Dann folgt – mit abnehmender Temperatur – wieder ein Anstieg bis 22 Uhr auf ca. 80 %.

#### Wiese

Bis 7 Uhr morgens ist die Luftfeuchte in allen Höhen nahezu bei 100 % (Abb. 79). In den nächsten Stunden nimmt sie in allen drei Höhen ab, allerdings liegt sie in 5 cm im Tagesverlauf stets über denen in 30 bzw. 130 cm Höhe. Der Grund dafür ist, dass in 30 cm und in 130 cm Höhe die Faktoren Temperatur und Wind mehr Einfluss auf die Luftfeuchtigkeit haben als in 5 cm Höhe, wo sich Vegetation befindet und deren Transpiration und Evaporation des Bodens für eine höhere Feuchtigkeit sorgen. Das Minimum liegt um 14/15 Uhr – korrespondierend mit dem Temperatur- und dem Windmaximum. Ab 18 Uhr steigt die Luftfeuchtigkeit in allen drei Höhen wieder an. In 5 cm Höhe bis 21 Uhr wieder auf 100 % und

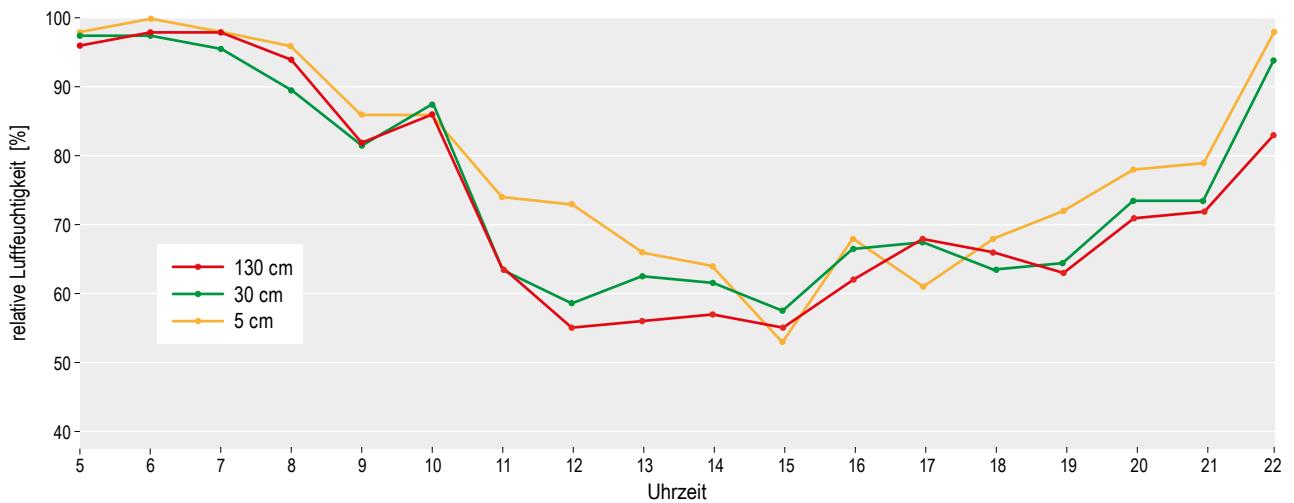


Abb. 78: Verlauf der relativen Luftfeuchte im Wald in Nieder-Werbe

in 30 cm und 130 cm Höhe auf ca. 80 %. Die Höhe der Luftfeuchtigkeit ist stark von der Temperatur abhängig. Bis zu den Nachmittagsstunden steigen die Temperaturen an und gleichzeitig nimmt die Luftfeuchtigkeit ab. Morgens und abends herrschen die niedrigsten Temperaturen vor und die höchste Luftfeuchtigkeit.

Der Peak um 17 Uhr ist der Tatsache geschuldet, dass zu diesem Zeitpunkt ein kurzer Regenschauer auf das Untersuchungsgebiet niederging. Er tritt auf der Wiese deutlicher in Erscheinung als im Wald mit seinem ausgeglicheneren Mikroklima.

Aus Abb. 80 geht hervor, dass die Luftfeuchte im Wald während des gesamten Messzeitraums über

der der Wiese liegt. Auch am Beispiel der relativen Feuchtigkeit wird also deutlich, dass sich die Pflanzen der Krautschicht im Wald im Vergleich zur Wiese größere Blätter und eine dünnerne Cuticula „leisten“ können, weil die höhere Feuchtigkeit eine geringere Transpirationsgefahr bedeutet.

Tagesmittelwerte der relativen Luftfeuchtigkeit [%]:

Wald: – in 5 cm: 79  
– in 30 cm: 76  
– in 130 cm: 74

Wiese: – in 5 cm: 73  
– in 30 cm: 72  
– in 130 cm: 69

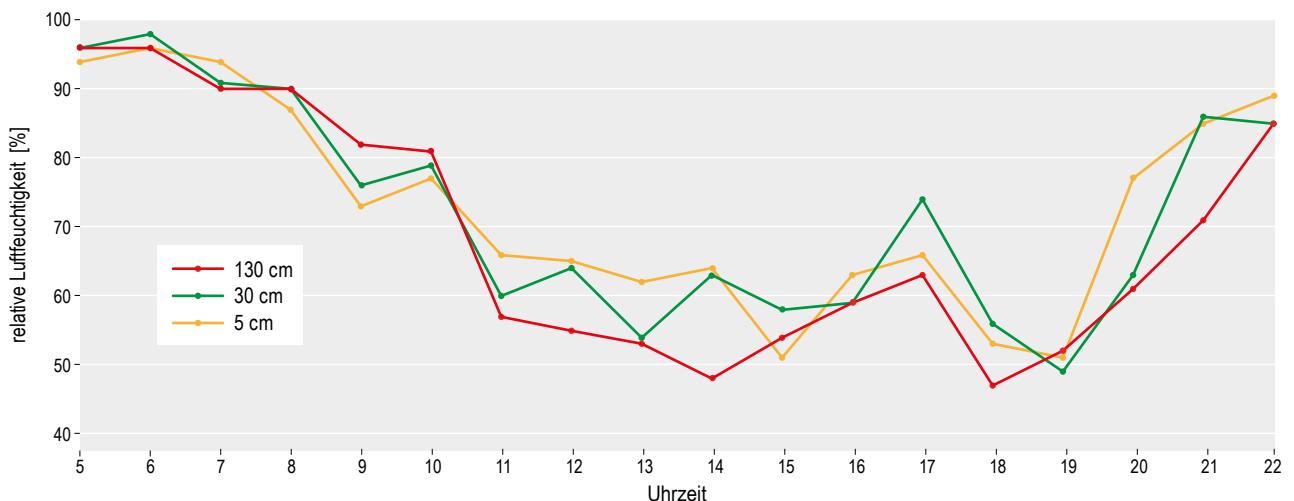


Abb. 79: Verlauf der relativen Luftfeuchte in verschiedenen Messhöhen auf einer Wiese in Nieder-Werbe

