

Evaluierung von Verfahren zur Erfassung des
Grobbodenanteils von Waldböden
Erarbeitung von Empfehlungen für die
Anwendung dieser Verfahren im Rahmen der
Bodenzustandserhebung im Wald

- Endbericht -



31. Mai 2006

Titel der Studie: Evaluierung von Verfahren zur Erfassung des Grobbodenanteils von Waldböden - Erarbeitung von Empfehlungen für die Anwendung dieser Verfahren im Rahmen der Bodenzustandserhebung im Wald -

Auftraggeber: Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV)

Ansprechpartner: Herr Hans-Albert Volz (BMELV)
Frau Dr. Nicole Wellbrock (BFH Eberswalde)

Auftragnehmer: Wald+Boden Umweltconsult GmbH
Ahornstr. 1
D-16259 Falkenberg / OT Gersdorf
Inhaber: Prof. Dr. Winfried Riek
Prof. Dr. Barbara Wolff

Bearbeiter: Prof. Dr. Winfried Riek
Prof. Dr. Barbara Wolff
Forstass. Wolfgang Hölzer
Forst.-Ing. (FH) Roberto Drexler
Dipl.-Ing. (FH) Marieanna Holzhausen

Gliederung

	Seite
1 Einführung	4
1.1 Problemstellung	4
1.2 Sachstand	4
1.3 Aufgabenstellung	5
2 Definitionen	6
3 Methoden	7
3.1 Auswahl der Untersuchungspunkte	7
3.2 Gelände- und Laborverfahren	8
3.3 Referenzwerte für Feinbodendichte und Skelettanteil	9
3.3.1 Vorgehen im Gelände	9
3.3.2 Volumenbestimmung mit der „Bällchenmethode“	10
3.4 Skelettschätzung am Profil	13
3.4.1 Schätzung des flächenbezogenen Skelettanteils	13
3.4.2 Ansatz für die Ableitung des volumenbezogenen Skelettanteils	15
4 Ergebnisse	17
4.1 Erfahrungen mit den Probenahmegeräten	17
4.1.1 Rammkernsonde	17
4.1.2 AMS-Core-Sampler mit Liner	18
4.1.3 Murachscher Wurzelbohrer	18
4.1.4 Zusammenfassende Bewertung	20
4.2 Vergleich der Verfahren volumengerechter Beprobung	21
4.2.1 Vergleich stratifiziert nach Substratgruppen	21
4.2.2 Vergleich innerstandörtlicher und methodischer Variabilität	23
4.2.3 Vergleich mit Stechzylinderbeprobung und Volumenersatzmethode	28
4.2.4 Erfassung der einzelnen Grobbodenfraktionen	32
4.2.5 Eignung der Verfahren für den Unterboden	33
4.3 „Kombiniertes Verfahren“ (Volumenprobe, Schippe/Spaten, Profilwand)	34
4.3.1 Ergebnisse der volumenbezogenen Probennahme	34
4.3.2 Ergebnisse der nicht volumengerechten Probennahme	36
4.3.3 Ergebnisse der Schätzung am Bodenprofil	37
4.3.4 Ermittlung von Grobbodenvolumen und Feinbodenvorrat	38
4.3.5 Vergleich mit den Referenzwerten der „Bällchenmethode“	40
4.4 Lösungsalgorithmen beim „Kombinierten Vorgehen“	43
4.4.1 Bestimmung der Trockenrohddichte	43
4.4.1.1 Trockenrohddichte des Gesamtbodens (TRD _{ges})	43
4.4.1.2 Trockenrohddichte des Feinbodens (TRD _{FB})	44
4.4.2 Feinbodenvorrat	46
4.4.3 Festsubstanzdichte	52
4.5 Anwendung von Pedotransferfunktionen	55
5 Schlussfolgerungen und Zusammenfassung	57
6 Literatur	59

Anhang

1 Einführung

1.1 Problemstellung

Im Rahmen des Forstlichen Umweltmonitorings werden Angaben über die bodenphysikalischen Parameter Trockenrohdichte (TRD) und Skelettgehalt für die Berechnung von Elementvorräten sowie zur Kennzeichnung des Bodenwasserhaushaltes benötigt.

Für die Vorratsermittlung der einzelnen Elemente ist der Vorrat an Feinboden (Bodenpartikel < 2mm Äquivalentdurchmesser) zu bestimmen. Anhand des Feinbodenvorrats und der im Labor bestimmten Elementkonzentration im Feinboden lässt sich dann der Elementvorrat (t/ha) berechnen.

Die Ermittlung des Feinbodenvorrats basiert auf gemessenen und / oder geschätzten Angaben zum Skelettgehalt des Bodens und der Trockenrohdichte. Differenzierte Algorithmen zu deren rechnerischen Verknüpfung bei skeletthaltigen Substraten fehlen jedoch bislang.

Im Mittelpunkt der vorliegenden Studie steht daher die Entwicklung einer „feldtauglichen Arbeitsanleitung“ für die Erfassung des Feinbodenvorrats aus Skelettgehalt und Trockenrohdichte. Insbesondere sollen alle für die rechnerische Verknüpfung der Ergebnisse aus i) Stechzylinder- / Stechkappenbeprobung, ii) visueller Ansprache der Grobskelettfraktion und iii) „Schippen-/Spatenbeprobung“ notwendigen Arbeitsschritte und Rechenoperationen dargestellt werden. Darüber hinaus sind die speziellen Beprobungsverfahren mit Rammkernsonde, AMS Core-Sampler mit Liner sowie Murachschem Wurzelbohrer hinsichtlich ihrer Eignung, die Trockenrohdichte und den Skelettgehalt repräsentativ zu erfassen, zu überprüfen.

1.2 Sachstand

In der vom BMELV finanzierten Vorstudie zur BZE II von Heinkele et al. (2005) wurde untersucht, wie sich unterschiedliche Beprobungsvolumina (Stechkappen mit 3.75 cm³, Stechzylinder mit 100 cm³ sowie Stechzylinder mit 250 cm³ Volumen) auf das Ergebnis der Trockenrohdichte und den dabei erfassten Skelettgehalt auswirken. Als Referenz dienten Bodenproben, deren Volumen und Feinbodenvorrat mittels PU-Schaumverfahren ermittelt wurde. Als eines der wesentlichen Ergebnisse dieser Studie zeigte sich, dass die Stechkappenbeprobung und das Stechzylinderverfahren zu vergleichbaren Werten der Trockenrohdichte des Feinbodens führen. Die Stechkappenmethode kann auch auf skelettreicheren Böden zum Einsatz kommen, wo eine Beprobung mit Stechzylindern nicht möglich ist.

Die Diskussion der Ergebnisse der Studie von Heinkele et al. (2005) im Rahmen der Bund-Länder-AG „BZE II“ machte deutlich, dass es hinsichtlich der Ermittlung des Skelettgehaltes nach wie vor Probleme und offene Fragen gibt. So dürften Skelettfractionen mit geringem Äquivalentdurchmesser (< ca. 20 mm) noch annähernd repräsentativ mit Stechzylindern zu erfassen sein. Für gröbere Skelettfractionen kommt indes nach aktuellem Wissensstand im Rahmen der BZE II nur die visuelle Schätzung an der Profilwand in Frage. Dabei ist unverkennbar, dass dieses nicht objektivierbare Verfahren erhebliche Fehlerquellen in sich birgt. Es wurde deshalb ein kombiniertes Verfahren diskutiert, bei welchem die Skelettfractionen < 20 mm mittels Stechzylinder erfasst werden sollen, die Fractionen > ca. 60 mm durch Schätzung an der Profilwand und zusätzlich die Fractionen im mittleren Bereich (20 mm - 60 mm) durch Siebung einer nicht volumengerecht gewonnenen Probe (sog. „Schippen-/Spatenverfahren“). Da hierbei für repräsentative Siebanalysen unter Umständen erhebliche Boden- bzw. Steinmengen anfallen können, wurde diskutiert, das Sieben und

Wägen – zumindest bei nicht bindigem Material – bereits im Gelände durchzuführen. Für die notwendigen Rechenschritte wären in diesem Fall eine exemplarische Bodenprobe zur gravimetrischen Ermittlung des aktuellen Wassergehaltes sowie eine Auswahl an Bodenskelett zur Bestimmung der Festsubstanzdichte im Labor zu gewinnen.

Des Weiteren wurde in der Bund-Länder-AG „BZE II“ über Beprobungsverfahren diskutiert, welche eine Erfassung der TRD des Feinbodens und – unter bestimmten Voraussetzungen – auch des vollständigen Skelettgehaltes erlauben. Diese Verfahren – namentlich die Beprobung mit Rammkernsonde, AMS Core-Sampler mit Liner bzw. Murachschem Wurzelbohrer – waren jedoch nicht Gegenstand der genannten Studie von Heinkele et al. (2005) und sollten deshalb vor ihrem standardmäßigen Einsatz bei der BZE II ebenfalls getestet werden.

1.3 Aufgabenstellung

Folgende Aufgaben waren im Rahmen dieser Studie zu lösen:

1) Eignung der Rammkernsonde, des AMS Core-Samplers mit Liner und des Murachschen Wurzelbohrers für die volumengerechte Entnahme von Bodenproben und Bestimmung der Trockenrohdichte im Ober- und Unterboden

Die genannten drei Bohrergeräte sollen auf 15 Flächen an jeweils drei Probenahmepunkten und auf 2 Flächen an jeweils einem Probenahmepunkt in jeweils 5-facher Wiederholung zur Gewinnung einer volumengerechten Bodenprobe aus 17-22 cm Tiefe eingesetzt werden. Die Auswahl der Flächen und Probenahmepunkte hat sich nach den Vorgaben der Studie von Heinkele et al. (2005) zu richten. Zusätzlich sollen Bodenproben aus den Tiefenstufen 30-45 cm und 60-75 cm mit Murachschem Wurzelbohrer und Rammkernsonde in jeweils 5-facher Wiederholung auf 6 Flächen entnommen werden. Die ermittelten Grobbodenanteile, Trockenrohdichten und daraus abgeleitete Feinbodenvorräte sind vergleichend statistisch auszuwerten.

2) Überprüfung eines kombinierten Verfahrens zur Bestimmung des Skelettgehaltes von Böden

Es soll eine kombinierte Methode aus i) volumenbezogener Beprobung (Stechzylinder, Rammkernsonde, Murachscher Wurzelbohrer, Bohrer mit Liner), ii) nichtvolumengerechter Beprobung mittels Schippe- bzw. Spatenaushub und iii) Skelettansprache am Bodenprofil entwickelt werden, welche den Gesamtskelettgehalt möglichst genau wiedergibt und im Rahmen der BZE II durchführbar ist.

3) Zusammenstellung von Lösungsalgorithmen

Es soll eine Zusammenstellung von Gleichungen und Rechenalgorithmen für jede im Rahmen der BZE II potenziell zum Einsatz kommende Verfahrenskombination zur Bestimmung der Feinbodenmenge aus Trockenrohdichte und Skelettgehalt angefertigt werden. Die Algorithmenbeschreibungen sind in Form einer „feldtauglichen“ Arbeitsanleitung abzufassen. Ferner ist für die Schätzung des volumenbezogenen Grobskeletts an der Profilwand ein Algorithmus (Umrechnungsfaktor) zu entwickeln, der es zulässt, vom geschätzten Flächenanteil auf den Volumenanteil zu schließen.

3) Überprüfung von Pedotransferfunktionen zur Ableitung der Trockenrohdichte

Mit Hilfe der gewonnenen Trockenrohdichten sind Pedotransferfunktionen auf ihre Vorhersagegenauigkeit zu überprüfen.

2 Definitionen

Da in der Literatur die hier relevanten bodenphysikalischen Begriffe teilweise unterschiedlich verwendet werden bzw. verschiedene Begriffe für ein und denselben Sachverhalt gebräuchlich sind, wird nachfolgend die im Rahmen dieser Studie verwendete Nomenklatur erläutert.

Die Bezeichnung für die Kornfraktionen des Bodens richten sich nach AG Boden (2005). Danach wird bei der Kennzeichnung der Gesamtbodenart zwischen den Kornfraktionen des Feinbodens (Äquivalentdurchmesser < 2 mm) und des Grobbodens (Äquivalentdurchmesser \geq 2 mm) unterschieden. Für den Grobboden wird im Rahmen dieser Studie der Begriff des Bodenskeletts synonym verwendet (Scheffer & Schachtschabel, 1998; AK Boden, 2005; AG Standortkunde, 2003). Die Kornfraktionen des Grobbodens werden gemäß BMELV (2006) nach Tab. 1 in Grus / Kies, Steine, Blöcke und Großblöcke eingeteilt. Für die Bezeichnung Feinboden ist in der Literatur auch der Begriff der Feinerde zu finden (z.B. AK Standortkunde, 2003). Bei der Ermittlung von Stoffvorräten wird nach AK Standortkunde (2003) zunächst die Feinerdemasse einer Flächeneinheit berechnet. Bei der BZE I wurde hierfür der Begriff der Feinbodenmenge in der Einheit [t/ha] verwendet (BMELF, 1990). In der vorliegenden Studie wird hierfür hingegen - analog zur gebräuchlichen Bezeichnung „Elementvorrat“ - der Begriff Feinbodenvorrat eingeführt.

Tab. 1: Kornfraktionen des Grobbodens

<i>Äquivalentdurchmesser</i>	<i>Kantig</i>	<i>Gerundet</i>
2 – 6,3 mm	Feingrus	Feinkies
6,3 – 20 mm	Mittelgrus	Mittelkies
20 – 63 mm	Grobgrus	Grobkies
63 – 200 mm	Kantige Steine	Gerundete Steine
200 – 630 mm	Kantige Blöcke	Gerundete Blöcke
> 630 mm	Kantige Großblöcke	Gerundete Großblöcke

Die Dichte des Gesamtvolumens einer Probe (einschließlich der Poren zwischen den festen Partikeln) kann nach Scheffer & Schachtschabel (1998) und Hartge & Horn (1992) als Maß für die Lagerung herangezogen werden. Es wird hierbei von der Dichte des Bodens gesprochen. In der Regel wird dieser Kennwert für den ofentrockenen Boden angegeben. In der vorliegenden Studie wird für die von Scheffer & Schachtschabel (1998) bzw. Hartge & Horn (1992) als Bodendichte bezeichnete physikalische Kenngröße der Begriff der Trockenrohddichte benutzt. Sie ist definiert als die bei 105°C getrocknete Masse einer Bodenprobe in natürlicher Lagerung, bezogen auf ihr Volumen und stimmt mit der Nomenklatur der AG Boden (2005) überein. Vom AK Standortkunde (2003) wird indes der Begriff der Trockenraumdichte für diesen Kennwert verwendet.

Bei der Trockenrohddichte wird in der vorliegenden Studie ausdrücklich zwischen der auf den Gesamtboden (TRD_{ges}) und der auf den Feinboden bezogenen Trockenrohddichte (TRD_{FB}) differenziert (vgl. Kap. 4.4.1).

