

HUMBOLDT-UNIVERSITÄT ZU BERLIN



DAS WIKIMOOS-FELDBUCH

ZUR HORIZONTANSPRACHE IN MOORBÖDEN

TEIL A

THEORETISCHE GRUNDLAGEN



Wissens- und Kartierungs-Indikatorenset **MoorSubstrate**

Impressum

DOI: 10.18452/27142

<https://hu.berlin/wikimoos>



Bearbeitung

George-Laurentiu Constantin

Dr. Ernst Gehrt

Prof. Dr. Jutta Zeitz

Albrecht-Thaer-Weg 2

14195 Berlin-Dahlem

E-Mail: jutta.zeitz@agrار.hu-berlin.de

Layout und Grafik

Lydia Rösel

George-Laurentiu Constantin

Abbildungen/Fotos

George-Laurentiu Constantin

Tim Fischer

Jimi Gaszikowski

Felix Fechtner

Dr. Christian Klingenfuß

Druck

Druckerei der Humboldt-Universität zu Berlin

Dorotheenstraße 26

10117 Berlin

Zitervorschlag

Constantin, G. L., Gehrt, E. & Zeitz, J. (2022).

Das WIKIMooS-Feldbuch zur Horizontansprache in Moorböden (1. Auflage). Humboldt-Universität zu Berlin (Hrsg.), Berlin, 174 S. DOI: 10.18452/27142

Förderhinweis

Das Vorhaben „Wissens- und Kartierungs-Indikatorenset MoorSubstrate (WIKIMooS)“ (Projektlaufzeit: 01.04.2019 bis 30.09.2022) wurde durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) gefördert (DBU-Aktenzeichen: 34591/01).

Berlin, Dezember 2022



Inhaltsverzeichnis

1. Hintergrund und Zielsetzung	3
2. "Lies-Mich"	5
2.1. Wofür ist das WIKIMooS-Tool geeignet?	5
2.2. Neuerungen und Beziehung zu anderen Quellen	6
2.3. Geländemethoden	7
2.4. Zur Bestimmung der Moorsubstrate	7
3. Bestandteile des WIKIMooS-Tools und deren Funktion	8
3.1. Das WIKIMooS-Feldbuch	8
3.2. WIKIMooS-Moorvideos	8
3.3. Eichungsmethode: Anleitung für die Trockensiebung	8
3.4. Online-Verfügbarkeit	8
4. Begriffserklärung	9
5. Bodenentwicklung in Mooren - theoretische Grundlagen für die Arbeit mit dem WIKIMooS-Feldbuch	10
5.1. Primäre und sekundäre pedogene Prozesse	10
5.2. Prozesse in Moorböden	11
5.2.1. Chemische und biologische Veränderungen	11
5.2.1.1. Zersetzung - ein Oberbegriff	11
5.2.1.2. Humifizierung	12
5.2.1.3. Mineralisierung	13
5.2.1.4. Bioturbation	13
5.2.2. Physikalische Veränderungen	13
5.2.2.1. Setzung	13
5.2.2.2. Schrumpfung	14
5.2.3. Anthropogene Veränderungen	14
5.2.3.1. Bodenbearbeitung	14
5.2.3.2. Befahrungsbedingte Effekte	15
5.2.4. Stoffliche Ein- und Austräge	15
5.2.5. Komplexe sekundäre Prozesse	15
5.2.5.1. Vererdung	15
5.2.5.2. Vermulmung	16
5.2.5.3. Moorschwund	17
5.3. Substrat	17
5.3.1. Die Torfart	17
5.3.2. Der Humifizierungsgrad	17
5.3.3. Hydrogenetische Moortypen und Standortfaktoren	18
5.4. Gefüge	20
5.4.1. Grundgefüge	20
5.4.2. Aggregatgefüge	21
5.4.3. Absonderung	21
5.4.4. Anlagerung	23

Inhaltsverzeichnis

5.4.5. Mechanische Veränderung	25
5.4.6. Bedeutung des Substrats in der Gefügebildung	26
5.5. Pedogene Bereiche	27
5.5.1. Bereich A	27
5.5.2. Bereich B	28
5.5.3. Bereich C	29
5.6. Horizonte	30
5.7. Relevanz der Horizonte und der pedogenen Bereiche	32
6. Allgemeine Vorgehensweise bei der Arbeit mit dem Feldbuch	34
7. Quellen	35

1. Hintergrund und Zielsetzung

In den letzten Jahren ist die Thematik der Moore und deren Stellung im Spannungsfeld zwischen Klimaschutz, Naturschutz und Wirtschaft in der Öffentlichkeit immer präsenter geworden. Durch die zunehmende Beschäftigung mit möglichen Perspektiven für Moorflächen in Deutschland ist es aber auch klar geworden, dass es einen immer größeren Bedarf an bodenkundlichen Untersuchungen an Moorstandorten geben wird. In diesem Zusammenhang gab es zwei wichtige Lücken, die so gut wie möglich geschlossen werden sollten.

Erstens war es bekannt, dass die Kriterien für die Ansprache von Moorbodenhorizonten geschärft werden mussten. Dies galt vor allem für schwierige Fälle, z.B. für die Unterscheidung von Vererdungs- und Vermulmungshorizonten. Weil die Merkmale des Bodengefüges zu den wichtigsten Kriterien für die Ansprache von Bodenhorizonten zählen, sollte auch sichergestellt werden, dass die Namen und Definitionen der Gefügeformen für den Sonderfall Moorboden geeignet sind. Dies war besonders wichtig, da die Gefügeformen und deren Definitionen in der aktuellen, 5. Auflage der Bodenkundlichen Kartieranlei-

tung (KA5) (Ad-hoc-AG Boden, 2005) hauptsächlich aus der Mineralbodenkunde stammen.

Zweitens wurde es deutlich, dass das wachsende Interesse für die Moorthematik und der erhöhte Bedarf an bodenkundlichen Untersuchungen in Mooren dazu führen, dass immer mehr Personen die Fähigkeit benötigen, die Merkmale eines Moorbodens im Gelände sicher aufzunehmen. Entsprechende Kenntnisse sollten nicht nur bereits erfahrenen KartiererInnen, sondern auch dem Personal von Forschungseinrichtungen, öffentlichen Behörden, Naturschutzvereinen, Ingenieurbüros oder auch von landwirtschaftlichen Betrieben zur Verfügung stehen.

Das wichtigste Ziel des Projekts WIKIMooS (<https://hu.berlin/wikimoos>) war also ein Tool zu entwickeln, das sowohl erfahrenen BodenkundlerInnen präzisere Kriterien für bodenkundliche Aufnahmen im Moor bereitstellt, als auch andere interessierte Personen dazu befähigt, wichtige Merkmale von Moorböden reproduzierbar und unabhängig vom vorhandenen Hintergrundwissen im Gelände zu erkennen.

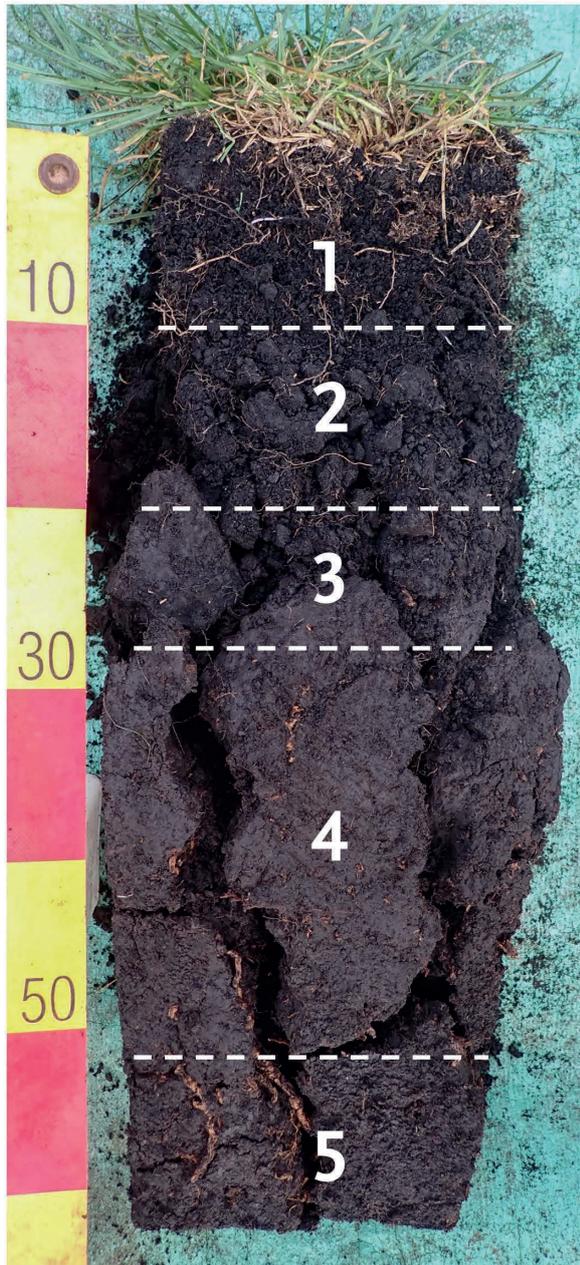
Um das entstehende Tool an die realen Bedürfnisse künftiger NutzerInnen anzupassen, wurde die gesamte Projektarbeit nach den Prinzipien der partizipativen, zielorientierten Projektplanung durchgeführt. Bereits in der Anfangsphase wurde ein umfangreiches, bundesweites Netzwerk von potenziellen NutzerInnen aufgebaut, die die Projektarbeit begleitet haben und an wichtigen Entscheidungen bezüglich des Inhalts und des Formats des WIKIMooS-Tools beteiligt waren (Abb. 1.1).



Abb. 1.1.: Testung des ersten Feldbuchentwurfs mit potenziellen NutzerInnen, einschließlich praktischer Geländearbeit (links) und Auswertung der Ergebnisse (rechts). Fotos: ©J. Gaszikowski (links) und ©F. Fechner (rechts)

1. Hintergrund und Zielsetzung

Durch das WIKIMooS-Tool wird der Moorcommunity am Ende des Projekts eine standardisierte Vorgehensweise für bodenkundliche Aufnahmen im Gelände und die Möglichkeit einer sichereren, reproduzierbaren Ansprache von Moorbodenhorizonten angeboten. Die Horizontansprache basiert ihrerseits v.a. auf der Erkennung von Gefügemerkmalen (Abb. 1.2).



Die korrekte Identifizierung von Moorbodenhorizonten liefert erste wichtige Informationen über Prozesse, die an den untersuchten Standorten stattgefunden haben und erlaubt eine erste Einschätzung der Fähigkeit des Bodens, moorspezifische ökologische Bodenfunktionen zu erfüllen. Diese Erkenntnisse sind für Entscheidungen im Moormanagement unentbehrlich. Für die Bewertung der Eignung konkreter Maßnahmen auf Moorflächen sind bodenkundliche Aufnahmen im Gelände aber nicht allein ausreichend. Solche Untersuchungen müssen ggf. durch die Bestimmung ausgewählter bodenchemischer und -physikalischer Parameter im Labor vervollständigt werden. Bodenkundliche Aufnahmen im Gelände sind aber ein wichtiger Teil der notwendigen Gesamtbetrachtung auf landschaftsökologischer Ebene, die u.a. auch die Untersuchungen der Vegetation und des Wasserhaushaltes am Standort beinhalten sollte.

Im BfN-Skript 462 (Tiemeyer et al. 2017) werden Indikatoren genannt, die im Rahmen von Maßnahmen im Moorflächenmanagement während der Projektplanung oder der Erfolgskontrolle erhoben werden können. Die Indikatoren im Teil „Zustand des Torfkörpers - Bodeneigenschaften“ können entweder im Gelände erfasst oder im Labor bestimmt werden. Unabhängig davon ist die Betrachtungsebene der meisten Indikatoren der Moorbodenhorizont. Somit bilden die richtige Erkennung von Horizontgrenzen und die richtige Horizontansprache den Kern aller bodenkundlichen Untersuchungen. Diese Basis erlaubt eine korrekte Beprobung und eine aufschlussreiche Interpretation von Ergebnissen im Lichte der standortspezifischen Pedogenese. In diesem Kontext bietet das Projekt WIKIMooS nutzerfreundliche und zuverlässige Ressourcen und einen vereinheitlichenden Qualitätsstandard für bodenkundliche Untersuchungen an Moorstandorten an.

Abb. 1.2.: Torfmonolith aus einem Moorbodenprofil („Flachschurfriegel“) mit fünf Horizonten, die sich in ihren Gefügemerkmalen unterscheiden. Foto: ©G.L. Constantin

2. “Lies-Mich”

Die Benutzung des WIKIMooS-Feldbuches soll eine zuverlässige Ansprache von Moorbodenhorizonten erleichtern. Bei dessen Entwicklung wurde sehr viel Wert auf eine nutzerfreundliche Gestaltung gelegt, z.B. durch die Verwendung von Bildern zur Unterstützung der Horizontansprache und durch den modularen Aufbau, der einen flexiblen Einsatz der Steckbriefe für Methoden, Gefügeformen und Horizonte erlaubt. An dieser Stelle muss aber unbedingt erwähnt werden, dass das WIKIMooS-Tool einige Neuerungen vorschlägt, sowohl was die Vorgehensweise bei der Horizontansprache als auch was die Nomenklatur der Gefügeformen und Horizonte betrifft. Deswegen wird empfohlen, dass man das WIKIMooS-Feldbuch vor der ersten Anwendung einmal vollständig und gründlich in der gegebenen Reihenfolge der Kapitel liest. Weiterhin werden die theoretischen Grundlagen auch in den WIKIMooS-Moorvideos erklärt (siehe Kap. 3). Dort wird ebenfalls detailliert gezeigt, wie die im Feldbuch enthaltene Methodologie richtig anzuwenden ist.

2.1. Wofür ist das WIKIMooS-Tool geeignet?

Im Projekt WIKIMooS wurde die Ausbildung typischer Gefügeformen und Horizonte sowohl in naturnahen als auch in entwässerten und landwirtschaftlich bzw. forstwirtschaftlich genutzten Moorböden untersucht, um diese systematisch darstellen zu können. Der Anspruch war, sowohl ein besseres Verständnis der Prozesse zu gewinnen, die hinter der Ausbildung typischer Degradierungserscheinungen stehen, als auch repräsentative Ergebnisse zu erhalten, die sich auf die meisten Moorstandorte in Deutschland übertragen lassen. Im Laufe des Projekts wurden deswegen Standorte aus mehreren repräsentativen Nutzungskategorien untersucht, deren Ausgangszustand vor der Entwässerung aber vergleichbar war. Diese Standortauswahl sollte es gestatten, verschiedene Ausprägungen der Gefü-

gebildungen mit verschiedenen Stadien der sekundären Pedogenese in Verbindung zu bringen.

Daher stammen die im WIKIMooS-Feldbuch beschriebenen Gefüge- und Horizontmerkmale aus der Untersuchung typischer, stark organischer Torfe (> 70% organische Bodensubstanz) von tiefgründigen Moorstandorten (Torfmächtigkeit > 70 cm). Für solche Standorte ist das Feldbuch also besonders gut geeignet. In folgenden Situationen kann man mit dem WIKIMooS-Feldbuch ebenfalls arbeiten, aber es können ggf. Abweichungen von den hier dargestellten Ausprägungen vorkommen, da die Gefügebildung von zusätzlichen Faktoren beeinflusst wird:

- Standorte mit **stark mineralhaltigen Torfen**,
- von **Holztorfen** dominierte Standorte,
- sehr **kalkreiche Moorböden**.

Es gibt auch Moorstandorte, an denen die Gefügebildung aufgrund der Zusammensetzung der Substrate oder der Bearbeitungs- und Entwässerungsgeschichte vermutlich anders verläuft als in typischen Moorböden aus Torf. Dies gilt auch für wiedervernässte Moore. Solche Fälle konnten im Projekt WIKIMooS nicht beachtet werden. Für die Untersuchung folgender Standorttypen ist das WIKIMooS-Feldbuch in der jetzigen Ausgabe noch nicht geeignet:

- **mineralisch überdeckte Moorböden (natürlich oder anthropogen)**
 - Überdeckung durch eingespülten oder eingewehten Sand,
 - Kleiüberdeckung,
 - Sanddeckkultur,
- **sehr tief bearbeitete Moorböden (Bearbeitungstiefe etwa > 40 cm)**
 - tiefgepflügt,
 - Baggerkuhlung,
 - Sandmischkultur,
- **Moorböden aus Organomudde,**
- **wiedervernässte Moorböden.**

Dafür kann das WIKIMooS-Tool in Zukunft ggf. um spezifische Unterlagen erweitert werden.

2. "Lies-Mich"

Die im WIKIMooS-Feldbuch enthaltenen Horizontsteckbriefe und Bestimmungsschlüssel werden getrennt für die beiden Hauptmoortypen **Niedermoor** und **Hochmoor** angeboten. Profile mit Übergangsmoortorf sind mithilfe der Unterlagen für Niedermoor zu untersuchen.

2.2. Neuerungen und Beziehung zu anderen Quellen

Das WIKIMooS-Tool kann man als Teil der Bestrebungen verstehen, die in den letzten Jahren in Deutschland und in der Schweiz unternommen wurden, um die Systematik der Moorböden zu verbessern und zu vereinheitlichen, sowie die Objektivität der Ansprache von Moorbodenhorizonten zu verbessern.

