

Frank, Stefan et al.

Working Paper

Methodenhandbuch zu den Gelände- und Laborarbeiten für den Aufbau des deutschlandweiten Moorbodenmonitorings für den Klimaschutz (MoMoK) - Teil 1: Offenland, Version 1.0

Thünen Working Paper, No. 199

Provided in Cooperation with:

Johann Heinrich von Thünen Institute, Federal Research Institute for Rural Areas, Forestry and Fisheries

Suggested Citation: Frank, Stefan et al. (2022) : Methodenhandbuch zu den Gelände- und Laborarbeiten für den Aufbau des deutschlandweiten Moorbodenmonitorings für den Klimaschutz (MoMoK) - Teil 1: Offenland, Version 1.0, Thünen Working Paper, No. 199, Johann Heinrich von Thünen-Institut, Braunschweig,
<https://doi.org/10.3220/WP1661764883000>

This Version is available at:

<https://hdl.handle.net/10419/265494>

Standard-Nutzungsbedingungen:

Die Dokumente auf EconStor dürfen zu eigenen wissenschaftlichen Zwecken und zum Privatgebrauch gespeichert und kopiert werden.

Sie dürfen die Dokumente nicht für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, öffentlich zugänglich machen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

Sofern die Verfasser die Dokumente unter Open-Content-Lizenzen (insbesondere CC-Lizenzen) zur Verfügung gestellt haben sollten, gelten abweichend von diesen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Terms of use:

Documents in EconStor may be saved and copied for your personal and scholarly purposes.

You are not to copy documents for public or commercial purposes, to exhibit the documents publicly, to make them publicly available on the internet, or to distribute or otherwise use the documents in public.

If the documents have been made available under an Open Content Licence (especially Creative Commons Licences), you may exercise further usage rights as specified in the indicated licence.

Methodenhandbuch zu den Gelände- und Laborarbeiten für den Aufbau des deutschlandweiten Moorbodenmonitorings für den Klimaschutz (MoMoK) – Teil 1: Offenland

Version 1.0

**Stefan Frank, Ullrich Dettmann, Arne Heidkamp, Arndt Piayda, Willi
Oehmke, Bärbel Tiemeyer**

Thünen Working Paper 199

Dr. Stefan Frank
Dr.-Ing. Ullrich Dettmann
Dr. Arndt Piayda
Dr. Arne Heidkamp
MSc. Willi Oehmke
Dr.-Ing. Bärbel Tiemeyer

Thünen-Institut für Agrarklimaschutz
Bundesallee 65
38116 Braunschweig

Tel.: 0531-596 2621
E-Mail: stefan.frank@thuenen.de

Thünen Working Paper 199

Braunschweig/Germany, September 2022

Inhalt

Abbildungsverzeichnis	5
Tabellenverzeichnis	6
Zusammenfassung	7
Abstract	8
1 Einleitung	9
1.1 Hintergrund und Ziele	9
1.2 Organische Böden im Sinne des Moorbodenmonitorings	10
1.3 Untersuchungskonzept	12
2 Untersuchungsfläche	13
3 Ablauf der Arbeiten	15
4 Vorarbeiten	17
4.1 Vorerkundung	17
4.2 Vorbereitung der Standorteinrichtung	18
5 Boden	20
5.1 Beprobungspunkte	20
5.1.1 Probenahmegeräte	21
5.1.2 Position der Beprobungspunkte	29
5.1.3 Auswahl des geeigneten Probenahmegerätes	30
5.1.4 Durchführung	33
5.2 Moormächtigkeit	34
5.3 Profilgrube	35
5.3.1 Position der Profilgrube	35
5.3.2 Durchführung	35
5.3.3 Bodenansprache	37
5.3.4 Probenahme	39
6 Hydrologie	41
6.1 Moorpegel (Moorwasserstandsmessstellen)	42
6.1.1 Position des Moorpegels	42
6.1.2 Einbauvarianten	42
6.1.3 Installation	46
6.2 Grundwasserstandsmessstelle	46
6.3 Grabenpegel	46
6.3.1 Position der Grabenpegel	47
6.3.2 Installation und Einbauvarianten	47
6.4 Pegeldatenlogger	48
6.5 Gesättigte hydraulische Leitfähigkeit (Gelände)	49
6.5.1 Position der Messpunkte	49
6.5.2 Versuchsdurchführung	50
7 Geländehöhen	53

7.1	Fixpunkt für die Höhenvermessung	53
7.1.1	Position des Fixpunktes	54
7.1.2	Installationen	54
7.2	Höhenvermessung mittels Tachymeter oder Nivelliergerät	55
7.2.1	Höhenvermessung der Untersuchungsfläche	55
7.2.2	Höhenvermessung weiterer Punkte auf der Untersuchungsfläche	57
7.3	Kontinuierliche Messung der Geländehöhen (Seilzugsensoren)	58
7.3.1	Position und Installation des Seilzugsensors	59
8	Vegetation	60
8.1	Dauerbeobachtungsflächen	61
8.2	Gesamtfläche: Erfassung und Dokumentation der Biotoptypen	61
8.3	Fotodokumentation der Vegetationsentwicklung	61
9	Vermarkung und GNSS-Messungen	61
10	Fotodokumentation der Standorteinrichtung	62
11	Wiederkehrende Geländearbeiten	63
11.1	Regelmäßig wiederkehrende Tätigkeiten	63
11.2	Tätigkeiten nach der Aufbauphase des Moorbodenmonitorings	64
12	Probenlagerung und Laboruntersuchungen	65
12.1	Probenlagerung	65
12.2	Übersicht über Probenarten und Laborprozesse	65
12.3	Moorbodenphysikalische Analysen an ungestörten Stechzylinderproben	67
12.3.1	Gesättigte hydraulische Leitfähigkeit (Labor)	67
12.3.2	Bodenhydraulische Eigenschaften	67
12.3.3	Trockenrohdichte (Stechzylinder)	68
12.3.4	Porosität	69
12.4	Bodenchemische und -physikalische Analysen an gestörten Proben und Proben der Beprobungspunkte	69
12.4.1	Probenaufbereitung	69
12.4.2	Wassergehalt (feldfrisch und ofentrocken)	70
12.4.3	pH-Wert (H ₂ O und CaCl ₂)	71
12.4.4	Phosphor, Mangan und Eisen im Dithionit-Extrakt (reduziert)	71
12.4.5	Phosphor, Kalium und Eisen im CAL-Extrakt	71
12.4.6	Kohlenstoff- und Stickstoffgehalt	72
12.4.7	Glühverlust	73
12.4.8	Texturanalyse	73
12.4.9	Trockenrohdichte (Beprobungspunkte)	73
	Dank	74
	Literaturverzeichnis	75
	Anhang	81

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Schematische Übersicht der Positionen der auf einer Untersuchungsfläche durchzuführenden Arbeiten sowie zu installierenden Messtechnik.....	14
Abbildung 2:	Vorschlag eines Arbeitsablaufs zur Einrichtung einer Untersuchungsfläche	17
Abbildung 3:	Positionierung des Moorpegels auf entwässerten Untersuchungsflächen.....	20
Abbildung 4:	Ein Meter langer a) Stechbohrer, b) mit Verlängerung und Griff und c) mit Bodenprobe.....	22
Abbildung 5:	a) geöffnete Klappsonde, b) geschlossene Klappsonde, c) Klappsonde mit Bodenprobe, d) und e) Verschlussmechanismus für Verlängerungsstangen und f) Klappsonde mit Verlängerungen und Griff	23
Abbildung 6:	a) Rammkernsonde (Schlauchsonde) mit Hülse und Schlauch, b) Elektrohammer, c) Ziehhilfe und d) Bohrkern	24
Abbildung 7:	Wardenaar-Profilstecher a) arretiert, b) Arretierung gelöst, c) oben geöffnet, d) komplett geöffnet und e) mit einer Torfprobe	24
Abbildung 8:	a) Vertikale Beprobung des obersten Horizontes mittels Stechzylinder, b) Ausgraben der eingeschlagenen Stechzylinder und c) Säuberung der entnommenen Stechzylinder	25
Abbildung 9:	Schematische Darstellung der Beprobung mit a) Stechbohrer, b) Klappsonde und c) Stechzylinder	26
Abbildung 10:	Edelman-Bohrer (Flügelbohrer) a) ohne und b) mit Torf-Probe.....	27
Abbildung 11:	a) Entnahme eines Torfblockes auf einer wiedervernässten Fläche mit Hilfe eines Messers und b) entnommener Torfblock	27
Abbildung 12:	a) Sediment-Probennehmer (Plexiglasrohr) mit Stopfen und Stempel, b) Probe mit überschüssigem Wasser und c) Muddeprobe	28
Abbildung 13:	Schematische Darstellung der Beprobung rezenter Mudden mit dem Sediment-Probennehmer	29
Abbildung 14:	Schematische Darstellung der vier Bohrungen eines Bohrclusters an Treposol-Standorten.....	30
Abbildung 15:	Entscheidungsbaum zur Auswahl des geeigneten Probenahmegeräts.....	32
Abbildung 16:	a) Horizontabgrenzung innerhalb des ersten Meters einer mit dem Stechbohrer entnommenen Probe und b) Überführung der Probe aus dem Stechbohrer in eine Plastiktüte	33
Abbildung 17:	Moorpeilstange mit beweglichem Griff und konisch zulaufender Spitze.....	35
Abbildung 18:	Anlage der Profilgrube.....	37
Abbildung 19:	Schematische Darstellung der Unterteilung des R-Horizontes von Treposolen in einen oberen und unteren sowie in einen alten (ehemals unten liegende Torfe) und einen jungen (ehemals oben liegende Torfe) Bereich	38
Abbildung 20:	Beprobung des Bodenprofils in Abhängigkeit von Standortbedingungen und Tiefe der Moor-Mineralbodengrenze	39

Abbildung 21:	Moorwasserstand und Grundwasserstand (piezometrische Druckhöhe) bei gespannten Grundwasserverhältnissen	41
Abbildung 22:	Pegeltypen: a) über Flur verbauter Moorpegel, b) unter Flur verbauter Moorpegel und c) Doppelpegel (Pegel- und Filtertiefe dargestellt für geohydrologische Situation „Moor- entspricht Grundwasserstand“, nicht maßstabsgetreu).....	43
Abbildung 23:	Vergleich der Moorwasserstände zwischen eines über Flur und unter Flur installierten Moorpegels.....	44
Abbildung 24:	Schematische Darstellung des Einbaus von Moorpegeln bei verschiedenen geohydrologischen Bedingungen und Schichtaufbauten (nicht maßstabsgetreu)	45
Abbildung 25:	Schematische Darstellung verschiedener Optionen für Grabenpegel: a) Torfschichten an der Grabensohle und b) Mineralboden an der Grabensohle und direkter Kontakt zum Grundwasser (nicht maßstabsgetreu)	48
Abbildung 26:	Palstek-Knoten mit fester Schlaufe	49
Abbildung 27:	Optionen zur Messung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit bei unterschiedlichen Kombinationen von Moorwasserständen und unterschiedlich leitfähigen Schichten.....	51
Abbildung 28:	Mit Standardfilterrohr, ohne Rohr und einem Rohr nach Baird et al. (2004) bestimmte gesättigte hydraulische Leitfähigkeit (K_s) (Schwarztorf).....	53
Abbildung 29:	Schematische Darstellung des Aufbaus und Einbaus des Fixpunktes für die Höhenmessungen	54
Abbildung 30:	Median $\pm$ Standardfehler des Medians der Geländehöhen von drei Untersuchungsflächen mit unterschiedlicher Landnutzung in Abhängigkeit von der Punktzahl des Vermessungsrasters	57
Abbildung 31:	Beispiele und Nomenklatur für die Vermessung des Grabenquerschnitts für Gräben mit a) einer Böschungskante und b) mehreren Böschungskanten	58
Abbildung 32:	An der Fixstange installierter Seilzugsensor mit Rasengitterstein und Aluminiumblock	59
Abbildung 33:	Schematische Darstellung eines auf einer Untersuchungsfläche mit ausgeprägtem Mikrorelief installierten Seilzugsensors.....	60
Abbildung 34:	Übersicht über Probenarten, Probenaufbereitung und jeweils gemessene bodenchemische (H_2O : Wasser, $CaCl_2$: Kalziumchlorid, C_{org} : organischer Kohlenstoff, C_{anorg} : anorganischer Kohlenstoff, C_t : gesamt Kohlenstoff, N_t : Gesamtstickstoff, Fe: Eisen, P: Phosphor, Mn: Mangan, K: Kalium, CAL: Calcium-Acetat-Lactat, DI: Dithionit) und bodenphysikalische Kenngrößen sowie der Art der Rückstellprobe	66

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Übersicht über den Zeitaufwand für die durchzuführenden Arbeiten. GNSS = Globales Navigationssatellitensystem	16
Tabelle 2:	Wiederkehrende Geländearbeiten	64

Zusammenfassung

Moor- und weitere organische Böden speichern große Mengen an organischem Bodenkohlenstoff, die bei Entwässerung als Kohlendioxid (CO₂) freigesetzt werden. Da in Deutschland ein Großteil dieser Böden entwässert ist, tragen sie nach derzeitigen Berechnungen mit 54 Mio. t CO₂-Äquivalenten pro Jahr 7,5% zu den gesamten deutschen Treibhausgasemissionen bei. Zunehmende Anstrengungen bei der Umsetzung von Minderungsmaßnahmen erfordern sowohl adäquate Methoden in der Emissionsberichterstattung als auch ein konsistentes Monitoring. Das Projekt „Aufbau eines deutschlandweiten Moorbodenmonitorings für den Klimaschutz (MoMoK) – Teil 1: Offenland“ (2020 bis 2025) stellt sich der Herausforderung, ein langfristiges deutschlandweites repräsentatives Monitoringnetz für Moorböden aufzubauen. Dieses Messnetz wird ca. 200 Standorte umfassen. Dabei werden sowohl Standorte unter entwässerungsbasierter landwirtschaftlicher Nutzung als auch naturnahe Standorte und wiedervernässte ungenutzte oder als Paludikultur genutzte Moor- und weitere organische Böden untersucht.

Eine Langzeitmessung von Treibhausgasflüssen ist nur an wenigen Standorten möglich. Entsprechend fokussiert das Moorbodenmonitoring auf die Erfassung von Geländehöhen, da Geländehöhenänderungen als Proxy für Änderungen der Vorräte an organischem Bodenkohlenstoff dienen können. Daneben wird an allen Standorten der Vorrat an organischem Bodenkohlenstoff gemessen, um die Grundlage für eine mögliche Wiederholungsinventur zu legen. Standorte anderer Monitoringprogramme (Langzeitmessstandorte für Treibhausgase, Bodendauerbeobachtung) werden nach Möglichkeit eingebunden. Das hier vorgelegte Methodenhandbuch beschreibt das generelle Messdesign des Moorbodenmonitorings, das Vorgehen für die Einrichtung von Untersuchungsflächen, die Probenahme im Gelände und die Labormethoden. Aufgenommene Größen umfassen Geländehöhen (jährliche Erfassung der gesamten Untersuchungsfläche und kontinuierliche Aufnahme an deren Zentralpunkt), Gesamtvräte an organischem Bodenkohlenstoff und Stickstoff, horizontbezogene bodenchemische und -physikalische Eigenschaften, Moor- und Oberflächenwasserstände sowie die Vegetation und Bewirtschaftung. Neben praktischen Anleitungen wird der wissenschaftliche Hintergrund für methodische Entscheidungen erläutert.

Parallel zum Aufbau des Messnetzes werden die derzeit in der Emissionsberichterstattung genutzten Regionalisierungsansätze für Treibhausgasemissionen bzw. deren Steuergrößen verbessert. Dies umfasst die Aktualisierung der Kulisse organischer Böden, die Verbesserung der Regionalisierung der Moorbodenwasserstände und die Ableitung der Treibhausgasemissionen. Diese Arbeiten sind jedoch nicht Teil des Methodenhandbuchs.

Ziel des Methodenhandbuchs ist es, die im Rahmen des Moorbodenmonitorings (Teil 1: Offenland) im Gelände und Labor angewandten Methoden umfassend und transparent zu dokumentieren. Daneben sollen diese detaillierten Informationen, Anleitungen und Protokolle all jenen als Anregung zur Verfügung stehen, die ein Monitoring von Moorstandorten planen oder einzelne Größen konsistent zum Moorbodenmonitoring aufnehmen möchten.

Stichworte: Moorböden, Organische Böden, Sackung, Bodeneigenschaften, Bodenkohlenstoffvorräte, Hydrologie, Monitoring

Abstract

Peat and further organic soils store large amounts of soil organic carbon, which is released as carbon dioxide (CO₂) upon drainage. In Germany, most of these soils are drained, and they thus contribute with 54 Mio. t CO₂-equivalents per year 7.5% to the total German greenhouse gas emissions. Increasing efforts in implementing mitigation measures call for both adequate methods in emission reporting and consistent monitoring. The project “Establishment of a German peatland monitoring programme for climate protection (MoMoK) – Part 1: Open land” (2020-2025) rises to the challenge of building a long-term representative monitoring network for peatlands all over Germany. This network will comprise around 200 sites. It encompasses drained grassland and cropland, paludiculture as well as unutilized semi-natural and rewetted sites.

As long-term monitoring of greenhouse gas exchange will only be feasible at a few sites, the peatland monitoring programme focusses on the measurement of soil motion, which may be used as proxy for changes in the stocks of soil organic carbon. Beside soil motion, total stocks of organic carbon are determined at all sites as a baseline for possible future inventories. Sites of other monitoring programmes (long-term greenhouse gas flux sites, soil monitoring) are integrated into the network wherever possible. This handbook describes the general design of the peatland monitoring programme, the site setup and field sampling as well as laboratory methods. The monitoring programme collects data on surface heights (annual survey of the monitoring sites, continuous point measurements of surface motion), total soil organic carbon and nitrogen stocks, soil chemical and physical properties of the individual soil horizons, peat and surface water levels as well as on vegetation and management. Besides giving practical guidance, the handbook explains the scientific background of methodological choices.

Parallel to the establishment of the monitoring network, the regionalisation methods for greenhouse gasses and their drivers as currently used in emission reporting are improved. This comprises an update of the map of organic soils as well as the improvement of the regionalisation of water table depths in organic soils and of the greenhouse gas emissions. These parts of the project, however, are not part of this handbook.

With the publication of the handbook, we aim at a comprehensive and transparent documentation of the field and laboratory methods of the German peatland monitoring programme (Part 1: Open land). Furthermore, these detailed information, guidelines and protocols are available as inspiration to anyone who is planning monitoring of peatlands or wishes to measure single parameters consistently to the peatland monitoring programme.

Keywords: peatlands, organic soils, subsidence, soil properties, soil organic carbon stocks, hydrology, monitoring

1 Einleitung

1.1 Hintergrund und Ziele

Moor- und weitere organische Böden besitzen auf Grund ihres hohen und vulnerablen Vorrats an organischem Bodenkohlenstoff eine besondere Bedeutung für den Klimaschutz. Entwässerung führt zu einer Freisetzung von Kohlendioxid (CO₂) (Evans et al., 2021a; Moore und Knowles, 1998; Tiemeyer et al., 2020). Da die organischen Böden in Deutschland größtenteils entwässert sind, stellen sie mit ca. 54 Mio. t CO₂-Äquivalenten pro Jahr (zu 89% CO₂) bzw. 7,5% der gesamten deutschen Treibhausgasemissionen eine starke Quelle dar (UBA, 2022). Die Emissionen werden in den Sektoren „Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft“ (LULUCF) und „Landwirtschaft“ berichtet. Die Ermittlung der Emissionen von Treibhausgasen (THG) aus organischen Böden im Rahmen der jährlichen Emissionsberichterstattung lehnt sich derzeit an die in Tiemeyer et al. (2020) veröffentlichte Methodik an. Wichtige Grundlagen sind hierbei die Karte der organischen Böden (Roßkopf et al., 2015), die Landnutzung nach ATKIS®Basis-DLM (AdV, 2019), die regionalisierten Grundwasserflurabstände in organischen Böden nach Bechtold et al. (2014) sowie die Abhängigkeit der THG-Emissionen von Grundwasserflurabständen und Landnutzungskategorie (Tiemeyer et al., 2020).

Zunehmende Anstrengungen bei der Umsetzung von Minderungsmaßnahmen erfordern sowohl adäquate Methoden in der Emissionsberichterstattung als auch ein konsistentes Monitoring. Beispielsweise nennt die Bund-Länder-Zielvereinbarung zum Klimaschutz durch Moorbodenschutz (Bund und Länder, 2021) nicht nur ein konkretes Minderungsziel (-5 Mio. t CO₂-Äquivalente pro Jahr bis 2030), sondern hat u.a. auch die Verbesserung der Datengrundlagen zum Ziel. Dabei wird explizit ein „bundesweit einheitliches Monitoring von organischen Böden“ genannt.

Das Thünen-Institut für Agrarklimaschutz wurde durch das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft mit dem „Aufbau eines deutschlandweiten Moorbodenmonitorings für den Klimaschutz (MoMoK) – Teil 1: Offenland“ (Laufzeit: 2020 bis 2025) beauftragt. Parallel dazu arbeitet das Thünen-Institut für Waldökosysteme am „Aufbau eines deutschlandweiten Moorbodenmonitoring für den Klimaschutz – Teil 2: Wald“. Übergeordnete Ziele sind der Aufbau eines langfristigen Moorbodenmonitoring-Netzwerks und die parallele Verbesserung der Regionalisierungsmethoden für die Emissionsberichterstattung.

Im Rahmen von großen Verbundprojekten wurden an mehr als 100 Standorten mit (weitgehend) einheitlichen Methoden THG-Flüsse über zumeist ein bis vier Jahre gemessen (Tiemeyer et al., 2020). Dieser Wissens- und Datenstand wird durch Forschungsprojekte zu spezifischen Fragestellungen kontinuierlich erweitert. Ein einheitliches und repräsentatives Monitoring für organische Böden zur langfristigen Bewertung ihres Zustands und ihrer Klimawirksamkeit besteht in Deutschland bisher jedoch nicht, wird aber sowohl für die Abschätzung von Trends, als Grundlage für die Emissionsberichterstattung und für die Bewertung von Minderungsmaßnahmen zunehmend wichtiger. Das Projekt MoMoK wird diese Lücke schließen. Dabei werden ca. 200 Monitoringstandorte im Offenland mit einem Fokus auf abiotische Parameter (Geländehöhen, Bodeneigenschaften, Wasserstände) und auf die Ableitung von Änderungen in den Vorräten an organischem Bodenkohlenstoff eingerichtet. Die Methodik soll anschlussfähig für und an weitere Monitoringprogramme sein, d.h. sich mit Langzeitmessungen von Treibhausgasen wie z.B. ICOS (Integrated Carbon Observation System) oder Bodendauerbeobachtungsflächen kombinieren lassen.

Änderungen in den Vorräten an organischem Bodenkohlenstoff können über Messungen der CO₂-Flüsse (sowie der Emissionen von Methan) mittels Haubentechnik (Tiemeyer et al., 2016) oder Eddy-Kovarianzmethode (Evans et al., 2021a), über die Bestimmung von Vorratsänderungen im Rahmen von Wiederholungsinventuren (z.B. Simola et al., 2012) oder über eine Ableitung aus den Geländehöhenänderungen (z.B. Weinzierl und Waldmann, 2015) ermittelt werden. Die Langzeitmessung von THG-Flüssen ist aufgrund der hohen Genauigkeit und der Prozessverständnis ermöglichenden hohen zeitlichen Auflösung weiterhin unverzichtbar. Aufgrund des hohen personellen und technischen Aufwands kann dies jedoch nur an ausgewählten Standorten – und nicht im Rahmen

des Moorbodenmonitorings selbst – realisiert werden. Für eine Abdeckung aller relevanter Kombinationen von Landnutzung und Moorbodentyp greift das Moorbodenmonitoring daher auf eine Messung der Geländehöhen auf verschiedenen räumlichen und zeitlichen Skalenebenen zurück. Da sich sowohl physikalische als auch biologische Prozesse in Geländehöhenänderungen manifestieren, müssen auch Steuergrößen wie Bodeneigenschaften und Moorwasserstände erfasst werden. Diese gehen gleichzeitig in die Verbesserung der Regionalisierungsansätze ein. Daneben wird an allen Standorten der Vorrat an organischem Bodenkohlenstoff gemessen, um die Grundlage für eine mögliche Wiederholungsinventur zu legen.

Eine große Herausforderung sowohl bei Geländearbeiten an Moorstandorten als auch bei Laboranalysen von Torfen ist, dass sowohl Mess- und Beprobungsgeräte als auch Labormethoden häufig für Mineralböden entwickelt wurden. Daneben sind Moorstandorte und Torfe in ihren Eigenschaften höchst variabel (z.B. Liu et al., 2020; Wittnebel et al. 2021a). Um die optimale Vorgehensweise für verschiedene Moorstandorte und Torfe zu ermitteln, wurden teilweise umfangreiche Vorversuche durchgeführt und eigene Methoden entwickelt (z.B. Dettmann et al., 2019; 2021; 2022).

Ziel des Methodenhandbuchs ist es, die im Rahmen des Moorbodenmonitorings (Teil 1: Offenland) im Gelände und Labor angewandten Methoden umfassend und transparent zu dokumentieren und Wissen über moor- und torfspezifische Gelände- und Labormethoden zu vermitteln und zu teilen. Das Methodenhandbuch beschreibt das generelle Messdesign des Moorbodenmonitorings, die Vorbereitung und Umsetzung der Einrichtung von Untersuchungsflächen, die Probenahme im Gelände und die Labormethoden. Aufgenommene Größen umfassen Geländehöhen (jährliche Erfassung der Untersuchungsfläche und kontinuierliche Aufnahme an einem Punkt), Gesamtvorräte an organischem Bodenkohlenstoff und Stickstoff, horizontbezogene bodenchemische und -physikalische Eigenschaften, Moor- und Oberflächenwasserstände sowie die Vegetation und Bewirtschaftung. Neben praktischen Anleitungen wird der wissenschaftliche Hintergrund für methodische Entscheidungen erläutert. Das Methodenhandbuch bildet die Grundlage für eine einheitliche, objektive und nachvollziehbare Einrichtung und Charakterisierung der Monitoringstandorte.

Dieses Thünen-Working Paper gibt den gegenwärtigen Stand (September 2022) der Abläufe und Methoden wieder. Die Hintergrundinformationen, Anleitungen und Protokolle stehen allen Personen und Institutionen als Anregung und Vorlage zur Verfügung, die ein Monitoring von Moorstandorten planen oder einzelne Größen konsistent zum Moorbodenmonitoring aufnehmen möchten.

1.2 Organische Böden im Sinne des Moorbodenmonitorings

Aufgrund unterschiedlicher naturräumlicher Gegebenheiten und bodenkundlicher Fachtraditionen existieren international eine Vielzahl von Definitionen für organische Böden. Die Definition der organischen Böden in der Emissionsberichterstattung lehnt sich an die Guidelines des IPCC (2006) an. Das IPCC-Wetlands Supplement (IPCC, 2014) übernimmt diesen Ansatz, betont aber, dass es keine festgelegte IPCC-Definition für Torfe („peat“) und Moorböden („peatlands“) gibt, um Raum für länderspezifische Definitionen zu lassen. Auch in Deutschland lässt sich die IPCC-Definition für „organic soils“ nicht direkt in die deutsche Bodensystematik nach bodenkundlicher Kartieranleitung (KA5, Ad-hoc-AG Boden, 2005) übertragen bzw. umgekehrt (Details siehe z.B. Wittnebel et al., 2021a). Diese Problematik ergibt sich daraus, dass beispielsweise anmoorige Horizonte den IPCC-Kriterien entsprechen können, aber dass dies nicht zwangsläufig der Fall ist. Beim Moorbodenmonitoring ist – wie bei der Emissionsberichterstattung – für die Bewertung von Bodentypen an der Grenze zwischen Moorböden und Mineralböden ausschlaggebend, dass entweder ein den „echten“ Moorböden ähnliches Emissionsverhalten nachgewiesen wurde oder hohe Kohlenstoffvorräte in Böden mit Moorhistorie CO₂-Verluste im entwässerten Zustand erwarten lassen.

Im Rahmen des Moorbodenmonitorings wird demzufolge eine umfassende Definition für organische Böden verwendet und folgende Bodentypen adressiert:

- Bodentypen der Abteilung Moore,
- Moor- und Anmoorgleye,
- Hochmoor-, Niedermoor- und Anmoorstagnogleye,
- Anmoorpseudogleye,
- Treposole (Sandmisch- und Tiefpflugsanddeckkulturen, Baggerkuhlungen),
- Überdeckte organische Böden,
- Muddemoore
- deren Subtypen, Varietäten und Subvarietäten

Erläuterung

Böden aus anmoorigen Substraten oder sehr flachgründige Standorte: Tiemeyer et al. (2016) zeigen in einer Synthesestudie mit 48 Grünlandstandorten, dass auch an entwässerten Standorten mit anmoorigen Substraten, also mit Gehalten an organischer Bodensubstanz zwischen 15 und 30% und an flachgründigen Standorten mit einer Torfmächtigkeit von weniger als 0,30 m, mit hohen CO₂-Emissionen zu rechnen ist. Da in der Neuauflage der bodenkundlichen Kartieranleitung voraussichtlich durchgängig ein Umrechnungsfaktor von 2,0 zwischen organischer Bodensubstanz und organischem Bodenkohlenstoff (C_{org}) genutzt werden wird, entspricht die Untergrenze anmooriger Substrate und somit auch die Untergrenze für Standorte für das Moorbodenmonitoring 7,5% C_{org}. Aus der KA5 (Ad-hoc-AG Boden, 2005) ergibt sich eine Mindestmächtigkeit von 0,10 m.

Überdeckte Moorböden: Verschiedene Studien zeigen, dass auch überdeckte Moorböden hohe THG-Emissionen aufweisen (z.B. Beyer, 2014; Pagenkemper et al., 2022) und dass die organische Substanz in den entsprechenden Oberböden nicht stabil ist (Säurich et al., 2019). Daneben sind unter den Überdeckungen hohe Vorräte an C_{org} zu finden (Wittnebel et al. 2021a). Auch mächtig überdeckte Moorböden emittieren erhebliche Mengen an Treibhausgasen (Tiemeyer et al., 2020, Standorte GN6 und GN7), so dass beim Moorbodenmonitoring in Anlehnung an typische Entwässerungstiefen sowie Grenzen für Deckschichtmächtigkeiten in verschiedenen bodenkundlichen Kartenwerken Standorte mit Überdeckungen kleiner 1,00 m betrachtet werden. Somit werden auch überdeckte organische Böden betrachtet, bei denen die Mächtigkeit des organischen Horizonts in Anlehnung an IPCC (2006) mindestens 0,20 m beträgt und dieser innerhalb des oberen Meters beginnt.

Treposole: Treposole aus organischen Böden (= Sandmisch- und Tiefpflugsanddeckkulturen) weisen deutlich höhere C_{org}-Vorräte als Mineralböden auf (Wittnebel et al. 2021a), so dass hohe THG-Emissionen bei Entwässerung potenziell möglich sind. Messungen des THG-Austauschs liegen dazu bisher nicht vor, und Untersuchungen zur Änderung der C_{org}-Vorräte beschränken sich auf die Oberböden (Bambalov, 1998; Höper, 2015). Aufgrund der Kenntnislücken und der hohen C_{org}-Vorräte werden Treposole ins Moorbodenmonitoring aufgenommen. Als besondere Form von Treposolen gibt es in Niedersachsen Baggerkuhlungen, die auch in der Bodenkundlichen Karte BK50 (LBEG, 2017) ausgewiesen werden. Diese werden analog zu den übrigen Treposolen als organische Böden betrachtet. Aufgrund ihrer extremen Heterogenität werden im Rahmen des Moorbodenmonitorings jedoch keine Untersuchungsflächen auf Baggerkuhlungen eingerichtet.

Muddemoore: In der Neuauflage der bodenkundlichen Kartieranleitung werden voraussichtlich Muddemoore enthalten sein. Diese sind jedoch bisher nur in Kartenwerken Brandenburgs (Fell et al., 2015; LBGR, 2021) ausgewiesen und nehmen auch dort nur einen geringen Flächenumfang ein. Daher werden im Rahmen des Moorbodenmonitorings keine Untersuchungsflächen auf Muddemooren eingerichtet.

1.3 Untersuchungskonzept

Das Projekt „Aufbau eines deutschlandweiten Moorbodenmonitorings für den Klimaschutz (MoMoK) – Teil 1: Offenland“ stellt sich der Herausforderung, ein langfristiges deutschlandweites repräsentatives Monitoringnetz für Moorböden zu etablieren, das ca. 200 Standorte umfassen wird. Dabei werden sowohl Standorte unter entwässerungsbasierter landwirtschaftlicher Nutzung, naturnahe Standorte und wiedervernässte ungenutzte oder als Paludikultur genutzte Moor- und weitere organische Böden untersucht.

Die Hauptherausforderung bei der Standortauswahl besteht im Abwägen von Repräsentativität (z.B. bezüglich aktueller Landnutzung, geographischer Verteilung, Bodentypen) und der Erfassung von Standorten mit Minderungsmaßnahmen, die derzeit noch keinen großen Flächenanteil ausmachen, perspektivisch aber wichtig werden können. Entsprechend kommt neben den entwässerungsbasiert landwirtschaftlich genutzten Standorten solchen mit Minderungsmaßnahmen sowie den naturnahen Standorten als Referenz z.B. in Hinblick auf Auswirkungen von Klimaänderungen eine besondere Bedeutung bei. Maßnahmenflächen umfassen verschiedene Optionen der Wiedervernässung, Paludikulturen sowie Standorte mit einer aktiven Steuerung der Wasserstände bei extensiver (z.B. naturschutzorientierte Feuchtwiesen) und intensiver Nutzung (Unterflurbewässerung). Diese Standorte werden im Messnetz (derzeit) flächenmäßig überrepräsentiert, was für eine ausreichende Bewertung dieser Maßnahmen jedoch notwendig ist.

Bisherige Untersuchungen haben gezeigt, dass die Abhängigkeit der CO₂-Emissionen vom Moorwasserstand stark standortabhängig ist (Tiemeyer et al., 2016). Daher werden Standorte des Moorbodenmonitorings nicht nach einem einheitlichen Raster ausgewählt, sondern auf ausgewählte „Cluster“ verteilt. Als Cluster wird hier eine Gruppe von Standorten innerhalb eines zusammenhängenden Moorkörpers mit vergleichbaren hydrogeologischen und meteorologischen Bedingungen sowie vergleichbarer Moorgenese bezeichnet. Die Auswahl der Cluster erfolgt nach Möglichkeit in Absprache mit Moorexpert*innen der Bundesländer sowie der Regionen. Jedes Cluster wird dabei über eine regionaltypische Auswahl an Boden- und Landnutzungstypen verfügen. Bei der Standortauswahl wird darauf geachtet, dass sich Nutzungstypen innerhalb eines Clusters nicht wiederholen, sondern dass jede Boden-Landnutzungstyp-Kombination verteilt über Deutschland in mindestens drei verschiedenen Clustern zu finden ist.

Um Synergien zu nutzen, werden nach Möglichkeit Standorte anderer Monitoring-Programme in das Netzwerk integriert (z.B. Bodendauerbeobachtungsflächen der Bundesländer, Moorstandorte von ICOS-Deutschland und weitere Langzeitstandorte mit CO₂-Messungen).

An jedem der ausgewählten Standorte wird eine Untersuchungsfläche eingerichtet (50 m x 50 m), an der folgende Daten nach den in diesem Methodenhandbuch beschriebenen Methoden aufgenommen werden:

- Geländehöhen: Terrestrische Vermessung aller Untersuchungsflächen und kontinuierliche Punktmessungen an ausgewählten Standorten
- Vorräte an organischem Bodenkohlenstoff und Stickstoff an 10 Beprobungspunkten pro Untersuchungsfläche
- Horizontbezogene moorbodenkundliche, bodenchemische und bodenphysikalische Parameter (Bodenprofil)
- Moorwasserstände und, wenn relevant, Graben- und Grundwasserstände
- Pflanzenarten (Dauerbeobachtungsflächen) und Biototypen (Untersuchungsfläche)
- Wassermanagement und Landnutzung (Fragebögen)

Parallel zum Aufbau des Messnetzes werden die Regionalisierungsansätze für THG-Emissionen bzw. deren Steuergrößen verbessert. Derzeit steht die Aktualisierung der aktuell in der Emissionsberichterstattung genutzten Flächenkulisse organischer Böden im Fokus. Daneben wird getestet, inwieweit perspektivisch Fernerkundungsdaten für eine flächenhafte Abschätzung der Geländehöhenänderung im Offenland genutzt werden können. Aus all diesen Daten wird eine Methode zur dynamischen Regionalisierung der Moorwasserstände entwickelt und werden letztendlich die CO₂-Emissionen abgeleitet. Da mehrjährige Daten zu

Geländehöhenänderungen erst gegen Ende dieses Projekts zur Verfügung stehen werden, werden sich die entsprechenden Regionalisierungsansätze zunächst weiterhin auf Flussdaten stützen. Auch die Abschätzung der stark an die Moorwasserstände gebundenen Emissionen von Methan (CH_4) wird sich durch diese Ansätze verbessern, da die derzeitige Karte der Moorwasserstände statisch ist und landwirtschaftlich genutzte Standorte in der zu Grunde liegende Datenbasis unterrepräsentiert sind, was möglicherweise derzeit zu einer zu nassen Einschätzung der Moorwasserstände und damit einer Überschätzung der CH_4 -Emissionen führt. Diese Arbeiten sind jedoch nicht Teil des hier vorliegenden Methodenhandbuchs.

2 Untersuchungsfläche

Abhängig von der jeweiligen Zielsetzung unterscheiden sich verschiedene Monitoringprogramme sowohl hinsichtlich der Größe und Form der Untersuchungsflächen als auch der aufgenommenen Parameter (z.B. BUWAL, 2003; Luthardt et al., 2006; Orgiazzi et al., 2017; Jacobs et al., 2018). Die idealtypische Geometrie für das Moorbodenmonitoring und die Verteilung von Sensoren bzw. Probenahmepunkten auf der Untersuchungsfläche sind in Abbildung 1 dargestellt. Standardmäßig hat die Untersuchungsfläche eine Größe von 50 m x 50 m (siehe Erläuterung). Allerdings steht für einige Nutzungsformen bisher nur eine eingeschränkte Auswahl von Versuchsflächen zur Verfügung. In diesem Falle wird von der Standardgeometrie abgewichen und auch langgestreckte und schmale Flächen zugelassen (z.B. 20 x 125 m; siehe Anhang 1). Dennoch sollte die Untersuchungsfläche nicht schmaler als 20 m sein. Im Zweifelsfall ist ein ausreichender Abstand zu möglichen Störfaktoren (z.B. Gräben, Wege) bei der Festlegung der Untersuchungsfläche wichtiger als die quadratische Form.

Nahezu alle Sensoren bzw. Probenahme- und Vermessungspunkte werden auf der Untersuchungsfläche selbst platziert. Wesentliche Elemente sind

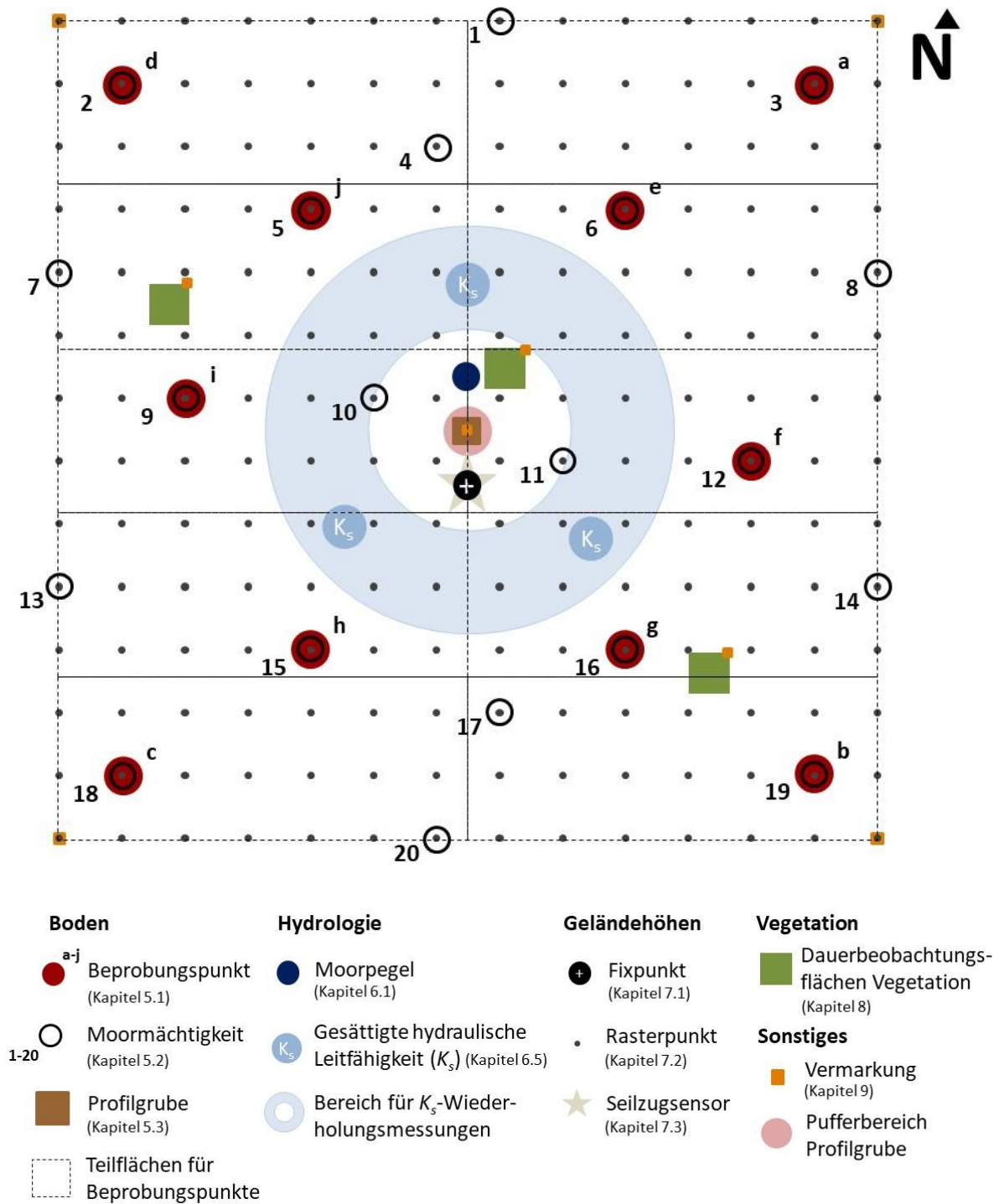
- eine zentral angelegte Profilgrube mit Pufferbereich ohne weitere Arbeiten,
- ein Raster für die Vermessung der Geländehöhen,
- zehn Teilflächen gleicher Größe, in denen jeweils ein Beprobungspunkt liegt und eine zusätzliche Messung der Moormächtigkeit vorgenommen wird,
- ein Bereich zur Platzierung der Bohrlöcher für die Messung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit,
- Dauerbeobachtungsflächen des Vegetationsmonitorings,
- eine in den mineralischen Untergrund eingebrachte Fixstange als Referenzhöhe für die Höhenvermessung sowie ggf. als Halterung für den Seilzugsensor (kontinuierliche Messung der Geländehöhen), sowie
- Moor- und ggf. Grabenpegel.