Vom AK Standortkunde (2003) wird ferner darauf hingewiesen, dass Lagerungsdichte und Trockenraumdichte nicht synonym ist. Die Lagerungsdichte wird vom AK Standortkunde der effektiven Lagerungsdichte gleichgesetzt. Nach Scheffer & Schachtschabel (1998) sind indes Lagerungsdichte und Bodendichte gleichzusetzen. Die effektive Lagerungsdichte ist danach ausschließlich für die unter Einbeziehung des Tongehaltes umgerechnete Lagerungsdichte (Bodendichte) zu verwenden. Der Begriff der effektiven Lagerungsdichte

wird in der vorliegenden Studie nicht benutzt. Die effektive Lagerungsdichte kann für die Schätzung der Bodendichte am Bodenprofil von Bedeutung sein (AG Boden, 2005).

Unter der Substanzdichte ist die Masse der Bodenfestsubstanz pro Volumeneinheit – ohne Berücksichtigung des Bodenhohlraumsystems – nach Trocknung bei 105°C in g/cm³ zu verstehen. Diesbezüglich sind die Begrifflichkeiten in der Literatur relativ eindeutig. Als synonyme Bezeichnung kommt im wesentlichen noch der Ausdruck „spezifisches Gewicht der Bodenfestsubstanz“ vor. In der vorliegenden Studie ist die Substanzdichte des Grobbodens (D_{GB}) von Bedeutung. Sie bezieht sich ausschließlich auf die mineralische Fraktion ≥ 2 mm; die in einer Bodenprobe enthaltene organische Substanz spielt für ihre Ausprägung keine Rolle.

3 Methoden

3.1 Auswahl der Untersuchungspunkte

Die Untersuchungsflächen der vorliegenden Studie waren durch die Arbeit von Heinkele et al. (2005) vorgegeben. Erläuterungen zum Auswahlverfahren finden sich dort. Für einige statistische Auswertungen wurden die Daten nach Substrat- bzw. Bodenartenhauptgruppen stratifiziert. Die Stratenzugehörigkeit der Untersuchungsflächen geht aus Tab. 2 hervor.

Tab. 2: Kennzeichnung der Untersuchungsflächen nach Substrat und Bodenart (Gruppen für stratifizierte Auswertung: 1=(L-)U; 2=S; 3=LS; 4=L)

<i>BZE-Nr.</i>	<i>Bundesland</i>	<i>Ausgangsgesteine der Bodenbildung (lt. Datenbank BZE I)</i>	<i>Bodenarten-Gruppen (abgeleitet aus Datenbank BZE I)</i>	<i>Gruppenzugehörigkeit (Stratum für statistische Auswertung im Rahmen dieser Studie)</i>
03001	NI	71FL41	Lehmschluff	1
03031	NI	71WS43	Lehmschluff	1
03066	NI	71WS41	Lehmschluff Lehmtone	1
03144	NI	73	Reinsand	2
03111	NI	73-71	Lehmsand Normallehm	3
03152	NI	73	Lehmsand	3
03187	NI	73	Sandlehm	3
06054	HE	71FL41HS	Normallehm	4
07142	RP	41	Lehmsand	3
12142	BB	73	Reinsand	2
12147	BB	89-73	Reinsand	2
12002	BE	73	Reinsand	2
13046	MV	75-65	Reinsand	2
16004	TH	71-31	Lehmschluff Tonschluff Schluffton	4
16020	TH	41	Reinsand	2
16034	TH	05	Normallehm	4
16054	TH	41	Lehmsand Schluffsand	2

Für die im Rahmen dieser Studie vorgesehene Beprobung des Unterbodens mittels Murachbohrer und Rammkernsonde wurden sechs Flächen anhand der in Tab. 3 dargestellten Kriterien ausgewählt.

Tab. 3: Flächenauswahl für die Unterbodenbeprobung

<i>Kriterium</i>	<i>Fläche</i>	<i>Skelettgehalt (lt. Datenbank BZE I)</i>
1. Sandstandorte:		
1.1 Stechzylinderbeprobung möglich (geringer bis mittlerer Skelettgehalt)	12002 12142	4 % 14 %
1.2 Stechzylinderbeprobung nicht möglich (sehr hoher Skelettgehalt)	12147 13046	40 % 70 %
2. Schluffstandorte	03031	15 %
3. Lehmstandorte	16034	15 % (Fels z.T. ab 40 cm anstehend)

3.2 Gelände- und Laborverfahren

An den vorgegebenen Teilflächen von insgesamt 17 BZE-Punkten (Kap. 1.3, Kap. 3.1) wurden mit 5-facher Wiederholung volumengerechte Proben mit Rammkernsonde, AMS Core-Sampler mit Liner und Murachschem Wurzelbohrer aus den Tiefen 17-22 cm (17 BZE-Punkte) bzw. 30-45 cm und 60-75 cm (6 BZE-Punkte) entnommen. Schlug eine Probennahme - beispielsweise aufgrund zu hoher Skelettgehalte - fehl und musste die Probe verworfen werden, wurde die Probennahme (maximal zweimal) wiederholt. Konnte dann immer noch keine brauchbare Probe gewonnen werden, wurde ein Fehlwert verzeichnet.

Das Bodenmaterial wurde im Labor bei 105°C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Anschließend wurde die Masse bestimmt. An einem Teil der Proben erfolgte die Ermittlung der Humusgehalte, welche für die Überprüfung von Pedotransferfunktionen benötigt wurden, über Glühverlust. Für alle Proben wurden die Massen der Skelettfraktionen > 2,0-6,3 mm und > 6,3 mm durch Siebung bestimmt. Zusätzlich wurden an den 6 Flächen mit Tiefenbeprobung auch die Fraktionen 6,3-20 mm und 20-63 mm sowie > 63 mm bestimmt.

Das Volumen einer Teilprobe des Bodenskeletts wurde jeweils mittels Pyknometer durch Wasserverdrängung und Wägung bestimmt. Pyknometer sind Glasflaschen mit eingeschliffenen Stopfen, die eine enge Kapillare enthalten. Das Pyknometer wird mit der Flüssigkeit randvoll gefüllt, der Überschuss beim Aufsetzen des Stopfens durch die Kapillare herausgedrückt. Nach sorgfältigem Abtrocknen wird gewogen. Im Rahmen der vorliegenden Studie wurden die Volumina einiger Vergleichsproben zusätzlich mit Hilfe eines Helium-Pyknometers ermittelt.^{*)}

Der von den gängigen Standardverfahren abweichende Ansatz zur Ermittlung eines Referenzwertes für die Feinbodendichte und den Skelettgehalt wird im folgenden ausführlich erläutert.

^{*)} Für die Durchführung der Volumenermittlung mittels Helium-Pyknometer danken wir Herrn Dipl. Ing. M. Facklam / TU Berlin

3.3 Referenzwert für Feinbodendichte und Skelettanteil

3.3.1 Vorgehen im Gelände

Zur Überprüfung der mittels Rammkernsonde und Murachbohrer im Unterboden entnommenen Bodenproben wurde ein Referenzwert für die Bodendichte und den volumenbezogenen Skelettgehalt bestimmt. Heinkele et al. (2005) setzten hierzu das Volumenersatzverfahren mit PU-Schaum ein. In der vorliegenden Studie wurde dafür ein neuer Ansatz getestet, der sich im einzelnen wie folgt beschreiben lässt.

Im Grundsatz handelt es sich bei der verwendeten Methode um ein Volumenersatzverfahren, bei dem das entnommene Bodenvolumen durch Verfüllung mit Bällchen ermittelt wird. Aus der Anzahl der in eine Bodengrube verfüllten Bällchen in chaotischer Lagerung lässt sich der Raum, den diese Bällchen einnehmen, grundsätzlich näherungsweise berechnen. Hierfür wurde im Rahmen der Studie ein empirischer Umrechnungsalgorithmus ermittelt. Die Verfahrensweise und erzielte Genauigkeit bei der Umrechnung von Kugelanzahl in Volumen ist in Kap. 3.3.2 dargestellt.

Für die Anwendung dieses Verfahrens waren im Gelände exakt definierte Handlungen durchzuführen. Das genaue Vorgehen an den einzelnen Untersuchungspunkten kann in folgende Schritte gegliedert werden.

Schritt 1:

Es wurde eine Bodengrube ausgehoben, deren Maße ca. 90 cm Breite und 90 cm Tiefe umfasste. Die Grubenlänge wurde so dimensioniert, dass in der Grube ein bequemes Arbeiten möglich war. An der Profilwand wurden je 5 100 cm³-Stechzylinder aus den relevanten Tiefenstufen (30-45 cm, 60-75 cm) entnommen. Für den Fall, dass keine Stechzylinderbeprobung möglich war, wurden Stechkappen (bzw. selbst gefertigte Ministechzylinder mit einem Volumen von 6 cm³) in 10-facher Wiederholung eingesetzt. Zusätzlich wurden je 4 Proben zu 200 g für die gravimetrische Bestimmung des aktuellen Wassergehaltes entnommen.

Die Stechzylinderproben sollten für den Vergleich der aus Murachbohrer und Rammkernsonde ermittelten Trockenrohddichten und Skelettgehalte im Unterboden mit hinzugezogen werden. Außerdem wurden damit die Anteile der Grobbodenfraktion 2-6,3 mm bestimmt. Die Bestimmung des Wassergehaltes war notwendig, da die gestörten Proben („Schippen-Spatenproben“) bereits im Gelände gesiebt wurden, die Berechnungen zu Trockenrohddichte und Feinbodenvorrat jedoch auf ofentrockene Proben zu beziehen sind.

Schritt 2:

An der Profilwand sollte der Anteil des Skelettes mit Äquivalentdurchmesser > 6 cm geschätzt werden (vgl. Kap.3.4). Die Schätzung sollte später mit den gemessenen (ausgesiebten) Steinen verglichen werden, um die Schätzergebnisse zu überprüfen. Hierzu wurde der Grobboden aus der glattgestrichenen Profilwand schichtweise herauspräpariert, einzeln entnommen, gesammelt und mit einer Schieblehre zur Bestimmung des Äquivalentdurchmessers vermessen (3 Achsen). Es wurde alles Skelett entnommen, von dem an der glattgestrichenen Profilwand ein Teil zu sehen war, und deren Äquivalentdurchmesser mehr als 6 cm betrug.

Bei sehr hohem Skelettgehalt wurden sinnvolle Durchmesserklassen gebildet, in Eimern gutachtlich nach Durchmesserklasse differenziert gesammelt und nur exemplarisch vermessen. Aus der Anzahl der Skelette pro Eimer bzw. Durchmesserklasse war die Summe (Volumen des Grobbodens der Fraktion > 6 cm) zu bestimmen.

Die Maße der Profilwandfläche wurden genau bestimmt. Dabei wurde die Profilwand über eine Trapezform angenähert. Außerhalb dieser Trapezfläche wurde kein Skelett entnommen.

Schritt 3:

Die Profilwand wurde erneut abgestochen und in der Vertikalen glatt gezogen. Die Anpassung erfolgte mittels Holzlatte und Wasserwaage.

Es sollte nun hinter der Profilwand der zu untersuchende Bodenmonolith entnommen werden. Um ein horizontales Nullniveau zu markieren, wurde zunächst eine Schnur ca. 10 cm über Geländeniveau horizontal (Wasserwaage) zwischen zwei eingeschlagene Latten gespannt. Auf das Niveau dieser Schnur wurden anschließend alle in die Tiefe reichenden Messungen bezogen.

Es wurde hinter der Profilwand mittig eine quadratische 60x60 cm² Fläche durch Einritzen mit Messer abgegrenzt. Sie diente zur Markierung des zu entnehmenden Bodenmonolithen. Dabei musste streng auf Rechtwinkligkeit geachtet werden. Innerhalb dieser abgegrenzten Fläche wurde der Oberboden bis ca. 10 cm Tiefe abgetragen. Die abgetragene Schicht sollte nicht weiter untersucht werden, da sie aufgrund von Wurzeln und hohem Humusanteil schwierig im Gelände zu sieben gewesen wäre.

Das so neu geschaffene künstliche Bodenniveau (Plateau innerhalb der 60x60 cm Fläche) war absolut horizontal mittels Brettchen und Wasserwaage auszurichten. Der Abstand dieses Bodenniveaus zum Nullniveau (Schnur) wurde gemessen.

Schritt 4:

Es erfolgte die Entnahme des Bodenmonolithen. Der Boden wurde schichtenweise abgetragen, in einen Eimer verfüllt und anschließend im Gelände gesiebt. Für jeden Eimer (ca. 8 – 15 kg) wurden folgende Maschenweiten gesiebt bzw. berechnet: < 6.3 mm; < 20 mm, < 63 mm; Restboden (> 63 mm). Für den Fall, dass die Siebung bei 6.3 mm nicht möglich war (z.B. zu bindiges Material), wurde mit einem Sieb der Maschenweite 10 mm begonnen; falls dies auch nicht möglich war bei 20 mm usw. In diesen Fällen wurde zusätzlich eine Gesamtprobe von 5 – 10 kg Boden entnommen, um an dieser im Labor nach Probentrocknung die Siebung vorzunehmen. Der Anteil der Grobbodenfraktion 2 - 6,3 mm wurde grundsätzlich nicht im Gelände ermittelt sondern anhand der Stechzylinderproben (vgl. Schritt 1). Aus jeder Durchmesserklasse wurde überdies exemplarisches Skelettmaterial für die Festsubstanzdichtebestimmung im Labor entnommen.

Schritt 5:

An der Profilwand wurde nun zur Abgrenzung des Monolithenvolumens eine Platte senkrecht fixiert und der entnommene Bodenraum mit Bällchen verfüllt. Der Bodenraum wurde bis etwas über das künstliche Bodenniveau aufgefüllt (< 10 cm unter Geländeoberfläche). Die Oberfläche der Kugeln wurde mittels Brettchen und Wasserwaage eingeebnet und der Abstand zum Nullniveau (Schnur) ermittelt. Anschließend wurde die Anzahl der Bällchen bestimmt.

Die Schritte 4 und 5 wurden zunächst für die Tiefe 0 – 40 cm und anschließend für 0 – 80 cm vorgenommen.

3.3.2 Volumenbestimmung mit der „Bällchenmethode“

Aus der Anzahl der Bällchen, welche den entnommenen Bodenmonolithen ausfüllen, sollte auf dessen Volumen geschlossen werden. Hierzu war ein empirischer Algorithmus zu finden.

Es wurde eine stabile rechtwinklige Holzkiste mit den Maßen 60 x 60 x 90 cm³ angefertigt und diese wiederholt bis in unterschiedliche Tiefen mit Bällchen verfüllt. Aus dem berechneten Volumen des verfüllten Körpers und der Bällchenanzahl wurde eine lineare Regressionsbeziehung abgeleitet. Um die Randbedingungen in der Holzkiste den natürlichen der Bodengrube besser anzupassen wurden am Grund der Kiste sowie an den senkrechten Kanten ungleichförmige Styroporkörper als Steinattrappen angebracht, deren Volumen durch Wasserverdrängung ermittelt und vom Kistenvolumen abgezogen wurde.