Das WIKIMooS-Feldbuch ergänzt die 5. Auflage der Bodenkundlichen Kartieranleitung (KA5) (Ad-hoc-AG Boden, 2005) im Bereich der Moorböden. Mithilfe des WIKIMooS-Feldbuches soll die Bestimmung von vier wichtigen horizontbezogenen Merkmalen unterstützt werden, die im KA5-Aufnahmebogen enthalten sind (siehe KA5, S. 46 oder Steckbrief **ME-04**, Angabe der entsprechenden Felder im Aufnahmebogen):

- **Unter-/Obergrenze (cm)** (Feld 25),
- **Horizontsymbol** (Feld 27),
- **Bodengefüge** (Gefügeform und Aggregatgröße) (Feld 35),
- **Humifizierungsgrad nach von Post** (Feld 40) - alternative Angabe zur Zersetzungsstufe laut KA5 (siehe KA5, S. 128).

Die meisten Elemente im WIKIMooS-Feldbuch sind KA5-konform. Die Fertigstellung des WIKIMooS-Feldbuches fiel aber zeitlich eng mit der Veröffentlichung der 6. Auflage der Bodenkundlichen Kartieranleitung (KA6) (in Vorbereitung) zusammen. Deswegen gab es in den letzten Jahren einen fachlichen Austausch zwischen dem Projekt WIKIMooS, der Sektion 1 der Deutschen Gesellschaft für Moor- und Torfkunde (DGMT) und der AG Bodensystematik der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft (DBG), die sich mit der Entwicklung der neuen Auflage der KA befasst. Dadurch war es möglich, folgende Neuerungen, die für die noch unveröffentlichte

KA6 geplant sind, auch schon in das WIKIMooS-Feldbuch zu integrieren:

- Verwendung einer **neuen Skala für Aggregatgrößen** (gro-Skala),
- neue Gefügeform: **Keilgefüge**,
- neuer Bodenhorizont: **Reaggregierungshorizont** (Hg-Horizont).

In wenigen Fällen basieren Konzepte und Definitionen im WIKIMooS-Feldbuch nicht auf Angaben aus der KA5 oder KA6, sondern auf älterer deutscher Fachliteratur oder auf Fachliteratur aus der Schweiz, mit deren Hilfe sich gewisse Merkmale stellenweise besser beschreiben lassen. Das gilt für folgende Elemente:

- **Restgefüge** (Gefügeform für vermulmte Moorböden) - Definition angelehnt an Nievergelt et al. (2002); in KA5 und KA6 nicht vorhanden,
- **Prismengefüge** auch aus groben Aggregaten möglich, deren **Querachse > 50 mm** beträgt - Definition des Prismengefüges übernommen aus Kuntze (1981); abweichend von KA5 und KA6.

Außerdem führt das WIKIMooS-Feldbuch zwei eigene, von den AutorInnen vorgeschlagene Neuerungen ein, die nach der Durchführung einer gründlichen, bundesweiten Beprobungskampagne als sinnvoll für die Abbildung der Realität in deutschen Moorböden erscheinen:

- neue Gefügeform: **Konglomeratgefüge** (typische Gefügeform für Reaggregierungshorizonte),
- Unterteilung eines Moorbodenprofils in bis zu drei distinkte **pedogene Bereiche**: A, B und C. Diese Gliederung widerspiegelt die Bodenentwicklung im Sonderfall der Moorböden und soll die Horizontansprache im Gelände sicherer machen. Die Begriffe Oberboden, Unterboden und Untergrund, die aus der Mineralbodenkunde stammen, werden aber auch hier entsprechend der KA5/KA6 weiter verwendet (siehe Definitionen in Kap. 4).

2. "Lies-Mich"

Nicht zuletzt soll erwähnt werden, dass es im theoretischen Teil des Feldbuches (Kap. 5) einen besonderen Fokus auf der getrennten Darstellung der Prozesse gibt, die einerseits während der Torfablagerung stattgefunden haben und andererseits erst infolge der anthropogenen Entwässerung und Nutzung der Moore eingeleitet wurden. Für diesen Zweck wurden die Begriffe „**primäre pedogene Prozesse**“ (syngenetisch ablaufend mit der Geogenese) und „**sekundäre pedogene Prozesse**“ verwendet. Diese Unterscheidung erscheint als sinnvoll im Kontext der Beschäftigung mit den Folgen der Moorentwässerung und -nutzung, die einen deutlichen Einschnitt in der Entwicklung der Moorböden darstellen.

2.3. Geländemethoden

Als Grundlage für die im WIKIMooS-Feldbuch vorgeschlagenen Geländemethoden dienten verschiedene existierende bodenkundliche Methoden, die entweder weiterentwickelt und auf die Situation in den Mooren angepasst oder in einer aktualisierten, nutzerfreundlichen Form dargestellt wurden:

- **Flachschorfmethode mit Präparation eines Flachschorfriegels:** Weiterentwicklung einer in der nordostdeutschen moorkundlichen Tradition inoffiziell als „Succow'scher Griff“ bekannte Vorgehensweise,
- **Abwurfprobe und Aggregatgrößensortierung:** Anpassung der in Neuseeland entwickelten Visual-Soil-Assessment-Methode (Shepherd, 2000),
- **Bestimmung des Humifizierungsgrades nach von Post:** detaillierte und praxisnahe Vorstellung der von-Post-Methode in der Form, die in der KA5 zu finden ist. Diese basiert ihrerseits auf von Post (1924) und wurde für trockene Torfe durch Grosse-Brauckmann et al. (1977) ergänzt.

2.4. Zur Bestimmung der Moorsubstrate

Der Fokus des WIKIMooS-Feldbuches liegt auf der Ansprache von Gefügeformen und Bodenhorizonten. Um ein grundsätzliches Verständnis

der Bildung, Entwicklung und des aktuellen Zustands der Moorböden an ausgewählten Standorten zu erlangen, benötigt man auch die Fähigkeit, Moorsubstrate (Torfe und Mudden) sicher zu bestimmen. Dafür gibt es bereits eine sehr zu empfehlende Veröffentlichung: die an der HNE Eberswalde entwickelten „Steckbriefe Moorsubstrate“ (Meyer-Uhlherr et al., 2015 bzw. <https://e-docs.geo-leo.de/handle/11858/8054>). Das Format des WIKIMooS-Feldbuches wurde gezielt so konzipiert, dass es mit den Steckbriefen Moorsubstrate kompatibel ist. Materialien aus beiden Mappen können also, nach Bedarf, für verschiedene Tätigkeiten im Gelände frei ausgewählt und zusammengeheftet werden.



Foto: ©J. Gaszikowski

Die AutorInnen wünschen viel Erfolg und viel Spaß bei der Arbeit mit dem WIKIMooS-Tool.

Berlin, Dezember 2022

George-Laurentiu Constantin
Dr. Ernst Gehrt
Prof. Dr. Jutta Zeitz

3. Bestandteile des WIKIMooS-Tools und deren Funktion

Das WIKIMooS-Tool umfasst mehrere Bestandteile, die in unterschiedlichen Formaten vorliegen und in verschiedenen Situationen benutzt werden können.

3.1. Das WIKIMooS-Feldbuch

Das Kernstück des WIKIMooS-Tools ist das WIKIMooS-Feldbuch zur Horizontansprache in Moorböden. Das Feldbuch (ein Ringordner) besteht aus sechs Teilen (A bis F).

Im Teil A sind die theoretischen Grundlagen für die Arbeit mit dem Feldbuch enthalten. Dieser erste Teil ist als eigenständige Broschüre mit Rückenstichbindung gestaltet und soll vor allem „zu Hause“, vor der Arbeit im Gelände benutzt werden. Hier sind relevante Fachinformationen über Moorböden (Teil A, Kap. 5) sowie allgemeine Erläuterungen bezüglich des Anwendungsbereichs des Feldbuches zu finden (Teil A, Kap. 2).

Die Teile B bis F beinhalten Materialien, die im Gelände verwendet werden sollen und dienen zur Unterstützung der Horizontansprache. Sie wurden als Sammlungen von laminierten Steckbriefen und somit witterungsbelastbar konzipiert. Teil B (Methoden) ist aber auch für die Vorbereitung von Geländearbeiten nützlich, da er u.a. Details zur Standortauswahl und zu nötigen Geräten und Materialien enthält. Zusätzlich zur gedruckten Form kann das gesamte WIKIMooS-Feldbuch im digitalen Format (PDF) von der WIKIMooS-Homepage heruntergeladen werden.

3.2. WIKIMooS-Moorvideos

Die wichtigsten Informationen aus dem WIKIMooS-Feldbuch wurden zusätzlich im Videoformat aufbereitet. In Zusammenarbeit mit dem Projekt „MoorIS – ein Moorinformationssystem für Niedersachsen“ des niedersächsischen Landesamts für Bergbau, Energie und Geologie

(LBEG) wurde eine Serie von zehn kurzen Videos produziert (max. 13 min pro Video). Die WIKIMooS-Moorvideos tragen folgende Titel:

1. Die Bedeutung der Moore
2. Moorböden - Entstehung und Entwicklung
3. Die Flachschorfgrube
4. Der Flachschorfriegel
5. Pedogene Bereiche in Moorböden
6. Horizontgrenzen in Moorböden
7. Abwurfprobe und Aggregatgrößen-sortierung
8. Der Humifizierungsgrad nach von Post
9. Vererdet oder vermulmt?
10. Geräte und Materialien für bodenkundliche Untersuchungen im Moor

Die Videos sind vor allem für die Vorbereitung von Geländearbeiten vorgesehen, können aber bei Bedarf auch im Gelände benutzt werden. Sie sind auf der MoorIS-Internetplattform und auf der WIKIMooS-Homepage in deutscher Sprache sowie auf Youtube in deutscher oder englischer Sprache zu sehen (siehe Kap. 3.4).

3.3. Eichungsmethode: Anleitung für die Trockensiebung

Für die Unterscheidung von Vererdungs- und Vermulmungshorizonten wird eine Anleitung zur Durchführung der Trockensiebungsmethode empfohlen. Diese Methode kann nachträglich (im Labor) anhand von gesammeltem Bodenmaterial durchgeführt werden, falls die Ansprache im Gelände nicht eindeutig war. Die Anleitung ist auf der WIKIMooS-Homepage zu finden (siehe Kap. 3.4).

3.4. Online-Verfügbarkeit

WIKIMooS-Homepage (Download Feldbuch im PDF-Format; Videos; Anleitung Trockensiebung): <https://hu.berlin/wikimooS>
MoorIS-Webseite (Videos auf Deutsch): <https://www.mooris-niedersachsen.de/?pgId=1363>
Youtube: GeoChannel BGR LBEG (Videos auf Deutsch/Englisch): <https://www.youtube.com/@GeoChannelBGRLBEG/playlists>

4. Begriffserklärung

Die meisten Fachbegriffe, die im WIKIMooS-Feldbuch vorkommen, werden im nachfolgenden Kapitel 5 erklärt. Es bleiben nur noch wenige relevante Begriffe übrig, die im Text nicht explizit definiert werden. Diese Fachbegriffe werden hier anhand der Definitionen aus der KA5 (Ad-hoc-AG Boden, 2005) und der KA6 (in Vorbereitung) vorgestellt.

Abweichungshorizont: Horizont, in dem ein Zusatzsymbol, das nicht alleine stehen kann, einem Stammhorizont mit bereits vorhandenen Zusatzsymbolen hinzugefügt wird und dessen Bedeutung modifiziert (Definition angelehnt an KA6-Entwurf);

Auflage: Humusschicht an der Bodenoberfläche (ein oder mehrere organische Horizonte), die nicht durch Torfbildung entstanden ist. Sie besteht i.d.R. aus akkumulierter Pflanzenspreu, die sich nach und nach zersetzt (z.B. für Waldmoorstandorte: mehr oder weniger zersetztes Material aus abgestorbenen Zweigen und Laub/Nadeln, das über dem Torf liegt);

fossiles Merkmal: pedogenes Merkmal eines Horizonts, das durch die Ablagerung jüngeren Materials begraben und überprägt wurde;

Geländeoberfläche (im Kontext der Moorböden): Obergrenze des obersten Moorbodenhorizonts und Bezugspunkt (Null) für Tiefenangaben bei der Aufnahme der Horizontgrenzen. Dabei sind Auflagehorizonte ausgenommen. Diese befinden sich oberhalb der Geländeoberfläche und deren Horizontobergrenze wird mit „+“ in Bezug auf die Geländeoberfläche notiert;

H-Horizont: Bodenhorizont aus Torf. H-Horizonte sind die wichtigsten Horizonte in Moorböden und die, womit sich dieses Feldbuch befasst;

Humus: „die Gesamtheit der von abgestorbenen Pflanzen- und Tiersubstanzen abstammenden organischen Stoffe auf und im Boden“ (Ad-hoc-AG Boden, 2005, S. 298);

mineralisch: Substrate mit < 30 Masse-% organischer Substanz;

Moorboden: Boden aus Torfen mit einer Mächtigkeit von ≥ 30 cm, „einschließlich zwischenlagerner mineralischer Schichten und Mudden

mit einem Flächenanteil von weniger als 30 %“ (Ad-hoc-AG Boden, 2005, S. 257);

Oberboden: „oberer Teil des Mineralbodens, der einen der jeweiligen Bodenbildung entsprechenden Anteil an Humus und Bodenorganismen enthält und der sich meist durch dunklere Bodenfarbe vom Unterboden abhebt“ (Ad-hoc-AG Boden, 2005, S. 403). Der Begriff lässt sich teilweise auf Moorböden übertragen. Im Fall entwässerter Moorböden wird der Begriff für den oberflächennahen Bereich verwendet, der durch sekundäre Zersetzung und mechanische Störung (Bioturbation und/oder Bodenbearbeitung) am stärksten verändert ist (Horizonte: Hm, Hv, Hp und Hg, inklusive abgeleiteter Varianten). Im Fall torfakkumulierender Moore (naturnah oder wiedervernässt) ist der Oberboden der Bereich mit aktueller Torfbildung (Hn-Horizont);

organisch: Substrate mit ≥ 30 Masse-% organischer Substanz;

reliktisches Merkmal: pedogenes Merkmal, das unter Bedingungen und Einflüssen entstanden ist, die aktuell nicht mehr vorhanden oder dominant sind;

Torf: organisches Substrat (≥ 30 Masse-% organische Bodensubstanz), gebildet durch die Akkumulation unvollständig zersetzter Reste torfbildender Pflanzen unter Wasserüberschuss;

Übergangshorizont: Horizont, in dem sich „die Merkmale unterschiedlicher pedogener Prozesse überlagern“ (Ad-hoc-AG Boden, 2005, S. 82);

Unterboden: unterer Teil des Bodens, der sich zwischen Oberboden und Untergrund befindet. Im Fall der Moorböden wird der Begriff für alle H-Horizonte benutzt, die nicht zum Oberboden gehören (Horizonte: Ha, Ht, Hw und Hr, inklusive abgeleiteter Varianten);

Untergrund: „Bereich unterhalb des Unterbodens, durch Verwitterung und Bodenbildung nicht beeinflusstes Gestein“ (Ad-hoc-AG Boden, 2005, S. 412). Im Kontext der Moorböden wird der Begriff Untergrund für die Bezeichnung der mineralischen Horizonte verwendet, die sich unterhalb der H-Horizonte an der Basis des Moores befinden („mineralischer Untergrund“), z.B. Horizonte aus Sanden, Lehmen oder mineralischen Mudden;

Verzahnungshorizont: Horizont, in dem „Bereiche von verschiedenen Horizonten zusammen vorkommen, ohne sich zu durchdringen“ (Ad-hoc-AG Boden, 2005, S. 82).

5. Bodenentwicklung in Mooren - theoretische Grundlagen für die Arbeit mit dem WIKIMooS-Feldbuch

Die Bildung und Entwicklung der Moorböden stellen in der Bodenkunde in vielen Hinsichten einen Sonderfall dar. Moorböden unterscheiden sich von den meisten Mineralböden vor allem in den räumlichen und zeitlichen Mustern der Prozesse, die an deren Entstehung beteiligt sind und in der stofflichen Zusammensetzung, die ihrerseits einen prägenden Einfluss auf die Entwicklung der Bodenstruktur hat. Wenn man bodenkundliche Aufnahmen an Moorstandorten durchführen möchte, ist es dementsprechend sinnvoll, die Besonderheiten der Entwicklung von Moorböden zu kennen. In diesem Kapitel werden die wichtigsten Aspekte vorgestellt, die als fachliche Grundlage für die bodenkundliche Kartierung im Moor dienen sollen. Als Erstes werden die beiden Etappen der Moorbodenbildung vorgestellt. Danach werden Prozesse beschrieben, die in Moorböden ablaufen und einen Einfluss auf deren Entwicklung haben. Anschließend werden die Beziehungen zwischen Substrat, Gefüge und Bodenhorizonte erklärt, das Konzept der pedogenen Bereiche eingeführt und dessen Relevanz für eine sichere Horizontansprache erläutert.

5.1. Primäre und sekundäre pedogene Prozesse

Wenn die Entstehung von Böden allgemein betrachtet wird, unterscheidet die Bodenkunde normalerweise zwei distinkte Etappen: die **Geogenese** und die **Pedogenese**. Die Geogenese be-

zeichnet die Entstehung des Ausgangsgesteins, das als Grundlage für die Bodenbildung fungiert. Als Pedogenese hingegen definiert man die Entstehung eines Bodens aus diesem Ausgangsgestein durch die Einwirkung verschiedener bodenbildender (= pedogener) Prozesse. Überwiegend finden Geogenese und Pedogenese in Mineralböden zeitlich versetzt statt. Die natürlichen bodenbildenden Prozesse greifen mit der Zeit von der Geländeoberfläche aus immer weiter in die Tiefe. Dies gilt z.B. für die Verwitterung des Ausgangsgesteins oder die Humusanreicherung.

