



Methoden zur Bestimmung physikalischer Begleitparameter an Bodenproben

Peter Schwab, Andreas Gubler

Impressum

Herausgeber:	Agroscope Reckenholzstrasse 191 8046 Zürich www.agroscope.ch
Auskünfte:	Peter Schwab; peter.schwab@agroscope.admin.ch
Redaktion:	Andreas Gubler
Gestaltung:	Andreas Gubler
Copyright:	© Agroscope 2016
ISSN:	2296-729X
ISBN:	978-3-906804-28-6

Korrigierte Version von 2018
(S. 10, Formel Lagerungsdichte Feinerde korrigiert)

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	4
Résumé	5
Abstract	6
1 Einleitung	7
2 Methoden	8
2.1 Begriffe & Definitionen	8
2.2 Probenahme	10
2.2.1 Raumbgewichtsproben (RG-Proben)	11
2.2.2 Grosse Volumenproben	12
2.2.3 Horizontproben	12
2.2.4 Zylinderproben	12
2.3 Bestimmung	14
2.3.1 Beprobtes Volumen V_{GP}	14
2.3.2 Frisch- und Trockenmasse der Probe (FM_{GP} , M_{GP})	14
2.3.3 Masse und Volumen Skelett für RG-Proben und grosse Volumenproben (M_{Skel} , V_{Skel})	14
2.3.4 Masse und Volumen Skelett für Horizontproben (M_{Skel} , V_{Skel})	14
3 Arbeitsanleitungen	15
3.1 Probenahme RG-Proben 0-20 cm mit Humax-Schlagsonde (Methode a)	15
3.2 Probenahme RG-Proben mit Grasprobenstecher (Methode b)	16
3.3 Probenahme mit Stechrahmen (Methode c)	16
3.4 Probenahme aus Grube (Sand- bzw. Wassermethode; Methode d)	17
3.5 Probenahme mit Schlag- oder Bohrsonde (Methoden e-g)	17
3.6 Probenahme mit Stechzylinder (Methode h)	19
4 Resultate & Diskussion Methodenabklärungen	20
4.1 Einfluss der Probengrösse	20
4.2 Dichte der Skelett-Fests substanz für die Volumenschätzung	24
4.3 Einfluss organischer Bestandteile	25
4.4 Vergleichbarkeit verschiedener Beprobungsarten für Horizontproben	26
4.5 Vergleichbarkeit RG-Proben vs. Horizontproben	28
5 Schlussfolgerungen & Ausblick	30
5.1 Methodische Abklärungen	30
5.2 Empfehlungen bezüglich physikalischer Begleitparameter	30
5.3 Profillumfassende Horizontproben	30
5.4 Ausblick und weiterführende Analysen	32
6 Verzeichnisse	33
6.1 Literaturverzeichnis	33
6.2 Abbildungsverzeichnis	33
6.3 Tabellenverzeichnis	35

Zusammenfassung

Wie dicht oder locker das Bodenmaterial gelagert ist, hängt sehr stark von den Boden- und Standorteigenschaften ab. Der Zustand des Bodens ändert sich aber auch über die Zeit als Folge von Witterung und Bewirtschaftung. Dies ist von grosser Bedeutung für Monitoringprogramme, da der Bodenzustand zum Zeitpunkt der Probenahme grossen Einfluss auf die Resultate haben kann. Anhand so genannter physikalischer Begleitparameter kann der Bodenzustand erfasst werden; dazu gehören beispielsweise das Raumgewicht Feinerde (RG_{FE} ; Trockenmasse Feinerde [< 2 mm] pro Bodenvolumen inkl. Skelett), die Lagerungsdichte (LD_{FE} ; Trockenmasse Feinerde pro Feinerdevolumen) und der Wassergehalt (WG). Diese Begleitparameter erlauben zudem den Bezug der gewichtsbezogenen Konzentrationen aufs Bodenvolumen, was die Betrachtung von Stoffvorräten und -flüssen erlaubt.

Die Nationale Bodenbeobachtung der Schweiz (NABO) erhebt seit 2003 bei jeder Probenahme physikalische Begleitparameter. In methodischen Abklärungen wurden die Aussagesicherheit, sowie die Vergleichbarkeit verschiedener Methoden untersucht. Der vorliegende Bericht präsentiert die verwendeten Methoden inkl. detaillierter Arbeitsanleitungen und stellt die gewonnenen Erkenntnisse vor, insbesondere zu Aussagekraft und Vergleichbarkeit verschiedener Methoden. Basierend darauf geben wir Empfehlungen zur Anwendung in der Praxis und zur Umsetzung in Bodenmonitoringprogrammen.

Zur Bestimmung physikalischer Begleitparameter entnimmt die NABO jeweils vier volumetrische Proben aus 0-20 cm Tiefe mit einer Humax-Schlagsonde von 4.8 cm Durchmesser (RG-Proben). Diese zusätzlichen Proben sind nötig, da die entsprechenden Flächenmischproben zur Bestimmung chemischer und biologischer Parameter kein festes Volumen haben (Entnahme mit Hohlmeisselbohrer). Der Vergleich der Resultate der RG-Proben mit grossen Volumenproben (beprobtes Volumen $\sim 25 \times 20 \times 20 \text{ cm}^3$) zeigte, dass die RG-Proben zu klein sind, um die Skelettfraktion zuverlässig zu erfassen: der Gehalt an Grobkies (2-5 cm) und Steinen (>5 cm) wurde unterschätzt. Dies verfälscht auch die Schätzung von LD_{FE} . Hingegen waren auch für skelettreiche Böden RG_{FE} und WG aus RG-Proben und grossen Volumenproben vergleichbar. Weiter zeigten Abklärungen, dass der Laboraufwand ohne bedeutende Qualitätsverluste für die LD_{FE} -Bestimmung reduziert werden kann, indem das Volumen des Skelettes nicht gemessen, sondern aus seiner Masse unter Annahme einer mittleren Dichte von 2.4 g cm^{-3} berechnet wird. Zudem sind Volumen und Masse organischer Bestandteile in der Praxis irrelevant, da deren Anteil an der gesamten Probe gering ist.

Für die profilumfassende Entnahme von Horizontproben hat sich die Humax-Schlagsonde anstelle der Bohrsonde als zuverlässiger erwiesen, da bei ersterer das beprobte Volumen exakter definiert ist. Das Material der Bohrkerne wird in pedologische Bodenhorizonte aufgetrennt; in der Regel werden vier Bohrkerne entnommen und anschliessend gepoolt. Die gewonnenen Horizontproben dienen sowohl zur Bestimmung der physikalischen Begleitparameter als auch der übrigen Parameter. Die Horizontproben widerspiegeln stets den Mittelwert des gesamten Horizontes, im Gegensatz zu Proben aus einer Profilwand, welche nur einen Ausschnitt repräsentieren. Daher erlauben erstere die Beurteilung von Vorräten sowie deren Veränderung über das ganze Bodenprofil. Ein Vergleich der Resultate aus Horizont- und RG-Proben zeigte, dass die Resultate vergleichbar sind, sofern die beprobten Tiefen (0-20 cm) übereinstimmen. Hingegen können aufgrund von Gradienten innerhalb der Horizonte die Resultate aus mächtigeren bzw. geringeren Horizontproben nicht auf 0-20 cm umgerechnet werden.

Résumé

Les matériaux composant un sol peuvent être compactés ou aérés. Cela dépend avant tout des conditions pédologiques et topographiques. L'état du sol évolue aussi au fil du temps en fonction des conditions météorologiques et du mode d'exploitation. Ceci est très important pour les programmes de monitoring car l'état du sol au moment du prélèvement d'échantillon peut exercer une grosse influence sur les résultats. Des paramètres physiques auxiliaires permettent d'enregistrer l'état du sol; parmi ces paramètres, on peut citer la densité apparente de la terre fine (RG_{FE} ; matière sèche de terre fine [< 2 mm] par volume de terre, pierres comprises), la distribution de la porosité (LD_{FE} ; matière sèche de terre fine par volume de terre fine) et la teneur en eau (WG). Ces paramètres auxiliaires permettent en outre de faire la relation entre les concentrations rapportées au poids et le volume de terre, ce qui permet dans la foulée de prendre en compte les réserves et les flux de matières.

Depuis 2003, l'observatoire national des sols suisse (NABO) enregistre des paramètres physiques accessibles à chaque prélèvement d'échantillon pour l'observation à long terme des sols. Des études méthodologiques ont servi à étudier la fiabilité des résultats ainsi que la comparabilité des différentes méthodes. Ce rapport présente les méthodes utilisées, avec les instructions de travail détaillées et publie les résultats obtenus ainsi que nos expériences par rapport à l'application pratique. Ces éléments nous ont permis de formuler des recommandations pour l'application aux programmes de monitoring du sol.

Pour déterminer les paramètres physiques auxiliaires, le NABO prélève à chaque échantillonnage quatre échantillons volumétriques à une profondeur de 0 à 20 cm à l'aide d'une sonde Humax d'un diamètre de 4,8 cm (échantillons RG). Ces échantillons supplémentaires sont nécessaires car les échantillons composés qui servent à déterminer les paramètres chimiques et biologiques n'ont pas de volume fixe (prélèvement à l'aide d'une tarière en acier). La comparaison des résultats des échantillons RG avec de gros échantillons volumiques (volume testé $\sim 25 \times 20 \times 20$ cm³) a montré que les échantillons RG sont trop petits pour permettre d'appréhender la fraction pierreuse de manière fiable: la teneur en graviers grossiers (2-5 cm) et en pierres (> 5 cm) a été sous-estimée. Cela fausse également l'estimation de LD_{FE} . Par contre, pour les sols pauvres en pierres, les valeurs RG_{FE} et WG des échantillons RG et des gros échantillons volumiques étaient comparables. Des études ultérieures ont également montré qu'il est possible de réduire la charge de travail en laboratoire, nécessaire pour déterminer LD_{FE} , sans perte de qualité significative. Pour cela, le volume des pierres ne doit pas être mesuré, mais calculé à partir d'une masse en se basant sur l'hypothèse d'une densité moyenne de 2,4 g cm⁻³. Par ailleurs, le volume et la masse des composants organiques ne jouent pas un grand rôle dans la pratique, car leur proportion est réduite par rapport à l'ensemble de l'échantillon.

Pour le prélèvement d'échantillons d'horizons pédologiques sur toute la longueur du profil, la sonde Humax s'est avérée plus fiable que la tarière, car avec la première, le volume prélevé est défini de manière plus précise. Le matériau de la carotte est séparé en horizons pédologiques; en général, on prélève quatre carottes que l'on regroupe ensuite. Les échantillons d'horizons servent à la fois à déterminer les paramètres physiques auxiliaires et les autres paramètres. Les échantillons d'horizons reflètent toujours la moyenne de l'horizon global, contrairement aux échantillons provenant d'une section, qui ne représentent qu'une partie. C'est pourquoi les premiers permettent d'évaluer les réserves ainsi que leur évolution sur l'ensemble du profil pédologique. Une étude des résultats des échantillons d'horizons et des échantillons RG a montré que les résultats étaient comparables dans la mesure où les profondeurs étudiées (0-20 cm) correspondaient. En revanche, comme il y a des gradients au sein des horizons, il n'est pas possible de convertir par calcul à une profondeur standard de 0-20 cm les résultats d'échantillons d'horizons d'une profondeur supérieure ou moindre.

Abstract

Soil and site characteristics strongly influence how densely or loosely compacted soil material is. Moreover, the state of the soil changes over time as a result of weather conditions and management. This is of great importance for soil monitoring programmes, since the state of the soil at the time of sampling may significantly influence the results. So-called auxiliary physical parameters serve to capture the state of the soil; these include, for instance, the apparent density of fine earth (RG_{FE} ; dry matter of fine earth [< 2 mm] per total soil volume including skeleton), the bulk density of fine earth (LD_{FE} ; dry matter of fine earth per fine earth volume), and soil water content (WG). Furthermore, these parameters also allow weight-related concentrations to be converted to soil volumes, which in turn allows the observation of stocks and mass flows. Since 2003, the Swiss Soil Monitoring Network (NABO) has recorded the above-mentioned physical parameters for each soil sampling. This report presents the methods used – including detailed working instructions – and introduces our findings, particularly with respect to the validity and comparability of the different methods. On this basis, we provide recommendations for implementation in soil monitoring programmes.

For each sampling, NABO collects four volumetric soil samples (so-called RG samples) of 4.8 cm diameter from the top 20 cm to determine the auxiliary physical parameters. Extra samples are needed because the composite samples used to determine chemical and biological soil parameters are taken with a gauge auger; thus, the sampled volume is not exactly defined. A comparison of the results of RG samples with those of large-volume samples (sampled volume $\sim 25 \times 20 \times 20$ cm³) revealed that RG samples are too small to capture soil skeleton reliably: the fractions of gravel (2-5 cm) and stones (>5 cm) were generally underestimated, which in turn also caused the underestimation of LD_{FE} . By contrast, RG_{FE} and WG were comparable for RG samples and large volume samples, even for skeleton-rich soils. In addition, we demonstrated that laboratory workload may be reduced without significantly affecting the quality of LD_{FE} results by deriving the soil skeleton volume from its mass using a mean density of 2.4 g cm⁻³ instead of measuring the volume. Furthermore, the volume and mass of organic components is immaterial in practice, since their relative share of the entire soil sample is generally very small.

Percussion and drilling soil corers were used to sample the entire soil profile; the former were found to be more reliable, due to their more precise definition of the sampled volume. The soil cores were separated into pedological horizons, with the individual horizons of four soil cores being pooled. These samples serve to determine both the auxiliary physical parameters and further variables. Unlike grab samples taken from a soil profile, which only represent a section within the horizon, the horizon samples always reflect the average value for the entire soil horizon, thus allowing the assessment of stocks and their changes across the entire soil profile over time. A comparison of the samples from soil cores with RG samples (described above) showed the results to be comparable, provided that the sampled soil depths (0-20 cm) were the same. By contrast, gradients within the soil horizons meant that the results from thicker or thinner horizon samples could not be converted to 0-20 cm soil depth.

1 Einleitung

Der Bodenkörper besteht aus den drei Phasen Luft, Wasser und Festsubstanz, wobei sich letztere weiter aufteilen lässt in Skelett (Bestandteile > 2 mm) und Feinerde. Die Massen- und Volumenanteile der einzelnen Phasen sind standortabhängig, sie variieren aber auch über die Zeit. Werden Bodenproben mit einem klar definierten Volumen genommen, können zur Beschreibung dieser Massen- und Volumenanteile einige physikalische Basisgrößen bestimmt werden, beispielsweise der Wassergehalt (WG) oder die Menge Feinerde pro Bodenvolumen (Raumgewicht der Feinerde, RG_{FE}). Mit diesen Grössen können einerseits Aussagen über den aktuellen Zustand des Bodenkörpers gemacht werden (vgl. nächster Absatz), andererseits können gewichtsbezogene Konzentrationen aufs Bodenvolumen bezogen werden (Berechnung von Vorräten, vgl. übernächster Absatz). Weiterführende physikalische Methoden benötigen zumeist ungestörte Bodenproben (Bodenstruktur bleibt bei der Probenahme intakt). Sie beschreiben die Funktionalität des Bodens anhand von Porengrößenverteilung, Wasser- und Luftdurchlässigkeit, etc., sind jedoch nicht Gegenstand dieses Berichtes.

Bei wiederholten Probenahmen, wie sie für Monitoringprogramme typisch sind, ist der Bodenzustand zum Zeitpunkt der Probenahme ein kritischer Faktor. So ist seit längerem bekannt, dass die Bodenfeuchte die Zusammensetzung von Bodenproben beeinflussen kann (Ellert & Bettany 1995). Diese Beobachtung wird gemeinhin damit erklärt, dass die Bodenmatrix je nach Wassergehalt quillt oder schrumpft und somit bei einer fixen Beprobungstiefe (gemessen von der Bodenoberfläche) die relativen Anteile der obersten Bodenhorizonte variieren. Gemäss unserer Erfahrung ist die Probenahme als Fehlerquelle oft bedeutender als die Analytik (Desaules et al. 2004). Daher erfasst die NABO seit 2003 mit volumetrischen Proben den Bodenzustand bei jeder Probenahme. Die Idee dahinter ist, anhand der physikalischen Grössen zu beurteilen, ob die wiederholten Probenahmen bei vergleichbarem Bodenzustand stattgefunden haben. Die bestimmten Grössen sind folglich Meta-Daten zur Beschreibung der einzelnen Probenahmen, daher wird gelegentlich auch der Begriff „physikalische Begleitparameter“ verwendet.

Die meisten chemischen und biologischen Messgrössen liefern als Resultat Konzentrationen, die sich auf die Menge Feinerde (Trockensubstanz) beziehen. Sie erlauben daher keine Aussagen zu den jeweiligen Massen pro Bodenvolumen (Vorräten); dies ist erst möglich, wenn auch das RG_{FE} und somit die Menge Feinerde pro Bodenvolumen bekannt ist. Der Bezug aufs Volumen ist zwingend, wenn aufgrund von Gehalten, Ein- und Austrägen Stoffflussrechnungen und -bilanzen berechnet werden. Ebenso wenn Gehalte über mehrere Bodenhorizonte, bis hin zu profillumfassenden Vorräten, aggregiert werden. Für volumetrische Bodenproben, beispielsweise Horizontproben aus Schlagsonden, kann das RG_{FE} anhand derselben Proben bestimmt werden, die auch für die chemischen und biologischen Analysen gebraucht werden. Proben mit nicht genau definiertem Volumen, beispielsweise Flächenmischproben entnommen mit einem Hohlmeisselbohrer (Halbrohr), müssen zusätzlich entsprechende Volumenproben genommen werden für die RG_{FE} -Bestimmung.