Erläuterung:

Bodeneigenschaften variieren räumlich stark (z.B. Nielsen und Wendroth, 2003), weshalb eine räumlich verteilte Messung von Standorteigenschaften einer Punktmessung zur Charakterisierung eines Standortes stets vorzuziehen ist. Da dies aus Kostengründen nicht bei allen Parametern möglich ist, wurde insbesondere bei elementaren Eigenschaften wie dem Bodenkohlenstoffvorrat und den Geländehöhenänderungen auf eine räumlich verteilte Messung innerhalb der Untersuchungsfläche Wert gelegt. Hierbei ist die Dimensionierung der Untersuchungsfläche ein kritischer Parameter, da mit größerer Untersuchungsfläche das Risiko steigt, nicht die zufällige kleinräumige Variabilität, sondern räumliche Trends von Bodeneigenschaften zu erfassen. Ausschlaggebend für die Entscheidung für die Flächengröße war letztendlich ein möglicher Abgleich mit Fernerkundungsdaten und die Möglichkeit, die Untersuchungsfläche flexibel im Footprint von Eddy-Kovarianz-Messsystemen zu platzieren. Fernerkundungsmethoden ermöglichen prinzipiell nicht nur eine Erfassung von Landnutzung und Vegetation (z.B. Artz et al., 2019), sondern auch eine Messung der Geländehöhenänderung mit Radarinterferometrie (inSAR, z.B. Alshammari et al. (2020) und Marshall et al. (2022) für ungenutzte Standorte).

Für landwirtschaftlich genutzte Standorte fehlt es jedoch noch an Erfahrung und an einem Abgleich mit terrestrischer Höhenvermessung. Im Rahmen des Moorbodenmonitorings werden Forschungsarbeiten zu dieser Thematik durchgeführt, sind jedoch nicht Bestandteil dieses Methodenhandbuchs.

Abbildung 1: Schematische Übersicht der Positionen der auf einer Untersuchungsfläche durchzuführenden Arbeiten sowie zu installierenden Messtechnik



Quelle: eigene Darstellung

Eine weitere zentrale Entscheidung ist die Positionierung von Beprobungspunkten. Um sicherzustellen, dass die Untersuchungsfläche durch die Beprobung adäquat abgedeckt wird, wurde die Untersuchungsfläche in 10 Teilflächen gleicher Größe unterteilt. Auf dem systematischen Raster (in Anlehnung an BUWAL, 2003) der Geländehöhenvermessungen wurden die Beprobungspunkte so angeordnet, dass in jeder Teilfläche ein Beprobungspunkt und ein zusätzlicher Punkt zur Bestimmung der Moormächtigkeit liegen. Bei einer möglichen Nachbeprobung werden in jeder Teilfläche zufällig zwei Punkte des Vermessungsrasters für die wiederholte Beprobung bzw. Mächtigkeitsbestimmung ausgewählt. Die Lage dieser Punkte gilt dann für alle Untersuchungsflächen. Somit werden die Vorteile systematischer und randomisierter Beprobungsschemata kombiniert. Die Anzahl der Beprobungs- und Vermessungspunkte sowie weitere methodische Entscheidungen werden in den jeweiligen Kapiteln erläutert.

3 Ablauf der Arbeiten

Abbildung 2 zeigt einen möglichen Ablauf der Arbeitsschritte vor und während der Einrichtung einer Untersuchungsfläche. Als erstes wird die generelle Eignung des Standortes im Rahmen einer Vorerkundung festgestellt. Im Anschluss erfolgt die Einrichtung der Untersuchungsfläche. Abhängig vom Arbeitsaufwand und zur Verfügung stehenden Personal können die anfallenden Tätigkeiten auch parallel durchgeführt werden. Eine Abschätzung des zu erwartenden Zeitaufwands wird in Tabelle 1 gegeben. Alle benötigten Materialien sind im Anhang 2: Packliste aufgelistet. Die Ausführungen zum Arbeitsablauf umfassen nicht die Vegetationsaufnahmen. Während Standorteinrichtung, Vermessung und Bodenprobenahme zu (fast) jeder Jahreszeit durchgeführt werden können, ist für die Vegetationsaufnahmen der phänologisch passende Zeitpunkt notwendig. Daher werden die Aufnahmen unabhängig von der Standorteinrichtung durchgeführt (Kapitel 8).

Je nach Standort- und Witterungsbedingungen treten unterschiedliche Herausforderungen auf. Entsprechend müssen der vorgeschlagene Ablauf und die damit verbundenen Tätigkeiten situationsbedingt angepasst werden.

Dies betrifft insbesondere Untersuchungsflächen

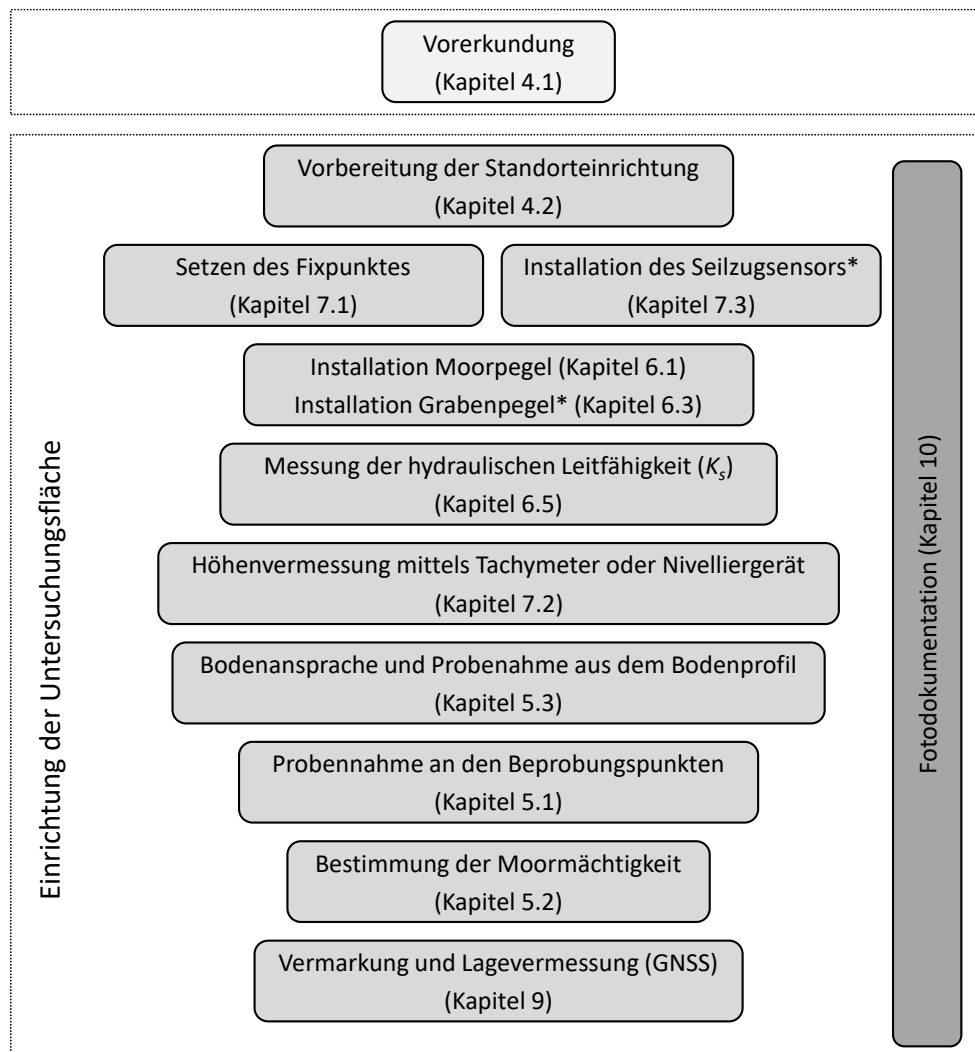
- auf Tiefumbruchböden (Treposole, d.h. Sandmisch- oder Tiefpflugsanddeckkulturen),
- in naturnahen oder wiedervernässten Mooren, an denen keine Profilgrube angelegt werden kann, und
- mit dauerhaftem Wasserüberstau (Polder).

Notwendige Anpassungen werden in den einzelnen Kapiteln zur Einrichtung näher erläutert.

Tabelle 1: Übersicht über den Zeitaufwand für die durchzuführenden Arbeiten. GNSS = Globales Navigationssatellitensystem

Tätigkeit	Kapitel	Zeitaufwand bei maximaler Personenzahl	Benötigte Personen	Den Zeitaufwand bestimmende Faktoren
Vorbereitung der Einrichtung	4.2	0,5 bis 5 Stunden	3	Komplexität des Dränsystems
Fixpunkt setzen	7.1	1 bis 2 Stunden	1	Mächtigkeit des Torfkörpers
Installation Seilzugsensor	7.3	0,5 bis 1 Stunden	1	
Installation Moor- und Grabenpegel	6.1 und 6.3	1 bis 6 Stunden	1 bis 2	Mächtigkeit des Torfkörpers, Grabentiefe und -breite, Sohlbeschaffenheit
Messung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit	6.5	Arbeitszeit: 2 bis 3 Stunden Dauer Versuch: 3 Stunden bis 3 Tage	1	Hydraulische Leitfähigkeit des Torfkörpers
Höhenvermessung				
Tachymeter	7.2	5 bis 8 Stunden	1	Hindernisse auf der Fläche, Oberflächenstruktur,
Nivelliergerät		5 bis 8 Stunden	2	Begehbarkeit
Profilgrube mit Ansprache und Probenahme	5.3	1 bis 2 Tage	1 bis 2	Komplexität des Profilaufbaus, Moorwasserstand, Mächtigkeit, Vorhandensein sehr trockener und/oder stark aggregierter Torfe
Moormächtigkeit und Beprobungspunkte	5.1 und 5.2	1 bis 3,5 Tage	1 bis 3	Mächtigkeit und Komplexität des Torfkörpers
Lagevermessung (GNSS)	9	2 bis 3 Stunden	1	Empfang von Satelliten- und Korrektursignal, Hindernisse

Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 2: Vorschlag eines Arbeitsablaufs zur Einrichtung einer Untersuchungsfläche

* an ausgewählten Standorten

Quelle: eigene Darstellung

4 Vorarbeiten

Die Vorarbeiten gliedern sich in die Vorerkundung des Standortes und die Vorbereitung der Standorteinrichtung. Bei der Vorerkundung des Standortes wird die generelle Eignung als Untersuchungsfläche geprüft, während die vorbereitenden Untersuchungen der Charakterisierung des Standortes und der endgültigen Positionierung der Messgeräte sowie der Beprobungspunkte dienen.

4.1 Vorerkundung

Im Verlauf der Vorerkundung wird die Eignung eines potenziellen Standortes für die Einrichtung einer Untersuchungsfläche durch Recherche, Vorgespräche sowie eine Feldbegehung und eine Befragung der Flächennutzer*innen bzw. Flächeneigentümer*innen überprüft. Neben der Klärung der generellen Teilnahmebereitschaft der Flächeneigentümer*innen und Nutzer*innen am Moorbodenmonitoring sowie der Einholung von allen notwendigen Genehmigungen umfasst die Recherche auch Leitungsabfragen (Strom, Gas,

Wasser, Telefon) über Portale der Netzbetreiber oder direkt bei den Versorgern sowie den Ausschluss von Verdachtsflächen auf Kampfmittel.

Beim Moorbodenmonitoring bedeutet „Eignung“, dass der Standort zum einen vorab definierten Kriterien (z.B. Bodentyp, Nutzung, Moormächtigkeit) genügt und zum anderen ausreichend homogen ist. Diese Kriterien sollen die repräsentative Abdeckung von z.B. Moorbodentypen und Landnutzungen in Deutschland gewährleisten, gleichzeitig aber auch genutzte und ungenutzte nasse Moore in ausreichendem Detailgrad abdecken (Kapitel 1.3). Als ausreichend homogen wird eine Untersuchungsfläche angesehen, wenn sie (1) nur geringe und unsystematische Unterschiede in der Moormächtigkeit, (2) keine Unterschiede in Horizont- und Substratabfolge und (3) eine gleichmäßige Vegetationsstruktur aufweist. Außerdem dürfen innerhalb der Fläche keine Unterschiede in der Bewirtschaftung und im Wassermanagement auftreten.

Während der Vorerkundung werden folgenden Informationen aufgenommen und dokumentiert (Anhang 3: Protokoll Vorerkundung):

- Homogenität hinsichtlich Vegetation, Nutzung und Hydrologie (visuelle Prüfung) sowie Bodentyp und Moormächtigkeit (Erkundung mit Fotodokumentation)
- Abgleich der vorgefundenen mit den erwarteten Standorteigenschaften (Bodentyp, Moormächtigkeit)
- Störungen (anthropogener Bodenauftrag, Trassen etc.)
- Prüfung der Flächengröße und -ausstattung
 - Mindestabstand von 15 m zu Wegen, Gräben und weiteren Störungen kann eingehalten werden
 - Mindestgröße von 2.500 m² und eine Mindestbreite von 20 m kann eingehalten werden
- Wassermanagement und Entwässerungssituation, insbesondere Vorhandensein von Dränrohren
- Bohren eines Loches zur Bestimmung des aktuellen Moorwasserstandes (Vorbereitung der Messung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit, Kapitel 6.5)

Zur Ergänzung der vorab für den Standort eingeholten Auskünfte (z.B. Leitungsabfragen, Verdachtsfläche für Kampfmittel) sowie der im Gelände gewonnenen Erkenntnisse werden die Flächenbesitzer*innen oder Flächenbewirtschafter*innen zu folgenden Punkten befragt (Anhang 4: Fragebogen zur Vorerkundung):

- Aktuelle Bewirtschaftung sowie geplante Änderungen von Bewirtschaftung,
- Entwässerungssituation bzw. Wassermanagement und geplante Änderungen,
- Bewirtschaftungs- oder Naturschutzauflagen und daraus folgenden Sperrzeiten.

Wenn sich die Untersuchungsfläche als geeignet herausstellt, werden Bewirtschafter*innen bzw. Eigentümer*innen gebeten, einen umfangreichen Fragebogen zu Landnutzungshistorie sowie zur Bewirtschaftung auszufüllen. Dieser wird um eine jährliche Abfrage der Bewirtschaftung ergänzt. Zur Wahrung des Datenschutzes werden betriebs- und personenbezogene Daten in einer besonders geschützten separaten Datenbank gehalten und ausschließlich pseudonymisiert ausgewertet.

4.2 Vorbereitung der Standorteinrichtung

Vor Beginn der Einrichtung wird die im Rahmen der Vorerkundung ausgewählte Position der Untersuchungsfläche noch einmal geprüft und endgültig festgelegt. Wichtig ist hierbei, dass:

- keine Sonderposition auf dem Standort für die Einrichtung der Untersuchungsfläche ausgewählt wurde,
- die Lage repräsentativ für den Standort ist,
- die Untersuchungsfläche nach Möglichkeit mittig zwischen Gräben oder Wegen liegt,
- der Zentralpunkt mindestens 15 m Abstand zu Gräben, Wegen und Störungen aufweist.

Vor Beginn der Einrichtung wird ein Foto der Untersuchungsfläche aufgenommen (Kapitel 10, S. 62). Ausgehend vom Zentralpunkt werden die Eckpunkte der Untersuchungsfläche abgesteckt. Anpassungen der Flächegeometrie aufgrund von Besonderheiten des Standortes müssen dokumentiert werden.

Bevor weitere Arbeiten vorgenommen werden können, muss das Entwässerungssystem innerhalb der Untersuchungsfläche vollständig erfasst werden. Insbesondere die Positionen der Dränrohre müssen festgestellt und markiert werden. Die Oberflächentopographie oder die Wasserversorgung der Pflanzen (insbesondere in trockenen Sommern beim Grünland) können erste Hinweise auf die Lage von Dränrohren geben. Es sollte beachtet werden, dass Dränsysteme verschiedenen Alters in verschiedenen Tiefen mit unterschiedlichen Dränabständen, Dräntiefen und Richtungen vorhanden sein können und somit die Oberflächentopographie irreführend sein kann. Folgende Schritte können bei der Erfassung des Dränsystems helfen:

- Dränpläne und weitere Unterlagen der Bewirtschafter*innen
- Visuelle Prüfung: Topographie, Vegetation, Dränauslässe (siehe Vorerkundung, Fragebogen)
- Verwenden von Dränpiekern (ca. 1,00 m Länge)
- Aufgraben kleinerer Bereiche für eine genaue Verortung der Dränrohre innerhalb der Untersuchungsfläche

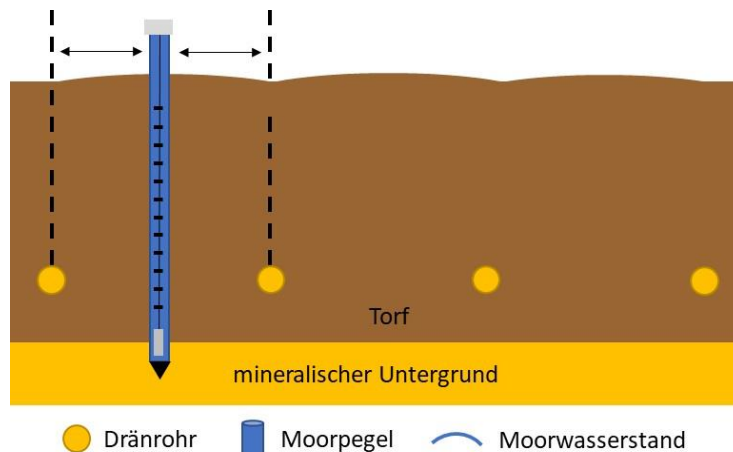
Das Auffinden und Markieren der Dränrohre dient nicht nur der hydrologischen Charakterisierung des Standortes, sondern ist entscheidend für die Positionierung des Bodenprofils, der Messgeräte (Moorpegel, Seilzugsensoren) sowie der Punkte zur Messung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit. In Abhängigkeit von der Komplexität kann die Erfassung des Dränsystems sehr zeitintensiv sein (Tabelle 1).

Bei Treposolen (Sandmisch- und Tiefplugsanddeckkulturen) ist für eine repräsentative Beprobung und Profilaufnahme die Ermittlung der Pflugrichtung erforderlich. Zusätzlich zu Unterlagen zum Standort und Informationen der Bewirtschafter*innen erfordert dies zumeist ein Anlegen von Flachscharfen und ist ebenfalls zeitaufwändig.

Erläuterung:

Dränrohre haben einen direkten Einfluss auf die räumliche Verteilung der Moorwasserstände. Im Winter und in feuchten Perioden ist der Moorwasserstand am Dränrohr am niedrigsten und steigt zur Dränbeetmitte an (Abbildung 3). In trockenen Perioden kann der Moorwasserstand in Dränbeetmitte in Abhängigkeit vom Grabenwasserstand und der Einbautiefe der Dränrohre tiefer oder höher als an den Dränrohren sein. Für beide Fälle können in Abhängigkeit vom Abstand des Moorpegels zum Dränrohr unterschiedliche Wasserstände auf einer Untersuchungsfläche gemessen werden. Damit die Vergleichbarkeit der Ergebnisse über alle Standorte hinweg sichergestellt ist, sollte der Moorpegel immer in Dränbeetmitte positioniert werden (Abbildung 3).

Zusätzlich ist der Torf in der Nähe von Dränrohren in seiner natürlichen Lagerung gestört, so dass dort kein Bodenprofil angelegt und kein Beprobungspunkt platziert werden sollte. Auch werden so Schäden am Dränsystem vermieden. Daneben ist der Dränabstand wichtig für die Wahl des Vermessungsrasters. Dieses sollte kein Vielfaches des Dränabstands betragen, da sonst ein Bias bei der Messung der Geländehöhen auftritt. Bei Anwendung des Standardlayouts der Untersuchungsfläche tritt dieses Problem jedoch üblicherweise nicht auf, da der Abstand zwischen zwei Rasterpunkten 3,57 m beträgt, während typische Dränabstände 8 m, 10 m oder 20 m sind.

Abbildung 3: Positionierung des Moorpegels auf entwässerten Untersuchungsflächen

Quelle: eigene Darstellung

5 Boden

Die bodenkundliche Aufnahme der Untersuchungsflächen ist eine der zentralen Aufgaben des Moorbodenmonitorings. In diesem Kapitel werden die Arbeiten zur bodenkundlichen Standortcharakterisierung sowie zur Bestimmung der Vorräte an organischem Bodenkohlenstoff (C_{org}) und Gesamtstickstoff (N_t) beschrieben. Zur Bestimmung der C_{org} - und N_t -Vorräte werden je Untersuchungsfläche volumengetreue Bodenproben über die gesamte Moormächtigkeit an 10 Beprobungspunkten entnommen, während die Profilgrube der detaillierten bodenkundlichen Beschreibung und horizontbezogenen Beprobung für weiterführende bodenchemische und -physikalische Analysen dient.

Unter „Moormächtigkeit“ wird die Mächtigkeit des gesamten Profilaufbaus, d.h. einschließlich mineralischer Decken und Zwischenlagerungen sowie Mudden verstanden. Die „Torfmächtigkeit“ dagegen ist die Summe der Mächtigkeit der Torfhorizonte und der anmoorigen Horizonte. Dabei wird keine Unterscheidung zwischen anmoorigen Substraten (15 bis 30% organische Bodensubstanz) und Torfen (> 30% organische Bodensubstanz) gemacht, da diese im Feld nicht in allen Fällen sicher zu unterscheiden sind. Unzersetzte Streu sowie weitere organische Auflagehorizonte werden nicht zur Moor- bzw. Torfmächtigkeit gezählt. Ebenso werden lebende Pflanzenteile z.B. von Torfmoosen und Wurzelfilzschichten nicht zum Boden gezählt. Sie werden jedoch dokumentiert.

5.1 Beprobungspunkte

Für die Erfassung der Höhe sowie der räumlichen Variabilität der C_{org} - und N_t -Vorräte werden auf der Untersuchungsfläche an 10 Beprobungspunkten (Abbildung 1) volumengetreue Bodenproben über die gesamte Moormächtigkeit bis zum mineralischen Untergrund entnommen.

Vor der Probenahme an den Beprobungspunkten ist sicherzustellen, dass

- keine sonstigen Störungen (z.B. Gräben, Aushub) vorhanden sind,
- die Position mittels Metalldetektors freigemessen wurde, und
- im Umkreis von 1,00 m keine Dränrohre vorhanden sind.

Sollte einer der oben genannten Punkte zutreffen oder nicht vollständig ausgeschlossen werden können, so wird der Beprobungspunkt 1,00 m in nördliche, falls nicht möglich, in östliche Richtung verlegt. Für den neu gewählten Beprobungspunkt gelten die gleichen Bedingungen, so dass der Vorgang ggf. wiederholt werden muss. Die Dokumentation erfolgt nach Anhang 5: Protokoll Beprobungspunkte.

Erläuterung:

Eine Möglichkeit zur Bestimmung von Kohlenstoffverlusten oder -sequestrierung ist die wiederholte Bestimmung der C_{org} -Vorräte (z.B. Poeplau et al., 2022; Simola et al., 2012; Smith et al., 2019). Im Vergleich zu Mineralböden, bei denen die Bestimmung der C_{org} -Vorräte bis zu einer Tiefe von 1,00 m in der Regel ausreichend ist (Jacobs et al., 2018), treten bei Moor- und weiteren organischen Böden zusätzliche Herausforderungen auf: Zum einen ist bei tiefgründigen Standorten ein Großteil des Bodenkohlenstoffes in einer Tiefe $> 1,00$ m gespeichert (Wittnebel et al., 2021a) und zum anderen ändert sich die Trockenrohdichte sowohl saisonal als auch – insbesondere an entwässerten Standorten – über Dekaden oder Jahrhunderte (Liu et al. 2020). Vererdete und vermulmte Horizonte haben aufgrund von Schrumpfung, Sackung und sekundären pedogenetischen Prozessen höhere Trockenrohdichten als ständig wassergesättigte Horizonte (z.B. Wittnebel et al., 2021a). Entsprechend können entwässerte Standorte im oberen Meter höhere C_{org} -Vorräte aufweisen als naturnahe oder vernässte Standorte. Selbst im Jahresverlauf können allein aufgrund der Oszillation der Bodenoberfläche und der damit verbundenen Änderung der Trockenrohdichten C_{org} -Vorräte im oberen Meter schwanken, so dass eine volumengetreue Beprobung bis zum mineralischen Untergrund entscheidend für eine mögliche zukünftige Bestimmung der Vorratsänderungen ist. Zur Ermittlung der optimalen Beprobungsmethodik wurde ein umfangreicher Feldversuch mit verschiedenen Probenahmegeräten durchgeführt (Dettmann et al., 2022), dessen Ergebnisse in den in Kapitel 5.1.3 beschriebenen Entscheidungsbaum eingegangen sind.

Bodeneigenschaften sind grundsätzlich räumlich heterogen, so dass die flächenrepräsentative Erfassung insbesondere im Hinblick auf die Detektierbarkeit von Unterschieden bei einer möglichen Wiederbeprobung eine Herausforderung darstellt (z.B. Poeplau et al., 2022; Walter et al., 2016). Um die angemessene Anzahl an Beprobungspunkten zu ermitteln, wurde eine statistische Analyse der Daten im Rahmen der Bodenzustandserhebung Landwirtschaft beprobten Moor- und weiteren moorähnlichen Böden (Poeplau et al., 2020) durchgeführt. Mit einem Bootstrap-Ansatz wurde die Abhängigkeit der minimalen detektierbaren Differenz (MDD, siehe auch Walter et al., 2016) des C_{org} -Vorrates von der Anzahl der entnommenen und räumlich verteilten Bohrkerns ermittelt. Dabei stellte sich heraus, dass 10 Beprobungspunkte einen akzeptablen Kompromiss zwischen Aufwand und MDD darstellen (Wittnebel et al. 2021b). Dieses Ergebnis war unabhängig vom untersuchten Bodentyp. Unter Annahme eines jährlichen C_{org} -Verlustes entwässerter Standorte von ca. $8 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (Tiemeyer et al., 2020) würde dies eine Wiederbeprobung entsprechender Standorte nach etwa 10 Jahren erlauben. Genauere Aussagen zur MDD und zu einem möglichen Beprobungsintervall sind jedoch erst nach Analyse der durch das Moorbodenmonitoring gewonnenen Daten möglich.

5.1.1 Probenahmegeräte

Zur volumengetreuen Beprobung stehen eine Reihe von Probenahmegeräten wie z.B. Stechbohrer (Abbildung 4), Klappsonde (Abbildung 5; Belokopytov and Beresnevich, 1955), Rammkernsonde (Abbildung 6), Wardenaar-Profilstecher (Abbildung 7; Wardenaar, 1987) und Stechzylinder (Abbildung 8) zur Verfügung. Diese Probenahmegeräte unterscheiden sich in ihrem Anwendungsbereich und ihrer Eignung für verschiedene Torfe (Walter et al. 2016; Smeaton et al., 2020). Falls eine volumengetreue Beprobung mit keinem der genannten Geräte möglich ist, können Torfblöcke aus dem Oberboden ausgeschnitten und gefroren weiterverarbeitet werden (z.B. Golubev und Whittington, 2018). Grundsätzlich liefern Proben aus Wardenaar-Profilstecher, Stechzylinder und Stechbohrer ähnliche Werte der Trockenrohdichte. Für die Klappsonde trifft dies unter gesättigten Bedingungen ebenfalls zu (Dettmann et al., 2022). Wenn Proben mit der Rammkernsonde genommen wurden, sind die resultierenden Daten nur verwendbar, wenn die gesamte Kernlänge berücksichtigt und der gesamte Moorkörper bis zur Moorbasis mit dem Kern beprobt wird. Auf Grund von Stauchung und Streckung können horizontbezogene Volumina hingegen fehlerhaft sein (Dettmann et al., 2022; Walter et al. 2016). Für überstaute Standorte und Standorte mit aufgeschwommenen Torfhorizonten mit rezenter Muddebildung stehen zusätzlich zu den bereits genannten Probenahmegeräten Sediment-Probennehmer für die Abschätzung der C_{org} - und N_t -Vorräte zur Verfügung (Cabezas et al., 2014). Falls eine volumengetreue Beprobung

mit keinem der Probenahmegeräte möglich ist, sollte eine gestörte Mischprobe entnommen werden. In tieferen Bodenschichten kann hierfür der Edelman-Bohrer (auch als Flügelbohrer bezeichnet) verwendet werden.

5.1.1.1 Stechbohrer

Der halbzyklindrische Stechbohrer (Eijkelpkamp, Giesbeek, Niederlande, auch als Guts-Bohrer bezeichnet) steht in zwei unterschiedlich langen Versionen für die Entnahme von 0,50 m oder 1,00 m langen Bohrkernen zur Verfügung. Der Stechbohrer ist mit verschiedenen Bohrkammerdurchmessern (0,02 bis 0,06 m Ø) erhältlich. Für die Probenahme sollte ein Bohrer mit einem Kammerdurchmesser von 0,06 m verwendet werden. Mit zusätzlichen Stangen können die Bohrer so weit verlängert werden, dass eine Beprobung bis in größere Tiefen möglich ist. Die Bohrkammer ist im Vergleich zu anderen Bohrgeräten (z.B. Klappsonde) nicht verschließbar. Bei jeder Bohrung werden die oberen und unteren 0,10 m Probenmaterial in der Bohrkammer verworfen, da in diesen Bereichen Störungen der entnommenen Probe nicht ausgeschlossen werden können. Wenn mehr als eine Beprobung für die Probenahme bis zur Moorbasis nötig ist, wird an zwei nebeneinander liegenden Punkten (Abstand < 0,50 m) gebohrt (Abbildung 9a), um Störungen der Probe durch ins Bohrloch nachfallendes Material zu minimieren. Dabei ist es wichtig überlappend zu bohren, um das aus den oberen und unteren 0,10 m verworfene Material auszugleichen. Bei jedem Bohrlochwechsel ist es notwendig, auf die zu beprobende Tiefe vorzubohren.

Abbildung 4: Ein Meter langer a) Stechbohrer, b) mit Verlängerung und Griff und c) mit Bodenprobe



Quelle: U. Dettmann

5.1.1.2 Moorklappsonde

Mit der Moorklappsonde (Eijkelpkamp, Giesbeek, Niederlande, kurz „Klappsonde“) können standardmäßig 0,50 m lange Bohrkern entnommen werden. Im Eigenbau können jedoch Klappsonden mit größerem Kammervolumen zur Entnahme längerer Bohrkern gefertigt werden. Wie der Stechbohrer kann die Klappsonde für die Probennahme aus größeren Tiefen verlängert werden. Im Unterschied zum Stechbohrer verfügt die Klappsonde über eine verschließbare halbzyklindrische Bohrkammer. Für die Beprobung wird die Klappsonde mit geschlossener Kammer (Abbildung 5b) in den Boden gedrückt. Nachdem die untere Kammergrenze die Beprobungstiefe erreicht hat, wird die Klappsonde je nach Bauweise um 180° nach rechts oder links gedreht und dadurch geöffnet. Im Anschluss wird die Sonde weitere 0,50 m in den Boden gedrückt und die Kammer durch Zurückdrehen wieder verschlossen. Die Beprobung in größeren Tiefen wird an zwei nebeneinander liegenden Punkten durchgeführt (Abstand < 0,50 m). Im Gegensatz zum Stechbohrer muss bei der Klappsonde kein Material verworfen werden, wodurch die Bohrungen nicht überlappend durchgeführt werden müssen (Abbildung 9b). Ebenso ist das Vorbohren auf die zu beprobende Tiefe nicht zwangsläufig notwendig, da die Klappsonde mit geschlossener Kammer in den Boden gedrückt wird.

Abbildung 5: a) geöffnete Klappsonde, b) geschlossene Klappsonde, c) Klappsonde mit Bodenprobe, d) und e) Verschlussmechanismus für Verlängerungsstangen und f) Klappsonde mit Verlängerungen und Griff



Quelle: U. Dettmann

5.1.1.3 Rammkernsonde

Mit der Rammkernsonde (hier: Schlauchsonde, 0,08 m Ø, Eijkelkamp, Giesbeek, Niederlande) können je nach Sondenlänge zylindrische Bohrkerne mit einer Länge zwischen 1,00 m und 2,00 m entnommen werden. Die Sonde wird dabei mit Hilfe eines Elektrohammers (z.B. Wacker EH 23, Wacker Neuson; Abbildung 6b) in den Boden getrieben. Es stehen verschiedene Sondentypen zur Verfügung. Ein Vergleich zwischen Schlauch-, Klapp- und Linersonden hat gezeigt, dass mit der Schlauchsonde entnommene Proben für verschiedene Mineralbodenarten und Niedermoortorf sowohl die höchste Präzision als auch den geringsten systematischen Fehler der Trockenrohdichten im Vergleich zu Stechzylinderproben aufweisen (Walter et al., 2016). Aus diesem Grund wird hier nur die Verwendung der auch in der Bodenzustandserhebung Landwirtschaft (Jacobs et al., 2018) verwendeten Schlauchsonde beschrieben.

Vor jeder Sondierung ist die Messung der Moormächtigkeit an dem Beprobungspunkt notwendig. Dafür stehen Moorpeilstange (DIN 19672-2:1968-04, Kapitel 5.2, Abbildung 17), Stechbohrer (0,03 m Ø) oder Pürckhauer zur Auswahl. Die Rammkernsondierung wird 0,15 m tiefer als die vorab bestimmte Moormächtigkeit durchgeführt. Die Bohrtiefe wird an der eingetriebenen Sonde ermittelt. Hierfür wird von der Geländeoberfläche bis zur 1,00 m bzw. 2,00 m Markierung an der Außenseite der Sonde gemessen. Im Anschluss wird der Bohrkern mit einer hydraulischen Ziehvorrichtung (Eijkelkamp, Giesbeek, Niederlande; Abbildung 6c) entnommen und die Kernlänge zwischen dem oberen Ende des Kernes und dem Beginn der Hülse gemessen (Abbildung 6d). Wenn Kernlänge und Bohrtiefe nicht übereinstimmen, muss eine Stauchungs- oder Streckungskorrektur durchgeführt werden (Walter et al., 2016). Dabei werden die jeweiligen Horizontmächtigkeiten oder Tiefenstufen in Abhängigkeit von Kernlänge und Bohrtiefe korrigiert, d.h. anteilig verlängert oder verkürzt. Im Anschluss kann der Kern auf die korrigierten Längen geschnitten werden.

Abbildung 6: a) Rammkernsonde (Schlauchsonde) mit Hülse und Schlauch, b) Elektrohammer, c) Ziehhilfe und d) Bohrkern

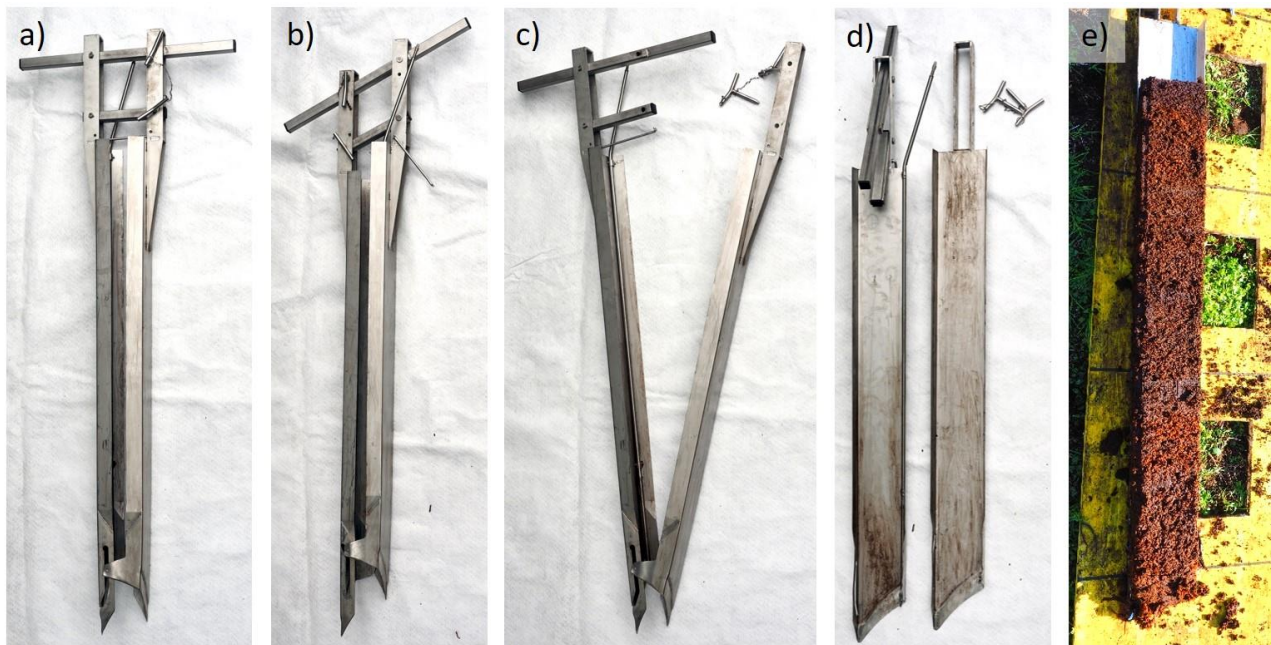


Quelle: U. Dettmann

5.1.1.4 Wardenaar-Profilstecher

Mit dem Wardenaar-Profilstecher (Eijkelkamp, Giesbeek, Niederlande) können 1,00 m lange, quaderförmige (Querschnitt: 0,10 m x 0,12 m) Proben genommen werden. Der Profilstecher besteht aus zwei angespitzten Hälften, die über Scharniere miteinander verbunden sind. Solange die Scharniere arretiert sind, werden die zwei Hälften gleichzeitig in den Boden gedrückt (Abbildung 7a). Durch Lösen der Arretierung können die zwei Hälften anschließend abwechselnd in den Boden gedrückt werden (Abbildung 7b). Ist die gewünschte Tiefe erreicht, wird der Wardenaar-Profilstecher in die Entnahme-Position gebracht. In dieser Position wird das untere Ende des Profilstechers verengt und die Probe (Abbildung 7e) mit Hilfe manueller Ziehgeräte entnommen oder ausgegraben.

Abbildung 7: Wardenaar-Profilstecher a) arretiert, b) Arretierung gelöst, c) oben geöffnet, d) komplett geöffnet und e) mit einer Torfprobe



Quelle: U. Dettmann

5.1.1.5 Stechzylinder

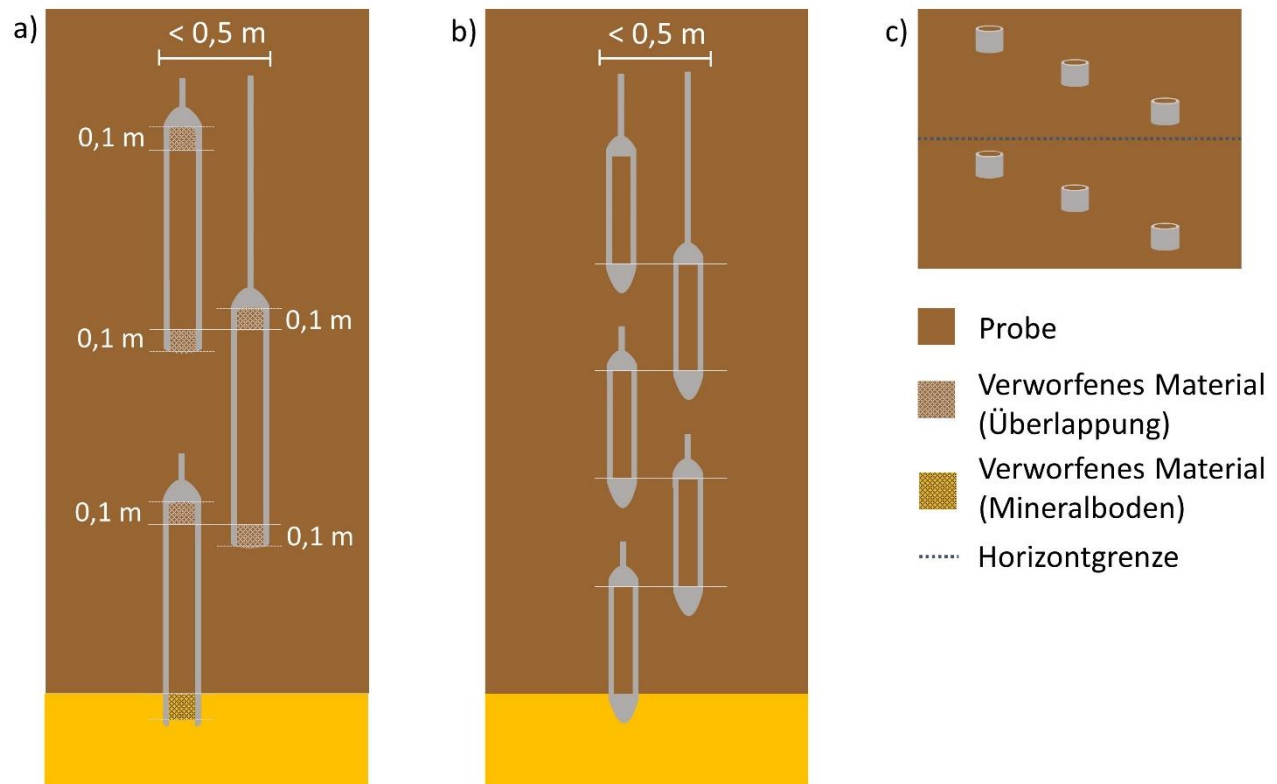
Stechzylinder (hier: $\varnothing$: 7,2 cm, Höhe: 6 cm, Volumen: 244 cm³) kommen sowohl für die horizontbezogene Bestimmung der Trockenrohdichte und der bodenhydraulischen Eigenschaften (Kapitel 5.3.4.1) als auch – bei Bedarf – für die Probenahme an den Beprobungspunkten zum Einsatz. In diesem Fall sollte die Beprobung mit Stechzylindern in dreifacher Wiederholung je Horizont und je Beprobungspunkt erfolgen. Die Stechzylinder werden hierbei auf die gesamte Horizontmächtigkeit (Abbildung 9c) verteilt. Die Stechzylinder werden vertikal eingeschlagen und im Anschluss ausgegraben (Abbildung 8a und b). Danach wird das Material vorsichtig entlang der Ober- und Unterkante des Stechzylinders abgeschnitten (Abbildung 8c). Falls die Stechzylinderprobe eine Störung (z.B. Löcher) aufweist, ist eine wiederholte Probennahme notwendig. Zum Abschluss der Probenahme wird das gesamte Material der drei Stechzylinder in einen Probenbeutel überführt.