Moorböden folgen diesem Grundsatz aber nicht gänzlich. Der Grund dafür ist die Art und Weise, wie Torf, das **Substrat** („Ausgangsgestein“) eines Moorbodens, gebildet wird. An Standorten mit Wasserüberschuss ist die Rate aerober Zersetzungsprozesse durch die reduzierenden (anoxischen) Bedingungen gehemmt. Dadurch fällt sie insgesamt geringer aus als die Bildungsrate organischer Substanz durch die Vegetation. Infolgedessen akkumuliert sich mit der Zeit immer mehr nur teilweise zersetztes pflanzliches Material in Form von **Torf** (Abb. 5.1).



Abb. 5.1.: Abgestorbenes Torfmoos lagert sich in einem nassen, naturnahen Hochmoor als Torf ab.

Foto: ©T. Fischer

Zu jedem Zeitpunkt der Moorbodenwachstumsphase ist der oberflächennahe Bereich, in dem neuer Torf gebildet wird (= **Akrotelm**), teilweise belüftet und deswegen aeroben Zersetzungsprozessen ausgesetzt. Solange das Wasserangebot am Standort ausreicht, wachsen immer weitere

Generationen torfbildender Pflanzen (z.B. Torfmoose, Braunmoose, Schilf oder Seggen), deren Reste den bereits existierenden Torf überdecken oder verdrängen. So gelangt der Torf mit der Zeit in den tieferen, komplett wassergesättigten Bereich des Moores (= **Katotelm**), wo er anschließend unter reduzierenden Bedingungen konserviert wird. Das Ausmaß, in dem das abgestorbene pflanzliche Material durch aerobe Zersetzungsprozesse verändert wird, bevor es den wassergesättigten Bereich erreicht, bestimmt maßgeblich die Eigenschaften des abgelagerten Torfes. Die Geogenese des „Ausgangsgesteins“ Torf ist somit unmittelbar mit **primären** pedogenen Prozessen verknüpft.

Wenn Moorböden entwässert und genutzt werden, stellen sich Bedingungen ein, die die aerobe Zersetzung des organischen Materials stark begünstigen. Außerdem führen physikalische Prozesse, anthropogene Eingriffe und biologische Aktivität zu Änderungen in der Bodenstruktur (Abb. 5.2). Dies stellt eine neue, drastischere Phase pedogener Veränderungen dar.



Abb. 5.2.: Stark zersetzter, krümeliger Oberboden eines entwässerten Hochmoores.

Foto: ©G.L. Constantin

Für ein besseres Verständnis der Bodenentwicklung an entwässerten und genutzten Moorstandorten ist es dementsprechend wichtig, von Anfang an im Sinn zu behalten, dass solche Standorte zwei verschiedene Etappen der Pedogenese durchlaufen haben: eine primäre Veränderung während der Torfablagerung und die **sekundären Veränderungen** infolge von Entwässerung und Nutzung.

5.2. Prozesse in Moorböden

Sowohl während der Torfablagerung als auch nach der Entwässerung spielen sich Prozesse ab, die zur Veränderung der Moorböden führen. Diese rufen typische, im Gelände erkennbare Merkmalsausprägungen und/oder bestimmte physikalische, chemische und biologische Bodeneigenschaften hervor. Im Folgenden werden die wichtigsten primären und sekundären pedogenen Prozesse beschrieben.

5.2.1. Chemische und biologische Veränderungen

Sobald abgestorbenes organisches Material vorliegt, setzen aerobe und anaerobe biogeochemische Prozesse ein. Diese sind im Kontext der Moorbodenentwicklung als Erstes zu erwähnen, da alle Torfe zu unterschiedlichen Graden chemisch oder strukturell durch die Tätigkeit von Mikro- oder Makroorganismen verändert werden.

5.2.1.1. Zersetzung - ein Oberbegriff

Stoffabbauprozesse, die mit dem Absterben pflanzlichen Gewebes anfangen, werden allgemein als Zersetzungsprozesse bezeichnet. Zu diesen Abbauprozessen gehört bereits die Spaltung großer Moleküle (z.B. Stärke und Proteine) durch pflanzeneigene Enzyme im absterbenden Gewebe. Anschließend erfolgt der Abbau durch die Aktivität der Bodenorganismen (Koppisch, 2001).

Die bedeutendsten Zersetzungsprozesse verlaufen **aerob** und finden also in Bereichen des Moorbodens statt, die mindestens zeitweilig belüftet werden. Zwei wichtige Vorgänge sind hier zu unterscheiden. Ein Teil der organischen Substanz wird durch Bakterien und Pilze sowie von wirbellosen Makroorganismen zu stabilen Kohlenstoffverbindungen (Huminstoffen) umgesetzt. Dieser Prozess wird **Humifizierung** genannt. Andererseits werden komplexe organische Moleküle durch Mikroorganismen zu niedermolekularen Verbindungen veratmet, die dann aus dem Moorboden entweichen. Dieser Prozess ist als **Mineralisierung** bekannt.

Unter permanent nassen Bedingungen (bei reduzierendem Redoxpotential) sind aerobe Stoffwechselprozesse nicht möglich. Die Zersetzung

des organischen Materials, die mit der Oxidation von Kohlenstoff verbunden ist, wird dadurch stark gehemmt. Hier können nur **anaerobe** Zersetzungsprozesse ablaufen, deren Effekt aber im Vergleich zu den aeroben extrem gering ist.

5.2.1.2. Humifizierung

Eine primäre Humifizierung läuft im teilweise sauerstoffführenden, obersten Bereich eines wachsenden Moores ab, wo die Torfakkumulation stattfindet. In Abhängigkeit von den Eigenschaften hydrologischer Regime, klimatischer Bedingungen, pH und Trophie kann die Humifizierung während der Torfablagerung unterschiedlich weit voranschreiten (siehe Kap. 5.3.3).

Im Zuge der Humifizierung werden Cellulose, Hemicellulose und andere polymere Kohlenhydrate pflanzlichen Ursprungs abgebaut. Dabei reichern sich Lignine an. Langkettige C-Verbindungen (z.B. Cutin-Bestandteile) werden ebenfalls angereichert oder durch mikrobielle Stoffwechselprozesse umgewandelt (Amelung et al., 2018a). Diese recht stabilen Verbindungen bilden eine amorphe, dunkel gefärbte Masse mit kolloidalen Eigenschaften. Die Erkennbarkeit der ursprünglichen pflanzlichen Strukturen nimmt dabei ab. Im Extremfall sind pflanzliche Strukturen mit dem bloßen Auge nicht mehr erkennbar, und der Torf besteht ausschließlich aus dunkler, amorpher Masse. In der Regel sind primäre Humifizierungsprozesse jedoch durch die geringe Sauerstoffverfügbarkeit stark gehemmt, so dass pflanzliche Strukturen in ausschließlich primär humifizierten Torfen meistens gut erkennbar sind.



Abb. 5.3.: Sehr schwach humifizierter Torfmoostorf. Foto: ©G.L. Constantin

Eine schwache Humifizierung kann durch die alleinige Tätigkeit von Bakterien und Pilzen zustande kommen, die verschiedene pflanzliche Gewebestrukturen präferenziell angreifen. Unter anderem wird cellulosereiches Stützgewebe abgebaut. Auch wenn weiterhin sehr gut wiedererkennbar, werden schwach humifizierte pflanzliche Bestandteile dadurch weich/mürbe, ein Zeichen dafür, dass das pflanzliche Material bereits **vertorft** ist (Abb. 5.3).

Bei stärkeren Humifizierungsprozessen spielen Bodentiere (v.a. Milben, Collembolen und Regenwürmer) eine zunehmend große Rolle (Abb. 5.4). Sie zerkleinern die Pflanzenreste zu feineren Strukturen und ernähren sich von dem entstehenden feinen Material. Humifizierende stoffliche Transformationsprozesse finden in dem Fall im Darm der Bodenlebewesen statt. Mit deren Ausscheidungen tragen sie zu einer starken Zunahme des amorphen Humusanteils bei (Puffe & Grosse-Brauckmann, 1963; Grosse-Brauckmann & Puffe, 1964).



Abb. 5.4.: Regenwurm in einem Moorbodenhorizont aus Schilftorf. Foto: ©G.L. Constantin

Nach Entwässerung werden Torfe zusätzlich sekundär humifiziert. Die Umsetzungsprozesse sind im Grunde genommen die gleichen wie bei der primären Humifizierung. Der Unterschied besteht darin, dass die Sauerstoffverfügbarkeit im entwässerten Torf viel höher ist. Der Humifizierungsprozess ist dadurch deutlich begünstigt, so dass stark humifizierte Substrate entstehen, in denen vertorftete Pflanzenbestandteile i.d.R. gar nicht mehr erkennbar sind oder höchstens vereinzelt noch erkannt werden können. Dies hängt auch damit zusammen, dass die Tätigkeit der Bodentiere bei sekundären Humifizierungsprozessen eine herausragende Rolle spielt. Aus kohlenstoffchemischer Sicht findet eine zu-

nehmende Anreicherung von Lignin, Aromaten, langkettigen Alkanen (z.B. Wachsen) sowie von anderen langkettigen C-Verbindungen (z.B. von Harzen und Gerbstoffen) statt (Puffe & Grosse-Brauckmann, 1963; Amelung et al., 2018a).

5.2.1.3. Mineralisierung

In der geringmächtigen belüfteten Schicht naturnaher Moorböden werden Kohlenstoffverbindungen durch Mikroorganismen oxidativ zersetzt (veratmet), wobei Kohlenstoffdioxid (CO₂) freigesetzt wird. Sobald die Pflanzenreste aber in den wassergesättigten Bereich gelangen, fehlt der Sauerstoff als Oxidationsmittel. Andere Verbindungen, die im wassergesättigten Bereich vorkommen, können ebenfalls als Oxidationsmittel fungieren, doch die Reaktionen verlaufen viel langsamer. Die Mineralisierungsrate im anaeroben Bereich ist somit extrem gering. Produkte der anaeroben Mineralisierung sind z.B. Methan (CH₄) und Schwefelwasserstoff (H₂S), der aufgrund seines starken Geruchs auch als Indikator für reduzierende Bedingungen verwendet werden kann.

Durch die Entwässerung wird ein viel mächtiger Bereich des Bodens regelmäßig belüftet. Dies verursacht intensive Mineralisierungsprozesse, so dass es an entwässerten Standorten zu einer massiven Freisetzung von Kohlenstoffdioxid kommt. Weil dies zu einem Nettoverlust an Torfsubstanz führt, spricht man auch von **oxidativem Torfverzehr** oder von **Torfschwund**. Aus entwässerten und gedüngten Moorböden entweicht zudem auch Lachgas (N₂O).

5.2.1.4. Bioturbation

Lebende Organismen verändern den Torf nicht nur im Sinne der stofflichen Umsetzungsprozesse, sondern führen auch zur Durchmischung des Substrats. Sei es durch kräftige Wurzeln, Regenwürmer, Maulwürfe (Abb. 5.5) oder Wildschweine, führt das Aufreißen und Wühlen zur Störung der ursprünglichen Lagerung des Torfes.

5.2.2. Physikalische Veränderungen

Das Erste, was nach der Entwässerung eines Moores sichtbar wird, sind die Folgen der physikalischen Veränderung des Bodens. Die Prozesse, die im Folgenden beschrieben werden, haben zudem auch ganz praktische Auswirkungen auf die Nutzung der Moorböden. Deswegen gab es historisch eine besonders intensive Auseinandersetzung mit diesen Phänomenen.

5.2.2.1. Setzung

Im Zuge der Entwässerung geht der Auftrieb im wasserfreien, oberen Bereich des Moorbodens verloren. Durch die Schwerkraft wird einerseits der entwässerte Bereich in sich selbst verdichtet. Andererseits wird auch der tiefere, noch wassergesättigte Bereich komprimiert, da die Masse der gesamten entwässerten Schicht einen hohen Druck auf den darunterliegenden Torf ausübt (Stegmann & Zeitz, 2001). Ein alternativer Begriff für diesen Prozess ist **Sackung**, wobei Sackung in der Literatur oder umgangssprachlich manchmal auch für den gesamten Geländehöhenverlust an entwässerten Standorten verwendet wird.



Abb. 5.5.: Stark entwässertes Niedermoor mit dichter Maulwurfbesiedlung. Foto: ©G.L. Constantin

5.2.2.2. Schrumpfung

Torf ist ein stark poröses Material. Wenn sich ursprünglich wassergefüllte Poren im Zuge der Entwässerung entleeren, erzeugen die entstehenden Wassermensken Zugkräfte, die letztendlich zum Aufreißen des Torfes führen (Abb. 5.6).



Abb. 5.6.: In einer Fahrspur sind tiefe Risse im Torf erkennbar. Foto: ©G.L. Constantin

Die erste Generation von Schrumpfrissen ist vertikal. Mit jeder weiteren Generation bilden sich i.d.R. Risse aus, die rechtwinklig zur vorangegangenen Generation stehen. Bei wiederholter Schrumpfung und Quellung entstehen mit der Zeit also auch Querrisse (Abb. 5.7).

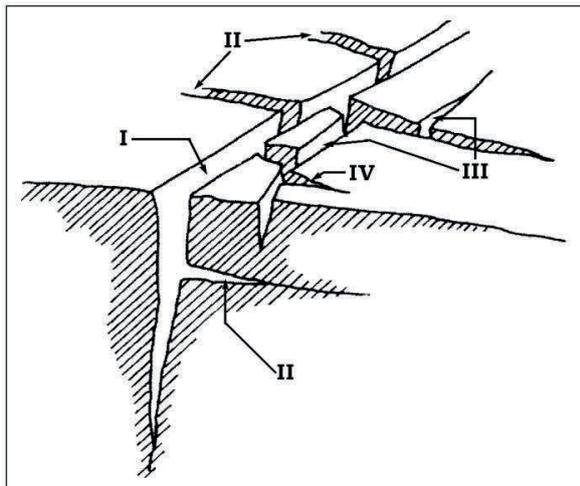


Abb. 5.7.: Rissbildungsmuster (Generationen I-IV) in einem schrumpfungsfähigen Substrat (aus Becher, 2000).

Die Dichte der Schrumpfrisse nimmt mit der Nähe zur Geländeoberfläche zu, da die Austrocknung und die damit einhergehende Schrumpfung hier am stärksten sind. Obwohl ein geschrumpfter Torf die Fähigkeit besitzt, bei Wiedervernässung zurückzuquellen, wird das ursprüngliche Volumen nicht vollständig erreicht, so dass sich die gebildeten Schrumpfrisse nicht wieder permanent schließen können. Je nach Intensität ist die Schrumpfung daher ein teilweise irreversibler Prozess.

5.2.3. Anthropogene Veränderungen

Die langjährige Nutzung der Moorflächen hinterlässt ebenfalls unmittelbare Spuren im Moorboden. Anthropogene Veränderungen sind sehr vielfältig. Doch diejenigen, die zur Veränderung der Bodenstruktur am deutlichsten beitragen, sind die vorwiegend mechanischen Auswirkungen der Bodenbearbeitung und Befahrung.

5.2.3.1. Bodenbearbeitung

Die Lagerung des Torfes wird oft nicht nur auf natürliche Weise durch Tiere und Pflanzenwurzeln, sondern auch durch den Menschen gestört. Die landwirtschaftliche Nutzung von Moorstandorten als Acker und/oder Grünland ist mit mechanischen Eingriffen wie Pflügen, Fräsen, Eggen und Grubbern verbunden. Die Effekte dieser Bodenbearbeitungsmaßnahmen sind in der Regel auf die oberen 10-30 cm des Moorbodens beschränkt. Seltener fanden auch wesentlich tiefere Eingriffe in den Torf statt, wie das Tiefenpflügen, die Baggerkuhlung oder Maßnahmen, die mit dem historischen Torfabbau verbunden sind, z.B. die Planierung alter Handtorfstiche oder die Umlagerung von Bunkerde (mehr dazu in Zeitz, 2003).

In vielen Fällen ist Bodenbearbeitung auch mit der gezielten Zugabe oder dem Auftrag von mineralischem Material assoziiert. Die Zugabe bzw. der Auftrag von Sand oder Bauschutt war eine oft praktizierte Methode zur Verbesserung der Befahrbarkeit von entwässerten Moorflächen.

5.2.3.2. Befahrungsbedingte Effekte

Durch die Befahrung mit schwerer landwirtschaftlicher Technik wird der entwässerte Bereich des Moorbodens zusätzlich verdichtet. Außerdem entstehen im Ober- und Unterboden starke Scherkräfte, die zur Ausbildung scharfer, horizontal verlaufender Risse führen können (Abb. 5.8).



Abb. 5.8.: Scharfer, horizontaler Riss im Oberboden eines Grünlandstandortes auf Niedermoor.
Foto: ©T. Fischer

5.2.4. Stoffliche Ein- und Austräge

Auch Stoffe, die nicht am Standort gebildet wurden, können sich in Moorböden festsetzen, z.B. verschiedene mineralische Substrate. Dies ist für die sekundäre Bodenentwicklung relevant, da die Verbindung der organischen Substanz mit dem mineralischen Material zu Unterschieden in der Gefügebildung und den Zersetzungsprozessen führt. Andere Substanzen hingegen verlassen den Moorböden.