Der vorliegende Bericht beschreibt die von der NABO angewandten Methoden zur Bestimmung physikalischer Begleitparameter sowie zur profillumfassenden Entnahme von Horizontproben. Kapitel 2 gibt einen Überblick über die Definitionen physikalischer Begleitparameter und den Methoden zu deren Bestimmung, Kapitel 3 enthält die detaillierten Arbeitsanleitungen dazu. In Kapitel 4 werden die Resultate methodischer Abklärungen besprochen, insbesondere zur Vergleichbarkeit der verwendeten Methoden. Zum Schluss werden die Erkenntnisse und die daraus abgeleiteten Empfehlungen in Kapitel 5 zusammengefasst.

2 Methoden

2.1 Begriffe & Definitionen

Physikalische Parameter beruhen auf den Massen und Volumina verschiedener Phasen des Bodens bzw. der Bodenproben. Die relevanten Grössen sind in Abbildung 1 und Tabelle 1 zusammengefasst. Die Frischmasse (FM) bezeichnet das Gewicht der Bodenprobe bzw. Feinerde in feldfeuchtem Zustand, sprich dem Zustand bei der Probenahme. Die Trockenmasse (M, auch Trockensubstanz) bezieht sich stets auf das Gewicht nach der Trocknung bei 105 °C. Für das Skelett wird (vereinfachend) angenommen, dass es kein Wasser enthält. Streng genommen müssten auch Masse und Volumen von Pflanzenteilen (z. B. Wurzeln) sowie von Fremdbestandteilen (anthropogen eingebrachtes Material wie Metall, Plastik, Ziegelbruch) berücksichtigt werden. In der Praxis können sie in der Regel jedoch vernachlässigt werden.

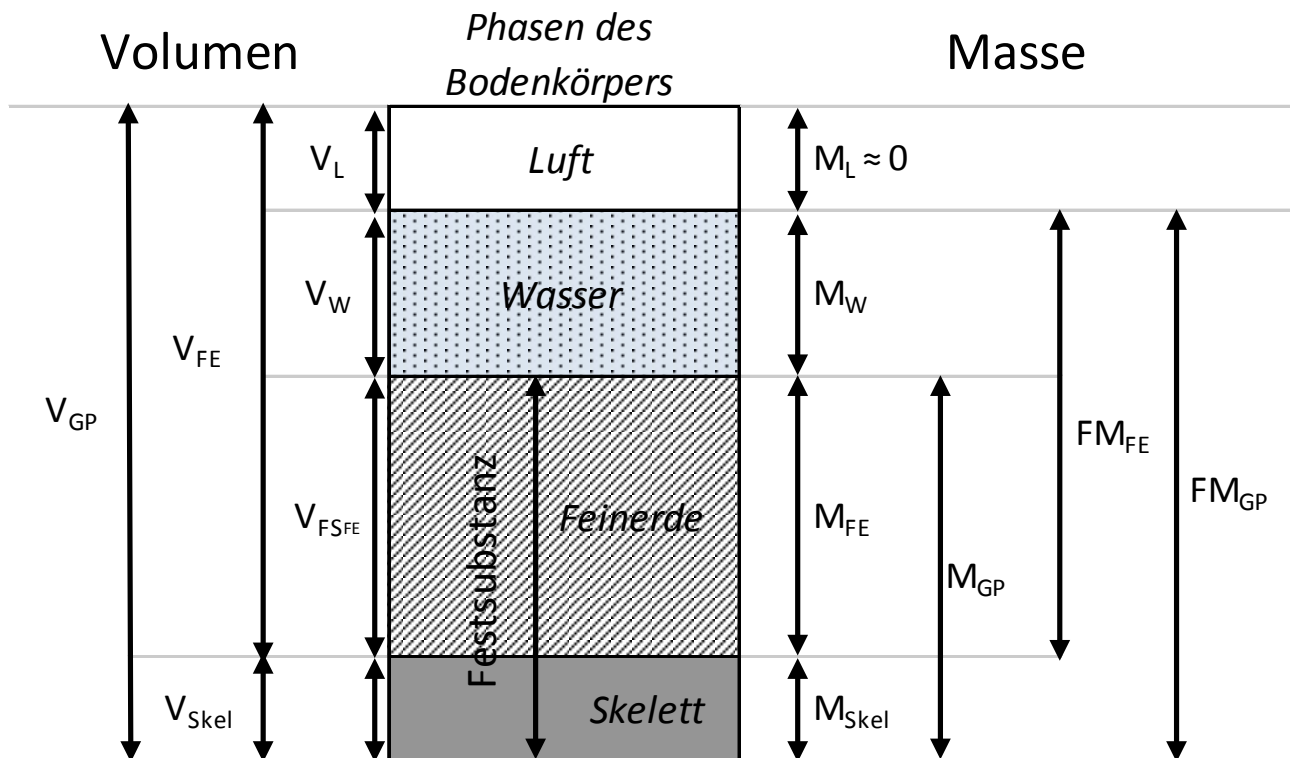


Abbildung 1: Definition der Massen und Volumina der Bodenphasen bzw. -proben (überarbeitet aus Hillel 2003).

Tabelle 1: Abkürzungen und Definitionen der Massen und Volumina verschiedener Phasen des Bodens bzw. der Bodenproben.

Abk.	Definition	Bezug zu weiteren Grössen
V_{GP}	Volumen der Bodenprobe insgesamt	
V_{Skel}	Volumen des Skelettes (> 2 mm)	
V_{FE}	Volumen der Feinerde (< 2 mm) inkl. der wasser- und luftgefüllten Poren	$V_{FE} = V_{GP} - V_{Skel}$
V_L	Volumen der Bodenluft	
V_W	Volumen des Bodenwassers	
V_{FSFE}	Volumen der Festschubstanz der Feinerde	$V_{FSFE} = V_{FE} - V_L - V_W$
M_L	Masse der Bodenluft	$M_L \approx 0$
FM_{GP}	Frischmasse der Bodenprobe insgesamt (feldfeucht)	
M_{Skel}	Masse des Skelettes (> 2 mm; Annahme: trocken)	
FM_{FE}	Frischmasse der Feinerde (< 2 mm, feldfeucht)	$FM_{FE} = FM_{GP} - M_{Skel}$
M_W	Masse des Bodenwassers	$M_W = FM_{GP} - M_{GP}$
M_{FE}	Trockenmasse (105 °C) der Feinerde (< 2 mm)	$M_{FE} = FM_{FE} - M_W = M_{GP} - M_{Skel}$
M_{GP}	Trockenmasse (105 °C) der Bodenprobe insgesamt	$M_{GP} = FM_{GP} - M_W = M_{FE} + M_{Skel}$

Auf der Basis der Massen und Volumina können folgende physikalische Parameter bestimmt werden:

Gravimetrischer Wassergehalt der Probe (g/g %) *(gravimetric) soil water content*

$$WG_{GP} = M_W / M_{GP} \cdot 100 \% = (FM_{GP} - M_{GP}) / M_{GP} \cdot 100 \%$$

Wassergehalt der Probe insgesamt zum Zeitpunkt der Probenahme.

Gravimetrischer Wassergehalt der Feinerde (g/g %) *(gravimetric) water content of soil < 2 mm*

$$WG_{FE} = M_W / M_{FE} \cdot 100 \% = (FM_{GP} - M_{GP}) / M_{FE} \cdot 100 \%$$

Wassergehalt der Feinerde zum Zeitpunkt der Probenahme. Für skelettfreie Böden identisch mit WG_{GP} .

Raumgewicht Gesamtprobe (g cm⁻³) *(dry) bulk density¹*

$$RG_{GP} = M_{GP} / V_{GP}$$

Festmasse (Feinerde + Skelett) pro Bodenvolumen, manchmal auch als Trockenrohddichte bezeichnet.

Raumgewicht Feinerde (g cm⁻³) *apparent density²*

$$RG_{FE} = M_{FE} / V_{GP}$$

Trockenmasse Feinerde pro Bodenvolumen.

Lagerungsdichte der Feinerde (g cm⁻³) *(dry) bulk density¹*

$$LD_{FE} = M_{FE} / V_{FE}$$

Trockenmasse Feinerde pro Feinerdevolumen. Ist ein Mass der Komprimierung der Feinerde und somit des Verdichtungszustandes des Bodens. In Desaules & Studer (1993) und Desaules & Dahinden (2000) als Raumgewicht Feinerde bezeichnet. Für skelettfreie Böden identisch mit RG_{FE} .

Skelettgehalt (cm³/cm³ %) *rock content*

$$Skelett = V_{Skel} / V_{GP} \cdot 100 \%$$

Volumenanteil des Skelettes (Festschubstanz > 2mm).

Dichte der Skelett-Festschubstanz (g/cm³) *(mean) particle density, density of solids*

$$\rho_{Skel} = M_{Skel} / V_{Skel}$$

Skelettmasse pro Skelettvolumen (spezifisches Gewicht).

In der deutsch- und englischsprachigen Literatur werden die Begriffe für physikalische Bodenparameter nicht einheitlich verwendet, verschiedene Begriffe werden in unterschiedlichem Kontext gebraucht (z. B. Grossman & Reinsch 2002). So werden die Begriffe Trockenrohddichte, Raumgewicht und Lagerungsdichte nebeneinander für identische Definitionen verwendet, gleichzeitig gelten für die einzelnen Begriffe (insbesondere die Lagerungsdichte) in verschiedenen Dokumenten jedoch unterschiedliche Definitionen. Die oben eingeführten Definitionen gelten für diesen Bericht sowie für die NABO generell. Allerdings sei darauf hingewiesen, dass der Begriff Raumgewicht in älteren NABO-Dokumenten (insbesondere Desaules & Studer 1993 und Desaules & Dahinden 2000) anders als unten definiert verwendet wurde und in etwa der obigen Definition der Lagerungsdichte entspricht.

¹ Der Begriff ‚bulk density‘ wird sowohl für RG_{GP} als auch LD_{FE} verwendet, wobei letzteres in der Bodenkunde üblicher ist. Daneben existiert auch die ‚wet bulk density‘, bei der die Masse des feuchten Bodens (FM_{GP}) auf das Bodenvolumen bezogen wird (wiederum entweder mit oder ohne Skelett).

² Unseres Wissens existiert im Englischen kein fester Begriff für das Raumgewicht. Zur klaren Unterscheidung von der Lagerungsdichte (‚bulk density‘) empfehlen wir den Begriff ‚apparent density‘ (scheinbare Dichte) in Analogie zum französischen Begriff ‚densité apparente‘.

Auf internationaler Ebene wird zur Berechnung von Vorräten zumeist LD_{FE} („bulk density“) verwendet, wobei der Skelettgehalt als separate Grösse in die Berechnung einfließt. Aus der Konzentration der Substanz X (C_X ; in $g\ kg^{-1}$) berechnet sich der entsprechende Vorrat (V_X ; $g\ m^{-2}$) für die Bodentiefe h (cm) dann mit

$$V_X = 10 \cdot C_X \cdot LD_{FE} \cdot h \cdot [1 - \text{Skelett} / 100\%]$$

wird hingegen RG_{FE} bestimmt, kann V_X ohne zusätzliche Skelettbestimmung berechnet werden:

$$V_X = 10 \cdot C_X \cdot RG_{FE} \cdot h$$

2.2 Probenahme

Um die oben definierten physikalischen Bodenparameter zu bestimmen, benötigt man Proben mit einem klar definierten Beprobungsvolumen. Verschiedene Methoden, die durch die NABO eingesetzt werden/wurden, erfüllen diese Voraussetzung (Tabelle 2). Aufgrund ihres Verwendungszweckes, lassen sich diese in drei Gruppen einteilen.

- Raumgewichtsproben (RG-Proben; Methoden a-b): Erfassung des Bodenzustandes bei der Probenahme (Kapitel 2.2.1).
- Grosse Volumenproben (c-d): Genaue Erfassung des Skelettgehaltes, insbesondere für skelettreiche Böden (Kapitel 2.2.2).
- Horizontproben (e-g): Horizontweise Beprobung mit Bohrkernen zur Bestimmung chemischer und physikalischer Parameter (Kapitel 2.2.3).
- Stechzylinderproben (h): Ungestörte Volumenproben zur Bestimmung weiterer physikalischer Parameter (Kapitel 2.2.4).

Tabelle 2: Übersicht der Methoden zur Entnahme volumetrischer Proben

Methode	Probenahme-Gerät	Beprobte Tiefe	Beprobter Querschnitt	Proben	Einsatz NABO
a RG-Proben	Humax Schlagsonde SH 25/30 cm ¹⁾	0-20 cm	∅ 4.8 cm, 18.1 cm ²	Raumgewichts-Proben 0-20 cm	ab 2003
b RG-Moorstandorte	Grasprobenstecher mit welliger, rasiermesserscharfer Schneide	0-20 cm	∅ 4.3 cm, 14.5 cm ²	Raumgewichts-Proben 0-20 cm für Moorstandorte	ab 2003
c Stechrahmen	Stahlblechrahmen	0-20 cm	25 x 20 cm, 500 cm ²	Grosse Volumenproben	einmalig 2008-09
d Grube	mit Spaten und Handschaufel ausgehobene kubische Grube	0-20 cm	~25 x 20 cm, ~500 cm ²		(methodische Abklärungen)
e Split-Tube	Split tube sampler ²⁾	0-40 cm	∅ 4.8 cm, 18.1 cm ²	Volumetrische Horizontproben	2007-09
f Bohrsonde	Rotationssonde HS ¹⁾	0-100 cm (4 x 25 cm)	∅ ~ 5.3 cm, ~22.1 cm ²		2010-13
g Schlagsonde	Humax Schlagsonde SHK 75 cm ¹⁾	0-75 cm (3 x 25 cm)	∅ 5.0 cm, 19.6 cm ²		ab 2011
h Stechzylinder	Stechzylinder-Set Modell C ²⁾	5 cm-Ausschnitt aus Horizont	∅ 5.0 cm, 9.6 cm ²	Ungestörte Volumenproben	ab 2015

¹⁾ Humax-Schlag- und Bohrsonden www.humax.ch,

²⁾ Split tube sampler, Stechzylinder-Set www.eijkelkamp.com



Abbildung 2: Entnahme von Volumenproben mit der Humax-Handsonde (links; RG-Proben, Methode a), mit dem Stechrahmen (Mitte; grosse Volumenproben, Methode c) und mit Stechzylindern (rechts; Methode h).

2.2.1 Raumgewichtsproben (RG-Proben)

Die NABO entnimmt zur Bestimmung der chemischen Bodeneigenschaften (pH-Wert, Kohlenstoffgehalt, Schadstoffgehalte, usw.) Flächenmischproben aus 0-20 cm Tiefe mit einem Hohlmeisselbohrer (Halbrohr; vgl. Gubler et al. 2015). Das beprobte Volumen ist nicht klar definiert und variiert je nach Bodeneigenschaften und -zustand. Deshalb entnimmt die NABO seit 2003 zusätzlich Volumenproben für dieselbe Bodentiefe. Einerseits, um den Bodenzustand bei der Probenahme zu erfassen, und andererseits, um die gemessenen Parameter auch auf das Volumen zu beziehen.

Standardmässig (Methode a) werden dazu bei jeder Erhebung vier volumetrische Proben entlang der Seiten der beprobten Fläche ($10 \times 10 \text{ m}^2$) entnommen (A bis D, Bezeichnung im Uhrzeigersinn beginnend beim Einmesspunkt der Fläche, vgl. Abbildung 3). Bis 2007 wurde zusätzlich eine fünfte Probe (E) in der Mitte der Fläche entnommen. Bei jeder späteren Erhebung werden die Probenahmestellen jeweils um einen Meter im Uhrzeigersinn verschoben. Die Beprobung erfolgt mit einer Humax-Schlagsonde SH und PVC-Hülsen mit Durchmesser 48 mm und Länge 25 oder 30 cm. Die Volumenproben werden in der Tiefe von 0-20 cm entnommen, wobei das Bohrloch nach der Entnahme nachgemessen wird. Allfällige Abweichung von der Standardtiefe 20 cm müssen erfasst werden, da das beprobte Volumen aus Probendurchmesser und Beprobungstiefe berechnet wird. Auf geeigneten Flächen wird der Zylinder lotrecht eingeschlagen (vgl. Abschnitt 3.1 für Details). Unmittelbar nach der Probenahme werden die Proben verschlossen (Plastiksäcke) um Feuchtigkeitsverluste zu vermeiden, Transport und Lagerung erfolgen in Kühlboxen bzw. im Kühlschrank.

Für die beiden Moorstandorte ist die beschriebene Standardmethode nicht geeignet, stattdessen kommen Grasprobenstecher zum Einsatz (Methode b; vgl. Kapitel 3.2 für Details).