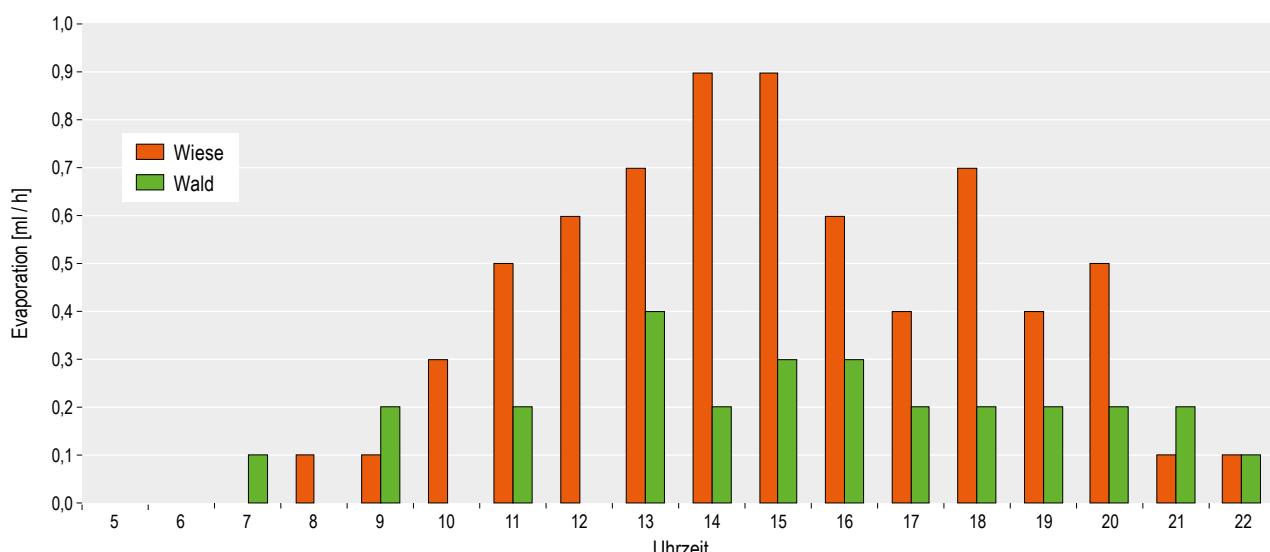


**Abb. 80:** Vergleich der relativen Luftfeuchte (in 130 cm Höhe) auf einer Wiese und in einem Laubwald in Nieder-Werbe

#### 4.8.1.5 Evaporation

Aus ökologischer Sicht wäre es optimal die (durch Spaltöffnungen geregelte) Transpiration der Krautschichtpflanzen zu messen. Da dies aus Kosten- und Zeitgründen nicht infrage kam, wurde im Praktikum die Evaporation gemessen. Man versteht darunter die unkontrollierte Verdunstung von Wasser an einer definierten, feuchten Oberfläche. Dieser Wert erlaubt es, die Gefahr des Wasserverlustes von in der Umgebung wachsenden Pflanzen abzuschätzen. Die Evaporation ist somit ein Maß für die potentielle Transpiration der Pflanzen. Ihre Höhe ist abhängig vom Wind, von der Temperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit. Sie wird mit dem Evaporimeter in ml/h gemessen.

Vergleicht man die Evaporationswerte von Wald und Wiese (Abb. 81), so sieht man, dass die Evaporation um 14 Uhr ihr Maximum erreicht. Eine zweite Aufälligkeit ist, dass sie im Wald niedriger ist als auf der Wiese. Dies hängt mit den niedrigeren Temperaturen und den geringeren Windgeschwindigkeiten im Wald zusammen. Etwa 90 % des über die Wurzeln aus dem Boden aufgenommenen Wassers wird durch die Transpiration wieder über die Blätter abgegeben. Vergleicht man die Kurvengänge der Evaporation mit den Kurvengängen der relativen Luftfeuchtigkeit, wird deutlich, dass sich diese beiden Parameter indirekt proportional zueinander verhalten: Je höher die relative Luftfeuchtigkeit, umso geringer die Evaporation.



**Abb. 81:** Vergleich der Evaporation auf einer Wiese und in einem Laubwald in Nieder-Werbe

Tagesmittelwerte der Evaporation [ml/h]:

Wald: – in 5 cm: 0,1  
– in 30 cm: 0,1  
– in 130 cm: 0,2

Wiese: – in 5 cm: 0,3  
– in 30 cm: 0,4  
– in 130 cm: 0,4

(Der Regenschauer um 17 Uhr macht sich auch bei der Evaporation durch ein Absenken derselben bemerkbar).

Für die Pflanzen des Waldes mit ihren schwach ausgeprägten Transpirationsschutzmechanismen erweisen sich die ausgeglicheneren und niedrigeren Evaporationswerte als günstig; sie können sich die mangelhaften Schutzmechanismen gewissermaßen „leisten“.

#### **Zusammenfassung der mikroklimatischen Auswirkungen auf das Pflanzenwachstum im Wald und im Freiland:**

Im Vergleich zwischen den Pflanzen im Wald und auf der Wiese haben die Waldpflanzen, bis auf die schlechten Lichtverhältnisse, die günstigeren Lebensbedingungen. Die ausgeglicheneren Temperaturen, die höhere Luftfeuchtigkeit, die niedrigeren Windgeschwindigkeiten und die niedrigeren Evaporationswerte wirken sich positiv auf den Wasserhaushalt der Pflanzen und des Waldbodens aus. Auch die Destruenten können dort besser arbeiten, weil der Boden nicht so leicht austrocknet. Die Pflanzen können sich, wie schon erwähnt, große Blätter mit sehr dünner Cuticula „leisten“ und auch ihre Spaltöffnungen länger offenlassen. Sie können auf diese Weise länger Photosynthese betreiben als die Pflanzen der Wiese (vorausgesetzt, es gelingt ihnen, den Lichtkompensationspunkt zu überschreiten). Die Wiesenvegetation gelangt bei geöffneten Stomata aufgrund der höheren Transpirationsgefahr leicht in Wasserstress und kann im Sommerhalbjahr oft nur morgens und abends Gas austausch betreiben. Dennoch wachsen auf der Wiese aufgrund der sehr guten Lichtverhältnisse wesentlich mehr Pflanzenarten als im Wald. (Dort schaffen es nur wenige Species, durch evolutionäre Anpassungen, den Kompensationspunkt längerfristig zu überschreiten).