Abbildung 8: a) Vertikale Beprobung des obersten Horizontes mittels Stechzylinder, b) Ausgraben der eingeschlagenen Stechzylinder und c) Säuberung der entnommenen Stechzylinder



Quelle: Thünen-Institut

Abbildung 9: Schematische Darstellung der Beprobung mit a) Stechbohrer, b) Klappsonde und c) Stechzylinder



Quelle: eigene Darstellung

5.1.1.6 Edelman-Bohrer (Flügelbohrer)

Mit dem Edelman-Bohrer (Abbildung 10) können gestörte Bodenproben (Länge ca. $0,20 \text{ m}$) entnommen werden. Wie der Stechbohrer und die Klappsonde kann der Edelman-Bohrer für die Probennahme in größeren Tiefen verlängert werden. Für die Probenahme muss bis zur oberen Grenze der Beprobungstiefe vorgebohrt werden. Im Anschluss wird der Bohrer unter Druck 20 cm in den Boden gedreht und rausgezogen. Das entnommene Material wird in einen Probenbeutel überführt.

Abbildung 10: Edelman-Bohrer (Flügelbohrer) a) ohne und b) mit Torf-Probe



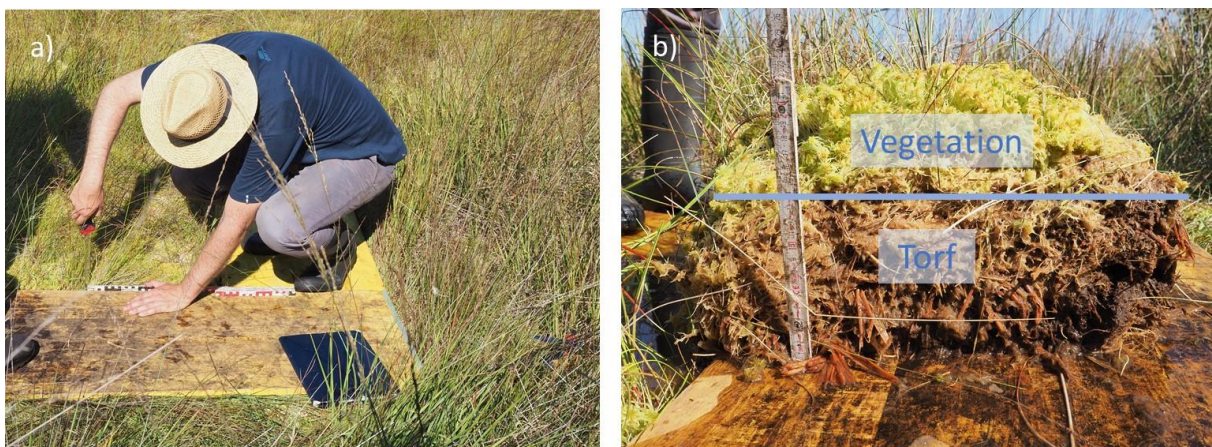
Quelle: U. Dettmann und S. Frank

5.1.1.7 Blockentnahme

Bei der Blockentnahme wird ein Torfblock aus dem Oberboden geschnitten oder gesägt. Die Länge und Breite des Blockes sollten dabei in etwa mit der Größe der verwendeten Transportkisten (im Falle des Moorbodenmonitorings 0,20 m x 0,15 m x 0,10 m; Breite x Länge x Höhe) übereinstimmen, so dass die Blöcke durch die Kiste nicht komprimiert werden. Ist der zu beprobende Horizont mächtiger als die Kiste hoch, wird der Horizont auf mehrere Kisten aufgeteilt, wobei bei der Dokumentation auf die korrekte Horizontzuordnung zu achten ist.

Vor der Blockentnahme sind die genauen Grenzen der auszuschneidenden Fläche zu markieren (Abbildung 11a). Entlang einer der langen Schnittkanten wird ein Loch ausgehoben, durch das später die Blockentnahme erfolgt. Im Anschluss wird der Block von oben ausgeschnitten. Das Abschneiden an der Unterseite des Blockes erfolgt über das nebenanliegende Loch. Nachdem der Block abgetrennt und geborgen ist (Abbildung 11b), wird die Vegetationsschicht (vitalen Moos, Gräser etc.) mit einer Schere vom Torf abgetrennt. Anschließend wird der Block vorsichtig in die Transportkiste überführt.

Abbildung 11: a) Entnahme eines Torfblockes auf einer wiedervernässten Fläche mit Hilfe eines Messers und b) entnommener Torfblock



Quelle: U. Dettmann

5.1.1.8 Sediment-Probennehmer

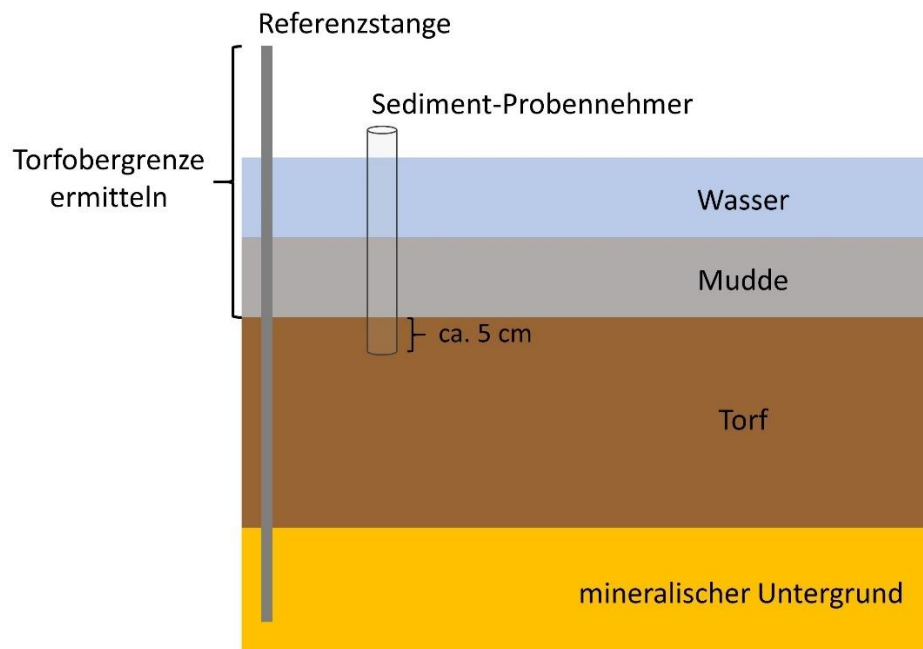
An überstauten Standorten insbesondere mit rezenter Muddebildung oder mit sehr flüssigen Torfen können Sediment-Probennehmer (Eijkelkamp, Giesbeek, Niederlande) zum Einsatz kommen. Die Probenahmestelle sollte nicht durch vorhergehendes Betreten gestört und ein Abstand zum Beprobungspunkt von einer Armlänge eingehalten werden.

Abbildung 12a zeigt einen Sediment-Probennehmer (Eigenbau). Dieser besteht aus Plexiglasrohren (0,057 m $\varnothing$) variabler Länge (0,50 m, 1,00 m oder 1,50 m) sowie einem Stopfen und einem Stempel. Eine während der Beprobung installierte Stange dient als Tiefenreferenz (Abbildung 13). Das Plexiglasrohr wird durch den zu beprobenden Horizont bis mindestens 0,05 m in den folgenden Horizont (gewachsener Torf) gedrückt. Anschließend wird das Plexiglasrohr mit einem Stopfen am oberen Ende verschlossen und langsam an die Wasseroberfläche gebracht. Kurz vor Erreichen der Wasseroberfläche wird der Stempel in das untere Ende des Probennehmers gedrückt und dann das Plexiglasrohr herausgeholt. Das Plexiglasrohr wird nun für ca. 15 Minuten stehen gelassen, damit durch die Störung in Suspension gebrachte Partikel sedimentieren können. Im Anschluss wird die Probe dekantiert (Abbildung 12b und c). Hierzu wird der obere Stopfen entfernt und der Stempel soweit in das Plexiglasrohr gedrückt bis das Probenmaterial an der Rohroberkante angelangt ist. Zur Bestimmung des Volumens wird die Mächtigkeit der Probe im Rohr vermerkt (Anhang 5: Protokoll Beprobungspunkte), da Stauchung und Streckung berücksichtigt werden müssen, insbesondere wenn die Grenze zum unterliegenden Horizont nicht deutlich ausgeprägt ist. Der Probentransport sollte in einem wasserdichten Probengefäß erfolgen.

Abbildung 12: a) Sediment-Probennehmer (Plexiglasrohr) mit Stopfen und Stempel, b) Probe mit überschüssigem Wasser und c) Muddeprobe



Quelle: S. Frank

Abbildung 13: Schematische Darstellung der Beprobung rezenter Mudden mit dem Sediment-Probennehmer

Quelle: eigene Darstellung

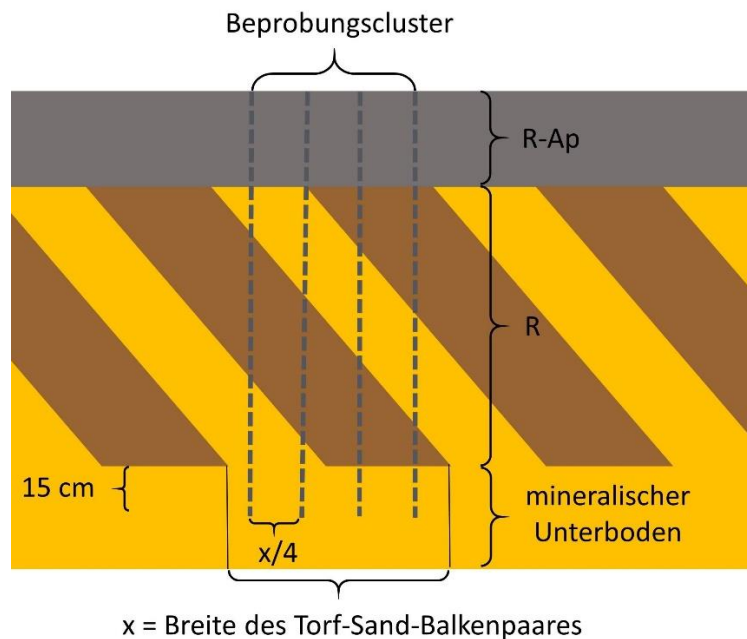
5.1.2 Position der Beprobungspunkte

Entsprechend Beprobungsschema (Abbildung 1):

Die Positionierung und Nomenklatur der Beprobungspunkte orientiert sich am Raster der Geländehöhenvermessungen (Abbildung 1). Regeln für eine Verschiebung sind in Kapitel 5.1 (S. 20) beschrieben. An Standorten mit ausgeprägtem Mikorelief (Bult-Schlenke-Komplexe, Horste) oder anthropogener Oberflächenprofilierung (z.B. Kartoffeldämme) werden die Beprobungspunkte ausschließlich in Schlenken bzw. Tiefenbereichen positioniert.

Treposole:

Bei Treposolen (Sandmisch- und Tiefpflugsanddeckkulturen) wird auf Grund ihres Profilaufbaus ein abweichendes Beprobungsdesign angewandt. Dieses lehnt sich an Untersuchungen von Mineralboden-treposolen an (Alcántara et al., 2016). Aufgrund der aus Voruntersuchungen bekannten hohen räumlichen Heterogenität von Treposolen aus organischen Böden wurde die Anzahl der Bohrcluster jedoch von fünf (Alcántara et al., 2016) auf 12 erhöht. Dabei werden 10 Bohrcluster entsprechend Abbildung 1 und die beiden zusätzlichen Bohrcluster (Kürzel „k“ und „l“) zufällig auf dem Schlag verteilt. Ein Cluster besteht aus vier Beprobungspunkten, die rechtwinklig zur Pflugrichtung angeordnet werden, so dass ein Paar Torf- und Sandbalken repräsentativ beprobt wird (Abbildung 14). Der Abstand der Beprobungspunkte innerhalb eines Clusters entspricht einem Viertel der mittleren Breite der Torf- und Sandbalkenpaare und wird aus dem Bodenprofil ermittelt. Entsprechend wird die Anzahl der Beprobungspunkte im Vergleich zum Standardvorgehen auf 48 erhöht. Bei einer Nachbeprobung werden die Bohrcluster 11 und 12 wieder zufällig auf dem Schlag verteilt, während Cluster 1 bis 10 dem Standarddesign entsprechen.

Abbildung 14: Schematische Darstellung der vier Bohrungen eines Bohrclusters an Treposol-Standorten

Quelle: eigene Darstellung

5.1.3 Auswahl des geeigneten Probenahmegerätes

Die volumengetreue Beprobung bis zur Moorbasis stellt eine große Herausforderung dar. Die Auswahl des geeigneten Probenahmegerätes ist von vielen Faktoren (z.B. Torfeigenschaften, Wassergehalt, Beprobungstiefe) abhängig. An den meisten Standorten kann eine volumengetreue Beprobung bis zur Moorbasis nur durch die Kombination verschiedener Probenahmegeräte sichergestellt werden.

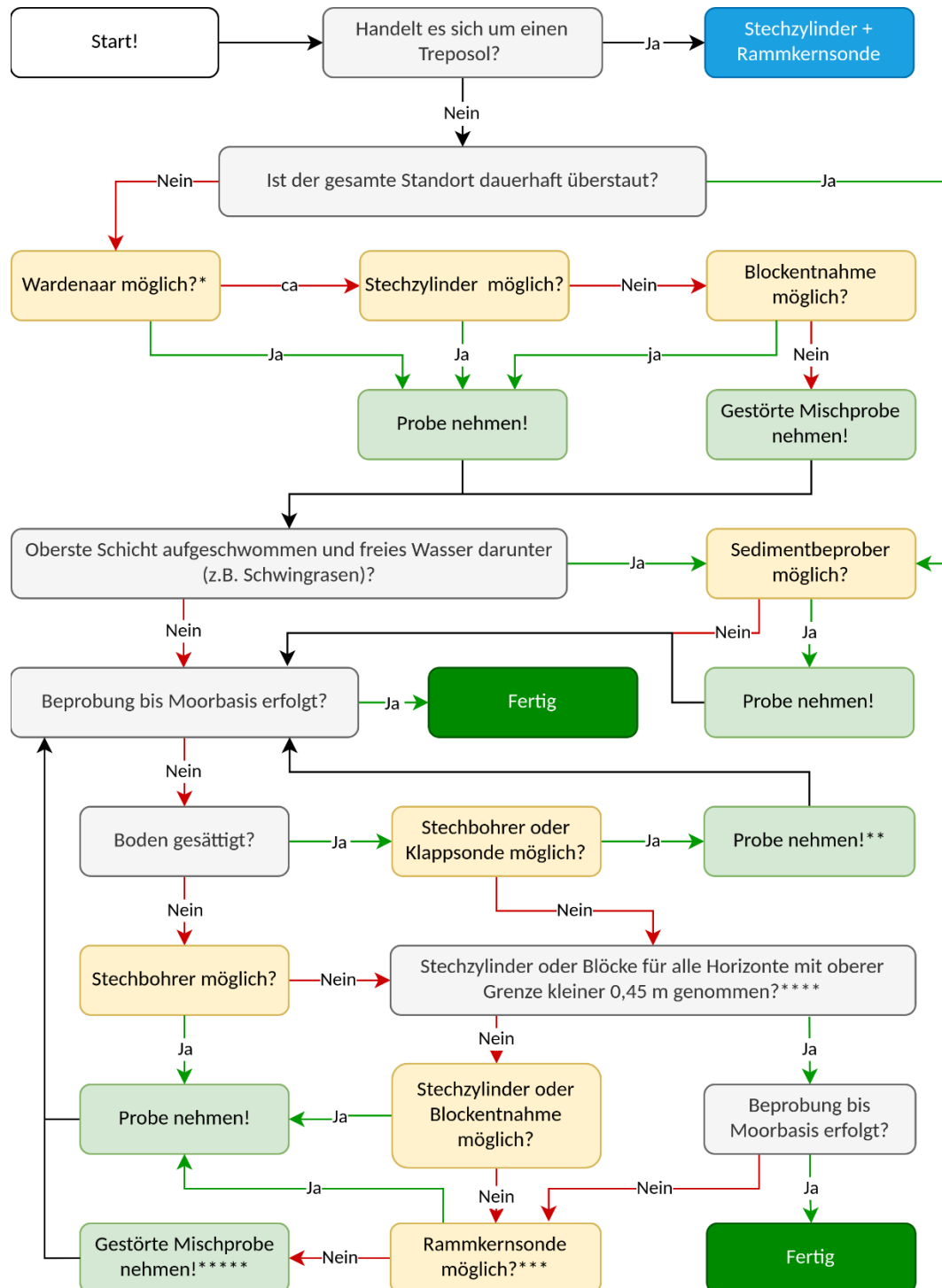
Die Wahl des geeigneten Probenahmegerätes für verschiedene Profiltiefen kann anhand des Entscheidungsbaums (Abbildung 15) getroffen werden, der für alle Standorttypen zur Anwendung kommen kann. Zur Beprobung von Treposolen kommen grundsätzlich Stechzylinder in Kombination mit der Rammkernsonde zum Einsatz (Kapitel 5.1.4, S. 33, Bereich: Ausnahme Treposole). Nachdem ausgeschlossen wurde, dass es sich bei dem Standort um einen Treposol handelt, ist das erste Auswahlkriterium **„Ist der gesamte Standort dauerhaft überstaut?“**. Falls dies nicht der Fall ist, sollte zunächst versucht werden, mit dem Wardenaar-Profilstecher eine Probe zu entnehmen. An entwässerten und landwirtschaftlich genutzten Standorten mit stark zersetzten, aggregierten oder verdichteten Oberböden kann von vornherein davon ausgegangen werden, dass eine volumengetreue Beprobung mit dem Wardenaar-Profilstecher nicht möglich ist. In diesem Fall stellt die Beprobung mit Stechzylindern die erste Alternative dar. An naturnahen und wiedervernässten Standorten mit schwach zersetzten Torfen und stark ausgeprägter rezenter Wurzelbildung folgt als nächste Option die Entnahme eines ungestörten Bodenblockes (Blockentnahme). Falls beide Beprobungsmethoden scheitern, muss eine gestörte Mischprobe entnommen werden. Wenn nur eine gestörte Mischprobe genommen wird, kann anhand der Horizont-Substrat-Kombination oder von Pedotransferfunktionen (z.B. Wittnebel et al., 2021a) die Trockenrohdichte aus dem C_{org} -Gehalt geschätzt werden.

Als nächstes Entscheidungskriterium erfolgt die Auswahl **„Oberste Schicht aufgeschwommen und freies Wasser darunter (z.B. Schwimmrasen)?“**. Bei Verneinung wird abgeklärt, ob die bisherige **„Beprobung bis zur Moorbasis erfolgt?“** ist. Im weiteren Entscheidungsbaum erfolgt diese Überprüfung nach jeder Beprobung, da erst beim Erreichen der Moorbasis die Probenahme beendet ist. Bei der Beprobung tieferer Schichten sollte der Stechbohrer die erste Wahl sein. Falls sichergestellt ist, dass der **„Boden gesättigt?“** ist, kann eine volumengetreue Beprobung alternativ mit der Klappsonde erfolgen. Bei erfolgreicher Beprobung wird im

Entscheidungsbaum wieder auf „**Beprobung bis Moorbasis erfolgt?**“ gesprungen. Ist die Beprobung weder mit Stechbohrer noch mit Klappsonde möglich, wird alternativ auf Stechzylinder oder Blockentnahme ausgewichen, solange die Frage „**Stechzylinder oder Blöcke für alle Horizonte mit oberer Grenze kleiner 0,45 m genommen?**“ verneint wird. Falls in diesem Fall die Stechzylinder Beprobung oder die Blockentnahme scheitern, kann eine Rammkernsondierung durchgeführt werden. Als letztes Mittel bleibt die Entnahme einer gestörten Mischprobe mit dem Edelman-Bohrer (Kapitel 5.1.1.6). Unabhängig vom verwendeten Probenahmegerät wird an dieser Stelle des Entscheidungsbaumes wieder auf „**Beprobung bis Moorbasis erfolgt?**“ gesprungen und so oft wiederholt bis die Moorbasis erreicht ist.

Wenn im Entscheidungsbaum die Fragen „**Ist der gesamte Standort dauerhaft überstaut?**“ oder „**Oberste Schicht aufgeschwommen und freies Wasser darunter (z.B. Schwimmrasen)?**“ mit ja beantwortet werden, wird eine Beprobung mit dem Sediment-Probennehmer angestrebt. Bei erfolgreicher Sedimentbeprobung wird im Entscheidungsbaum auf „**Beprobung bis zur Moorbasis erfolgt?**“ gesprungen. Das Gleiche gilt für den Fall, dass keine rezenten Mudden oder flüssige Torfe vorliegen, bzw. die Probenahme mit dem Sediment-Probennehmer scheitert.

Abbildung 15: Entscheidungsbaum zur Auswahl des geeigneten Probenahmeegeräts



* Bei stark zersetzten, aggregierten oder verdichteten Böden kann der Wardenaar Bohrer ausgeschlossen werden

** Der Stechbohrer ist zu bevorzugen. Bei großen Moormächtigkeiten kann aus Zeitgründen auf die Klappsonde gewechselt werden, wenn sichergestellt ist, dass der Boden gesättigt ist

*** Je nach Moormächtigkeit 1 oder 1,5 m lange Sonde verwenden

**** Horizonte, die innerhalb der oberen 0,45 m beginnen, wenn möglich komplett mit Stechzylindern beproben

***** z.B. mit dem Edelman-Bohrer (Flügelbohrer)

5.1.4 Durchführung

Vor der Beprobung werden alle Beprobungspunkte markiert und die Lage mittels GNSS eingemessen (Kapitel 9, S. 61). Anschließend ist z.B. mit einem Markierungsstäbchen der Nullpunkt festzulegen, um einen konsistenten Tiefenbezug pro Beprobungspunkt zu gewährleisten. An landwirtschaftlich genutzten Standorten wird als Referenzhöhe die Geländeoberkante (bei Grünland ohne Wurzelfilz) verwendet. Die Mächtigkeit des Wurzelfilzes wird zusätzlich an allen Beprobungspunkten notiert. An naturnahen oder vernässten Standorten kann hingegen der Übergang von Vegetation zu Torf als Referenzhöhe definiert und vor der Probenahme markiert werden. Im Anschluss erfolgt die Wahl des geeigneten Probenahmeegerätes (siehe 5.1.3, S. 30) und die Probenahme. An sensiblen Standorten werden Schalungsbretter mit vorgebohrten Löchern für die Probenahme verwendet, um Schäden an Torf und Vegetation zu verringern.

Der erste Meter wird horizontbezogen beprobt und angesprochen. Hierbei beträgt die Mindestmächtigkeit eines separat zu beprobenden Horizontes analog zum Bodenprofil 0,065 m (siehe Kapitel 5.3.3, S. 37). Flachere Horizonte werden dem überliegenden Horizont zugeordnet oder als Lage innerhalb eines Horizontes vermerkt und mit diesem zusammen beprobt. Ab dem zweiten Meter werden die Proben tiefenbezogen entnommen und in der Tiefe zwischen 1,00 m bis 1,50 m in 0,25 m lange Abschnitte und ab 1,50 m Tiefe in 0,50 m lange Abschnitte aufgeteilt. Im ersten Meter erfolgt die Bodenansprache analog zum Bodenprofil (siehe Kapitel 5.3.3, S. 37) unter Verwendung eines standardisierten Protokolls (Anhang 5: Protokoll Beprobungspunkte) je Beprobungspunkt. Ab dem zweiten Meter wird die Ansprache auf Torfart (Haupt- und Nebenbestandteile) und Zersetzungsgrad bzw. Muddeart oder Textur reduziert. Bei Torfartenwechsel in der Tiefenstufe wird die dominierende Torfart als Hauptbestandteil und die Grenze des Wechsels dokumentiert. Wird die Beprobung mit Stechbohrer, Klappsonde, Wardenaar-Profilstecher oder Rammkernsonde durchgeführt, wird der Kern nach erfolgter Ansprache horizont- bzw. tiefenstufenweise geschnitten (Abbildung 16a). Bei Proben aus der Rammkernsonde müssen ggf. Stauchungs- oder Streckungskorrekturen durchgeführt werden. Im Anschluss wird die Probe in Probenbeutel umgepackt (Abbildung 16b) und mit Etiketten (außen und innen im Beutel) versehen. Dabei darf kein Probenmaterial verloren gehen, da dies einen direkten Einfluss auf die Bestimmung der Trockenrohdichte hat.

Abbildung 16: a) Horizontabgrenzung innerhalb des ersten Meters einer mit dem Stechbohrer entnommenen Probe und b) Überführung der Probe aus dem Stechbohrer in eine Plastiktüte



Die Beprobung endet mit Erreichen des mineralischen Untergrundes. Mineralbodenanteile in der Probe werden abgeschnitten und verworfen. Ist der Übergang zwischen dem Moorkörper und dem mineralischen Untergrund (z.B. C- oder G-Horizont oder fossiler Oberboden) nicht eindeutig zu erkennen, sollte zusätzlich eine Probe des Übergangsbereiches genommen werden.

Ausnahme Treposol

Treposole werden auf Grund des besonderen Horizontaufbaus abweichend beprobt. Das Profil dieser Böden lässt sich in einen R-Ap und einen R-Horizont unterteilen (Abbildung 14). Der R-Ap Horizont wird pro Beprobungspunkt (vier pro Beprobungscluster) (siehe Kapitel 5.1.2, S. 29) mit je Stechzylindern, d.h. 12 Stechzylinder pro Beprobungscluster beprobt. Der R-Horizont wird jeweils als Ganzes mittels Rammkernsonde beprobt und im Gegensatz zum Bodenprofil (vgl. Kapitel 5.3.3, S. 37) nicht weiter unterteilt. Die Untergrenze des R-Horizontes wird aus dem Bodenprofil übernommen. Aufgrund der räumlichen Heterogenität endet die Bohrung in Anlehnung an Alcántara et al. (2016) 0,15 m unterhalb der Untergrenze des R-Horizontes, um eventuelle tiefer gepflügte Bereiche innerhalb der Untersuchungsfläche nicht zu verpassen. Diese 0,15 m werden separat beprobt. Die Proben aus den 4 Beprobungspunkten (R-Ap, R-Horizont, mineralischem Unterboden) eines Bohrclusters werden horizontweise zu einer Mischprobe zusammengeführt. Entsprechend liegen am Ende 12 Mischproben je Horizont pro Untersuchungsfläche vor.

5.2 Moormächtigkeit

Die Bestimmung der Moormächtigkeit erfolgt in 20-facher Wiederholung entsprechend Abbildung 1. Dazu werden 10 Messungen an den Beprobungspunkten (siehe Kapitel 5.1.2, S. 29) und 10 weitere Messungen verteilt auf der Untersuchungsfläche durchgeführt und dokumentiert (Anhang 7: Protokoll Moormächtigkeit). Die Messung der Moormächtigkeit erfolgt i.d.R. mit der Moorpeilstange (DIN 19672-2:1968-04, Abbildung 17). Diese ist insbesondere auf Untersuchungsflächen mit sandigen oder kiesigen Substraten im Liegenden der Torfe oder Mudden besonders geeignet, da die konische Verdickung nicht in diese Schichten eindringt. Auf Untersuchungsflächen mit weichen (schluffig-tonigen) Substraten im Liegenden sollte der Stechbohrer (0,03 m $\varnothing$) oder die Klappsonde verwendet werden, da die Moorpeilstange diese Grenze nicht erfassen kann. Auf flachen und stark degradierten Untersuchungsflächen (kleiner 1,00 m) kann alternativ ein Bohrstock (Pürckhauer) verwendet werden. Wie bei den Probenahmepunkten wird auch bei der Bestimmung der Moormächtigkeit die Mächtigkeit von – sofern vorhanden – Wurzelfilz (Grünland) oder vitalen Torfmoosen separat dokumentiert.

An Standorten mit rezenter Muddebildung (oder anderen flüssigen Substraten an überstauten Standorten) wird an allen Punkten neben der Moormächtigkeit auch die Mächtigkeit dieses Horizonts mittels Sediment-Probennehmer bestimmt (Kapitel 5.1.1.8).

Da eine Bestimmung der Moormächtigkeit auf Untersuchungsflächen mit Treposolen nicht möglich ist, wird auf die Erhebung verzichtet und durch eine höhere Anzahl an Rammkernsondierungen (siehe Kapitel 5.1.4) ausgeglichen.

Abbildung 17: Moorpeilstange mit beweglichem Griff und konisch zulaufender Spitze



Quelle: U. Dettmann

5.3 Profilgrube

Die Profilgrube dient der bodenkundlichen Charakterisierung der Untersuchungsfläche. Gleichzeitig werden aus dem Bodenprofil horizontbezogen sowohl Stechzylinderproben für bodenphysikalische Untersuchungen als auch gestörte Proben für bodenchemische Analysen entnommen.

5.3.1 Position der Profilgrube

Die Profilgrube wird nahe des Zentralpunktes angelegt (Abbildung 1). In dieser Position ist die Anfälligkeit des Profilaufbaus gegenüber räumlichen Trends reduziert. Die ebenfalls in der Nähe der Flächenmitte durchgeführten kontinuierliche Messungen der Geländehöhen und der Moorwasserstände sowie die im Gelände aufgenommenen Daten der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit können so dem Bodenprofil zugeordnet werden.

Insbesondere auf naturnahen und wiedervernässten Standorten können durch häufige Querung der Untersuchungsfläche zur Profilgrube Trittschäden entstehen. Diese sollten durch das Auslegen von Brettern oder das Tragen von Schneeschuhen minimiert werden. Ist dies nicht möglich, so kann ein Bodenprofil in Ausnahmefällen an den Rand der Untersuchungsfläche gelegt werden.

Bei der Anlage der Profilgrube ist sicherzustellen, dass

- keine Störungen (z.B. Gruppen, Aushub) vorhanden sind,
- die Position mittels Metalldetektor freigemessen wurde,
- und keine Dränrohre in oder unterhalb der Grube liegen.

Sollte einer der oben genannten Punkte zutreffen oder nicht vollständig ausgeschlossen werden können, so wird die Profilgrube ca. 5 m in nördliche bzw., falls nicht möglich, in östliche Richtung verlegt. Für den neu gewählten Punkt gelten die gleichen Bedingungen. Sind Dränrohre auf der Untersuchungsfläche vorhanden, so wird die Profilgrube in der Dränbeetmitte angelegt.

5.3.2 Durchführung

Die Profilgrube wird entsprechend der in Abbildung 18 schematisch dargestellten Form unter Beachtung der Hinweise in der bodenkundlichen Kartieranleitung (KA5, Ad-Hoc-AG Boden, 2005) angelegt. Die Profilgrube wird, sofern möglich, bis in eine Tiefe von 1,00 m unter Geländeoberfläche aufgegraben und beprobt. Folgende Ausnahmen können auftreten:

- Bei Moormächtigkeiten kleiner 1,00 m reicht die Profilgrube mindestens bis ca. 0,20 m in den mineralischen Untergrund (z.B. C- oder G-Horizont). Der erste Mineralbodenhorizont wird ebenfalls beprobt.
- Das Anlegen einer Profilgrube ist nicht oder nur eingeschränkt möglich (überstaute Flächen, sehr schnell nachlaufendes Wasser, das nicht abgepumpt werden kann). In diesem Fall wird die Profilgrube so tief wie möglich angelegt. Die Horizontansprache und Probenahme in Horizonten unterhalb der Profilgrubentiefe wird mit geeigneten Probenahmegeräten durchgeführt.
- Treposole: Da eine vollständige Beprobung der Torfbalken notwendig ist, muss die Profilgrube bis mindestens 0,20 m unter den R-Horizont reichen (s.u.).

Nach bodenkundlicher Kartieranleitung (Ad-Hoc-AG Boden, 2005) wird eine Aufgrabung bis 1,20 m empfohlen. Da das Anlegen einer entsprechend tiefen Profilgrube an Moorstandorten erfahrungsgemäß häufig auch dann nicht möglich ist, wenn Wasser aus der Profilgrube abgeschöpft und -gepumpt wird, und da sich auch andere Monitoringprogramme wie die Bodenzustandserhebung Landwirtschaft auf eine Profiltiefe von 1,00 m beschränken (Jacobs et al., 2018), wird hier von dieser Empfehlung abgewichen. Dennoch erfolgt auch bei Moormächtigkeiten von mehr als 1,00 m eine Charakterisierung und Beprobung sämtlicher Torf- und Muddehorizonte und somit die Bestimmung der Torf- und Moormächtigkeit bis einschließlich des ersten Mineralbodenhorizonts (z.B. C- oder G-Horizont, fossiler Oberboden etc., siehe Kapitel 5.3.4). Das Vorgehen zur Wahl des geeigneten Probenahmegerätes für die Horizontansprache und Beprobung in größeren Tiefen ist ausführlich in Kapitel 5.1.3 (S. 30) beschrieben. Im Gegensatz zu den Beprobungspunkten erfolgt am Profil eine horizontbezogene Ansprache und Beprobung für den kompletten Moorkörper.

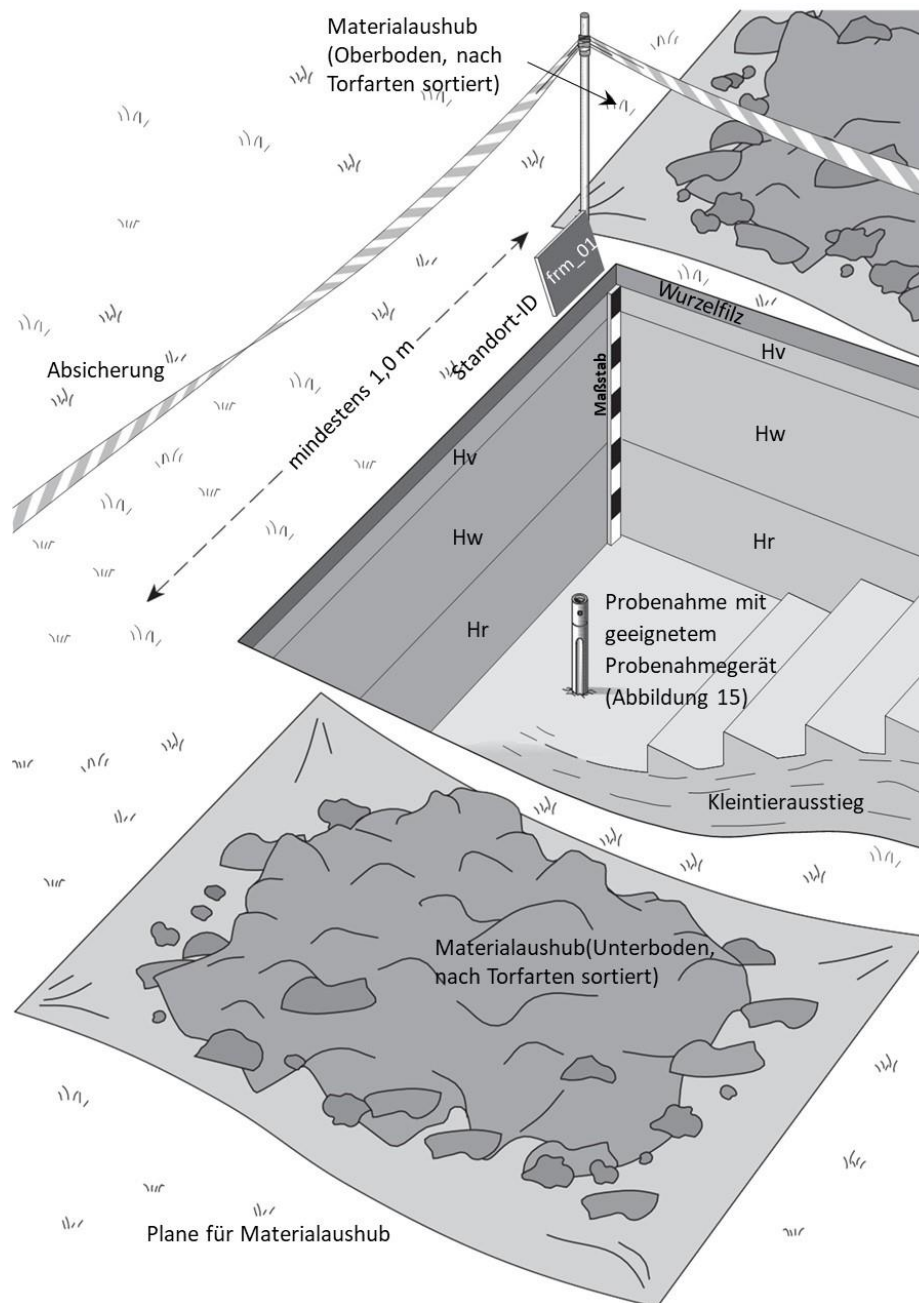
Für die Ansprache des Bodenprofils wird die nördliche Wand der Profilgrube verwendet. Um eine Beeinflussung der Proben für bodenphysikalische Untersuchungen auszuschließen, darf dieser Bereich nicht betreten werden. Unter gleichzeitiger Abbildung der Grauskala, des Maßbandes, des Datums sowie der Standortbezeichnung (Tafel) wird von der Profilwand ein Profilfoto erstellt (Anforderungen siehe Kapitel 10, S. 62). Ein weiteres Foto sollte ohne Standortbezeichnung aufgenommen werden.

Insbesondere bei unterliegendem Sand und hohen Grundwasserständen besteht das Risiko eines hydraulischen Grundbruchs, so dass zusätzliche Sicherungsmaßnahmen ergriffen werden müssen (Anpassen der Tiefe und sehr sparsames Abpumpen der Profilgrube, kein Aufenthalt aller Personen in der Profilgrube, ggf. Abstützen der Grubenwände). Nach Beenden der Arbeiten wird die Profilgrube unter Berücksichtigung der natürlichen Lagerung der Torf- und weiteren Substrate verfüllt. Die Lage der Profilgrube wird mit einem Unterflurmarker verortet und per GNSS eingemessen (Kapitel 9, S. 61).

Ausnahme Treposol

Bei Treposolen ist die eine horizontbezogene Beprobung nur mit Stechzylindern sinnvoll möglich. Entsprechend muss die Profilgruppe (ggf. mit einem Minibagger) mindestens 0,15 m unter die Balkenuntergrenze (R-Horizont) ausgehoben werden und sollte ca. vier bis fünf Torf-Sandbalkenpaare umfassen. Bei tiefen Treposolen ist die Profilgrube u. U. deutlich tiefer als 1,00 m, so dass hier besonders sorgfältig auf das Risiko eines hydraulischen Grundbruchs geachtet werden muss.

Außerdem ist es nicht in allen Fällen möglich, die nördliche Wand für die Profilaufnahme zu nutzen, da die Profilgrube für eine repräsentative Beprobung und die Feststellung der Breite des Torf-Sandbalkenpaares (Abbildung 14) rechtwinklig zur Pflugrichtung angelegt werden muss.

Abbildung 18: Anlage der Profilgrube

Quelle: Geologischer Dienst Nordrhein-Westfalen; verändert

5.3.3 Bodenansprache

Die Ansprache der Horizonte und des Bodentyps erfolgt nach bodenkundlicher Kartieranleitung (KA5, Ad-Hoc AG Boden, 2005, Anhang 6: Protokoll Bodenprofil). Auch wichtige Änderungen, die mit Einführung der KA6 eintreten, sollten nach Möglichkeit bereits bei der Ansprache berücksichtigt werden (z.B. neue Horizonte für Torfe und Mudden sowie angepasste Übergangs-, Verzahnungs- oder Abweichungshorizonte und daraus folgende neue Bodentypen wie Abmoore oder Muddemoore). Die Aufnahme startet unterhalb des Wurzelfilzes (Grünland) bzw. der lebenden Vegetation an nassen Standorten. Die wichtigsten horizontbezogenen Aufnahmegrößen im Gelände sind:

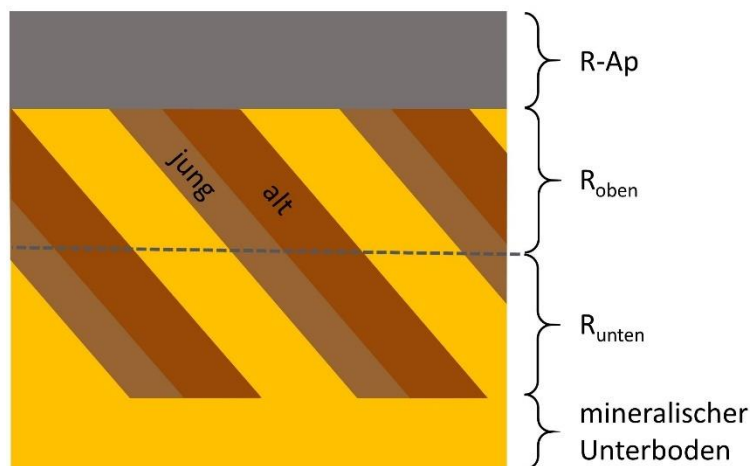
- Mächtigkeit

- Torf- bzw. Muddeart mit Haupt- und Nebenbestandteilen, dabei sehr hilfreich: „Steckbriefe Moorsubstrate“ (Meier-Uhlherr et al., 2015)
- Zersetzungsgrad nach von Post (10-stufige Skala, von Post, 1924)
- Farbe (verbal und nach Munsell-Tafel)
- Carbonatgehalt
- pH-Wert: mit geeigneter Messkette (z.B. SenTix®SP; WTW, München, Deutschland) direkt in der Profilwand gemessen, nur in ausreichend feuchten Horizonten möglich
- hydromorphe Merkmale inklusive Nachdunklung insbesondere wassergesättigter Horizonte
- Gefüge aller Horizonte
- Durchwurzelung

Aufgrund der Höhe der beim Moorbodenmonitoring verwendeten Stechzylinder beträgt die Mindestmächtigkeit eines Horizonts für eine Beprobung 0,065 m. Die Aufnahme eines eigenständigen Horizontes, z.B. mineralische Zwischenschichten oder zwischenliegende Mudden kann auch bei geringeren Mächtigkeiten erfolgen, wenn die Zwischenschicht stark abweichende bodenchemische und -physikalische Eigenschaften vermuten lässt. Innerhalb eines ansonsten homogenen Torfhorizontes befindliche organische Lagen (abweichende Torfart) mit einer geringeren Mächtigkeit als 0,065 m werden als Lage innerhalb dieses Horizontes beschrieben.