Was die primären Einträge angeht, können sich während des Moorbodens auch mineralische Partikel externen Ursprungs zusammen mit dem Torf ablagern. Zum Beispiel kann Feinsand von benachbarten mineralischen Standorten durch Einwehung ins Moor gelangen. Sand, Schluff und Ton können gelegentlich auch eingespült werden, was oft zur Ausbildung gut erkennbarer mineralischer Bänder führt. Dies ist der Fall vor allem in Mooren mit Überflutungsdynamik, sowie bei Moorstandorten an der Basis von Hängen. In Niedermooren, die von karbonat- oder eisenreichem Grundwasser gespeist werden, kann man im Torf auch Kalkausfällungen oder Eisenkonkretionen finden.

Entwässerte Moore können ebenfalls durch stoffliche Einträge aus externen Quellen geprägt sein. Diese sind hauptsächlich anthropogen. Besonders wichtig sind der Stickstoff- und Phosphoreintrag durch Düngung, der Karbonateintrag durch Kalkung sowie die Zugabe oder der Auftrag von mineralischem Material.

Was Austräge aus Mooren angeht, sind Treibhausgase wohl die bekanntesten. Aus Mooren mit sehr hohen Wasserständen und vor allem mit Überstau entweicht Methan. Wenn Torfakkumulation gleichzeitig stattfindet, wird aber die Methanfreisetzung durch die Fixierung von Kohlenstoffdioxid kompensiert. Entwässerte Moore hingegen stoßen große Mengen an Kohlenstoffdioxid und, je nach Trophie, auch von Lachgas aus.

Das Wasser, das aus Mooren abfließt, führt wasserlösliche Huminstoffe, und an stark gedüngten Standorten sind außerdem Stickstoff- und Phosphorausträge üblich. Zusätzlich verlieren Moorflächen unter Ackernutzung oder Grünlandflächen mit einer lückigen Grasnarbe stark humifizierte Torf aus dem Oberboden durch Wind- und Wassererosion.

5.2.5. Komplexe sekundäre Prozesse

Die sekundäre Veränderung der Moorböden führt insgesamt zu einer Reihe typischer Erscheinungen auf Gefüge- und Substratebene, deren Muster an den meisten entwässerten und genutzten Standorten wiedererkennbar sind. Solche Muster kommen oft durch ein komplexes Zusammenspiel verschiedener Prozesse zustande.

5.2.5.1. Vererdung

Von Vererdung spricht man, wenn die Aktivität der humifizierenden Bodenorganismen im Oberboden so stark ausgeprägt ist, dass das Substrat durch die Anlagerung des umgesetzten Bodenmaterials eine typische Krümelstruktur annimmt (Abb. 5.2; Abb. 5.9) (siehe „Krümelgefüge“ in Kap. 5.4.5).

Vererdung findet im Zuge der Humifizierung bei ausreichender Entwässerung statt und kann z.B. unter Düngung und Kalkung verstärkt ablaufen (Göttlich & Kuntze, 1990). Bodenlebewesen tragen nicht nur durch die Veränderung der organischen Substanz zur Ausbildung eines Krümelgefüges bei, sondern auch durch deren wüh-

lende Tätigkeit (Bioturbation). Außerdem spielen Schrumpfungsprozesse im Oberboden ebenfalls eine Rolle in der Ausbildung eines Vererdungshorizonts an der Geländeoberfläche.



Abb. 5.9.: Vererdeter Niedermoortorf mit Krümelgefüge. Foto: ©G.L. Constantin

5.2.5.2. Vermulmung

Unter Vermulmung versteht man die Ausbildung eines Horizonts aus vollständig zersetztem, extrem fein strukturiertem Torf an der Geländeoberfläche, der zur Austrocknung neigt. Die Vermulmung stellt einen extremen Fall der sekundären Humifizierung und eine Folgeerscheinung der Vererdung dar. Im vermulmten Torf ist die Zersetzung so weit vorangeschritten, dass gerüstbildende Strukturen verlorengegangen und nur noch peptisierbare Substanzen übriggeblieben sind.

An der Ausbildung eines vermulmten Oberbodens sind aber auch die Risse im Unterboden beteiligt, die infolge einer tiefen Entwässerung und intensiven Befahrung entstanden sind. Diese unterbrechen den kapillaren Aufstieg, so dass der Oberboden öfter austrocknet. Humifizierende Bodenorganismen werden dadurch so stark beeinträchtigt, dass die produzierte Menge an bindenden Substanzen für biogene Anlagerungsprozesse nicht mehr ausreicht. Absonderungsprozesse und die mechanische Zerschlagung durch wühlende Wirbeltiere und Bodenbearbeitung übernehmen die dominante Rolle. So zerfällt der Torf zu feinem, grießig-staubigem Material (Abb. 5.10) (siehe „Restgefüge“ in Kap. 5.4.3).



Abb. 5.10.: Vermulmter Oberboden eines tief entwässerten Niedermoorstandortes.

Foto: ©G.L. Constantin

Trockene organische Substanz hat allgemein hydrophobe Eigenschaften. Außerdem handelt es sich bei den Kohlenstoffverbindungen, die sich im vollständig zersetzten, vermulmten Material angereichert haben, vor allem um langkettige Moleküle, z.B. Wachse, Harze oder Bitumen (Rochus & Sipos, 1976; Koppisch, 2001), die besonders hydrophob sind. So ist es denkbar, dass die Hydrophobie des vermulmten Torfes nicht nur durch die häufige Austrocknung, sondern auch durch die chemische Zusammensetzung des Substrats zustande kommt.



Abb. 5.11.: Trotz eines Grundwasserstandes von nur 40 cm unter Flur bleibt der vermulmte Oberboden trocken. Foto: ©G.L. Constantin

Da die Hydrophobie ihrerseits die Vernässung des Oberbodens erschwert, ist die Austrocknung vermulmter Oberböden ein selbstverstärkender Prozess. Stark vermulmte Standorte bieten dadurch besonders ungünstige Bedingungen für das Pflanzenwachstum und stellen zudem eine besondere Herausforderung für Wiedervernässungsmaßnahmen dar (Abb. 5.11).

5.2.5.3. Moorschwind

Durch die kumulierte Wirkung von Setzung, Schrumpfung und Mineralisierung verringert sich die Mächtigkeit des Torfes in entwässerten Mooren, woraus ein Netto-Geländehöhenverlust zustande kommt (Abb. 5.12).

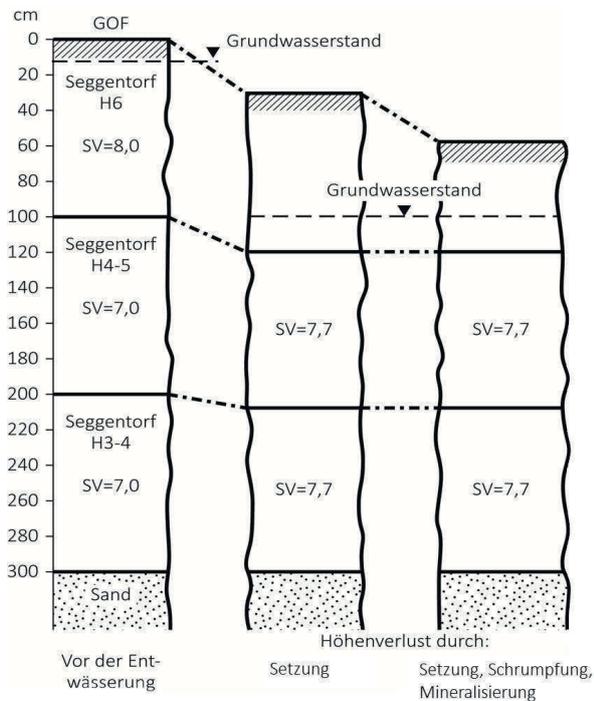


Abb. 5.12.: Geländehöhenverluste nach der Entwässerung (aus Illner et al., 1980); für die Seggentorfe werden Humifizierungsgrade (H) und Substanzvolumina in Vol. % (SV) angegeben.

Für dieses, als **Moorschwind** bezeichnete Phänomen (Abb. 5.13), wird manchmal auch der Begriff Sackung (im weiten Sinn) verwendet. Im engeren Sinn wird Sackung aber in den meisten Quellen als Synonym für Setzung verwendet. Der Eindeutigkeit halber wird für die Gesamtheit der Höhenverluste die Benutzung des Begriffs Moorschwind empfohlen.



Abb. 5.13.: Durch den Moorschwind liegt die Geländeoberfläche in der Friedländer Großen Wiese etwa 1 m tiefer als ca. 1970, als die Betonbrücke gebaut wurde. Zum Größenvergleich: Javier Gargiulo (HU Berlin). Foto (März, 2021): ©G.L. Constantin

5.3. Substrat

Torf ist das Substrat, aus dem Moorböden hauptsächlich bestehen (Mudden werden hier nicht weiter behandelt). Die im vorherigen Kapitel beschriebenen pedogenen Prozesse hängen teilweise auch von abiotischen Standortfaktoren wie Wasser- und Nährstoffverfügbarkeit ab. So wird insgesamt die Beschaffenheit der Torfe bestimmt, die man an einem untersuchten Standort vorfinden kann. Die entsprechenden Merkmale werden als Substratmerkmale bezeichnet.

5.3.1. Die Torfart

Das zentrale Merkmal des Substrats Torf ist die Torfart, d.h. die botanische Zusammensetzung der Vegetationsreste, aus denen der Torf besteht. Die Torfart wird durch die abiotischen Standortfaktoren bestimmt, die während des Moorbewachstums vorherrschen und für die Etablierung bestimmter torfbildender Pflanzengesellschaften entscheidend sind. Torfarten werden nach dem jeweils wichtigsten Torfbildner benannt. Die Entstehung, Eigenschaften und Erkennungsmerkmale der häufigsten Torfarten werden im Tool „Steckbriefe Moorsubstrate“ (Meier-Uhlherr et al., 2015) detailliert dargestellt.

5.3.2. Der Humifizierungsgrad

Ein anderes wichtiges Substratmerkmal ist der **Humifizierungsgrad**. Bei allen Torfen besitzt

der Humifizierungsgrad mindestens eine primäre Komponente. In unberührten, nassen Mooren sind die Humifizierungsgrade ausschließlich durch die Standortfaktoren bestimmt, die eine mehr oder weniger ausgeprägte primäre Humifizierung erlauben. In entwässerten Mooren werden oberflächennahe Substrate zusätzlich durch die sekundäre Humifizierung verändert.

Es gibt mehrere standardisierte Bewertungssysteme für die Humifizierung von Torfen. Das am häufigsten angewendete ist der **Humifizierungsgrad nach von Post** (von Post, 1924). Die Methode beinhaltet die Vergabe eines Humifizierungsgrades auf einer 10-stufigen Skala nach der Durchführung einer „**Handquetschprobe**“ (Abb. 5.14).



Abb. 5.14.: Handquetschprobe nach von Post: stark trübes Wasser und etwas Torfsubstanz gehen durch die Finger durch. Foto: ©T. Fischer

Die von-Post-Methode diente ursprünglich allein der Untersuchung primär geprägter Torfsubstrate. Sie wurde später auch für die Bestimmung des Humifizierungsgrades trockener Torfe angepasst (Grosse-Brauckmann et al., 1977). Seitdem ist es in der bodenkundlichen Praxis üblich geworden, Humifizierungsgrade sowohl für primär als auch für sekundär humifizierte Torfe aufzu-

nehmen. Dabei muss notiert werden, dass die Vergabe des gleichen Humifizierungsgrades für einen primär und einen sekundär humifizierten Torf nicht bedeutet, dass sich die beiden Substrate auch in ihren physikalischen und chemischen Eigenschaften ähnlich sein müssen. Dies liegt daran, dass die Substrateigenschaften im Laufe der sekundären pedogenen Veränderung neben der Humifizierung auch von vielen anderen Prozessen beeinflusst werden. Eine Anleitung für die Bestimmung des Humifizierungsgrades nach von Post findet man im Teil B des Feldbuches (Steckbrief **ME-06**).

5.3.3. Hydrogenetische Moortypen und Standortfaktoren

Unter den wichtigsten Faktoren, die sowohl die Vegetation an einem Moorstandort (und somit die Torfart) als auch die Intensität der primären Humifizierung beeinflussen, ist der Ursprung des Wassers, das das Moor speist. Nach diesem Kriterium werden Moore in mehrere sogenannte hydrogenetische Moortypen eingeteilt, u.a. Verlandungsmoore, Versumpfungsmoore, Quellmoore, Durchströmungsmoore, Überflutungsmoore und Regenmoore. Diese werden in mehreren existierenden Publikationen eingehend beschrieben, z.B. in Succow et al. (2001), Meier-Uhlherr et al. (2015) und Zeitz & Möller (2018).

Hydrogenetische Moortypen können grob zu zwei Hauptmoortypen zusammengefasst werden: **Hochmoore** (gleichbedeutend wie Regenmoore) und **Niedermoore** (alle anderen, grundwassergespeisten Moortypen).

In Niedermooren etablieren sich Pflanzengesellschaften, die das mäßig bis stark nährstoffreiche Grundwasser lieben, z.B. Seggenriede (ggf. mit Binsen und/oder Braunmoosen), Schilfröhrichte oder Erlenbruchwälder (Abb. 5.15 links).

In den nährstoffarmen Hochmooren gedeihen vor allem die Torfmoose (Gattung Sphagnum), die zudem die Standorte stark ansäuern. Nur wenige andere Pflanzen, darunter Wollgräser, Heidekräuter, Moorbirken und Moorkiefern können sich mit den Torfmoosen vergesellschaften (Abb. 5.15 rechts).



Abb. 5.15.: Moortypische Vegetation: Seggenried mit Schilf (Niedermoor, links); Sphagnenbulte mit Wollgras, Heidekräutern und Moorkiefern (Hochmoor, rechts). Fotos: ©G.L. Constantin

Mit der Zeit können sich die Bedingungen an einem Standort auch ändern (z.B. durch eine abnehmende Nährstoffverfügbarkeit). Dies führt zur Veränderung der Pflanzengesellschaft, so dass der Haupttorfbildner im Laufe des oft jahrtausendelangen Moorbauwachstums i.d.R. nicht konstant bleibt. In vielen Moorbodenprofilen sind deswegen übereinander gelagerte Schichten aus verschiedenen Torfarten zu finden, z.B. Radelmoortorf über Schilftorf.

Für die verschiedenen hydrogenetischen Moortypen sind kleinere oder größere Schwankungen im Grundwasser- bzw. Moorbodenwasserstand typisch. Natürlicherweise kennen Überflutungs- oder Versumpfungsmoore häufiger Phasen mit tieferen Wasserständen als z.B. Durchströmungsmoore. Dort können aerobe Zersetzungsprozesse für längere Zeit auf neu gebildete Substrate einwirken. Für solche Standorte sind also höhere primäre Humifizierungsgrade typisch.

Ein anderer Faktor, der die primären bodenbildenden Prozesse und somit die Substrateigenschaften beeinflusst hat, ist das Klima der letzten Jahrtausende. Seit der letzten Vereisung gab es in Nord- und Mitteleuropa mehrere Schwankungen, was mittlere Temperaturen und Niederschlagsmengen anbelangt. Dies ist auch im Torf wiedererkennbar. Ein bekanntes Beispiel kommt in den norddeutschen Hochmooren vor. Dort hat sich von etwa 3700 bis 450 v. Chr. während einer relativ warmen, feuchten Phase (Subboreal) stark humifizierter Torfmoostorf gebildet. Dieser wird wegen seiner dunklen Farbe **Schwarztorf** genannt.

Im Laufe des 1. Jahrtausends v. Chr. (seit Anfang des Subatlantikums) wurde das Klima kälter und niederschlagsreicher. Seitdem lagerte sich sehr schwach humifizierter Torfmoostorf ab, der aufgrund seiner hellen Farbe auch **Weißtorf** heißt (Abb. 5.16).



Abb. 5.16.: Scharfe Schwarztorf-Weißtorf-Grenze in der Moorklappsonde an einem Standort in Niedersachsen. Foto: ©G.L. Constantin

Der Schwarztorf-Weißtorf-Kontakt wird aber standortabhängig sogar innerhalb des gleichen Moores nicht gleich datiert und verläuft nicht immer scharf (Averdieck et al., 1990). Übergangsbereiche von mehreren Dezimetern sind möglich.