## **5 Zusammenfassung der ökologischen Beziehungen**

Eines der wesentlichen Ziele des Praktikums – Erfassung des gesamten Beziehungsgefüges abiotischer und biotischer Komponenten des Ökosystems „Laubwald“ – wurde nicht erreicht. Obwohl mitteleuropäische Laubwälder als relativ artenarm gelten, muss man doch aufgrund unserer Freiland- und Laborerhebungen feststellen, dass die Anzahl von ökologischen Faktoren, die Einfluss auf die Existenzmöglichkeiten der Krautschicht des Waldes nimmt, erheblich größer ist, als dass sie innerhalb einer Woche auch nur annähernd vollständig erfasst werden kann. Folgerichtig ist das von uns erstellte Netz von gegenseitigen Beeinflussungen unvollständig (Abb. 82). Immerhin konnte den Praktikumsteilnehmern zumindest die Existenz eines sehr vielfältigen ökologischen Netzes vorgestellt werden.

Unsere weitere Intention, den durch ihr Studium stark technisch ausgebildeten und orientierten Studierenden die Aussagemöglichkeiten biologischer

Messverfahren (Zeigerpflanzen) näherzubringen, hat sich hingegen verwirklichen lassen: Oft waren sie beeindruckt und erstaunt darüber, dass man mit Hilfe von Pflanzenaufnahmen Aussagen über wichtige Umweltfaktoren (pH-Wert und Nährstoffversorgung) machen konnte, die anschließend mit technischen Messungen bestätigt wurden. Das trifft z. B. für unsere Messungen des pH-Wertes zu. Auch der Zusammenhang mit den Fulvosäuregehalten, der Stabilität der Bodenkrümel, dem Ladungssinn von Bodenkolloiden und der Kationenadsorption an Bodenkolloide wurde deutlich.

Bei anderen Parametern (z. B. Messung des Wassergehaltes, der Aktivität der Remineralisierer, des Ammonium- und des Phosphatgehaltes) konnten keine derartigen Übereinstimmungen mit den Zeigerwerten der Krautschicht festgestellt werden. Hier zeigte sich, dass die Momentanwerte eines Tages nicht geeignet sind, die Langzeitwerte der biologischen

Aussagen zu erklären bzw. zu bekräftigen. Den Studierenden wurde bewusst, dass in der Regel nur kosten- und zeitaufwändige, kontinuierliche technische Langzeit-Messungen ähnlich aussagekräftig sind wie die mittleren Zeigerwerte der von ihnen im Praktikum herangezogenen Krautschicht des Waldes.

Ein weiterer wesentlicher Aspekt des Praktikums war die Frage nach Herkunft und Erhalt der Nährstoffe im Boden (vor allem N, P, K, S, Ca, Fe, Mg). Wir haben uns dieser Frage von vielen, unterschiedlichen Seiten genähert (s. o.). Die Studierenden haben erfahren, dass die primäre Nährstoffzufuhr aus der chemischen Zusammensetzung des Ausgangsgesteins erfolgt. Am Beispiel des Buntsandsteins, der im wesentlichen aus dem Mineral Quarz besteht, wurde deutlich, dass der daraus entstandene Boden kaum Ionen liefert, die für das Pflanzenwachstum von Bedeutung sind. Auf der anderen Seite der Skala haben sie den Zechsteinkalk kennengelernt, der reich an Mineralen ist, die als Nährstofflieferanten gelten.

Auch die sekundäre Quelle (Remineralisierung der toten organischen Substanz) wurde intensiv erforscht. Allen Beteiligten wurde bewusst, dass dieser Prozess

außerordentlich komplex und damit störungsanfällig ist. Faktoren, wie die Bestimmung der Bodenart (Sand, Schluff, Ton), Struktur, Stabilität und Ladungssinn von Bodenkrümeln (Bodenkolloide) wurden ebenso untersucht und diskutiert, wie der Austausch von Kationen zwischen Kolloiden und den Wurzeln der Krautschichtpflanzen. Auch der Bedeutung von Grobzerkleinerern (saprobore Organismen) und den Arbeitsmöglichkeiten der Bakterien und Pilze (Destruenten/Remineralisierer) galt unser Interesse.

Es wurden temporäre Störfaktoren, wie z. B. Luft- bzw. Wassermangel aufgedeckt, aber auch dauerhafte, wie z. B. ein niedriger pH-Wert oder mangelnder Nachschub an abgestorbener Biomasse (Nekromasse). Immer wieder erfolgte ein Abgleich der technischen Messungen mit den Zeigerwerten der Pflanzen, um festzustellen, welche gleichartigen (oder auch unterschiedlichen) Erkenntnisse sich daraus ableiten ließen.

Nach Beendigung des Praktikums hatten die Studierenden die Aufgabe, sich noch einmal in der obligaten Praktikumsausarbeitung mit dem ökologischen Beziehungsgefüge der vier Untersuchungsstandorte