Bei Treposolen werden Torf- und Sandbalken getrennt beschrieben und jeweils in einer eigenen Zeile des Protokolls notiert. Dies ist notwendig, um den Sand- und Torfbalken separat Probennummern zuweisen zu können. Zusätzlich wird der R-Horizont mittig in einen oberen und einen unteren R-Horizont geteilt (Abbildung 19). Der Torfbalken des R-Horizontes wird zusätzlich in einen „alten“ (ehemals tiefere Torfhorizonte) und „jungen“ Bereich (ehemals obere Torfhorizonte) unterteilt, wenn innerhalb des Torfbalkens verschiedene Torfe erkennbar und durch eine ausreichende Mächtigkeit gekennzeichnet sind (Abbildung 19). Gleiches gilt für den Mineralbalken, sofern in diesem die ehemaligen Mineralbodenhorizonte klar zu trennen sind. Ein ähnliches Vorgehen kann auch für weitere Beimengungen (z.B. stark ausgeprägte Almkalke) notwendig sein.

Abbildung 19: Schematische Darstellung der Unterteilung des R-Horizontes von Treposolen in einen oberen und unteren sowie in einen alten (ehemals unten liegende Torfe) und einen jungen (ehemals oben liegende Torfe) Bereich

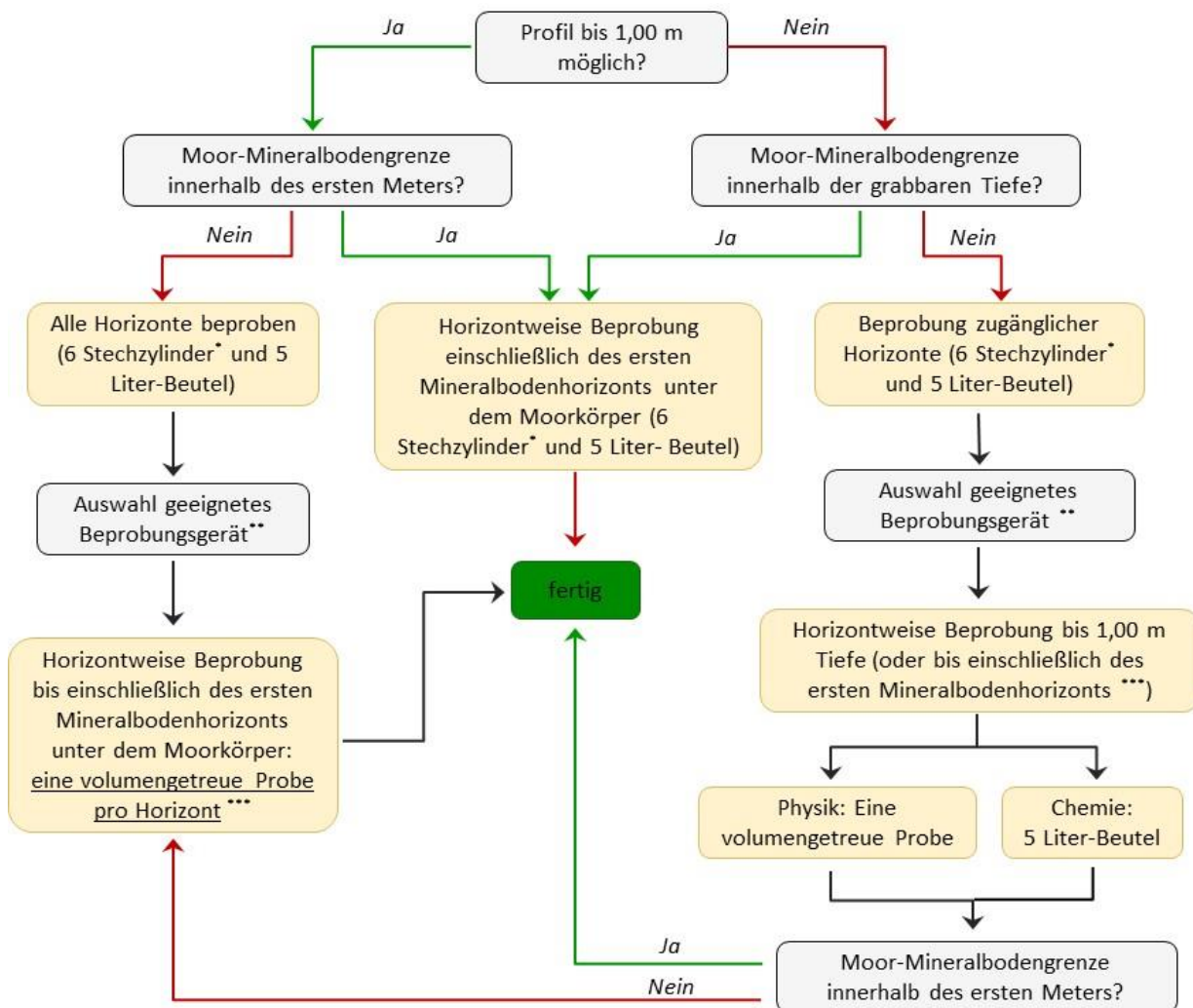


Quelle: eigene Darstellung

5.3.4 Probenahme

Die Probenahme aus dem Bodenprofil erfolgt grundsätzlich horizontbezogen. Der Wurzelfilz sowie die lebende Vegetation werden vor der Beprobung des obersten Horizontes entfernt. Horizonte kleiner 0,065 m werden zwar gesondert aufgenommen, jedoch nicht beprobt, da aufgrund der Höhe der Stechzylinder eine Beprobung erst ab einer Mindestmächtigkeit von 0,065 m möglich ist. Eine sorgfältige Beschriftung und Etikettierung, die eindeutig den Horizonten zugeordnet werden kann, ist entscheidend für eine fehlerarme Auswertung der Daten. Das Vorgehen bei der Beprobung in Abhängigkeit von Tiefe der Profilgrube und der Moor-Mineralbodengrenze ist in Abbildung 20 dargestellt. Bei Treposolen werden Torf- und Sandbalken entsprechend der Ansprache (Abbildung 19) getrennt beprobt.

Abbildung 20: Beprobung des Bodenprofils in Abhängigkeit von Standortbedingungen und Tiefe der Moor-Mineralbodengrenze



* oder entsprechend große Blöcke

** oder mehrere (siehe Entscheidungsbaum in Abbildung 15)

*** gestörte Probe (wenn volumengetreue Beprobung von Mineralboden nicht möglich: ca. 0,50 Liter)

Quelle: eigene Darstellung

5.3.4.1 Volumengetreue Proben (Bodenphysik)

Zur Bestimmung der Trockenrohdichte, der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit (Labor) sowie der Retentionseigenschaften (Kapitel 12.3, S. 67) werden bis zu einer Tiefe von 1,00 m bzw. bis einschließlich des ersten Mineralbodenhorizonts im Unterboden je Horizont sechs Stechzylinder entnommen. Die Stechzylinder werden vertikal entnommen und sollen dabei den gesamten Horizont repräsentieren (Abbildung 9c). Beim Einschlagen muss so vorsichtig und erschütterungsarm wie möglich vorgegangen werden, um keine künstlichen Risse o.ä. zu erzeugen. Bei weichen Substraten kann der Stechzylinder auch vorsichtig mit der Hand in den Boden gedrückt werden. Nach dem Ausgraben werden die Proben vorsichtig mit Brotmessern und Scheren auf die Stechzylindergröße geschnitten, wobei keine Löcher, Randeffekte oder Risse entstehen dürfen. Falls beispielsweise das Bodenmaterial nicht direkt an den Stechzylinder anschließt, muss die Probenahme wiederholt werden. Auch sollte ein Verschmieren der Poren an der Schnittfläche vermieden werden.

Ist eine Beprobung mittels Stechzylinder nicht möglich (z.B. bei strukturreichen Torfen mit rezenten Wurzeln an nassen Standorten), werden mindestens aus den ungesättigten Horizonten Torfblöcke (0,35 m x 0,25 m x 0,25 m; Breite x Länge x Höhe) entsprechend dem in Kapitel 5.1.1.7 (S. 27) beschriebenen Vorgehen entnommen.

Aus Horizonten innerhalb des ersten Meters, die weder mit Stechzylindern noch mit Blöcken beprobbar sind, werden volumengetreue Proben mit geeigneten Probenahmegeräten (siehe Kapitel 5.1.1, S. 21) entnommen (Abbildung 20). An diesen Proben kann nur die Trockenrohdichte bestimmt werden. Auf Wiederholungsproben wird verzichtet, da das beprobte Volumen (je nach Probenahmegerät und Horizontmächtigkeit) meist mehreren Stechzylindern entspricht und mit den Probenahmegeräten der gesamte Horizont abgedeckt wird.

Erläuterungen:

Die Anzahl der Stechzylinderproben richtet sich nach DIN EN ISO 11272:2017-07 „Bodenbeschaffenheiten – Bestimmung der Trockenrohdichte“ (DIN e.V., 2017), in der Wiederholungsmessungen an mindestens 6 Stechzylinderproben empfohlen werden. Diese Empfehlung wird für die Bestimmung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit übernommen, da DIN 19683-9:2012-07 „Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit in wassergesättigten Stechzylinderproben“ (DIN e.V., 2012) keine konkrete Anzahl an Wiederholungen nennt. Die vertikale Entnahme der Stechzylinder hat den Hintergrund, dass die hydraulischen Eigenschaften (Leitfähigkeit und Retentionseigenschaften) im Anschluss an die Labormessungen mit einem hydraulischen Modell parametrisiert werden, das den eindimensionalen vertikalen Fluss durch den Stechzylinder simuliert. Weitere Informationen dazu sind in Dettmann et al. (2014) und Dettmann et al. (2019) verfügbar. Des Weiteren findet an *allen* Moorbodenstandorten vertikaler Fluss durch Versickerung und kapillaren Aufstieg statt, während die Bedeutung horizontaler Wasserbewegung von den Standortbedingungen bzw. vom Wassermanagement abhängt. Die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit von Torfen ist anisotrop (z.B. Rosa und Larocque, 2008); eine entsprechende Messung kann aber aus Kapazitätsgründen im Moorbodenmonitoring nicht durchgeführt werden. Daneben werden durch die Messung der hydraulischen Leitfähigkeit im Gelände auch horizontale Komponenten erfasst (Kapitel 6.5).

5.3.4.2 Gestörte Proben (Bodenchemie)

Bis zu einer Tiefe von 1,00 m bzw. inklusive dem ersten mineralischen Horizont unterhalb des Moorkörpers werden aus jedem Horizont ca. 5 Liter Probenvolumen entnommen, an dem bodenchemische Kennwerte (siehe Kapitel 12.4, S. 69), ggf. die Textur sowie der permanente Welkepunkt bestimmt werden. Unterhalb einer Tiefe von 1,00 m werden volumengetreue Proben in einfacher Wiederholung für die Bestimmung der Trockenrohdichte und bodenchemischer Kennwerte bis inklusive des ersten mineralischen Horizontes unterhalb des Moorkörpers entnommen (Abbildung 20). Wenn eine volumengetreue Beprobung des ersten mineralischen Horizonts nicht möglich ist, kann auf den Edelman-Bohrer zurückgegriffen werden.

Die Entnahme gestörter Proben von Untersuchungsflächen ohne oder mit flacher Profilgrube erfolgt ebenfalls aus Bohrkernen. Hier sind ggfs. mehrere Bohrungen notwendig, um die erforderliche Menge Probenmaterial bis in eine Tiefe von 1,00 m zu erhalten. Die Beprobung für Tiefen unterhalb 1,00 m erfolgt wie bei Untersuchungsflächen, an denen eine Profilgrube bis 1,00 m angelegt werden kann (Abbildung 20).

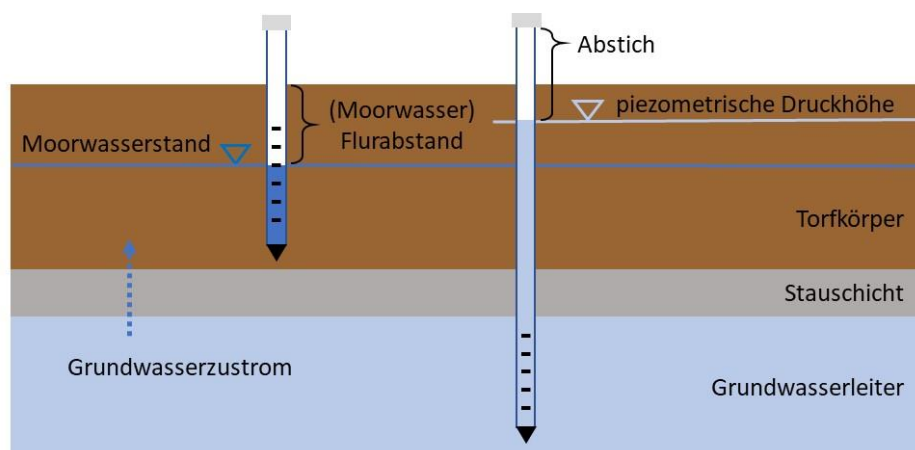
6 Hydrologie

Untersuchungen zur Hydrologie umfassen an allen Standorten die kontinuierliche Messung der Moorwasserstände und die Erfassung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit. Wenn relevant für das Verständnis der hydrologischen Verhältnisse der Untersuchungsfläche, werden auch Graben- und Grundwasserstände gemessen. Für alle Wasserstandsmessungen kommen Pegeldatenlogger (Kapitel 6.4) zum Einsatz, da aufgrund des Umfangs des Messnetzes regelmäßige manuelle Messungen unmöglich sind und mindestens tägliche Werte für die Datenauswertung benötigt werden (z.B. Ableitung von Parametern der intraanuellen Verteilung der Moorwasserstände als Erklärungsvariable für THG-Emissionen, Tiemeyer et al., 2016). Daneben steigt die Unsicherheit von Jahresmittelwerten der Moorwasserstände ab einem Messintervall von zwei Wochen deutlich an (Tiemeyer et al., 2017), was für eine Verwendung von Pegeldatenloggern spricht.

Bei der Messung von Wasserständen ist es wichtig, zwischen denen des freien ("phreatischen") Wasserstand (Moorwasserstand) und denen der unterliegenden tieferen Grundwasserkörper (piezometrische Druckhöhe, Grundwasserstand) zu unterscheiden. Wasserstände werden mit Bezug auf eine definierte Höhe (meist m über NN) angegeben. Stauhizonte im Torfprofil oder im Liegenden mit niedriger hydraulischer Leitfähigkeit (z.B. Mudden) können zu deutlichen Unterschieden zwischen phreatischer und piezometrischer Druckhöhe führen. Beim Vorliegen von Stauhizonten kann die piezometrische Druckhöhe über dem Moorwasserstand liegen, so dass sich Moorwasserstand und Grundwasserstand unterscheiden (Abbildung 21). Auch bei niedrigen Wasserständen im tieferen Grundwasser kann ein eigener Moorwasserstand im Torfkörper vorliegen (nicht dargestellt). Die Menge des zuströmenden bzw. versickernden Wassers hängt von der Druckdifferenz zwischen Moor- und Grundwasserstand sowie von der hydraulischen Leitfähigkeit und Mächtigkeit der Stauschicht ab.

Mit Grundwasserflurabstand (kurz: Flurabstand) wird der Abstand des Grundwasserspiegels zur Geländeoberkante bezeichnet. In diesem Dokument bezieht sich dies ausschließlich auf den Moorwasserstand und nicht auf den Wasserstand in tieferen Grundwasserkörpern. Bei manuellen Messungen z.B. mit dem Lichtlot wird der Abstich, d.h. die Distanz zwischen Pegeloberkante und Grundwasserspiegel bestimmt (Abbildung 21). Um diesen Wert in Moorwasserstand und Flurabstand umrechnen zu können, müssen die absolute Höhe des Pegels sowie der Abstand zwischen Gelände- und Pegeloberkante bekannt sein.

Abbildung 21: Moorwasserstand und Grundwasserstand (piezometrische Druckhöhe) bei gespannten Grundwasserverhältnissen



Quelle: eigene Darstellung

Der Flurabstand ist für die biogeochemischen Prozesse im Torfkörper sowie für das Pflanzenwachstum entscheidend, während der Wasserstand über NN eine Beurteilung z.B. der Fließrichtung oder der Auswirkung wasserbaulicher Maßnahmen wie Grabenanstau erlaubt. Daher wird im Moorbodenmonitoring vorrangig der Wasserstand im Torfkörper, d.h. der Moorwasserstand, erfasst und der Flurabstand über die Messung der (Bewegung der) Geländeoberkante abgeleitet. Für das Verständnis der geohydrologischen Einbettung in die Landschaft ist jedoch auch der Grundwasserstand eine relevante Größe.

6.1 Moorpegel (Moorwasserstandsmessstellen)

6.1.1 Position des Moorpegels

Die Installation des Moorpegels erfolgt in mindestens 3,00 m Abstand zur Profilgrube und bei gleichzeitiger Installation eines Seilzugsensors zur automatisierten Messung der Geländehöhen (siehe 7.3, Abbildung 32) in dessen unmittelbarer Nähe (etwa 0,50 bis 1,50 m Abstand zur Fixstange). Aus dem generellen Messdesign (Abbildung 1) ergibt sich, dass die Pegel nach Möglichkeit in der Mitte zwischen zwei Gräben und generell nach Möglichkeit in der Mitte der Untersuchungsfläche positioniert werden. Bei Vorhandensein von Dränrohren erfolgt die Installation in Dränbeetmitte (Abbildung 3), damit die Vergleichbarkeit der Ergebnisse über alle Standorte hinweg sichergestellt ist (siehe Kapitel 4.2, S. 18). Auch topographische Sondersituationen sollten vermieden werden. Bei unter Flur installierten Moorpegeln ist zusätzlich darauf zu achten, dass sie nicht unterhalb von Fahrspuren der Flächenbewirtschaftung liegen, um das Risiko des Herunterdrückens durch direktes Überfahren zu minimieren.

6.1.2 Einbauvarianten

Im Rahmen des Moorbodenmonitorings wird der Moorwasserstand über NN gemessen und anhand des Abstands zwischen Pegeloberkante und Geländeoberkante in Flurabstände umgerechnet. Entsprechend ergeben sich folgende Anforderungen an den Auf- und Einbau der Moorpegel:

- (1) Feste Verankerung im mineralischen Untergrund, so dass sich der Moorpegel nicht mit dem Moorkörper bewegen kann.
- (2) Kein Durchbohren von Stau- und Sperrschichten.
- (3) Ausreichend tiefe Verfilterung, um ganzjährig Moorwasserstände erfassen zu können. Diese Anforderung lässt sich nicht in allen Fällen mit Punkt 2 in Einklang bringen.
- (4) Messung des (zeitlich dynamischen) Abstands zwischen Pegel- und Geländeoberkante: Jährliche Messung im Rahmen der wiederkehrenden Geländearbeiten (Kapitel 11, S. 63), Nutzung der Daten des Seilzugsensors (Kapitel 7.3, S. 58) oder Einbau eines zweiten Pegeldatenlogger innerhalb eines Moorpegels („Doppelpegel“), der sich mit der Geländeoberfläche bewegt (Abbildung 22c).

Aus diesen Anforderungen, den Ansprüchen der Flächennutzer*innen sowie der geohydrologischen Situation ergeben sich verschiedene Einbauvarianten der Moorpegel.

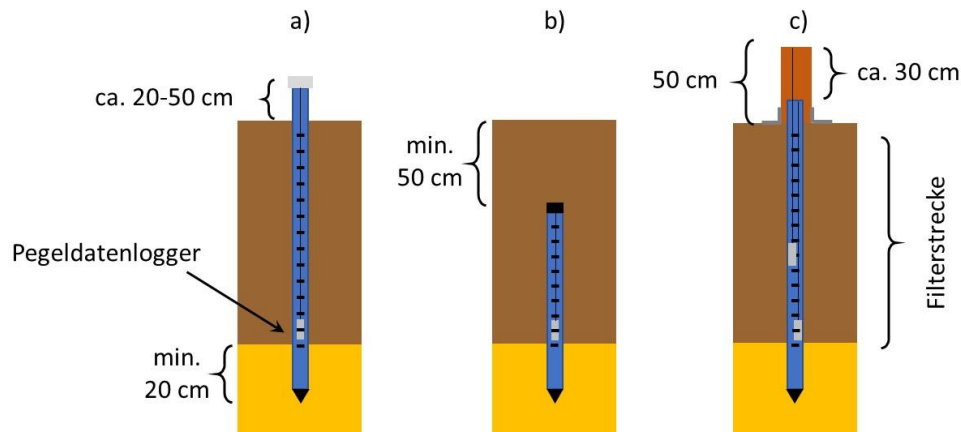
6.1.2.1 Pegeltypen

Beim Moorbodenmonitoring kommen drei Pegeltypen zum Einsatz (Abbildung 22), die grundsätzlich in allen geohydrologischen Situationen verwendet werden können:

- Über Flur verbauter Moorpegel (Standard) (Abbildung 22a)
- Unter Flur verbauter Moorpegel (Abbildung 22b)
- „Doppelpegel“: Druckdifferenzmessung mit zwei Drucksensoren (Abbildung 22c)

Die Wahl von Rohrlänge, Filterstrecke und -tiefe und Art der Verankerung hängt bei allen Pegeltypen von der geohydrologischen Situation ab (Abbildung 24).

Abbildung 22: Pegeltypen: a) über Flur verbauter Moorpegel, b) unter Flur verbauter Moorpegel und c) Doppelpegel (Pegel- und Filtertiefe dargestellt für geohydrologische Situation „Moor- entspricht Grundwasserstand“, nicht maßstabsgetreu)



Quelle: eigene Darstellung

Standardpegel

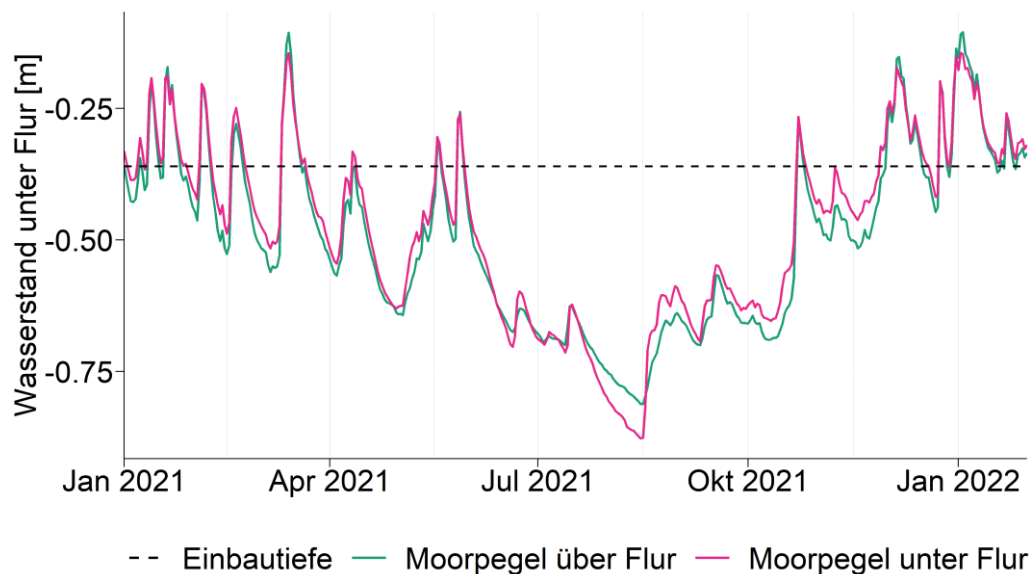
Das Pegelrohr wird mindestens 20 cm im mineralischen Untergrund verankert und Rohrlänge bzw. Filtertiefe so gewählt, dass der Pegel (voraussichtlich) auch in trockenen Sommern nicht trockenfällt (Abbildung 22a). Die Pegeloberkante endet etwa 0,20 bis 0,50 m oberhalb der Geländeoberkante. Weiter herausragende Pegel können z.B. durch Tiere leichter beschädigt werden, während nur kurz über der Geländeoberkante endende Pegel insbesondere an nassen Standorten einwachsen können. Auch ist die Verwendung eines „Doppelpegels“ bei einem weit herausragenden Pegelrohr nur schwer zu realisieren (Erläuterungen s.u.).

Unter Flur verbauter Pegel

An Standorten, an denen Installationen über Flur nicht erwünscht sind, können Moorpegel auch unter Flur installiert werden, um landwirtschaftliche Arbeitsabläufe nicht zu stören und den Moorpegel vor Beschädigung zu schützen. Der Ausbau endet mindestens 0,50 m unterhalb der Geländeoberfläche (Abbildung 22b).

Um zu prüfen, ob eine Installation unter Flur im Vergleich zu Standardpegeln zu systematischen Abweichungen des gemessenen Moorwasserstands führt, wurden an einem tiefgründigen Grünlandstandort zwei Moorpegel in einem Abstand von ca. 4,00 m unterschiedlich installiert (über Flur vs. unter Flur; Abbildung 22a und b). Messungen über ein Jahr zeigen, dass sich die aus beiden Einbauvarianten gewonnenen Daten kaum unterscheiden. Dies gilt sowohl für nasse Perioden mit Wasserständen oberhalb der Oberkante des unter Flur installierten Moorpegels sowie für trockene Perioden mit Wasserständen unterhalb der Oberkante des unter Flur installierten Moorpegels (Abbildung 23). Bei unter Flur installierten Moorpegeln sollte das Auslesen der Pegeldatenlogger zu Zeitpunkten erfolgen, an denen der Moorwasserstand unterhalb der Oberkante der Messstelle liegt, um verwertbare Abstiche zu bekommen. Ist ein Auslesen nur in Perioden mit flurnahen Moorwasserständen möglich, so ist nach dem Aufgraben eine Ruhezeit von 2 Tagen einzuhalten. Erst im Anschluss sollte eine Abstichsmessung erfolgen.

Abbildung 23: Vergleich der Moorwasserstände zwischen eines über Flur und unter Flur installierten Moorpegels



Quelle: eigene Darstellung

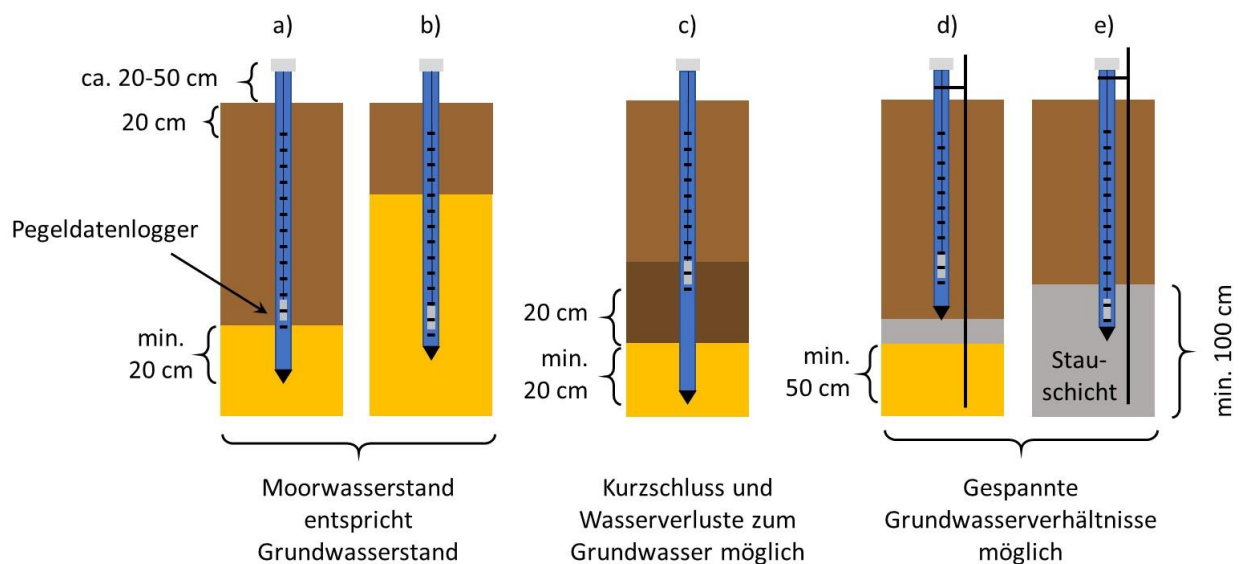
Doppelpegel

An nassen Standorten, an denen mit starker Oszillation gerechnet werden kann und kein Seilzugsensor installiert wird (Kapitel 7.3, S. 58), kann der Standardpegel um einen zweiten Drucksensor erweitert werden (op de Beek et al., 2018). Hierfür wird über den installierten Moorpegel ein nach oben verschlossenes KG-Rohr (ca. 0,16 m Ø, Länge 0,50 m) gestülpt und z.B. mit Zeltheringen in der Lage fixiert (Abbildung 22c). Das KG-Rohr liegt auf der Mooroberfläche lose auf und kann sich frei mit der Geländeoberfläche mitbewegen. Die Vorrichtung darf zu keinem Zeitpunkt auf die Pegelkappe aufsetzen, wobei an naturnahen Standorten eine Oszillation von bis zu 0,30 m erwartet werden kann (Howie und Hebda, 2018). Bei sehr trockenen Verhältnissen während des Einbaus kann die Differenz zwischen KG-Rohr und Pegelkappe geringer als die dargestellten 0,30 m sein, da ein weiteres Absinken der Geländeoberkante unwahrscheinlich ist. An dem KG-Rohr wird ein zusätzlicher Pegeldatenlogger befestigt und in das Pegelrohr eingelassen. Aus der Differenz der gemessenen Wasserstände bzw. der Drücke lässt sich die Bewegung der Geländeoberfläche und somit auch der Flurabstand zeitlich hochaufgelöst erfassen, ohne dass ein Seilzugsensor installiert werden muss.

6.1.2.2 Geohydrologische Situation

Die geohydrologische Situation und der Schichtaufbau entscheiden über die Wahl von Filtertiefe, Rohrlänge und Verankerung. Die geohydrologische Situation wird aus dem Profilaufbau sowie aus im Rahmen der Vorbereitung der Standorteinrichtung z.B. aus Literatur oder von regionalen Moorexpert*innen eingeholten Informationen abgeleitet. In Bezug auf die Installation von Moorpegeln werden Standorte als „tiefgründig“ begriffen, an denen zu erwarten ist, dass der Moorwasserstand auch in Trockenjahren ganzjährig im Torfkörper steht.

Abbildung 24: Schematische Darstellung des Einbaus von Moorpegeln bei verschiedenen geodyrologischen Bedingungen und Schichtaufbauten (nicht maßstabsgetreu)



Quelle: eigene Darstellung

Moorwasserstand entspricht Grundwasserstand

Wenn keine Unterschiede in der hydraulischen Leitfähigkeit der Moorbasis und des Liegenden zu erwarten sind, d.h. wenn der Grundwasserstand dem Moorwasserstand entspricht, hängt die Wahl der Filterstrecke und -tiefe lediglich vom (erwarteten) minimalen Moorwasserstand ab. Bei ausreichend tiefgründigen Verhältnissen empfiehlt es sich dennoch, die Filterstrecke ca. 0,20 m über der Moorbasis enden zu lassen. Bei tiefgründigen Standorten wird der Moorpegel etwa 0,20 m in den mineralischen Untergrund eingebracht, um Schwankungen des Pegelrohres zu vermeiden (Abbildung 24a).

Bei flachgründigen Standorten muss die Filterstrecke des Pegels bis in den mineralischen Untergrund reichen, um ein sommerliches Trockenfallen zu vermeiden (Abbildung 24b). Auch bei Treposolen wird der Pegel entsprechend tief, d.h. bis unter den R-Horizont (Tiefumbruchshorizont) ausgebaut. Die Einbautiefe sollte an die örtlichen Grundwasserstände angepasst werden, so dass die jahreszeitliche Dynamik des Grundwasserstandes erfasst werden kann.

Moorwasserstand liegt über dem Grundwasserstand

Mehr Aufmerksamkeit erfordern Standorte, an denen sich aufgrund niedriger hydraulischer Leitfähigkeiten im Unterboden ein eigener Moorwasserstand ausgebildet hat, der über dem regionalen Grundwasserstand liegt. Ein typisches Beispiel sind tiefgründige Hochmoorstandorte, deren Moorbasis Schwarztorf bildet (Abbildung 24c). Auf Untersuchungsflächen dieses Typs wird eine Bohrung durch den Moorkörper bis mindestens 0,20 m in den mineralischen Untergrund abgeteuft. Die Filterstrecke des Pegels liegt ausschließlich im Torfkörper und endet mindestens 0,20 m über der Torf-Mineralboden-Grenze, um einen hydraulischen Kurzschluss zu vermeiden. Die Filterstrecke sollte aber so tief wie möglich platziert werden. Dennoch muss bei flachgründigen Standorten u.U. ein Trockenfallen des Pegels im Sommer akzeptiert werden.

(Potenziell) gespannte Grundwasserverhältnisse

An Standorten mit Stauschicht (z.B. Kalk- oder organische Mudden, bindige Mineralböden) und möglicherweise vorliegenden gespannten Grundwasserverhältnissen darf die Stauschicht nicht durchbohrt werden. Bei einer

Mächtigkeit der Stauschicht von weniger als 0,50 m wird der Moorpegel lediglich im Torfkörper installiert (Abbildung 24d). An flachgründigen Standorten mit Stauschicht muss entsprechend ein Trockenfallen des Pegels akzeptiert werden.

Bei mächtigeren Stauschichten ($> 0,50$ m) kann das Pegelrohr bis mindestens 0,20 m, maximal jedoch nicht mehr als bis in $1/3$ der Mächtigkeit der Stauschicht in diese reichen. Je nach Standortsituation wird der Moorpegel zusätzlich mit einer Schelle an einer tiefer in den Boden (mindestens 0,50 m in den Mineralboden oder 1,00 m in Mudden oder Tonen) eingetriebenen Metallstange fixiert (Abbildung 24e). Wenn der Moorwasserstand bis in quell- und schrumpffähige Schichten wie Mudden und Tone fallen kann, muss die Verankerung deutlich unter diese Schichten reichen.

6.1.3 Installation

Die Installation und Länge der zu installierenden Pegelrohre hängt von der Landnutzung, dem Aufbau des Moorkörpers und den geohydrologischen Gegebenheiten ab (Abbildung 24). Die Löcher für die Installation der Pegelrohre werden mit einem Stechbohrer oder Edelman-Bohrer (Flügelbohrer; siehe Kapitel 5.1.1.6, S. 26) (ca. 0,06 m $\varnothing$) gebohrt. Verwendet werden DN50 Voll- und Filterrohre (Schlitzweite von 0,75 mm, verschiedene Längen) aus Kunststoff mit einer Wandstärke von 4 mm. Fluchtstangen oder Unterflurmarker dienen der Auffindbarkeit bzw. dem Vermeiden von Beschädigungen durch Aktivitäten auf der Untersuchungsfläche. Insbesondere an beweideten Standorten, empfiehlt es sich, den Pegel einzuzäunen.

Über die Filterstrecke wird ein Filterstrumpf gezogen, um Verschlammung zu minimieren. Die Basis der Messstelle bildet eine kegelförmige Spitze, die in das unterste Voll- oder Filterrohr geschraubt wird. Der Moorpegel wird mit Verschlusskappen für den oberirdischen (Aluminium) oder unterirdischen (Kunststoff) Einbau nach oben verschlossen. Die Filterstrecke endet ca. 0,20 m unterhalb der Geländeoberfläche, bei unter Flur eingebauten Pegeln tiefer (Abbildung 24). Falls die Kombination von Rohrlänge und Moormächtigkeit dies nicht erlaubt, wird der entsprechende Teil der Filterstrecke mit Klebeband abgeklebt. Herablaufen von Oberflächenwasser am Pegelrohr wird durch sorgfältiges Verfüllen des Bohrlochrandes verhindert. Die verbauten Materialien sowie die Position der Filterstrecke werden entsprechend Anhang 9: Protokoll Moor- und Grabenpegel vermerkt.

6.2 Grundwasserstandsmessstelle

In Mooregebieten, in denen mit relevantem Grundwasserzustrom zu rechnen ist oder in denen gespannte Grundwasserkörper vorliegen, können nach Bedarf zusätzlich Grundwasserstandsmessstellen installiert werden. Die Installation und Abdichtung solcher Messstellen ist technisch aufwändiger als die Einrichtung von Moorpegeln und wird daher an externe Dienstleister vergeben.

6.3 Grabenpegel

Der Einbau von Grabenpegeln ist bei Grabenentwässerung sowie an Standorten notwendig, an denen durch wasserbauliche Maßnahmen in das Abflussverhalten und somit die Hydrologie des Standortes eingegriffen wird (z.B. Grabenanstau, Grabeneinstau, Unterflurbewässerung). An Standorten mit Rohrdränung werden Grabenpegel installiert, wenn zu erwarten ist, dass der Grabenwasserstand für längere Phasen, d.h. nicht nur für wenige Tage nach hohen Niederschlägen, über den Dränauslässen liegt. Neben Auskünften von Landwirt*innen kann auch die Vegetation im bzw. am Graben hilfreich für eine Einschätzung der potenziellen Abflusssituation sein.

6.3.1 Position der Grabenpegel

Die Installation der Grabenpegel erfolgt im Vorfluter auf Höhe des in der Fläche installierten Moorpegels. Bei der Installation sind Sonderpositionen im Vorfluter zu vermeiden (z.B. Taschen am Rand). Wenn möglich sollte der Pegel mittig in den Vorfluter verbaut werden.

Die Installation und Länge der zu installierenden Pegelrohre hängt vom Profilaufbau und den geohydrologischen Gegebenheiten ab (Abbildung 25). Insbesondere bei Gewässern, in denen höhere Fließgeschwindigkeiten zu erwarten sind, ist eine solide Verankerung im Untergrund entscheidend. Um Schäden durch eine mögliche Grabenräumung zu vermeiden, sollten die Pegel auffällig markiert werden. Verwendete Materialien unterscheiden sich nicht von den bei Moorpegeln verwendeten Pegelrohren (Kapitel 6.1, S. 42)) und werden zusammen mit Angaben zur Filterstrecke und -tiefe analog zum Moorpegel dokumentiert (Anhang 9: Protokoll Moor- und Grabenpegel).

6.3.2 Installation und Einbauvarianten

Zur Gewährleistung einer ausreichenden Standfestigkeit sollten Grabenpegel möglichst wenig über die Grabensohle hinausragen, aber so lang sein, dass ein Auslesen auch bei höheren Wasserständen noch bequem möglich ist. Auch ist ggf. eine zusätzliche Stabilisierung durch eine Metallstange sinnvoll (Abbildung 25).

Es treten verschiedene geohydrologische Situationen auf, die bei der Installation analog zu Kapitel 6.1 berücksichtigt werden müssen. Wenn die geohydrologische Situation es zulässt (keine gespannten Grundwasserverhältnisse und Stauschichten an der Grabensohle), sollte der Grabenpegel mindestens 0,20 m im mineralischen Untergrund verankert werden.

Grabenpegel in Vorflutern mit Torfschichten an der Sohle (Abbildung 25a):

Wenn der Grabenwasserstand dem Grundwasserstand entspricht (analog zu Abbildung 24a und b), kann die Filtertiefe bis in den mineralischen Untergrund reichen (analog zu Abbildung 24b). Wenn der Moorwasserstand – und damit der Grabenwasserstand – über dem Grundwasserstand liegt, ist ein Kurzschluss und Wasserverlust zum Grundwasser möglich (analog zu Abbildung 24c). Ein entkoppelter Grabenwasserstand kann auch mit der Zeit durch Sedimentation und der Entstehung einer Schicht mit geringerer hydraulischer Leitfähigkeit entstehen. In beiden Fällen sollte die Filterstrecke etwa 0,20 m oberhalb der Torf-Mineralboden-Grenze enden.

Gespannte Grundwasserverhältnisse und Stauschichten an der Grabensohle:

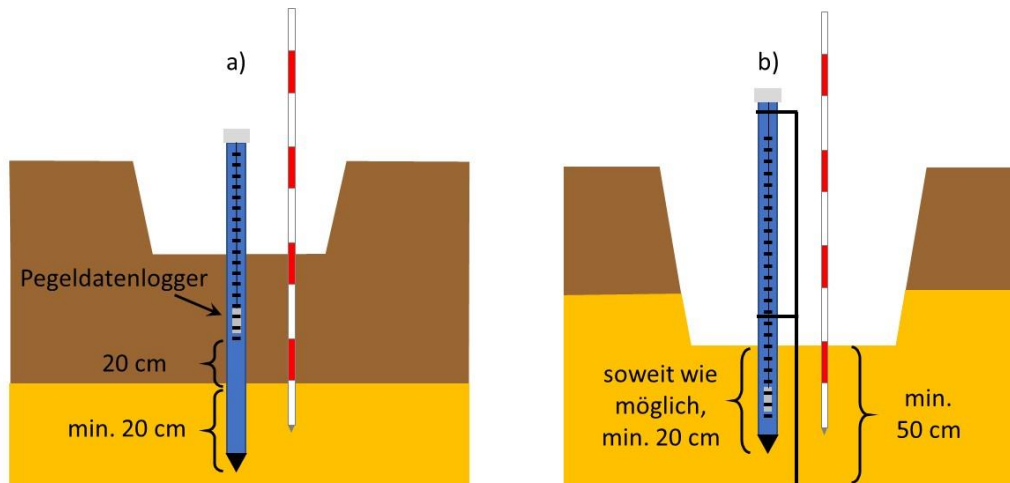
Ist mit gespannten Grundwasserverhältnissen zu rechnen, darf entsprechend dem Vorgehen bei der Installation von Moorpegeln die Stauschicht nicht durchbohrt und der Grabenpegel ausschließlich im Torfkörper bzw. bei mächtigen Stauschichten im oberen Teil der Stauschicht installiert werden (analog zu Abbildung 24d und e). Wenn der Aufbau eine sichere Verankerung Torf bzw. in der Stauschicht nicht zulässt, wird der Grabenpegel mit Schellen an einer entweder bis in den mineralischen Untergrund oder tief in die Stauschicht reichenden Metallstange fixiert.