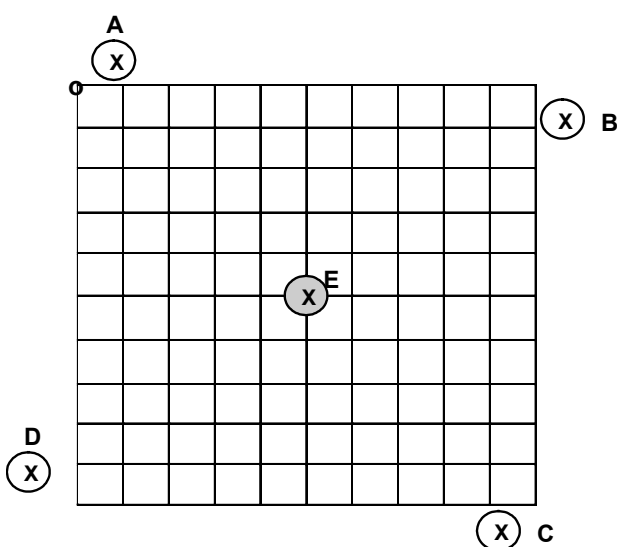


Abbildung 3: Protokollierung der Anordnung von Raumgewichtsproben A - E in Bezug zum Einmesspunkt \circ (Protokoll Probenplan). Die Probe E wurde nur bis 2007 entnommen.

2.2.2 Grosse Volumenproben

Grosse Volumenproben erfassen ein Bodenvolumen von ungefähr 8-10 Liter. Dadurch kann der Skeletthalt zuverlässig erfasst werden (Kapitel 4.1 sowie Buchter et al. 1993). Die NABO entnahm einmalig grosse Volumenproben, um die physikalischen Parameter genau zu bestimmen und die Abweichung der kleineren RG-Proben zu kennen. Die grossen Volumenproben wurden mit Stechrahmen (Methode c) oder mit Spaten und Schaufeln aus einer Grube (Methode d) entnommen. Bei skelettreichen Böden, insbesondere bei hohen Steingehalten, sowie an Waldstandorten ist die Gruben-Methode besser geeignet, da Steine und Baumwurzeln das Eindringen des Stechrahmens stark erschweren oder verunmöglichen. Im Gegensatz zum Stechrahmen ist das beprobte Volumen für die Grube nicht vorgegeben, es muss daher nach der Probenentnahme mit Wasser oder Sand gemessen werden (vgl. Kapitel 3.4).

2.2.3 Horizontproben

Zur Entnahme von volumetrischen Horizontproben wurden Split-Tube-Sampler, Bohr- und Schlagsonden eingesetzt (Methoden e-g). Analog zu den RG-Proben, werden vier Bohrkerne entlang der Seiten der Probenahmefläche entnommen (Abbildung 3) und bei jeder Wiederholung um 1 m im Uhrzeigersinn verschoben. Die entnommenen Bohrkerne werden in pedologische Bodenhorizonte separiert, die Proben der vier Bohrkerne pro Erhebung werden horizontweise aggregiert. Für diese Proben können sowohl chemische als auch physikalische Parameter bestimmt werden. Um letztere berechnen zu können, muss die Lage der Horizontgrenzen korrekt bestimmt werden. Dazu muss auch die Stauchung der Bohrkerne durch die Probenahme berücksichtigt werden (vgl. Kapitel 3.5). Der Split-Tube-Sampler wurde wegen der geringen Entnahmetiefe (max. 40 cm) ab 2010 durch die tiefer vordringenden Geräte ersetzt. Ebenso wurde die Bohrsonde weitestgehend durch die Schlagsonde ersetzt, da das beprobte Volumen für die Bohrsonde nicht klar definiert ist (vgl. Kapitel 4.4).

2.2.4 Zylinderproben

Mit Stahlzylindern (Methode h) können, im Gegensatz zu den vorhergehenden Methoden, ungestörte Volumenproben entnommen werden, d. h. die Bodenstruktur bleibt bei der Probenahme erhalten. Daher kann mit diesen Proben eine Reihe weiterer physikalischer Parameter bestimmt werden, wie Porenverteilung bzw. Desorptionskurve, gesättigte Wasserleitfähigkeit, Luftpermeabilität, Gasdiffusion etc. Auch die in diesem Bericht gezeigten Parameter lassen sich (im Anschluss an die übrigen Analysen) bestimmen. Aufgrund des kleinen Probenvolumens muss jedoch eine genügend grosse Anzahl Wiederholungen gemacht werden, um verlässliche Werte zu erhalten.

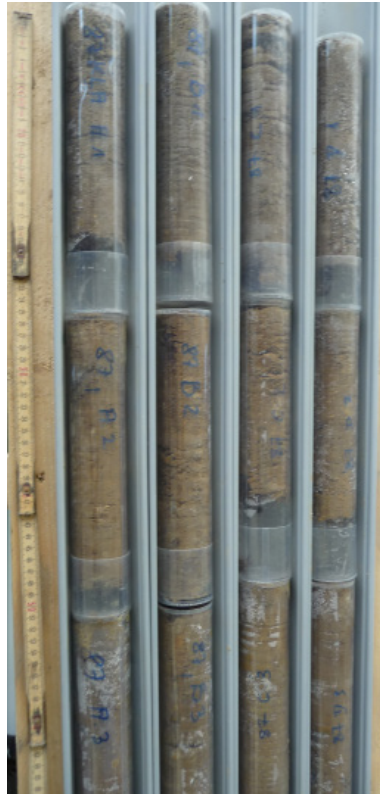


Abbildung 4: Entnahme volumetrischer Horizontproben mit der Humax-Bohrsonde (oben links; Methode f) bzw. der Humax-Schlagsonde (oben rechts; Methode g). Tiefenmessung am Bohrloch nach jeder Bohr-Etappe (unten links), Aneinanderreihung der entnommenen Bohrkern der einzelnen Etappen pro Bohrung (unten Mitte) und Bodenansprache mit Bestimmung und Vermessung der Horizontgrenzen (unten rechts).

2.3 Bestimmung

Für die entnommenen Proben werden V_{GP} , FM_{GP} , M_{GP} , M_{Skel} und V_{Skel} bestimmt, daraus lassen sich alle weiteren Parameter aus Kapitel 2.1 berechnen. Zusätzlich kann auch V_{Skel} aus M_{Skel} berechnet werden, sofern ρ_{Skel} bekannt ist (oder geschätzt wird, siehe unten).

2.3.1 Beprobtes Volumen V_{GP}

Mit Ausnahme von Methode g ist der beprobte Querschnitt Q durch die Sonde definiert. Ist die beprobte Tiefe h bekannt, so gilt $V_{GP} = Q \cdot h$. Für die Proben aus der Grube wird V_{GP} direkt im Feld mit Wasser oder Sand bestimmt (vgl. Kapitel 3.4).

2.3.2 Frisch- und Trockenmasse der Probe (FM_{GP} , M_{GP})

Unmittelbar nach der Probenahme werden die Proben im Plastiksack in eine Kühlbox gegeben und somit vor Verdunstung geschützt. Bis zur Analyse werden sie im Plastiksack bei 5 °C im Kühlschrank zwischengelagert. Somit wird gewährleistet, dass der Feuchtezustand bei der Analyse jenem zum Zeitpunkt der Probenahme entspricht. Nach dem Auspacken wird die gesamte Probe gewogen (FM_{GP}), anschliessend für 48 h bei 105 °C getrocknet und wieder gewogen (M_{GP}). In Abweichung zu den übrigen Proben werden die Horizontproben nur bei 40 °C getrocknet, damit sie auch für chemische Analysen verwendet werden können. Um M_{GP} zu bestimmen, wird für Horizontproben ein Aliquot des bei 40 °C getrockneten Materials bei 105 °C getrocknet, um den Restwassergehalt zu bestimmen und das Trockengewicht der Probe entsprechend zu korrigieren.

2.3.3 Masse und Volumen Skelett für RG-Proben und grosse Volumenproben (M_{Skel} , V_{Skel})

Die bei 105 °C getrocknete Probe wird in Wasser aufgelöst, anschliessend wird mit einem 2 mm - Sieb durch Auswaschung die Fraktion > 2 mm gewonnen. Der Siebrückstand wird in Skelett und Pflanzenmaterial separiert und bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz (ca. 12-24 h) getrocknet und anschliessend gewogen. Das Volumen kann mit einem Pyknometer oder durch die Wasserverdrängungs-Methode (Archimedisches Prinzip, siehe Abbildung 5) bestimmt werden. Alternativ kann V_{Skel} als M_{Skel} / ρ_{Skel} berechnet werden, indem ρ_{Skel} geschätzt wird. Die NABO verzichtet seit 2010 auf die direkte Bestimmung von V_{Skel} , als Schätzwert für ρ_{Skel} wird 2.4 g cm^{-3} verwendet. Dieser Wert wurde von den grossen Volumenproben abgeleitet (vgl. Kapitel 4.2). Masse und Volumen des Pflanzenmaterials können aufgrund des geringen Anteils vernachlässigt werden (vgl. Kapitel 4.3).

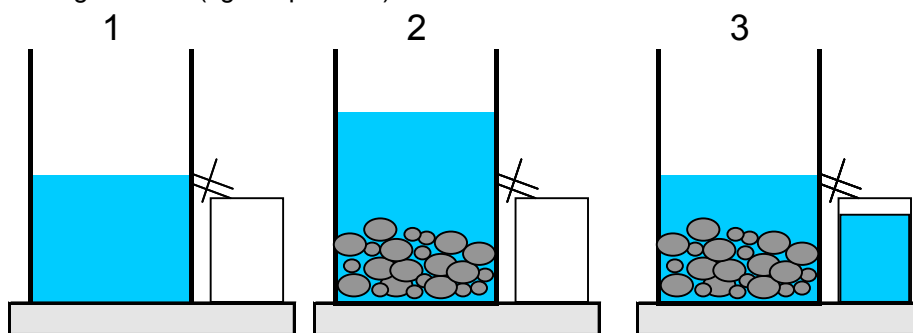


Abbildung 5: Bestimmung des Skelettvolumens durch Wasserverdrängung (geeignet vor allem bei grossen Volumenproben): (1) Eimer bis zum Überlauf füllen. Hahn schliessen. (2) Skelett einfüllen. (3) Hahn öffnen und Wasservolumen aus Überlauf volumetrisch oder gravimetrisch (unter Berücksichtigung der temperaturabhängigen Dichte von Wasser) bestimmen.

2.3.4 Masse und Volumen Skelett für Horizontproben (M_{Skel} , V_{Skel})

Das bei 40 °C getrocknete Material der Horizontproben wird mit dem Backenbrecher zerkleinert. Anschliessend wird die Fraktion > 2 mm mit einem 2 mm-Sieb abgetrennt. Der Siebrückstand wird in Kies, Feinerdebröckel, Fremdbestandteile und organisches Material (Pflanzenwurzeln) getrennt und anschliessend gewogen. Es wird angenommen, dass das Skelett kein Wasser enthält; eine Korrektur für die Trocknung bei nur 40 °C ist somit nicht notwendig. V_{Skel} wird rechnerisch als M_{Skel} / ρ_{Skel} mit $\rho_{Skel} = 2.4 \text{ g cm}^{-3}$ bestimmt. Für die Horizontproben kann die Masse der Feinerde nach dem Sieben gewogen werden, allerdings sollte M_{FE} dennoch mit $M_{GP} - M_{Skel}$ berechnet werden, da es beim Backenbrechen und Sieben zu Verlusten kommen kann.

3 Arbeitsanleitungen

Dieses Kapitel enthält detaillierte Arbeitsanleitungen zu den im Kapitel 2.2 beschriebenen Methoden. Das benötigte Material ist in Tabelle 3 zusammengefasst.

Tabelle 3: Materialliste zur Entnahme volumetrischer Bodenproben.

Methode	Entnahme Bodenprobe	Tiefe	Volumenbestimmung	Verpackung und Transport
a) RG-Proben	Humax-Schlagsonde 25/30 ¹⁾ Hammer, Hülsen	Doppelmeter für Kontrolle Probentiefe	-	Hülsen, Plastiksack
b) RG-Moorstandorte	Grasprobenstecher Ausstosslatte		-	Plastiksäcke (20 x 35 cm)
c) Stechrahmen	Stechrahmen, div. Handschaufeln, Kessel		-	Plastiksäcke 15-20 l
d) Grube	Spaten, div. Handschaufeln, Kessel		Plastiksack, Messkolben, Kanister mit Wasser oder Quarzsand	Plastiksäcke 15-20 l
e) Split-Tube	Bohrer und Sonden ¹⁾ Split-tube ²⁾ , Schlegel, Hülsen		-	Plastik-Hülsen, Plastiksäcke
f) Bohrsonde				
g) Schlagsonde	3-teilige Hebevorrichtung ²⁾			
h) Stechzylinder	Set ²⁾ mit Zylinder, Schneiden, Bohrgeräten, Hammer		-	Plastik-Verschlusskappen, Transportbox, Plastiksack

Transport aller Proben in Kühlbox

¹⁾ www.humax.ch

²⁾ www.eijkelkamp.com

³⁾ Dünnwandiger, wasserdichter Plastiksack (z. B. Allzweckbeutel „Quick-Bag“ 35 l aus Polyethylen, ca. 55 cm x 55 cm) für Volumenbestimmung mit Wasser bzw. robuster Plastiksack für Bestimmung mit Sand

3.1 Probenahme RG-Proben 0-20 cm mit Humax-Schlagsonde (Methode a)

- Die Einstellung der Tiefenmarkierung (Briede) auf korrekte Tiefe von 20 cm kontrollieren und allenfalls korrigieren.
- Beschriftete Plastikhülse in Humax-Sonde einlegen.
- Sonde lotrecht einschlagen bis Tiefe von 20 cm erreicht ist (auf geeigneten Flächen sollte die mittlere Tiefe 20 cm betragen, vgl. Abbildung 6).
- Probe durch Drehen und leichtem Abkippen vom Bodenkörper lösen.
- Das Gerät sorgfältig herausziehen, die Bruchstelle eventuell mit Messer plan schneiden und den Bohrkern herausnehmen (dazu den Bohrkern vollständig in Hülse stossen).
- Tiefe des Bohrloches nachmessen und (falls abweichend von 20 cm) erfassen, wird später zur Berechnung des beprobten Volumens benötigt. Empfohlene Genauigkeit: 0.5 cm.
- Die beprobte Tiefe sollte im Bereich von 18-22 cm liegen, andernfalls Beprobung wiederholen.
- Bohrkern visuell kontrollieren. Die Probe in der Hülse kann im Vergleich zur Bohrlochtiefe gestaucht sein. Deutlich kürzere Bohrkern können allerdings auch auf Probenverluste hinweisen. Bohrloch kontrollieren, ob Zylinderöffnung durch Stein verstopft wurde, allenfalls ist auch ein Vergleich mit den weiteren Replikaten hilfreich. Eine unebene Bruchstelle am Probengrund ist ebenfalls ein Hinweis auf selektive Verluste. Bei Hinweisen auf Probenverluste, Beprobung wiederholen.
- Bodenproben in Plastikhülse belassen und in gut verschlossenem Plastiksack gekühlt transportieren und lagern (Kühlbox/Kühlschrank).

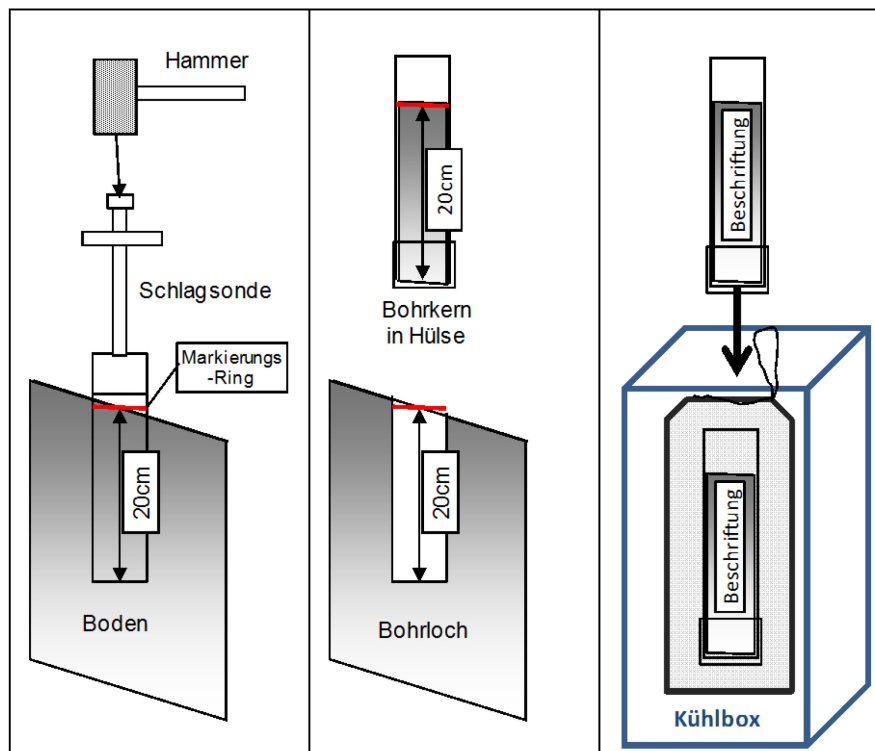


Abbildung 6: Probenahme mit Humax-Schlagsonde 0-20 cm auf einer geneigten Fläche: Sonde lotrecht einschlagen bis zum Erreichen der mittleren Probentiefe von 20 cm (links), Entnahme der Probe und Nachmessen des Bohrloches (mitte), Probe beschriftet und in gut verschlossenem Plastiksack gekühlt transportieren und lagern (rechts).