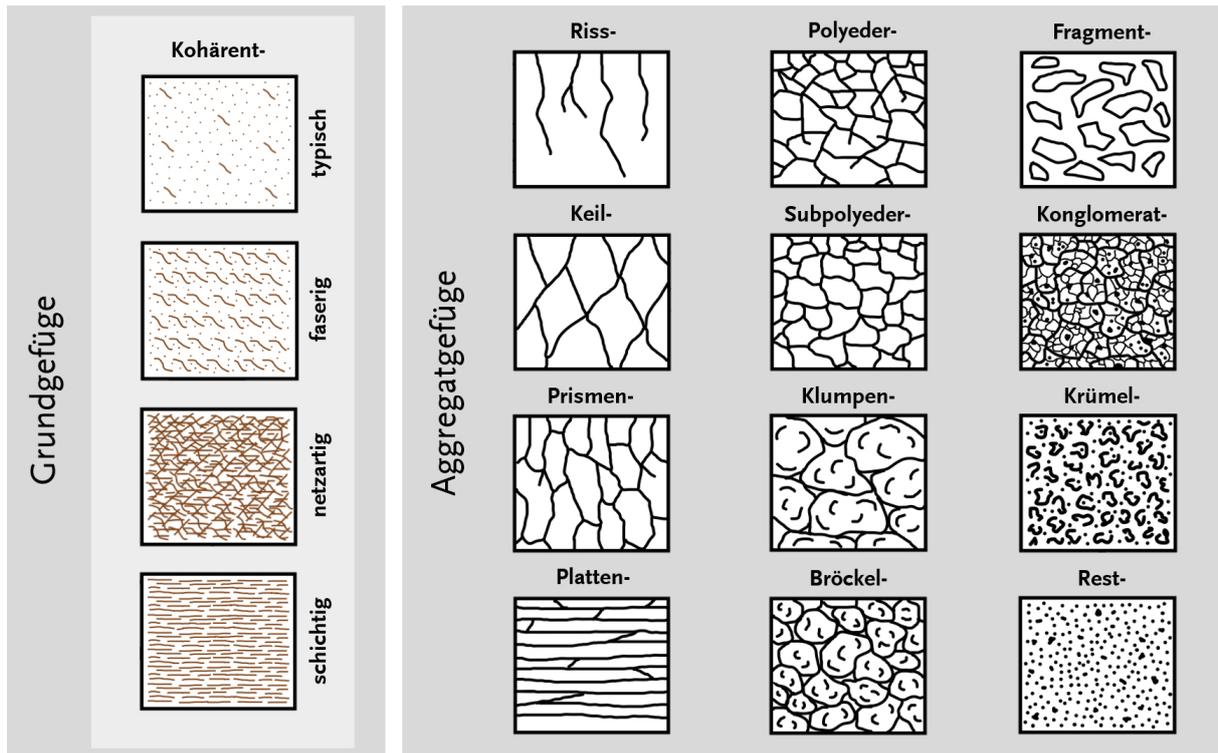


Abb. 5.17.: Übersicht der häufigsten Gefügeformen in Moorböden; diese werden den Hauptkategorien Grundgefüge und Aggregatgefüge zugeordnet. Das Grundgefüge der Torfe ist ein Kohärentgefüge mit mehreren möglichen Ausprägungsformen. Grafik: ©G.L. Constantin

5.4. Gefüge

Nicht nur das Substrat wird durch bodenbildende Prozesse verändert, sondern auch das Bodengefüge. Als **Bodengefüge** oder **Bodenstruktur** wird die „räumliche Anordnung der festen Bodenbestandteile“ (Ad-hoc-AG Boden, 2005, S. 116) und der dazwischen vorhandenen Hohlräume bezeichnet. Je nach Aussehen, Größe und relativer Lage der Gefügeelemente zueinander, spricht man von verschiedenen **Gefügeformen** (Abb. 5.17). Die Gefügebildung verläuft in Moorböden in manchen Hinsichten anders als in den meisten Mineralböden (z.B. was die Beschaffenheit der Substrate und was die Bedeutung der Wasserstände für die Gefügebildung anbelangt). Allgemein stammen aber die Begriffe, die für die Beschreibung des Bodengefüges verwendet werden, aus der Mineralbodenkunde. Da sie sich in einigen Fällen nicht perfekt auf Moorböden anwenden lassen, müssen die Definitionen der Gefügeformen für Moorböden stellenweise spezifisch angepasst oder auch passendere Begriffe eingeführt werden, die moorspezifische Gefü-

gebildungen genauer darstellen können (wie im Kap. 2 „Lies-Mich“ erklärt wurde).

5.4.1. Grundgefüge

In torfakkumulierenden Mooren besitzt der gesamte Torf eine kompakte, zusammenhängende, risslose Struktur. Das heißt, dass alle ausschließlich primär geprägten Torfe ein sogenanntes **Grundgefüge** aufweisen. Torfe sind zwar nicht in allen Aspekten mit mineralischen Substraten vergleichbar, doch unter den in der KA5 aufgeführten Grundgefügeformen trifft die Definition des **Kohärentgefüges** für Torfe am besten zu: „zusammenhaftende, nicht gegliederte Bodenmasse, deren Bestandteile meist durch kolloidale Substanzen allseitig, jedoch unterschiedlich stark, miteinander verklebt sind“ (Ad-hoc-AG Boden, 2005) (Steckbriefe **GF-13**, **GF-ÜS**).

Dieses torfspezifische Kohärentgefüge kann aber verschiedene **Ausprägungsformen** annehmen, die von der Torfart und vom primären Humifizierungsgrad maßgeblich bestimmt werden (Abb. 5.17, 5.18). So zeigen stark bis sehr stark humifizierte Torfe (H7-H10 nach von Post) ein **typisches** Kohärentgefüge. Hier überwiegt

des Torfes. Durch wiederholte Quellungs- und Schrumpfungszyklen entsteht Reibung zwischen benachbarten Aggregaten, so dass die Aggregate mit der Zeit glänzende Oberflächen entwickeln, die den *slickensides* der Pelosole ähnlich sind (Becher, 2000). Durch Absonderung entstehen typischerweise Aggregate mit mehr oder weniger glatten Oberflächen und scharfen Kanten (Abb. 5.19).



Abb. 5.19.: Absonderungsgefüge mit typischen Merkmalen: scharfe Aggregatkanten und glatte, stark glänzende Aggregatoberflächen (ähnlich *slickensides*). Foto: ©G.L. Constantin

Für Absonderungsprozesse können im Unterboden auch starke, durch Befahrung entstehende Scherkräfte verantwortlich sein, während im Oberboden die sprengende Einwirkung von Frost zu erwähnen ist. Am häufigsten findet man typisches Absonderungsgefüge in den Unterböden entwässerter Moorprofile. Dabei handelt es sich meistens um Absonderung in Bereichen des Profils, in denen keine mechanischen Eingriffe stattgefunden haben. Der Torf befindet sich dann in natürlicher Lagerung innerhalb der Aggregate. In historisch tiefer bearbeiteten Profilen können diese Prozesse aber auch in Unterböden aus mechanisch gestörtem Torf ablaufen.

Die Pfade der Gefügeentwicklung durch Absonderung werden in Abb. 5.20 schematisch dargestellt. Folgende Gefügeformen entstehen hauptsächlich durch Absonderungsprozesse:

Rissgefüge (Steckbriefe **GF-12, GF-ÜS**) – Wenn Kohärentgefüge zum ersten Mal schrumpfbedingt aufreißt, sind die ersten Risse vertikal. Rissgefüge besteht ausschließlich aus vertikalen Rissen, die nach unten in einem ungeteil-

ten, kohärenten Bereich enden. Die Schrumpfrisse haben i.d.R. sehr schwach bis deutlich glänzende Oberflächen, die nach unten immer matter werden.

Prismengefüge (Steckbriefe **GF-09, GF-ÜS**) – Prismen sind vertikal ausgerichtete Gefügeelemente (mit einer deutlich längeren vertikalen Achse), die i.d.R. 5-6 kantig bis scharfkantig abgegrenzte laterale Seitenflächen aufweisen. Grobe Prismen können aus einem Rissgefüge entstehen, wenn sich vertikal orientierte Gefügeelemente weiter in sich verdichten und sich durch Querrisse vom darunterliegenden Substrat lösen. Allgemein können sich grobe Aggregate weiter in feinere Aggregate aufspalten, darunter auch feinere Prismen (Querachse < 50 mm). Wenn grobe, vertikal orientierte Gefügeelemente gerundete Seitenflächen und eine kappenartige Kopffläche besitzen, wird auch der Begriff Säulengefüge verwendet. In Anlehnung an Hickisch (1989) wird das Säulengefüge hier als Unterkategorie des Prismengefüges behandelt.

Keilgefüge (Steckbriefe **GF-11, GF-ÜS**) – Nach wiederholten Schrumpfungszyklen bilden sich immer mehr Querrisse. Dabei kann ein Keilgefüge entstehen, das aus vertikal ausgerichteten keil- oder klingenförmigen Gefügeelementen mit deutlich bis stark glänzenden Oberflächen besteht, die scharfkantig und spitz zulaufend ineinander verzahnt sind.

Polyedergefüge (Steckbriefe **GF-08, GF-ÜS**) – Durch eine intensive Absonderung entstehen aus groben Gefügeelementen auch Polyeder. Diese Aggregate sind kantig bis scharfkantig und haben i.d.R. glatte, deutliche glänzende Oberflächen. Sie weisen variable Kantenlängen auf, aber keine deutlich längere vertikalen Achse. Grobes Polyedergefüge aus Aggregaten mit Achsenlängen > 50 mm wird auch Blockgefüge genannt.

Subpolyedergefüge (Steckbriefe **GF-07, GF-ÜS**) – Aufgrund der faserigen Beschaffenheit mancher Torfe kann die Absonderung auch zur Abspaltung von Aggregaten mit variablen, etwa gleichen Kantenlängen, aber ohne scharfe Kanten führen. Diese Aggregate mit subpolyedrischer Form sind schwächer kantig, abgerundet oder wulstig und haben vorwiegend matte Oberflächen mit stellenweise glänzenden Bereichen. Dabei muss beachtet werden, dass Subpolyedergefüge in Moorböden auf verschiedene Weisen entstehen kann. Die Merkmale des Subpolyeder-

gefüges sind also unspezifisch in Bezug auf pedogene Prozesse. Bei der Entstehung dieser Gefügeform sind i.d.R. auch Anlagerungsprozesse und/oder mechanische Veränderungsprozesse beteiligt. Deswegen wird das Subpolyedergefüge auch in Kap. 5.4.4 (Anlagerung) und Kap. 5.4.5 (Mechanische Veränderung) aufgeführt.

Plattengefüge (Steckbriefe **GF-10**, **GF-ÜS**) – Die Befahrung mit schwerer landwirtschaftlicher Technik kann sowohl im Oberboden- als auch im Unterbodenbereich zur Ausbildung glatter horizontaler Risse führen (Steckbrief **ZH-03**). In Unterböden, die aus einem primär schichtig strukturierten Substrat bestehen, kann dies zur Absonderung horizontal gelagerter, verdichteter, plattiger Gefügeelemente führen. Es entsteht ein sogenanntes Plattengefüge.

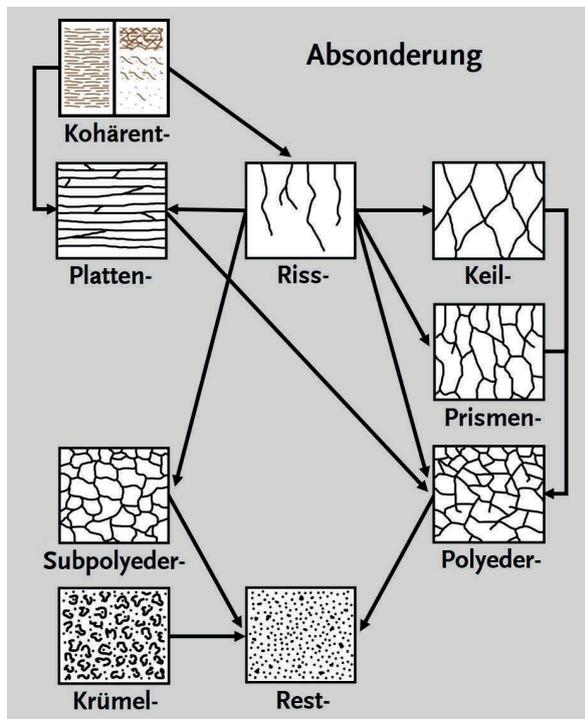


Abb. 5.20.: Durch Absonderungsprozesse geprägte Pfade der Gefügebildung in entwässerten Moorböden. Grafik: ©G.L. Constantin

Restgefüge (Steckbriefe **GF-01**, **GF-ÜS**) – Durch den starken Rückgang biogener Anlagerungsprozesse (siehe Kap. 5.4.4) dominieren in vermulmten Oberböden die Absonderungsprozesse. Als Folge zerfallen vorhandene Aggregate (z.B. Krümel und Subpolyeder) in immer kleinere Gefügeelemente. Das entstehende Material besteht überwiegend aus sehr feinen (< 2 mm), harten Aggregaten mit unregelmäßig-kantiger oder

abgerundeter Form und loser, komplett desaggregierter organischer Substanz. Für diese Gefügeform wird der Begriff Restgefüge vorgeschlagen (Definition nach Nievergelt et al. (2002) für Moorböden angepasst). An der Ausbildung des Restgefüges kann neben Absonderungsprozessen (z.B. Schrumpfung/Quellung, Sprengung durch Frost) auch die mechanische Zerschlagung durch Bodenbearbeitung beteiligt sein. Diese Gefügeform ist typischerweise auf den Vermulmungshorizont stark degradierter Oberböden beschränkt (i.d.R. im Tiefenbereich 0-10 cm).

5.4.4. Anlagerung

Der Boden kann allgemein als Kolloidsystem beschrieben werden. Kolloide sind sehr feine, feste Partikeln (< 2 µm), die in einer flüssigen Phase verteilt sind. Diese Partikeln interagieren miteinander über adsorbierte Kationen oder Wassermoleküle und über elektrostatische Wechselwirkungen an den unmittelbaren Kontaktstellen. Auf rein chemischer Ebene sind für den Zusammenhalt des Bodenmaterials Kohäsionskräfte (z.B. Hauptvalenzbindungen und zwischenmolekulare Van-der-Waals-Wechselwirkungen), sowie Adhäsionskräfte an Phasengrenzflächen verantwortlich (Amelung et al., 2018b).

Die wichtigsten Kolloide in Moorböden sind die Huminstoffe. In tonhaltigen Torfen können sich außerdem stabile Ton-Humus-Komplexe bilden, die eine Aggregatbildung durch Anlagerung fördern. Auch durch die Anwesenheit von Kationen wie Ca^{2+} kann die Vernetzung von Kolloiden gefördert werden. Deshalb sind Anlagerungsprozesse in natürlich kalkreichen oder gekalkten Mooroberböden stärker ausgeprägt. Außerdem können bestehende Aggregate durch die Ausfällung von Kalk und Eisenhydroxiden miteinander verkittet werden (Kuntze, 1981).

Verschiedene Anlagerungsmechanismen führen zum Zusammenschluss kleiner Bodenpartikeln, was die Bildung größerer Aggregate zur Folge hat. Im Fall der Moorböden finden Anlagerungsprozesse hauptsächlich im stärker zersetzten Oberbodenmaterial entwässerter Standorte statt. Dabei ist ein wichtiger Teil der Anlagerungsprozesse biogen. Zum Beispiel geben im Boden lebende Mikroorganismen Schleimstoffe ab, die Bodenteilchen miteinander verkleben können. Außerdem wird organisches und mineralisches Material, das von makroskopischen Zer-

setzern wie Regenwürmern, Milben oder Collembolen aufgenommen wurde, bei der Darmpassage verknetet, stabilisiert und als Kotballen ausgeschieden. Weiterhin werden diese kleinen Bodenaggregate durch Pilzhyphen und Feinwurzeln miteinander verflochten.

Durch Bodenbearbeitung und/oder Bioturbation gestörtes Torfmaterial, das als loser Verband von kleinen Gefügeelementen vorliegt, kann erneut **reaggregieren**, wenn Anlagerungsprozesse dominant sind. An Grünlandstandorten, die seit mehreren Jahren nicht mehr umgebrochen wurden, ist eine derartige Reaggregation v.a. in tieferen Bereichen des Oberbodens zu beobachten (etwa in 10-20 cm Tiefe).

Die genetischen Beziehungen der Gefügeformen, die durch Anlagerungsprozesse geprägt sind, werden in Abb. 5.21 vorgestellt. Verschiedene Anlagerungsprozesse sind maßgeblich an der Ausbildung folgender Gefügeformen beteiligt:

Krümelfüge (Steckbriefe **GF-02, GF-ÜS**) – Der Begriff bezieht sich auf feines, biogenes Aufbaugefüge im Oberboden. An Moorstandorten ist Krümelfüge eng mit dem Prozess der Vererdung und daher mit einer besonders regen Aktivität der makroskopischen Zersetzer und der Mikroorganismen verknüpft. Kleine, stark zersetzte Torfaggregate und die Kotballen der Zersetzer werden miteinander verklebt und durch Pilzhyphen und Feinwurzeln stabilisiert. Dadurch entstehen i.d.R. 1-10 mm große, unregelmäßig aufgebaute, buchtige und poröse Aggregate, die Krümel genannt werden. Bei schwacher Vererdung und bei hoher Bodenfeuchte haften die Krümel aneinander, so dass man sie nicht sauber isolieren kann. Man spricht dann von einem schwammigen Krümelfüge. Je nachdem welches Substrat biogen umgesetzt wird, kann Krümelfüge aus dem Grundgefüge (Kohärentgefüge) oder aus verschiedenen Aggregatgefügeformen entstehen.

Subpolyederggefüge (Steckbriefe **GF-07, GF-ÜS**) – Hierbei handelt es sich um recht stabil reaggregierte Gefügeelemente aus vorher mechanisch gestörtem Material. Meistens sind die Aggregate abgerundet oder kantig (aber nicht scharfkantig) und besitzen teils matte, durch biogene Anlagerung geprägte Oberflächenbereiche, und teils glänzende Oberflächenbereiche, die durch Reibung infolge von Schrumpfung/Quellung oder Befahrung entstanden sind.

Konglomeratgefüge (Steckbriefe **GF-03, GF-ÜS**) – Dieser Begriff wird für relativ schwach reaggregierte Gefügeelemente vorgeschlagen, die unregelmäßig und zerklüftet sind und bei leichtem Fingerdruck in ihre ursprünglichen Einzelteile zerfallen. Ein Konglomerat besteht üblicherweise aus aneinander haftenden, ungerichtet gelagerten Subpolyedern, Restgefüge, und ggf. vereinzelt Polyedern. Diese sind nach dem Zerfall des Konglomerats wieder erkennbar. Die Reaggregation in vermulmten Substraten ist i.d.R. relativ schwach. Vermutlich beruht sie hauptsächlich auf Van-der-Waals-Wechselwirkungen an den Kontaktstellen der Konglomeratbestandteile zwischen langkettigen Alkanen, die sich im stark zersetzten Substrat angereichert haben. Weiterhin könnte auch die befahrungsbedingte Verdichtung zur Reaggregation beitragen.