Mineralboden mit direktem Kontakt zum Grundwasser an der Sohle (Abbildung 25b):

Dieser Fall tritt bei nicht-bindigen mineralischen Substraten an der Grabensohle auf. Für eine ausreichende Standfestigkeit des Grabenpegels sollte dieser mindestens 0,50 m in den mineralischen Untergrund reichen. Wenn der Graben zum Zeitpunkt der Installation trockengefallen ist, sollte bis unter den Wasserspiegel gebohrt und der Pegel entsprechend tief verfiltert werden, da bei direktem Kontakt des Grabens zum Grundwasser auch ein Wasserstand unterhalb der Grabensohle für das Verständnis der hydrologischen Verhältnisse des Standorts von Interesse ist. Da Bohren unter gesättigten Verhältnissen häufig schwierig zu realisieren ist (nasser Sand o.ä.

fällt aus dem Bohrer, Loch fällt zu), muss der Pegel im Zweifelsfalle ebenfalls mit einer Metallstange fixiert werden. Die Filterstrecke des Grabenpegels sollte bis in den mineralischen Untergrund reichen, um ein Trockenfallen zu verhindern.

Abbildung 25: Schematische Darstellung verschiedener Optionen für Grabenpegel: a) Torfschichten an der Grabensohle und b) Mineralboden an der Grabensohle und direkter Kontakt zum Grundwasser (nicht maßstabsgetreu)



Quelle: eigene Darstellung

6.4 Pegeldatenlogger

Es existieren zwei Typen von automatischen Pegeldatenloggern: Absolutdrucksensoren erfassen die Summe aus Wassersäule und atmosphärischem Druck, während Relativdrucksensoren eine Ausgleichskapillare besitzen und somit nur die Wassersäule messen. Relativdrucksensoren sind häufig präziser und haben den Vorteil, dass keine zusätzliche Messung des Luftdrucks zur Kompensation des Messsignals notwendig ist. Dennoch kommen im Moorbodenmonitoring Absolutdrucksensoren zum Einsatz, da diese kostengünstiger sind, eine Installation unter Flur möglich ist und ein Überfluten der Messstelle (und damit der Kapillare) nicht zu einem Ausfall führt. Für eine zeitlich hochaufgelöste Messung der Moor- bzw. Grabenwasserstände sollten folgende Anforderungen an die Datenlogger gestellt werden:

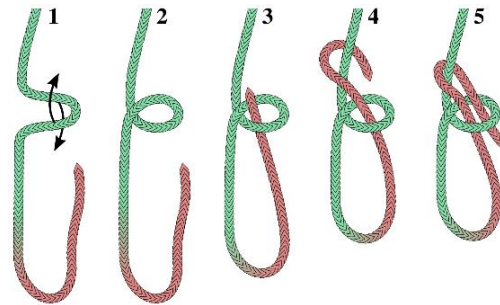
- Betriebstemperatur: zwischen 0-40°C
- Messbereich: zwischen 0-10 m Wassersäule
- Genauigkeit: +/- 0,5 cm Wassersäule
- Messauflösung: < 0,5 cm Wassersäule
- Batterielaufzeit von mindestens 5 Jahren bei einer stündlichen Messung
- Kapazität des internen Speichers von mindestens 50.000 Datensätzen
- Wenn möglich, interner Backup der gespeicherten Daten

Auf eine einheitliche Bezeichnung der Pegeldatenlogger über alle Standorte hinweg sollte geachtet werden. Werden auf der Fläche mehrere Pegel installiert, so ist auf eine eindeutige Bezeichnung (z.B. durch Verwendung von Zusätzen) der Pegeldatenlogger zu achten. Eine stündliche Messung ist ausreichend, um belastbare Tageswerte und die saisonale Dynamik der Moor- und Grabenwasserstände in ausreichender Auflösung erfassen zu können. Zur Vermeidung möglicher Sprünge durch die Umstellung von Sommer- auf Winterzeit, wird vor der Programmierung der Datenlogger die Uhrzeit mit dem Computer/Tablet abgeglichen und auf eine permanente

Verwendung der Winterzeit geachtet. Uhrzeit und Datum von Computer/Tablet muss ebenfalls mit einer Uhr (z.B. Handy) abgeglichen werden.

Der Pegeldatenlogger wird mit einer längenstabilen Schnur an einer in der Pegelkappe liegenden Einlegscheibe (Eigenbau aus Unterlegscheibe und Schäkel) befestigt. Der Knoten an der Schnur muss sowohl am Pegeldatenlogger als auch an der Einlegscheibe eine feste Schlaufe bilden (Abbildung 18).

Abbildung 26: Palstek-Knoten mit fester Schlaufe



Quelle: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Palstek_knoten.png; Lizenz: Attribution-ShareAlike 4.0 International (CC BY-SA 4.0)

Der Pegeldatenlogger sollte so tief wie möglich, aber mindestens 0,20 m oberhalb der Pegelsohle installiert werden. Wenn als unterstes Rohr ein Vollrohr verwendet wurde (z.B. bei Fixierung im unterliegenden Mineralboden, Abbildung 24c), darf sich die Messtiefe des Pegeldatenloggers nicht unterhalb der Filterstrecke befinden. Nach dem Einbau werden die Rohroberkante (Einlegscheibe) sowie sechs Geländehöhen nahe des Pegelrohrs mit Referenz zum Fixpunkt mit einem Nivelliergerät oder Tachymeter eingemessen (siehe Kapitel 7.2.2, S. 57).

Da der Moorwasserstand durch die Installation des Pegelrohrs abgesenkt wird, findet mindestens 24 Stunden nach dem Einbau bzw. idealerweise am Ende der Geländearbeiten die erste Stichtagsmessung mit dem Lichtlot statt. In dieser Zeit sollte der Wasserstand im Pegelrohr wieder auf das Ausgangsniveau angestiegen sein. Neben der Stichtagsmessung (Abstich) samt Datum und Uhrzeit wird der Abstand der Rohroberkante zur Geländeoberkante sowie Name und Seriennummer des installierten Pegeldatenloggers notiert (Anhang 9: Protokoll Moor- und Grabenpegel). Zur Funktionskontrolle des Pegeldatenloggers kann ein erstes Auslesen der Daten erfolgen. Ist zu diesem Zeitpunkt noch kein Wasser im Pegelrohr vorhanden, so wird dies ebenfalls im Protokoll vermerkt.

6.5 Gesättigte hydraulische Leitfähigkeit (Gelände)

Die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit (K_s -Wert) wird beim Moorbodenmonitoring im Gelände mittels Bohrlochversuchen bestimmt. Bei Bohrlochversuchen wird Wasser aus einem Bohrloch oder Brunnen entnommen bzw. diesen zugeführt (z.B. Baird et al., 2004). Mit dem gemessenen zeitlichen Verlauf des darauffolgenden Anstieges (oder Abfalls) kann die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit berechnet werden. Die Methode setzt voraus, dass die Zielhorizonte zum Messzeitpunkt wassergesättigt sind. Bei der Wahl der Messtiefe und der Interpretation der Ergebnisse gilt zu beachten, dass die resultierenden Leitfähigkeitswerte vom leitfähigsten und damit für den lateralen Zustrom entscheidenden Horizont bestimmt werden.

6.5.1 Position der Messpunkte

Auf jeder Untersuchungsfläche wird die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit in 3-facher Wiederholung ermittelt. Hierzu werden drei Punkte in einem Winkel von 120° innerhalb des ringförmigen Bereiches (Abbildung 1) um die Profilgrube platziert. Im Gegensatz zu den Beprobungspunkten werden die Messpunkte für die K_s -Werte nicht

über die gesamte Untersuchungsfläche verteilt, damit eine Zuordnung der Daten zu am Profil angesprochenen Horizonten und deren Eigenschaften möglich ist. Die Bohrlöcher dürfen weder auf einem Rasterpunkt der Geländehöhenvermessung (Kapitel 7.2.1) noch in einer Dauerbeobachtungsfläche des Vegetationsmonitorings (Kapitel 8.1) liegen. Ebenfalls sollten die Bohrlöcher, wenn möglich, in Dränbeetmitte angelegt werden. Da je nach aktuellem Moorwasserstand K_s -Werte unterschiedlicher Horizonte bestimmt werden können, wird der Versuch im Rahmen der jährlichen Routinearbeiten wiederholt. Dabei wird das erste Bohrloch zufällig, aber unter Aussparung der Rasterpunkte, innerhalb des vorgegebenen Bereiches positioniert und die weiteren zwei Punkte jeweils im 120° Winkel um den Zentralpunkt verteilt.

6.5.2 Versuchsdurchführung

6.5.2.1 Wahl der Messtiefe und Ausschlusskriterien

Bei der Wahl der Messtiefe, d.h. der Einbautiefe der Filterstrecke muss vor Beginn des Versuchs festgestellt werden, ob im Profil ein Wechsel der hydraulischen Leitfähigkeiten zu erwarten ist und in welchem Bereich sich der Ruhewasserstand befindet. Letzteres stellt insbesondere bei gering leitfähigen Substraten eine Herausforderung dar, da sich der Wasserstand im Bohrloch durch die Bohrung deutlich unter dem Ruhewasserstand befinden kann (Abbildung 27). Informationen zur Horizontierung sind aus Vorerkundung und Profilansprache bekannt, während der Ruhewasserstand über ein im Rahmen der Vorerkundung angelegtes Testbohrloch ermittelt wird. Im Optimalfall ist der Ruhewasserstand jedoch aus aktuellen Daten des Moorpegels bekannt. Wenn keine Informationen vorliegen, muss die Situation anhand des aktuellen Moorwasserstands, dessen Änderungsgeschwindigkeit und der Horizontierung eingeschätzt werden. Diese Informationen sind notwendig, um die Messwerte bestimmten Horizonten zuordnen zu können und eine Auswirkung von Stauschichten (insbesondere bei gespannten Grundwasserverhältnissen) auf die Messergebnisse zu vermeiden. Die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit ist sehr variabel. Als Vereinfachung können jedoch stark zersetzte Torfe, anmoorige Substrate, Organo- und Kalkmudden sowie Schluffe und Tone als gering leitfähig eingeschätzt werden. Sande, Kiese und gering zersetzte Torfe dagegen besitzen eine höhere hydraulische Leitfähigkeit. Der Zersetzungsgrad (von Post, 1924) ist hilfreich für die Entscheidung, in welcher Schicht die Filterstrecke eingebaut werden sollte. Wenn sich der Ruhewasserstand zum Zeitpunkt der Messung nicht im Torf befindet, kann unter Berücksichtigung der unten dargestellten Bedingungen alternativ der K_s -Wert des Liegenden aufgenommen werden. Generell lassen sich vereinfacht vier Fälle unterscheiden, wobei eine Schicht mehrere Horizonte umfassen kann:

- Gering leitfähige Schicht über hoch leitfähiger Schicht, Ruhewasserstand in gering leitfähiger Schicht (Abbildung 27a)
- Gering leitfähige Schicht über hoch leitfähiger Schicht, Ruhewasserstand in hoch leitfähiger Schicht, (Abbildung 27b)
- Hoch leitfähige Schicht über gering leitfähiger Schicht, Ruhewasserstand in gering leitfähiger Schicht, (Abbildung 27c)
- Hoch leitfähige Schicht über gering leitfähiger Schicht, Ruhewasserstand in hoch leitfähiger Schicht (keine Abbildung)

Wenn sich der Ruhewasserstand in einer gering leitfähigen Schicht befindet, darf der verfilterte Teil des Rohres nur in diese Schicht eingebracht werden und die Filterstrecke muss bis mindestens 0,15 m unter den Ruhewasserstand reichen (Abbildung 27a). Die Länge des unverfilterten Bereichs plus Spitze ist für die beim Moorbodenmonitoring verwendeten Pegelrohre dargestellt; andere Konstellationen sind denkbar. Wenn dies nicht gewährleistet werden kann, können je nach geohydrologischer Situation folgende Fehler auftreten: a) gespannte Grundwasserverhältnisse: Überschätzung des K_s -Wertes durch aufsteigendes Wasser, b) Moorwasserstand über Grundwasserstand: Kurzschluss und Unterschätzung der K_s -Werte wegen

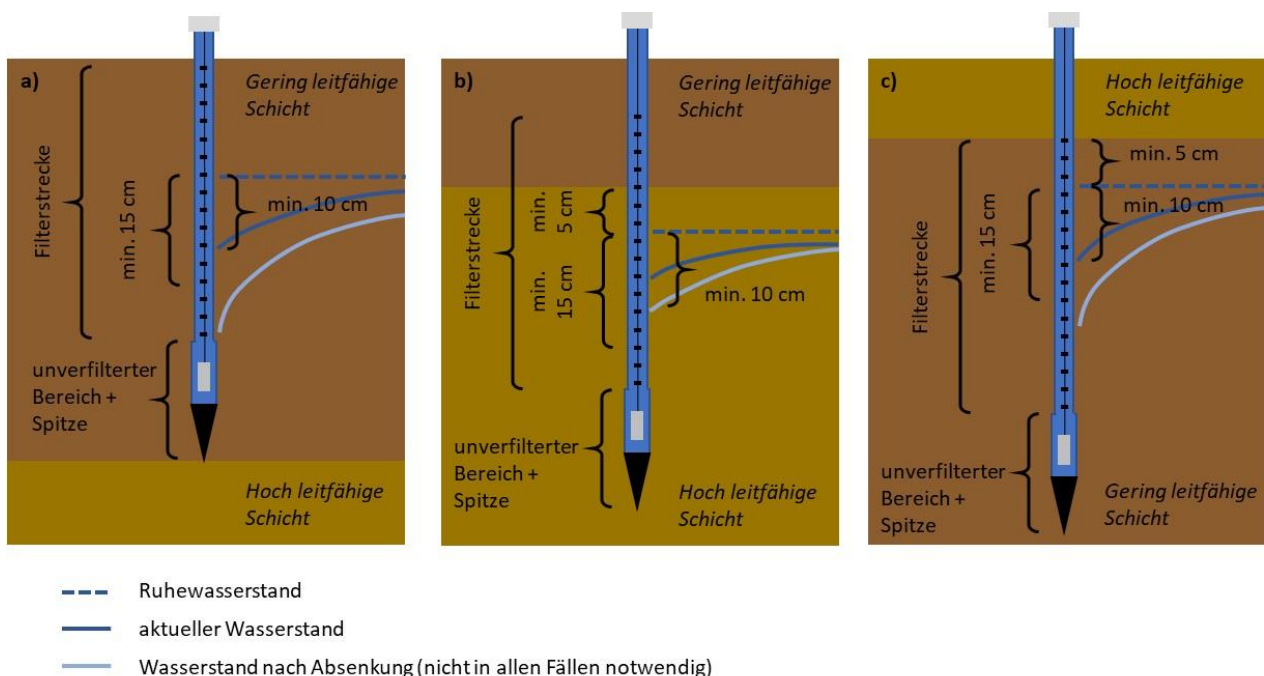
Wasserverlusten ins Liegende, c) Moorwasserstand entspricht Grundwasserstand: die hoch leitfähige Schicht dominiert die Zuströmung zum Rohr, so dass die gemessenen Werte einem falschen Horizont zugeordnet werden.

Wenn der Ruhewasserstand bei gleicher Konstellation der Schichten in der hoch leitfähigen Schicht liegt (Abbildung 27b), sollte der Ruhewasserstand mindestens 0,05 m unter dem Schichtwechsel liegen, damit eine klare Zuordnung der Messergebnisse möglich ist. Auch hier ist eine Filterstrecke von 0,15 m unter dem Ruhewasserstand notwendig.

Wenn sich die hoch leitfähige Schicht über der gering leitfähigen Schicht und der aktuelle Moorwasserstand in der gering leitfähigen Schicht befindet (Abbildung 27c), muss gewährleistet sein, dass sich auch der Ruhewasserstand in der gering leitfähigen Schicht befindet. Wenn dies nicht der Fall ist, würde der Versuch ein Mischsignal aufnehmen, das nicht korrekt zugeordnet werden kann. Entsprechend muss der Ruhewasserstand mindestens 0,05 m unter dem Schichtwechsel liegen und die Verfilterung nicht in die darüber liegende hoch leitfähige Schicht reichen.

Bei gleicher Konstellation der Schichten und einem Ruhewasserstand in der hoch leitfähigen Schicht (nicht dargestellt), muss ebenfalls eine Filterstrecke von 0,15 m unter dem Ruhewasserstand gewährleistet werden und sich dieser entsprechend mindestens 0,20 m über dem Schichtwechsel befinden (0,05 m „Sicherheitsabstand“ wie in Abbildung 27b und c). Sofern die Filterstrecke nicht fälschlicherweise in die gering leitfähige Schicht gesetzt wird, ist diese Konstellation jedoch unkritisch und wenig fehleranfällig.

Abbildung 27: Optionen zur Messung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit bei unterschiedlichen Kombinationen von Moorwasserständen und unterschiedlich leitfähigen Schichten



Quelle: eigene Darstellung

Wenn die beschriebenen Bedingungen nicht eingehalten werden können, weil sich der Moorwasserstand zu nahe an der Schichtgrenze befindet oder der Profilaufbau zu komplex ist (mehrere Stauhorizonte o.ä.), kann keine Messung durchgeführt werden. Des Weiteren kann die Messung nicht durchgeführt werden, wenn

- die Untersuchungsfläche überstaut ist,
- Niederschlag fällt und für die nächsten 24 Stunden Niederschlag angekündigt ist, der eine nennenswerte Änderung des Moorwasserstands erwarten lässt, oder

- bei gespannten Grundwasserverhältnisse das Risiko des Durchbohrens eines Stauhorizontes besteht.

6.5.2.2 Vorbereitung des Versuches

Da der Versuch je nach Torfeigenschaften zwischen 30 Minuten und mehreren Tagen dauern kann, muss der Zeitpunkt für die Messung passend gewählt werden. Ist das Profil hauptsächlich aus schlecht leitenden Torfen aufgebaut oder befindet sich der Ruhewasserstand innerhalb schlecht leitender Torfschichten (Abbildung 27a oder c), so ist der Versuch als eine der ersten Arbeiten auf der Untersuchungsfläche zu starten. Hingegen ist an Standorten mit sehr gut leitfähigen Torfen oder an flachgründigen Standorten mit sandigen Substraten im Liegenden darauf zu achten, dass während der Versuchsdurchführung kein Wasser aus der Profilgrube gepumpt wird, da dies die Messungen beeinflussen kann.

Die drei Bohrlöcher werden mit einem Edelman-Bohrer (ca. 0,06 m Ø) oder dem großen Stechbohrer (ca. 0,06 m Ø) abgeteuft und mit der passenden Kombination aus Voll- und Filterrohren (DN50, Schlitzweite 0,75 mm) versehen (Abbildung 27). Alle drei Rohre werden vor Versuchsbeginn mit Pegeldatenlogger ausgestattet, die so tief wie möglich in die jeweiligen Rohre gehängt werden. Dabei ist sicherzustellen, dass der Ruhewasserstand nicht unterhalb der jeweiligen Pegeldatenlogger liegt oder durch die durchzuführende Wasserstandsabsenkung darunter gerät. Werden Absolutdrucksensoren verwendet, so müssen die gewonnen Daten im Anschluss um den Luftdruck korrigiert werden, d.h. es muss ein Barometer verwendet werden. Dieses wird an einem sicheren Ort auf der Untersuchungsfläche für die Dauer des Versuches verstaut und seine Lage währenddessen nicht verändert. Vor dem Start der Messungen werden die Pegeldatenlogger und das Barometer zeitlich synchronisiert (Winterzeit!) und mit einem Messintervall von einer Minute gestartet. Auf einen gleichzeitigen Start der Logger zur nächsten vollen Minute ist hierbei zu achten.

6.5.2.3 Weiterer Versuchsablauf

Der Versuch kann unmittelbar gestartet werden. Wenn der aktuelle Wasserstand im Rohr durch die Abteufung zur Startzeit bereits um mindestens 0,10 m unter dem Ruhewasserstand liegt und nur langsam ansteigt, ist keine weitere Absenkung durch Wasserentnahme nötig. Das Startdatum sowie die Startzeit und der Startwasserstand des Versuches werden für jedes Bohrloch notiert (Anhang 10: Protokoll Gesättigte hydraulische Leitfähigkeit (K_s) Gelände). Wenn notwendig, wird im Anschluss der Wasserstand um mindestens 0,10 m, aber nach Möglichkeit nicht über Horizonttiefen hinweg abgesenkt. Diese Absenktiefe ist mit dem Lichtlot zu kontrollieren. Die Entnahmemenge wird mit einem Messbecher ausgelitert und notiert. Der Absenkwasserstand, die Absenkdauerzeit und das Absenkdatum sind zu notieren. Die weitere Versuchsdauer ist abhängig vom K_s -Wert.

Der Versuch kann beendet werden, wenn der Moorwasserstand im Rohr ein Plateau erreicht hat und sich somit wieder im Ruhewasserstand befindet. Dies gilt es in regelmäßigen Abständen durch Messungen mit dem Lichtlot zu kontrollieren und als Grundwasserflurabstand mit Zeitangabe zu notieren (Anhang 10: Protokoll Gesättigte hydraulische Leitfähigkeit (K_s) Gelände; Seite 2). Die Plateauphase kann mehr oder weniger ausgeprägt sein, je nachdem wie stark die Absenkung des Moorwasserstandes war und wie groß im Verhältnis dazu die Luftdruckschwankungen während des Experiments waren. Das Datum, die Uhrzeit und der Moorwasserstand des Experimentes werden notiert. Alle Pegeldatenlogger werden geborgen, ausgelesen und gestoppt. Hierbei ist zu beachten, dass das Barometer immer zuletzt gestoppt und ausgelesen wird.

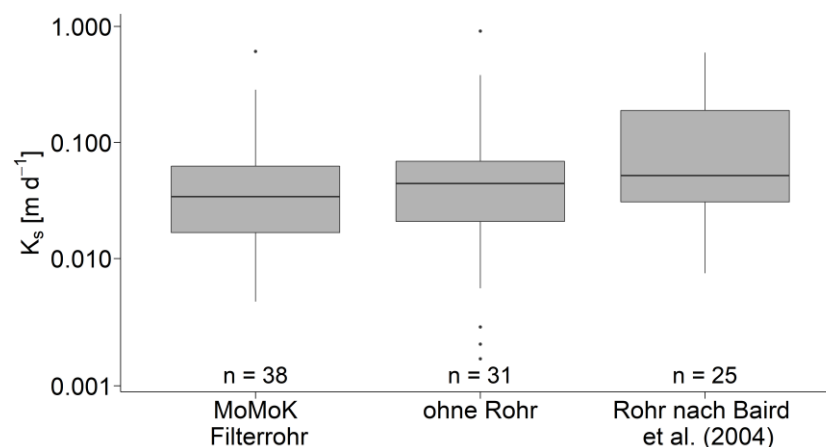
Erläuterung:

Die Versuchsdurchführung entspricht etablierten Verfahren zur Durchführung und Auswertung der Bohrlochmethode (Hvorslev, 1951, 1951; Brand und Premchitt, 1980; Baird et al., 2004; Surridge et al., 2005). Aufbauend darauf wurde ein Vorversuch an zwei Standorten mit flachgründigem Schwarztorf durchgeführt, um die Methodik auf die Anforderungen des Moorbodenmonitorings abzustimmen. Dabei wurde der Einfluss

verschiedener Faktoren der Durchführung unter Geländebedingungen auf das Messergebnis geprüft. Von besonderer Bedeutung ist die Wahl des Rohres bzw. das Verzichten auf ein Rohr. Entsprechend wurde ein Bohrloch ohne Rohr, ein Filterrohr (Schlitzweite 0,75 mm) und ein spezielles Rohr für die Anwendung in Torfen (Baird et al., 2004) verglichen (Abbildung 28). Mögliche Unterschiede zwischen den mit den verschiedenen Rohren ermittelten K_s -Werten wurden mittels eines linearen gemischten Modelles (Standort als *random factor*) und unter Berücksichtigung der Varianzstruktur getestet (Pinheiro et al., 2020). Es konnten keine signifikanten Unterschiede in den K_s -Werten festgestellt werden. Da die Herstellung der Rohre nach Baird et al. (2014) aufwändig ist und bei rohrlosen Versuchen in das Loch stürzende Torfbrocken die Ergebnisse beeinflussen können, werden beim Moorbodenmonitoring Standard-Filterrohre verwendet.

Des Weiteren zeigte sich beim Vorversuch, dass die barometrische Kompensation der Wasserstandsdaten bei Absolutdrucksensoren auch bei extrem kurzen Versuchsverläufen unabdingbar ist, da die auftretenden Luftdruckschwankungen zur Verfälschung des Ergebnisses führen. Eine Versuchsdurchführung direkt nach der Abteufung des Pegelrohres hat im Vergleich zu späteren Wiederholungsmessungen keinen Unterschied gezeigt, so dass ein Versuchsstart auch direkt nach Einrichtung der Messtellen möglich ist. Eine Mindestabsenkung des Moorwasserstands von 10 cm ist notwendig, da sonst während der Datenprozessierung unter Berücksichtigung aller Messunsicherheiten das Signal-Rausch-Verhältnis zu gering wird und die Messergebnisse unnötig große Unsicherheiten aufweisen. Wenn die Mindestabsenktiefe überschritten wird, sind die ermittelten K_s -Werte unabhängig von der Absenktiefe. Bezüglich des Messintervalls der Pegeldatenlogger hat sich eine Minute als optimal erwiesen, da bei größeren Intervallen (z.B. fünf Minuten) schnelle Anstiege zu schlecht abgebildet werden und bei hochfrequenten Intervallen (z.B. eine Sekunde) der langfristige Betrieb der Pegeldatenlogger ggf. eingeschränkt ist. Die Versuchsdauer ist erfahrungsgemäß variabel und kann von 30 Minuten bis hin zu mehreren Tagen reichen.

Abbildung 28: Mit Standardfilterrohr, ohne Rohr und einem Rohr nach Baird et al. (2004) bestimmte gesättigte hydraulische Leitfähigkeit (K_s) (Schwarztorf)



Quelle: eigene Darstellung

7 Geländehöhen

7.1 Fixpunkt für die Höhenvermessung

Zentrales Element der Erfassung der Geländehöhen ist der Fixpunkt, dessen Oberkante die unveränderliche Referenzhöhe am Standort darstellt. Alle Höhenmessungen erfolgen in Relation zum Fixpunkt.

7.1.1 Position des Fixpunktes

Die Installation des Fixpunktes kann entweder auf oder neben der Untersuchungsfläche erfolgen, wobei die Positionierung davon abhängig ist, ob auf der Untersuchungsfläche kontinuierlich Geländehöhen mittels Seilzugsensor (Kapitel 7.3, S. 58) gemessen werden.

Untersuchungsfläche ohne kontinuierliche Höhenmessung:

Die Installation kann außerhalb der Untersuchungsfläche erfolgen. Die Position kann frei und in Absprache mit der*dem Flächenbewirtschafter*in gewählt werden, muss jedoch von jedem Punkt der Untersuchungsfläche zu sehen sein. Eine Störung des Arbeitsablaufes der*des Flächenbewirtschafters*in auf der Untersuchungsfläche kann so verhindert werden.

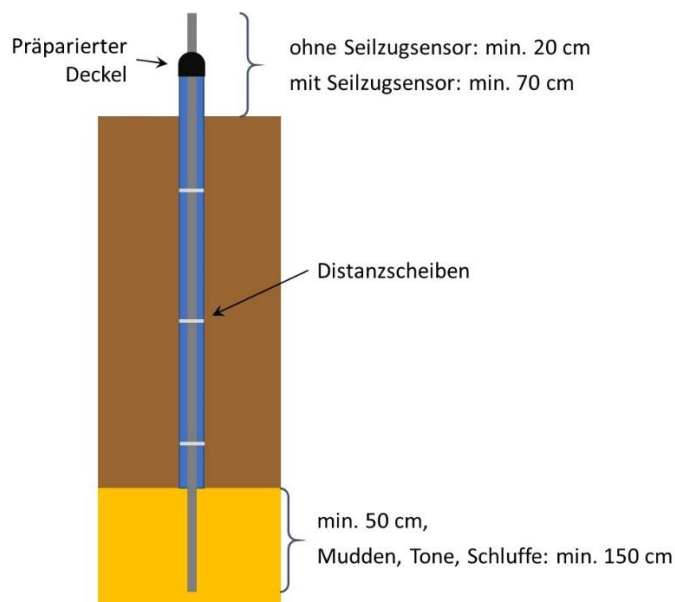
Untersuchungsfläche mit kontinuierlicher Höhenmessung:

An Standorten mit kontinuierlicher Messung der Geländehöhen wird die Fixstange gleichzeitig für die Installation des Seilzugsensors genutzt. Der Fixpunkt wird in diesem Fall im Abstand von etwa 0,50 bis 1,50 m zum Moorpegel und, wenn existent, in der Mitte eines Dränbeetes installiert. Eine Bewirtschaftung im direkten Umfeld der Fixstange sowie angrenzender Aufbauten ist nicht möglich, so dass eine Markierung z.B. über Fluchtstangen (mindestens zwei Meter lang) notwendig ist.

7.1.2 Installationen

Analog zum Einbau der Moorpegel werden Vollrohre DN50 ohne untere Spitze und ohne Pegelkappe bis in den mineralischen Untergrund installiert. Bei gespannten Grundwasserverhältnissen sollte nicht durch die Stauschicht gebohrt werden. Innerhalb des so installierten Rohres wird eine Metallstange ausreichender Länge mindestens 0,50 m in den mineralischen Untergrund getrieben (Abbildung 29). Durch die Installation von Distanzscheiben um die Stange sowie das Aufschrauben eines präparierten Deckels mit passender Lochgröße für die Metallstange auf das Vollrohr wird eine seitliche Bewegung der Fixstange im Rohr minimiert (Dokumentation nach Anhang 8: Protokoll Standorteinrichtung).

Abbildung 29: Schematische Darstellung des Aufbaus und Einbaus des Fixpunktes für die Höhenmessungen



Quelle: eigene Darstellung

Auf Untersuchungsflächen mit ausgeprägten Mudden, Tonen oder Schluffen im Liegenden der Torfe sollte die Metallstange zwischen 1,50 m und 2,00 m tief in diese Schicht getrieben werden. Bei dicht lagernden Sedimenten im Liegenden kann für die Installation der Metallstange in den mineralischen Untergrund ein Elektrohammer (z.B. Wacker EH 23, Wacker Neuson, Abbildung 6) als Unterstützung verwendet werden. Wird an der Fixstange ein Seilzugsensor (Kapitel 7.3, S. 58) installiert, sollte das Rohr möglichst bodennah abschließen und die Fixstange mindestens 0,70 m über die Geländeoberkante hinausragen, in anderen Fällen sind 0,20 m ausreichend. Der Messbereich des Seilzugsensor darf unter feuchten oder nassen Bedingungen bei der Installation der Fixstange nicht betreten werden. Bei sensiblen Standorten sollten beim Arbeiten Bretter ausgelegt und/oder Schneeschuhe getragen werden.

7.2 Höhenvermessung mittels Tachymeter oder Nivelliergerät

Die flächenhafte Vermessung der Geländehöhen auf der Untersuchungsfläche zählt zu den zentralen und jährlich zu wiederholenden Arbeiten im Rahmen des Moorbodenmonitorings. Eine Durchführung ist allerdings nur sinnvoll, wenn durch das Betreten der Untersuchungsfläche keine Veränderung der zu messenden Geländehöhen in einem Umkreis von einem Meter zu erwarten ist. Dies betrifft insbesondere Untersuchungsflächen mit einer auf dem Wasser freischwimmenden Vegetations- bzw. Torfdecke (z.B. Schwingrasen). Sämtliche Höhenvermessungen erfolgen in Relation zum Fixpunkt (Dokumentation: Anhang 11: Protokoll Höhenvermessung).

7.2.1 Höhenvermessung der Untersuchungsfläche

Um den zu Beginn der Einrichtung markierten Zentralpunkt der Untersuchungsfläche wird ein gleichmäßiges Raster für eine flächenhafte, repräsentative Erfassung der Geländehöhen gelegt. Das Raster sollte dabei ca. 200 Punkte umfassen, kann aber in Abhängigkeit von der Flächengeometrie variieren (vgl. Abbildung 1; 196 Punkte mit Anhang 1; 198 Punkte). Der Reihenabstand des Rasters sollte hierbei nicht einem Vielfachen des Dränabstandes entsprechen, was aber beim Standarddesign (Abbildung 1) aufgrund des Rasterabstands 3,57 m von nicht auftritt. Bei der Höhenvermessung ist die genaue Position der einzelnen Rasterpunkte nicht entscheidend, da die Höhenverteilung und das Flächenmittel und nicht die genaue Höhe der einzelnen Punkte von Interesse sind. Bei Störungen (z.B. durch eingeschränkte Sicht) ist das Verlegen um einige Dezimeter möglich. Der Ausweichpunkt muss ähnliche Eigenschaften wie der Originalpunkt aufweisen.

Während bei der Verwendung eines Nivelliergerätes das Raster manuell mit Hilfe von Fluchtstangen zur Peilung und einem Schlagzirkel als Schrittmaß aufgenommen werden muss und im Regelfall zwei Personen bindet, kann durch die Verwendung einer Totalstation (z.B. TS16, Leica Geosystems AG, Heerbrugg, Schweiz) der Arbeitsaufwand deutlich reduziert werden. Mit Hilfe moderner Totalstationen können automatisiert Raster über die Untersuchungsfläche gelegt und die Arbeit durch eine Person bewältigt werden.

Um gleichbleibende Distanzen für die Messung zu gewährleisten, wird das Messgerät zentral auf der Untersuchungsfläche positioniert. Für die Vermessung sollte ein Messprisma oder eine Messlatte mit definierter Auflagefläche verwendet werden, die nicht in den Boden gedrückt, sondern mit dem Eigengewicht aufgesetzt wird.

Besonderheiten:

- Auf nassen oder überstauten Untersuchungsflächen sollte der Geländepunkt in ausreichendem Abstand zum Bearbeiter (Armlänge, ca. 0,60 m) aufgenommen werden.
- An überstauten Standorten mit weichen oder flüssigen Substraten (z.B. rezente Muddebildung) wird der gewachsene Torf als Geländeoberfläche definiert und durch das Eigengewicht der Messlatte bzw. des

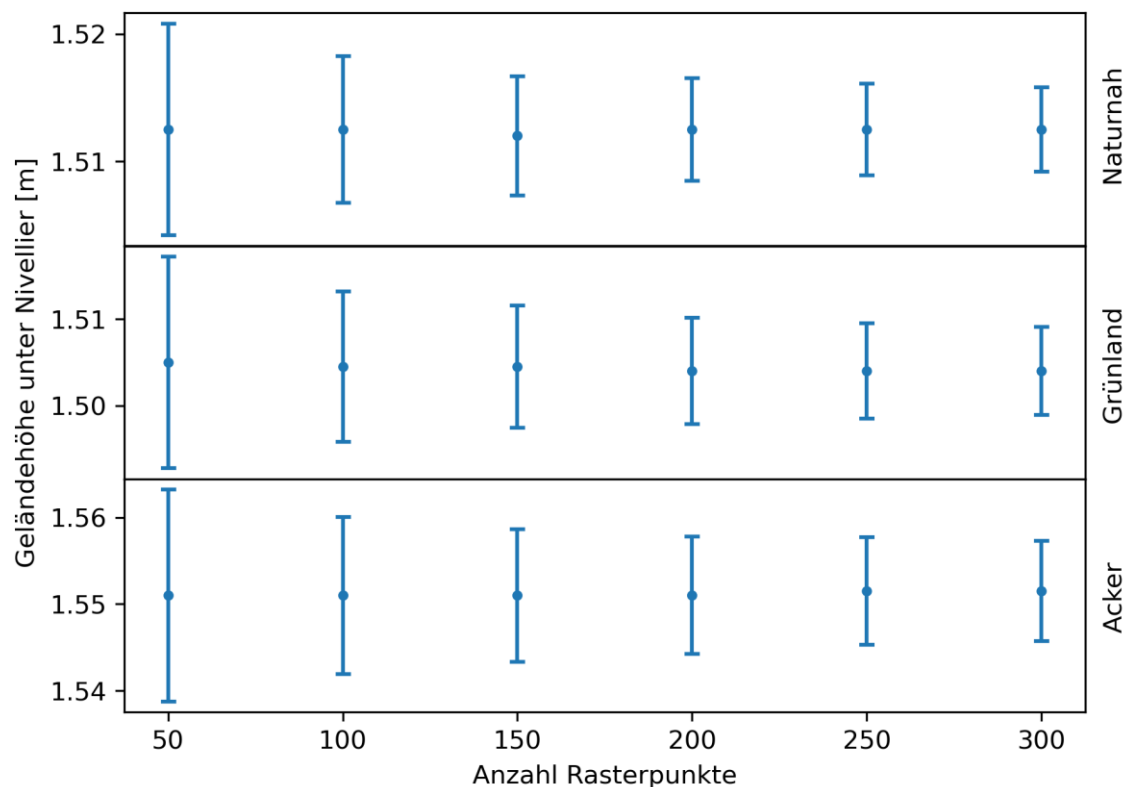
Messprismas identifiziert. Die Mächtigkeit der Mudde wird an allen Punkten der Moormächtigkeitsmessung bestimmt (siehe Kapitel 5.1.1.8, S. 28).

- Auf Untersuchungsflächen mit hoher Vegetation (z.B. Röhrichte) kann eine Vermessung ggfs. nicht durchgeführt werden. Hier bleibt zu prüfen, inwieweit die Vermessung unter Installation einer Verlängerungsstange an das Messprisma oder der Messlatte des Tachymeters oder Nivelliergerätes möglich ist. Auch sollte in diesem Fall das Messgerät so hoch wie möglich positioniert werden.
- Auf Untersuchungsflächen mit regelmäßigen linienhaften Strukturen (z.B. Kartoffelanbau) werden die Geländehöhen ausschließlich in den Tiefenbereichen gemessen. Hier besteht das Problem, dass der angehäuften Torf im darauffolgenden Jahr auf der gesamten Fläche verteilt wird und somit bei der nächsten Vermessung oder Beprobung höhere Geländehöhen oder C_{org} -Vorräte festgestellt werden. Daher wird das Volumen des Torfes in den Kartoffeldämmen (o.ä.) durch das Anlegen von zwei Vermessungstransekten senkrecht zu den Dämmen bestimmt. Zusätzlich werden aus den Dämmen sechs Stechzylinder zur Bestimmung der Trockenrohdichte entnommen (siehe Kapitel 5.3.4.1, S. 40).
- Flächen mit Bulten und Schlenken bzw. ausgeprägten Horsten werden gemäß des Standardrasters vermessen, d.h. es werden sowohl Punkte in Schlenken als auch auf Bulten aufgenommen.

Erläuterung:

Ziel der terrestrischen Höhenvermessung ist vornehmlich die Bestimmung der langfristigen Geländehöhenänderung der Untersuchungsfläche. Daher sind der Median sowie die Verteilung (Histogramm bzw. Dichtefunktion) der Geländehöhen, nicht aber die räumliche Verteilung der Geländehöhen von Interesse. Um die Anzahl von Vermessungspunkten zu ermitteln, die für eine, von der Anzahl der Punkte unabhängigen, Höhenverteilung notwendig sind, wurden Untersuchungen an mehreren Standorten mit unterschiedlicher Landnutzung (naturnaher Hochmoorstandort mit ausgeprägter Mikrotopographie, Grünland, Acker) durchgeführt. Dabei wurden die Flächen (50 m x 50 m) mit einem Punktabstand von 2,50 bis 3,00 m vermessen, was einer Punktzahl von 420 (naturnah), 324 (Grünland) und 441 (Acker) entsprach. Die Punktzahl des Rasters wurde in einem Bootstrap-Verfahren ($n = 1.000.000$) schrittweise reduziert. Hieraus wurden Median und Standardfehler des Medians der Geländehöhe in Abhängigkeit von der Dichte der Rasterpunkte abgeleitet (Abbildung 30). Dabei konnte gezeigt werden, dass eine Erhöhung der Rasterdichte unabhängig von Landnutzung und Topographie nur zu einer leichten Verringerung des Standardfehlers führt. Um den Zeit- und Arbeitsaufwand in vertretbarem Maß zu halten, wurde eine Rastergröße von 200 Punkten festgesetzt.

Abbildung 30: Median $\pm$ Standardfehler des Medians der Geländehöhen von drei Untersuchungsflächen mit unterschiedlicher Landnutzung in Abhängigkeit von der Punktzahl des Vermessungsrasters



Quelle: eigene Darstellung

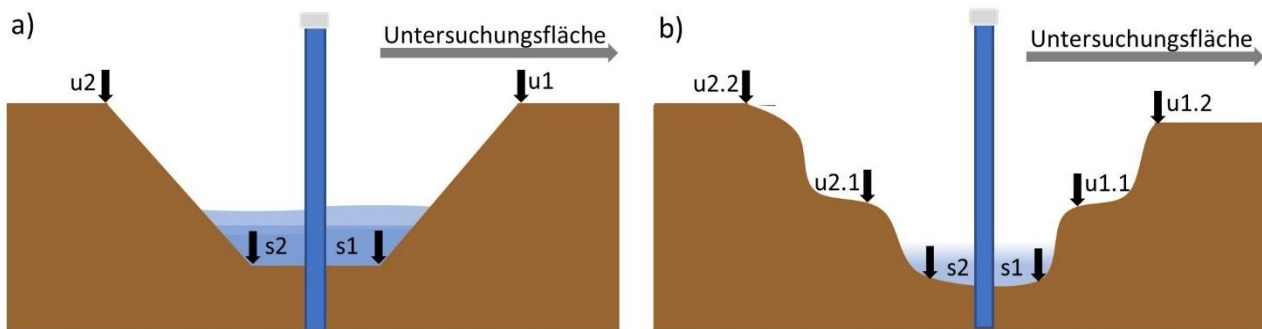
7.2.2 Höhenvermessung weiterer Punkte auf der Untersuchungsfläche

Neben den Geländehöhen werden die Höhen aller Installationen auf der Untersuchungsfläche sowie zusätzliche relevante Geländepunkte vermessen und dokumentiert (Anhang 11: Protokoll Höhenvermessung). Dies umfasst z.B.:

- Die Einlegscheiben in den Moorpegeln, Grundwassermessstellen und Grabenpegeln sowie die umgebenden Geländehöhen
- Fixstange (Oberkante) sowie die umgebenden Geländehöhen
- Eckpunkte der Rasengittersteine
- Wasserwirtschaftliche Bauwerke (Wehre, Staubauwerke, Überläufe etc.) in angrenzenden Gewässern
- Dränrohrtiefen (am Auslass und einmal in der Fläche)
- Grabenquerschnitt, wenn ein Grabenpegel installiert wird (Beispiele in Abbildung 31)

Im Rahmen der jährlichen Nachvermessung werden alle Installationen sowie oben genannte Punkte erneut aufgenommen. Insbesondere der Vergleich festinstallierter Aufbauten (Moorpegel vs. Fixpunkt) kann für eine Qualitätskontrolle und Fehlerkontrolle (Veränderung der Fixpunkthöhe oder der Moorpegel) verwendet werden.