3.2 Probenahme RG-Proben mit Grasprobenstecher (Methode b)

- Auf dem Grasprobenstecher bei 20 cm eine Markierung (Filzstift) anbringen.
- Den Grasprobenstecher durch drehen in den Boden drücken. Dadurch wird das organische Substrat geschnitten. Beim Erreichen der markierten Tiefe waagrecht abkippen und schneiden.
- Das Gerät sorgfältig herausziehen, dabei das Rohr oben nach Möglichkeit schliessen, damit ein Unterdruck entsteht.
- Probe von hinten mit einer Holzlatte vollständig in beschrifteten Plastiksack ausstossen.
- Die Vollständigkeit der Volumenprobe 0-20 cm mit Doppelmeter im Bohrloch kontrollieren.

3.3 Probenahme mit Stechrahmen (Methode c)

- Den Stechrahmen bis zum Anschlag (20 cm Tiefe) in den Boden drücken
- Das Bodenmaterial vollständig bis 20 cm Tiefe ausgraben und in angeschriebene Plastiksäcke einfüllen und gekühlt transportieren und lagern.
- In Hanglagen wird der Stechrahmen nicht lotrecht, sondern parallel zur Hangoberfläche eingedrückt. Die effektive Beprobungstiefe wird mit $h_{\text{effektiv}} = \cos \alpha \cdot 20 \text{ cm}$ (α : Neigungswinkel in Grad) berechnet. Für die Berechnung des Beprobungsvolumens ist dennoch die Tiefe des Stechrahmens (20 cm) relevant.
- Bei stark skeletthaltigen Böden (vor allem bei Steinen > 5 cm) wird der Rahmen schrittweise bis zum Anstossen eingedrückt, das Bodenmaterial bis zur Einstichtiefe ausgegraben, dann der anstossende Stein entfernt und der Stechrahmen weiter eingedrückt. Der ausgegrabene Stein wird in die Volumenprobe einbezogen, wenn sein Schwerpunkt innerhalb des Stechrahmens liegt (vgl. Abbildung 16). Für die hervorstehenden Steine in der Grubensohle gelten die gleichen Kriterien.

3.4 Probenahme aus Grube (Sand- bzw. Wassermethode; Methode d)

- Mit Spaten und kleinen Gartenschaufeln wird eine 20 cm tiefe, von oben bis unten möglichst gleichmäßig senkrechte Grube mit einer Seitenlänge von mindestens 20 cm gegraben und das Bodenmaterial in Probensäcke abgefüllt. Es ist darauf zu achten, dass der Boden möglichst ohne Druck auf die Grubenwand ausgebrochen wird. Dabei gilt: Die aus Grubenwand und -sohle herausragenden Steine gehören zur Probe, wenn ihr Schwerpunkt innerhalb der Grube liegt.
- Das Volumen der ausgehobenen Gruppe (= beprobtes Volumen) wird mit der Wasser- oder Sandmethode bestimmt:
 - > **Wassermethode:** Grube mit dünnwandigem, wasserdichtem Sack (z. B. Allzweckbeutel „Quick-Bag“ 35 l aus Polyethylen, ca. 55 cm x 55 cm) auskleiden und mit abgemessenem Wasser Messkolben) bis zum Grubenrand füllen. Das benötigte Wasservolumen erfassen. Bei Hanglagen ist darauf zu achten, dass die Grube in Falllinie nicht zu breit ist (Grubenschlitz quer zur Falllinie anlegen); das Volumen wird bestimmt durch talseitiges Hochziehen des Plastiksackes, das Wasser wird bis zur mittleren Grubenrandhöhe aufgefüllt (allerdings ist bei Hanglagen die Sandmethode besser geeignet).
 - > **Sandmethode:** Plastiksack in Grube mit abgemessener Menge Quarzsand füllen. Etappenweise einfüllen und andrücken, damit der Plastik eng an die Grubenwand anliegt. Füllen bis die Grube plan mit der umliegenden Oberfläche ist. Das benötigte Sandvolumen erfassen.



Abbildung 7: Entnahme einer grossen Volumenprobe mit Handschaufeln aus einer Grube (Methode g) mit anschließender Volumenbestimmung durch Auffüllen der Grube mit abgemessenem Sand (rechts).

3.5 Probenahme mit Schlag- oder Bohrsonde (Methoden e-g)

Beschrieben wird die Probenahme mit der Schlagsonde 75 cm. Die Methodik der Bohrsonde ist analog, ebenso jene des Split-Tube-Samplers. In der Regel werden pro Erhebung vier Bohrungen durchgeführt, deren Proben horizontweise aggregiert werden.

- In der Regel werden mit drei Bohr-Etappen à 25 cm Länge ein zusammengesetzter Bohrkern von ca. 75 cm Tiefe entnommen. An diesem Bohrprofil werden Horizontgrenzen bestimmt. Die einzelnen Bohrkern werden durch die Beprobung unterschiedlich stark gestaucht. Daher muss für jede Bohr-Etappe die effektiv beprobte Tiefe im Bohrloch gemessen werden, um anschliessend die effektiven Tiefen der Bodenhorizonte zu berechnen (vgl. unten).
- Beschriftete Hülse (Standort, Bohrstelle TC1 – TC4, Bohretappe H1 – H4) in Innenrohr geben, Innenrohr in Schlagsonde einführen, Schlagkopf aufschrauben.
- Event. Streuauflage oder Vegetation an der Oberfläche entfernen, damit die Oberfläche sichtbar ist.
- Sorgfältig einschlagen bis zur Markierung (alle 25 cm). Eindringfortschritt beobachten, damit bei anstehendem Skelett (Steine, Fels) das Einschlagen gestoppt werden kann (Schneide der Schlagsonde kann Schaden nehmen).
- Die reguläre Tiefe jeder 25 cm-Bohr-Etappe ist erreicht, wenn die Markierung die Oberfläche erreicht.

- Schlagsonde bleibt im Boden. Durch leichte Drehung des Innenrohres wird die Teilprobe unten vom Bodenkörper gelöst und kann anschliessend langsam herausgezogen werden. Die Hülse wird entnommen und mit Deckel verschlossen.
- Bohrtiefe messen: Probenlänge in der Plastikhülse (M1), Bohrrohr innen (M2a) und Bohrrohr aussen (M2b) im Protokoll erfassen. Die erreichte Bohrtiefe ist $M2 = M2a - M2b$ (vgl. Abbildung 8 links).
- Inneres Rohr an der Schneide reinigen und nächste Hülse einsetzen, Entnahme der nächsten Bohr-Etappe analog zu oben.
- Nach Abschluss der untersten Bohr-Etappe (ca. 75 cm Tiefe), wird die Schlagsonde mit der dreiteiligen Hebevorrichtung herausgezogen.
- Bodenansprache: Die Bohrkern der einzelnen Bohr-Etappen werden entsprechend ihrer Reihenfolge in einem Halbrohr ausgelegt (ein Halbrohr pro Bohrung). Die pedologischen Horizontgrenzen werden bestimmt und deren Position innerhalb der einzelnen Bohrkern gemessen (jeweils Distanz ab Oberkante Bohrhülse).
- Aus den erfassten Tiefen lässt sich die durchschnittliche Stauchung für den Bohrkern jeder Etappe berechnen als $r = M1 / M2$. Daraus lässt sich wiederum die effektive Tiefe sämtlicher Horizontgrenzen ableiten. Als illustratives Beispiel die Berechnung der Untergrenze des Ahp-Horizontes in Abbildung 8:
 $M3 =$ gemessene Tiefe des Horizontes im Bohrkern (Der Bohrkern hat die Länge M1)
 effektive Tiefe der Horizontgrenze = $M3 / M1 \cdot M2$
- Für tiefere Bohr-Etappen muss zusätzlich die Position der Oberkante der Bohrhülse addiert werden.
- Die Proben werden horizontweise in Plastiksäcke abgefüllt, gut verschlossen und gekühlt transportiert und gelagert.

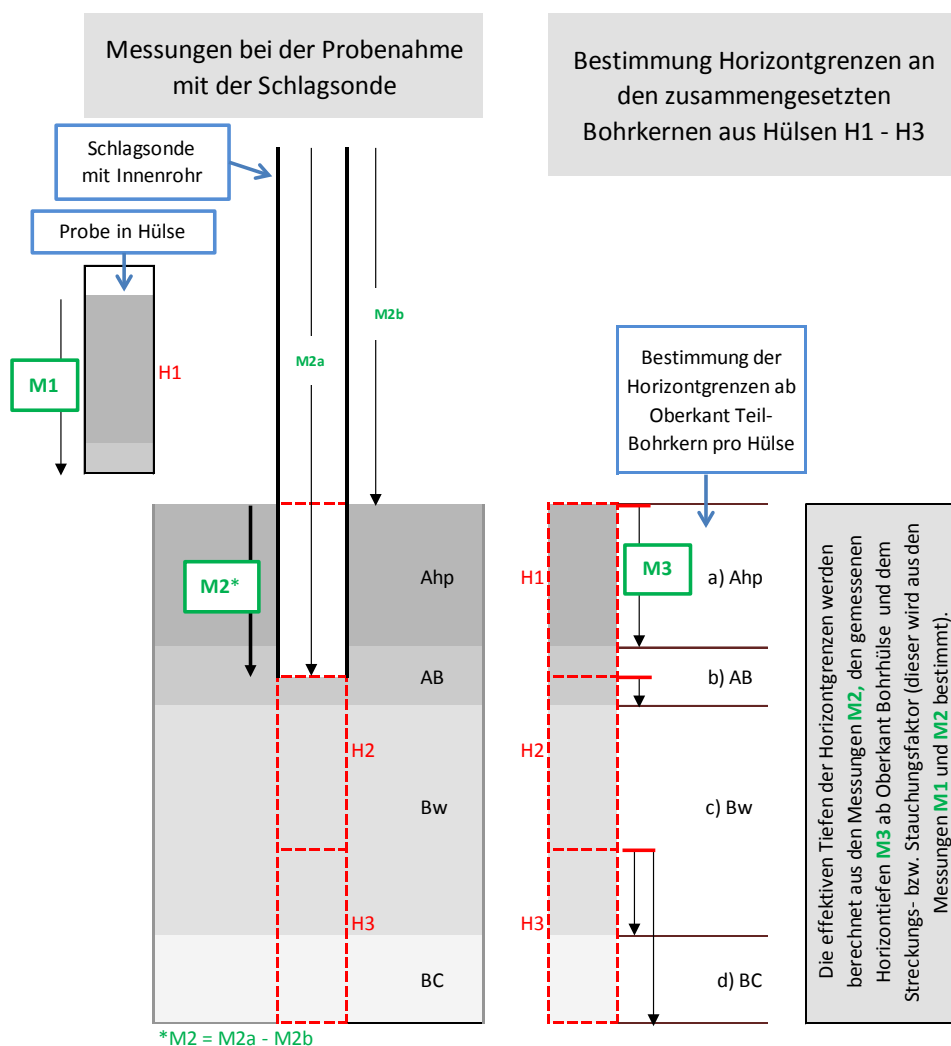


Abbildung 8: Profilmessung und Erfassung der Bohrtiefen der einzelnen Bohr-Etappen (links) sowie Bestimmung und Erfassung der Horizontgrenzen (rechts).

3.6 Probenahme mit Stechzylinder (Methode h)

Anleitung gemäss Gebrauchsanweisung für Stechzylinderset Modell 07.53.SC von Eijkelkamp (Schritte 1 bis 4 in Abbildung 9):

1. Mit Edelmanbohrer und Riverside-Bohrer bis ca. 1 cm oberhalb der gewünschten Untersuchungstiefe (h_1) vorbohren.
2. Den Zylinder in die Stechhülse einführen und mit Hammer und Schlagvorrichtung (Ringhalter, Verlängerungsstück und Schlagkopf) auf die gewünschte End-Tiefe (h_2) einschlagen.
3. Probe abdrehen und sorgfältig aus dem Bohrloch herausnehmen.
4. Den Zylinder aus dem Ringhalter nehmen, überständiges Bodenmaterial bis ca. 0.5 cm ober- und unterhalb des Stechzylinders sorgfältig entfernen. Tiefe und Nr. des Zylinders im Protokoll erfassen. Proben mit Plastik-Schutzkappen verschliessen und gekühlt im Probenkoffer transportieren.

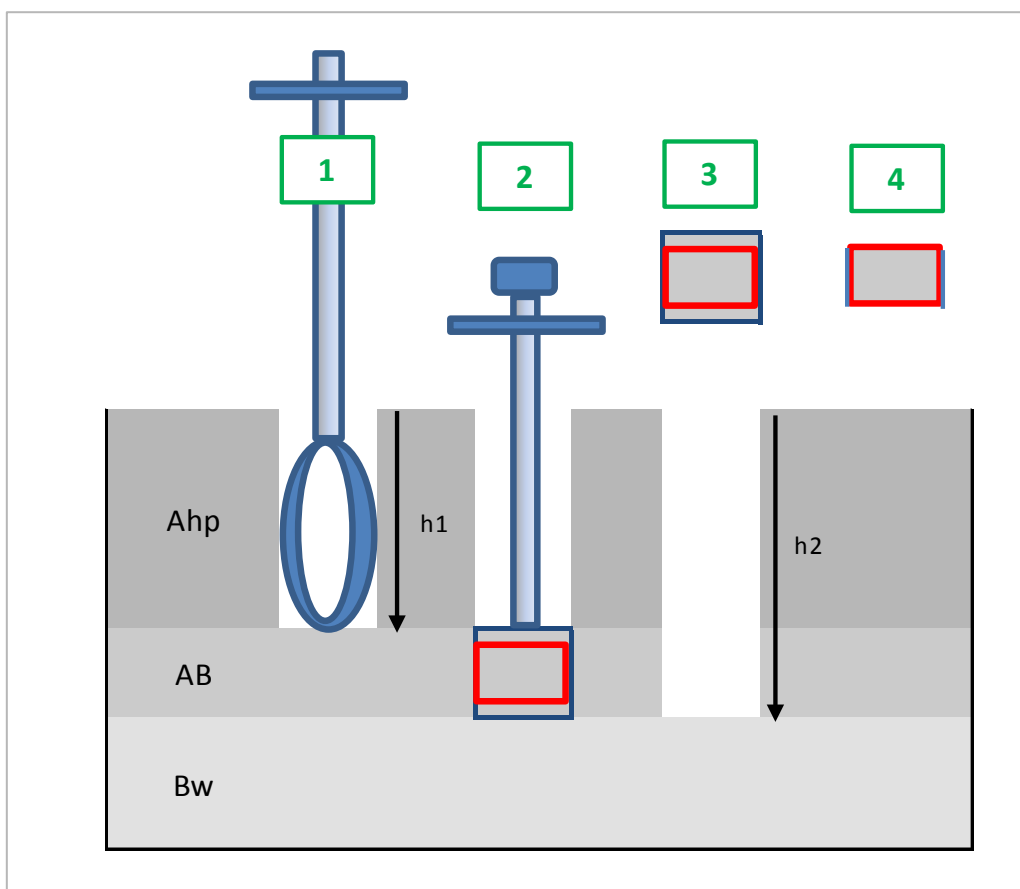


Abbildung 9: Entnahme von Stechzylinderproben in ausgewählten Tiefen (Bodenhorizonten).

4 Resultate & Diskussion Methodenabklärungen

Mit der Integration der physikalischen Begleitparameter in die NABO-Probenahme wurden auch folgende methodische Fragestellungen untersucht:

- Wie gravierend sind die systematischen Fehler, die durch das relative kleine Beprobungsvolumen der Humax-Schlagsonde induziert werden? (Kapitel 4.1)
- Kann ρ_{Skel} und somit V_{Skel} geschätzt werden? (Kapitel 4.2)
- Wie wichtig ist die Erfassung org. Bestandteile wie Wurzeln? (Kapitel 4.3)
- Liefern die verschiedenen Methoden zur Entnahme von Horizontproben vergleichbare Resultate? (Kapitel 4.4)
- Wie gut vergleichbar sind die Resultate aus RG-Proben mit jenen aus Horizontproben? (Kapitel 4.5)

4.1 Einfluss der Probengrösse

Um die Parameter RG_{FE} und LD_{FE} aus Volumenproben zu bestimmen, muss die Skelettfraktion korrekt erfasst werden. Für steinige Böden sind dazu relativ grosse Beprobungsvolumina von 4 bis 8 Liter, d. h. ein Quader mit 15 bis 20 cm Seitenlänge und 20 cm Tiefe, nötig (Buchter et al. 1993). Daher stellte sich für die RG-Proben die Frage, wie gross die Fehler sind, die durch das relativ kleine Beprobungsvolumen der Humax-Schlagsonde (48 mm Durchmesser) induziert werden. Zu diesem Zweck wurden an 29 NABO-Standorten zeitgleich je vier 4 RG-Proben und vier grosse Volumenproben (entweder mit Stechrahmen 25 cm x 20 cm oder aus ähnlich grosser Grube) entnommen. Bei einer Beprobungstiefe von 0-20 cm erfassen die RG-Proben ein Bodenvolumen von 0.36 l, die grossen Volumenproben hingegen 8-10 l. Die Werte der grossen Volumenproben wurden als „wahre“ Werte betrachtet und jenen der RG-Proben gegenübergestellt.