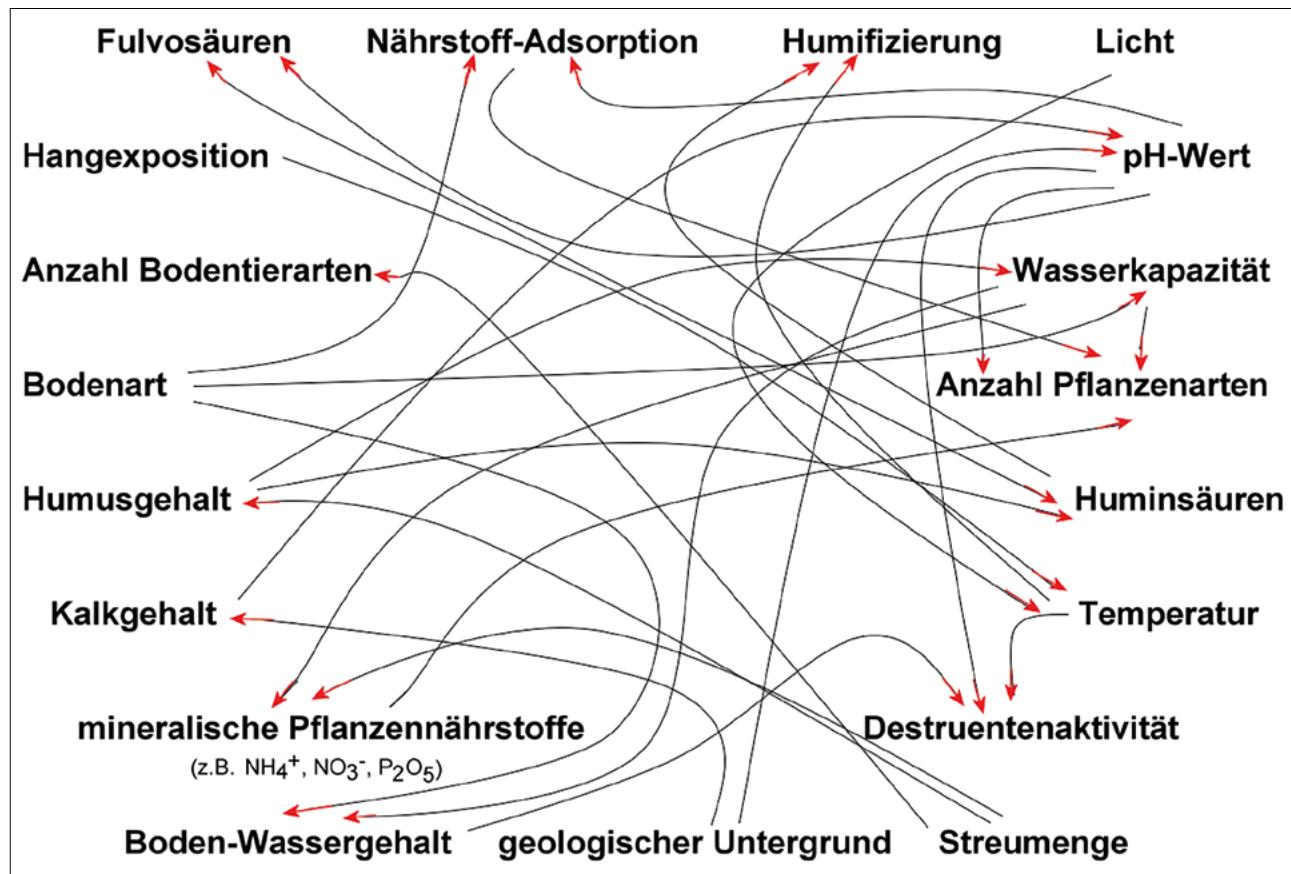


Abb. 82: Schema des ökologischen Netzwerkes am Boden eines Laubwaldes (unvollständig)

auseinanderzusetzen. Wenn nach der Durchsicht dieser Ausarbeitungen durch uns beim einen oder anderen eine Wiedervorlage verlangt wurde, mag dies zuweilen daran gelegen haben, dass die Betroffenen mit der Komplexität des Praktikumsinhaltes in manchen Details überfordert waren.

Sicher ist jedoch, dass diese (wenig geliebte) Ausarbeitung eine geordnete logische Struktur verlangte,

die für die Teilnehmer an der Veranstaltung gewissermaßen als Vorstufe für die bald darauf erfolgende Abschlussarbeit des Studiums nützlich war.

Wir hoffen, dass die ehemaligen Studierenden sich in Zukunft bei jedem Schritt in den Wald daran erinnern werden, wie komplex und spannend das Leben unter ihren Füßen ist.

## 6 Literaturverzeichnis

### Zitierte Literatur

- [1] ELLENBERG, H. (1974): Zeigerwerte der Gefäßpflanzen Mitteleuropas. *Scripta Geobotanica* **9**: 97 S.
- [2] ELLENBERG, H.; WEBER, H. E.; DÜLL, R., WIRTH, V., WERNER, W. & PAULISSEN, D. (1992): Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa. *Scripta Geobotanica* **18**: 1 – 248, Göttingen.
- [3] CLOOS, H. (1955): Geologische Strukturkarte der Mittelgebirge. *Geol. Rundschau*, **44**, S. 480.
- [4] Geologische Karte von Hessen (1969): Ausschnitt aus der GK 1:25 000, Bl. 4720 Waldeck, 1969.
- [5] STEUBING, L. & FANGMMEIER, A. (1992): Pflanzenökologisches Praktikum. Ulmer, Stuttgart.
- [6] AICHELE, D. & GOLTE-BECHTLE, M. (1990): Was blüht denn da? 53. Auflage, Franck'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart und folgende Auflagen bis 2021.
- [7] OBERDORFER, E. (1983): Pflanzensoziologische Exkursionsflora. 5. Aufl., Ulmer, Stuttgart.
- [8] SCHAUER, TH. & CASPARI, C. (1993): Der große BLV-Pflanzenführer. 6. Auflage, BLV Verlagsgeellschaft, München, Wien, Zürich.
- [9] SCHMEIL, O. & FITSCHEN, J. (1982): Flora von Deutschland. 87. Aufl., bearbeitet von W. Rauh und K. Senghas, Quelle und Meyer, Heidelberg.
- [10] KUNTZE, H., NIEMANN, J., ROESCHMANN, G. & SCHWERDTFEGER, G. (1981): Bodenkunde. 2. Aufl., UTB Ulmer, Stuttgart.
- [11] BRUCKNER, G. (1988): Lebensraum Boden. Kosmos-Handbücher, Franckh'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- [12] Energie- und Umweltagentur NÖ: <https://www.umwelt-bildung.at/download/bodeworkshop-aufschlaemmprobe-anleitung-eNu.pdf>  
letzter Zugriff am 02.02.2025.
- [13] MAISENBACHER, P.: Versuchsanleitung zum Austausch von Nährstoffen in Böden. Zentrum für Schulqualität und Lehrerbildung (HG) [CC BY SA 4.0 DE] In: Landesbildungsserver Ba.-Wü. – Fachbereich Geographie: <https://www.schule-bw.de/faecher-und-schularten/gesellschaftswissenschaftliche-und-philosophische-faecher/geographie/material/materialboden/naehrstoffhaltevermoegen/eisen-nitrat-bodenkolloide.pdf>  
letzter Zugriff am 02.02.2025.
- [14] MAISENBACHER, P.: Versuchsanleitung zum Austausch von Nährstoffen in Böden. Zentrum für Schulqualität und Lehrerbildung (HG) [CC BY SA 4.0 DE] In: Landesbildungsserver Ba.-Wü. – Fachbereich Geographie: <https://www.schule-bw.de/faecher-und-schularten/gesellschaftswissenschaftliche-und-philosophische-faecher/geographie/material/materialboden/naehrstoffhaltevermoegen/ladung-farbtraeger.pdf>  
letzter Zugriff am 02.02.2025.
- [15] REHFUESS, K. E. (1990): Waldböden. 2. Aufl., Pareys Studientexte 29, Hamburg, Berlin.
- [16] HORN, M. & KULICK, J. (1969): Geologische Karte von Hessen, GK 1:25 000, Bl. 4720 Waldeck. Hessisches Landesamt für Bodenforschung, Wiesbaden.
- [17] HORN, M. & KULICK, J. (1969): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Hessen, GK 1:25 000, Bl. 4720 Waldeck. Hessisches Landesamt für Bodenforschung, Wiesbaden.
- [18] MÜLLER, S. (1969): Böden unserer Heimat. Franckh'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- [19] PLASS, W. (1968): Erläuterungen zur Bodenkarte von Hessen, BK 1:25 000, Bl. 4720 Waldeck. Hessisches Landesamt für Bodenforschung, Wiesbaden.