Abbildung 31: Beispiele und Nomenklatur für die Vermessung des Grabenquerschnitts für Gräben mit a) einer Böschungskante und b) mehreren Böschungskanten



Quelle: eigene Darstellung

7.3 Kontinuierliche Messung der Geländehöhen (Seilzugsensoren)

Die kontinuierliche Messung der Geländehöhen erfolgt auf ca. 50 Untersuchungsflächen des Moorbodenmonitorings mit einem Seilzug-Potentiometer (*kurz: Seilzugsensor*, Abbildung 32), der am Thünen-Institut entwickelt wurde. Maßgebliche Kriterien für die Entwicklung waren:

- Präzision
- Geringer Stromverbrauch (Laufzeit mindestens 1 Jahr bei stündlicher Messung)
- Hohe zeitliche Auflösung
- Handhabbare Datenmenge und möglichst unkomplizierte Datenprozessierung
- Robustheit und geringe Empfindlichkeit gegenüber Temperaturschwankungen
- Kosten

Erläuterung:

Im Rahmen von Voruntersuchungen wurden verschiedene Messgeräte zur zeitlich hochaufgelösten Messung von Geländehöhen untersucht. Zu diesen zählten Schneehöhensensoren, Kamerasysteme (Evans et al., 2021b), doppelte Drucksensoren (Abbildung 22c, op de Beek et al., 2008) sowie Seilzug-Potentiometer. Auf Laser oder Ultraschall basierende Schneehöhensensoren sind teuer in der Anschaffung, haben einen hohen Stromverbrauch und/oder sind anfällig gegenüber Temperaturschwankungen. Die für das Kamerasystem (Evans et al., 2021b) notwendige Kamera ist nicht mehr verfügbar, während alternative Modelle aufgrund von unpassenden Brennweiten etc. nicht geeignet sind. Daneben entstehen durch die Fotos große Datenmengen, deren Auswertung trotz existierender automatischer Auswerteroutine aufwändig und kompliziert ist.

Entsprechend erfüllte nur das Seilzug-Potentiometer (Abbildung 32) die oben genannten Kriterien. Das Messprinzip ist einfach und robust: Die Positionsänderung des Messseils wird über ein Sensorelement in ein elektrisches Signal umgewandelt und kann von einem Logger verarbeitet werden. Zur Messung der Geländehöhe wird der Seilzugsensor zusammen mit dem Logger in ein wetterfestes Gehäuse installiert und mit Schellen fest an die höhenstabile Fixstange montiert. Das Seilende wird anschließend an einen sich mit der Geländeoberfläche mitbewegenden Gegenstand befestigt. Eine Veränderung der Geländehöhe in Relation zur Fixstange kann so vom Seilzugsensor im Submillimeterbereich erfasst werden. Ein Versuch auf Asphalt (= stabile Seillänge) über einen Zeitraum mit variierenden Temperaturen zeigte, dass keine Temperaturabhängigkeit der Messung besteht. Doppelte Drucksensoren („Doppelpegel“) kommen ebenfalls an stark oszillierenden Standorten zum Einsatz (siehe Kapitel 6.1.2). Nachteilig gegenüber Seilzugsensoren ist die geringere Präzision der Druckmessung, vorteilhaft ist jedoch, dass die benötigten Pegeldata logger kommerziell erhältlich sind.

7.3.1 Position und Installation des Seilzugsensors

Die automatisierte, zeitlich hochaufgelöste Messung der Geländehöhen erfolgt am Fixpunkt auf der jeweiligen Untersuchungsfläche (siehe Kapitel 7.1, S. 31). Dazu wird das Gehäuse des Seilzugsensors in ausreichender Höhe (ca. 0,40 m) über der Geländeoberfläche (gemessen am Gehäuseunterrand) an der Fixstange installiert. Zur standardisierten Dokumentation des Aufbaus erfolgt die Ausrichtung des Seilzugsensors in nördliche Richtung. Dies kann in Abhängigkeit von der Geländeoberflächenstruktur unterhalb des Seilzugsensors angepasst werden.

Abbildung 32: An der Fixstange installierter Seilzugsensor mit Rasengitterstein und Aluminiumblock



Quelle: Thünen-Institut

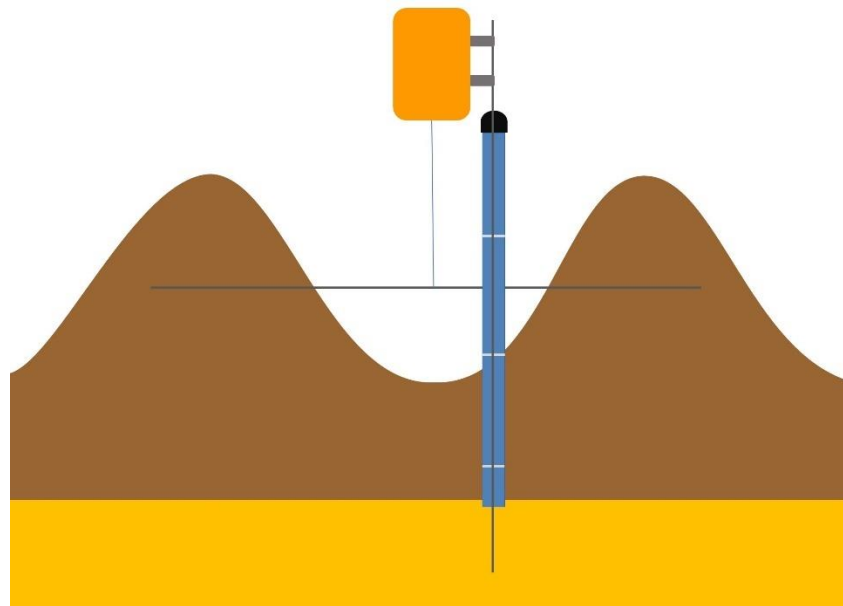
Untersuchungsflächen mit weitestgehend homogener Oberflächenstruktur (z.B. Grünland):

Unter das Gehäuse und um die Fixstange wird ein Rasengitter mit einer Abmessung von 0,40 m x 0,60 m gelegt und festgetreten. Im Anschluss wird senkrecht unterhalb des Seilausganges des Seilzugsensors ein Aluminiumblock auf das Rasengitter gestellt und mit Kabelbindern fixiert (Abbildung 32). Das Seil des Seilzugsensors wird anschließend langsam herausgezogen und mit einem Haken am Aluminiumblock befestigt. Wichtig bei der Installation des Seiles ist, dass dieses den Rand der Öffnung im Gehäuse nicht berührt.

Untersuchungsflächen mit heterogener Oberflächenstruktur (z.B. naturnahe Standorte mit Bult-Schlenken-Komplexen):

Unter das Gehäuse des Seilzugsensors wird eine Metallstange ($\varnothing$: ¾ Zoll; Länge: 1,00 m) horizontal auf Höhe der Schlenkenoberfläche durch möglichst viele Bulten gestochen, so dass ihre Mitte senkrecht unter dem Seilaustritt des Gehäuses liegt (Abbildung 33). Das Seil wird vorsichtig aus dem Gehäuse gezogen und an einer Öse an der Metallstange eingehängt.

Abbildung 33: Schematische Darstellung eines auf einer Untersuchungsfläche mit ausgeprägtem Mikorelief installierten Seilzugsensors



Quelle: eigene Darstellung

Auf eine einheitliche Bezeichnung der Seilzugsensoren über alle Standorte hinweg sollte geachtet werden. Analog zur Messung des Moorwasserstandes (vgl. Kapitel 6.4, S. 48) wird die Geländehöhe in stündlicher Auflösung und permanent in Winterzeit aufgezeichnet. Nach Installation und Start des Loggers wird der Abstand der Fixpunktoberkante zur Oberkante des Rasengitters an allen vier Ecken gemessen und zusammen mit dem Datum, der Uhrzeit (Winterzeit), dem Namen sowie der Seriennummer des Seilzugsensors und Loggers dokumentiert (Anhang 12: Protokoll Seilzugsensor). Wurde eine Querstange installiert, wird der Abstand zwischen Fixstangenoberkante zur Metallstange an vier Punkten (links, rechts, zwei mittig) gemessen.

Im Rahmen der jährlichen Datenerhebung wird der Bereich des Seilzugsensors gepflegt und ggf. entsprechend die Flächenbewirtschaftung manuell simuliert. Dazu zählt z.B.:

- Zurückschneiden aufgewachsener Vegetation
- Erneuerung der Vegetation im Falle einer Grünlanderneuerung
- Bodenbearbeitung (pflügen, grubbern etc.)
- Bei naturnahen oder wiedervernässten Flächen: Dokumentation der durch das Rasengitter gewachsenen Vegetation, ggf. Entfernung von Vegetation, die Messung beeinträchtigen könnte.

8 Vegetation

Die Vegetationsaufnahme wird als Kombination von Dauerbeobachtungsflächen mit einer Charakterisierung der gesamten Untersuchungsfläche (Abbildung 1) durchgeführt. An Ackerstandorten findet keine Aufnahme statt. Der Zeitpunkt und die Frequenz der Aufnahmen hängt vom Vegetationstyp ab. Grünlandstandorte sollten vor dem ersten Schnitt aufgenommen werden. Es wird eine zweijährliche Aufnahme angestrebt, die Wiederholungsaufnahmen sollten zu einem phänologisch vergleichbaren Zeitpunkt stattfinden.

Zum jetzigen Zeitpunkt wurden noch keine Vegetationsaufnahmen für die Untersuchungsflächen des Moorbodenmonitorings durchgeführt. Entsprechend wird die Vorgehensweise noch präzisiert und in einer aktualisierten Version des Methodenhandbuchs veröffentlicht werden.

8.1 Dauerbeobachtungsflächen

Für das Vegetationsmonitoring werden drei Dauerbeobachtungsflächen (DBF) mit für den Standort repräsentativer Vegetation eingerichtet. Idealerweise liegt eine DBF direkt am Standort des Moorpegels, darf aber nicht durch die Aufnahme des Bodenprofils oder die Installation des Pegels gestört sein. Die Lage der beiden anderen DBF kann frei gewählt werden, muss aber außerhalb der Zone für die Wiederholungsmessungen der hydraulischen Leitfähigkeit liegen (Abbildung 1). Die Größe und Form der Flächen ist vom Vegetationstyp abhängig, sollte die charakteristische Vegetationszusammensetzung aufweisen und wird bei der Erstaufnahme festgelegt. In Anlehnung an für Paludikulturflächen entwickelte Monitoringleitlinien wird eine Größe von 2,00 m x 2,00 m empfohlen. Bei heterogenen Flächen kann die Anlage von zwei oder mehr Tripeln von DBF notwendig sein bzw. im Verlauf des Monitorings notwendig werden. An den Dauerbeobachtungsflächen wird jeweils eine vollständige Artenliste erfasst und für alle Arten der Deckungsgrad (prozentual) bezogen auf die Gesamtfläche der DBF geschätzt. Daneben wird der Gesamtdeckungsgrad von Torfmoosen (wenn vorhanden) und Gefäßpflanzen, ggf. offenem Boden, Streu und Wasser sowie die Deckungsgrade der einzelnen Arten in Prozent getrennt nach Moos-, Gras-, Strauch- und Baumschicht aufgenommen.

Die Vermarkung der Dauerbeobachtungsflächen erfolgt an ungenutzten Standorten durch Holzpflöcke und Unterflurmarker, an genutzten Standorten nur durch Unterflurmarker.

8.2 Gesamtfläche: Erfassung und Dokumentation der Biotoptypen

Die Biotoptypenkartierung ist in vielen Bundesländern die Standardmethode für flächenbezogene Bestandserfassungen. Dabei ist eine Herausforderung, dass die Bundesländer jeweils eigene Biotoptypenschlüssel entwickelt haben und in einigen Bundesländern nur gefährdete Biotoptypen erfasst werden. Daher sollten die Biotoptypen der gesamten Fläche sowohl nach der Systematik des jeweiligen Bundeslandes, als auch auf Basis der Roten Liste der Biotoptypen (Finck et al., 2017, siehe auch Kartierschlüssel für das bundesweite Ökosystem-Monitoring nach Ackermann et al. (2020)) erfasst werden. Wenn relevant, sollten auch FFH-Lebensraumtypen und deren Erhaltungszustand kartiert werden. Falls auf der Fläche mehr als ein Biotoptyp angetroffen wird, wird im Gelände eine Skizze zur räumlichen Verbreitung der Biotoptypen erstellt und anschließend digitalisiert.

8.3 Fotodokumentation der Vegetationsentwicklung

Neben der Vegetationsaufnahme wird eine Fotodokumentation durchgeführt, d.h. die DBF und die Gesamtfläche werden von definierten und dokumentierten Standpunkten aus fotografiert. Die DBF werde jeweils vom südlich bzw. bei Nord-Süd-Ausrichtung vom südöstlich gelegenen Eckpunkt fotografiert; der Standpunkt für das Foto der Gesamtfläche wird bei der Erstaufnahme festgelegt und dokumentiert.

9 Vermarkung und GNSS-Messungen

Die Vermarkung relevanter Punkte auf der Untersuchungsfläche erfolgt mit passiven, elektromagnetischen Unterflurmarken (Stabform, 25 kHz, Ebinger Prüf- und Ortungstechnik GmbH, Köln, Deutschland). Zur Auffindung der Unterflurmarken werden passende Suchgeräte (EBEX®300, Ebinger Prüf- und Ortungstechnik GmbH, Köln, Deutschland) verwendet. Die Unterflurmarken werden senkrecht (mit der Spitze nach unten zeigend) in einer Tiefe von ca. 0,20 m (nasse Standorte) bis 0,50 m (nur Ackerstandorte) unter Flur in den Boden eingebracht. Aufgrund der Grenzen der Auffindbarkeit sollte auf ein tieferes Vergraben verzichtet werden. Zu vermarkende Punkte sind:

- Eckpunkte der Untersuchungsfläche
- Profilgrube (Grubenmitte)

- Unter Flur installierte Moorpegel
- Dauerbeobachtungsflächen Vegetation

Alle Installationen, Beprobungs- oder Arbeitspunkte mit Ausnahme des Vermessungsrasters für Geländehöhen (Kapitel 7.2.1, S. 55) werden mit einem GNSS-Gerät eingemessen und dokumentiert (Anhang 13: Protokoll GNSS-Messung (Lagevermessung)). Dabei ist ein Ein-Frequenzempfänger (z.B. Antenne: AS05, Leica Geosystems AG, Heerbrugg, Schweiz) ausreichend. Das GNSS-Gerät sollte mindestens 30 Minuten vor der Messung eingeschaltet und eine Lagegenauigkeit von 0,50 m eingehalten werden.

Zu vermessende Punkte und Installationen sind z.B.:

- Profilgrube (Profilwand, Grubenmitte)
- Moor- und Grabenpegel
- Beprobungspunkte
- Fixpunkt
- Eckpunkte der Untersuchungsfläche
- Punkte für Moormächtigkeitsmessungen
- Messpunkte für die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit
- Lage der Dränrohre (Dränauslass, Tiefe in Flächenmitte)
- Eckpunkte der Dauerbeobachtungsflächen (Vegetation)
- Sonstiges (z.B. Wehre etc.)

10 Fotodokumentation der Standorteinrichtung

Die Einrichtung der Untersuchungsfläche wird während des gesamten Prozesses fortlaufend dokumentiert (Anhang 14: Protokoll Fotodokumentation). Die Fotos dienen zum einen der Dokumentation der Arbeiten (z.B. Beweissicherung) und können für die Öffentlichkeitsarbeit verwendet werden. Folgende Fotos werden aufgenommen:

- Standortsituation vor den Arbeiten
 - über die gesamte Untersuchungsfläche
 - vom vorgesehenen Zentralpunkt in die vier Haupthimmelsrichtungen
- Bodenprofil
 - ausgehobene Grube
 - Profilstirnwand (nördliche Richtung)
 - verschlossene Grube
- Fixpunkt
- Moor- und Grabenpegel
- Eckpunkte der Vermessungsfläche
- Standortsituation nach Beendigung der Arbeiten

Zusätzlich können nach Bedarf noch folgende Punkte dokumentiert werden:

- Besonderheiten des Standortes
- Besonderheiten im Bodenprofil / an den Beprobungspunkten

Alle Fotos werden in hoher Qualität mit einer Digitalkamera (keine Handykamera!) aufgenommen, wobei auf angemessene Lichtverhältnisse geachtet werden sollte. Installationen auf der Untersuchungsfläche sollten, sofern möglich, immer in Gänze abgebildet werden.

Für eine einheitliche Qualität der Profilaufnahmen sollten zusätzlich folgende Punkte beachtet werden:

- Aufnahme im Hochformat und frontal, zur Vermeidung von Verzerrungen
- Aufnahme sollte vor der Probenahme mit Maßband, Graustufenkarte und Schreibtafel (Angaben: Standort-ID, Datum) erfolgen
- Die Profilwand sollte vorab mit dem Spaten und Maurerkelle glatt abgestochen werden
- Die Profilwand sollte während der Aufnahme vollständig beschattet werden
- Eine Aufnahme bei grellem Licht sollte vermieden werden
- Das Blitzlicht sollte nicht verwendet werden, um Reflektionen auf der Profilwand zu verhindern

11 Wiederkehrende Geländearbeiten

Ein Teil der vorgestellten Geländearbeiten wird ausschließlich bei der Einrichtung der Untersuchungsfläche durchgeführt (Installation von Messtechnik, Lagevermessung und Vermarkung der Fläche mittels GNSS und Unterflurmarken), während im Rahmen des Moorbodenmonitorings darüber hinaus in unterschiedlichen Abständen regelmäßig wiederkehrende Arbeiten auf der Untersuchungsfläche durchgeführt werden. Daneben wird durch die Etablierung des Moorbodenmonitorings und der in der Aufbauphase erhobenen Daten die Grundlage für später zu wiederholende Tätigkeiten, z.B. die Erfassung von C_{org} -Vorräten, gelegt.

11.1 Regelmäßig wiederkehrende Tätigkeiten

Regelmäßig wiederkehrende Tätigkeiten umfassen alle Arbeiten, die in einem jährlichen oder zweijährlichen Turnus durchgeführt werden (Tabelle 2). Hierzu zählen vor allem die Pflege, Wartung und Fotodokumentation der Aufbauten (z.B. Fixpunkt, Moorpegel, Seilzugsensoren). Neben dem Freischneiden der Aufbauten stellen die technische Wartung sowie das Auslesen der aufgezeichneten Daten die wichtigsten Arbeitsschritte dar. Zusätzlich werden jährlich die Geländehöhen der Untersuchungsfläche und die Höhen der Installationen mittels Tachymeter oder Nivelliergerät in Relation zum Fixpunkt gemessen. Falls möglich, wird die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit gemessen, um so Daten zu verschiedenen Horizonten bzw. Tiefen zu gewinnen. Die Aufnahme der Vegetation erfolgt in einem eigenem Turnus. Da die Vegetationsaufnahme zu einem phänologisch günstigen Zeitpunkt stattfinden muss, während die sonstigen Tätigkeiten (nahezu) jahreszeitenunabhängig sind, macht dies i.d.R. einen weiteren Besuch des Standortes notwendig.

Tabelle 2: Wiederkehrende Geländearbeiten

Kategorie	Untersuchung	Kapitel	Intervall	Durchzuführen
Gelände- höhen	Vermessung der Fläche	7.2.1 (S. 55)	jährlich	Immer
	Vermessung der Installationen	7.2.2 (S. 57)	jährlich	Immer
	Auslesen der Datenlogger der Seilzugsensoren	7.3 (S. 58)	jährlich	Immer (wenn installiert)
Hydrologie	Auslesen Pegeldatenlogger (Moor- und Grabenpegel)	6.4 (S. 48)	jährlich	Immer (wenn installiert)
	Messung gesättigte hydraulische Leitfähigkeit	6.5 (S. 49)	jährlich	Falls möglich
Vegetation	Aufnahme Dauerbeobachtungsflächen und Erfassung Biotoptypen	8 (S. 60)	alle zwei Jahre	Zu phänologisch günstigen Zeiten
Sonstiges	Fotodokumentation	10 (S. 62)	jährlich	Immer

Quelle: eigene Darstellung

Neben den aufgeführten Geländearbeiten wird bei landwirtschaftlich genutzten Standorten jährlich die Bewirtschaftung abgefragt.

11.2 Tätigkeiten nach der Aufbauphase des Moorbodenmonitorings

Längerfristig wiederkehrende Tätigkeiten beinhalten alle Arbeiten, welche zusätzlich zu den regelmäßig wiederkehrenden Tätigkeiten über größere Zeithorizonte (> 10 Jahre) durchgeführt werden können. Hierzu zählen vor allem eine wiederholte Ermittlung der C_{org} - und N_t -Vorräte an Beprobungspunkten sowie die erneute Messung der Moormächtigkeiten.

12 Probenlagerung und Laboruntersuchungen

12.1 Probenlagerung

In der Regel können Proben nicht unmittelbar nach der Rückkehr bearbeitet werden. Stechzylinderproben werden kühl (4°C) und alle weiteren Proben bei -15 °C zwischengelagert. Auch die Blöcke werden eingefroren. Nach der Probenaufbereitung bzw. der Analyse werden folgende Rückstellproben eingelagert: Getrocknete Stechzylinderproben, homogenisierte, feldfrische Proben aus den Bodenprofilen (2500 cm³, aufgeteilt in fünf Beutel, Einlagerung bei -15°C) und 10 g getrocknetes und homogenisiertes Material aller weiterer Proben (Abbildung 34).

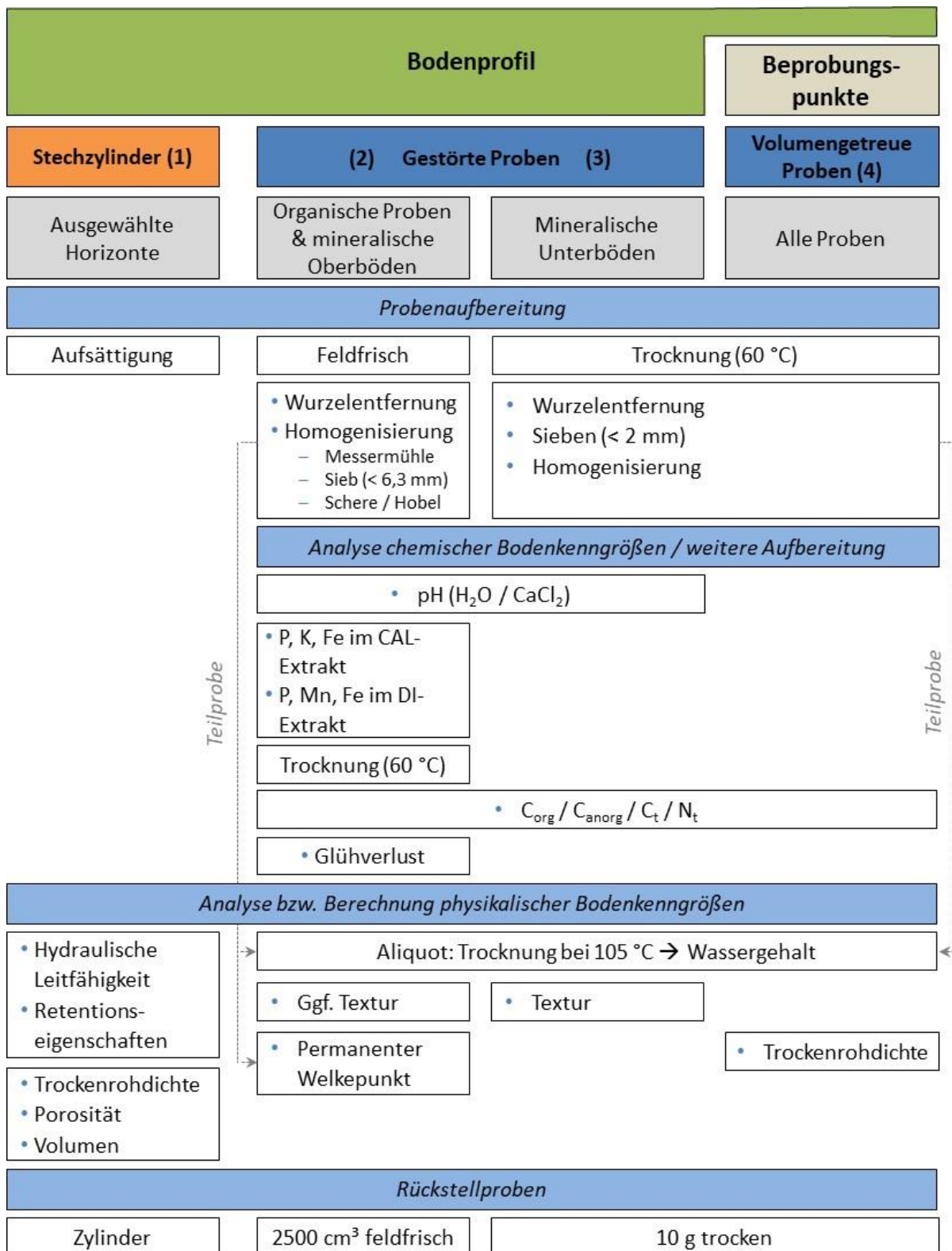
12.2 Übersicht über Probenarten und Laborprozesse

Alle Bodenproben (Profil, Beprobungspunkte) werden im Folgenden in vier Probenarten untergliedert. Beim Moorbodenmonitoring werden diese auf zwei Labore (Thünen-Labor für Bodenmonitoring und Moorklabor) sowie auf verschiedene Laborprozesse unterteilt:

- (1) Stechzylinderproben aus dem Profil (Kapitel 5.3.4.1, S. 40): Moorklabor
- (2) Organische Proben bzw. mineralische Oberbodenproben aus dem Profil (gestörte Proben, Kapitel 5.3.4.2, S. 40): Labor für Bodenmonitoring
 - alle Torf- und Muddehorizonte
 - an- bzw. abmoorige Horizonte, Decken aus mineralischem Substrat sowie R-Ap und R-Horizonte tiefgepflügter Standorte
- (3) Mineralische Unterbodenproben aus dem Profil (gestörte Proben, Kapitel 5.3.4.2, Abbildung 20): Labor für Bodenmonitoring
 - alle beprobten mineralischen Horizonte unterhalb der Torf- bzw. Muddehorizonte
- (4) Sämtliche Bodenproben der Beprobungspunkte (Kapitel 5.1, S. 20) sowie volumengetreue Proben aus Horizonten tiefer 1,00 m aus dem Bodenprofil (Kapitel 5.3.4.1, Abbildung 20): Labor für Bodenmonitoring

Da sich die Probenarten im Umfang an aufzunehmenden bodenchemischen und -physikalischen Bodenkenngößen unterscheiden, werden sie unterschiedlich aufbereitet (Abbildung 34). Während des Laborprozesses werden feldfrische Proben grundsätzlich in einer Kühlzelle bei 4 °C gelagert. Mit Ausnahme der Bestimmung der bodenhydraulischen Eigenschaften ist der Laborprozess nach maximal 2-3 Wochen abgeschlossen, da längere Standzeiten von feldfrischen Proben in der Kühlzelle zu Pflanzenkeimung führen können. Die Probenaufbereitung und die analytische Bestimmung von Bodenkenngößen orientieren sich an deutschen Normen der DIN (EN ISO) bzw. der GAFA (2014) sowie auf eigene in wissenschaftlichen Publikationen veröffentlichte Routinen. Die Normen wurden teilweise aus methodischen bzw. arbeitstechnischen Gründen modifiziert und in laborinternen SOPs (Standard Operation Procedures) formuliert.

Abbildung 34: Übersicht über Probenarten, Probenaufbereitung und jeweils gemessene bodenchemische (H_2O : Wasser, $CaCl_2$: Kalziumchlorid, C_{org} : organischer Kohlenstoff, C_{anorg} : anorganischer Kohlenstoff, C_t : gesamt Kohlenstoff, N_t : Gesamtstickstoff, Fe: Eisen, P: Phosphor, Mn: Mangan, K: Kalium, CAL: Calcium-Acetat-Lactat, DI: Dithionit) und bodenphysikalische Kenngrößen sowie der Art der Rückstellprobe



Quelle: eigene Darstellung

12.3 Moorbodenphysikalische Analysen an ungestörten Stechzylinderproben

An ungestörten Stechzylinderproben aus der Profilwand werden moorbodenphysikalische Analysen mit sechs Wiederholungen pro beprobtem Horizont durchgeführt. Dabei werden die physikalischen Basiseigenschaften (Porosität und Trockenrohdichte) an derselben Probe wie die hydraulischen Eigenschaften (Retentionseigenschaften, gesättigte und ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit) bestimmt. Die ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit (K_u) und die Wasserretentionseigenschaften werden an drei der sechs Wiederholungsproben gemessen. Für die Analyse der oben genannten Parameter werden im Labor folgende Schritte durchgeführt:

- (0) Nur Blockproben: Aus den gefrorenen Blöcken werden sechs Proben in Größe der Stechzylinder gesägt.
- (1) Aufsättigung der Proben bis zur Gewichtskonstanz, sichergestellt durch wöchentliche Wägung. Dieser Arbeitsschritt kann je nach Feldfeuchte der Torfe bis zu drei Monaten in Anspruch nehmen.
- (2) Bestimmung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit
- (3) Bestimmung der Wasserretentionseigenschaften und ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit an drei der sechs Proben
- (4) Trocknung der Proben bei 105 °C für mindestens 7 Tage

Zwischen allen Teilschritten werden die Proben gewogen ($\pm 0,01$ g LSM2000, PCE Deutschland GmbH, Meschede, Deutschland). Zusätzlich zu den sechs ungestörten Stechzylinderproben wird der Wassergehalt beim permanenten Welkepunkt ($pF\ 4,2 = \log_{10}(15.000)$ hPa) an feldfrischem Probenmaterial bestimmt.

12.3.1 Gesättigte hydraulische Leitfähigkeit (Labor)

Normvorlage:

- DIN 19683-9:2012-07

Die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit wird im Labor mit dem „Haubenpermeameter nach Hartge“ (Umwelt-Geräte-Technik GmbH, Müncheberg, Deutschland) bei stationärer Strömung unter Einhaltung eines konstanten Druckgefälles gemessen (Details z.B. in Tiemeyer et al., 2017). Beim Anschließen der Stechzylinderprobe an das Haubenpermeameter wird sichergestellt, dass sich keine Bodenpartikel oder Wurzeln zwischen Stechzylinder und Haube befinden. Im nächsten Schritt wird die Druckhöhendifferenz zwischen Probenober- und Probenunterseite eingestellt und kontrolliert, ob alle Schläuche der Anlage luftleer sind. Nachdem sich ein konstanter Durchlauf (ca. ein Tropfen pro Sekunde) eingestellt hat, startet die Messung. Dabei wird die Menge an Wasser gemessen, die bei gegebener Druckhöhendifferenz in 15 Minuten durch die Probe fließt.

12.3.2 Bodenhydraulische Eigenschaften

Methode: Verdunstungsversuch und Überdruckmethode

Normvorlage:

- DIN ISO 11274:2020-04

Verdunstungsversuch

Die Verdunstungsversuche (Gardner und Miklich, 1962; Wind, 1968; Schindler, 1980; Dettmann et al., 2014; Peters et al., 2015) werden an drei der sechs ungestörten Stechzylinderproben im Anschluss an die Messung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit mit der ku-pF-Apparatur (Umwelt-Geräte-Technik GmbH, Müncheberg,

Deutschland), durchgeführt. Das Messprinzip beruht auf der Erfassung der Flussrate durch periodische Wägung, bei gleichzeitiger Bestimmung des hydraulischen Gradienten über zwei Tensiometer. Dabei werden die Retentionseigenschaften und Leitfähigkeitsfunktion als kontinuierliche Datenreihe von 0 bis -800 hPa simultan an einer Probe gemessen.

Im Vorfeld des Versuches werden die Tensiometer kalibriert und es wird sichergestellt, dass bei einem Druck von 0 hPa mit einer Genauigkeit von mindestens $\pm 0,30$ hPa gemessen wird. Vor Versuchsstart werden an der 6 cm hohen Stechzylinderprobe in 1,5 und 4,5 cm Höhe mit Hilfe einer Bohrschablone zwei Löcher vorgebohrt. Das entnommene Material wird gewogen und bei der gravimetrischen Bestimmung von Trockenrohdichte (Kapitel 12.3.3) und Porosität (Kapitel 12.3.4) berücksichtigt. Im Anschluss wird die Probe in den Messkorb der ku-pF-Apparatur gestellt und die Tensiometer in die vorgebohrten Löcher der Probe eingeführt. Während des Versuches rotieren 10 Messkörbe mit Stechzylinderproben auf der ku-pF-Apparatur. Bei jeder Probe werden alle 10 Minuten die Saugspannungen und das Gewicht ($\pm 0,001$ g, FX-2000i, A&D Europe GmbH, Darmstadt, Deutschland) gemessen. Der Verdunstungsversuch endet, wenn bei einer Saugspannung von etwa -800 hPa die untere Messgrenze der Tensiometer erreicht ist. Eine detaillierte Versuchsbeschreibung ist in Dettmann et al. (2019) zu finden.

Überdruckmethode

Der Wassergehalt beim permanenten Welkepunkt ($p_F 4,2 = \log_{10}(15.000)$ hPa) wird mit der „Überdruckmethode“ an einer Druckmembranzelle (Membranpresse, Eijkelkamp, Giesbeek, Niederlande) bestimmt (Dane und Hopmans, 2002; Details in Bechtold et al., 2018 und Dettmann et al., 2019).

Für die Messung werden zwei poröse, gesättigte, Celluloseacetatmembranen in der Druckmembranzelle ausgelegt. Es wird sichergestellt, dass die Membranen faltenfrei und ohne Luftblasen darunter aufliegen. Im Anschluss werden die feldfrischen Proben in Plastikringe ($\varnothing$ 3,50 cm, Höhe 1,00 cm) auf die Celluloseacetatmembranen gelegt, die Druckmembranzelle geschlossen und ein Druck von 15.000 hPa angelegt. Während der Versuchsdurchführung wird die Menge des aus der Druckmembranzelle laufenden Wassers regelmäßig kontrolliert. Der Versuch ist beendet, wenn die Proben Gleichgewichtszustand erreicht haben, d.h. kein weiteres Wasser mehr aus der Membranpresse herausläuft. Im Anschluss wird der gravimetrische Wassergehalt der Proben bestimmt.

Datenauswertung

Die Auswertung der Messwerte aus Verdunstungsversuch und Überdruckmethode erfolgt nach Dettmann et al. (2019) sowohl für die „Vereinfachte Verdunstungsmethode“ („*direct method*“; siehe auch Peters und Durner, 2009) als auch mit HYDRUS-1D (Šimůnek et al., 2013) in Kombination mit inverser Parameteroptimierung („*inverse method*“ und „*inverse PWP method*“). Dabei werden die uni- und bimodalen hydraulischen Funktionen von van Genuchten-Mualem (van Genuchten, 1980; Mualem, 1976) und Peters-Durner-Iden (Peters, 2013; Iden und Durner, 2014; Peters, 2014) parametrisiert. Aus den parametrisierten bodenhydraulischen Funktionen lassen sich Kennwerte wie die nutzbare Feldkapazität ableiten.

12.3.3 Trockenrohdichte (Stechzylinder)

Normvorlage:

- **DIN EN ISO 11272: 2017-07**

Die Trockenrohdichte der horizontbezogenen Proben aus den Bodenprofilen wird mit dem Stechzylinderverfahren in Anlehnung an das Vorgehen in Kapitel 12.4.9 bestimmt. Im Anschluss an die Messung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit (Kapitel 12.3.1) und der ungesättigten hydraulischen Eigenschaften

(Kapitel 12.3.2) wird die Probe für mindestens 7 Tage im Ofen bei 105 °C getrocknet und das Trockengewicht bestimmt. Da Torfe und andere organische Böden im Verlauf der Entwässerung schrumpfen, wird für die Berechnung von Trockenrohichte und Porosität das Volumen der Probe bei Sättigung als Gesamtvolumen des Bodens verwendet.

12.3.4 Porosität

Die Porosität wird im Anschluss an die Messung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit (Kapitel 12.3.1 und der ungesättigten hydraulischen Eigenschaften (Kapitel 12.3.2) bestimmt. Der Volumenanteil der luft- oder wassergefüllten Poren wird dabei aus der Gewichts Differenz zwischen gesättigter und getrockneter Probe bestimmt. Dabei wird davon ausgegangen, dass sämtliche Poren der Probe nach der Aufsättigung wassergefüllt sind. Die Porosität ist somit identisch zu dem Sättigungswassergehalt. Als Gesamtvolumen des Bodens wird das Volumen der Probe bei Sättigung verwendet.

12.4 Bodenchemische und -physikalische Analysen an gestörten Proben und Proben der Beprobungspunkte

Die moorbodenchemischen Analysen werden bis auf eine Kenngröße nach normierten bzw. angepassten Standardverfahren durchgeführt. Es wird kurz die Durchführung der Kenngrößen-Methode vorgestellt und die einhergehenden qualitätssichernden Maßnahmen. Ein wesentlicher Punkt ist die Ermittlung der Vergleichspräzision der Messdaten, um die Güte bzw. deren Messunsicherheit zu bestimmen. Dies wird durch die regelmäßige Messung von Referenzmaterial (soweit vorhanden) und der Teilnahme des Labors an nationalen bzw. internationalen Ringversuchen gewährleistet. Generell werden die Bodenkenngößen bei Verwendung feldfrischer Proben in dreifacher und bei getrockneten Proben in zweifacher Wiederholung gemessen.

12.4.1 Probenaufbereitung

Normvorlage:

- **DIN 19747:2009-07**

Für die Probenbehandlung und Aufarbeitung von getrockneten Bodenmaterial kann auf verschiedene Normen bzw. Richtlinien zurückgegriffen werden. Hingegen sind für Moorböden oder für feldfrische Bodenproben keine offiziellen Normen vorhanden. Teilweise lassen sich bei der VDLUFA (Verband deutscher landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten) in Verbindung mit Bodenkenngößen Handlungsempfehlungen zu Moorböden ableiten, beispielsweise soll nach VDLUFA (2012) die CAL-Extraktion (Kapitel 12.4.5) und nach VDLUFA (1991) die Messung des pH-Werts an Moor- und Anmoorböden an feldfrischen Proben erfolgen. Auch sollte die Extraktion von redoxsensitivem Phosphor an feldfrischen Proben erfolgen (Zak et al., 2008). Eine konkrete Anleitung zur Aufbereitung von Moorböden gibt es allerdings nicht.

Das feldfrische Probenmaterial wird daher nach einer im Rahmen des Moorbodenmonitorings ausgearbeiteten Standardarbeitsanweisung „Probenaufbereitung feldfrischer Bodenproben“ aufbereitet. Aus den feuchten Proben werden zunächst die erkennbaren rezenten Wurzeln entfernt. Anschließend werden die verschiedenen Probenarten mit unterschiedlichen Verfahren homogenisiert:

- Rein organische Proben mit einem hohen Faseranteil (z.B. Wollgrastorfe oder *Sphagnum*-Torfe mit entsprechenden Beimengungen) werden zunächst mit einer Schere, Hobel oder Küchenmesser vorzerkleinert. Anschließend kann das vorbearbeitete Material in einer Messermühle (GM 300, Retsch, Haan) homogenisiert werden (Programmablauf nachfolgend).

- Rein organische Proben ohne Fasermaterial (z.B. reine Moostorfe, (weiche) Holztorfe, Radizellentorfe oder Schilftorfe) werden durch ein 3-Stufen-Programm an der Messermühle homogenisiert:
 - 1. Stufe: Vorzerkleinerung (10 Sekunden bei 500 U min⁻¹)
 - 2. Stufe: Zerkleinerung (10 Sekunden bei 1.800 U min⁻¹)
 - 3. Stufe: Nachzerkleinerung, bei schwierigen Proben mehrfach (15 Sekunden bei 2.400 U min⁻¹)
- Proben mit Mineralanteil, vererdete und vermulmte Torfe sowie Mudden werden durch ein 6,3 mm Sieb gepresst und mit einem Löffel umgerührt.

Die homogenisierten Proben werden in etikettierte Frischhaltedosen gefüllt und in einer Kühlzelle aufbewahrt.

Die gestörten Proben der mineralischen Unterböden aus dem Bodenprofil und die volumengetreuen Proben der Beprobungspunkte werden nach der DIN 19747:2009-07 (DIN e.V., 2009) behandelt. Nach einer Trocknung bei 60 °C (bis zum Erreichen der Gewichtskonstanz) werden die Proben < 2 mm (Feinboden) gesiebt. Die Wurzeln werden per Hand aussortiert und verworfen. Für eine Homogenisierung der Proben reicht es aus, die Probe gut mit einem Löffel zu durchrühren.

Bei Treposolen fallen aufgrund der Beprobung größere Probenmengen an, so dass mehrere Teilproben für die analysierten Bodenkenngößen abgenommen werden. Bei Probenmaterial < 2,5 kg Trockenmasse wird eine Teilprobe pro Kenngröße genommen. Bei einer getrockneten Probenmenge > 10 kg werden 10 Teilproben entnommen und analysiert.

12.4.2 Wassergehalt (feldfrisch und ofentrocken)

Normvorlagen:

- **DIN EN 15934:2012-11**
- **GAFA (2014):** HFA A2.1 Wassergehalt

Zur Bestimmung des Wassergehalts werden drei feldfrische homogenisierte Teilproben mit jeweils ca. 25 g in kleine Alu-Schalen abgewogen. Die Proben werden nun bei 105 °C bis Gewichtskonstanz getrocknet. Im Routinebetrieb ist dies nach 24 Stunden geschehen. Die Trocknung wird aber konservativ zur Absicherung auf 48 Stunden verlängert. Die Proben in den kleinen Alu-Schalen werden in größeren Alu-Schalen zusammengeführt und zur Abkühlung bis Raumtemperatur im Exsikkator eingestellt. Abschließend werden die Proben an einer Präzisionswaage (Genauigkeit: 0,01 g, Mettler Toledo, Columbus, Ohio, USA) zurückgewogen.