Die untersuchten Standorte weisen **Skelettgehalte** von 0 bis 27 % auf (Abbildung 10). Die Bestimmung mit der Humax-Schlagsonde liefert in der Regel zu niedrige Skelettgehalte, diese liegen zwischen 30 und 100 % des tatsächlichen Skelettgehaltes (Abbildung 10). Die gemessene Differenz des Skelettgehaltes lässt sich nicht alleine durch nichterfasste Steine (> 50 mm) erklären (Abbildung 11 links), auch der Anteil an Grobkies (20-50 mm) wird unterschätzt (ebenda rechts). Für drei Standorte (5, 26 und 66) wurden zudem für RG-Proben ein geringerer Feinkiesanteil (2-20 mm) beobachtet. Währendem die Abweichungen für die Fraktionen > 2 mm sich in erster Linie durch die Grössenverhältnisse der Korngrössen und Beprobungsvolumina erklären lassen, so wird angenommen, dass die Abweichungen der Fraktion 2-20 mm hauptsächlich durch die Heterogenität der beprobten Flächen begründet ist.

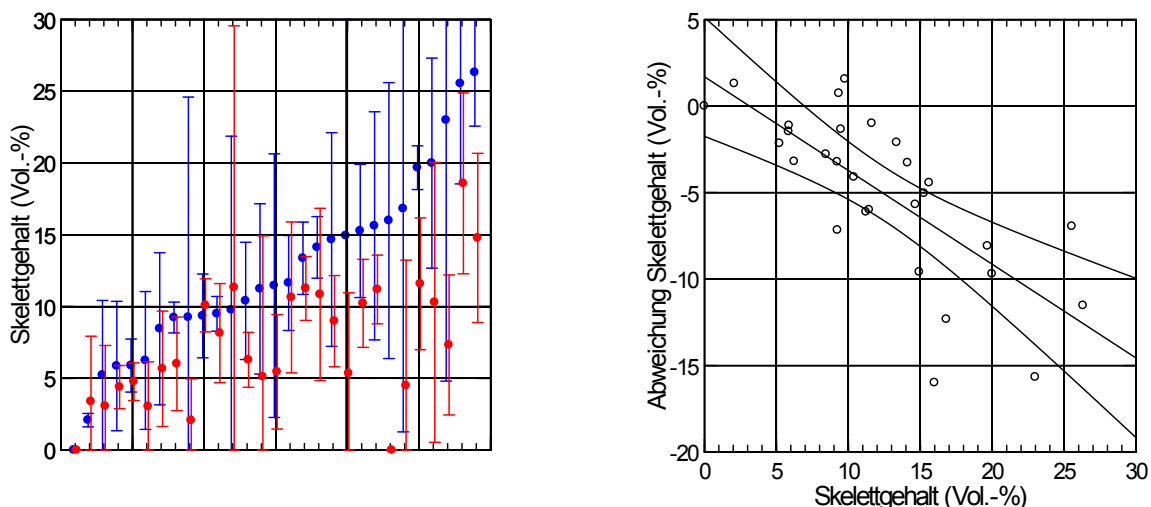


Abbildung 10: Auswirkungen der Probengrösse auf die Skelettgehaltbestimmung. Links: Mittelwert pro Standort mit 95 %-Vertrauensintervall ($N = 4$) für grosse Volumenproben (blau) vs. RG-Proben (Humax-Sonde; rot; x-Achse: Standorte in der Reihenfolge aufsteigender Skelettgehalte). Rechts: Differenz der Resultate beider Methoden (grosse Volumenprobe minus RG-Probe) vs. Skelettgehalt bestimmt aus grosser Probe.

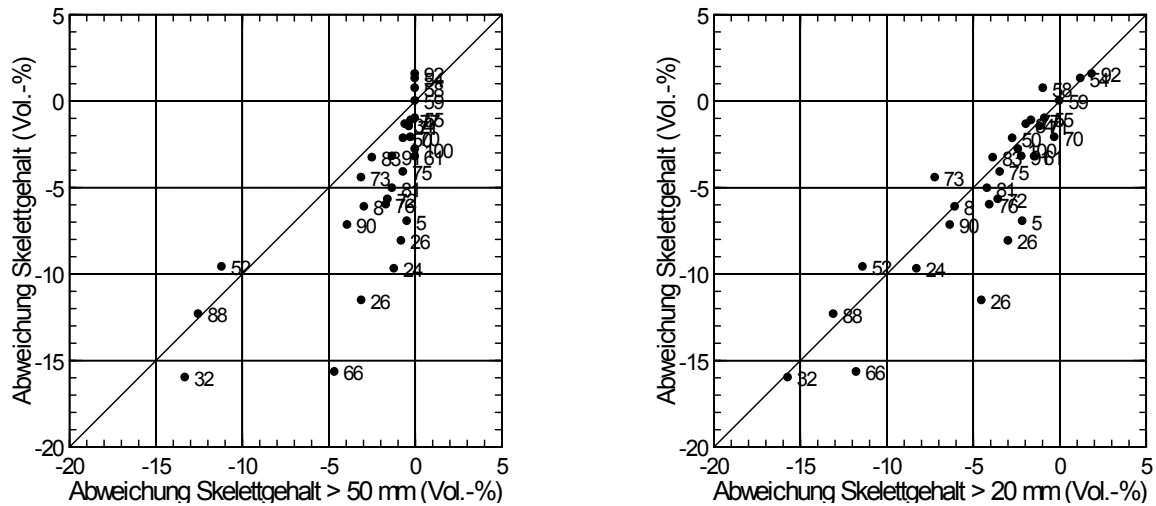


Abbildung 11: Abweichungen des Skelettgehaltes der RG-Proben im Vergleich zu grossen Volumenproben. Abweichungen des gesamten Skelettgehaltes (Fraktion > 2 mm) vs. Abweichungen der Fraktion > 50 mm (Steine; links) bzw. der Fraktion > 20 mm (Grobkies und Steine; rechts) für die untersuchten Standorte (Beschriftung: Standortnummer).

Auf die Bestimmung des WG_{FE} haben die oben beschriebenen Abweichungen des Skelettgehaltes keinen Einfluss. RG-Proben wie auch grosse Volumenproben liefern vergleichbare Werte, es sind keine systematischen Fehler erkennbar, insbesondere korrelieren die Abweichungen nicht mit dem Skelettgehalt (Abbildung 12). Für RG_{FE} liefern die RG-Proben insgesamt leicht tiefere Resultate ($\sim 0.05 \text{ g cm}^{-3}$), die Abweichungen sind bis 17 % Skelett unkorreliert mit dem Skelettgehalt, für höhere Skelettgehalte über 17 % jedoch deutlich grösser (Abbildung 13). Die Abweichungen bei der Bestimmung von LD_{FE} (Abbildung 14) und RG_{GP} (Abbildung 15) sind grösser als jene für RG_{FE} und korrelieren stärker mit dem Skelettgehalt.

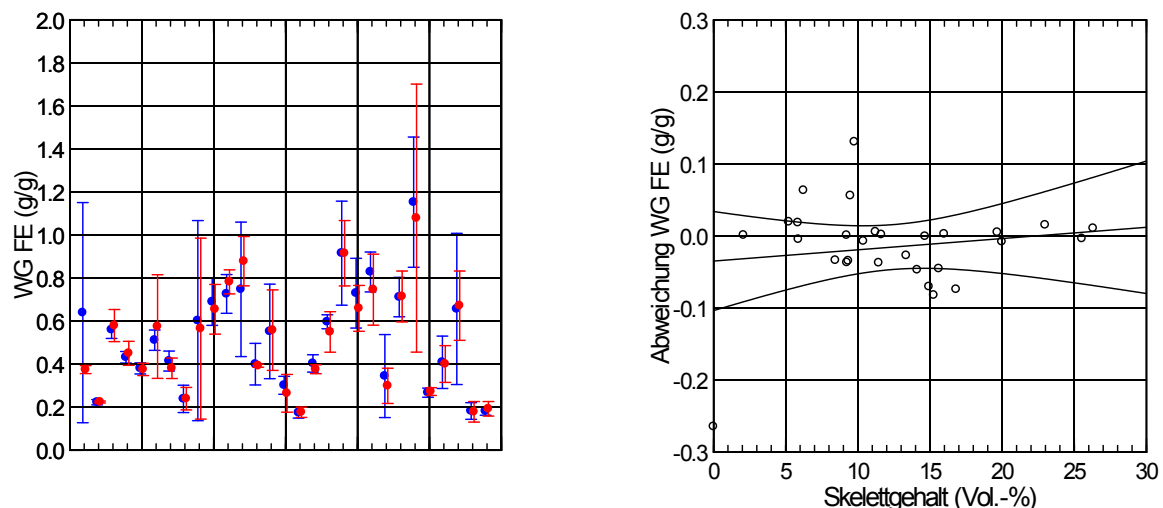


Abbildung 12: Auswirkungen der Probengrösse auf die Wassergehaltsbestimmung der Feinerde (WG_{FE}). Links: Mittelwert pro Standort mit 95 %-Vertrauensintervall ($N = 4$) für grosse Volumenproben (blau) vs. RG-Proben (Humax-Sonde; rot); x-Achse: Standorte in der Reihenfolge aufsteigender Skelettgehalte. Rechts: Differenz der Resultate beider Methoden (grosse Volumenprobe minus RG-Probe) vs. Skelettgehalt bestimmt aus grosser Probe.

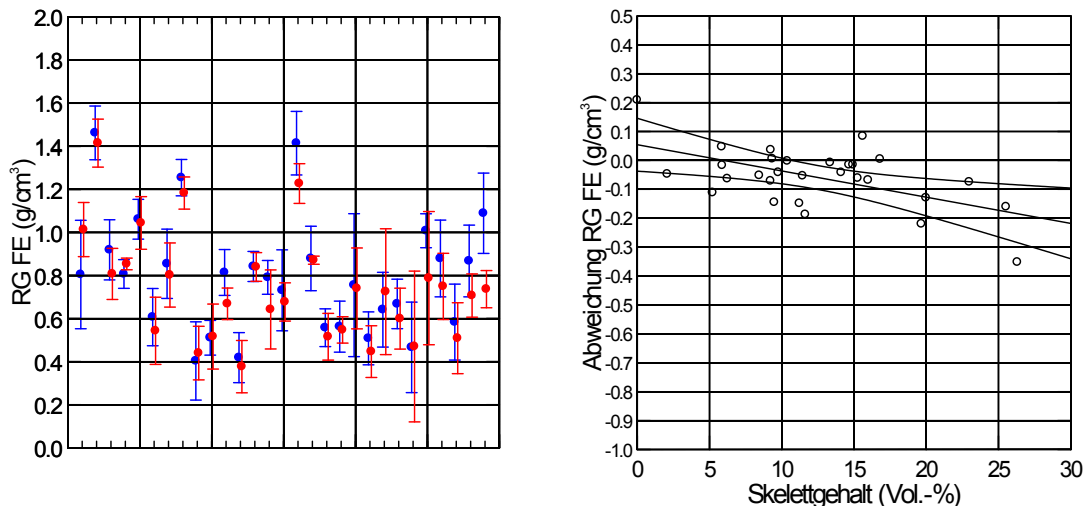


Abbildung 13: Auswirkungen der Probengröße auf die Raumgewichtsbestimmung der Feinerde (RG_{FE}). Links: Mittelwert pro Standort mit 95 %-Vertrauensintervall (N = 4) für grosse Volumenproben (blau) vs. RG-Proben (Humax-Sonde; rot; x-Achse: Standorte in der Reihenfolge aufsteigender Skelettgehalte. Rechts: Differenz der Resultate beider Methoden (grosse Volumenprobe minus RG-Probe) vs. Skelettgehalt bestimmt aus grosser Probe.

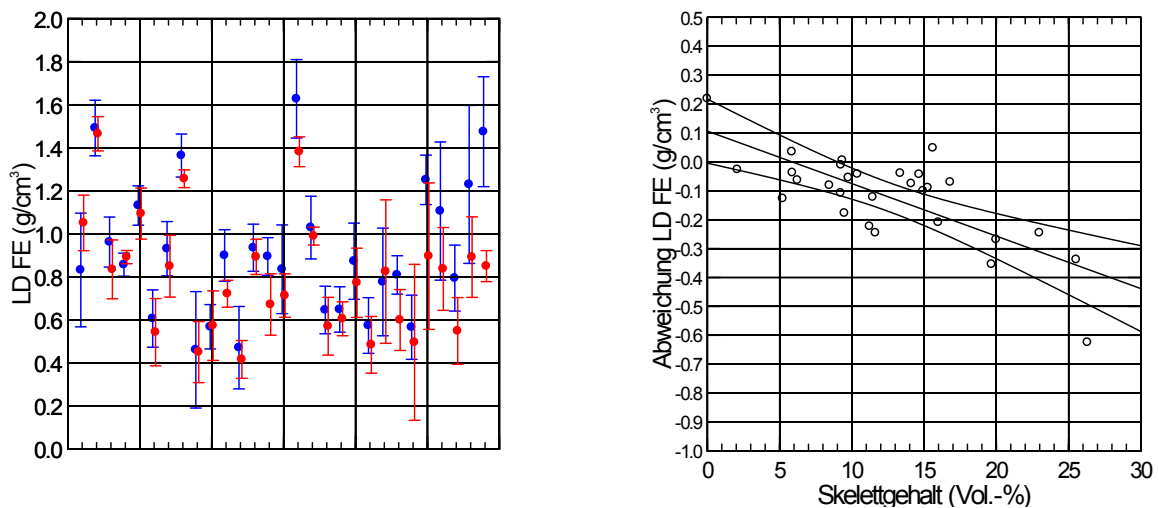


Abbildung 14: Auswirkungen der Probengröße auf die Lagerungsdichtebestimmung der Feinerde (LD_{FE}). Links: Mittelwert pro Standort mit 95 %-Vertrauensintervall (N = 4) für grosse Volumenproben (blau) vs. RG-Proben (Humax-Sonde; rot; x-Achse: Standorte in der Reihenfolge aufsteigender Skelettgehalte. Rechts: Differenz der Resultate beider Methoden (grosse Volumenprobe minus RG-Probe) vs. Skelettgehalt bestimmt aus grosser Probe.

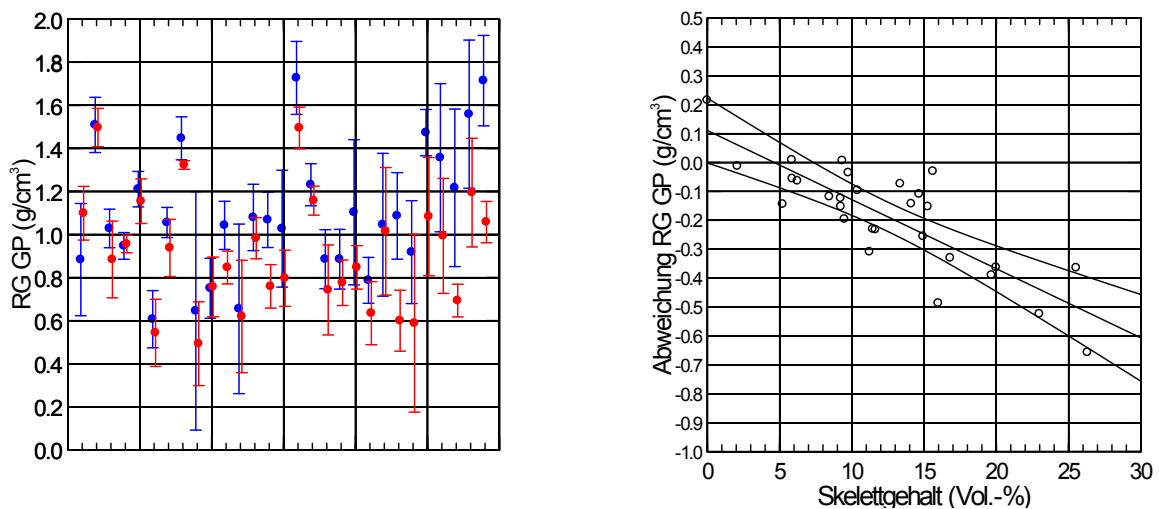


Abbildung 15: Auswirkungen der Probengröße auf die Raumgewichtsbestimmung der Gesamtprobe (RG_{GP}). Links: Mittelwert pro Standort mit 95 %-Vertrauensintervall (N = 4) für grosse Volumenproben (blau) vs. RG-Proben (Humax-Sonde; rot; x-Achse: Standorte in der Reihenfolge aufsteigender Skelettgehalte. Rechts: Differenz der Resultate beider Methoden (grosse Volumenprobe minus RG-Probe) vs. Skelettgehalt bestimmt aus grosser Probe.