Die Versuche ergaben folgende Beziehungsgleichung (Abb. 1; Abb. 2):

$$\text{Volumen} = 208.381 * \text{Bällchenanzahl} - 816.42 \quad (r^2=0.999)$$

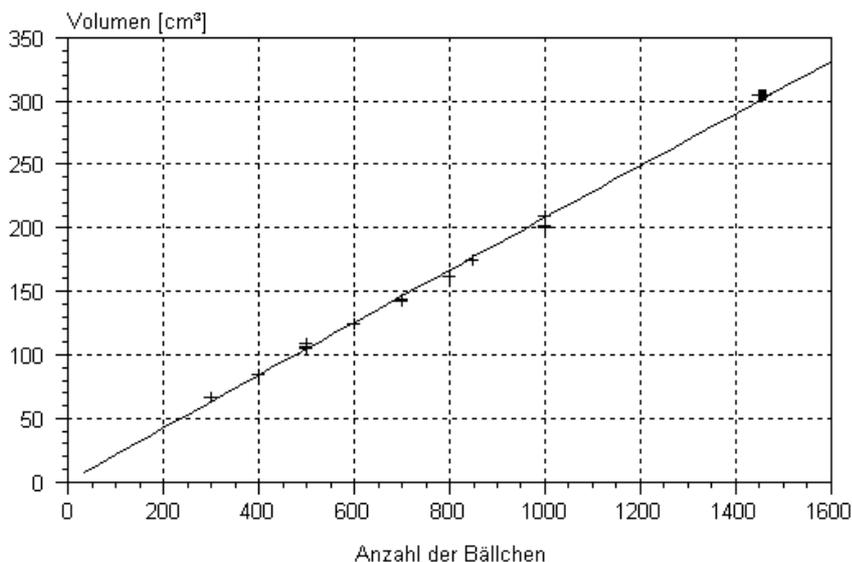


Abb. 1: Beziehung zwischen ausgefülltem Volumen [Tsd. cm³] und Bällchenanzahl

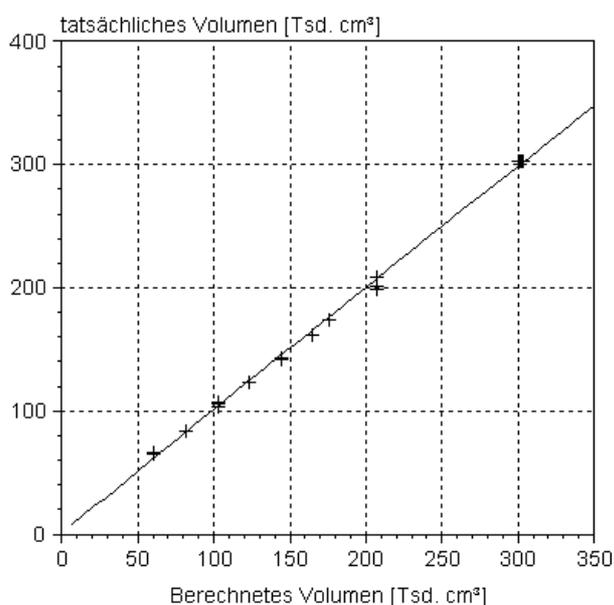


Abb. 2: Gegenüberstellung von tatsächlichem und berechnetem Volumen [Tsd. cm³]

Die Genauigkeit des Verfahrens geht aus einer Messserie hervor, bei der wiederholt der gesamte Raum der Kiste (abzüglich der Styroporkörper) aufgefüllt wurde (303.307 cm^3) und die Kugeln ausgezählt wurden. Die Häufigkeitsverteilung in Abb. 3 und Abb. 4 zeigen die Spannweite um den Sollwert absolut und in Prozent vom Sollwert (303.307 cm^3). Es zeigt sich, dass das Regressionsmodell das Volumen bei hohen Werten von n tendenziell leicht unterschätzt. Der Fehler ist aber mit insgesamt weniger als 1 % äußerst gering.

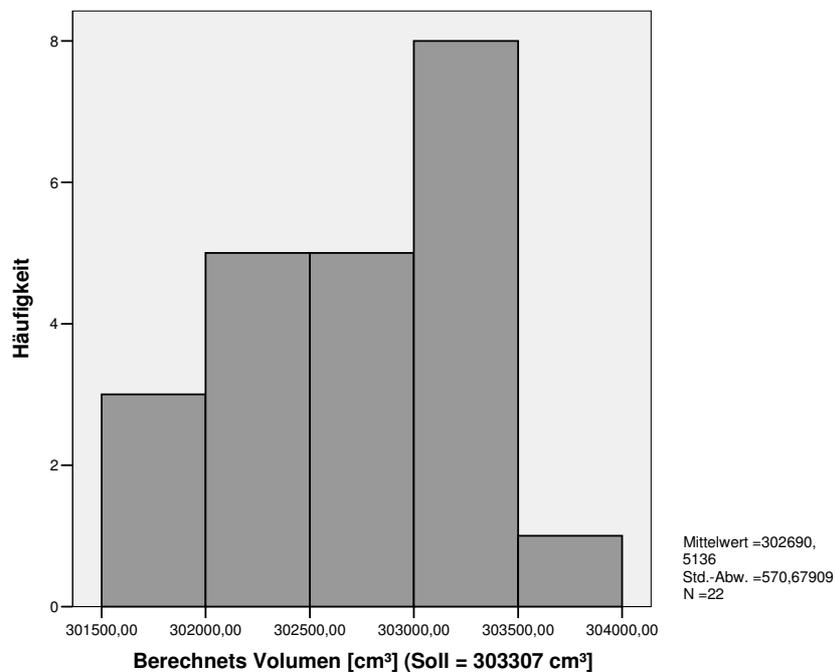


Abb. 3: Reproduzierbarkeit der Volumenermittlung mittels „Bällchenmethode“ (Abweichungen vom Sollwert bei wiederholter Verfüllung)

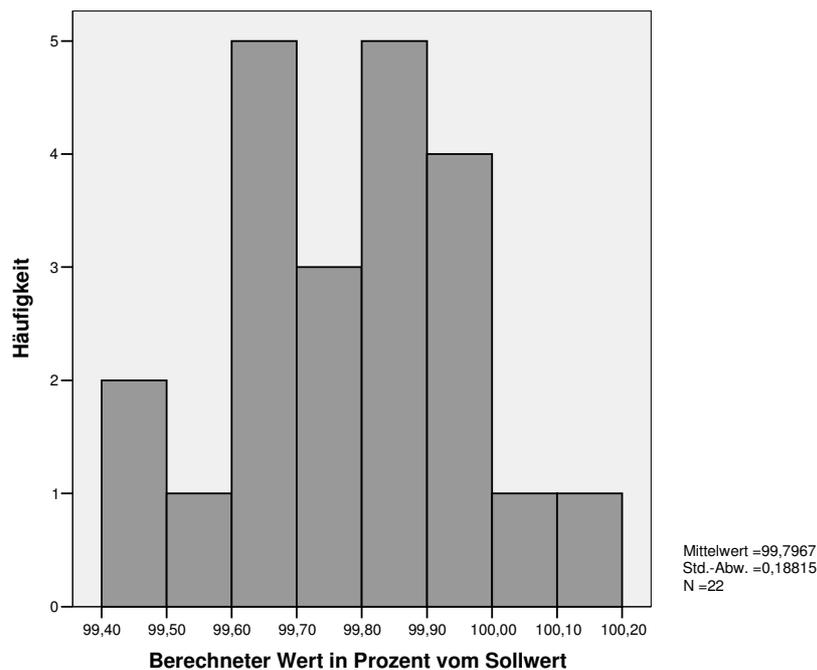


Abb. 4: Reproduzierbarkeit der Volumenermittlung mittels „Bällchenmethode“ (Prozentuale Abweichungen vom Sollwert bei wiederholter Verfüllung)

3.4 Skelettschätzung am Profil

3.4.1 Schätzung des flächenbezogenen Skelettanteils

Für die Schätzung des Skelettgehaltes am Profil (Fraktion > 6 cm) wurde der Grobboden aus der Profilwand vorsichtig herauspräpariert. Dabei war darauf zu achten, dass die einzelnen Partikel soweit (etwa bis zur Hälfte) freigelegt wurden, dass ihr Äquivalentdurchmesser daraus näherungsweise ableitbar war.

Die Schätzung kann grundsätzlich mit Hilfe von Schätzhilfen zur Bestimmung von Flächenanteilen am Bodenprofil erfolgen (Abb. 5) oder auf der Grundlage von Fotos bestimmt werden (Abb. 6). In der vorliegenden Studie wurden zunächst die Flächenanteile geschätzt und zusätzlich die sichtbaren Steine und Blöcke (Skelett > 6,3 mm Äquivalentdurchmesser) einzeln vermessen. Hierbei wurden 3 Achsen mittels Schiebelehre erfasst und daraus der Äquivalentdurchmesser berechnet.

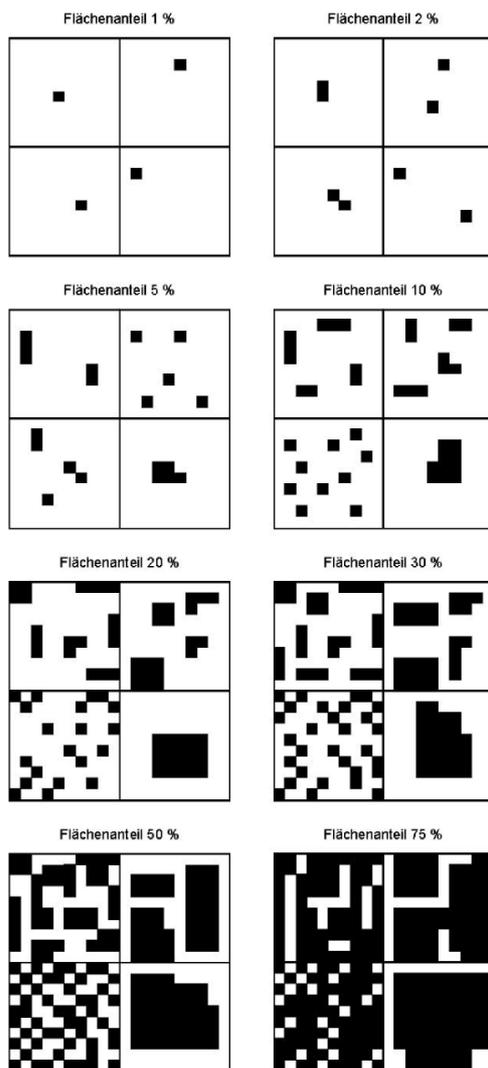


Abb. 5: Schätzhilfe zur Bestimmung von Flächenanteilen am Bodenprofil (Wellbrock et al., 2006)

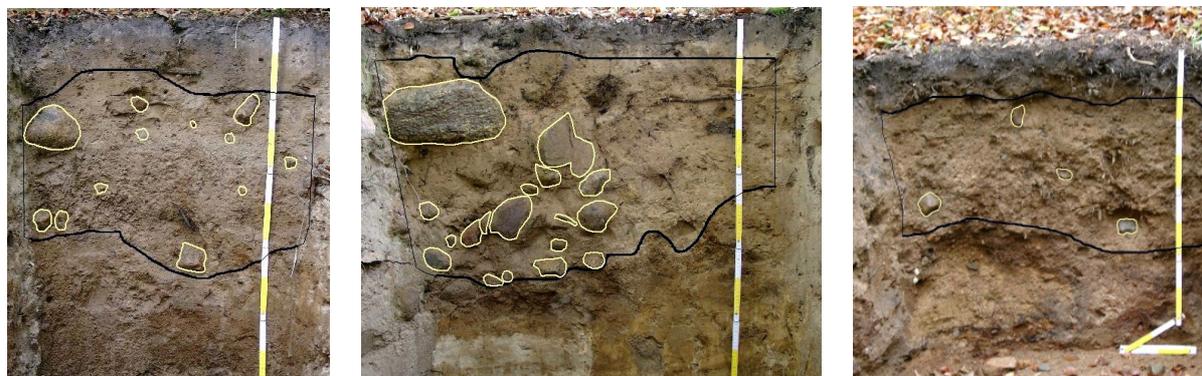


Abb. 6: Grundlage für die fotografische Bestimmung des Flächenanteils von Grobskelett am Bodenprofil (Flächenprozent bezogen auf die umrandete Fläche v.l.n.r.: 8 %, 19 %, 2 %) (aus: Drexler, 2005)

3.4.2 Ansatz für die Ableitung des volumenbezogenen Skelettgehalts

Für die vorliegenden Fragestellungen ist der volumenbezogene Anteil an Grobboden (Fraktion > 6 cm Äquivalentdurchmesser) relevant, welcher aus dem flächenbezogenen Anteil an der Profilwand abgeschätzt werden kann. Dabei werden zwei Fälle unterschieden.

Im ersten Fall handelt es sich um mehr oder weniger quaderförmige Skelettschichten von plattiger Lagerung, wie sie z.B. für Kalksandstein zu verzeichnen sind. Der Boden besteht überwiegend aus Bodenskelett, dazwischen befindet sich nur wenig Feinboden (Abb. 7). In diesem Fall kann der an der Profilwand geschätzte flächenbezogene prozentuale Anteil des Grobbodens dem volumenbezogenen Skelettanteil annähernd gleichgesetzt werden.

Im zweiten Fall handelt es sich um rundliche bis kantige Skelettfractionen wie sie zum Beispiel in eiszeitlichen Geschiebeablagerungen zu finden sind (Abb. 7). Der Feinbodenanteil ist deutlich höher als im Fall 1. Für die flächenbezogene Abschätzung des Grobbodenanteils ist wie in Kap. 3.3.1 dargestellt vorzugehen, d.h. die Skelettpartikel sind zunächst etwa bis zur Hälfte aus der Profilwand herauszupräparieren. Über Kugelformen lassen sich den einzelnen Partikeln näherungsweise Äquivalentdurchmesser zuordnen.

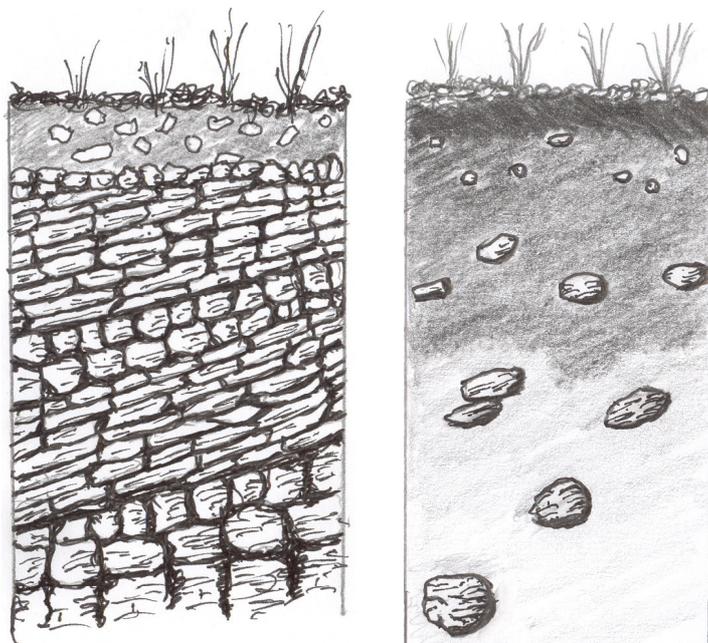


Abb. 7: Beispiel für plattige Skelettschichten mit wenig Feinboden (links, Fall 1) sowie für rundliche Skelettpartikel im Feinboden (rechts, Fall 2) (Zeichnung: U. Finger)

Es sei ausdrücklich darauf hingewiesen, dass nur die Skelettfractionen > 6 cm Äquivalentdurchmesser in die Anteilsschätzung mit einbezogen wurden. Kleinere Grobbodenfraktionen (bzw. der Grobboden im Bereich zwischen den im Fall 1 auftretenden großen Skelettplatten) sollten im Zuge des „Kombinierten Verfahrens“ (Kap. 4.3) durch die gestörte Probennahme bzw. durch Stechzylinder oder Stechkappen quantitativ erfasst werden.