- [20] SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL (1992): Lehrbuch der Bodenkunde. 13. Auflage, bearbeitet von P. Schachtschabel, H. P. Blume, G. Brümmer, K.-H. Hartge & U. Schwertmann, Enke, Stuttgart und folgende Auflagen bis 2018.
- [21] LERCH, G. (1991): Pflanzenökologie. 1. Auflage, Akademie-Verlag, Berlin.
- [22] MOELLER, H. (2003): Zum Gebrauch des arithmetischen Mittels der pH-Werte von Böden. *Tuexenia* **23**, 397–399, Göttingen.
- [23] PALM, W. (1973): Keys to small organisms in soil, litter and water troughs. Nuffield Foundation, Penguin Books Ltd. Harmondsworth and Longmans Green Ltd. London. 1970, 5–12; Schlüssel geändert und übersetzt.
- [24] GISI, U. (1997): Bodenökologie. Georg Thieme Verlag, Stuttgart.
- [25] Eurofins Agro. Wiki: <https://www.eurofins-agro.com/de-de/phosphor-boden>. letzter Zugriff am 02.02.2025.
- [26] REMMERT, H. (1978): Ökologie, ein Lehrbuch. Springer, Heidelberg, Berlin New York.
- [27] BEGON, M. E., HARPER, J. L. & TOWNSEND, C. R. (1998): Ökologie. Spektrum-Verlag, Heidelberg, Berlin.
- [28] SIMMEL et al. (2021): Ellenberg N values of bryophytes in Central Europe. In: *J. Veg Sci.* **32** (2021), e12957.
- Weiterführende Literatur, die den Praktikumsteilnehmern zur zusätzlichen Lektüre anempfohlen wurde:**
- ALEV, K. (1991): Methodenhandbuch der Bodenmikrobiologie. Ecomed, Landsberg/Lech.
- AMANN, G. (1984): Bäume und Sträucher des Waldes. 14. Auflage, Melsungen: Neumann.
- AMANN, G. (2023): Bodenpflanzen des Waldes. 3. Auflage, Melsungen: Neumann.
- Arbeitsgruppe Boden (1994): Bodenkundliche Karterungsanleitung für Geowissenschaften und Rohstoffe. 4. Auflage, Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- BÖHLMANN, D. (1982): Ökophysiologisches Praktikum. Parey, Berlin, Hamburg.
- BRUCKNER, G. & KALUSCHE, D. (1990): Boden und Umwelt. 2. Auflage, Biologische Arbeitsbücher **19**, Quelle & Meyer, Heidelberg, Wiesbaden.
- GIGON, A., GERSTER, A., GÜSEWELL, S. & STENZ, B. (1999): Kurzpraktikum Terrestrische Ökologie. Vdf-Verlag, Zürich.
- HAFNER, J. & PHILIPP, E. (1978): Ökologie. Schrödel-Verlag, Braunschweig.
- HENNINSEN, D. & KATZUNG, G. (2006): Einführung in die Geologie Deutschlands. 7. Auflage, Elsevier, München.
- HOFMEISTER, H. (1983): Lebensraum Wald. 2. Auflage, Parey, Hamburg.
- HOFMEISTER, H. & NOTTEBOHM, G. (1995): Ökologie der Wälder. G. Fischer, Stuttgart.
- LARCHER, W. (1994): Ökophysiologie der Pflanzen. 5. Auflage, UTB Ulmer, Stuttgart.
- LOTZ, K. (1995): Einführung in die Geologie des Landes Hessen. Hitzeroth, Marburg.
- MATHTEY, W., DELLA SANTA, E. & WANNENMACHER, C. (1989): Praktische Ökologie. Diesterweg/Sauerländer, Frankfurt/M.
- ROWELL, D. L. (1994): Bodenkunde (Untersuchungsmethoden und ihre Anwendungen). Springer, Berlin, Heidelberg, New York.
- STERN, H. (1979): Rettet den Wald. Heyne-Verlag, München.
- STEUBING, L. (1965): Pflanzenökologisches Praktikum. Parey, Berlin, Hamburg.
- WALTER, R. (1992): Geologie von Mitteleuropa. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.

**Dank:** Unser Dank gilt jenen annähernd 1 000 Studierenden, die im Verlauf der Jahre durch ihr Engagement und ihren Enthusiasmus (und ihre Leidenschaft) zur Erstellung der ca. 6 000 Daten für diese Publikation beigetragen haben. An manchen Tagen (Mikroklimamessung) mussten sie um 4:00 Uhr aufstehen, durch den finsternen Wald zur Klima-Messstation laufen – immer gewärtig, auf eine Rotte Wildschweine zu treffen oder durch das Schrecken eines Rehbocks in Angst versetzt zu werden – und wenn die letzte Messung um 22:00 Uhr absolviert war, hieß es noch, die Station abzubauen.

Ca. 50 % der Arbeiten fielen im Freiland an. Diese waren zu absolvieren – gleichgültig, ob die Wege sehr steil waren, ob es regnete, Mückenangriffe stattfanden, oder ob Zecken in der Krautschicht lauerten. Wer abends am Lagerfeuer sitzen wollte (und wer wollte das nicht), musste aus dem Wald ein paar Äste mitbringen. Wenn nicht genug Holz da war, verlosch das Feuer bereits am frühen Abend. Bei der Arbeit im „Labor“ waren Ideenreichtum und Improvisationsfähigkeit gefragt – und Feierabend gab es erst dann, wenn die letzte Messung absolviert war.

In der Ökostation in Nieder-Werbe, die viele Jahre genutzt wurde, existierte nur ein einziger (enger) Schlafraum für die jeweils 16 Personen. Wer die

nächtliche Geräuschkulisse nicht ertragen konnte, musste im Seminarraum auf Stühlen (oder auf der Wiese vor dem Haus) übernachten. Jeweils vier Personen hatten (zusätzlich zur wissenschaftlichen Arbeit) Küchendienst. Das bedeutete morgens den Tisch zu decken, anschließend abzuräumen und den Abwasch zu erledigen, abends hieß es, für die gesamte Gruppe zu kochen und wieder auf- und abzuräumen. Am letzten Tag stand der Abbau der Geräte für den Rücktransport nach Gießen an. Das Haus wurde erst verlassen, wenn es wieder besenrein war.

Ein unter derart einfachen Verhältnissen durchgeführtes, mehrtägiges Praktikum erfordert von den Beteiligten Toleranz und Teamfähigkeit und funkto-

niert nur, wenn alle bereit sind, sich in dieses Zusammenspiel einzufügen.

Es war unser Eindruck, dass dies (bis auf ganz wenige Ausnahmen) über die Jahrzehnte gut funktioniert hat. Diese Erkenntnis war auch für uns Ansporn und Befriedigung zugleich.

Dafür ein nachträgliches Dankeschön an die Studierenden!

Ein besonderer Dank geht an B. Sc. Fiene Bremer, die sich um die Erstellung der vielen Diagramme verdient gemacht hat und Herrn Dr. Kai Klama für die Hinweise zu den geologischen Grundlagen.