Es ist denkbar, dass Anlagerungsprozesse allgemein durch einen engeren Kontakt der Bodenbestandteile begünstigt werden. So ein Zustand entwickelt sich auch, wenn mechanisch gestörte Substrate mit Krümel- oder Restgefüge bei längerfristiger Wassersättigung quellen und eine geschlossene, massive, auf den ersten Blick kohärent wirkende Masse bilden. Einzelne Gefügeelemente sind dann nur nach vorsichtigem Aufreißen erkennbar.

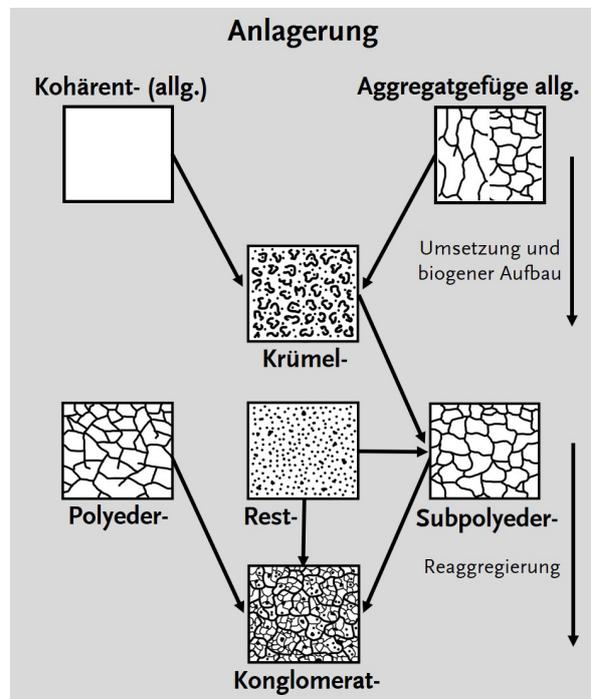


Abb. 5.21.: Durch Anlagerungsprozesse geprägte Pfade der Gefügebildung in entwässerten Moorböden. Grafik: ©G.L. Constantin

5.4.5. Mechanische Veränderung

Die Gestalt der Aggregate kann weiterhin durch direkte mechanische Einwirkung verändert werden. Diese kann entweder natürlichen oder anthropogenen Ursprungs sein (Bioturbation bzw. Bodenbearbeitung) und führt entweder zur Zerschlagung oder zur Umformung bereits existierender Aggregate. Alle durch Absonderung oder Anlagerung entstandenen Aggregate können nachträglich mechanisch verändert werden.

Eine häufige Art der Bodenbearbeitung ist der Umbruch (das Pflügen). Dabei werden hauptsächlich Aggregate des Oberbodens zerschlagen und umgeformt. Dies erfolgt meistens in oberflächennahen Substraten, die sich nicht mehr in natürlicher Lagerung befinden, da sie in der Vergangenheit bereits durch Bodenbearbeitung und/oder Bioturbation gestört worden sind. In diesen Fällen werden u.a. Krümel- oder Restgefüge, reaggregierte Subpolyeder und Konglomerate oder gequollenes, sekundär kohärent wirkendes Bodenmaterial mechanisch verändert.

Bis zur nächsten Bodenbearbeitung setzt sich der frisch gepflügte Bereich eines Moorbodens und wird durch wiederholte Befahrung verdichtet. Auch durch oxidativen Torfverzehr verliert er an Mächtigkeit. So greift der Pflug bei jedem neuen Umbruch i.d.R. auch wenige Zentimeter in die darunterliegende Schicht aus Torf in natürlicher Lagerung hinein. Dadurch werden aus dem Unterboden auch schwächer zersetzte Torffragmente, teilweise mit noch sehr gut erkennbaren Pflanzenresten in den Oberboden hochgepflügt. Durch Bodenbearbeitungsmethoden wie das Fräsen oder die Benutzung der Kreiselegge, die v.a. an Hochmoorgrünlandstandorte üblich sind, wird das Substrat stärker zerkleinert. Dabei entstehen Gemische aus feinen, unterschiedlich stark zersetzten Gefügefragmenten.

Die Pfade der Gefügeentwicklung durch mechanische Veränderung werden in Abb. 5.22 dargestellt. Mechanische Veränderungsprozesse sind hauptsächlich an der Ausbildung folgender Gefügeformen beteiligt:

Bröckelgefüge (Steckbriefe **GF-04, GF-ÜS**) – Die durch die Pflugschar ausgeübte Kräfte führt zur Zerschlagung, Verformung und Verknetung vorhandener Gefügeelemente. Neu geformte, abgerundete oder nur schwach kantige Aggregate, die hauptsächlich aus stark zersetztem Torf bestehen, matte Oberflächen besitzen und

≤ 50 mm im Durchmesser betragen, werden Bröckel genannt.

Klumpengefüge (Steckbriefe **GF-05, GF-ÜS**) – Für größere Bröckel (Durchmesser > 50 mm), wird der Begriff Klumpen verwendet. Klumpen sind oft auch etwas kantiger als die kleineren Bröckel.

Fragmentgefüge (Steckbriefe **GF-06, GF-ÜS**) – Fragmente (im weiten Sinne) werden alle Aggregate genannt, an denen die Zerschlagung größerer Gefügeelemente beteiligt ist (einschließlich Bröckel und Klumpen). Im engeren Sinne (angelegt an Nievergelt et al., 2002), werden Fragmente hier als Aggregate definiert, die ausschließlich durch Zerschlagung (ohne Verformung oder Verknetung) entstanden sind. Üblicherweise handelt es sich um hochgepflügte Torfstücke aus dem Unterboden, in denen pflanzliche Strukturen in natürlicher Lagerung erkennbar sind. Diese Fragmente haben eine unregelmäßige Form, scharfe Bruchkanten und matte, faserige Oberflächen. Wegen der Verdichtung des Unterbodenbereichs, aus dem sie stammen, bestehen sie i.d.R. aus deutlich schichtig strukturiertem Torf und tendieren deswegen dazu, sich beim Hochpflügen in Plattenform zu lösen.

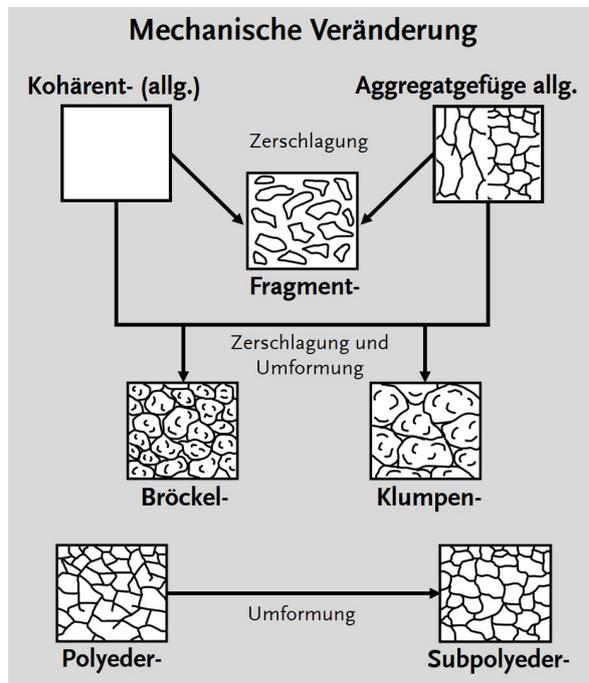


Abb. 5.22.: Durch mechanische Veränderung geprägte Pfade der Gefügebildung in entwässerten Moorböden. Grafik: © G.L. Constantin

Subpolyedergefüge (Steckbriefe **GF-07**, **GF-ÜS**) – Aggregate mit einer subpolyedrischen Form (kantig, aber nicht scharfkantig) und teils glatten Oberflächenbereichen entstehen auch durch die Umformung von Polyedern. Dafür können wühlende Wirbeltiere (z.B. Maulwürfe), wachsende, starke Baumwurzeln an Waldstandorten oder die Bodenbearbeitung verantwortlich sein. Dabei werden Polyeder aus ihrer ursprünglichen Lage gelöst und ihre Kanten werden durch die entstehende Reibung abgerundet.

5.4.6. Bedeutung des Substrats in der Gefügebildung

Sowohl die primären als auch die sekundären Merkmale des Substrats haben einen erheblichen Einfluss auf die Ausprägung des entstehenden Aggregatgefüges.

Zum Beispiel wird die Neigung des Torfes zur Ausbildung von Schrumpfrissen von den primären Merkmalen Torfart und Humifizierungsgrad beeinflusst. Dies ist ein wichtiger Faktor bei der Gefügebildung. Allgemein sind primär stärker humifizierte Torfe anfälliger für die Bildung von Schrumpfrissen. Ein klassisches Beispiel dafür ist der Unterschied in der Gefügebildung im Weißtorf und im Schwarztorf (beides Torfmoostorfe). Der schwach humifizierte Weißtorf ist sehr schrumpfsresistent, was dazu führt, dass vertikale Schrumpfrisse hier, wenn überhaupt vorhanden, recht schwach ausgebildet sind. Der stark humifizierte Schwarztorf hingegen neigt dazu, bei Austrocknung deutlich und tief vertikal aufzureißen (Abb. 5.23).

Zwischen den einzelnen Torfarten gibt es Unterschiede, sogar wenn die Substrate gleich stark humifiziert sind. Radizellentorfe lassen sich z.B. in Grobseggentorfe und Feinseggentorfe unterteilen. Dabei zeigen Grobseggentorfe eine stärkere Tendenz zur Ausbildung von Absonderungsgefüge als Feinseggentorfe (Wojahn & Schmidt, 1987 in Stegmann & Zeitz, 2001).

Weiterhin beeinflusst die Torfart auch das räumliche Muster der Schrumpfrissbildung. Deutlich lagig abgelagerte Torfe wie Cuspidata-Torfmoostorfe, Braunmoostorfe und rhizomreiche Schilftorfe reißen in vertikaler Richtung kaum auf, neigen aber zur Absonderung horizontal ausgerichteter, plattiger Gefügeelemente. In Torfen, in denen größere Pflanzenreste vorhanden sind (z.B. Holztorfe und sogar Schneidentorfe),

folgen die Schrumpfrisse präferentiell der Ausrichtung dieser vorgegebenen Strukturen.

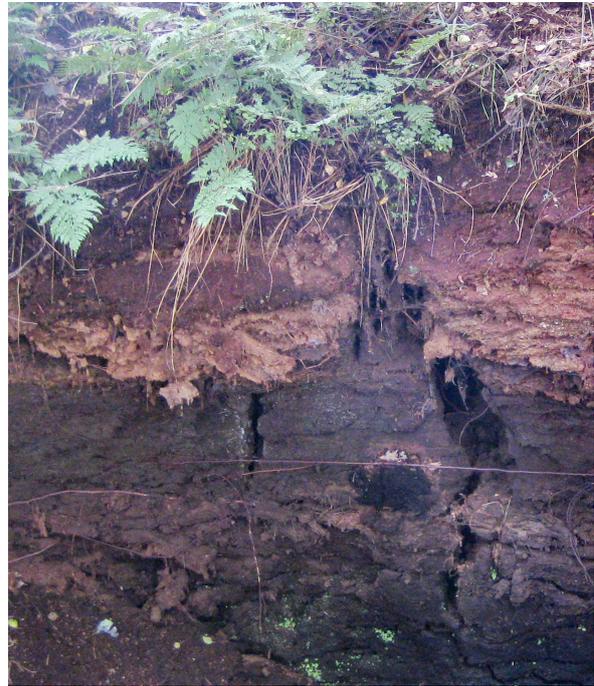


Abb. 5.23.: Abtorfungskante mit Schwarztorf-Weißtorf-Grenze; schrumpfsbedingte Klüfte sind vor allem im Schwarztorfbereich zu erkennen. Foto: ©G.L. Constantin

Im Torf vorhandene mineralische Komponenten beeinflussen Gefügebildungsprozesse ebenfalls. So sind z.B. stabilisierende Ton-Humus-Komplexe, Ca-Brücken und die Verkittung durch Eisenhydroxide und Kalk zu erwähnen. Solche Phänomene sind an Niedermoorstandorten, die von kalk- oder eisenführendem Grundwasser gespeist sind, oder in Quellbereichen zu beobachten. In eisenreichen Moorböden können gefällte Eisenhydroxide im Wasserschwankungsbereich ockerfarbene bis dunkelbraune Tapeten (= **Rostflecken**) an Riss- und Aggregatoberflächen oder an Wurzelbahnen bilden (Steckbrief **ZH-04**).

Torfart, Humifizierungsgrad sowie die Anwesenheit verschiedener mineralischer Komponenten werden in hohem Maße vom hydrogenetischen Moortyp und den entsprechenden Standortfaktoren bestimmt (siehe Kap. 5.3.3). Das heißt, dass man auch unterschiedliche Gefügebildungsmuster in Abhängigkeit vom hydrogenetischen Moortyp erwarten kann.

5.5. Pedogene Bereiche

Pedogene Prozesse reichen in den Moorboden unterschiedlich tief hinein. Schaut man sich also ein beliebiges Moorbodenprofil an, fallen auf den ersten Blick zunächst bis zu drei Bereiche auf, die sich im Erscheinungsbild des Gefüges und meistens auch in der Farbe deutlich voneinander unterscheiden (Abb. 5.24). Hierfür wird der Begriff „pedogene Bereiche“ vorgeschlagen. Auf die pedogenen Bereiche (gekennzeichnet mit den Buchstaben A, B und C) soll im Folgenden näher eingegangen werden. Die bodenbildenden Prozesse, die durch ihre unterschiedlichen Wirkungstiefen zur Ausbildung der drei pedogenen Bereiche führen, werden als Übersicht in Tab. 5.1 aufgelistet. Die pedogenen Bereiche A, B und C umfassen alle Ober- und Unterbodenhorizonte des Moorbodens, wobei jeder Horizont einem pedogenen Bereich spezifisch zugeordnet wird (Tab. 5.2 in Kap. 5.6).

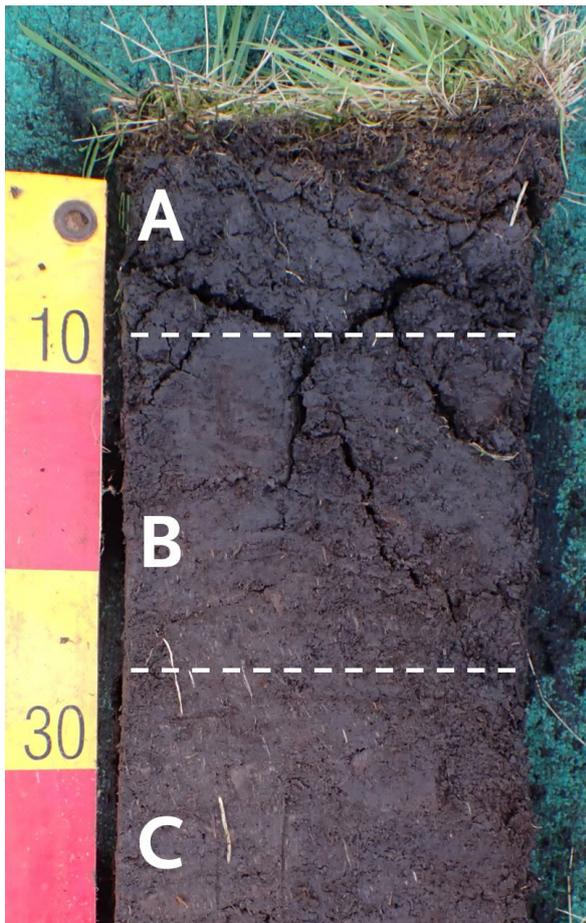


Abb. 5.24.: Nach Bodenstruktur (Rissmuster) und Farbe lässt sich dieses Hochmoorprofil in drei distinkte Bereiche (pedogene Bereiche A, B und C) unterteilen. Foto: ©G.L. Constantin

Ein großer Vorteil der Arbeit mit den hier definierten Bereichen A, B und C bei bodenkundlichen Untersuchungen im Moor besteht darin, dass diese Bereiche in den meisten Fällen anhand vom Gefüge sehr deutlich zu erkennen sind. Für eine leichte Erkennung eignet sich die im Teil B des Feldbuches beschriebene Flachschrufmethode (Steckbrief **ME-01**) besonders gut. Wenn man die drei pedogenen Bereiche richtig erkannt hat, verfügt man bereits über ein grundlegendes Verständnis der Bodenentwicklung am jeweiligen Standort. Für die Bestimmung der pedogenen Bereiche kann man die Steckbriefe **ME-02**, **NI-PB** und **HO-PB** benutzen. Die anschließende Ansprache aller vorhandenen Horizonte ist einfacher und weniger fehleranfällig, wenn man die erkannten pedogenen Bereiche in Betracht ziehen kann.