Die Umrechnung von flächen- in volumenbezogenen Skelettanteil im Fall 2 kann über den Faktor $2/3$ erfolgen, welcher sich aus folgenden Gleichungen ergibt:

Volumen der Kugel mit Durchmesser d:

$$V = \frac{\pi}{6} \times d^3$$

Volumenanteil dieser Kugel an einem Würfel der Kantenlänge d:

$$V_{ant} = \frac{\pi/6 \times d^3}{d^3} = 0,523$$

Fläche des Kreises mit Durchmesser d:

$$F = \frac{\pi}{4} \times d^2$$

Flächenanteil dieses Kreises an einem Quadrat der Kantenlänge d:

$$F_{ant} = \frac{\pi/4 \times d^2}{d^2} = 0,785$$

Es wird deutlich, dass der Umrechnungsfaktor zwischen Flächenanteil und Volumenanteil $f = 0,524/0,785 = 2/3$ beträgt. Es wird daher empfohlen den volumenbezogenen Skelettgehalt für die Fraktionen > 6 cm aus dem geschätzten Flächenanteil dieser Fraktion an der Profilwand näherungsweise durch Multiplikation mit dem Faktor 0,7 zu berechnen.

Die Herleitung dieses Umrechnungsfaktors kann nach Drexler (2005) auch wie folgt veranschaulicht werden (Tab. 4): An einer Profilwand von $100 \text{ cm} \times 100 \text{ cm}$ Fläche sollen die zur Hälfte herauspräparierten Skelettfractionen beispielsweise 30 % der Fläche einnehmen. Dies ist exemplarisch durch die fünf Steine bzw. Blöcke der in Spalte 1 der Tab. 4 dargestellten Äquivalentdurchmesser gegeben. Es wird nun für jeden Skelettdurchmesser (bzw. allgemein für Durchmesserklassen) eine vertikale Bodenscheibe ($100 \text{ cm} \times 100 \text{ cm}$) mit der Mächtigkeit dieses Skelettdurchmessers berechnet, auf deren Volumen das Skelettvolumen zu beziehen ist. Der Grundgedanke besteht darin, dass die Steine einer bestimmten Durchmesserklasse näherungsweise ein Bodenvolumen repräsentieren, dessen Mächtigkeit dem Durchmesser der Steine entspricht. Voraussetzung für die Gültigkeit dieser Annahme ist, dass alles Skelett bis zur Hälfte des Äquivalentdurchmessers herauspräpariert ist. Dieses Bodenvolumen gibt in Tab. 4 die Spalte 4 wieder. Aus den volumenbezogenen Anteilen des Bodenskeletts an den einzelnen zugehörigen vertikalen Bodenscheibenvolumina lässt sich der Gesamtanteil des Skeletts am Bodenvolumen als Summe berechnen (Spalte 5 in Tab. 4). Im Beispiel liegt er bei 20 Vol.-%, womit sich für die Umrechnung von Flächen-% auf Volumen-% der Faktor $2/3$ ergibt.

Tab. 4: Beispiel für die Ableitung des volumenbezogenen Anteils von Bodenskelett aus dem auf die Profilwand bezogenen Flächenanteil (Voraussetzung hälftig herauspräpariertes Bodenskelett) (nach Drexler, 2005)

Fläche der Profilwand: 100 cm * 100 cm = 10000 cm ²				
Skelettdurchmesser d [cm]	Scheinbare Fläche der hälftig heraus präparierten Steine und Blöcke [cm ²]	Volumen der einzelnen Steine und Blöcke [cm ³]	Repräsentiertes Bodenvolumen (100 cm * 100 cm * d)	Volumenanteil des Skeletts am jeweils repräsentierten Bodenvolumen [%]
33,50	881,41	19684,89	335000	5,88
26,50	551,55	9743,98	265000	3,68
28,90	655,97	12638,40	289000	4,37
30,00	706,86	14137,17	300000	4,71
16,14	204,60	2201,45	161400	1,36
	Summe 3000 entspricht 30 Flächen-% der Profilwandfläche			Summe entspricht 20 Volumen-% des Gesamtbodenausschnitts
Umrechnungsfaktor Vol.-% = f * Flächen-% Faktor f = 20 % / 30 % = 0,666				

4 Ergebnisse

4.1 Erfahrungen mit den Probenahmegeräten

4.1.1 Rammkernsonde

Die Rammkernsonde wird mit einem elektrischen Schlaghammer im Boden versenkt und mechanisch mittels Klemmbacken und einer Hebelvorrichtung ausgezogen. Am Rammkern wird die relative Gesamtstauchung des Bohrkerns ermittelt. Die Tiefenstufen werden anhand des Stauchungsfaktors linear umgerechnet. Zum Einsatz kamen in der vorliegenden Studie Rammkernsonden von 1 m Länge und 50 mm Innendurchmesser.

Der Vorteil der Rammkernsonde besteht darin, dass Steine größtenteils durchschlagen werden und somit eine repräsentative Probe für Fein- und Grobboden gewonnen werden kann. Bei Verwendung einer einzigen langen Sonde (praktikabel bis z.B. 1,5 m Länge) kommt es nicht zur Verschleppung von Bodenmaterial, wie dies bei mehrfacher Verwendung von kürzeren Bohrgeräten (wie z.B. dem Wurzelbohrer) beim Ausziehen und Nachsetzen häufig geschieht.

Einer der Nachteile des Verfahrens besteht darin, dass die Stauchung der Probe nur durch einen linearen Umrechnungsfaktor undifferenziert über die gesamte Bohrkernlänge berücksichtigt werden kann. Tatsächlich ist aber davon auszugehen, dass die Stauchung im Oberboden durch Zerstörung der Bodenstruktur z.B. infolge anhaltenden Rüttelns auf Steinen größer ist als im Unterboden. Ein weiterer Nachteil ist darin zu sehen, dass die Korngrößenfraktionierung durch Bruchstücke, die beim Einschlagen entstehen können, verfälscht wird.

Der hohe Transportaufwand von Bohrhammer, Stromgenerator und Sonde ist für den Einsatz in bergigen Lagen hinderlich. Nach eigenen Erfahrungen erwies sich das System in der allgemeinen Benutzung als schwer und vergleichsweise unhandlich.

Der Muschelkalk auf Fläche 16004 war nicht bei jeder Sondierung durchbrechbar. Hier zeigten sich die Grenzen der Einsatzmöglichkeiten dieses Gerätes. Zum Teil kam es zum Steckenbleiben des Bohrkopfes im Gestein; in anderen Fällen behinderte festgeklemmtes Skelett die Probennahme und die Säuberung der Sonde. Durch anhaltende Rüttelbewegungen

auf Stein konnte verstärkt eine Verdichtung insbesondere locker gelagerten Oberbodenmaterials beobachtet werden.

Als Verdichtungsfaktor wurde im Mittel aller Probennahmen mit Rammkernsonde der Wert 0.85 (SD = 0.06) berechnet (n=306); Dies besagt, dass der Bohrkern durch das Einschlagen bis 90 cm Tiefe durchschnittlich um 15 % verkürzt worden ist. Die Ober- und Untertiefe der entnommenen Bohrkern wurden entsprechend der zu beprobenden Tiefenstufen und dem aus der jeweiligen Stauchung resultierenden Umrechnungsfaktor im Gelände individuell festgelegt.

Insgesamt ist das Verfahren am wenigsten anfällig gegenüber kräftigen Wurzeln und Bodenskelett. Als Verschleißteil erwies sich der Schlagkopf der Rammkernsonde. Bei Dauereinsatz sollten daher unbedingt mehrere Ersatzrammkernsonden eingeplant werden.

Die Gefahr, dass bei trockenen nicht bindigen Böden Probenmaterial herausrieselt, ist bei der Rammkernsonde von allen drei getesteten Beprobungsverfahren am geringsten, war aber auch hier im Fall von sehr trockenem kiesigem Material zu beobachten.

4.1.2 AMS-Core-Sampler mit Liner

Für das in Deutschland noch wenig bekannte Probenahmegerät liegen in den USA Erfahrungen vor. Palmer et al (2002) beschäftigen sich mit der Probennahmestrategie für die Ermittlung der Kohlenstoffvorräte von Wäldern im Rahmen des US-amerikanischen Forest Health Monitoring. Für die Ermittlung der Trockenrohddichte schlagen die Autoren die Verwendung des AMS Core Samplers vor. Bei diesem Verfahren wird ein 20 cm langer und im Durchmesser 5 cm umfassender Bohrer eingetrieben. Die in einem sog. Liner (= durchsichtige elastische Plastikhülse im Bohrer) aufgefangene Probe des Tiefenbereiches 0-20 cm wird anschließend in die Tiefenbereiche 0-5 cm, 5-10 cm und 10-20 cm geteilt und an diesen Teilproben die Trockenrohddichten bestimmt. Nach Palmer et al. (2002) können mit diesem Verfahren bei Entnahme von jeweils drei Proben pro Fläche im Hinblick auf die Anforderungen des Forest Health Monitoring Programms ausreichend genaue Daten ermittelt werden.

Liner Sampler sind laut Hersteller geeignet zur Entnahme ungestörter Proben von mehr oder weniger lockeren Böden bis in eine Tiefe von maximal 7 m. Ausdrücklich weisen Palmer et al. (2002) jedoch darauf hin, dass dieses Verfahren nur bei Proben mit geringem Skelettgehalt und bei Grobbodenpartikeln mit geringem Durchmesser (etwa < 1 cm) sinnvoll einsetzbar ist.

Die in der durchsichtigen Plastikhülse (Liner) kompakt gebundene Bodenprobe in natürlicher Lagerung lässt sich mittels Teppichmesser bequem in Schichten beliebiger Mächtigkeit schneiden, solange dies nicht durch erhöhte Skelettanteile verhindert wird. Das Verfahren eignet sich nach den Erfahrungen der vorliegenden Studie gut für weitgehend skelettfreie Böden. Hier kann die Qualität der Probe (Vorkommen von Rissen, Störungen, etc.) im Gegensatz zu Wurzelbohrer und Rammkernsonde unmittelbar durch die Liner-Folie überprüft werden.

Eine Berücksichtigung der Stauchung – vergleichbar zum Vorgehen mit Rammkernsonde – erfolgte in der vorliegenden Studie nicht. Hinweise auf stauchungsbedingte Bodenverdichtung beim Einschlagen der Liner Sampler werden von Palmer et al. (2002) lediglich für sehr humusreiche Oberbodenproben angeführt und die Anwendbarkeit dieses Verfahrens für diese Böden in Frage gestellt. Die vergleichende Auswertung der in dieser Studie gewonnenen Geländebefunde verdeutlichen, dass Stauchungseffekte bei diesem Verfahren sehr wohl von Bedeutung sind und tendenziell zu erhöhten Werten der Trockenrohddichte führen (vgl. Kap. 4.2).

Nach eigenen Einschätzungen macht das Gerät einen vergleichsweise labilen Eindruck. Der Bohrkopf wird beim Herausziehen durch kleine Schrauben gehalten, die im Laufe der Untersuchung mehrfach zerstört wurden und ausgewechselt werden mussten. Für den Unterboden ist infolge verschleppten Bodenmaterials keine Probenahme möglich. Hierfür müssten Bohrköpfe mit unterschiedlichen Radien zur Verfügung stehen, um durch geschachtelte Beprobung möglichst wenig Material im Bohrloch zu verschleppen. Eine Unterbodenbeprobung mittels Liner ist allein aus dem Grunde nicht möglich, dass die Arretierschrauben am eingeschlagenen Bohrkopf nicht erreicht werden können (es sei denn, man gräbt den Bohrkopf seitlich frei), welche als Widerlager jeweils vor dem Herausziehen des Bohrers herausgedreht werden müssen.

Bei mittelstarken Wurzeln und Wurzelfilz im Oberboden konnte das Verfahren i.d.R. nicht eingesetzt werden, weil das Einschlagen des Bohrers nicht möglich war. Auch weiches verwittertes Gestein kann nicht durchdrungen werden.

Bei feuchteren und tonreicheren Böden wurde der Bohrkern bei Entnahme häufig um einige Zentimeter aus der Hülle gezogen. Für den aus dem Liner herausragenden Bohrkern besteht dann die Gefahr des Abbechens von Bodenteilen, was einige Male eintrat. Die Probe wurde in diesen Fällen nochmals genommen.

Der Bohrzylinder ist gegenüber dem Wurzelbohrer enger, was den Vorteil hat, dass trockenes Material seltener herausrieselt. Auch das Herausfallen von Bodenskelett aufgrund dessen Eigengewichts tritt beim Liner vergleichsweise seltener auf. Bei trockenen Sanden wurde jedoch auch hier ein Herausrieseln des Materials verzeichnet. Das gegenüber Wurzelbohrer und ggfs. Rammkernsonde geringere Probenvolumen bedeutet bei heterogenen Böden eine weniger repräsentative Probennahme.

Als negativ ist zu bewerten, dass beim Zerschneiden der Liner vor Ort größere Mengen Plastikmüll entstehen, die entsorgt werden müssen. Zu beachten ist ferner, dass dieses Verfahren laufende Materialkosten für jede entnommene Bodenprobe erzeugt.

4.1.3 Murachscher Wurzelbohrer

Der Bau des Wurzelbohrers ist gegenüber dem Liner deutlich stabiler. Der massive Bohrkopf ist in der Lage, wie die Rammkernsonde, poröse Steine zu zerschlagen und gewährleistet so eine weitgehend repräsentative Beprobung von Fein- und Grobboden. Für die Beprobung in größerer Tiefe ist der Einsatz von Bohrköpfen unterschiedlichen Durchmessers nötig, um das Problem der Bodenverschleppung so gering wie möglich zu halten. Hierzu sind ggfs. individuell an die auftretenden Standortsbedingungen einer Region angepasste Sonderanfertigungen zu empfehlen (vgl. Vorgehen in Schleswig-Holstein im Rahmen der BZE; Aydin mündl. Mitt.). Die Berücksichtigung der Stauchung (Ableitung von Stauchungsfaktoren wie bei der Rammkernsonde) erfolgte bislang nicht. Die statistischen Auswertungen im Rahmen dieser Studie geben deutliche Hinweise auf Stauchungseffekte, welche bei der Trockenrohdichte zu erhöhten Werten einzelner Tiefenstufen führen können.

Vom Geländeteam dieser Studie wird der Wurzelbohrer als in der Handhabung am unkompliziertesten bewertet. Ein zeitlich sehr effektives Arbeiten ist möglich. Die dünne aber scharfkantige Bauweise des Zylinders ermöglicht es, auch stärkere Wurzeln und weiches Gestein (z.B. dünne Sandsteinschichten) beim Einschlagen zu durchtrennen. Als weiterer Vorteil wird das gegenüber Rammkernsonde und Liner deutlich größere Entnahmenvolumen (Durchmesser 8 cm) gesehen. Die Entnahme der Probe aus dem Bohrgerät ist bei Erzeugung von leichtem Gegendruck für leicht bindige und frische Böden ohne weiteres möglich. Wie bei allen Verfahren besteht bei trockenen Sandproben jedoch die Gefahr, dass Material herausrieselt. Aufgrund des großen Innendurchmessers fallen beim Wurzelbohrer größere Skelettfragmente besonders leicht heraus.