## 7 Anhang

In den folgenden Artenlisten sind alle Arten aufgeführt, die im Zeitraum 1989 bis 2024 an den untersuchten Standorten gefunden wurden. Ergänzt sind die Ellenberg'schen Zeigerwerte L (Lichtzahl),

F (Feuchtezahl), R (Reaktionszahl) und N (Stickstoffzahl); die N-Zahl der Moose wurde aus SIMMEL et al. 2021 [28] ergänzt.

### 7.1 Artenliste der Krautschicht des Untersuchungsstandortes „Bach“

Ort:	Nieder-Werbe (Edersee)	Gestein:	Kalk-/Grauwackengemisch		
Höhe ü. NHN:	275 m	Bodentyp:	Braunerde		
Neigung:	ca. 5°	Gesamtartenzahl			
Geländeform:	Bachquellmulde	Krautschicht:	82		
Exposition:	Nordwesten				

Wissenschaftlicher Artnname	Deutscher Artname	L	F	R	N
<i>Acer campestre</i>	Feldahorn	(5)	5	7	6
<i>Acer pseudoplatanus</i>	Bergahorn	(4)	6	x	7
<i>Actaea spicata</i>	Christophskraut	3	5	6	7
<i>Aegopodium podagraria</i>	Geißfuß/Zaungiersch	5	6	7	8
<i>Ajuga reptans</i>	Kriechender Günsel	6	6	6	6
<i>Alliaria petiolata</i>	Lauchkraut	5	5	7	9
<i>Alnus glutinosa</i>	Schwarzerle	(5)	9	6	x
<i>Anemone nemorosa</i>	Buschwindröschen	x	5	x	x
<i>Aquilegia vulgaris</i>	Wald-Akelei	6	4	7	4
<i>Atrichum undulatum</i>	Katharinenmoos	6	6	4	4

Wissenschaftlicher Artnname	Deutscher Artnname	L	F	R	N
<i>Athyrium filix-femina</i>	Frauenfarn	3	7	x	6
<i>Aulacomnium palustre</i>	Sumpf-Streifenmoos	7	7	3	3
<i>Betula pendula</i>	Hängebirke	(7)	x	x	x
<i>Campanula trachelium</i>	Nesselblättrige Glockenblume	4	6	8	8
<i>Carex acutiformis</i>	Sumpf-Segge	7	9	7	5
<i>Carex pendula</i>	Hänge-Segge	5	8	6	6
<i>Carex remota</i>	Winkel-Segge	3	8	x	x
<i>Carex sylvatica</i>	Wald-Segge	2	5	6	5
<i>Carpinus betulus</i>	Hainbuche	(4)	x	x	x
<i>Circea lutetiana</i>	Gewöhnliches Hexenkraut	4	6	7	7
<i>Convallaria majalis</i>	Maiglöckchen	5	4	x	4
<i>Cornus sanguinea</i>	Roter Hartriegel	7	5	7	x
<i>Corylus avellana</i>	Haselnuss	6	x	x	5
<i>Crataegus laevigata</i>	Zweigriffliger Weißdorn	6	5	7	5
<i>Crataegus monogyna</i>	Eingriffeliger Weißdorn	7	4	8	4
<i>Daphne mezereum</i>	Seidelbast	4	5	7	5
<i>Dryopteris filix-mas</i>	Wurmfarn	3	5	5	6
<i>Equisetum palustre</i>	Sumpf-Schachtelhalm	7	8	x	3
<i>Equisetum sylvaticum</i>	Wald-Schachtelhalm	3	7	5	4
<i>Equisetum telmateia</i>	Riesen-Schachtelhalm	5	8	8	5
<i>Fagus sylvatica</i>	Rotbuche	(3)	5	x	x
<i>Festuca gigantea</i>	Riesenschwingel	4	7	6	6
<i>Fragaria vesca</i>	Walderdbeere	7	5	x	6
<i>Fraxinus excelsior</i>	Gemeine Esche	(4)	x	7	7
<i>Galeopsis tetrahit</i>	Stechender Hohlzahn	7	5	x	6
<i>Galium aparine</i>	Kletten-Labkraut	7	x	6	8
<i>Geranium robertianum</i>	Ruprechts-Storzschnabel	5	x	x	7
<i>Geum urbanum</i>	Echte Nelkenwurz	4	5	x	7
<i>Glechoma hederacea</i>	Gundelrebe	6	6	x	7
<i>Impatiens noli-tangere</i>	Großes Springkraut	4	7	7	6
<i>Lamium galeobdolon</i>	Goldnessel	3	5	7	5
<i>Listera ovata</i>	Großes Zweiblatt	6	6	7	7
<i>Lonicera xylosteum</i>	Gewöhnliche Heckenkirsche	5	5	7	6
<i>Melica uniflora</i>	Einblütiges Perlgras	3	5	6	6
<i>Milium effusum</i>	Waldhirse	4	5	5	5
<i>Moehringia trinervia</i>	Dreinervige Nabelmiere	4	5	6	7
<i>Mycelis muralis</i>	Zarter Mauerlattich	4	5	x	6
<i>Oxalis acetosella</i>	Wald-Sauerklee	1	5	4	6
<i>Paris quadrifolia</i>	Vierblättrige Einbeere	3	6	7	7

Wissenschaftlicher Artnname	Deutscher Artnname	L	F	R	N
<i>Plagiomnium undulatum</i>	Welliges Sternmoos	4	6	6	7
<i>Poa nemoralis</i>	Hain-Rispengras	5	5	5	4
<i>Primula veris</i>	Echte Schlüsselblume	7	4	8	3
<i>Prunus avium</i>	Vogelkirsche	(4)	5	7	5
<i>Prunus spinosa</i>	Schlehe, Schwarzdorn	7	4	7	x
<i>Quercus robur</i>	Stieleiche	(7)	x	x	x
<i>Ranunculus acris</i>	Scharfer Hahnenfuß	7	6	x	x
<i>Ranunculus ficaria</i>	Scharbockskraut	4	6	7	7
<i>Ranunculus lanuginosus</i>	Wolliger Hahnenfuß	3	6	7	7
<i>Ranunculus repens</i>	Kriechender Hahnenfuß	6	7	x	7
<i>Rosa canina</i>	Hunds-Rose, Heckenrose	8	4	x	x
<i>Rubus fruticosus</i>	Echte Brombeere	7	5	5	4
<i>Rubus idaeus</i>	Waldhimbeere	7	x	x	6
<i>Rumex crispus</i>	Krauser Ampfer	7	7	x	6
<i>Rumex obtusifolius</i>	Stumpfblättriger Ampfer	7	6	x	9
<i>Sambucus nigra</i>	Schwarzer Holunder	7	5	x	9
<i>Sambucus racemosa</i>	Trauben-Holunder	6	5	5	8
<i>Sanicula europaea</i>	Wald-Sanikel	4	5	8	6
<i>Scrophularia nodosa</i>	Knotige Braunwurz	4	6	6	7
<i>Senecio fuchsii</i>	Fuchs-Greiskraut	7	5	x	8
<i>Stachys sylvatica</i>	Waldziest	4	7	7	7
<i>Stellaria media</i>	Vogel-Sternmiere	6	x	7	8
<i>Symphytum officinale</i>	Gewöhnlicher Beinwell	7	7	x	8
<i>Taraxacum officinale</i>	Gewöhnlicher Löwenzahn	7	5	x	8
<i>Tussilago farfara</i>	Huflattich	8	6	8	x
<i>Urtica dioica</i>	Große Brennessel	x	6	7	9
<i>Veronica chamaedrys</i>	Gamander-Ehrenpreis	6	5	x	x
<i>Veronica hederifolia</i>	Efeu-Ehrenpreis	6	5	7	7
<i>Viburnum opulus</i>	Gemeiner Schneeball	6	x	7	6
<i>Vicia sepium</i>	Zaunwicke	x	5	6	5
<i>Viola reichenbachiana</i>	Waldveilchen	4	5	7	6