Die Beobachtung, dass die Bestimmungen von WG_{FE} und RG_{FE} robuster sind gegenüber Fehlern bei der Skelettbestimmung als jene von LD_{FE} und RG_{GP} , lässt sich anhand des Schemas in Abbildung 16 erläutern: Bei einer grossen Volumenprobe wird das Skelett im Randbereich zur Probe geschlagen (dunkelgrau), wenn der Schwerpunkt innerhalb der Volumenprobe liegt. So wird der Skelettgehalt korrekt inklusive der Skelettfraktion > 5 cm erfasst. Bei der Beprobung mit Schlagsonden werden Steine (> 5 cm) nicht erfasst und das übrige Skelett im Randbereich der Probe beim Einschlagen entweder in die Probe oder aus der Probe gedrängt (rot). Durch die Steine, die aus der Probe verdrängt werden, werden sowohl M_{Skel} als auch V_{Skel} unterschätzt. Umgekehrt wird V_{FE} überschätzt (da $V_{FE} = V_{GP} - V_{Skel}$). Wird zusätzliches Skelett in die Probe gedrängt, werden M_{Skel} und V_{Skel} in Analogie zu oben überschätzt bzw. V_{FE} unterschätzt, allerdings haben die Resultate oben gezeigt, dass der erste Fall i. d. R. deutlich überwiegt. Die direkt aus der Probe bestimmte M_{FE} wird hingegen nicht verfälscht, es sei denn, ein Stein verschliesst die Sondenöffnung. Wie oben beobachtet, wird die Bestimmung von WG_{FE} durch das kleinere Probenvolumen nicht systematisch verfälscht, da die Ausgangsgrössen M_W und M_{FE} (vgl. Definitionen in Kap. 2.1) durch die zu geringen Skelettgehalte nicht beeinflusst werden. Abweichungen zwischen den beiden Beprobungsmethoden kommen zufällig aufgrund der Heterogenität des Bodens zustande. Für RG_{FE} gilt grundsätzlich dasselbe, allerdings scheint es, insbesondere bei hohen Skelettgehalten, zu einer Verdrängung von Feinerde durch Skelett (und somit zu tiefen RG_{FE}) zu kommen. Währendem das Bezugsvolumen bei RG_{FE} das beprobte Volumen (V_{GP}) ist und somit direkt aus den Dimensionen der Schlagsonde abgeleitet wird, bezieht sich LD_{FE} auf $V_{FE} = V_{GP} - V_{Skel}$. Zu tiefe Skelettgehalte induzieren daher zu hohe V_{FE} bzw. zu tiefe LD_{FE} . Ähnlich lassen sich zu tiefe Werte für RG_{GP} erklären: Hier wird das Bezugsvolumen V_{GP} zwar korrekt erfasst, aber die zu tiefen Skelettgehalte induzieren zu tiefe Werte für M_{GP} . Somit lassen sich die beobachteten Abweichungen zwischen Humax-Proben und grossen Volumenproben für alle Parameter plausibel erklären.

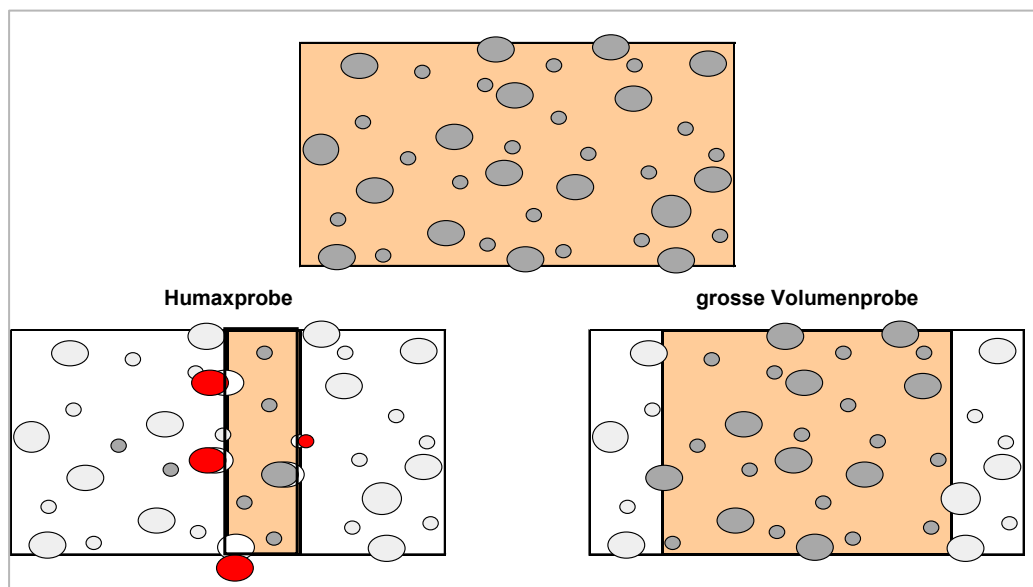


Abbildung 16: Schematische Darstellung der Beprobung eines skelettreichen Bodens. Das Skelett (grau) wird am Rand der Probe teilweise aus der Probe verdrängt (rot), die effektiv erfassten Skelettanteile (dunkelgrau) variieren je nach Probengrösse.

Fazit: Das relativ kleine Beprobungsvolumen der Humax-Sonde führt dazu, dass der Skelettgehalt (insbesondere der Fraktion > 2 cm) unterschätzt wird. Die Differenz nimmt proportional zum Skelettgehalt zu. Dies führt dazu, dass auch RG_{GP} und LD_{FE} unterschätzt werden. Um diese Grössen ohne systematischen Fehler zu bestimmen, sind grosse Volumenproben notwendig. Hingegen können RG_{FE} und WG_{FE} mit der Humax-Sonde zuverlässig bestimmt werden, deutliche Abweichungen werden nur für RG_{FE} bei Proben über 20 % Skelettgehalt beobachtet. Die Wiederholbarkeit der vier Replikate ist für alle Parameter bei beiden Methoden vergleichbar. Es ist daher anzunehmen, dass der systematische Fehler für wiederholte Messungen konstant bleibt.

4.2 Dichte der Skelett-Festschubstanz für die Volumenschätzung

Zur Bestimmung der LD_{FE} muss V_{Skel} bekannt sein, damit $V_{FE} = V_{GP} - V_{Skel}$ berechnet werden kann. Die Bestimmung von V_{Skel} durch Wasserverdrängung (vgl. Kap. 2.3.3) ist relativ aufwändig und bei geringen Skelettmengen zudem ungenau. Alternativ kann V_{Skel} aus M_{Skel} berechnet werden, sofern die Dichte des Gesteins (ρ_{Skel}) bekannt ist. RG-Proben sind aufgrund der kleinen Skelettmengen und entsprechend relativ grossen Messunsicherheiten ungeeignet für eine genaue Bestimmung. Deshalb wurde ρ_{Skel} für grosse Volumenproben ($N = 123$) von 29 NABO-Standorten berechnet (Abbildung 17). Die Werte variieren stark, das 1. Quartil liegt bei 2.24 g cm^{-3} , das 3. Quartil bei 2.62 g cm^{-3} . Der Mittelwert aller Werte beträgt 2.4 g cm^{-3} , der Median 2.47 g cm^{-3} . Es kann kein eindeutiger Zusammenhang zwischen ρ_{Skel} und vorliegenden Gesteinsart aufgezeigt werden. Für vier Gesteinsarten (1, 5, 6, 7) stammen die Resultate von nur je vier Proben eines einzelnen Standortes, die teils deutlichen Abweichungen dieser Mittelwerte vom Gesamtkollektiv sind daher nicht aussagekräftig. Die hier verwendeten Gesteinsarten sind jeweils die hauptsächlich vorkommenden, allerdings ist die Skelettfraction der meisten Standorte eine Mischung mehrerer Gesteine. Um die effektive ρ_{Skel} eines Standortes zu kennen, muss diese folglich gemessen werden, eine Abschätzung aufgrund des Gesteins ist schwierig.

Unter gewissen Umständen kann in der Praxis dennoch ein Schätzwert für ρ_{Skel} verwendet werden, beispielsweise der oben bestimmte Mittelwert von 2.4 g cm^{-3} . So kann der Aufwand für die Volumenbestimmung des Skelettes vermieden werden auf Kosten eines systematischen Fehlers für V_{Skel} und somit für LD_{FE} . (Die Bestimmung von RG_{FE} und RG_{GP} ist davon nicht betroffen.) Besteht das Ziel darin, zeitliche Veränderungen an fixen Standorten zu untersuchen, so ist dies auch mit geschätzter ρ_{Skel} möglich, da der systematische Fehler innerhalb eines Standortes konstant bleibt.

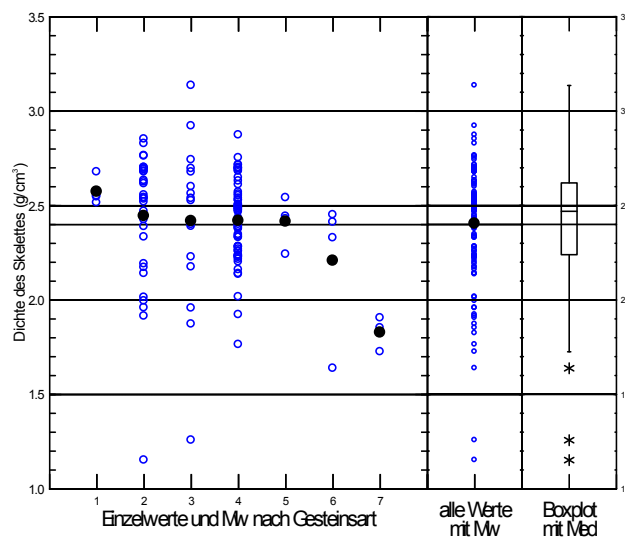


Abbildung 17: Spezifische Dichte (ρ_{Skel}) des Bodenskeletts für grosse Bodenproben von 29 NABO-Standorten gruppiert nach Hauptgesteinsart (1: Tonschiefer; 2: Kalkgestein; 3: Kristallin sauer; 4: Lockergestein gemischt; 5: Sandstein; 6: Kristallin basisch; 7: Mergelschiefer). Blau: Einzelwerte; schwarz: Mittelwert.

Fazit: Das Skelettvolumen V_{Skel} kann via Division der Skelettmasse M_{Skel} durch die angenommene Dichte der Skelettfraction ($\rho_{Skel} = 2.4 \text{ g cm}^{-3}$) geschätzt werden. Dadurch kann der Zeitaufwand für die Volumenbestimmung des Skelettes eingespart werden. Diese ist für die RG-Proben aufgrund der relativ geringen Skelettmengen per se schwierig und fehleranfällig.

4.3 Einfluss organischer Bestandteile

Die Bestimmung von M_{FE} ist zentral für die Berechnung des RG_{FE} (vgl. Kap. 2.1), wobei M_{FE} als Differenz aus M_{GP} und M_{Skel} definiert ist. Neben dem Skelett befinden sich oft auch Pflanzenteile wie Wurzeln, Holzstücke oder Nadeln in der Probe. Da diese Bestandteile nicht zur Feinerde gehören, stellte sich die Frage nach dem Einfluss dieser Komponenten auf die Resultate für RG_{FE} , insbesondere ob diese für die Berechnung von M_{FE} berücksichtigt werden müssen.

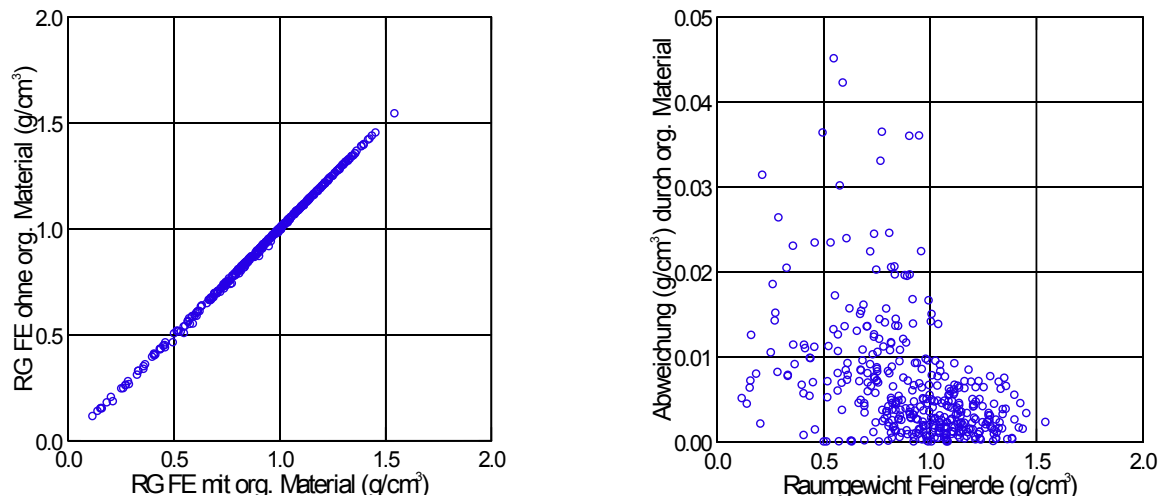


Abbildung 18: Raumgewicht Feinerde mit versus ohne Berücksichtigung der organischen Bestandteile (links) bzw. Abweichung des Raumgewichts Feinerde durch Abzug der organischen Bestandteile (rechts). $N = 384$ Proben von 61 NABO- Standorten.

Für insgesamt 384 RG-Proben von 61 NABO-Standorten wurde neben dem Skelett auch die Masse der organischen Bestandteile (M_{org}) bestimmt. Somit konnte RG_{FE} sowohl mit als auch ohne Berücksichtigung der organischen Bestandteile bestimmt werden (Abbildung 18). Im ersten Fall gilt $M_{FE} = M_{GP} - M_{Skel}$, im zweiten Fall $M_{FE} = M_{GP} - M_{Skel} - M_{org}$. Der Fehler durch die Vernachlässigung von M_{org} ist relativ gering, er liegt zumeist unter 0.02 g cm^{-3} , nur wenige Proben weisen grössere Abweichungen bis maximal 0.05 g cm^{-3} auf. Die relative Veränderung des RG_{FE} beträgt nur für wenige Proben mit tiefen RG_{FE} mehr als 5%. In der Praxis kann somit auf die Bestimmung der organischen Bestandteile verzichtet werden. Bei Monitoring-Programmen ist darauf zu achten, dass dies stets gleich gehandhabt wird.

Fazit: Zur Bestimmung von RG_{FE} kann die Masse von organischen Bestandteilen vernachlässigt werden, da deren Anteil an der gesamten Probe gering und der daraus resultierende Fehler in der Regel kleiner als 0.02 g cm^{-3} ist.

4.4 Vergleichbarkeit verschiedener Beprobungsarten für Horizontproben

Seit 2010 entnimmt die NABO volumetrische Horizontproben bis in eine Tiefe von 100 cm. Damit werden zeitliche Veränderungen der Gehalte im Unterboden sowie profilumfassend die Stoffmengen (Vorräte) erfasst. Pro Beprobung werden jeweils vier Bohrkern entnommen, die in pedologische Horizonte aufgeteilt und anschliessend horizontweise aggregiert werden. Zur Entnahme der Bohrkern kamen zwei verschiedene Methoden zum Einsatz: Schlagsonden und Bohrsonden. Um deren Vergleichbarkeit zu beurteilen, wurden Resultate der beiden Methoden gegenübergestellt (Abbildung 19). Die Messungen stammen jeweils vom selben Standort, jedoch von verschiedenen Zeitpunkten (Bohrsonde: 6. Erhebung 2010-14; Schlagsonde: 7. Erhebung 2015ff).

Die gezeigten Beispiele zeigen, dass Horizontgrenzen bei den einzelnen Erhebungen teilweise unterschiedlich beurteilt werden (abweichende Tiefe, zusätzliche Horizonte). Die bestimmten RG_{FE} weichen für einige Horizonte ab. Die Unterschiede sind durch die natürliche Heterogenität des Bodens, aber auch durch die abweichenden Horizontgrenzen verursacht, da die Werte jeweils den Mittelwert für die definierten Horizonte widerspiegeln. Betrachtet man jedoch profilumfassende Gehalte, sprich M_{FE} aufsummiert über die Tiefe, so gleichen sich die Unterschiede aus (vgl. Standorte 4 und 15). Für einige Standorte (z. B. Standort 9 in Abbildung 19) resultierten mit der Bohrsonde systematisch höhere RG_{FE} und somit höhere Summen für M_{FE} . Es ist nicht plausibel, dass sich die Werte über den betrachteten Zeitraum von fünf Jahren effektiv für das gesamte Profil so deutlich verändert haben; zudem resultierten für diesen Standort mit der Bohrsonde unrealistisch hohe RG_{FE} . Erklären lässt sich diese Beobachtung damit, dass die (abgeflachte) Bohrkronen je nach Bodenart und Bodenzustand zusätzliches Material in die Probe drückt, insbesondere für dicht gelagerte Böden. Das beprobte Bodenvolumen entspricht dann nicht mehr einem Zylinder, dessen Durchmesser dem Innenradius entspricht, sondern ist grösser. Der so entstandene systematische Fehler kann ausgeglichen werden, indem der effektiv beprobte Querschnitt geschätzt und für die Berechnungen verwendet wird. Der effektiv beprobte Querschnitt ist standortspezifisch und kann nur empirisch abgeleitet werden, zudem dürfte er zeitlich variieren. Aufgrund dieser Beobachtungen setzt die NABO ab der 7. Erhebung ausschliesslich die Schlagsonde ein, die ein klar definiertes Beprobungsvolumen hat. Die gezeigten Beispiele illustrieren allerdings auch einen Vorteil der Bohrsonde: sie erlaubt generell grössere Beprobungstiefen im Vergleich zur Schlagsonde.

Fazit: Die Bohrsonde erlaubt zwar generell grössere Beprobungstiefen als die Schlagsonde, allerdings ist das beprobte Volumen nicht genau definiert. Folglich ist die Schlagsonde vorzuziehen, sofern die korrekte Erfassung des Volumens wichtig ist. Die Horizontproben können für unterschiedliche Beprobungen unterschiedliche RG_{FE} aufweisen, insbesondere wenn Horizontgrenzen unterschiedlich definiert werden. Werden die Gehalte profilumfassend beurteilt, so gleichen sich diese Unterschiede aus.