Für die Bestimmung von Elementgehalten wie Kohlenstoff etc. an organischen Proben, die bei 60 °C getrocknet wurden (siehe GAFA, 2014: 2.1 Wassergehalt), muss der Wassergehalt der ofentrockneten Proben bekannt sein. Daher wird das oben beschriebene Prozedere auch für ofentrockene Proben durchgeführt. Eigene Untersuchungen haben gezeigt, dass eine Bestimmung von Kohlenstoff und Stickstoff nach Trocknung bei 60 °C ohne Korrektur des Wassergehalts zu einer Unterschätzung der Elementgehalte führt (Dettmann et al., 2021). Bei geringeren Trocknungstemperaturen als 60°C ist eine Korrektur nicht bei allen Torfarten möglich.

Im Handbuch Forstliche Analytik A2.1 Wassergehalt (GAFA, 2014) heißt es unter Prinzip der Methode: „Der Wassergehalt wird durch Trocknen der luftgetrockneten oder bei 40 °C (Boden) bzw. 60 °C (Humus) vorgetrockneten Probe bei 105 °C und Wiegen der Probe vor und nach der Trocknung bestimmt. Mit dem Umrechnungsfaktor UF, der aus dem so ermittelten Wassergehalt (Masse-%) berechnet wird, können Elementgehalte von vorgetrockneten Proben auf absolut trockene Proben umgerechnet werden“.

12.4.3 pH-Wert (H₂O und CaCl₂)

Normvorlage:

- **DIN ISO 10390: 2005-12**

Zur Bestimmung der pH-Wertes werden drei Proben mit jeweils 5 ml feldfrischem Torf bzw. organischem Boden und 25 ml destilliertem Wasser bzw. einer 0,01 mol L⁻¹ CaCl₂-Lösung versetzt und in einem Überkopfschüttler bei 20 U min⁻¹ für zwei Stunden in 50 ml Zentrifugenröhrchen geschüttelt. Das Boden-Lösungsverhältnis ist nach der DIN ISO 10390:2005-12 1:5, jedoch aufgrund der Verwendung von feldfrischen Proben entsprechend höher. Eine Vorstudie mit verschiedenen Torfen konnte zeigen, dass kein signifikanter Einfluss durch ein höheres Boden-Lösungsverhältnis auf den pH-Wert besteht. Anschließend wird die Suspension im Vergleich zur DIN ISO 10390:2005-12 nicht stehen gelassen, sondern 10 Minuten bei 8.100 U min⁻¹ zentrifugiert. Der pH-Wert wird mittels pH-Meter (ProLab 4000, SI ANALYTICS, Weilheim) in Verbindung mit einer pH-Einstabmesskette (Blue Line 28 pH, SI ANALYTICS, Weilheim) gemessen. Zur Zeit- und Kostenersparnis wird ein pH/EC-Messroboter (SP2000, SKALAR, Breda) verwendet.

12.4.4 Phosphor, Mangan und Eisen im Dithionit-Extrakt (reduziert)

Vorlage:

- **Psenner et al. (1984)**

Während sich in Deutschland für die Beurteilung der Pflanzenverfügbarkeit von insbesondere Phosphor (P) die CAL-Extraktion durchgesetzt hat (Kapitel 12.4.5), ist an Moorstandorten auch die Menge des redoxsensitiven Phosphors von Interesse, um z.B. die Mobilisierbarkeit durch Vernässungsmaßnahmen zu beurteilen (Zak et al., 2010). Dazu wurde eine sequenzielle Extraktionsmethode entwickelt (Zak et al., 2008), deren zweiter Schritt („reduktiv-löslicher P“) der Methode nach Psenner et al. (1984) entspricht. Auf eine säurehaltige komplexierende Extraktionsmethode sollte verzichtet werden, um das Herauslösen von P aus kristallinen redoxunempfindlichen Verbindungen wie z.B. Apatit zu vermeiden. Es werden für ein Boden-Lösungsverhältnis von 1:25 zunächst 1+x g feldfrisches Probenmaterial dreifach eingewogen (x ist die zusätzlich einzuwiegende Bodenmenge, die die Masse des Bodenwassers ergänzt, um identische 1 g Trockenmasse zu erhalten) und mit 25 ml eines Lösemittelgemisches aus Natrium-Dithionit und Natriumhydrogencarbonat versetzt. Die einzuwiegende Bodenmenge errechnet sich aus dem Wassergehalt (siehe Kapitel 12.4.2, S. 70). Die Probe wird für eine Stunde bei 20 U min⁻¹ im Überkopfschüttler geschüttelt. Die Suspension wird 10 Minuten bei 12.210 U min⁻¹ zentrifugiert und anschließend mit einem 0,45 µm Cellulose-Acetat-Filter filtriert. Die P, Mn und Fe-Konzentrationen werden bei den Wellenlängen von 178,28, 257,61 und 238,20 nm, axial, im Emissionsspektrometer mit gekoppeltem Plasma (ICP-OES, iCAP 7400 Thermo Fisher Scientific, Waltham, Massachusetts, USA) gemessen.

12.4.5 Phosphor, Kalium und Eisen im CAL-Extrakt

Normvorlage:

- **VDLUFA (2012): MBI-A6.2.1.1**

Es hat sich in Deutschland durchgesetzt, dass der pflanzenverfügbare Anteil an Phosphor und Kalium mittels Calcium-Acetat-Lactat-Auszug der VDLUFA-Methode bestimmt werden kann. Dazu wird bei einem Boden-Lösungsverhältnis von 1:20 zunächst 5+x g feldfrisches Probenmaterial dreifach eingewogen (x ist die zusätzlich einzuwiegende Bodenmenge, die die Masse des Bodenwassers ergänzt, um identische 5 g Trockenmasse zu erhalten) und mit 100 ml eines Lösemittelgemisches aus Calciumlactat, Calciumacetat und Essigsäure (zur pH-Einstellung auf 4,1) versetzt. Die einzuwiegende Bodenmenge errechnet sich aus dem Wassergehalt (siehe

Kapitel 12.4.2, S. 70). Die Probe wird für 90 Minuten bei 20 U min^{-1} im Überkopfschüttler geschüttelt. Die Suspension wird 10 Minuten bei $12.210 \text{ U min}^{-1}$ zentrifugiert und anschließend mit einem $0,45 \text{ }\mu\text{m}$ Cellulose-Acetat-Filter filtriert. Die P, K und Fe-Konzentrationen werden bei den Wellenlängen von 178,28, 766,49 und 238,20 nm, axial, im Emissionsspektrometer mit gekoppeltem Plasma (ICP-OES, iCAP 7400 Thermo Fisher Scientific, Waltham, Massachusetts, USA) gemessen.

12.4.6 Kohlenstoff- und Stickstoffgehalt

Normvorlagen:

- DIN EN 15936:2012-11
- DIN EN 16168:2012-11
- DIN ISO 10694:1996-08 (zurückgezogen)
- DIN 19539:2016-12
- VDLUFA MBI-A4.1.3.1 (VDLUFA, 2016)

Für die Messung der Gehalte an Gesamtkohlenstoff (C_t) und Gesamtstickstoff (N_t) wird 60°C getrockneter Feinboden in einer Planetenmühle mit Achatgefäßen vermahlen ($< 60 \text{ }\mu\text{m}$; Pulverisette 5, FRITSCH, Idar-Oberstein). Die Messung erfolgt mittels Makro-Elementaranalyse mit einer Einwaage von 30-800 mg über die Verbrennung des Bodenmaterials bei 960°C (Vario Max Cube, Elementar, Langenselbold). Durch die Verbrennung wird der Kohlenstoff zu Kohlenstoffdioxid (CO_2) oxidiert und Stickstoff nach Reduktion von Stickoxiden (NO_x) zu elementarem Stickstoff (N_2) mittels Wärmeleitfähigkeitsdetektor gemessen.

Kohlenstoff im Boden kann in organischer Form (C_{org}) oder in carbonathaltigen Böden auch als anorganischer Kohlenstoff (C_{anorg}) vorliegen. Liegt der pH-Wert (CaCl_2) des Bodens $< 6,2$, wird in Anlehnung an GAFA (2014; HFA A2.5) davon ausgegangen, dass C_t im Boden identisch ist mit C_{org} ; d. h. der Messwert des für C_t wird gleich C_{org} gesetzt und C_{anorg} nicht bestimmt. In folgenden Fällen wird eine zusätzliche Bestimmung des C_{anorg} durchgeführt:

- Wenn bei der Standortaufnahme festgestellt wurde, dass der beprobte Boden Carbonat enthält (HCl-Test),
- wenn der pH-Wert (CaCl_2) $\geq 6,2$ ist oder
- wenn der pH-Wert (CaCl_2) des Oberbodens deutlich über dem des Unterbodens liegt (z. B. durch eine kürzlich erfolgte Kalkung).

Die Fraktionierung von C_t in C_{org} und C_{anorg} erfolgt über die thermische Zersetzung bei verschiedenen Temperaturstufen: C_{org} wird bei einer Verbrennungstemperatur von 550°C bestimmt (VDLUFA, MBI-A4.1.3.2, 2016), der thermisch stabilere Carbonat-Kohlenstoff wird erst bei höheren Temperaturen (ca. 600 bis 900°C) als CO_2 freigesetzt. Im Rahmen des Moorbodenmonitorings werden die oben genannten Kohlenstofffraktionen durch die Temperaturstufenmethode (Verbrennung bei 550°C für C_{org}) und danach Aufheizen auf 1.000°C (für C_{anorg}) mit einem RC 612 (LECO, St. Joseph, Michigan, USA) bestimmt.

Zur Qualitätssicherung der Kohlenstoff- und Stickstoff-Analysen wurde zu Beginn der Routinemessungen ein Ringversuch mit sechs Institutionen durchgeführt, wobei die Teilnehmer unterschiedliche Verfahren angewendet haben. Es wurden drei hauseigene Bodenstandards mit unterschiedlichen Konzentrationen in den Routinemessungen mitgeführt (Ableitung von Regelkarten). Zusätzlich wurden, zeitlich versetzt, LECO-Laborstandardproben gemessen und es wurde am Ringversuch ISE, WEPAL für die Kenngrößen C_t , N_t und C_{org} teilgenommen.

12.4.7 Glühverlust

Normvorlage:

- **DIN EN 15935: 2012-11**

Der Glühverlust wird als Massenanteil einer Bodenprobe dargestellt. Er ist die errechnete Differenz der Massen vor und nach dem Glühvorgang bei einer Temperatur von 550 ± 25 °C. Die Probe wird zunächst bei 105 °C getrocknet, abgekühlt und gewogen. Anschließend werden von der getrockneten Probe zwei Teilproben (je 1 g Trockenmasse) im Verbrennungsofen (Nabertherm LB40/11BO, 28865 Lilienthal) für vier Stunden bei o. g. Temperatur verbrannt. Nach der Entnahme aus dem Ofen und deren Abkühlung werden die Proben zurückgewogen und der Glühverlust aus der Doppelbestimmung ermittelt.

12.4.8 Texturanalyse

Normvorlage:

- **DIN ISO 11277:2002-08**
- **GAFA (2014): HFA A2.5 Korngrößenzusammensetzung in Mineralböden**

Für die Bestimmung des Gehaltes von Sand, Schluff und Ton im Feinboden mineralischer Horizonte organischer Böden sowie in mineralischen Beimengungen bzw. Überdeckungen von Moorböden werden 10-30 g getrockneter Feinboden eingewogen. Standardmäßig wird an allen Proben eine Humuszerstörung mit 30%-igem Wasserstoffperoxid durchgeführt. Eine Carbonatzerstörung findet bei Proben mit Gehalten zwischen 2 und < 50 Masse-% (CaCO_3 -Äquivalent nach Messung s. u.) statt. Der Salzgehalt der Probensuspension wird auf < 400 $\mu\text{S cm}^{-3}$ eingestellt. Auf die optionale Zerstörung der Eisen- und Manganoxide und -Hydroxide bzw. Gips nach DIN ISO 11277:2002-08 wird verzichtet. Für spätere Berechnungen der einzelnen Texturfractionen Sand, Schluff und Ton muss die Gesamtmasse der reinen Partikel (ohne Humus- und Carbonatgehalt) bekannt sein. Daher wird diese in einem separaten Gefäß (Probenpräparation wie bei den Messsuspensionen) zusätzlich ermittelt. Das nachfolgende Dispergieren mittels Natriummetaphosphat und Natriumcarbonat erfolgt 18 Stunden im Überkopfschüttler bei 20 U min⁻¹. Die Abtrennung der Sandfraktionen (Fein-, Mittel-, Grobsand) erfolgt mittels Nasssiebung (destilliertes Wasser) mit drei Prüfsieben ($\varnothing = 10$ cm) gestapelt als Turm. Die Maschenweite der Siebe sind 630 μm oben, 200 μm mittig und 63 μm unten. Die Suspension mit den drei Schluff- und der Tonfraktion wird unterhalb des Siebes mit der Maschenweite 63 μm in einem 1.000 ml Messzylinder aufgefangen. Nach Abschluss der Nasssiebung werden die Siebe bei 105 °C getrocknet (bis Gewichtskonstanz), im Exsikkator abgekühlt und ausgewogen (Leergewicht wurde zuvor bestimmt). Die Massebestimmung der Schluff- und Tonfraktionen erfolgte nach dem KÖHNschen-Prinzip mittels Sedimentation (DIN ISO 11277:2002-08). Das Pipettieren der Suspension wird automatisiert mit einem Sedimaten (4-12, UGT, Müncheberg) durchgeführt. Die Glasgefäße mit den entnommenen Suspensionsproben werden bei 105 °C getrocknet, im Exsikkator abgekühlt und die Partikelmasse der jeweiligen Suspensionsprobe zurückgewogen (das Leergewicht wurde zuvor bestimmt und abgezogen). Nach Abzug des Blindwertes werden die prozentualen Anteile am Feinboden (auf 100% korrigiert) berechnet (DIN ISO 11277:2002-08). An Bodenproben, die einen Humusgehalt von > 30 Masse-% aufweisen, wird keine Körnungsanalyse durchgeführt (siehe HFA A2.5).

12.4.9 Trockenrohdichte (Beprobungspunkte)

Normvorlage:

- **DIN EN ISO 11272:2017-07**

Die Berechnung der Trockenrohddichte an den Beprobungspunkten erfolgt an den volumengetreuen Proben, die je nach Standort mit unterschiedlichen Probenahmegeräte entnommen wurden (Kapitel 5.1.1). Eine Besonderheit stellen die Blockproben dar, aus denen im gefrorenen Zustand Quader mit einer Kantenlänge von 0,15 m x 0,20 m x 0,10 m herausgesägt werden, um Proben definierten Volumens zu erhalten.

In einem ersten Schritt werden die Proben für die weiteren chemischen Analysen auf 60 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und im Anschluss vollständig gewogen. Nachfolgend werden von der bei 60 °C getrockneten Probe zwei Aliquote entnommen und bei 105 °C nachgetrocknet. Die bei 60 °C ermittelte Masse wird im Anschluss um die Masse des Restwassers nach Nachtrocknung korrigiert.

Grobbodenanteile (> 2 mm) sowie Wurzelanteile werden bei Vorhandensein quantitativ bestimmt. Die so erfassten Massen beider Bestandteile werden im Anschluss von der Masse der Probe abgezogen und das Probenvolumen mit Hilfe der Reindichten (Wurzeln: 1,00 g cm⁻³, Grobboden: 2,65 g cm⁻³) korrigiert.

Alle Proben werden an einer Präzisionswaage (Genauigkeit: 0,01 g, Mettler Toledo, Columbus, Ohio, USA) gewogen.

Dank

Wir bedanken uns beim Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft für die Finanzierung des Projekts „Aufbau eines deutschlandweiten Moorbodenmonitorings für den Klimaschutz – Teil 1: Offenland“ aus Sondermitteln für die Klimaberichterstattung, Projektionen, Maßnahmen.

Bei der Konzeption des Moorbodenmonitorings und bei Vorversuchen haben zahlreiche aktuelle und ehemalige Kolleg*innen der AG Moorforschung und des Thünen Labors für Bodenmonitoring sowie studentische Hilfskräfte engagiert teilgenommen. Dafür, und auch für die kritische Kommentierung des Methodenhandbuchs, möchten wir uns bedanken.

Das Moorbodenmonitoring wird durch eine projektbegleitende Arbeitsgruppe (PAG) unterstützt. Neben einem ersten Treffen der PAG wurde ein „Methodenworkshop“ mit Kolleg*innen verschiedener Fachdisziplinen durchgeführt. Bei beiden Veranstaltungen wurden die Methoden des Moorbodenmonitorings kritisch diskutiert. Durch die Kommentare und Anregungen der Teilnehmenden konnten Verbesserungen und Präzisierungen der methodischen Ansätze vorgenommen werden, wofür wir uns ebenfalls bedanken möchten. Auch haben uns Kolleg*innen der zuständigen Fachbehörden Bodendaten zur Verfügung gestellt und unsere bisherigen Arbeiten diskutiert. Wir freuen uns auf den weiteren fachlichen Austausch!

Das Moorbodenmonitoring wäre nicht möglich ohne die Flächenbesitzer*innen und Bewirtschafter*innen. Ihnen – wie auch den zuständige Genehmigungsbehörden – gilt unser besonderer Dank. Wir hoffen auf eine weitere vertrauensvolle und ergiebige Zusammenarbeit!

Literaturverzeichnis

- Ackermann W, Fuchs D, Tschisch J, Hänel, K, Lang A, Lauser P, Lipski A, Saborowski J, Wichelhaus A (2020): Ökosystem-Monitoring auf bundesweit repräsentativen Stichprobenflächen (ÖSM-I), BfN-Skripten 586, Bonn-Bad Godesberg.
<https://www.bfn.de/sites/default/files/BfN/service/Dokumente/skripten/skript586.pdf>
- Ad-hoc-AG Boden (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung (KA5), 5. Auflage, E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart
- AdV [Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland] (2019): Digitales Basislandschaftsmodell. ATKIS®Basis-DLM von 2019
- Alcántara V, Don A, Well R, Nieder R (2016): Deep ploughing increases agricultural soil organic matter stocks. *Global Change Biology* 22(8):2939-2956, <https://doi.org/10.1111/gcb.13289>
- Alshammari L., Boyd DS, Sowter A, Marshall C, Andersen R, Gilbert P, Marsh S, Large DJ (2020): Use of surface motion characteristics determined by InSAR to assess peatland condition. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 125:e2018JG004953, <https://doi.org/10.1029/2018JG004953>
- Artz RE, Johnson S., Bruneau P, Britton AJ, Mitchel RJ, Ross L, Donaldson-Selby G, Donnelly D, Aitkenhead MJ, Gimona A, Poggio L (2019): The potential for modelling peatland habitat condition in Scotland using long-term MODIS data. *Science of The Total Environment* 660:429-442, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.327>
- Baird AJ, Surridge BWJ, Money RP (2004): An assessment of the piezometer method for measuring the hydraulic conductivity of a *Cladium mariscus* - *Phragmites australis* root mat in a Norfolk (UK) fen. *Hydrological Processes* 18:275-291, <https://doi.org/10.1002/hyp.1375>
- Bambalov N (1999): Dynamics of organic matter in peat soil under the conditions of sand-mix culture during 15 years (a short communication). *International Agrophysics* 13(2):269-272
- Bechtold M, Dettmann U, Wöhl L, Durner W, Piayda A, Tiemeyer, B (2018): Comparing methods for measuring water retention of peat near permanent wilting point. *Soil Science Society of America Journal* 82(3):601-605, <https://doi.org/10.2136/sssaj2017.10.0372>
- Bechtold M, Tiemeyer B, Laggner A, Leppelt T, Frahm E, Belting S (2014): Large-scale regionalization of water table depth in peatlands optimized for greenhouse gas emission upscaling. *Hydrology and Earth System Sciences* 18:3319-3339, <https://doi.org/10.5194/hess-18-3319-2014>
- Belokopytov I, Beresnevich V (1955): Giktorf's peat borers. *Torfyanyaya Promyshlennost* 8:9-10
- Beyer C (2014): Greenhouse gas exchange of organic soils in Northwest Germany - Effects of organic soil cultivation, agricultural land use and restoration, Phd thesis at the University of Bremen, Germany, <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:gbv:46-00103939-13>
- Brand EW, Premchitt J (1980): Shape factors of cylindrical piezometers. *Géotechnique* 30:369-384, <https://doi.org/10.1680/geot.1980.30.4.369>
- Bund und Länder (2021): Bund-Länder-Zielvereinbarung zum Klimaschutz durch Moorbodenschutz, https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/_Landwirtschaft/Klimaschutz/moorbodenschutz-blzv.pdf
- BUWAL [Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft] (2003): Handbuch. Probenahme und Probenvorbereitung für Schadstoffuntersuchungen in Böden. Vollzug Umwelt. Bern, 90 p
- Cabezas A, Pallasch M, Schönfelder I, Gelbrecht J, Zak D (2014): Carbon, nitrogen, and phosphorus accumulation in novel ecosystems: Shallow lakes in degraded fen areas. *Ecological Engineering* (66):63-71. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.10.037>
- Dane JH, Hopmans JW (2002): Laboratory. In: Dane JH, Topp GC (ed), *Methods of Soil Analysis: Part 4 - Physical Methods*. Soil Science Society of America, Madison: pp 675-719
- Dettmann U, Bechtold M, Frahm E, Tiemeyer B (2014): On the applicability of unimodal and bimodal van Genuchten-Mualem based models to peat and other organic soils under evaporation conditions. *Journal of Hydrology* 515:103-115, <https://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.04.047>

- Dettmann U, Bechtold M, Viohl T, Piayda A, Sokolowksy L, Tiemeyer B (2019): Evaporation experiments for the determination of hydraulic properties of peat and other organic soils: An evaluation of methods based on a large dataset. *Journal of Hydrology* 575:933-944, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.05.088>
- Dettmann U, Kraft NN, Rech R, Heidkamp A, Tiemeyer B (2021): Analysis of peat soil organic carbon, total nitrogen, soil water content and basal respiration: Is there a 'best' drying temperature? *Geoderma* 403:115231, <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115231>
- Dettmann U, Frank S, Wittnebel M, Piayda A, Tiemeyer B (2022): How to take volume-based peat samples down to mineral soil - A comparison of different sampling devices. *Geoderma* 427:116132, <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116132>
- DIN e.V. [Deutsches Institut für Normung e.V.] (ed) (1968): DIN 19672-2:1968-04, Bodenentnahmegeräte für den Landeskulturbau; Geräte zur Untersuchung und Entnahme von Moorbodenproben. Beuth-Verlag Berlin, 8 p, <https://dx.doi.org/10.31030/1175239>
- DIN e.V. [Deutsches Institut für Normung e.V.] (ed) (1996): DIN ISO 10694:1996-08, Bodenbeschaffenheit – Bestimmung von organischem Kohlenstoff und Gesamtkohlenstoff nach trockener Verbrennung (Elementaranalyse). Beuth-Verlag, Berlin, 5 p, zurückgezogen
- DIN e.V. [Deutsches Institut für Normung e.V.] (ed) (2002): DIN ISO 11277:2002-08, Bodenbeschaffenheit – Bestimmung der Partikelgrößenverteilung in Mineralböden – Verfahren mittels Siebung und Sedimentation. Beuth-Verlag, Berlin, 38 p, <https://dx.doi.org/10.31030/9283499>
- DIN e.V. [Deutsches Institut für Normung e.V.] (ed) (2005): DIN ISO 10390:2005-12, Bodenbeschaffenheit - Bestimmung des pH-Wertes. Beuth-Verlag, Berlin, 9 p, zurückgezogen
- DIN e.V. [Deutsches Institut für Normung e.V.] (ed) (2009): DIN 19747:2009-07, Untersuchung von Feststoffen – Probenvorbehandlung, -vorbereitung und -aufbereitung für chemische, biologische und physikalische Untersuchungen. Beuth-Verlag, Berlin, 51 p, <https://dx.doi.org/10.31030/1527573>
- DIN e.V. [Deutsches Institut für Normung e.V.] (ed) (2012): DIN 19683-9: 2012-07, Bodenbeschaffenheit - Physikalische Laboruntersuchungen - Teil 9: Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit in wassergesättigten Stechzylinderbodenproben. Beuth-Verlag, Berlin, 13 p, <https://dx.doi.org/10.31030/1893408>
- DIN e.V. [Deutsches Institut für Normung e.V.] (ed) (2012): DIN EN 15934:2012-11, Schlamm, behandelter Bioabfall, Boden und Abfall – Berechnung des Trockenmasseanteils nach Bestimmung des Trockenrückstands oder des Wassergehalts. Beuth-Verlag, Berlin, 23 p, <https://dx.doi.org/10.31030/1866718>
- DIN e.V. [Deutsches Institut für Normung e.V.] (ed) (2012): DIN EN 15936:2012-11, Schlamm, behandelter Bioabfall, Boden und Abfall – Bestimmung des gesamten organischen Kohlenstoffs (TOC) mittels trockener Verbrennung. Beuth-Verlag, Berlin, 28 p, <https://dx.doi.org/10.31030/1866720>
- DIN e.V. [Deutsches Institut für Normung e.V.] (ed) (2012): DIN EN 16168:2012-11, Schlamm, behandelter Bioabfall, Boden und Abfall – Bestimmung des Gesamt-Stickstoffgehalts mittels trockener Verbrennung. Beuth-Verlag, Berlin, 13 p, <https://dx.doi.org/10.31030/1866716>
- DIN e.V. [Deutsches Institut für Normung e.V.] (ed) (2012): DIN EN 15935:2012-11, Schlamm, behandelter Bioabfall, Boden und Abfall – Bestimmung des Glühverlusts. Beuth-Verlag, Berlin, 13 p, <https://dx.doi.org/10.31030/1866719>
- DIN e.V. [Deutsches Institut für Normung e.V.] (ed) (2016): DIN 19539:2016-12, Untersuchung von Feststoffen – Temperaturabhängige Differenzierung des Gesamtkohlenstoff (TOC400, ROC, TIC900). Beuth-Verlag Berlin, 20 p, <https://dx.doi.org/10.31030/2585434>
- DIN e.V. [Deutsches Institut für Normung e.V.] (ed) (2017): DIN EN ISO 11272:2017-07, Bodenbeschaffenheit – Bestimmung der Trockenrohdichte. Beuth-Verlag, Berlin, 23 p, <https://dx.doi.org/10.31030/2581910>
- DIN e.V. [Deutsches Institut für Normung e.V.] (ed) (2020): DIN EN ISO 11274:2020-04, Bodenbeschaffenheit - Bestimmung des Wasserrückhaltevermögens – Laborverfahren. Beuth-Verlag, Berlin, 34 p, <https://dx.doi.org/10.31030/3071987>

- Evans CD, Peacock M, Baird AJ, Artz RRE, Burden A, Callaghan N, Chapman PJ, Cooper HM, Coyle M, Craig E, Cumming A, Dixon S, Gauci V, Grayson RP, Helfter C, Heppell CM, Holden J, Jones DL, Kaduk J, Morrison R (2021a): Overriding water table control on managed peatland greenhouse gas emissions. *Nature* 593:548–552, <https://dx.doi.org/10.1038/s41586-021-03523-1>
- Evans CD, Callaghan N, Jaya A, Grinham A, Sjogersten S, Page SE, Harrison ME, Kusin K, Kho LK, Ledger M, Evers S, Mitchell Williamson J, Radbourne AD, Jovani-Sancho AJ (2021b): A novel low-cost, high-resolution camera system for measuring peat subsidence and water table dynamics. *Frontiers in Environmental Science* 9:630752, <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.630752>
- Fell H, Roskopf N, Bauriegel A, Hasch B, Schimmelmann M, Zeitz J (2015): Erstellung einer aktuellen Moorkarte für das Land Brandenburg. *TELMA* 45:75-104, <https://doi.org/10.23689/fidgeo-2898>
- Finck P, Heinze S, Rath S, Riecken U, Symank A (2017): Rote Liste der gefährdeten Biotoptypen Deutschlands, dritte fortgeschriebene Fassung 2017. *Naturschutz und Biologische Vielfalt* 156, Bonn-Bad Godesberg, 637 p
- GAFA [Gutachterausschuss Forstliche Analytik] (2014): Handbuch Forstliche Analytik (HFA), 1.-5. Ergänzungen des Gutachterausschuss Forstliche Analytik: Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV) & Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (NW-FVA), Bonn.
- Gardner WR, Miklich FJ (1962): Unsaturated conductivity and diffusivity measurements by a constant flux method. *Soil Science* 93:271-274, <https://doi.org/10.1097/00010694-196204000-00008>
- Golubev V, Whittington P (2018): Effects of volume change on the unsaturated hydraulic conductivity of *Sphagnum* moss. *Journal of Hydrology* 559:884–894, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.02.083>
- Höper H (2015): Treibhausgasemissionen aus Mooren und Möglichkeiten der Verringerung. *TELMA Beiheft* 5:133-158, <https://doi.org/10.23689/fidgeo-2929>
- Howie SA, Hebda RJ (2018): Bog surface oscillation (mire breathing): A useful measure in raised bog restoration. *Hydrological Processes* 32:1518–1530, <https://doi.org/10.1002/hyp.11622>
- Hvorslev MJ (1951): Time lag and soil permeability in ground-water observations, Waterways Experiment Station, Corps of Engineers. *US Army Bulletin* 36, Vicksburg, 49 p.
- Iden SC, Durner W (2014): Comment on “Simple consistent models for water retention and hydraulic conductivity in the complete moisture range” by A. Peters. *Water Resources Research* 50(9):7530-7534, doi: <https://doi.org/10.1002/wrcr.20548>
- IPCC [Intergovernmental Panel on Climate Change] (2006): Good practice guidance for land use, land use change and forestry. Volume 4, Chapter 3: Consistent representation of land. Genf.
- IPCC [Intergovernmental Panel on Climate Change] (2014): 2013 Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands, Hiraishi T, Krug T, Tanabe K, Srivastava N, Baasansuren J, Fukuda M, Troxler TG. (ed), IPCC, Switzerland, <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/wetlands/>
- Jacobs A, Flessa H, Don A, Heidkamp A, Prietz R, Dechow R, Gensior A, Peoplau C, Riggers C, Schneider F, Tiemeyer B, Vos C, Wittnebel M, Müller T, Säurich A, Fahrion-Nitschke A, Gebbert S, Jaconi A, Kolata H, Laggner A, Weiser C, Freibauer A (2018): Landwirtschaftlich genutzte Böden in Deutschland - Ergebnisse der Bodenzustandserhebung. Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut, Thünen Report 64, 316 p, <https://doi.org/10.3220/REP1542818391000>
- LBEG [Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie Niedersachsen] (2017): Bodenkarte 1:50.000
- LBGR [Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe, Brandenburg] (2021): Referenzierte Moorkarte
- Liu H, Price J, Rezanezhad F, Lennartz B (2020): Centennial-scale shifts in hydrophysical properties of peat induced by drainage. *Water Resources Research* 56:e2020WR027538, <https://doi.org/10.1029/2020WR027538>
- Luthardt V, Brauner O, Dreger F, Friedrich S, Garbe H, Hirsch AK, Kabus T, Krüger G, Mauersberger H, Meisel J, Schmidt D, Täuschler L, Vahrson GW, Witt B, Zeidler M (2006): Methodenkatalog zum Monitoring - Programm der Ökosystemaren Umweltbeobachtung in den Biosphärenreservaten Brandenburgs, 4.

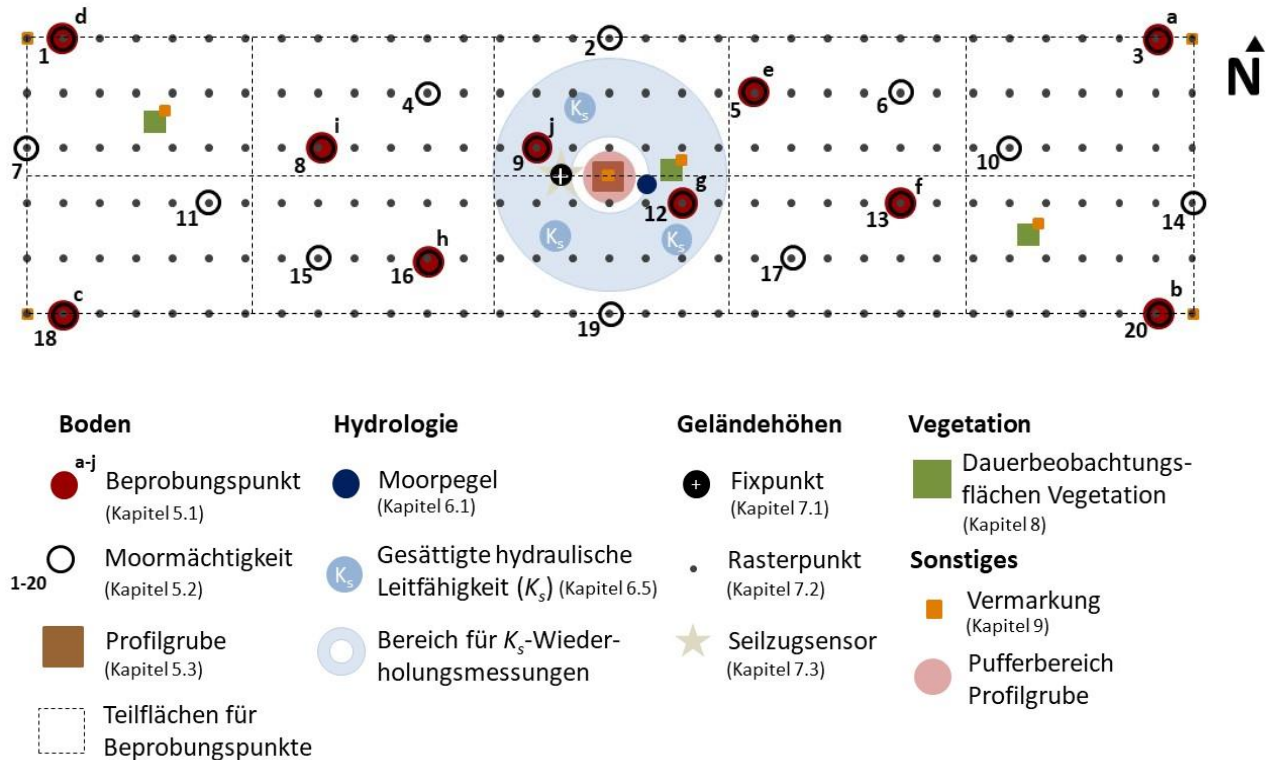
- akt. Ausgabe, unveröff., im Auftrag des Landesumweltamt Brandenburg, FH-Eberswalde, Teil A 177 p. + Anhang; Teil B 134 p. + Anhang
- Marshall C, Sterk HP, Gilbert PJ, Andersen R, Bradley AV, Sowter A, Marsh S, Large DJ (2022): Multiscale variability and the comparison of ground and satellite radar based measures of peatland surface motion for peatland monitoring. *Remote Sensing* 14:336, <https://doi.org/10.3390/rs14020336>
- Meier-Uhlherr R, Schulz C, Luthardt V (2015): Steckbriefe Moorsubstrate. 2. unveränderte Auflage, HNE Eberswalde (ed), Berlin, http://www.mire-substrates.com/download_deu.html
- Moore TR, Knowles R (1989): The influence of water table levels on methane and carbon dioxide emissions from peatland soils. *Canadian Journal of Soil Science* 69:33-38, <https://doi.org/10.4141/cjss89-004>
- Mualem Y (1976): A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research* 12(3):513-522, <https://doi.org/10.1029/WR012i003p00513>
- Nielsen DR, Wendroth O (2003): Spatial and temporal statistics, GeoEcology textbook, Catena Verlag GmbH, Reiskirchen, 398 p.
- op de Beeck M, Gielen B, Merbold L, Ayres E, Serrano-Ortiz P, Acosta M, Pavelka M, Montagnani L, Nilsson M, Klemedtsson L, Vincke C, De Ligne A, Moureaux C, Marañón-Jimenez S, Saunders M, Mereu S, Hörtnagl L (2018): Soil-meteorological measurements at ICOS monitoring stations in terrestrial ecosystems. *International Agrophysics* 32:619-631, <https://doi.org/10.1515/intag-2017-0041>
- Orgiazzi A, Ballabio C, Panagos P, Jones A, Fernández-Ugalde O (2018): LUCAS Soil, the largest expandable soil dataset for Europe: a review. *European Journal of Soil Science* 69(1):140-153, <https://doi.org/10.1111/ejss.12499>
- Pagenkemper S, Jansen-Minßen F, Krause A, Ernsing-Blaga M, Herzberg I, Kahne L, Höper H, Minke M, Sieber AC, Tiemeyer B, Heller S, Oehmke SW, Bräuer M, Dettmann U, Lange G, Gatersleben P, Schröder U, Giani L, Landscheidt S, Buchwald R, Kupke L (2022): Das Projekt SWAMPS – Verfahrensanalysen und Handlungsoptionen zur Verminderung von Treibhausgasemissionen und zum Schutz von Mooren für landwirtschaftlich genutztes Grünland. Abschlussbericht der Projektjahre 2015 bis 2021, 315 p., https://www.gruenlandzentrum.org/wp-content/uploads/2022/01/SWAMPS_Abschlussbericht_2022.pdf
- Pinheiro J, Bates D, DebRoy S, Sarkar D, R Core Team (2020): nlme: Linear and Nonlinear Mixed Effects Models. R package version 3.1-148, <https://CRAN.R-project.org/package=nlme>
- Peters A (2013): Simple consistent models for water retention and hydraulic conductivity in the complete moisture range. *Water Resources Research* 49(10):6765-6780, <https://doi.org/10.1002/wrcr.20548>
- Peters A (2014): Reply to comment by S. Iden and W. Durner on “Simple consistent models for water retention and hydraulic conductivity in the complete moisture range”. *Water Resources Research* 50(9):7535-7539, <https://doi.org/10.1002/2014WR016107>
- Peters A, Iden SC, Durner W (2015): Revisiting the simplified evaporation method: Identification of hydraulic functions considering vapor, film and corner flow. *Journal of Hydrology* 527:531-542, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.05.020>
- Peters A, Durner W (2008): Simplified evaporation method for determining soil hydraulic properties. *Journal of Hydrology* 356(1-2):147-162, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.04.016>
- Poeplau C, Jacobs A, Don A, Vos C, Schneider F, Wittnebel M, Tiemeyer B, Heidkamp A, Prietz R, Flessa H (2020): Stocks of organic carbon in German agricultural soils – Key results of the first comprehensive inventory. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 183:665-681, <https://doi.org/10.1002/jpln.202000113>
- Poeplau C, Prietz R, Don A (2022): Plot-scale variability of organic carbon in temperate agricultural soils—Implications for soil monitoring. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 185:403-416, <https://doi.org/10.1002/jpln.202100393>

- Psenner R, Pucsko R, Sager M (1984): Fractionation of organic and inorganic phosphorus compounds in lake sediments. An attempt to characterize ecologically important fractions. *Archiv für Hydrobiologie/Suppl.* 70:111-155
- Rosa E, Larocque M (2008): Investigating peat hydrological properties using field and laboratory methods: application to the Lanoraie peatland complex (southern Quebec, Canada). *Hydrological Processes* 22:1866–1875, <https://doi.org/10.1002/hyp.6771>
- Roßkopf N, Fell H, Zeitz J (2015): Organic soils in Germany, their distribution and carbon stocks. *CATENA* 133:157-170, <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.05.004>
- Säurich A, Tiemeyer B, Dettmann U, Don A (2019): How do sand addition, soil moisture and nutrient status influence greenhouse gas fluxes from drained organic soils? *Soil Biology and Biochemistry* 135:71–84, <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2019.04.013>
- Schindler U (1980): Ein Schnellverfahren zur Messung der Wasserleitfähigkeit im teilgesättigten Boden an Stechzylinderproben. *Archiv für Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde - Archives of Agronomy and Soil Science* 24:1-7
- Simola H, Pitkänen A, Turunen J (2012): Carbon loss in drained forestry peatlands in Finland, estimated by re-sampling peatlands surveyed in the 1980s. *European Journal of Soil Sciences* 63(6):798-807, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2012.01499.x>
- Šimůnek J, Šejna M, Saito H, Sakai M, van Genuchten MT (2013): The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media, Department of Environmental Sciences, University of California Riverside, California.
- Smeaton C, Barlow NLM, Austin WEN (2020): Coring and compaction: Best practice in blue carbon stock and burial estimations. *Geoderma* 364: Article 114180, <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114180>
- Smith P, Soussana J-F, Angers D, Schipper L, Chenu C, Rasse DP, Batjes NH, van Egmond F, McNeill S, Kuhnert M, Arias-Navarro C, Olesen J-E, Chirinda N, Fornara D, Wollenberg E, Alvaro-Fuentes J, Sanz-Cobena A, Klumpp K (2019): How to measure, report and verify soil carbon change to realize the potential of soil carbon sequestration for atmospheric greenhouse gas removal. *Global Change Biology* 26:219–241, <https://doi.org/10.1111/gcb.14815>
- Surridge BWJ, Baird AJ, Heathwaite AL (2005): Evaluating the quality of hydraulic conductivity estimates from piezometer slug tests in peat. *Hydrological Processes* 19:1227-1244, <https://doi.org/10.1002/hyp.5653>
- Tiemeyer B, Albiac Borraz E., Augustin J, Bechtold M, Beetz S, Beyer C, Drösler M, Ebli M, Eickenscheidt T, Fiedler S, Förster C, Freibauer A, Giebels M, Glatzel S, Heinichen J, Hoffmann M, Höper H, Jurasinski G, Leiber-Sauheitl K, Peichel-Brak M, Roßkopf N, Sommer M, Zeitz J (2016): High emissions of greenhouse gases from grasslands on peat and other organic soils. *Global Change Biology* 22:4134–4149, <https://doi.org/10.1111/gcb.13303>
- 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. *Bewertungsinstrumente und Erhebung von Indikatoren. BfN-Skripten* 462, Bonn-Bad Godesberg, 319 p, https://www.moorschutz-deutschland.de/fileadmin/moorschutz/_projekt/BfN-Skript_462_Moorschutz_internet.pdf
- Tiemeyer B, Freibauer A, Albiac-Borraz E, Augustin J, Bechtold M, Beetz S, Beyer C, Ebli M, Eickenscheidt T, Fiedler S, Förster C, Gensior A, Giebels M, Glatzel S, Heinichen J, Hoffmann M, Höper H, Jurasinski G, Laggner A, Leiber-Sauheitl K, Peichel-Brak M, Drösler M (2020): A new methodology for organic soils in national greenhouse gas inventories: Data synthesis, derivation and application. *Ecological Indicators* 109: Article 105838, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105838>
- UBA [Umweltbundesamt] (2022): Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2022. Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990-2020. *Climate Change* 24/2022, Dessau-Roßlau, 1048 p.