## 7.2 Artenliste der Krautschicht des Untersuchungsstandortes „Carbonat“

Ort:	Nieder-Werbe (Edersee)	Gestein:	Zechsteinkalk
Höhe ü. NHN:	395 m	Bodentyp:	Rendzina
Neigung:	ca. 5°		
Geländeform:	Ebene	Gesamtartenzahl	
Exposition:	Südwesten	Krautschicht:	79

Wissenschaftlicher Artnname	Deutscher Artnname	L	F	R	N
<i>Acer campestre</i>	Feldahorn	(5)	5	7	6
<i>Acer pseudoplatanus</i>	Bergahorn	(4)	6	x	7
<i>Actaea spicata</i>	Christophskraut	3	5	6	7
<i>Anemone nemorosa</i>	Buschwindröschen	x	5	x	x
<i>Aquilegia vulgaris</i>	Wald-Akelei	6	4	7	4
<i>Arabis hirsuta</i>	Raue Gänsekresse	7	4	8	x
<i>Arenaria serpyllifolia</i>	Quendel-Sandkraut	8	4	7	x
<i>Arrhenatherum elatius</i>	Glatthafer	8	x	7	7
<i>Astragalus glycyphyllos</i>	Süßholz-Tragant	6	4	7	3
<i>Atropa belladonna</i>	Tollkirsche	6	5	8	8
<i>Bromus ramosus</i>	Waldtrespe	6	5	7	6
<i>Carex flacca</i>	Blaugrüne Segge	7	6	8	4
<i>Carex ornithopoda</i>	Vogelfußsegge	6	3	9	3
<i>Carex sylvatica</i>	Wald-Segge	2	5	6	5
<i>Cephalanthera damasonium</i>	Weiße Waldvöglein	3	4	7	4
<i>Cephalanthera rubra</i>	Rotes Waldvöglein	4	3	8	4
<i>Cirsium arvense</i>	Acker-Kratzdistel	8	x	x	7
<i>Convallaria majalis</i>	Maiglöckchen	5	4	x	4
<i>Cornus sanguinea</i>	Roter Hartriegel	7	5	7	x
<i>Cotoneaster integerrimus</i>	Bergmispel	8	3	7	2
<i>Crataegus laevigata</i>	Eingriffeliger Weißdorn	6	5	7	5
<i>Crataegus monogyna</i>	Zweigriffeliger Weißdorn	7	4	8	4
<i>Cynoglossum officinale</i>	Gemeine Hundszunge	8	4	7	7
<i>Dactylis polygama</i>	Wald-Knaulgras	5	5	6	5
<i>Daphne mezereum</i>	Seidelbast	4	5	7	5
<i>Epipactis atrorubens</i>	Braunrote Ständelwurz	6	3	8	2
<i>Epipactis helleborine</i>	Breitblättriger Sitter	3	5	7	5
<i>Euphorbia cyparissias</i>	Zypressen-Wolfsmilch	8	3	x	3
<i>Fagus sylvatica</i>	Rotbuche	(3)	5	x	x
<i>Festuca gigantea</i>	Riesenschwingel	4	7	6	6

Wissenschaftlicher Artnname	Deutscher Artnname	L	F	R	N
<i>Fragaria vesca</i>	Walderdbeere	7	5	x	6
<i>Frangula alnus</i>	Faulbaum	6	8	4	x
<i>Galium aparine</i>	Kletten-Labkraut	7	x	6	8
<i>Galium sylvaticum</i>	Wald-Labkraut	5	5	6	5
<i>Hippocrepis comosa</i>	Schopf-Hufeisenklee	7	3	7	2
<i>Hordeum europaeus</i>	Waldhaargerste	4	5	7	6
<i>Hypericum hirsutum</i>	Behaartes Johanniskraut	7	5	8	7
<i>Lathyrus niger</i>	Schwarze Platterbse	5	3	7	3
<i>Ligustrum vulgare</i>	Gewöhnlicher Liguster	7	4	8	3
<i>Lithospermum arvensis</i>	Acker-Steinsame	6	5	8	5
<i>Lithospermum officinalis</i>	Echter Steinsame	6	5	8	5
<i>Lonicera xylosteum</i>	Rote Heckenkirsche	5	5	7	6
<i>Lotus corniculatus</i>	Gewöhnlicher Hornklee	7	4	7	3
<i>Melica nutans</i>	Nickendes Perlgras	4	4	x	3
<i>Milium effusum</i>	Waldhirse	4	5	5	5
<i>Moehringia trinervia</i>	Dreinervige Nabelmiere	4	5	6	7
<i>Mycelis muralis</i>	Zarter Mauerlattich	4	5	x	6
<i>Neottia nidus-avis</i>	Vogelnestwurz	2	5	7	5
<i>Ophrys insectifera</i>	Fliegen-Ragwurz	7	4	9	3
<i>Picea abies</i>	Gemeine Fichte	(5)	x	x	x
<i>Plantago media</i>	Mittlerer Wegerich	7	4	7	3
<i>Platanthera bifolia</i>	Zweiblättrige Kuckucksblume	6	5	7	x
<i>Poa nemoralis</i>	Hain-Rispengras	5	5	5	4
<i>Primula veris</i>	Echte Schlüsselblume	7	4	8	3
<i>Prunus avium</i>	Vogelkirsche	(4)	5	7	5
<i>Prunus spinosa</i>	Schlehe, Schwarzdorn	7	4	7	x
<i>Quercus petraea</i>	Traubeneiche	(6)	5	x	x
<i>Rosa canina</i>	Hunds-Rose, Heckenrose	8	4	x	x
<i>Rubus caesius</i>	Brombeere	6	x	8	7
<i>Rubus idaeus</i>	Waldhimbeere	7	x	x	6
<i>Sambucus nigra</i>	Schwarzer Holunder	7	5	x	9
<i>Sambucus racemosa</i>	Trauben-Holunder	6	5	5	8
<i>Sanicula europaea</i>	Wald-Sanikel	4	5	8	6
<i>Senecio fuchsii</i>	Fuchs-Greiskraut	7	5	x	8
<i>Sorbus aria</i>	Mehlbeere	(6)	4	7	3
<i>Symphytum officinale</i>	Gemeiner Beinwell	7	7	x	8
<i>Taraxacum laevigatum</i>	Sand-Löwenzahn	8	3	7	2
<i>Taraxacum officinale</i>	Gewöhnlicher Löwenzahn	7	5	x	8