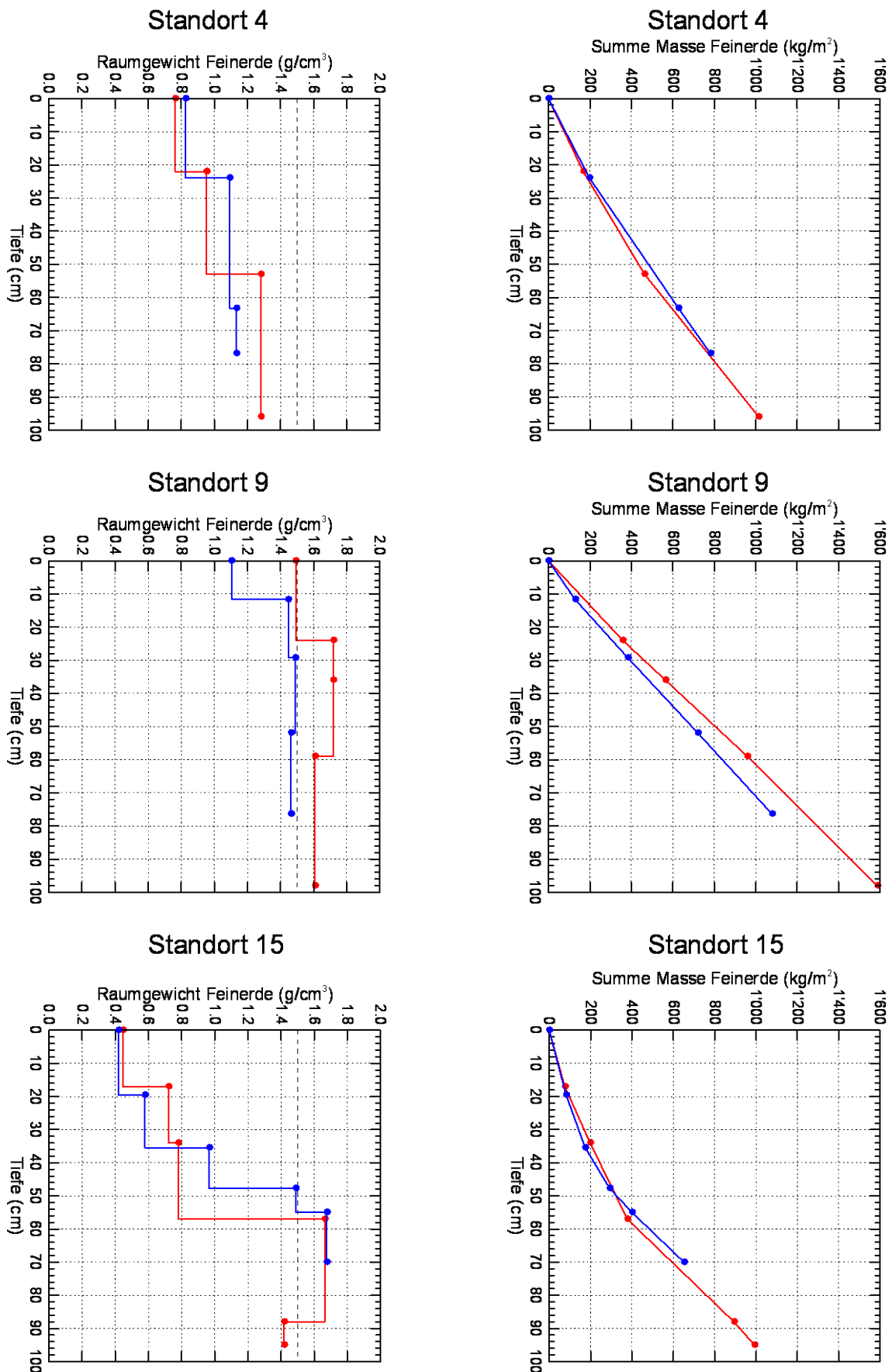


Abbildung 19: Vergleich der Horizontproben entnommen mit Bohrsonde (rot; 6. Erhebung 2010-14) vs. entnommen mit Schlagsonde (blau; 7. Erhebung 2015ff) für drei NABO-Standorte. Dargestellt sind RG_{FE} pro Horizont (links) sowie M_{FE} aufsummiert ab Bodenoberfläche (jeweils Mittelwert aus vier Bohrkernen). Die Punkte markieren die Tiefe der Horizontgrenzen, die anhand der Bohrkern abgeleitet wurden.

4.5 Vergleichbarkeit RG-Proben vs. Horizontproben

Währendem die Humax-Proben 0-20 cm die physikalischen Parameter für die obersten 20 cm des Bodens liefern, erhält man bei einer profilumfassenden Beprobung mit der Schlagsonde dieselben Parameter horizontweise. Aus letzteren können jedoch die Bodeneigenschaften ebenso für die obersten 20 cm des Bodens abgeleitet werden. Um die beiden Herangehensweisen zu vergleichen, wurden für 31 NABO-Standorte (für 7 Standorte liegen Werte von je 2 Erhebungen vor) jeweils die Resultate der beiden Methoden gegenübergestellt (Abbildung 20f).

Pro Erhebung wurde für jede Horizontprobe (aggregiert aus vier Bohrkernen) ein Wert bestimmt. Die je vier RG-Proben pro Erhebung wurden separat gemessen, so dass der Mittelwert mit Vertrauensintervall ausgewiesen werden kann. Für einen Teil der Standorte (25, 46, 48, 54, 55, 68, 78, 86 und 95) entsprach der oberste Horizont der Bohrkern aus der Schlag- oder Bohrsonde ungefähr der Probentiefe von 0-20 cm. Die beprobte Tiefe war somit identisch zu jener der RG-Proben und die Resultate somit direkt vergleichbar. Für die übrigen Standorte mit abweichender Horizontierung wurden die Resultate der Horizontproben für 0-20 cm berechnet, indem die Horizonte proportional zur Mächtigkeit gewichtet wurden.

Für jene Standorte, wo der oberste Horizont ungefähr 0-20 cm betrug, stimmten die RG_{FE} der Schlag- und Bohrsonde mit jenen der RG-Proben überein (d. h. Wert der Horizontprobe lag innerhalb des Vertrauensintervalls der RG-Proben; Abbildung 20). Für die übrigen Standorte lieferten Schlag- und Bohrsonde teilweise deutlich tiefere RG_{FE} . Da diese Abweichungen auch bei den wiederholten Messungen fünf Jahre später reproduziert wurde (Standorte 4, 9, 11, 14, 15, 67), erscheint es uns plausibel, dass es sich um systematische Fehler durch die von 20 cm abweichenden Horizontgrenzen handelt. Hierbei gibt es zwei verschiedene Erklärungsansätze:

- i) Der erste Horizont ist deutlich mächtiger als 0-20 cm: Innerhalb des Oberbodens besteht ein Dichtegradient, wobei der Boden zuoberst am dichtesten ist (wurde nicht gemessen, ist allerdings an den Bodenprofilen sichtbar). Die Messung liefert jeweils das mittlere RG_{FE} über die ganze beprobte Tiefe. Bei der Umrechnung vom gesamten Oberbodenhorizont (> 20 cm) auf 0-20 cm wurde der Dichtegradient nicht berücksichtigt und das effektive RG_{FE} deshalb unterschätzt.
- ii) Der erste Horizont ist geringer als 20 cm: Mit den RG-Proben zusätzlich ein Teil eines zweiten, dichteren Horizontes erfasst. Der entsprechende Anteil des zweiten Horizontes wird bei den Horizontproben zwar angerechnet, allerdings besteht auch hier wiederum das Problem, das innerhalb der Horizonte Gradienten vorhanden sind.

Im Gegensatz zu RG_{FE} stimmten WG_{FE} aus Schlag- bzw. Bohrsonde und RG-Proben gut überein, Abweichungen wurden nur sehr vereinzelt beobachtet (Abbildung 22). Abweichungen lassen sich auch hier wiederum durch abweichende Horizontgrenzen und Gradienten innerhalb der Bodenhorizonte erklären.

Fazit: Entspricht der erste Horizont der Schlag- bzw. Bohrsonde der Beprobungstiefe der RG-Proben (in unserem Fall 0-20 cm), so liefern Horizontproben und RG-Proben vergleichbare RG_{FE} -Werte. Weicht die Horizontierung jedoch davon ab, so ist die Umrechnung auf eine andere, fixe Bodentiefe aufgrund der Gradienten innerhalb der Horizonte schwierig, sie liefert zumeist deutlich tiefere RG_{FE} im Vergleich zu den RG-Proben.

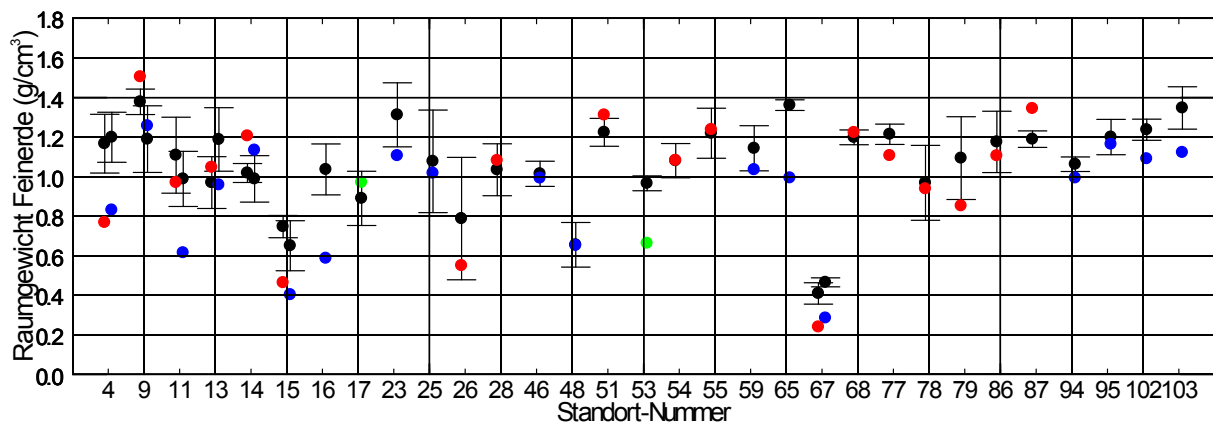


Abbildung 20: Raumgewicht Feinerde (RG_{FE}) 0-20 cm für 31 NABO-Standorte bestimmt mit Humax-Schlagsonde (schwarz; Mittelwert mit 95 %-Vertrauensintervall aus vier Einzelbestimmungen) sowie aus Horizontproben (1 Bestimmung aus vier aggregierten Proben) entnommen mit Bohrsonde (rot), Schlagsonde 75 cm (blau) und Split-Tube-Schlagsonde (grün).

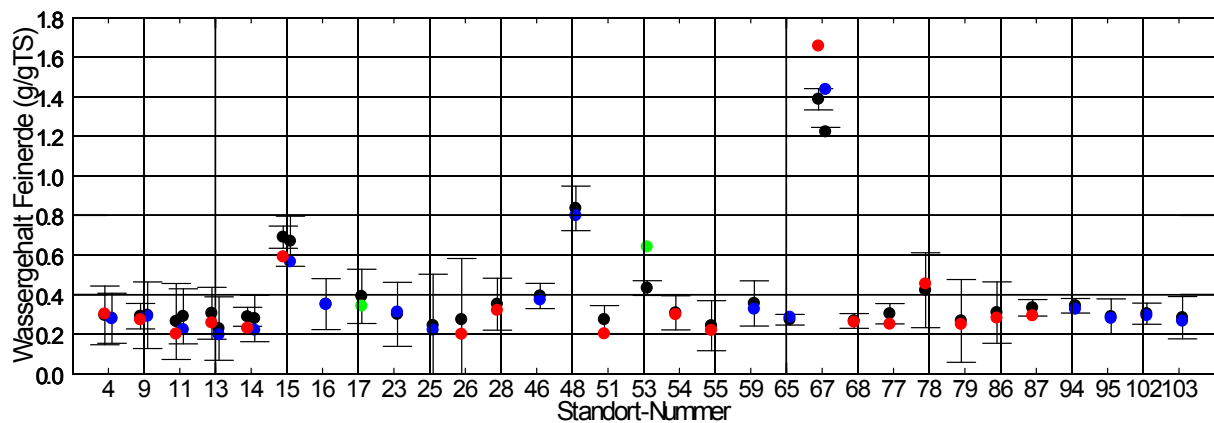


Abbildung 21: Gravimetrischer Wassergehalt der Feinerde (WG_{FE}) 0-20 cm für 31 NABO-Standorte bestimmt mit Humax-Schlagsonde (schwarz; Mittelwert mit 95 %-Vertrauensintervall aus vier Einzelbestimmungen) sowie aus Horizontproben (1 Bestimmung aus vier aggregierten Proben) entnommen mit Bohrsonde (rot), Schlagsonde 75 cm (blau) und Split-Tube-Schlagsonde (grün).

5 Schlussfolgerungen & Ausblick

5.1 Methodische Abklärungen

Die Abklärungen der NABO zeigten, dass volumetrische Proben von ca. 5 cm Durchmesser (beispielsweise aus Humax-Schlagsonden) geeignet sind, um WG_{FE} und RG_{FE} zuverlässig zu bestimmen. Beim Skeletthalt und als Folge davon bei RG_{GP} und LD_{FE} zeigen sie jedoch deutlich tiefere Werte im Vergleich zu grossen Volumenproben, die auch für skelettreiche Böden korrekte Werte liefern.

Für die profilumfassende Entnahme von Horizontproben hat sich die Humax-Schlagsonde als zuverlässiger erwiesen. Die Bohrsonde liefert teilweise höhere RG_{FE} im Vergleich zur Schlagsonde, weil das beprobte Volumen durch den abgeflachten Bohrkopf nicht exakt abgegrenzt ist. Dadurch wird zusätzliches Bodenmaterial in die Probe gedrückt, wobei die Menge je nach Bodenart und –zustand variiert. Die Resultate der Schlag- bzw. Bohrsonde sind mit jenen der RG-Proben vergleichbar, sofern die beprobte Tiefe übereinstimmt, d. h. der erste Horizont entspricht der Beprobungstiefe der RG-Proben (0-20 cm). Eine Umrechnung von RG_{FE} aus Horizontproben auf andere Bodentiefen liefert in der Regel fehlerhafte Werte.

Weiter wurde gezeigt, dass für die korrekte RG_{FE} -Bestimmung die organischen Bestandteile, wie Pflanzenwurzeln, vernachlässigt werden können. Ebenso kann auf die Volumenbestimmung beim Skelett verzichtet werden, indem stattdessen $V_{Skel} = M_{Skel} / \rho_{Skel}$ berechnet wird mit $\rho_{Skel} = 2.4 \text{ g cm}^{-3}$. Der dadurch verursachte systematische Fehler ist für die in diesem Bericht gezeigten Anwendungen verkraftbar, sofern er konstant bleibt.

5.2 Empfehlungen bezüglich physikalischer Begleitparameter

Bodenmonitoringprogramme sollen Veränderungen der Bodenqualität nicht nur a posteriori dokumentieren, sondern insbesondere schädliche Entwicklungen möglichst frühzeitig erkennen. Daher müssen zufällige und systematische Fehler entlang der gesamten Prozesskette möglichst vermieden bzw. minimiert werden. Ungenauigkeiten in der Analytik lassen sich durch Qualitätssicherungsmassnahme stark reduzieren. Weit weniger Aufmerksamkeit erhält in der Regel der Arbeitsschritt der Probenahme, obwohl dieser – gemäss unserer Erfahrung – die bedeutendere Fehlerquelle ist (Desaules et al. 2004). So zeigen auch die zeitlichen Verläufe einiger NABO-Standorte Artefakte, die höchstwahrscheinlich auf die Probenahme zurückgehen (Gubler et al. 2015, 2016; Meuli et al. 2014). Im Vordergrund stehen dabei nicht primär technische Fehler bei der Probenahme, diese lassen sich durch Standardarbeitsprotokolle u. ä. weitestgehend verhindern. Vielmehr beeinflusst der Zustand des Bodens zum Zeitpunkt der Probenahme die Zusammensetzung der resultierenden Proben.

Aus diesen Gründen empfiehlt die NABO allen Bodenmonitoringprogrammen, den Zustand des Bodens bei jeder Probenahme mithilfe der Parameter WG_{FE} und RG_{FE} zu erfassen. Für volumetrische Proben, wie die Horizontproben aus Schlagsonden, können diese Begleitgrössen direkt bestimmt werden, sprich an derselben Probe. Für Flächenmischproben, wie sie die NABO standardmässig für 0-20 cm entnimmt, sind zusätzliche Volumenproben notwendig. Dazu hat sich die Entnahme von vier Proben an der Rändern der Beprobungsfläche (je eine Probe pro Seite) mit der Humax-Handsonde (\varnothing 48 mm) bewährt.