Bei zu starken Grobwurzeln und massivem Stein ist die Anwendung nicht mehr möglich. Beim Auftreffen auf Steine leidet vor allem der scharfkantige Kranz des Bohrers. Wurde skelettreiches Material, wie Sandstein durchschlagen, kam es vor, dass die Kraft der Kurbel nicht ausreichte, die Probe volumengerecht aus dem Zylinder zu schieben. Die Probe musste in diesen Fällen zerstört und verworfen werden.

4.1.4 Zusammenfassende Bewertung

Zusammenfassend lassen sich die Geländebefunde zu den einzelnen Probenahmeverfahren wie in Tab. 5 dargestellt bewerten.

Tab. 5: Zusammenfassende Bewertung der Probenahmeverfahren

Vorteile	Nachteile
Liner (L=30 cm, D=5cm)	
Lagerung des Probenmaterials kann im durchsichtigen Liner überprüft werden (z.B. Vorkommen von Hohlräumen)	wenig robustes Gerät; mittlere Wurzeln, Wurzelfilz und bereits kleinere Steine behindern das Eindringen
	Unterboden ist nicht beprobbar, weil a) Feststellschrauben unzugänglich und b) erhebliche Bodenverschleppung aufgrund identischer Bohrerdurchmesser (geschachtelte Beprobung nicht möglich)
	Bohrkern von bindigerem und feuchtem Material wird z.T. mehrere Zentimeter aus dem Liner herausgezogen (Unterdruck)
	geringeres Entnahmevolumen als Murachbohrer und ggfs. Rammkernsonde
	erhebliche Plastikmüllmengen sowie zusätzliche Kosten (pro Liner ca. 1 €)
Vorteile	
Murachbohrer (L=25 cm; D=8 cm)	
Stabile Bauweise und kräftiger Zahnkranz gewährleisten, dass stärkere Wurzeln und z.T. Steine problemlos durchschlagen werden	Bei durchschlagenem Steinmaterial und Verkantung reicht die Kurbelkraft u.U. nicht aus, um die Probe ungestört heraus zu drehen
Großes Entnahmevolumen (großer Durchmesser) garantiert hohe Repräsentanz auch bei geringmächtigeren Tiefenstufen	Trockene skelettreiche Sandproben rieseln heraus (großer Durchmesser des Bohrers ist hier nachteilig)
	Unterbodenbeprobung schwierig, wenn nicht unterschiedliche Zylinderradien verwendet werden (für geschachtelte Beprobung ggfs. Sonderanfertigungen nötig; vgl. BZE Schleswig-Holstein)

Vorteile	Nachteile
Rammkernsonde (L=100 cm; D = 4.5 cm)	
Probennahme in einem Kern bis 1,5 m möglich; daher keine Probleme mit Verschleppung von Oberbodenmaterial nach unten	Gerätetransport, Geräuschbelästigung, Bedienung des Bohrhammers führen auf Dauer zu erheblicher körperlicher Belastung
Robuste Technik; relativ problemloses Durchschlagen von Wurzeln und Steinen	Stauchung / Verdichtung insbesondere des Oberbodens durch das Rütteln auf Steinen (linearer Korrekturfaktor noch zu prüfen)
	Bohrkopf und v.a. Schlagkopf erwiesen sich als Verschleißteile

Im Gesamtergebnis lässt sich schlussfolgern, dass es offensichtlich kein allgemeingültig optimales Verfahren gibt. Jedes Verfahren hat in Abhängigkeit von den Standortsbedingungen (v.a. Steingehalt, Durchwurzelung, Textur und aktuelle Bodenfeuchte) Vor- und Nachteile. Für die Oberbodenbeprobung sind grundsätzlich alle Verfahren geeignet, wenn die genannten Standortsbedingungen den Einsatz zulassen. Hinsichtlich der Unterbodenbeprobung erscheint das Liner-System als ungeeignet. Die Rammkernsonde ist diesbezüglich besonders vorteilhaft, da keine Bodenverschleppung von oben nach unten erfolgen kann. Der Murachsche Wurzelbohrer ist für die Unterbodenbeprobung geeignet, wenn zur Minimierung der Bodenverschleppung unterschiedliche Bohrerdurchmesser eingesetzt werden.

4.2 Vergleich der Verfahren volumengerechter Beprobung

4.2.1 Vergleich stratifiziert nach Substrattypen

Eines der Ziele vorliegender Studie war zu überprüfen, ob die Verfahren Rammkernsonde, Murachscher Wurzelbohrer und AMS Core Sampler mit Liner geeignet sind für die Gewinnung volumengerechter Proben. Konventionell werden hierfür in der Regel Stechzylinder mit 100 cm³ oder 250 cm³ eingesetzt. Mit den genannten Bohrsystemen werden längere Bohrkerne gewonnen, die dann nach Tiefenstufen beliebig differenziert abgeschnitten werden können und so ein effektiveres Arbeiten bei der Probennahme erlauben. Voraussetzung für den Einsatz der Verfahren ist neben der Berücksichtigung der geländetechnischen Grenzen der Geräte (vgl. Kap. 4.1), dass die Bohrkernabschnitte mit den konventionellen Verfahren vergleichbare Werte der Trockenrohddichte und des Grobbodenanteils liefern bzw. zu den realen Gegebenheiten - insbesondere hinsichtlich des Grobbodenanteils - adäquateren Werten führen.

Die Abb. 8 zeigt einen nach Substrattypen (Kap. 3.1) differenzierten Vergleich der Verfahren Murachscher Wurzelbohrer (M), Rammkernsonde (R) und Liner (L) hinsichtlich der Kennwerte Trockenrohddichte (gesamt), Trockenrohddichte des Feinbodens, Grobbodenanteil, Anteil der Grobbodenfraktion > 6,3 mm sowie Feinbodenvorrat. Die Werte beziehen sich auf die Tiefenstufe 17-22 cm, wobei der Feinbodenvorrat für eine Schichtmächtigkeit von 1 dm hochgerechnet worden ist. Aus den Balkendiagrammen gehen jeweils die Mittelwerte und deren 95%-Konfidenzintervall hervor.

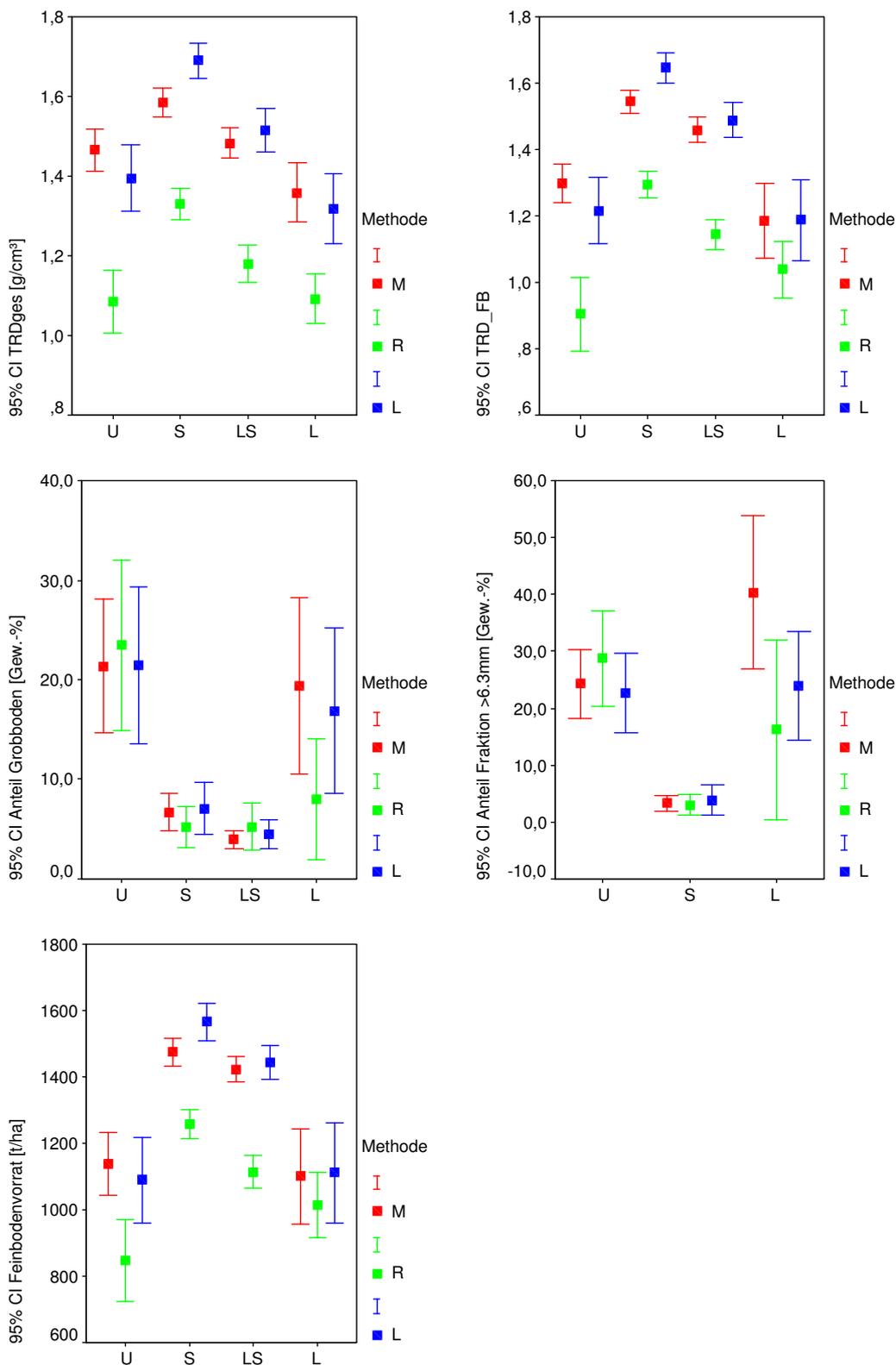


Abb. 8: Bodenphysikalische Kenngrößen (Mittelwert und 95 %-Konfidenzbereich) nach Beprobungsverfahren und Substrat differenziert; Tiefenstufe 17-22 cm; M = Murachscher Wurzelbohrer, R = Rammkernsonde, L = AMS Core Sampler mit Liner; U = Schluff bzw. (Lehm-)Schluff, S = Reinsand, LS = Lehmsand, L = Lehm (vgl. Kap. 3.1)

Die aus der Beprobung mit Murachsem Wurzelbohrer und Liner ermittelten Trockenrohdichten sind innerhalb der Substratgruppen vergleichbar, wobei die höchsten

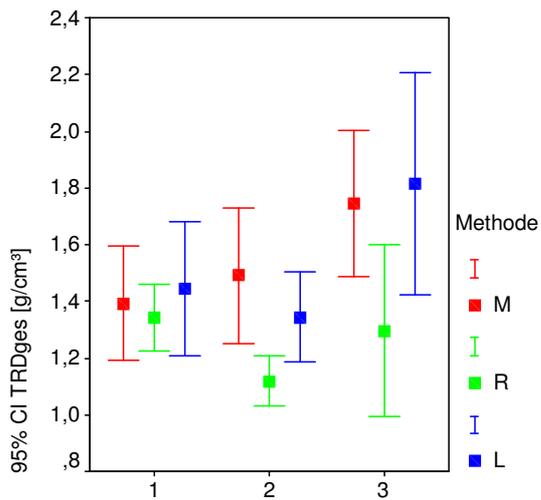
Werte bei den sandigen Substraten ermittelt werden. Die aus der Rammkernsondenbeprobung resultierenden Werte liegen in allen Fällen deutlich niedriger. Hinsichtlich der Erfassung des Grobbodens sowie der Grobbodenfraktion $> 6,3$ mm kommen alle Verfahren zu ähnlichen Ergebnissen. Bei der Substratgruppe Lehm weist die Beprobung mit Rammkernsonde tendenziell etwas geringere Grobbodenanteile aus als die beiden anderen Verfahren. Dies dürfte jedoch auf Effekte der kleinräumigen Bodenvariabilität zurückzuführen und damit zufällig sein. In den Feinbodenvorräten spiegeln sich die unterschiedlichen Werte der Trockenrohdichten wider. Infolge geringerer Trockenrohdichten bei der Rammkernsondenbeprobung sind bei diesem Verfahren auch die Feinbodenvorräte vergleichsweise niedriger. Bei den Substratgruppen Schluff, Sand und Lehmsand macht dieser Unterschied 20 – 25 % des Feinbodenvorrates aus. Bei den Lehmstandorten kompensiert der mit der Rammkernsonde ermittelte geringere Grobbodenanteil den Effekt der geringeren TRD auf den Feinbodenvorrat, so dass für diese Substratgruppe bei allen Verfahren Feinbodenvorräte in gleicher Größenordnung berechnet wurden.

4.2.2 Vergleich von innerstandörtlicher und methodischer Variabilität

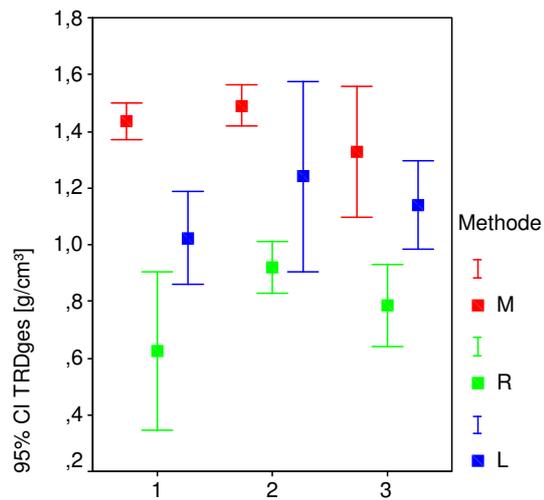
Um einen Einblick in die kleinräumige standörtliche Variabilität (Unterschiede zwischen den drei Teilflächen der Untersuchungspunkte) zu gewinnen, und diese mit den verfahrensbedingten Differenzen vergleichen zu können, sind in Abb. 9 die Trockenrohdichten (gesamt) für alle Flächen und Verfahren dargestellt. Bei der Betrachtung der Konfidenzbereiche ist der teilweise geringe Stichprobenumfang als Ursache erhöhter Vertrauensintervalle zu berücksichtigen, welcher aus Tab. 6 hervorgeht. Im Normalfall ist der Stichprobenumfang $n=5$. Abweichungen ergaben sich, wenn eine Probennahme (nach drei Versuchen) aufgrund zu hoher Steingehalte oder zu trockener Sandproben nicht erfolgen konnte. Insbesondere bei den Flächen 16004, 16034 und 16054 sind die Stichprobenumfänge deshalb teilweise so gering, dass eine Interpretation der Konfidenzintervalle nicht möglich ist.