5.5.1. Bereich A

Die Intensität bestimmter pedogener Prozesse nimmt mit zunehmender Tiefe sehr rasch ab. Das betrifft vor allem die starken Umsetzungsprozesse der sekundären Humifizierung und die Bioturbation. In der Regel sind die pedogenen Veränderungen, die durch diese Prozesse verursacht werden, auf die oberen 30 cm eines entwässerten Moorbodens beschränkt. Oft ist deren Wirkungstiefe sogar deutlich geringer. Gleichzeitig ist die Tiefe der anthropogenen Bodenbearbeitung recht ähnlich. Hier findet nicht nur eine Überlappung der Wirkungstiefen statt, sondern auch eine gegenseitige Beeinflussung der Prozesse. Zum Beispiel begünstigen die mechanische Störung des Bodengefüges und die Lockerung der Lagerung durch Bodenbearbeitung die aeroben Zersetzungsprozesse weiter und regen das Bodenleben an. Es entstehen überwiegend stark oder sehr stark zersetzte, dunkelbraun bis schwarz gefärbte Substrate, die mindestens eine mechanische Umformung bzw. Störung (durch Bioturbation und/oder Bodenbearbeitung) durchlaufen haben. Standortspezifisch wird das Gefüge weiterhin durch unterschiedlich starke Absonderungs- und Anlagerungsprozesse geprägt. Dieser hauptsächlich biologisch und anthropogen geprägte Bereich wird als Bereich A bezeichnet.

Tab. 5.1.: Prozesse, die zur Ausbildung der pedogenen Bereiche A, B und C beitragen. Die relative Intensität der beteiligten Prozesse wird mit „+“ (schwach bis mäßig) oder mit „++“ (stark) angegeben.

Prozesse	Bereich A	Bereich B	Bereich C
Primäre Humifizierung	++	++	++
Primäre stoffliche Ein- und Austräge	++	++	++
Setzung	++	++	+
Befahrungsbedingte Effekte	++	++	+
Schrumpfung	++	++	
Sekundäre Humifizierung	++	+	
Mineralisierung	++	+	
Sekundäre stoffliche Ein- und Austräge	++	+	
Bioturbation	++		
Bodenbearbeitung	++		

Im Bereich A dominieren Aggregate mit unregelmäßigen Umrissen und nur wenigen oder schwach ausgeprägten glatten und glänzenden Oberflächenanteilen. Zu erwarten sind Krümel-, Rest-, Konglomerat-, Subpolyeder-, Bröckel-, Klumpen- oder Fragmentgefüge (Abb. 5.25). Selten bildet gequollenes Rest- oder Krümelgefüge eine kohärent wirkende Masse, deren Einzelbestandteile nur beim vorsichtigen Aufreißen mit der Hand sichtbar werden.

Einen Sonderfall stellen die Unterböden der Standorte dar, die historisch tiefer als etwa 25 cm bearbeitet wurden, wo es unter Umständen zur Ausbildung von Prismen- oder Polyedergefüge aus mechanisch durchmischtem Torf kommen kann. Solche Horizonte werden ebenfalls dem pedogenen Bereich A zugeordnet. Das entscheidende Kriterium für die Identifizierung des Bereichs A sind klare Anzeichen der mechanischen Störung des Substrats.

Typische Horizonte für den Bereich A sind Hv, Hm, Hg, Hp und rHp, inkl. der Sonderform rHp°Ha (siehe Tab. 5.2 in Kap. 5.6). Bereich A umfasst also alle Oberbodenhorizonte sekundär veränderter Moorböden (der Hn-Horizont ist deswegen ausgenommen) und die Unterbodenhorizonte mit Absonderungsgefüge aus gestörtem Substrat.

5.5.2. Bereich B

Tiefer in den Moorboden reichen die Effekte der Schrumpfung. Je tiefer ein Moorboden entwässert ist, desto tiefer reichen auch die entstehenden Schrumpfrisse in den Torf hinein. In mäßig bis stark entwässerten Moorböden ist unterhalb des Bereichs A fast immer ein zweiter recht eindeutig abgrenzbarer Bereich zu erkennen, in dem das Gefüge maßgeblich durch Schrumpfung und Quellung geprägt ist. Dieser hauptsächlich durch physikalische Prozesse geprägte Bereich wird Bereich B genannt.

Im Bereich B findet man typische Gefügestrukturen, die durch Absonderung aus dem kohärenten Grundgefüge hervorgegangen sind, also Riss-, Prismen-, Keil-, Polyeder- und Plattengefüge (Abb. 5.25). Die Gefügeelemente sind durch überwiegend glatte, oft deutlich bis stark glänzende Oberflächen und durch scharfe Kanten gekennzeichnet. Aus netzartigem oder faserigem Kohärentgefüge können aber auch Subpolyeder entstehen.

Was für Bereich B aber immer zutrifft, ist, dass das Substrat innerhalb der einzelnen Gefügeelemente in natürlicher Lagerung vorliegt. Nach diesem Kriterium kann man eine Verwechslung mit dem Bereich A vermeiden. Typische Horizonte

für Bereich B sind Ha, Ht und der Übergangshorizont Ha-Ht (siehe Tab. 5.2 in Kap. 5.6). Allgemein ausgedrückt, umfasst der Bereich B die Unterbodenhorizonte mit Absonderungsgefüge aus natürlich gelagertem Substrat.

5.5.3. Bereich C

In manchen Moorbodenprofilen kann auch ein Bereich erkannt werden, wo das Grundgefüge weder durch Bodenbearbeitung oder Bioturbation noch durch Schrumpfung verändert wurde. In naturnahen Moorböden trifft dies für das gesamte Profil zu. Im Fall der entwässerten tiefgründigen Moorböden kann man einen entsprechenden Bereich unterhalb der Bereiche A und/oder B finden. Dieser hauptsächlich primär geprägte Bereich wird hier als Bereich C bezeichnet.

Im Bereich C ist ausschließlich ungeteiltes, kohärentes Grundgefüge zu finden (Abb. 5.25), das

verschiedene Ausprägungsformen haben kann. Ein schwacher sekundärer Einfluss ist durch Setzung und durch intensive Befahrung möglich, was zu einer deutlichen Verdichtung des Substrats führen kann. In diesem Fall kann die schichtige Ausprägungsform des Kohärentgefüges auch ein sekundäres Merkmal sein. Typische Horizonte für Bereich C sind Hr, Hw und Hn (siehe Tab. 5.2 in Kap. 5.6). Unterhalb des Bereichs C befindet sich nur noch der mineralische Untergrund oder die Basismudde. Bereich C umfasst also alle Unter- und Oberbodenhorizonte mit echtem (primärem) Kohärentgefüge. Unter den Horizonten des Bereichs C können keine Horizonte mit Aggregatgefüge folgen. Ausnahmen von dieser Regel wären nur an wiedervernässten Standorten mit Torfneubildung über degradierten Torfschichten zu erwarten. Solche Standorte werden in der aktuellen Ausgabe des Feldbuches aber nicht behandelt.

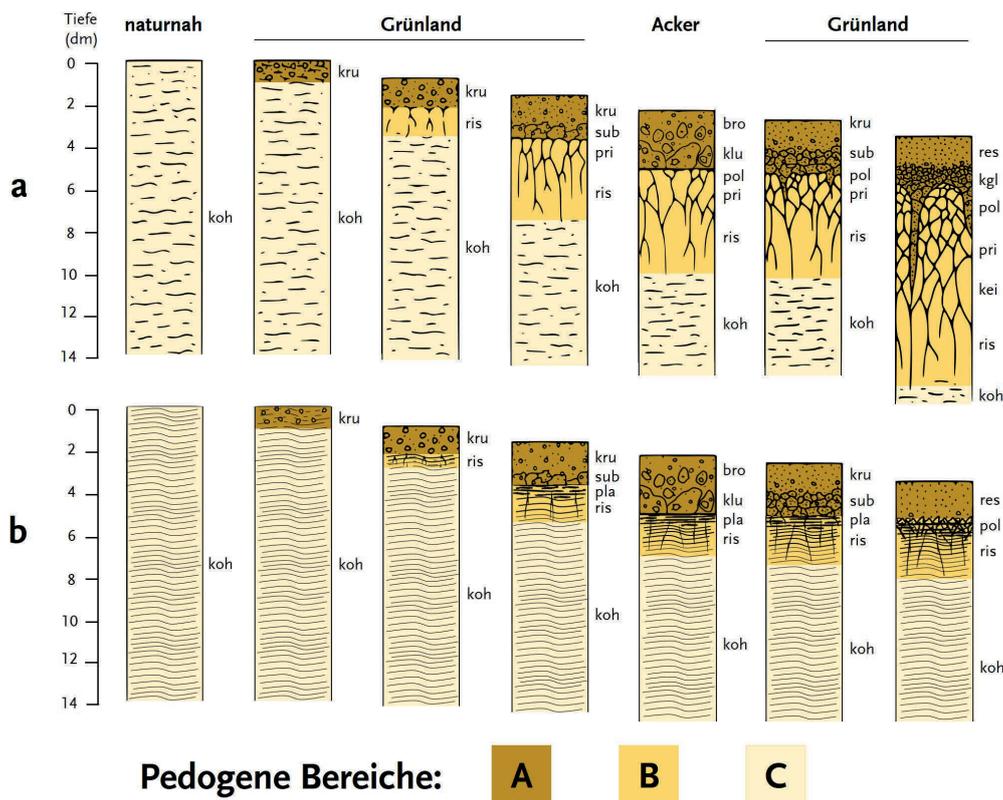


Abb. 5.25.: Entwicklung des Gefüges infolge der Entwässerung und der landwirtschaftlichen Nutzung a) in gut schrumpfungsfähigen Substraten (z.B. Radzellentorf, Schneidentorf oder stark zersetztem Sphagnotorf) und b) in schrumpfungsresistenten Substraten (z.B. schwach zersetztem Torfmoostorf, Braunmoostorf und rhizomreichem Schilftorf) (verändert nach Zeitz & Stegmann, 2001); bro = Bröckelgefüge, kei = Keilgefüge, kgl = Konglomeratgefüge, klu = Klumpengefüge, koh = Kohärentgefüge, kru = Krümelgefüge, pol = Polyedergefüge, pri = Prismengefüge, res = Restgefüge, ris = Rissgefüge, sub = Subpolyedergefüge.

5.6. Horizonte

Pedogene Bereiche können in vielen Fällen anhand der Substrat- und Gefügemerkmale weiter unterteilt werden. Wie bereits dargestellt, reichen verschiedene bodenbildende Prozesse unterschiedlich tief in den Boden hinein und führen dort zu spezifischen Änderungen in den Merkmalen des Substrats und des Gefüges. Das Überlagerungsmuster der Wirkungstiefen aller Prozesse organisiert den Boden in „meist oberflächenparallel verlaufenden Zonen mit mehr oder weniger einheitlichen Merkmalen und Eigenschaften“, die man Bodenhorizonte nennt (Ad-hoc-AG Boden, 2005, S. 81). Jeder pedogene Bereich besteht aus mindestens einem Horizont, wobei meistens mehrere übereinanderliegende Horizonte innerhalb eines pedogenen Bereichs erkennbar sind.

Moorbodenhorizonte werden hauptsächlich anhand der erkennbaren Merkmale des Substrats (z.B. Torfart und Humifizierungsgrad) und des Gefüges (z.B. Gefügestruktur und Aggregatgröße) angesprochen. Diese Eigenschaften lassen sich im Gelände entweder visuell oder haptisch untersuchen. Nur vereinzelt kann man den prägenden Einfluss eines bodenbildenden Prozesses und die damit verbundenen Eigenschaften

eines Horizontes weder visuell noch haptisch feststellen. Dies ist z.B. der Fall für den permanent wassergesättigten Bereich eines Moorbodens, der sich vom darüberliegenden Wasserschwankungsbereich anhand der Gefüge- und Substrateigenschaften nicht immer unterscheiden lässt. Oft kann man die im permanent nassen Bereich vorherrschenden reduzierenden Bedingungen nur olfaktorisch, durch die Anwesenheit von Schwefelwasserstoff (über den schwefeligen Geruch) identifizieren. Im weiteren Inhalt dieses Feldbuches wird deshalb immer wieder Bezug auf Merkmale genommen, die durch Sehen, Fühlen oder Riechen erkennbar sind.

Die Beziehung zwischen pedogenen Prozessen, Substrat- und Gefügemerkmalen, deren Rolle in der Horizontansprache und die Erkennbarkeit der Horizonte über verschiedene Sinnesindrücke werden in Abb. 5.26 dargestellt. Das Substrat wird sowohl von primären als auch von sekundären Prozessen geprägt, während die Eigenschaften des Gefüges an entwässerten Standorten vor allem von sekundären Prozessen bestimmt werden. Durch die Prägung der Substrateigenschaften nehmen aber auch primäre Prozesse einen gewissen Einfluss auf den Ablauf der sekundären Gefügebildung.

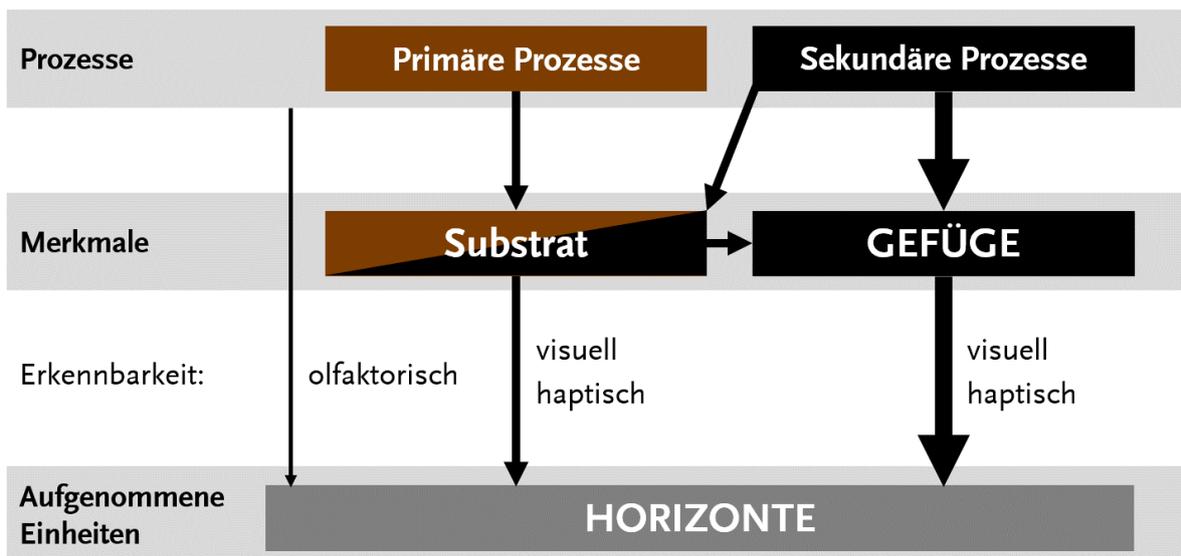


Abb. 5.26.: Schematische Darstellung der Beziehung zwischen bodenbildenden Prozessen und Substrat- bzw. Gefügemerkmalen in entwässerten Moorböden; erkennbare Substrat- und Gefügemerkmale sowie das Vorhandensein wichtiger Prozesse liefern Kriterien für die Horizontansprache im Gelände. Dabei nehmen Gefügemerkmale eine zentrale Rolle ein.

Für alle Bodenhorizonte legt die in der KA5 bzw. in der KA6 vorhandene Systematik ein Symbol (ein Kürzel) fest, das durch präzise Nomenklaturregeln bestimmt wird. Jede Horizontbezeichnung besteht aus einem Großbuchstaben (**Hauptsymbol**) und kann auch zusätzliche Kleinbuchstaben (**Zusatzsymbole**) enthalten. Nachgestellte Zusatzsymbole stehen für pedogene Merkmale, während vorangestellte Zusatzsymbole geogene und anthropogene Merkmale anzeigen. Im Fall der Moorböden werden die Merkmale des Substrats traditionell als geogen und Gefügemerkmale als pedogen behandelt. Da dem nachgestellten, pedogenen Zusatzsymbol eine größere Bedeutung in der Systematik zusteht, sind es die Gefügemerkmale, die in entwässerten Moorböden die wichtigste Rolle bei der Horizontansprache spielen.

Deswegen legt dieses Feldbuch einen besonderen Fokus auf die Gefügemerkmale.

Meistens wird ein Horizont über ein einziges pedogenes Merkmal definiert und entsprechend mit einem nachgestellten Zusatzsymbol versehen (= **Stammhorizont**). Es kommt aber auch durchaus vor, dass ein Horizont gleichzeitig mehrere relevante pedogene Merkmale aufweist. In solchen Fällen werden Begriffe wie „**Abweichungshorizont**“, „**Übergangshorizont**“, Horizont mit „**reliktischen**“ oder „**fossilen**“ Merkmalen und „**Verzahnungshorizont**“ verwendet (siehe kurze Definitionen in Kap. 4). Für diese Situationen gibt es komplexere Nomenklaturregeln, die in vollem Umfang der KA5 bzw. der KA6 zu entnehmen sind.

In diesem Feldbuch werden ausschließlich Torfhorizonte (Hauptsymbol = H) behandelt, und zwar diejenigen, die in stark organischen Moorböden am häufigsten vorkommen. Laut KA6 kann man nach pedogenen Merkmalen neun H-Horizonte unterscheiden, die jeweils durch ein eigenes nachgestelltes Zusatzsymbol definiert werden (neun Stammhorizonte). Die Unterscheidung zwischen Niedermoor- und Hochmoorsubstraten unterteilt die H-Horizonte weiter als „geogenes“ Merkmal. Ein vorangestelltes „n“ steht für Niedermoor und ein „h“ für Hochmoor.