5.3 Profilumfassende Horizontproben

Die profilumfassende Beprobung mit Schlag- oder Bohrsonden eröffnen neue Möglichkeiten im Vergleich zu den bewährten Flächenmischproben 0-20 cm. Als erstes erlauben sie, Horizonte unterhalb 20 cm zu analysieren, was zur Beurteilung der zeitlichen Entwicklung in den obersten 20 cm sehr wertvoll ist. Die Horizontproben widerspiegeln stets den Mittelwert des gesamten jeweiligen Horizontes, dies ist ein Vorteil im Vergleich zu Proben aus einer Profilwand, welche nur einen Ausschnitt repräsentieren. Daher erlauben erstere die Berechnung von Vorräten über das ganze Bodenprofil, ebenso kann deren Veränderung über die Zeit untersucht werden. Durch eine mehrfache Beprobung zu einem bestimmten Zeitpunkt, z. B. bei der ersten Erhebung eines neuen Standortes, kann die Heterogenität des Standortes abgeschätzt und die Unsicherheit der Vorratsschätzung beziffert werden (vgl. Abbildung 22 für zwei Beispiele).

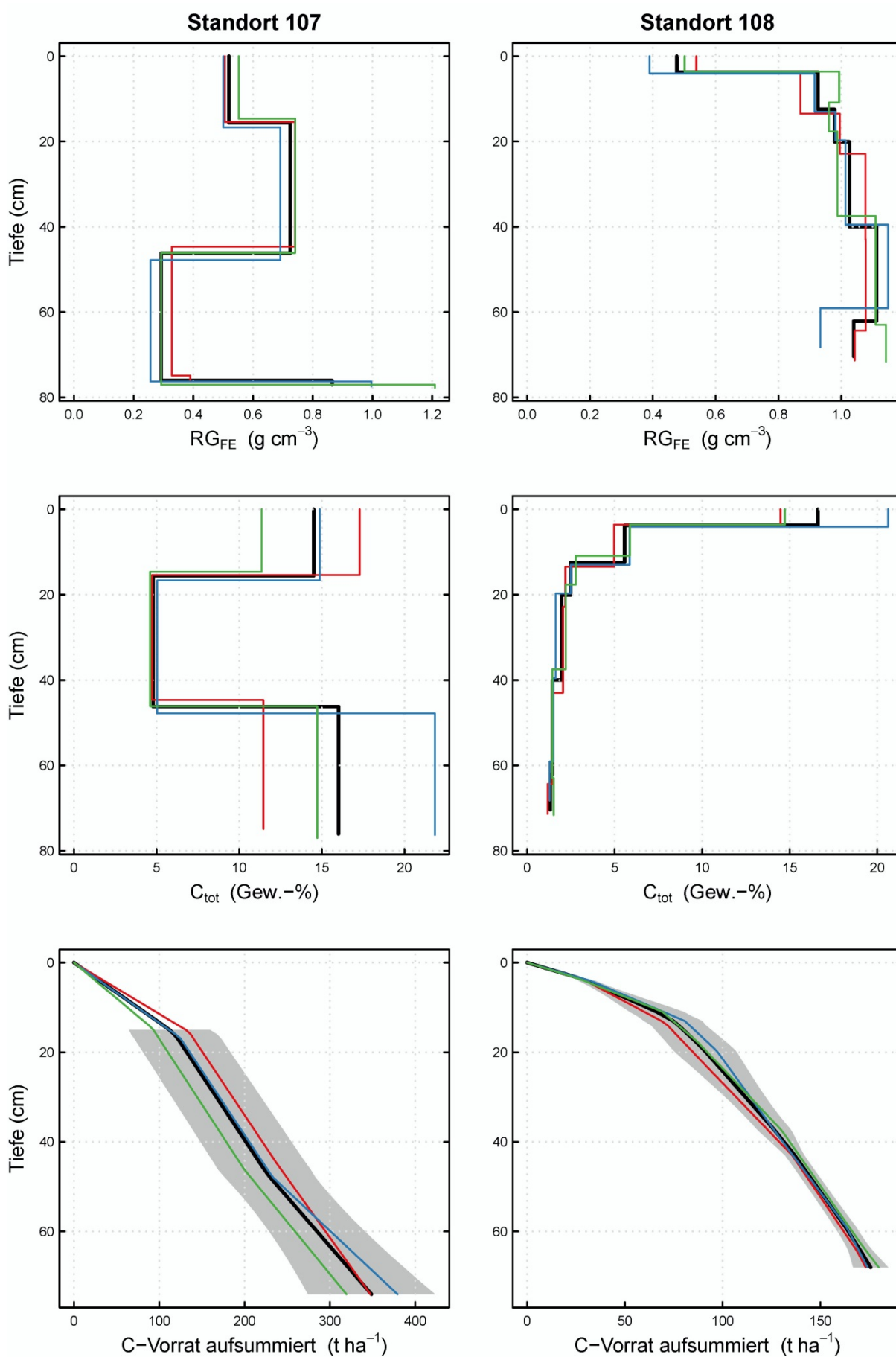


Abbildung 22: Dreifache Beprobung zweier NABO-Standorte mit Humax-Schlagsonde (je 3 x 4 Bohrkern, jeweils zeitgleich entnommen). Oben: RG_{FE} ($g\ cm^{-3}$) nach Horizont, jeweils Einzelwerte der drei Beprobungen (bunte Linien) mit Mittelwert (schwarze Linie). Mitte: Kohlenstoff total (C_{tot} , Gew.-%) nach Horizont, analog. Unten: Kohlenstoffvorrat ($t\ ha^{-1}$) aufsummiert über Tiefe mit 95%-Konfidenzintervall (graue Fläche) für Mittelwert.

5.4 Ausblick und weiterführende Analysen

Die NABO ist der Überzeugung, dass die vorgestellten Methoden ein pragmatischer und effizienter Weg ist, um physikalische Begleitparameter für die Probenahme zu erfassen. Allerdings muss aufgrund der bisher und zukünftig erhobenen Daten noch der definitive Beweis erbracht werden, dass dies in der Praxis tatsächlich funktioniert, sprich ob aufgrund der physikalischen Begleitparameter abweichende Probenahmen zuverlässig identifiziert werden. Weiter soll geprüft werden, ob WG_{FE} und RG_{FE} der einzelnen Erhebungen pro Standort aufgrund von Wettermodellen allein oder in Kombination mit Prozessmodellierungstools geschätzt werden kann. Falls dies gelingt, so könnten die physikalischen Begleitparameter auch für vergangene Beprobungen ohne direkte Messwerte geschätzt werden. Schliesslich soll auch evaluiert werden, ob aufgrund der gemessenen RG_{FE} zusammen mit den Informationen aus den Horizontproben abweichende Bedingungen bei der Probenahme rechnerisch kompensiert werden können.

6 Verzeichnisse

6.1 Literaturverzeichnis

- Buchter B, Hinz C, Flühler H (1993): Sample size for determination of coarse fragment content in a stony soil. *Geoderma* 63, 265-275.
- Desaules A, Dahinden R (2000): Nationales Boden-Beobachtungsnetz. Veränderungen von Schadstoffgehalten nach 5 und 10 Jahren. *Schriftenreihe Umwelt* Nr. 320, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern.
- Desaules A, Keller A, Schwab P, Dahinden R (2004) Projekt Varitemp: Analysen von Zeitreihen und Ursachen gemessener Konzentrationsveränderungen von Schwermetallen und Phosphor in Böden auf Dauerbeobachtungsflächen. Agroscope FAL Reckenholz, Zürich.
- Desaules A, Studer K (1993) NABO – Nationales Bodenbeobachtungsnetz. Messresultate 1985–1991. *Schriftenreihe Umwelt* Nr. 200. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern.
- Ellert B H, Bettany J R (1995), Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. *Can. J. Soil Sci.*, 75, 529–538.
- Grossman R B, Reinsch T G (2002) Bulk density and linear extensibility. In: Dane J H, Clarke Topp G (Eds) (2002) *Methods of Soil Analysis Part 4 Physical Methods*. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, USA.
- Gubler A, Schwab P, Wächter D, Meuli R G, Keller A (2015) Ergebnisse der Nationalen Bodenbeobachtung (NABO) 1985-2009. *Umwelt-Zustand* Nr. 1507, Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern.
- Gubler A, Schwab P, Wächter D, Meuli R G, Keller A (2016) Influence of soil water status on collected soil samples. *Agroscope Science* No. 34. Agroscope/NABO, Zürich.
- Hillel D (2003) *Introduction to Environmental Soil Physics*. Academic Press, Burlington.
- Meuli R G, Schwab P, Wächter D, Ammann S (2014) Ergebnisse der Nationalen Bodenbeobachtung (NABO). Zustand und Entwicklung 1985–2004. *Umwelt-Wissen* Nr. 1409. Bundesamt für Umwelt, Bern.

6.2 Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 1: Definition der Massen und Volumina der Bodenphasen bzw. -proben (überarbeitet aus Hillel 2003). 8
- Abbildung 2: Entnahme von Volumenproben mit der Humax-Handsonde (links; RG-Proben, Methode a), mit dem Stechrahmen (Mitte; grosse Volumenproben, Methode c) und mit Stechzylindern (rechts; Methode h). 11
- Abbildung 3: Protokollierung der Anordnung von Raumgewichtsproben A - E in Bezug zum Einmesspunkt (Protokoll Probenplan). Die Probe E wurde nur bis 2007 entnommen. 11
- Abbildung 4: Entnahme volumetrischer Horizontproben mit der Humax-Bohrsonde (oben links; Methode f) bzw. der Humax-Schlagsonde (oben rechts; Methode g). Tiefenmessung am Bohrloch nach jeder Bohr-Etappe (unten links), Aneinanderreihung der entnommenen Bohrkerne der einzelnen Etappen pro Bohrung (unten Mitte) und Bodenansprache mit Bestimmung und Vermessung der Horizontgrenzen (unten rechts). 13
- Abbildung 5: Bestimmung des Skelettvolumens durch Wasserverdrängung (geeignet vor allem bei grossen Volumenproben): (1) Eimer bis zum Überlauf füllen. Hahn schliessen. (2) Skelett einfüllen. (3) Hahn öffnen und Wasservolumen aus Überlauf volumetrisch oder gravimetrisch (unter Berücksichtigung der temperaturabhängigen Dichte von Wasser) bestimmen. 14
- Abbildung 6: Probenahme mit Humax-Schlagsonde 0-20 cm auf einer geneigten Fläche: Sonde lotrecht einschlagen bis zum Erreichen der mittleren Probtiefe von 20 cm (links), Entnahme der Probe und Nachmessen des Bohrloches (mitte), Probe beschriften und in gut verschlossenem Plastiksack gekühlt transportieren und lagern (rechts). 16
- Abbildung 7: Entnahme einer grossen Volumenprobe mit Handschäufeln aus einer Grube (Methode g) mit anschliessender Volumenbestimmung durch Auffüllen der Grube mit abgemessenem Sand (rechts)... 17
- Abbildung 8: ...Profilumfassende Entnahme volumetrischer Proben, Erfassung der Bohrtiefen der einzelnen Bohr-Etappen (links) sowie Bestimmung und Erfassung der Horizontgrenzen (rechts). 18
- Abbildung 9: Entnahme von Stechzylinderproben in ausgewählten Tiefen (Bodenhorizonten). 19
- Abbildung 10: Auswirkungen der Probengrösse auf die Skelettgehaltbestimmung. Links: Mittelwert pro Standort mit 95 %-Vertrauensintervall (N = 4) für grosse Volumenproben (blau) vs. RG-Proben (Humax-

Sonde; rot; x-Achse: Standorte in der Reihenfolge aufsteigender Skelettgehalte. Rechts: Differenz der Resultate beider Methoden (grosse Volumenprobe minus RG-Probe) vs. Skelettgehalt bestimmt aus grosser Probe.	20
Abbildung 11: Abweichungen des Skelettgehaltes der RG-Proben im Vergleich zu grossen Volumenproben. Abweichungen des gesamten Skelettgehaltes (Fraktion > 2 mm) vs. Abweichungen der Fraktion > 50 mm (Steine; links) bzw. der Fraktion > 20 mm (Grobkies und Steine; rechts) für die untersuchten Standorte (Beschriftung: Standortnummer).....	21
Abbildung 12: Auswirkungen der Probengrösse auf die Wassergehaltsbestimmung der Feinerde (WG _{FE}). Links: Mittelwert pro Standort mit 95 %-Vertrauensintervall (N = 4) für grosse Volumenproben (blau) vs. RG-Proben (Humax-Sonde; rot; x-Achse: Standorte in der Reihenfolge aufsteigender Skelettgehalte. Rechts: Differenz der Resultate beider Methoden (grosse Volumenprobe minus RG-Probe) vs. Skelettgehalt bestimmt aus grosser Probe.....	21
Abbildung 13: Auswirkungen der Probengrösse auf die Raumgewichtsbestimmung der Feinerde (RG _{FE}). Links: Mittelwert pro Standort mit 95 %-Vertrauensintervall (N = 4) für grosse Volumenproben (blau) vs. RG-Proben (Humax-Sonde; rot; x-Achse: Standorte in der Reihenfolge aufsteigender Skelettgehalte. Rechts: Differenz der Resultate beider Methoden (grosse Volumenprobe minus RG-Probe) vs. Skelettgehalt bestimmt aus grosser Probe.....	22
Abbildung 14: Auswirkungen der Probengrösse auf die Lagerungsdichtebestimmung der Feinerde (LD _{FE}). Links: Mittelwert pro Standort mit 95 %-Vertrauensintervall (N = 4) für grosse Volumenproben (blau) vs. RG-Proben (Humax-Sonde; rot; x-Achse: Standorte in der Reihenfolge aufsteigender Skelettgehalte. Rechts: Differenz der Resultate beider Methoden (grosse Volumenprobe minus RG-Probe) vs. Skelettgehalt bestimmt aus grosser Probe.....	22
Abbildung 15: Auswirkungen der Probengrösse auf die Raumgewichtsbestimmung der Gesamtprobe (RG _{GP}). Links: Mittelwert pro Standort mit 95 %-Vertrauensintervall (N = 4) für grosse Volumenproben (blau) vs. RG-Proben (Humax-Sonde; rot; x-Achse: Standorte in der Reihenfolge aufsteigender Skelettgehalte. Rechts: Differenz der Resultate beider Methoden (grosse Volumenprobe minus RG-Probe) vs. Skelettgehalt bestimmt aus grosser Probe.....	22
Abbildung 16: Schematische Darstellung der Beprobung eines skelettreichen Bodens. Das Skelett (grau) wird am Rand der Probe teilweise aus der Probe verdrängt (rot), die effektiv erfassten Skelettanteile (dunkelgrau) variieren je nach Probengrösse.	23
Abbildung 17: Spezifische Dichte (ρ_{Skel}) des Bodenskeletts für grosse Bodenproben von 29 NABO-Standorten gruppiert nach Hauptgesteinsart (1: Tonschiefer; 2: Kalkgestein; 3: Kristallin sauer; 4: Lockergestein gemischt; 5: Sandstein; 6: Kristallin basisch; 7: Mergelschiefer). Blau: Einzelwerte; schwarz: Mittelwert.	24
Abbildung 18: Raumgewicht Feinerde mit versus ohne Berücksichtigung der organischen Bestandteile (links) bzw. Abweichung des Raumgewichts Feinerde durch Abzug der organischen Bestandteile (rechts). N = 384 Proben von 61 NABO- Standorten.	25
Abbildung 19: Vergleich der Horizontproben entnommen mit Bohrsonde (rot; 6. Erhebung 2010-14) vs. entnommen mit Schlagsonde (blau; 7. Erhebung 2015ff) für drei NABO-Standorte. Dargestellt sind RG _{FE} pro Horizont (links) sowie M _{FE} aufsummiert ab Bodenoberfläche (jeweils Mittelwert aus vier Bohrkernen). Die Punkte markieren die Tiefe der Horizontgrenzen, die anhand der Bohrkern abgeleitet wurden.....	27
Abbildung 20: Raumgewicht Feinerde (RG _{FE}) 0-20 cm für 31 NABO-Standorte bestimmt mit Humax-Schlagsonde (schwarz; Mittelwert mit 95 %-Vertrauensintervall aus vier Einzelbestimmungen) sowie aus Horizontproben (1 Bestimmung aus vier aggregierten Proben) entnommen mit Bohrsonde (rot), Schlagsonde 75 cm (blau) und Split-Tube-Schlagsonde (grün).	29
Abbildung 21: Gravimetrischer Wassergehalt der Feinerde (WG _{FE}) 0-20 cm für 31 NABO-Standorte bestimmt mit Humax-Schlagsonde (schwarz; Mittelwert mit 95 %-Vertrauensintervall aus vier Einzelbestimmungen) sowie aus Horizontproben (1 Bestimmung aus vier aggregierten Proben) entnommen mit Bohrsonde (rot), Schlagsonde 75 cm (blau) und Split-Tube-Schlagsonde (grün).	29
Abbildung 22: Dreifache Beprobung zweier NABO-Standorte mit Humax-Schlagsonde (je 3 x 4 Bohrkern, jeweils zeitgleich entnommen). Oben: RG _{FE} (g cm ⁻³) nach Horizont, jeweils Einzelwerte der drei Beprobungen (bunte Linien) mit Mittelwert (schwarze Linie). Mitte: Kohlenstoff total (C _{tot} , Gew.-%) nach Horizont, analog. Unten: Kohlenstoffvorrat (t ha ⁻¹) aufsummiert über Tiefe mit 95 %-Konfidenzintervall (graue Fläche) für Mittelwert.	31

6.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Abkürzungen und Definitionen der Massen und Volumina verschiedener Phasen des Bodens bzw. der Bodenproben.	8
Tabelle 2: Übersicht der Methoden zur Entnahme volumetrischer Proben.....	10
Tabelle 3: Materialliste zur Entnahme volumetrischer Bodenproben.....	15