Bei der Betrachtung der Einzelflächen spiegelt sich der oben genannte Befund wider, wonach die Rammkernsondenbeprobung zu tendenziell geringeren Trockenrohdichten führt als die Beprobung mit Murachschem Wurzelbohrer und Liner. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass bei der Beprobung mit Rammkernsonde der Bodenverdichtung durch Anpassung der entnommenen Bohrkernlänge – und damit des Entnahmevolumentens – an die im Gelände ermittelte Stauchung routinemäßig Rechnung getragen wurde. Bei der Beprobung mit Liner und Wurzelbohrer blieben Stauchungseffekte indes unberücksichtigt. Es ist also davon auszugehen, dass die ermittelten Unterschiede der Trockenrohdichte zwischen Liner und Murachbohrer einerseits und Rammkernsonde andererseits hierin begründet liegen, die Bodendichte bei den beiden erstgenannten Verfahren mithin tendenziell überschätzt wird. Wie aus den Darstellungen in Abb. 9 zu erkennen ist, liegt der Betrag dieser Überschätzung meist deutlich höher als die Variabilität zwischen den einzelnen Teilflächen pro BZE-Punkt. So befinden sich die standörtlichen Werte an den jeweiligen drei Teilflächen im allgemeinen bei Betrachtung eines einzelnen Beprobungsverfahrens in ähnlichen Größenordnungen; die Abweichungen zwischen den genannten Verfahren sind indes erheblich. Nur in wenigen Ausnahmen befinden sich die Werte der Trockenrohdichte bei allen Verfahren in einer annähernd gleichen Größenordnung.

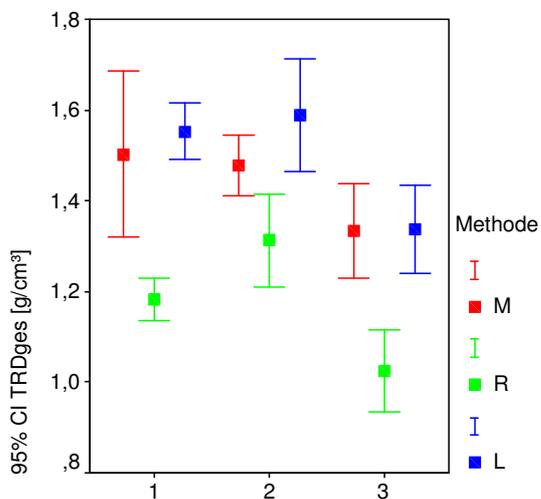
Die Lage der Teilflächen an den BZE-Punkten ergibt sich nach Heinkele et al. (2005) aus einem Kreis um den BZE-Mittelpunkt von 10 m Radius. Dies macht deutlich, dass allein das verwendete Beprobungsverfahren bzw. die Berücksichtigung oder Nicht-Berücksichtigung der Bodenstauchung bei der Bohrkernentnahme zu Differenzen der ermittelten Trockenrohdichte führt, welche größenordnungsmäßig deutlich über der bestehenden Bodenvariabilität innerhalb einer Fläche von ca. 300 m² liegt.



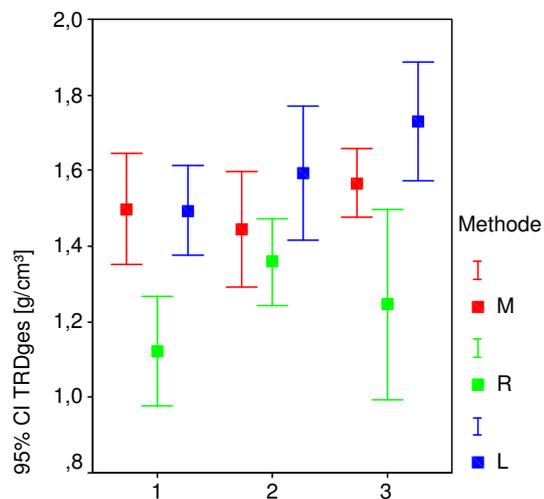
Fläche 3001, TF 1-3



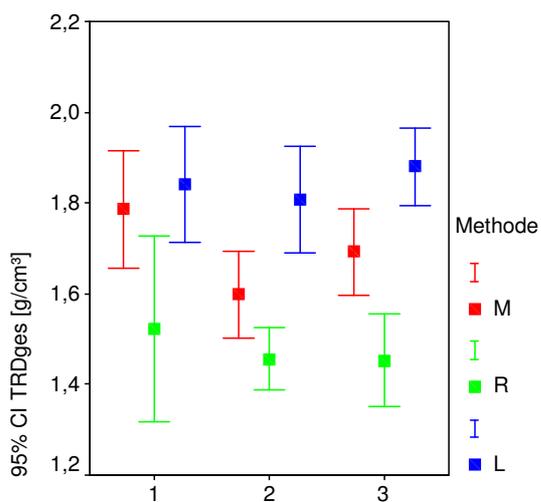
Fläche 3031, TF 1-3



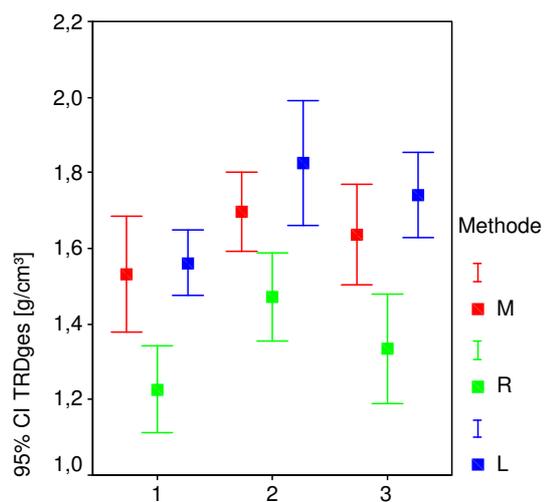
Fläche 3066, TF 1-3



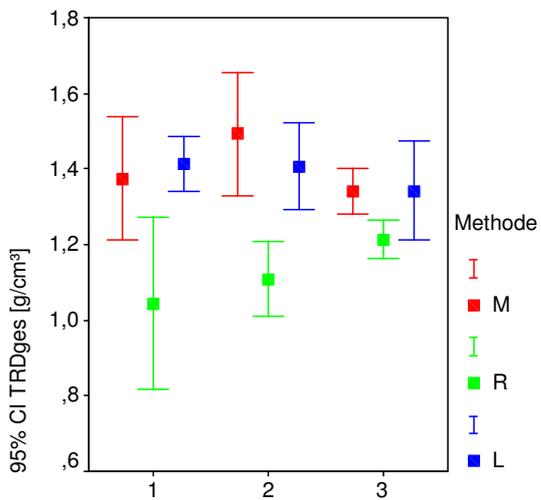
Fläche 3111, TF 1-3



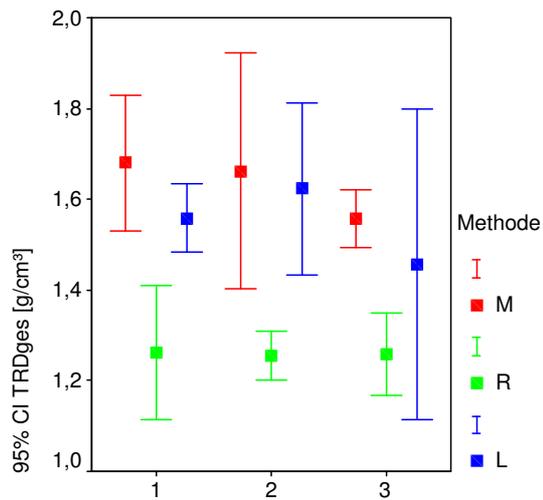
Fläche 3144, TF 1-3



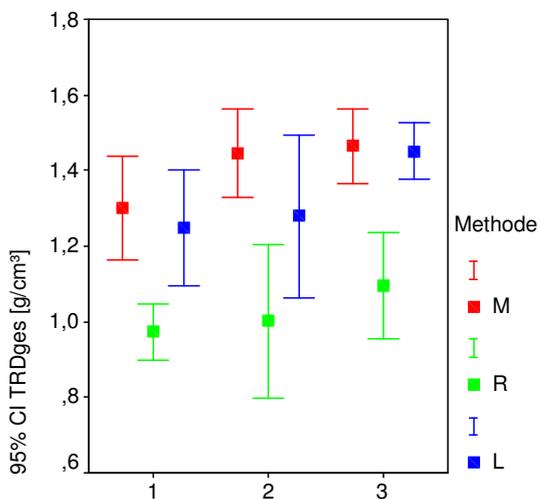
Fläche 3152, TF 1-3



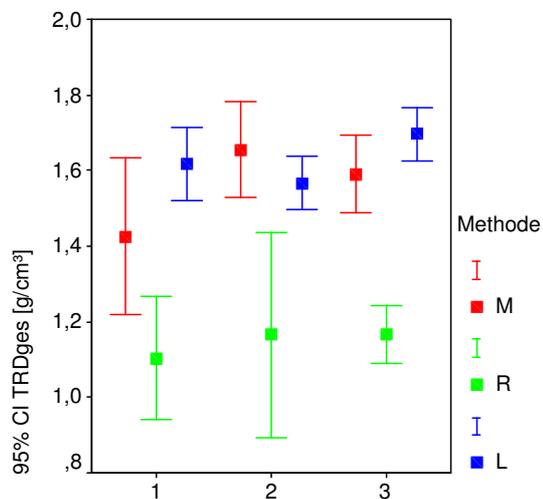
Fläche 3187, TF 1-3



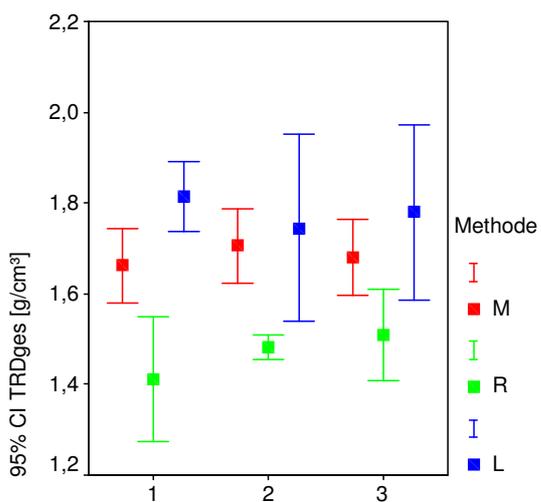
Fläche 6054, TF 1-3



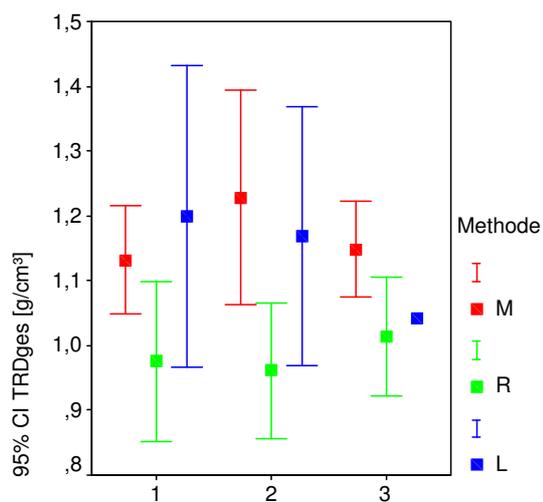
Fläche 7142, TF 1-3



Fläche 12002, TF 1-3



Fläche 12142, TF 1-3



Fläche 16004, TF 1-3

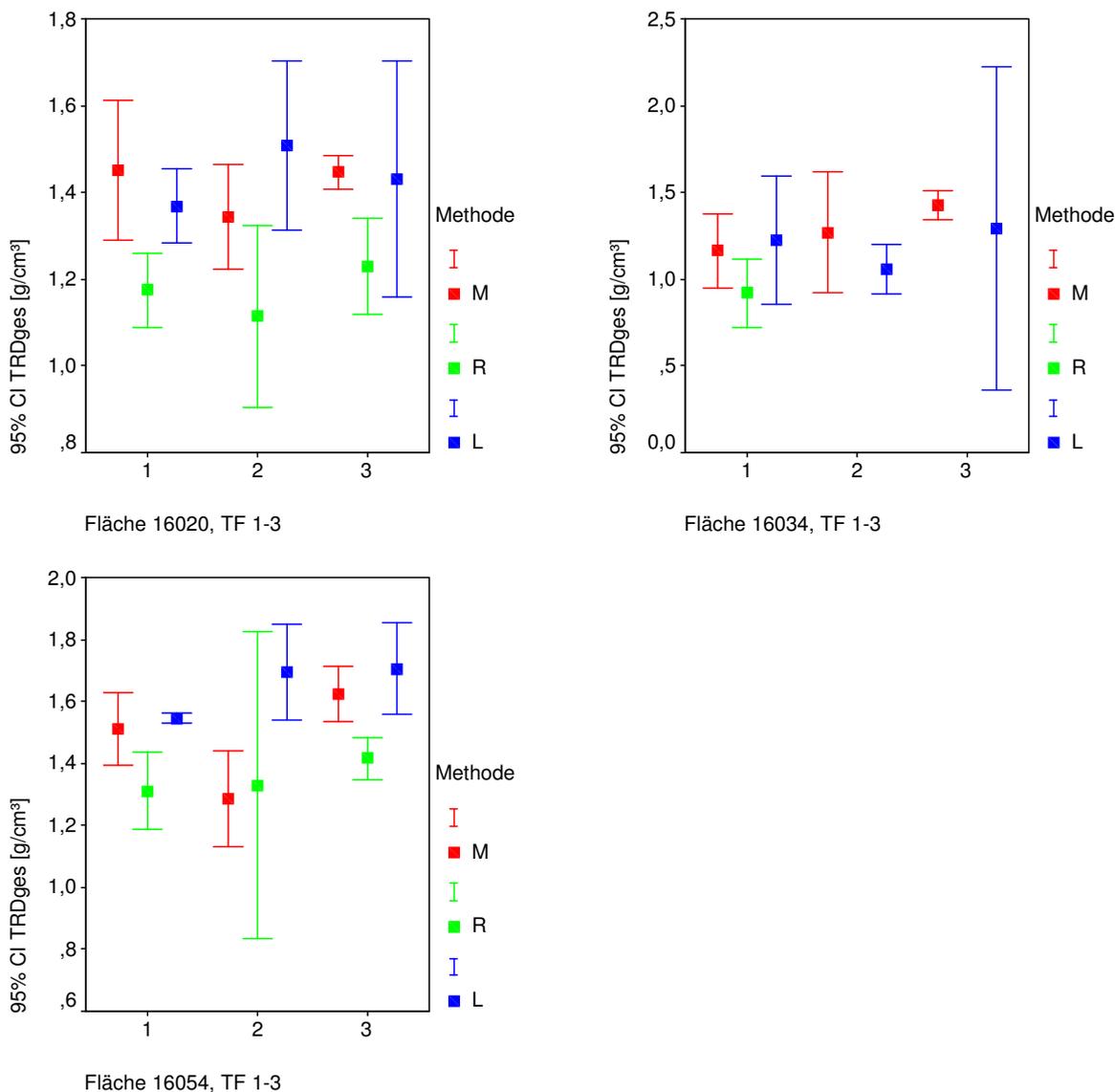


Abb. 9: Trockenrohdichte (gesamt) an den Teilflächen der Untersuchungspunkte (Mittelwert und 95 %-Konfidenzbereich); Tiefenstufe 17-22 cm;
M = Murachscher Wurzelbohrer, R = Rammkernsonde, L = AMS Core Sampler mit Liner

Tab. 6: Anzahl der mit den verschiedenen Verfahren gewonnenen Proben auf den Teilflächen der BZE-Punkte