In den Teilen D und E findet man jeweils 11 Steckbriefe für Niedermoor- bzw. Hochmoorhorizonte: jeweils neun Stammhorizonte, einen häufig vorkommenden Übergangsho-

rizont und einen häufig vorkommenden Horizont mit reliktischen Merkmalen (Tab. 5.2). Andere abgeleitete Varianten dieser Horizonte (z.B. Abweichungs-, Übergangs- oder Verzahnungshorizonte), die in stark organischen Moorböden üblich sind, werden auf den Steckbriefen zusätzlich angegeben. Für seltener auftretende Abweichungshorizonte, für Torfhorizonte mit einer deutlichen Anreicherung von Kalk, Eisenhydroxiden oder Salzen, für Muddehorizonte sowie für mineralische Horizonte findet man die Symbole an den entsprechenden Stellen in der KA5 bzw. der KA6.

Die Erkennung der Horizontgrenzen und die Horizontansprache werden nach der Bestimmung der pedogenen Bereiche durchgeführt. Für diese Schritte stehen die Methodensteckbriefe **ME-03** und **ME-04** im Teil B sowie die Bestimmungsschlüssel **NI-HZ** und **HO-HZ** in den Teilen D bzw. E zur Verfügung.

In einem Horizont können eine oder mehrere Gefügeformen nebeneinander auftreten. Man kann je nach Fragestellung entweder nur die dominante Gefügeform oder bis zu drei parallel vorkommende Gefügeformen in abnehmender Reihenfolge deren Anteils aufnehmen. Wenn verschiedene Gefügeformen auf unterschiedlichen räumlichen Skalen auftreten (z.B. grobe Prismen, die zu kleineren Polyedern zerfallen), werden die dominante Gefügeform und Aggregatgröße nach Ausführung des „Succow-Griffs“ am Flachschorfriegel bestimmt (Steckbrief **ME-01**). Für eine bessere Standardisierung der auf das Gefüge einwirkenden Kraft, wird zusätzlich eine Abwurfprobe empfohlen (Steckbrief **ME-05**).

Bei der Horizontansprache soll auch beachtet werden, dass die Definitionen der einzelnen Horizonte mehrere Möglichkeiten für dominante Gefügeformen und Aggregatgrößen, sowie verschiedene Torfarten und Humifizierungsgrade zulassen. So kann es dazu kommen, dass man zwei oder mehrere übereinanderliegende Schichten, die sich in diesen Merkmalen unterscheiden, mit dem gleichen Horizontsymbol versehen muss. In solchen Fällen werden übereinanderliegende Horizonte des gleichen Typs durchnummeriert. Zur Veranschaulichung werden hier einige Beispiele für den nHa-Horizont vorgestellt:

- a) nHa aus Polyedern über nHa aus Prismen
→ nHa1 über nHa2,

5. Bodenentwicklung in Mooren - theoretische Grundlagen für die Arbeit mit dem WIKIMooS-Feldbuch

- b) nHa aus Prismen gro6 über nHa aus Prismen gro7 → nHa1 über nHa2,
- c) nHa aus Polyedern gro5 über nHa aus Polyedern gro6 über nHa aus Prismen → nHa1 über nHa2 über nHa3,
- d) nHa aus Braunmoostorf über nHa aus Radzellentorf → nHa1 über nHa2,
- e) nHa aus Radzellentorf H7 über nHa aus Radzellentorf H5 → nHa1 über nHa2.

Tab. 5.2.: Übersicht der in den Teilen D und E beschriebenen Moorbodenhorizonte; die farbliche Unterlagerung der Felder entspricht den pedogenen Bereichen, in denen die jeweiligen Horizonte zu finden sind: A (braun), B (gelb) und C (beige).

Horizontsymbol		Benennung nach dem pedogenen Merkmal	Steckbrief		Oberboden/ Unterboden
Nieder-moor	Hoch-moor		Nieder-moor	Hoch-moor	
nHm	hHm	Vermulmungshorizont m von vermulmt	NI-01	HO-01	OB
nHv	hHv	Vererdungshorizont v von vererdet	NI-02	HO-02	OB
nHg	hHg	Reaggregationshorizont g von reaggregiert	NI-03	HO-03	OB
nHp	hHp	Pflughorizont p von gepflügt	NI-04	HO-04	OB
nrHp	hrHp	Reliktischer Pflughorizont	NI-05	HO-05	OB oder UB
nHa	hHa	Absonderungshorizont a von abgesondert	NI-06	HO-06	UB
nHt	hHt	Torfschrumpfungshorizont t von Torfschrumpfung	NI-07	HO-07	UB
nHa-nHt	hHa-hHt	Übergangshorizont Ha-Ht	NI-08	HO-08	UB
nHn	hHn	Torfneubildungshorizont n von neu	NI-09	HO-09	OB
nHw	hHw	Wassersechsselhorizont w von Wasser	NI-10	HO-10	OB oder UB
nHr	hHr	Reduktionshorizont r von reduziert	NI-11	HO-11	UB

5.7. Relevanz der Horizonte und der pedogenen Bereiche

Die Anwesenheit bestimmter Horizonte (= diagnostische Horizonte) und die Entstehung bestimmter Horizontabfolgen sind entscheidende

Kriterien der Bodensystematik. Somit stellen die Erkennung und die korrekte Ansprache von Horizonten die Grundlage für die Kartierung bodensystematischer Einheiten dar. Für die Praxis hat die sichere Durchführung von bodenkundlichen Aufnahmen ebenfalls eine große Bedeutung, da sich aus der Anwesenheit bestimmter Horizonte

und Horizontabfolgen auch auf chemische, physikalische (inkl. hydraulische) und biologische Eigenschaften der Böden an den untersuchten Standorten schließen lässt (Ad-hoc-AG Boden, 2005, S. 190). Dadurch ist die Horizontansprache für die Bewertung der Bodenfunktionen am Standort und für die Planung von Managementmaßnahmen relevant.

In diesem Kontext ist die Vorsortierung der Horizonte nach deren Zugehörigkeit zu den pedogenen Bereichen A, B und C nicht nur eine Unterstützung für die sichere Horizontansprache, sondern sie erlaubt auch eine erste Einschätzung zu erwartender Bodeneigenschaften im Gesamtprofil. Dies liegt daran, dass die chemischen und physikalischen Eigenschaften der Moorsubstrate in den drei pedogenen Bereichen durch jeweils charakteristische bodenbildende Prozesse nachhaltig verändert wurden. Zum Beispiel findet die Anreicherung von Nährstoffen und die schwerwiegendste Veränderung der Porenstruktur und der Trockenrohichte im Bereich A statt. In den Bereichen A und B sind die Substrate durch das Vorhandensein von Rissen vermehrt dem Sauerstoff ausgesetzt. Deswegen neigen sie stärker zur Mineralisierung und zur Freisetzung von Kohlenstoffdioxid. Weiterhin können vertikale Risse präferenzielle Sickerwege schaffen und auch die laterale Wasserbewegung durch den Torf beeinflussen. Auf der anderen Seite können horizontale Risse den kapillaren Aufstieg unterbrechen oder stauende Eigenschaften hervorrufen.

Diese Erkenntnisse können wertvoll für Entscheidungen im Moormanagement sein, sei es im Sinne der Konservierung wertvoller naturnaher Moore, der klimaangepassten Bewirtschaftung oder der Wiedervernässung und Renaturierung ehemals landwirtschaftlich genutzter Moorflächen.

6. Allgemeine Vorgehenweise bei der Arbeit mit dem Feldbuch

Im folgenden Teil des Feldbuches (Teil B) werden die Methoden vorgestellt, die der Ansprache von Moorbodenhorizonten im Gelände, der Aufnahme der dazugehörigen Gefügeformen und Aggregatgrößen und der Bestimmung des Humifizierungsgrades nach von Post dienen. Unterstützende Materialien für die Erkennung der Gefügeformen und die Bestimmung der Horizonte sind in den Teilen C (Gefügeformen), D (Niedermoor - Horizonte), E (Hochmoor - Horizonte) und F (Zusätzliche Bestimmungshilfen) enthalten. Die Anleitung für die Durchführung der Handquetschmethode nach von Post ist im Teil B (Steckbrief **ME-06**) zu finden.

Als Vorbereitung für die bodenkundliche Aufnahme im Gelände sollen der Teil B des Feldbuches gelesen und die Anleitungsvideos zu den Geländemethoden angeschaut werden. Anschließend sollte man die nötigen Geräte und Materialien vorbereiten (Steckbrief **ME-08**) und einen oder mehrere Standorte für die Aufnahmen auswählen (Steckbrief **ME-09**). Am Standort sind folgende Schritte zu befolgen:

1. **Grube anlegen und „Flachscurfriegel“ präparieren** (Steckbrief **ME-01**),
2. **entscheiden, ob es sich um einen Niedermoor- oder einen Hochmoorstandort handelt** (falls im Vorfeld nicht bekannt),

Hinweis: Hierfür kann man die Steckbriefe Moorsubstrate (Meier-Uhlherr et al., 2015) benutzen. Dieser erste Schritt ist wichtig, weil die Bestimmungsschlüssel für pedogene Bereiche und Horizonte sowie die Horizontsteckbriefe im WIKIMooS-Feldbuch für diese zwei Hauptmoortypen getrennt angeboten werden.

3. **pedogene Bereiche erkennen und bestimmen** (Steckbriefe **ME-02**, **NI-PB** und **HO-PB**),
4. **Horizontgrenzen erkennen** (Steckbrief **ME-03**),
5. **Horizonte bestimmen, Gefüge- und Substratmerkmale am Flachscurfriegel aufnehmen** (Steckbriefe **ME-04**, **NI-HZ**, **HO-HZ**),
Hinweis: Unterstützung für die Bestimmung der Torf- und Muddearten und für die Unterscheidung vererdeten und vermulmten Torfes findet man in Meier-Uhlherr et al., 2015. Außerdem sind detaillierte Informationen über die Erkennbarkeit pflanzlicher Strukturen in unterschiedlich stark humifizierten Torfen in Caspers (2010) enthalten.
6. **ggf. Bohrung durchführen, um tiefer liegende Horizonte bestimmen und deren Merkmale aufnehmen zu können** (Steckbriefe **ME-07**, **NI-HZ**, **HO-HZ**).

7. Quellen

Ad-hoc-AG Boden (2005). *Bodenkundliche Kartieranleitung* (5. Auflage). Hannover, 438 S.

Ad-hoc-AG Boden (in Vorbereitung). *Bodenkundliche Kartieranleitung* (6. Auflage), Entwurf vom 05.10.2022.

Amelung, W., Blume, H.-P., Fleige, H., Horn, R., Kandeler, E., Kögel-Knabner, I., Kretschmar, R., Stahr, K. & Wilke, B.-M. (2018a). Organische Bodensubstanz. In *Scheffer/Schachtschabel Lehrbuch der Bodenkunde* (17. Auflage, S. 63-102). Springer Spektrum, Berlin Heidelberg, 750 S.

Amelung, W., Blume, H.-P., Fleige, H., Horn, R., Kandeler, E., Kögel-Knabner, I., Kretschmar, R., Stahr, K. & Wilke, B.-M. (2018b). Physikalische Eigenschaften und Prozesse. In *Scheffer/Schachtschabel Lehrbuch der Bodenkunde* (17. Auflage, S. 213-340). Springer Spektrum, Berlin Heidelberg, 750 S.

Averdieck, F.-R., Hayen, H. & Willkomm, H. (1990). Der Entwicklungsgang im zeitlichen Ablauf. In K. Göttlich (Hrsg.), *Moor- und Torfkunde* (3. Auflage, S. 114-174). E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 530 S.

Becher, H.H. (2000). Gefüge/Morphologie. In H.-P. Blume, P. Felix-Henningsen, W.R. Fischer., H.-G. Frede, R. Horn, & K. Stahr (Hrsg.) (1996 ff.), *Handbuch der Bodenkunde* (Loseblattsammlung). Ecomed, Landsberg.

Caspers, G. (2010). Die Unterscheidung von Torfarten in der bodenkundlichen und geologischen Kartierung. *Telma* 40 (S. 33-66). Hannover. <https://e-docs.geo-leo.de/handle/11858/7317>

Göttlich, K. & Kuntze, H. (1990). Moorkultivierung für Land- und Fortwirtschaft. In K. Göttlich (Hrsg.), *Moor- und Torfkunde* (3. Auflage, S. 385-410). E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 530 S.

Grosse-Brauckmann, G. & Puffe, D. (1964). Untersuchungen an Torf-Dünnschnitten aus einem Moorprofil vom Teufelsmoor bei Bremen. In A. Jongerius (Hrsg.), *Soil micromorphology. – Proc.*

2nd international working-meeting on soil micromorphology, Arnhem, The Netherlands (S. 83–93), Amsterdam.

Grosse-Brauckmann, G., Hacker, E. & Tüxen, J. (1977). Moore in der bodenkundlichen Kartierung. *Telma* 7 (S. 39-54). Hannover.

Hickisch, B. (1989). Bodengefüge (Bodenstruktur) und gefügeabhängige mechanische Bodeneigenschaften. In G. Müller (Hrsg.), *Pflanzenproduktion Bodenkunde* (3. Auflage, S. 180-208). VEB Deutscher Landwirtschaftsverlag, Berlin, 380 S.

Illner, K., Lehrkamp, H., Rohde, S. & Sauerbrey, L. (1980). Die Bodenformen der landwirtschaftlich genutzten Niedermoore in der DDR und ihre Standorteigenschaften. *Lehrbrief Hochschulstudium Pflanzenproduktion*. Humboldt-Universität zu Berlin, Berlin, 100 S.

Koppisch, D. (2001). Torfbildung. In M. Succow, & H. Joosten (Hrsg.), *Landschaftsökologische Moorkunde* (2. Auflage, S. 8-17). E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 622 S.

Kuntze, H. (1981). Bodeneigenschaften. In H. Kuntze, J. Niemann, G. Roeschmann & G. Schwerdtfeger (Hrsg.), *Bodenkunde* (2. Auflage, S. 114-263). Ulmer, Stuttgart, 407 S.

Meier-Uhlherr, R., Schulz, C. & Luthardt, V. (2015). *Steckbriefe Moorsubstrate* (2. Auflage). Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde (Hrsg.), Berlin, 154 S. <https://e-docs.geo-leo.de/handle/11858/8054>

Nievergelt, J., Petrasek, M. & Weisskopf, P. (2002). *Bodengefüge: Ansprechen und Beurteilen mit visuellen Mitteln*. Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau (FAL), Zürich, 93 S.

Puffe, D. & Grosse-Brauckmann, G. (1963). Mikromorphologische Untersuchungen an Torfen. Zur Frage der Zersetzung oberflächennaher Hochmoortorfe unter Grünland. *Zeitschrift für Kulturtechnik und Flurbereinigung* 4(3) (S. 159–188). Berlin.

Rochus, W. & Sipos, S. (1976). Niedermoore unterschiedlichen Zersetzungsgrades und ihre Huminstoffkomplexe. *Telma* 6 (S. 179-189). Hannover.

7. Quellen

- Shepherd, T.G. (2000). *Visual Soil Assessment. Volume 1. Field guide for cropping and pastoral grazing on flat to rolling country.* horizons.mw & Landcare Research, Palmerston North, 84p.
- Stegmann, H. & Zeitz, J. (2001). Bodenbildende Prozesse entwässerter Moore. In Succow, M. & Joosten, H. (Hrsg.). *Landschaftsökologische Moorkunde* (2. Auflage, S. 47-57). E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 622 S.
- Succow, M., Stegmann, H., Koska, I., Timmermann, T., Edom, F., Couwenberg, J., de Klerk, P., Endtmann, E., Joosten, H. & Michaelis, D. (2001). Genese und Aufbau der Moore an Beispielen Ostdeutschlands. In M. Succow, & H. Joosten (Hrsg.), *Landschaftsökologische Moorkunde* (2. Auflage, S. 317-403). E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 622 S.
- Tiemeyer, B., Bechtold, M., Belting, S., Freibauer, A., Förster, C., Schubert, E., Dettmann, U., Frank, S., Fuchs, D., Gelbrecht, J., Jeuther, B., Laggner, A., Rosinski, E., Leiber-Sauheitl, K., Sachteleben, J., Zak, D. & Drösler, M. (2017). Moorschutz in Deutschland – Optimierung des Moormanagements in Hinblick auf den Schutz der Biodiversität und der Ökosystemleistungen. *BfN Skripten*, 462, Bundesamt für Naturschutz, Bonn, 320 S.
- von Post, L. (1924). Das genetische System der organogenen Bildungen Schwedens. *Comité international de Pédologie, IVème commission pour l'Europe*, Communication 22 (S. 287-304).
- Wojahn, E. & Schmidt, W. (1987). Ergebnisse und Probleme der landwirtschaftlichen Moornutzung in der DDR. *Internationales Symposium zum Thema „Bodenentwicklung auf Niedermoor und Konsequenzen für die landwirtschaftliche Nutzung“* Bd. 1 (S. 3-47).
- Zeitz, J. (2003). Moorkulturen. In H.-P. Blume, P. Felix-Henningsen, W.R. Fischer., H.-G. Frede, R. Horn, & K. Stahr (Hrsg.) (1996 ff.), *Handbuch der Bodenkunde* (Loseblattsammlung). Ecomed, Landsberg.
- Zeitz, J. & Möller, D. (2018). Landschaftsökologische Moortypen. In V. Luthardt & J. Zeitz (Hrsg.), *Moore im Brandenburg und Berlin* (2. Auflage, S. 41-51). Natur+Text, Rangsdorf, 384 S.
- Zeitz, J. & Stegmann, H. (2001). Moorbodenhorizonte und -typen. In Succow, M. Joosten, H. (Hrsg.). *Landschaftsökologische Moorkunde* (2. Auflage, S. 69-74). E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 622 S.