Wissenschaftlicher Artnname	Deutscher Artnname	L	F	R	N
<i>Tussilago farfara</i>	Huflattich	8	6	8	x
<i>Urtica dioica</i>	Große Brennnessel	x	6	7	9
<i>Veronica chamaedrys</i>	Gamander-Ehrenpreis	6	5	x	x
<i>Veronica teucrium</i>	Großer Ehrenpreis	7	3	8	2
<i>Viburnum lantana</i>	Wolliger Schneeball	7	4	8	4
<i>Viburnum opulus</i>	Gewöhnlicher Schneeball	6	x	7	6
<i>Vicia sepium</i>	Zaunwicke	x	5	6	5
<i>Vincetoxicum hirundinaria</i>	Schwalbenwurz	6	3	7	3
<i>Viola hirta</i>	Raues Veilchen	6	3	8	3
<i>Viola reichenbachiana</i>	Waldveilchen	4	5	7	6

### 7.3 Artenliste der Krautschicht des Untersuchungsstandortes „Buntsandstein“

Ort:	Nieder-Werbe (Edersee)	Gestein:	Buntsandstein
Höhe ü. NHN:	390 m	Bodentyp:	Braunerde (periglaziale Fließerde)
Neigung:	ca. 10°	Gesamtartenzahl	
Geländeform:	Leichter Hang	Krautschicht:	34
Exposition:	Südwesten		

Wissenschaftlicher Artnname	Deutscher Artname	L	F	R	N
<i>Acer pseudoplatanus</i>	Bergahorn	(4)	6	x	7
<i>Anemone nemorosa</i>	Buschwindröschen	x	5	x	x
<i>Betula pendula</i>	Hängebirke	(7)	x	x	x
<i>Calluna vulgaris</i>	Heidekraut	8	x	1	1
<i>Carpinus betulus</i>	Hainbuche	(4)	x	x	x
<i>Deschampsia flexuosa</i>	Drahtschmiele	6	x	2	3
<i>Digitalis purpurea</i>	Roter Fingerhut	7	5	3	6
<i>Epilobium angustifolium</i>	Schmalblättriges Weidenröschen	8	5	5	8
<i>Erica tetralix</i>	Gemeine Glockenheide	8	8	1	2
<i>Fagus sylvatica</i>	Rotbuche	(3)	5	x	x
<i>Frangula alnus</i>	Faulbaum	6	8	4	x
<i>Galium aparine</i>	Kletten-Labkraut	7	x	6	8
<i>Galium harcynicum</i>	Harz-Labkraut	7	5	2	3
<i>Hedera helix</i>	Efeu	(4)	5	x	x
<i>Hieracium laevigatum</i>	Glattes Habichtskraut	7	5	2	2
<i>Juniperus communis</i>	Wacholder	8	4	x	x
<i>Lathyrus linifolius</i>	Bergplatterbse	x	5	3	2
<i>Luzula luzuloides</i>	Weiße Hainsimse	4	5	3	4

Wissenschaftlicher Artnname	Deutscher Artnname	L	F	R	N
<i>Luzula sylvatica</i>	Wald-Hainsimse	4	5	4	4
<i>Picea abies</i>	Gemeine Fichte	(5)	x	x	x
<i>Poa nemoralis</i>	Hain-Rispengras	5	5	5	4
<i>Polytrichum formosum</i>	Waldbürstenmoos	4	6	2	3
<i>Populus tremula</i>	Espe, Zitterpappel	(6)	5	x	x
<i>Potentilla sterilis</i>	Erdbeerfingerkraut	5	5	6	6
<i>Prunus spinosa</i>	Schlehe, Schwarzdorn	7	4	7	x
<i>Quercus petraea</i>	Traubeneiche	(6)	5	x	x
<i>Rosa canina</i>	Hunds-Rose, Heckenrose	8	4	x	x
<i>Rubus idaeus</i>	Himbeere	7	x	x	6
<i>Stellaria holostea</i>	Große Sternmiere	5	5	6	5
<i>Vaccinium myrtillus</i>	Heidelbeere	5	x	2	3
<i>Veronica chamaedrys</i>	Gamander-Ehrenpreis	6	5	x	x
<i>Veronica officinalis</i>	Wald-Ehrenpreis	6	4	3	4
<i>Viola canina</i>	Hunds-Veilchen	7	4	3	2
<i>Viola riviniana</i>	Hain-Veilchen	5	4	4	x

## 7.4 Artenliste der Krautschicht des Untersuchungsstandortes „Grauwacke“

Ort:	Nieder-Werbe (Edersee)	Gestein:	Paläozoische Grauwacke
Höhe ü. NHN:	280 m	Bodentyp:	Ranker
Neigung:	ca. 45°		
Geländeform:	Steilhang	Gesamtartenzahl	
Exposition:	Nordnordwesten	Krautschicht:	15

Wissenschaftlicher Artnname	Deutscher Artnname	L	F	R	N
<i>Acer pseudoplatanus</i>	Bergahorn	(4)	6	x	7
<i>Atrichum undulatum</i>	Wellenblättriges Katharinenmoos	6	6	4	4
<i>Betula pendula</i>	Hängebirke	(7)	x	x	x
<i>Carpinus betulus</i>	Hainbuche	(4)	x	x	x
<i>Deschampsia flexuosa</i>	Drahtschmiele	6	x	2	3
<i>Fagus sylvatica</i>	Rotbuche	(3)	5	x	x
<i>Galium aparine</i>	Kletten-Labkraut	7	x	6	8
<i>Hedera helix</i>	Efeu	(4)	5	x	x
<i>Luzula luzuloides</i>	Weiße Hainsimse	4	5	3	4
<i>Picea abies</i>	Gemeine Fichte	(5)	x	x	x
<i>Poa nemoralis</i>	Hain-Rispengras	5	5	5	4
<i>Polytrichum formosum</i>	Waldbürstenmoos	4	6	2	3
<i>Quercus petraea</i>	Traubeneiche	(6)	5	x	x
<i>Sambucus nigra</i>	Schwarzer Holunder	7	5	x	9
<i>Viola riviniana</i>	Hain-Veilchen	5	4	4	x