Fläche	TF	Verfahren	Anzahl
3001	1	Wurzelbohrer	5
3001	1	RKS	5
3001	1	Liner	5
3001	2	Wurzelbohrer	5
3001	2	RKS	5
3001	2	Liner	5
3001	3	Wurzelbohrer	5
3001	3	RKS	5
3001	3	Liner	5
3031	1	Wurzelbohrer	5
3031	1	RKS	4

Fläche	TF	Verfahren	Anzahl
7142	1	Wurzelbohrer	5
7142	1	RKS	5
7142	1	Liner	5
7142	2	Wurzelbohrer	5
7142	2	RKS	5
7142	2	Liner	4
7142	3	Wurzelbohrer	5
7142	3	RKS	5
7142	3	Liner	4
12002	1	Wurzelbohrer	5
12002	1	RKS	5

3031	1	Liner	4
3031	2	Wurzelbohrer	5
3031	2	RKS	5
3031	2	Liner	5
3031	3	Wurzelbohrer	5
3031	3	RKS	4
3031	3	Liner	5
3066	1	Wurzelbohrer	5
3066	1	RKS	5
3066	1	Liner	5
3066	2	Wurzelbohrer	4
3066	2	RKS	5
3066	2	Liner	5
3066	3	Wurzelbohrer	5
3066	3	RKS	5
3066	3	Liner	5
3111	1	Wurzelbohrer	5
3111	1	RKS	5
3111	1	Liner	5
3111	2	Wurzelbohrer	5
3111	2	RKS	4
3111	2	Liner	5
3111	3	Wurzelbohrer	5
3111	3	RKS	5
3111	3	Liner	5
3144	1	Wurzelbohrer	5
3144	1	RKS	5
3144	1	Liner	5
3144	2	Wurzelbohrer	5
3144	2	RKS	5
3144	2	Liner	5
3144	3	Wurzelbohrer	5
3144	3	RKS	5
3144	3	Liner	4
3152	1	Wurzelbohrer	5
3152	1	RKS	5
3152	1	Liner	5
3152	2	Wurzelbohrer	5
3152	2	RKS	5
3152	2	Liner	5
3152	3	Wurzelbohrer	5
3152	3	RKS	5
3152	3	Liner	5
3187	1	Wurzelbohrer	5
3187	1	RKS	5
3187	1	Liner	5
3187	2	Wurzelbohrer	5
3187	2	RKS	5
3187	2	Liner	5
3187	3	Wurzelbohrer	5
3187	3	RKS	5

12002	1	Liner	5
12002	2	Wurzelbohrer	5
12002	2	RKS	5
12002	2	Liner	5
12002	3	Wurzelbohrer	5
12002	3	RKS	4
12002	3	Liner	4
12142	1	Wurzelbohrer	5
12142	1	RKS	5
12142	1	Liner	4
12142	2	Wurzelbohrer	5
12142	2	RKS	5
12142	2	Liner	5
12142	3	Wurzelbohrer	5
12142	3	RKS	5
12142	3	Liner	5
12147	1	Wurzelbohrer	5
12147	1	RKS	4
12147	1	Liner	4
13046	1	Wurzelbohrer	5
13046	1	RKS	4
13046	1	Liner	4
16004	1	Wurzelbohrer	5
16004	1	RKS	5
16004	1	Liner	5
16004	2	Wurzelbohrer	5
16004	2	RKS	5
16004	2	Liner	4
16004	3	Wurzelbohrer	5
16004	3	RKS	(3)
16004	3	Liner	(1)
16020	1	Wurzelbohrer	5
16020	1	RKS	5
16020	1	Liner	5
16020	2	Wurzelbohrer	5
16020	2	RKS	5
16020	2	Liner	5
16020	3	Wurzelbohrer	5
16020	3	RKS	5
16020	3	Liner	5
16034	1	Wurzelbohrer	5
16034	1	RKS	5
16034	1	Liner	4
16034	2	Wurzelbohrer	4
16034	2	Liner	4
16034	3	Wurzelbohrer	5
16034	3	Liner	(3)
16054	1	Wurzelbohrer	5
16054	1	RKS	5
16054	1	Liner	(2)
16054	2	Wurzelbohrer	4

3187	3	Liner	4
6054	1	Wurzelbohrer	5
6054	1	RKS	5
6054	1	Liner	5
6054	2	Wurzelbohrer	4
6054	2	RKS	4
6054	2	Liner	4
6054	3	Wurzelbohrer	5
6054	3	RKS	5
6054	3	Liner	4

16054	2	RKS	(2)
16054	2	Liner	4
16054	3	Wurzelbohrer	4
16054	3	RKS	5
16054	3	Liner	5

4.2.3 Vergleich mit Stechzylinderbeprobung und Volumenersatzmethode

Auf der Basis der Teilflächenmittelwerte wurden die bei Heinkle et al. (2005) dargelegten aus der Beprobung mit 100 cm³- bzw. 250 cm³- Stechzylindern resultierenden Trockenrohdichten den Werten aus der Beprobung mit Murachbohrer, Rammkernsonde bzw. Liner gegenübergestellt (Abb. 10, Abb. 11). Die Abbildungen bestätigen, dass die Nicht-Berücksichtigung der Stauchung zu erhöhten Trockenrohdichtewerten führt. Insbesondere die mit Liner und Murachbohrer ermittelten Werte im Bereich > 1,5 g/cm³ korrespondieren mit erheblich kleineren Trockenrohdichten der Stechzylinderbeprobung und dürften das Ergebnis einer Bodenstauchung darstellen. Die Werte der mit Stauchungsfaktoren bereinigten Rammkernsondenbeprobung sind größenordnungsmäßig mit den Werten der Stechzylinderbeprobung vergleichbar, liegen aber tendenziell leicht unter diesen. Dies könnte mit dem verwendeten linearen Ansatz begründet sein, mit dem die Stauchung berücksichtigt wird (Kap. 4.1.1), da die Stauchung in 17-22 cm geringer ist als im Oberboden und eventuell auch geringer als im Mittel des gesamten Bohrkerns, welcher für die Berechnung der Stauchungsfaktoren zugrunde gelegt wird.

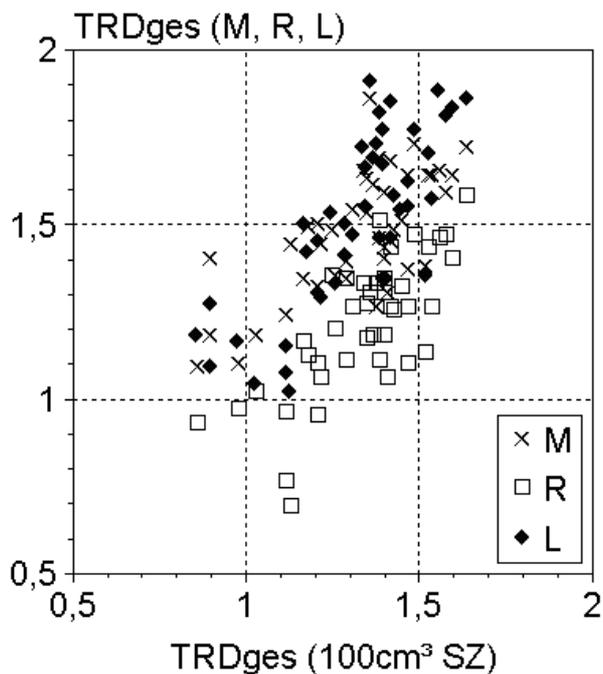


Abb. 10: Gegenüberstellung der Trockenrohddichte (gesamt) aus 100 cm³-Stechzylinderbeprobung und Beprobung mittels Murchbohrer, Rammkernsonde und Liner; Tiefenstufe 17-22 cm;

M = Murachscher Wurzelbohrer, R = Rammkernsonde, L = AMS Core Sampler mit Liner

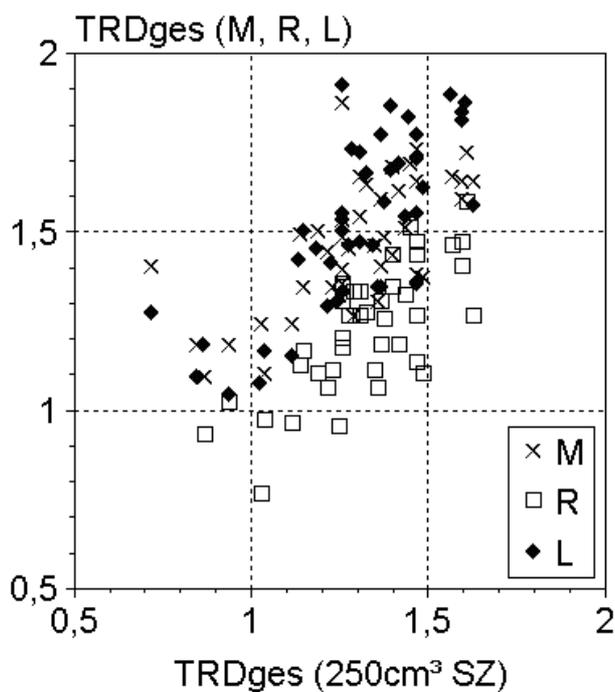


Abb. 11: Gegenüberstellung der Trockenrohddichte (gesamt) aus 250 cm³-Stechzylinderbeprobung und Beprobung mittels Murchbohrer, Rammkernsonde und Liner; Tiefenstufe 17-22 cm;

M = Murachscher Wurzelbohrer, R = Rammkernsonde, L = AMS Core Sampler mit Liner

Ein Vergleich der Grobbodenanteile – ermittelt aus der Beprobung mit 100 cm³- bzw. 250 cm³- Stechzylindern (Heinkele et al., 2005) sowie aus der Beprobung mit Murchbohrer, Rammkernsonde und Liner ist in Abb. 12 und Abb. 13 dargestellt. Aufgrund der eng beieinander liegenden Werte im Bereich < 10 Gew.-% werden alle Darstellungen zusätzlich im logarithmischen Maßstab gezeigt.

Aus den Darstellungen geht hervor, dass die Verfahren bis auf Einzelfälle vergleichbare Werte des Grobbodenanteils liefern. Bei den Einzelfällen mit erhöhter Abweichung zwischen der Stechzylinderbeprobung und den im Rahmen dieser Studie untersuchten Beprobungsverfahren könnte es sich um Effekte der kleinräumigen Variabilität handeln, wenn die Lage eines Probenahmepunkts von Heinkele et al. (2005) im Gelände nicht exakt identifizierbar war.

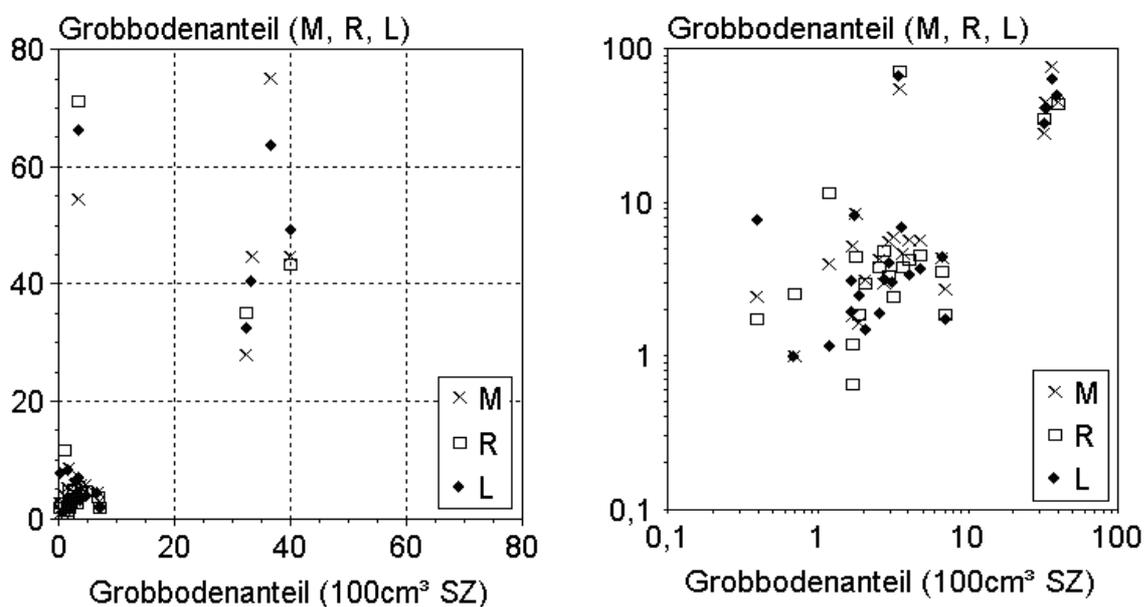


Abb. 12: Gegenüberstellung der Grobbodenanteile aus 100 cm³-Stechzylinderbeprobung und Beprobung mittels Murchbohrer, Rammkernsonde und Liner; Tiefenstufe 17-22 cm; M = Murchscher Wurzelbohrer, R = Rammkernsonde, L = AMS Core Sampler mit Liner

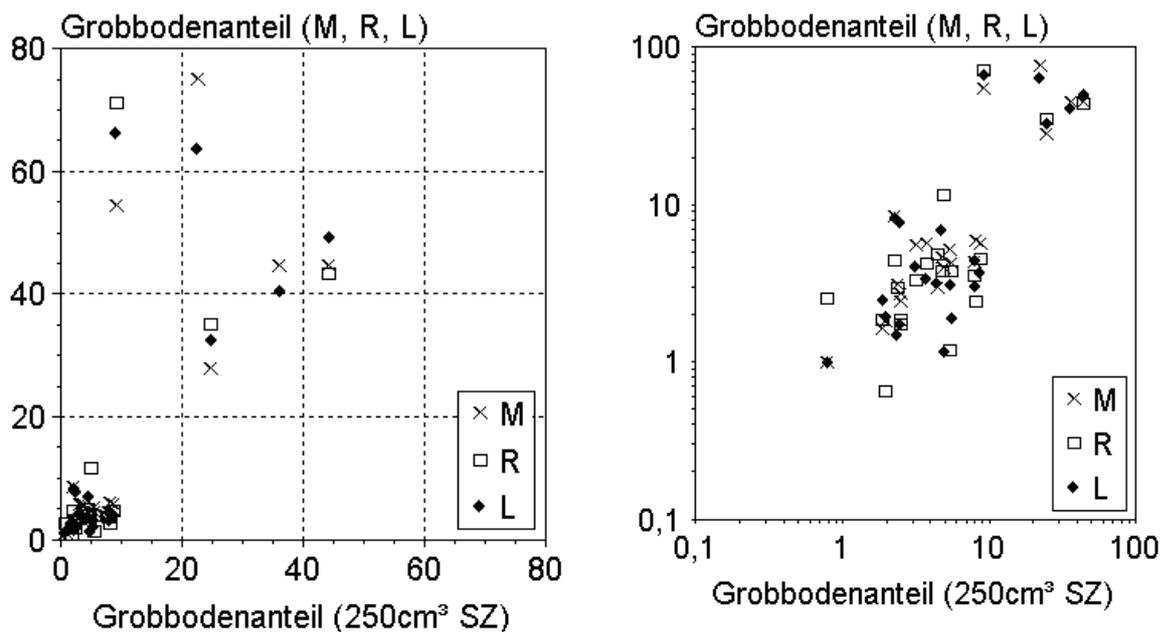


Abb. 13: Gegenüberstellung der Grobbodenanteile aus 250 cm³-Stechzylinderbeprobung und Beprobung mittels Murachbohrer, Rammkernsonde und Liner; Tiefenstufe 17-22 cm;
M = Murachscher Wurzelbohrer, R = Rammkernsonde, L = AMS Core Sampler mit Liner

In Abb. 14 sind die bei Heinkele et al. (2005) dokumentierten Ergebnisse der Volumenersatzmethode den hier geprüften Beprobungsverfahren gegenüber gestellt. Die Darstellungen machen deutlich, dass bei den Bohrverfahren gegenüber der Volumenersatzmethode tendenziell geringere Skelettanteile ermittelt werden. Das betrifft auch die Beprobung mittels Rammkernsonde. Alle im Rahmen dieser Studie geprüften Verfahren erscheinen mithin größervolumige Skelettanteile nicht repräsentativ zu erfassen und deshalb eher ein mit der Stechzylinderbeprobung als mit einem Volumenersatzverfahren (PU-Schaummethode, „Bällchenmethode“ vgl. Kap. 3.3) vergleichbares Ergebnis zu liefern. Für die Behandlung skelettreicher Böden wird deshalb in Kap. 4.3 eine neue „Kombinierte Methode“ zur Ermittlung von Grus- bzw. Kies-Anteil mittels volumengerechter sowie nicht volumengerechter Beprobung und Abschätzung des Gehaltes an Steinen und Blöcken am Bodenprofil beschrieben.