- VDLUFA [Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten e.V.] (ed) (1991): MBI-A5.1.1: Bestimmung des pH-Wertes. In: Methodenbuch Band I Die Untersuchung von Böden, Darmstadt.
- VDLUFA [Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten e.V.] (ed) (2012): MBI-A6.2.1.1: Bestimmung von Phosphor und Kalium im Calcium-Acetat-Lactat-Auszug. In: Methodenbuch Band I Die Untersuchung von Böden, Darmstadt.
- VDLUFA [Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten e.V.] (ed) (2016): MBI-A4.1.3.1: Bestimmung von organischem Kohlenstoff durch Verbrennung bei 550°C und Gasanalyse. In: Methodenbuch Band I Die Untersuchung von Böden, Darmstadt.
- van Genuchten M.T (1980): A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal* 44(5):892-898, <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>.
- von Post L (1924): Das genetische System der organogenen Bildungen Schwedens. *Comité international de Pédologie, IVème commission pour l'Europe*. 22:287–304.
- Wind GP (1968): Capillary conductivity data estimated by a simple method. In: *Water in the Unsaturated Zone*, Vol. 1. International Association Sci. Hydrology, U.N. Educ. Sci. Cult. Org., Paris, pp 181-191
- Walter K, Don A, Tiemeyer B, Freibauer A (2016): Determining soil bulk density for carbon stock calculations: A systematic method comparison. *Soil Science Society of America Journal* 80(3):579-591, <https://doi.org/10.2136/sssaj2015.11.0407>
- Wardenaar E (1987): A new hand tool for cutting peat profiles. *Canadian Journal of Botany* 65(8):1772-1773, <https://doi.org/10.1139/b87-243>
- Weinzierl W, Waldmann F (2015): Ermittlung langjähriger CO₂-Emissionen und Beurteilung der Moore Oberschwabens auf Basis historischer und aktueller Höhennivellements. *LGRB-Fachbericht 2015/2*, Freiburg, 112 p.
- Wittnebel M, Dettmann U, Tiemeyer B (2021a): Peat and other organic soils under agricultural use in Germany: Properties and challenges for classification. *Mires and Peat* 27: Article 19, <https://doi.org/10.19189/MaP.2020.SJ.StA.2093>
- Wittnebel M, Dettmann U, Piayda A, Tiemeyer B (2021b): Requirements for re-sampling soil organic carbon stocks of managed peat and other organic soils. In: *Proceedings of the 16th International Peat Congress, Oral Presentations*, 3-6 May 2021, Tallin, Estonia, pp 469
- Zak D, Gelbrecht J, Wagner C, Steinberg CEW (2008): Evaluation of phosphorus mobilization potential in rewetted fens by an improved sequential chemical extraction procedure. *European Journal of Soil Science* 59: 1191-1201, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2008.01081.x>
- Zak D, Gelbrecht J, Wagner C, Payer B, Augustin J (2010): Phosphorus mobilization in rewetted fens: the effect of altered peat properties and implications for their restoration. *Ecological Applications* 20:1336-1349, <https://doi.org/10.1890/08-2053.1>

Anhang

Anhang 1: Schematische Übersicht über die Positionen der auf einer schmalen Untersuchungsfläche durchzuführenden Arbeiten sowie zu installierenden Messtechnik.



Quelle: eigene Darstellung

Anhang 2: Packliste

Allgemein:

- Standortmappe (Karten, Genehmigungen, Leitungsauskünfte etc.)
- Formblätter (Aufnahmeblätter für Profile etc.) und Geländeanleitung
- Laptop inkl. Zubehör (z.B. Adapter für Pegeldatenlogger) und notwendiger Software für alle verwendeten Datenlogger und Geräte
- Schreibgeräte (Bleistifte, Radierer, Spitzer, Filzstift [permanent])
- Klemmbretter (DIN A4)
- Drei Gliedermaßstäbe (2,00 m)
- Metallsuchgerät inkl. Zubehör
- Handsonde zum Aufspüren von Dränrohren (Dränpieker)
- Digitalkamera
- Zwei Schirme („Anglerschirm“)
- Stühle und Klapptisch
- Material zum Reinigen der Geräte

- Benzinkanister 5L
- Verbandskasten, Feuerlöscher
- Werkzeugkoffer
- Bei sensiblen Standorten: Schneeschuhe für alle Teilnehmenden, Schalungsbretter und weiteres Material für temporäre Stege

Lage- und Höhenvermessung, Vermarkung:

- Geräte (GNSS, Tachymeter, Nivelliergerät) inkl. Zubehör und geladener Akkus
- Messlatte bzw. Messprisma inkl. Zubehör
- Kompass (Bussole) und Stativ zum Einmessen der Beprobungspunkte
- Schlagzirkel
- Mindestens fünf Fluchtstangen (2,00 m) und mindestens zwei teilbare Fluchtstangen
- Maßband (20 m)
- 10 Unterflurmarken pro Standort
- Mindestens 20 kurze Markierungsstäbe zum Abstecken der Punkte für die Moormächtigkeitsmessungen und die Beprobungen
- Pflanzstäbe für Markierung von Dränrohren usw.

Fixstange und Seilzugsensor

- Bohrgerät (siehe Beprobungspunkte)
- Ggf. Seilzugsensor, Rasengitterplatte, Alu-Block oder „Piercingstange“ mindestens zwei Kabelbinder (0,35 m)
- Fixstange: 1“ verschiedener Längen (Stahl verzinkt) (1,50 m, 0,10 m, 0,60 m), Anzahl je nach zu erwartenden Standorteigenschaften
- Vollrohre (DN50) verschiedener Längen als Ummantelung, Kappe 2“ (Feingewinde) mit 1“ Bohrung
- Mindestens fünf 1“ Muffen
- Abstandshalterscheiben und präparierte Deckel
- Hartholzbalken

Bodenprofil:

- Bodenkundliche Kartieranleitung (KA5)
- Steckbrief Moorsubstrate
- Grauwert-Tabelle und Farbtabelle nach Munsell
- Kreidetafel mit Kreide zur Kennzeichnung von Fotoaufnahmen
- Drei Spaten unterschiedlicher Größe
- Zwei Schaufeln
- Zwei Gewebeplanen für den Aushub (mindestens 2,00 x 3,00 m)
- Zwei Kniekissen
- Markierungsband und vier Stäbe zum Absichern der Grube
- Bodenprofil-Maßband (Länge 2,00 m), aufrollbar
- Kalibriertes pH-Messgerät

- Sprühflasche mit destilliertem Wasser
- 10%-ige Salzsäure (Pipettenflasche, Vorratsflasche)
- Vorratskanister Wasser (10 Liter)
- Zwei Spachtel
- Drei Maurerkellen
- Säge (bei Antreffen von Holztorfen evtl. benötigt)
- Lupe
- Schmutzwasserpumpe inkl. Schlauch und Schelle)
- Stromaggregat und Verlängerungskabel (Trommel 40 m)
- Beprobungstisch
- Bohrgerät für Tiefen > 1,00 m: siehe Beprobungspunkte

Probennahme Profil:

- Pro Standort 36 Stechzylinder (250 cm³) in Transportkisten
- Passende Schlaghaube
- Handschaufel
- Schonhammer
- Je zwei Brotmesser, Kittmesser und Scheren

Beprobungspunkte und Moormächtigkeit:

- Schalungsbrett (1,50 x 0,50 m mit mittigem Loch bzw. zwei Löchern)
- Zwei Handgrasscheren
- Pürckhauer, POM-Hammer, Ziehstange
- Moorpeilstange inkl. 10 Verlängerungsstangen und Griff
- Stechbohrer (1,00 m & 0,50 m Ø 0,06 m und 1,00 m Ø 0,03 cm)
- Klappsonde (Moorbohrer) und Stechbohrer (Guts-Bohrer) inkl. 10 Verlängerungsstangen und Griff
- Je nach Standorteigenschaften: Sedimentprobenehmer, Wardenaar-Profilstecher, Edelman-Bohrer, Kisten für Blockentnahme und/oder Material für die Rammkernsondierung

Rammkernsondierung (RKS):

- Schlaghammer
- Zwei Einsteckenden (Schlagkopf)
- Hydraulisches Stangenziehgerät
- Bodenplatte
- Zwei Verlängerungsstangen
- Klemmgehäuse inkl. Klemmeinsatz (Kugelklemme) und Backenklemme
- Zwei Schlauchsonden inkl. Schlauchkopf mit Gewindenippel und Schraubspitzen (eine Schraubspitze für Fänger, eine Standardspitze), Überstreifhilfe
- Pro Standort: 12 Schlauchhülsen für Schlauchsonden und 10 Kernfänger
- Pro Standort: 50 Vinylschläuche (oder Rolle)

- Werkzeug für RKS: Imbusschlüssel, Kettenrohrzange, Ersatzgewindenippel, WD40, Panzertape, Maulschlüssel (SW 32), zwei Rohrzangen (24“)
- Drahtbürsten: Lange Drahtbürste mit T-Griff, gerade Drahtbürste, gebogene Drahtbürste
- Zwei halbrunde Probenrinnen zum Auslegen der Kerne
- Gehörschutz für alle Teilnehmenden

Verpackung und Transport:

- Probenbeutel (5L und 2L)
- Etiketten und Kabelbinder
- Plastiksäcke zum Eintüten einer kompletten Bohrung
- Pro Standort: Drei Transportkisten
- Feldkarre, zwei Eimer

Moor- und Grabenpegel:

- Pegeldatenlogger
- Vollrohre in verschiedenen Längen (1,00 m, 0,50 m, 0,20 m): Anzahl entsprechend erwarteter Standorteigenschaften
- Filterrohre in verschiedenen Längen (1,00 m, 0,50 m, 0,20 m): Anzahl entsprechend erwarteter Standorteigenschaften
- Edelman-Bohrer (Ø 0,06 m) mit Verlängerungen
- Spitzen und Pegelkappen (ober- und unterirdisch), passende Kappenschlüssel und Einlegscheibe
- Filterstrümpfe
- Schnur
- Ausleseinheit und Laptop für Pegeldatenlogger
- Lichtlot
- Für Verankerung und Grabenpegel: ¾“ Stahlrohr verzinkt, verschiedene Längen, Muffen, Rohrschellen, kurze Gewindestange, Vielzweckleiter
- Ggf. Deckel für Doppelpegel
- Markierungsstangen

Messungen hydraulische Leitfähigkeit:

- Vier Pegeldatenlogger und Luftdruckdatenlogger (Barometer)
- Bailer
- Messbecher
- Je drei Filterrohre (0,50 m) und drei Vollrohre in verschiedenen Längen (1,00 m und 0,50 m)
- Je drei Spitzen und drei Pegelkappen mit Einlegscheiben
- Schnur

Anhang 3: Protokoll Vorerkundung



Vorerkundung	<i>Stand: 11.02.2022</i>
---------------------	--------------------------

Vorläufige Standortkennzeichnung	
---	--

Datum der Vorerkundung	
Feldteam	
Fotonummern	
Gesuchte Nutzung:	Vorgefundene Nutzung:
Gewünschte Torfmächtigkeit:	Vorgefundene Torfmächtigkeit:
Gewünschter Bodentyp:	Vorgefundener Bodentyp:
Mind. Flächengröße: 2.500 m ² [50x50m optimaler Weise]	Mögliche Fläche:
Geplante Messeinrichtungen:	

Checkliste			
	ja	nein	entfällt
Bodentyp (Aufbau Torfkörper) homogen (min. 5 Sondierungen mit Bohrer)			
Moormächtigkeit homogen (min. 5 Sondierungen mit Peilstange)			
Fläche ist eine Sonderposition auf dem Schlag ("nasse Ecke" o.ä.)			
Mindestabstand des Zentralpunktes von Störungen (Gräben etc.) sind 15m			
Fläche ist ausreichend groß (ca. 2.500 m ²)			
Fläche ist ausreichend lang/breit (min. 30 m)			
Flächenwasserstand bekannt (ggfs. Loch mit Flügelbohrer anlegen)			
Drainagen gefunden / sichtbar (z.B. im Graben)			
Drainage vorhanden (falls nicht sichtbar, Abfrage Landwirt)			
Sonstige Störungen vorhanden (z.B. Schuttdecken etc.)			
GPS-Positionen der Sondierungen aufgenommen			
Fotos von der Fläche gemacht			
Fragebogen Teil I an Landwirt ausgehändigt			

Profilinformationen						
Tiefe	Horizont	ZG (Post)	Torfart/Substrat	Beimengungen	Probe	Bemerkungen

[illegible]

Sonstiges	
Bemerkungen:	

Anhang 4: Fragebogen zur Vorerkundung



Fragebogen MOMOK-Teil 1

Vielen Dank für Ihr Interesse am Projekt „Aufbau eines deutschlandweiten Moorbodenmonitorings für den Klimaschutz“. Um bei der Standorteinrichtung einen möglichst reibungslosen Ablauf zu gewährleisten, möchten wir Sie bitten, Teil 1 des Fragebogens im Rahmen der Vorerkundung einer möglichen Untersuchungsfläche zusammen mit unseren Kartierer*innen auszufüllen.



Teil 1: Vorbereitende Angaben zur Untersuchungsfläche

Untersuchungsfläche

vorläufige ID: _____

Flurstücknummer: _____

1 Nutzung, Wassermanagement, Leitungen, Kampfmittel, Naturschutz

1.1 Nutzung

Wie wird die Fläche aktuell genutzt?

☐ Acker ☐ Grünland ☐ Anbaupaludikultur ☐ keine Nutzung

Bemerkungen: _____

Sind zukünftig Änderungen in der Nutzung geplant?

☐ nein ☐ ja _____

Bitte kreuzen Sie zutreffendes an, sofern die Untersuchungsfläche als Grünland genutzt wird:

Besitzt die Fläche einen Dauergrünlandstatus?

☐ nein ☐ ja

Wie nutzen Sie die Fläche?

☐ 1-2 Schnitte ☐ 3 Schnitte oder mehr ☐ Beweidung

Bemerkungen: _____



1.2 Hydrologie

Liegen gespannte Grundwasserverhältnisse auf der Untersuchungsfläche vor, d.h. ist beim Durchbohren von Sperrschichten mit aufsteigendem Grundwasser zu rechnen?

☐ unbekannt ☐ nein ☐ ja

1.3 Wassermanagement

Ist die Untersuchungsfläche dräniert?

☐ unbekannt ☐ nein ☐ ja

wenn ja, ☐ Rohrdrainage ☐ Gräben

durchschnittlicher Grabenabstand (m): _____

durchschnittlicher Dränabstand (m): _____

durchschnittliche Dräntiefe (m): _____

☐ mit Regulierung (z.B. Schöpfwerk, Wehre) ☐ ohne Regulierung

Sind Änderungen im Wassermanagement geplant?

☐ nein ☐ ja _____

1.4 Leitungen

Liegen Leitungen in der Untersuchungsfläche?

☐ unbekannt ☐ nein ☐ ja

wenn ja, ☐ Telefon ☐ Wasser ☐ Strom ☐ Gas

☐ Art nicht bekannt ☐ Sonstige: _____

1.5 Kampfmittel/ Kriegseinwirkungen

Sind auf der Untersuchungsfläche Kampfmittel und/oder Kriegseinwirkungen bekannt?

☐ unbekannt ☐ nein ☐ ja

wenn ja, ☐ Bombeneinschlagstrichter

☐ gefundene Altmunition oder „Blindgänger“

☐ Sonstige: _____



1.6 Naturschutzauflagen

Liegt die Fläche in einem Schutzgebiet oder gibt es Auflagen durch Agrarumweltmaßnahmen (z.B. AUKM, KuLaP, Vertragsnaturschutz)?

☐ nein ☐ Ja: _____

Ergeben sich aus den Schutzmaßnahmen Sperrzeiten, in denen ein Betreten bzw. die Beprobung nicht möglich ist?

☐ nein ☐ Ja: _____

Anhang 5: Protokoll Beprobungspunkte



Aufnahmebogen Beprobungspunkte MoMoK (KA5)												Stand: 08.03.2022	
Standort-ID:			Breitengrad:			Nutzung:							
Satellitenpunkt:			Laengengrad:			Vegetation:							
Datum:			Höhe ueber NN (m):			Witterung:							
Name Bearbeiter:						Bodenab-/auftrag:							
QS:						anthr.							
Neigung:			Koordinatensystem:			Veraenderungen:							
Exposition:			X:			Kommentar:							
Reliefformtyp:			Y:										
Reliefposition:			GPS Genauigkeit (m):										
Moormaechtigkeit			Moormaechtigkeit										
Vorerkundung (cm):			verwendeter Bohrer:										
Horizontbezogene Daten (< 1 m)													
Nr.	Tiefe von [cm]	Tiefe bis [cm]	Torf-, Mude-, Bodenart	ZG von Post	Farbe (verbal)	Humus	CaCO ₃	Beimengungen	sonstige Merkmale	Horizont	Beutel-probe	Labor-nummer	verwendeter Bohrer /Anzahl Stechzylinder
h													
h													
h													
h													
h													
h													
Tiefenstufenbezogene Daten (> 1 m)													
Nr.	Tiefe von [cm]	Tiefe bis [cm]	Torf-, Mude-, Bodenart	ZG von Post	Farbe (verbal)	Humus	CaCO ₃	Beimengungen	sonstige Merkmale	Horizont	Beutel-probe	Labor-nummer	verwendeter Bohrer /Anzahl Stechzylinder
h													
h													
h													
Tiefenstufenbezogene Daten (> 2 m)													
Nr.	Tiefe von [cm]	Tiefe bis [cm]	Torf-, Mude-, Bodenart	ZG von Post	Farbe (verbal)	Humus	CaCO ₃	Beimengungen	sonstige Merkmale	Horizont	Beutel-probe	Labor-nummer	verwendeter Bohrer /Anzahl Stechzylinder
h													
h													
h													
Tiefenstufenbezogene Daten (> 3 m)													
Nr.	Tiefe von [cm]	Tiefe bis [cm]	Torf-, Mude-, Bodenart	ZG von Post	Farbe (verbal)	Humus	CaCO ₃	Beimengungen	sonstige Merkmale	Horizont	Beutel-probe	Labor-nummer	verwendeter Bohrer /Anzahl Stechzylinder
h													
h													
h													
Tiefenstufenbezogene Daten (> 4 m)													
Nr.	Tiefe von [cm]	Tiefe bis [cm]	Torf-, Mude-, Bodenart	ZG von Post	Farbe (verbal)	Humus	CaCO ₃	Beimengungen	sonstige Merkmale	Horizont	Beutel-probe	Labor-nummer	verwendeter Bohrer /Anzahl Stechzylinder
h													
h													
h													
Tiefenstufenbezogene Daten (> 5 m)													
Nr.	Tiefe von [cm]	Tiefe bis [cm]	Torf-, Mude-, Bodenart	ZG von Post	Farbe (verbal)	Humus	CaCO ₃	Beimengungen	sonstige Merkmale	Horizont	Beutel-probe	Labor-nummer	verwendeter Bohrer /Anzahl Stechzylinder
h													
h													
h													
												Endteufe Bohrungen (cm):	
Bohrungskennzeichnung													
Bodensubtyp (Abkürzung)	Torf-/Bodenartensubtyp	Bodensubtyp und Bodenartentyp	Strati-graphie	GWS (cm)	Torfmaech-tigkeit [cm]	Moormaechtigkeit [cm]	Bodentyp (Name)	Bodentyp (WRB)					

Anhang 6: Protokoll Bodenprofil



THÜNNEN

Stand: 08.03.2022

Aufnahmebogen Bodenprofil (KA 5)

Nutzung:	
Vegetation:	
Witterung:	
Bodenab-/auftrag:	
anthr. Veränderungen:	
Kommentar:	

Aufschlussart:	
Breitengrad:	
Laengengrad:	
Hoehe ueber NN (m):	
Koordinatensystem:	
X:	
Y:	
GPS Genauigkeit (m):	

Standort-ID:	
Datum:	
Name Bearbeiter:	
QS:	
Neigung:	
Exposition:	
Reliefformtyp:	
Reliefposition:	

Horizontbezogenen Daten

[illegible]

Profilkennzeichnung

Profilkennzeichnung							
Bodensubtyp (Abkürzung)	Torf-/Bodenartensubtyp	Bodensubtyp und Bodenartentyp	Stratigraphie	GWS (cm)	Torfmaechtigkeit (cm)	Bodentyp (Name)	Bodentyp (WBB)

Horizontbezogenen Daten (Ergaenzung fuer maechtige Standorte)

[illegible]

Anhang 7: Protokoll Moormächtigkeit



Moormächtigkeit	Stand: 08.03.2021
-----------------	-------------------

Standort-ID:	
--------------	--

Datum:	
Bearbeiter:	
Anmerkung:	<i>Start der Moormächtigkeitsvermessung und Nummerierung in nördlicher / nordöstlicher Richtung vom Bodenprofil; gewähltes Sondierungsgerät ankreuzen</i>

Sondierungsgerät		
Moorpeilstange	Stechbohrer	Pürckhauer

Moormächtigkeit			
Ort	entspricht Beprobungs-punkt	Mächtigkeit [cm]	Bemerkung
Mächtigkeitpunkt 1			
Mächtigkeitpunkt 2	d		
Mächtigkeitpunkt 3	a		
Mächtigkeitpunkt 4			
Mächtigkeitpunkt 5	j		
Mächtigkeitpunkt 6	e		
Mächtigkeitpunkt 7			
Mächtigkeitpunkt 8			
Mächtigkeitpunkt 9	i		
Mächtigkeitpunkt 10			
Mächtigkeitpunkt 11			
Mächtigkeitpunkt 12	f		
Mächtigkeitpunkt 13			
Mächtigkeitpunkt 14	h		
Mächtigkeitpunkt 15	g		
Mächtigkeitpunkt 16			
Mächtigkeitpunkt 17			
Mächtigkeitpunkt 18	c		
Mächtigkeitpunkt 19	b		
Mächtigkeitpunkt 20			

Anhang 8: Protokoll Standorteinrichtung



Steckbrief - Standorteinrichtung

Standort-ID	
-------------	--

Standortfoto	(einfügen nach Einrichtung)
Installationen	
Datum der Einrichtung	
Feldteam	

Checkliste		
	ja	nein
Fotos vor Einrichtung gemacht		
Vermarkung Profilgrube		
Vermarkung Vermessungseckpunkte		
Vermarkung vergrabener Moorpegel		
GPS Einmessung Profilgrube		
GPS Einmessung Vermessungseckpunkte		
GPS Einmessung Moorpegel		
GPS Einmessung Fixpegel		
Profilbogen + Profilfoto fertig		
Probenliste fertig		
Hydraulische Leitfähigkeitstabelle fertig		
Hydraulische Leitfähigkeits-Diver + Baro ausgelesen und exportiert		
Installation Fixstange-Tabelle fertig		
Vermessung Ersteinrichtung-Tabelle fertig + Nivellier ausgelesen		
Moormächtigkeitspeilung-Tabelle fertig		
Moor-Grabenpegel fertig, Logger ausgelesen und exportiert		
Fotodokumentation fertig		

Fixstange		
	Fixstange [m]	Pegelrohr [m]
Stange über Rohr		
Rohr über Grund		
Torfmächtigkeit		
Stange/Rohr im Mineralischen		
Gesamtlänge		
Bohrung im Sand		
Bemerkung		

Regulärer Pegel (ggfs. bei Fixstange)	
ID	
Filterobergrenze_ROK_[m]	
Filteruntergrenze_ROK_[m]	
Rohrlänge_[m]	
Mooruntergrenze_GOK_[m]	
Verwendete Vollrohre [m]	
Verwendete Filterrohre [m]	
Moormächtigkeit Peilstange [m]	
Bemerkung	

Doppelpegel	
Filterobergrenze_ROK_[m]	
Filteruntergrenze_ROK_[m]	
Rohrlänge_[m]	
Mooruntergrenze_GOK_[m]	
Verwendete Vollrohre [m]	
Verwendete Filterrohre [m]	
Moormächtigkeit Peilstange [m]	
Bemerkung	

Grabenpegel	
Filterobergrenze_ROK_[m]	
Filteruntergrenze_ROK_[m]	
Rohrlänge_[m]	
Verwendete Vollrohre [m]	
Verwendete Filterrohre [m]	
Bemerkung	

Zusätzliche Pegel			
Filterobergrenze_ROK_[m]			
Filteruntergrenze_ROK_[m]			
Rohrlänge_[m]			
Mooruntergrenze_GOK_[m]			
Verwendete Vollrohre [m]			
Verwendete Filterrohre [m]			
Moormächtigkeit Peilstange [m]			
Bemerkung			





Informationen zur Hydrologie			
Ist die Fläche drainiert?	ja:	nein:	
wenn ja, wie?	Rohrdrainage:	Graben:	Sonstiges:
durchschnittl. Grabenabstand (m):			
durchschnittl. Dränabstand (m):			
durchschnittl. Dräntiefe (m):			
erfolgt eine aktive Regulierung:	ja (Schöpfwerk/Pumpe):	nein:	
Wasserrückhalt vorhanden?	nein:	ja:	
wenn ja, was?	Wehr:	Polder:	Sonstiges:
erfolgt eine aktive Wasserzufuhr?	ja (Schöpfwerk/Pumpe):	nein:	
Bemerkung			

Anhang 9: Protokoll Moor- und Grabenpegel



Stand: 25.01.2021

Moor-Grabenpegel

StandortID:

Bearbeiter:

[illegible]

Kommentar:



Erläuterungen	
Zeit	Datum und Uhrzeit [TT.MM.JJJ HH:MM]
Name	Name des Pegeldatenloggers (Bediensoftware)
Logger_SN	Seriennummer des Pegeldatenloggers
ROK_GOK [m]	Abstand Rohroberkante - Geländeoberkante zum Zeitpunkt des Einbaus (Mittelwert vier Messungen, positiv = Rohroberkante über Flur)
Abstich [m]	Grundwasserstand unter Rohroberkante (positiv = unter Rohroberkante)
ROK_Fixpunkt [m]	Abstand Rohroberkante - Fixpunkt zum Zeitpunkt des Einbaus (positiv = Rohroberkante über Fixpunkt)
mNN_ROK [m]	Höhe Rohroberkante über Normal Null (positiv = Rohroberkante über NN)
ROK_GOK_Stichtag [m]	Abstand Rohroberkante - Geländeoberkante zum Zeitpunkt der Messung (Mittelwert vier Messungen, positiv = Rohroberkante über Flur)
Bearbeiter	Bearbeiternamen der Feldmessung
active	Aktiv in der Auswertungsroutine (0=aus, 1=an, für Feldarbeiten unerheblich)
Bemerkungen	Wichtige Informationen/Auffälligkeiten während des Auslesens welche für die Auswertung wichtig sein können

Anhang 10: Protokoll Gesättigte hydraulische Leitfähigkeit (K_s) Gelände



THÜNNEN

Stand: 25.01.2021

Hydraulische Leitfähigkeit (KS-Messung)

Bearbeiter:

StandortID:[illegible]**Kommentar:**

Ablauf												
Standort ID												
Datum												
Zeit												
Logger Ks 1												
Wasserstand [m]												
GOK_ROK [m]												
Abstich [m]												
Logger Ks 2												
Wasserstand [m]												
GOK_ROK [m]												
Abstich [m]												
Logger Ks 3												
Wasserstand [m]												
GOK_ROK [m]												
Abstich [m]												
Kommentar:												

Erläuterungen	
ROK_GOK [m]	Abstand Rohroberkante - Geländeoberkante (Mittelwert vier Messungen, positiv = Rohr über Flur)
Zeit1	Datum und Uhrzeit Versuchsstart
GW1 [m]	Grundwasserstand unter Rohroberkante unmittelbar <u>vor</u> Wasserstandsabsenkung (positiv = unter Rohroberkante)
Extr [L]	Entnommene Wassermenge (in Litern)
Zeit2	Datum und Uhrzeit direkt nach Wasserstandsabsenkung
GW2 [m]	Grundwasserstand unter Rohroberkante unmittelbar <u>nach</u> Wasserstandsabsenkung
Zeit3	Datum und Uhrzeit Versuchsende
GW3 [m]	Grundwasserstand unter Rohroberkante bei Versuchsende
Rohr [m]	Rohrlänge
Filter [m]	Filterlänge
TiefeFilterUnterkannte [m]	Tiefe Filterunterkannte unter Geländeoberkannte
RI [m]	Rohrinnendurchmesser
RA [m]	Rohraußendurchmesser
Wasserstand [m]	Wasserstand unterhalb der Geländeoberkannte (Abstich - ROK_GOK)
ROK_GOK [m]	Abstand Rohroberkannte - Geländeoberkannte (Mittelwert vier Messungen, positiv = Rohr über Flur)
Abstich [m]	Wasserstand unterhalb der Rohroberkannte (ROK)

Anhang 11: Protokoll Höhenvermessung



Stand: 02.03.2022

Höhenvermessung Fläche

Installationen													
Information:													
Bei der Vermessung mit Tachymeter sind die eingemessenen Punkte anzukreuzen. Nicht vermessene Punkte/Objekte werden mit "h.a." gekennzeichnet. Im Tachymeter sind die eingemessenen Punkte analog zum Feld "ID" zu benennen und abzuspeichern.													
Bei der Vermessung mit Nivellier-Gerät sind die Höhen in dieses Dokument einzutragen. Die Zuordnung zum Fixpunkt (FP) ändert sich, falls Punkte an unterschiedlichen Tagen oder mit wechselnden Positionen des Nivellier-Gerätes aufgenommen werden. Der zum eingemessenen Punkt zugehörige Fixpunkt ("FP-Nr.") ist in der Spalte "Zuordnung FP" zu vermerken.													
Bitte eintragen (ja/nein) ob am Standort ein Seilzugsensor installiert wurde.													
Seilzugsensor	ja:	nein:											
Was	ID	Höhe (m)	Datum	FP-Nr.	Höhe (m)	Datum	FP-Nr.	Höhe (m)	Datum	FP-Nr.	Höhe (m)	Datum	Bemerkung
Fixpunkt (FP)	_fix			FP a			FP b			FP c			
Was	ID	Höhe (m)	Datum	Zuordnung FP									
GOK 1 neben FP	_fix_gok1												
GOK 2 neben FP	_fix_gok2												
GOK 3 neben FP	_fix_gok3												
GOK 4 neben FP	_fix_gok4												
Was	ID	Höhe (m)	Datum	Zuordnung FP									
Ecke 1 Rasengitter	_fix_rg1												
Ecke 2 Rasengitter	_fix_rg2												
Ecke 3 Rasengitter	_fix_rg3												
Ecke 4 Rasengitter	_fix_rg4												
Bodenprofil													
Bodenprofil GOK l	_pl												
Bodenprofil GOK m	_pm												
Bodenprofil GOK r	_pr												
Moorpegel													
Pegel Einlegescheibe	_bw												
Pegel GOK 1	_bw_gok1												
Pegel GOK 2	_bw_gok2												
Pegel GOK 3	_bw_gok3												
Pegel GOK 4	_bw_gok4												
Pegel GOK 5	_bw_gok5												
Pegel GOK 6	_bw_gok6												
Grabenpegel													
Pegel Einlegescheibe	_gp												
Pegel Sohle 1	_gp_s1												
Pegel Sohle 2	_gp_s2												
Pegel Ufer 1	_gp_u1												
Pegel Ufer 2	_gp_u2												
Dränrohre													
Dräntiefe 1	Wo	ID	Höhe (m)	Pickstocktiefe (m)	Zuordnung FP	Wo	ID	Höhe (m)	Pickstocktiefe (m)	Bemerkung			
Dräntiefe 2	Grabenauslass:	_da 1				Grabenmitte:	_da 1m						
Dräntiefe 3	Grabenauslass:	_da 2				Grabenmitte:	_da 2m						
Dräntiefe 4	Grabenauslass:	_da 3				Grabenmitte:	_da 3m						
	Grabenauslass:	_da 4				Grabenmitte:	_da 4m						



Eckpunkte und Flächenraster																			
StandardID:		Information:																	
Datum:		Bei der Vermessung mit Tachymeter sind die eingemessenen Punkte anzukreuzen. Nicht vermessene Punkte/Objekte werden mit "h.a." gekennzeichnet. Im Tachymeter sind die eingemessenen Punkte analog zum Feld "ID" zu benennen und abzuspeichern.																	
Vermesser:		Bei der Vermessung mit Nivellier-Gerät sind die Höhen in dieses Dokument einzutragen. Die Zuordnung zum Fixpunkt (FP) ändert sich, falls Punkte an unterschiedlichen Tagen oder mit wechselnden Positionen des Nivellier-Gerätes aufgenommen werden. Der zum eingemessenen Punkt zugehörige Fixpunkt ("FP-Nr.") ist in der Spalte "Zuordnung FP" zu vermerken.																	
Messgerät																			
Eckpunkte Vermessungsfläche																			
Was	ID	Datum	Höhe (m)	Zuordnung FP	Höhe (m) der Punkte je Messreihe										Bemerkung				
					1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Nord-Ost	_ap_1																		
Süd-Ost	_ap_2																		
Süd-West	_ap_3																		
Nord-West	_ap_4																		
Was	ID	Datum	Zuordnung FP																
Messreihe 1	MR_1																		
Messreihe 2	MR_2																		
Messreihe 3	MR_3																		
Messreihe 4	MR_4																		
Messreihe 5	MR_5																		
Messreihe 6	MR_6																		
Messreihe 7	MR_7																		
Messreihe 8	MR_8																		
Messreihe 9	MR_9																		
Messreihe 10	MR_10																		
Messreihe 11	MR_11																		
Messreihe 12	MR_12																		
Messreihe 13	MR_13																		
Messreihe 14	MR_14																		
Messreihe 15	MR_15																		

[illegible]

Anhang 12: Protokoll Seilzugsensor



THÜNEN

Stand: 25.01.2022

Höhenvermessung Seilzug

StandortID:

[illegible]

Erläuterungen	
Logger ID	Standort-ID übernehmen
Zeit	Datum der Aufnahme / Zeitpunkt der Aufnahme (bitte nicht zu vollen Stunden auslesen) der Höhen
Logger SN	Seriennummer des Loggers
Seilzug SN	Seriennummer des Seilzugsensors
FOK_GOK [m] Rasengitter 1	Abstand Oberkante Fixstange zur Oberkante Rasengitter an Ecke 1
FOK_GOK [m] Rasengitter 2	Abstand Oberkante Fixstange zur Oberkante Rasengitter an Ecke 2
FOK_GOK [m] Rasengitter 3	Abstand Oberkante Fixstange zur Oberkante Rasengitter an Ecke 3
FOK_GOK [m] Rasengitter 4	Abstand Oberkante Fixstange zur Oberkante Rasengitter an Ecke 4
mNN_FOK [m]	mNN der Oberkante des Fixstange
Bearbeiter	Name des Bearbeiters
Bemerkungen	sonstige wichtige Informationen / Vorkommisse / Batteriestand

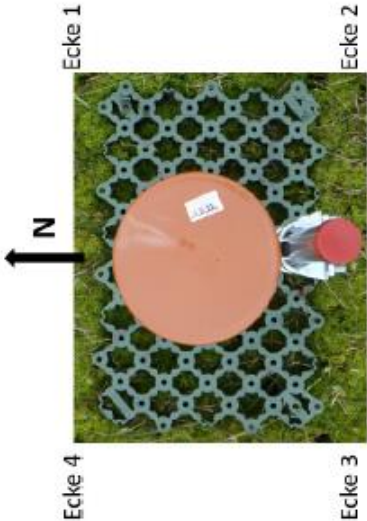


Abb. 1: Übersicht der Nummerierung der Ecken des Rasengitters in Relation zum Seilzugsensor

Anhang 13: Protokoll GNSS-Messung (Lagevermessung)



GPS Messungen			Stand: 02.03.2022	
Standort-ID				
Bearbeiter:				
Anmerkung:	<i>Punktname im GPS setzt sich aus der Standort-ID und der Punktendung zusammen!</i>			
Koordinaten-System:			ETRS_	
minimale Positionsabfrage:			Genauigkeit mind.:	
Profil				
Ort	Punktendung	Bemerkung	eingemessen	
			ja	nein
Zentralpunkt	_p			
Profilgrubenmitte	_pg			
Profilwand links	_pl			
Profilwand mitte	_pm			
Profilwand rechts	_pr			
GW-Messstelle				
Ort	Punktendung	Bemerkung	eingemessen	
			ja	nein
Grundwassermessstelle	_gw			
Grabenpegel	_gp			
weitere:	_gw_2			
weitere:	_gw_3			
Beprobungspunkte				
Ort	Punktendung	Bemerkung	eingemessen	
			ja	nein
Beprobungspunkt a	_b_a			
Beprobungspunkt b	_b_b			
Beprobungspunkt c	_b_c			
Beprobungspunkt d	_b_d			
Beprobungspunkt e	_b_e			
Beprobungspunkt f	_b_f			
Beprobungspunkt g	_b_g			
Beprobungspunkt h	_b_h			
Beprobungspunkt i	_b_i			
Beprobungspunkt j	_b_j			
Fix-Punkt				
Ort	Punktendung	Bemerkung	eingemessen	
			ja	nein
Fix-Punkt	_fix			
Fix-Punkt 2	_fix_2			
Fix-Punkt 3	_fix_3			



Eck-Punkte				
Ort	Punktendung	Bemerkung	eingemessen	
			ja	nein
Eckpunkt 1	_ep_1			
Eckpunkt 2	_ep_2			
Eckpunkt 3	_ep_3			
Eckpunkt 4	_ep_4			

Moormächtigkeit				
Ort	Punktendung	Bemerkung	eingemessen	
			ja	nein
Mächtigkeitpunkt 1	_mp_1			
Mächtigkeitpunkt 2	_mp_2	d		
Mächtigkeitpunkt 3	_mp_3	a		
Mächtigkeitpunkt 4	_mp_4			
Mächtigkeitpunkt 5	_mp_5	j		
Mächtigkeitpunkt 6	_mp_6	e		
Mächtigkeitpunkt 7	_mp_7			
Mächtigkeitpunkt 8	_mp_8			
Mächtigkeitpunkt 9	_mp_9	i		
Mächtigkeitpunkt 10	_mp_10			
Mächtigkeitpunkt 11	_mp_11			
Mächtigkeitpunkt 12	_mp_12	f		
Mächtigkeitpunkt 13	_mp_13			
Mächtigkeitpunkt 14	_mp_14	h		
Mächtigkeitpunkt 15	_mp_15	g		
Mächtigkeitpunkt 16	_mp_16			
Mächtigkeitpunkt 17	_mp_17			
Mächtigkeitpunkt 18	_mp_18	c		
Mächtigkeitpunkt 19	_mp_19	b		
Mächtigkeitpunkt 20	_mp_20			

KS-Messungen				
Ort	Punktendung	Bemerkung	eingemessen	
			ja	nein
KS-Messpunkt 1	_ks_1			
KS-Messpunkt 2	_ks_2			
KS-Messpunkt 3	_ks_3			

Dränauslässe (falls sichtbar)				
Ort	Punktendung	Bemerkung	eingemessen	
			ja	nein
Dränauslass 1	_da_1			
Dränauslass 2	_da_2			
Dränauslass 3	_da_3			
Dränauslass 4	_da_4			



Dränrohre (Flächenmitte)				
Ort	Punktendung	Bemerkung	eingemessen	
			ja	nein
Dränrohr 1	_da_1m			
Dränrohr 2	_da_2m			
Dränrohr 3	_da_3m			
Dränrohr 4	_da_4m			

Sonstige Punkte				
Ort	Punktendung	Bemerkung	eingemessen	
			ja	nein
Sonstige:	_so_1			
Sonstige:	_so_2			
Sonstige:	_so_3			
Sonstige:	_so_4			
Sonstige:	_so_5			
Sonstige:	_so_6			
Sonstige:	_so_7			
Sonstige:	_so_8			
Sonstige:	_so_9			
Sonstige:	_so_10			
Sonstige:	_so_11			
Sonstige:	_so_12			
Sonstige:	_so_13			
Sonstige:	_so_14			
Sonstige:	_so_15			

Anhang 14: Protokoll Fotodokumentation



Steckbrief - Fotodokumentation			
Standort ID			
Wo	ja	nein	Bemerkung
Fotos vor Arbeitsbeginn			
Fotos Haupthimmelsrichtung			
Norden			
Osten			
Süden			
Westen			
Fotos Profilpunkt			
ausgehobene Grube			
Nördliche Profilstirnwand			
geschlossene Grube			
Fixpunkt			
Moorwassermessstelle			
Grabenpegel			
Fotos Eckpunkte			3 Schritt Richtung Zentralpunkt
Norden			
Osten			
Süden			
Westen			
Fotos bei Beendigung			
Sonstiges 1			
Sonstiges 2			
Sonstiges 3			
Sonstiges 4			
Sonstiges 5			
Sonstiges 6			



Bibliografische Information:
Die Deutsche Nationalbibliothek
verzeichnet diese Publikationen in
der Deutschen Nationalbibliografie;
detaillierte bibliografische Daten
sind im Internet unter
www.dnb.de abrufbar.

Bibliographic information:
The Deutsche Nationalbibliothek
(German National Library) lists this
publication in the German National
Bibliographie; detailed bibliographic
data is available on the Internet at
www.dnb.de

Bereits in dieser Reihe erschienene
Bände finden Sie im Internet unter
www.thuenen.de

Volumes already published in this
series are available on the Internet at
www.thuenen.de

Zitationsvorschlag – Suggested source citation:

Frank S, Dettmann U, Piayda A, Heidkamp A, Oehmke W, Tiemeyer B (2022)
Methodenhandbuch zu den Gelände- und Laborarbeiten für den Aufbau des
deutschlandweiten Moorbodenmonitorings für den Klimaschutz (MoMoK) – Teil
1: Offenland, Version 1.0. Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut,
111 p, Thünen Working Paper 199, DOI:10.3220/WP1661764883000

Die Verantwortung für die Inhalte
liegt bei den jeweiligen Verfassern
bzw. Verfasserinnen.

The respective authors are
responsible for the content of
their publications.



THÜNEN

Thünen Working Paper 199

Herausgeber/Redaktionsanschrift – *Editor/address*

Johann Heinrich von Thünen-Institut
Bundesallee 50
38116 Braunschweig
Germany

thuenen-working-paper@thuenen.de
www.thuenen.de

DOI:10.3220/WP1661764883000
urn:nbn:de:gbv:253-202208-dn065255-6