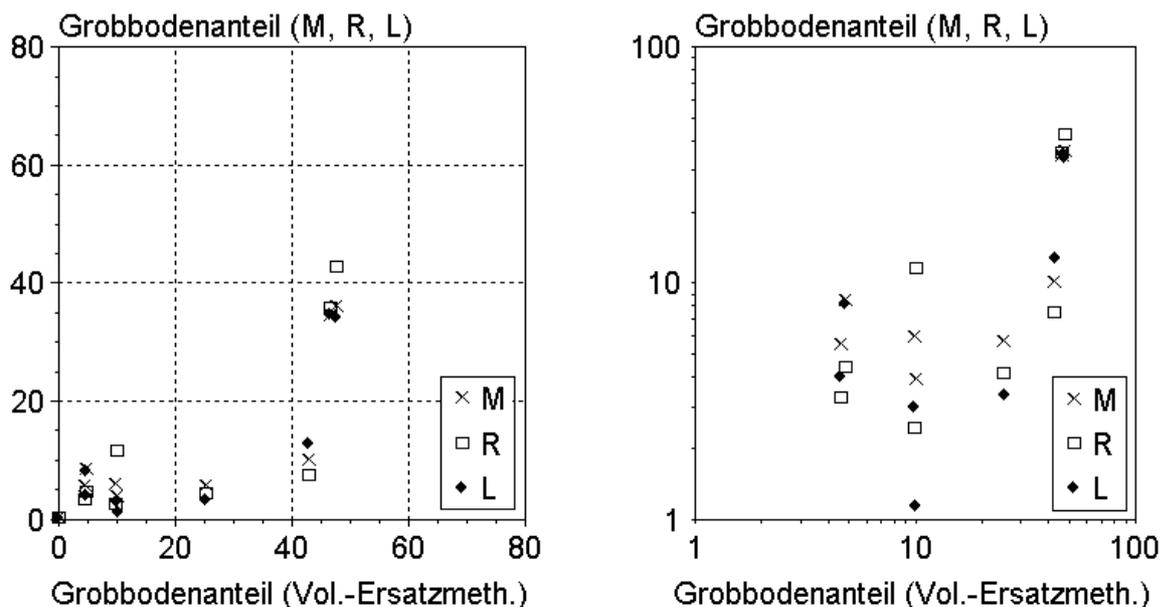


Abb. 14: Gegenüberstellung der Grobbodenanteile aus Volumenersatzmethode und Beprobung mittels Murchbohrer, Rammkernsonde und Liner; Tiefenstufe 17-22 cm; M = Murachscher Wurzelbohrer, R = Rammkernsonde, L = AMS Core Sampler mit Liner

4.2.4 Erfassung der einzelnen Grobbodenfraktionen

Für die Anwendung der „Kombinierten Methode“ (Kap. 4.3) ist zu prüfen, bis zu welcher Skelettfraktion bei der volumengerechten Beprobung Partikel erfasst werden. Bei der „Kombinierten Methode“ wird vorausgesetzt, dass eine Erfassung des Grobbodens bis 20 mm Äquivalentdurchmesser möglich ist und für die Erfassung der Fraktionen > 20 mm eine größere Menge gestörten Bodenmaterials mittels Schippe oder Spaten heranzuziehen ist. Abb. 15 zeigt in diesem Zusammenhang, dass bei den hier getesteten Verfahren Rammkernsonde, Murachbohrer und Liner ein enger Zusammenhang besteht zwischen dem Skelettanteil (Fraktionen > 2 mm) und dem Anteil der Fraktionen > 6,3 mm. Zwischen den Verfahren ist diesbezüglich kein Unterschied zu erkennen. Es wird deutlich, dass der Grobbodenanteil bei den untersuchten Böden maßgeblich vom Mittelgrus bzw. Mittelkiesanteil (6,3 – 20 mm Äquivalentdurchmesser) bestimmt wird. Dieses Ergebnis kann als Hinweis dafür interpretiert werden, dass die Fraktion 2 – 20 mm durch die geprüften Bohrgeräte mit hinreichender Repräsentanz erfasst wird. Dieser Befund dürfte auch auf Stechzylinder mit vergleichbarer Öffnung übertragbar sein.

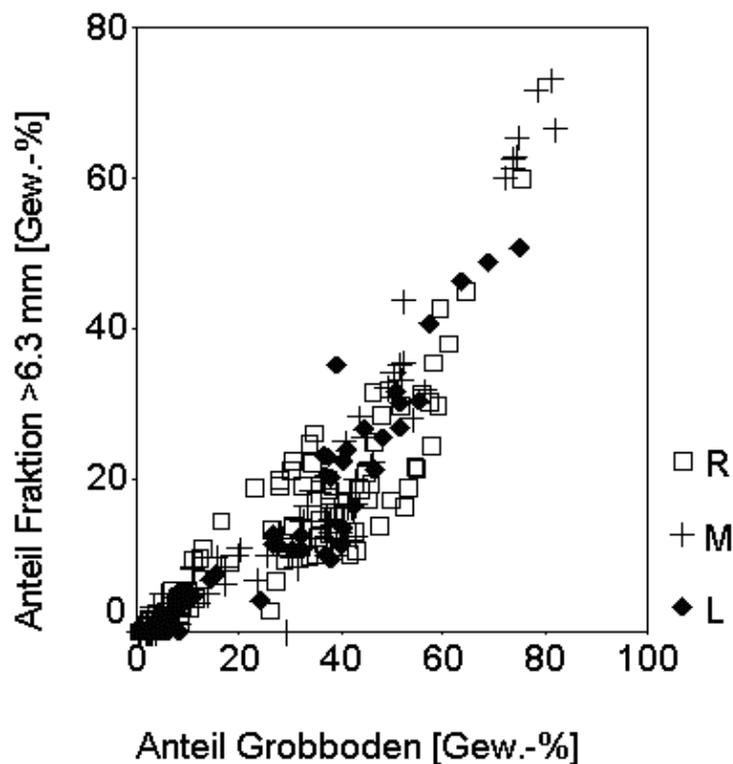


Abb. 15: Beziehung zwischen Anteil Grobboden und Anteil der Fraktion > 6,3 mm stratifiziert nach Untersuchungsmethoden; Tiefenstufe 17-22 cm;
M = Murachscher Wurzelbohrer, R = Rammkernsonde, L = AMS Core Sampler mit Liner

4.2.5 Eignung der Verfahren für den Unterboden

Wie in Kap. 4.1.2 dargelegt, erwies sich das Verfahren AMS Core Sampler mit Liner für die Beprobung des Unterbodens als ungeeignet. Auch der Murachsche Wurzelbohrer ist nur einsetzbar, wenn für den zweiten und ggfs. dritten Einschlag Bohrköpfe mit geringeren Durchmessern verwendet werden, da es ansonsten zu Bodenverschleppung und Verfälschung der Ergebnisse kommen kann. Für die Tiefenstufe 30 - 45 cm wurden sowohl Bohrdaten mit Rammkernsonde als auch mit Wurzelbohrer gewonnen, welche in Abb. 16 vergleichend gegenübergestellt sind. Bei den Darstellungen der Trockenrohdichte und des Anteils an Grobboden handelt es sich um die 95 %-Konfidenzbereiche der Mittelwerte von 5 Einzelwerten an der jeweiligen Teilfläche 1 der ausgewählten Untersuchungspunkte.

Während beim Grobbodenanteil gut vergleichbare Ergebnisse erzielt wurden, gibt es bei der Trockenrohdichte größere Abweichungen. Insgesamt sind die Trockenrohdichten beim Murachbohrer (wie auch schon im Oberboden beobachtet) tendenziell eher zu hoch, was mit der nicht berücksichtigten Stauchung begründet werden kann (Kap. 4.2.2). Die Unterbodenbeprobung führt mithin zu analogen Ergebnissen wie die Beprobung des Oberbodens. Der extrem geringe TRD-Wert bei der RKS-Beprobung bei Fläche 3031 (Abb. 16) ist nicht erklärbar. Alle 5 Werte der Rammkernsondenbeprobung liegen hier in einer relativ engen Spanne um $0,7 \text{ g/cm}^3$ während der Wert des Murachschen Wurzelbohrers bei $1,5 \text{ g/cm}^3$ liegt. Die Trockenrohdichte von $0,7 \text{ g/cm}^3$ erscheint für den Unterboden als sehr niedrig.

Die weitere Auswertung der Ergebnisse aus der Unterbodenbeprobung erfolgt im nächsten Kapitel durch die Gegenüberstellung der Werte mit den Ergebnissen der „Bällchenmethode“, die als Referenzwerte für den Unterboden verwendet werden.

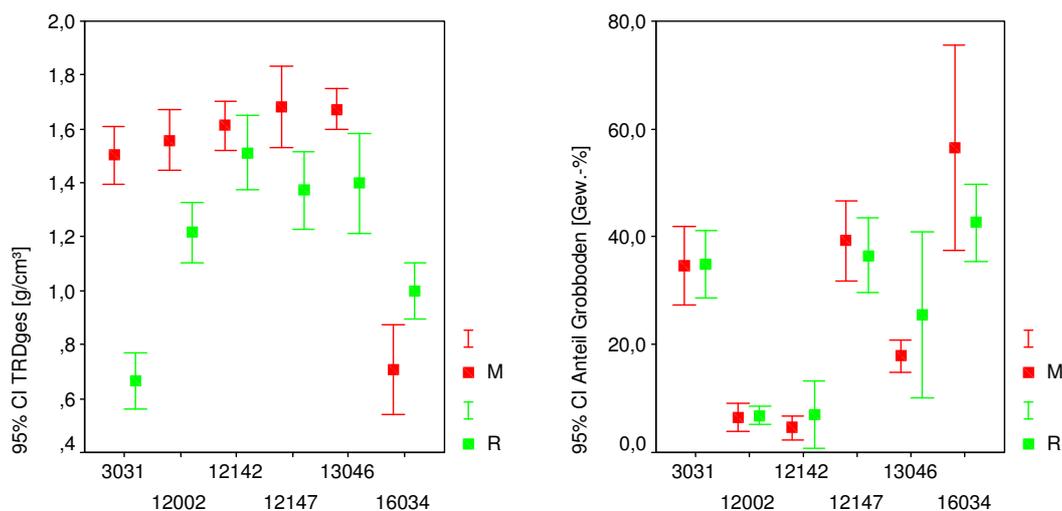


Abb. 16: Trockenrohddichte (gesamt) und Grobbodenanteil an Teilfläche 1 der Untersuchungspunkte (Mittelwert und 95 %-Konfidenzbereich); Tiefenstufe 30-45 cm; M = Murachscher Wurzelbohrer, R = Rammkernsonde, L = AMS Core Sampler mit Liner

4.3 „Kombiniertes Verfahren“ (Volumenprobe, Schippe/Spaten, Profilwand)

Unter dem „Kombinierten Verfahren“ wird in dieser Studie eine Methode verstanden, bei welcher sich der gesamte volumetrische Grobbodenanteil als Summe der Grobbodenfraktionen 2 - 6,3 (20) mm, 6,3 (20) - 63 mm sowie > 63 mm ergibt, welche jeweils mit unterschiedlichen, den Korngrößen adäquaten Probenahme- bzw. Schätzverfahren erfasst werden sollen. Die Fraktion 2 - 6,3 (20) mm soll dabei aus einer volumengerecht entnommenen Probe (Stechzylinder, Murachbohrer etc.), die Fraktion 6,3 (20) - 63 mm aus einer gestörten nicht volumengerechten Probe (Schippe/Spaten) und die Fraktion > 63 mm aus der Schätzung an der Profilwand ermittelt werden. Für die Ermittlung des Skelettvolumens ist zusätzlich die Dichte des Grobbodens (D_{GB}) und zur Berechnung des Feinbodenvorrates die Trockenrohddichte des Feinbodens (TRD_{FB}) notwendig. Für die Berechnung von TRD_{FB} wird die volumengerecht entnommene Bodenprobe herangezogen. D_{GB} wurde in dieser Studie mittels Pyknometer ermittelt. Alternativ kann hierzu das Verfahren der Tauchwägung verwendet werden.

Die Probennahme erfolgte auf den hierfür vorgesehenen Untersuchungspunkten (Kap. 3.1) in den Tiefenstufen 17-22 cm, 30-45 cm und 60-75 cm. Ziel ist der Vergleich zwischen dem mit Hilfe der „kombinierten Methode“ ermittelten Feinbodenvorrat und dem Referenzwert, welcher mittels „Bällchenmethode“ (Kap. 3.3) als Volumenersatzverfahren ermittelt wird. Auf die vorgesehene Untersuchung des Unterbodens von Fläche 16034 musste aufgrund von anstehendem Festgestein verzichtet werden, da die für das Volumenersatzverfahren notwendige Anlage der Bodengrube nicht realisierbar war.

4.3.1 Ergebnisse der volumenbezogenen Probennahme

In Tab. 7 sind die Trockenrohddichten des Feinbodens (TRD_{FB}) sowie die Grobbodenanteile der Fraktion 2-20 mm dargestellt. Die TRD_{FB} wurde nach der folgenden Gleichung auf der Grundlage der Beprobung mit 250 cm³-Stechzylindern mit jeweils fünf Wiederholungen berechnet (Kap. 4.4.1.2):

$$TRD_{FB} = \frac{M_{gesSZ} - M_{GBSZ}}{V_{gesSZ} - \frac{M_{GBSZ}}{D_{GB}}}, \text{ wobei}$$

- M_{gesSZ} Masse der mittels Stechzylinder (bzw. Wurzelbohrer etc.) entnommenen Bodenprobe [g]
 V_{gesSZ} Volumen des Stechzylinders (bzw. Bohrkerns aus dem Wurzelbohrer etc.) [cm³]
 M_{GBSZ} Masse des Grobbodens in der mittels Stechzylinder (bzw. Wurzelbohrer etc.) entnommenen Bodenprobe [g]
 D_{GB} Dichte des Grobbodens [g/cm³].

Bei den Standorten 12147 und 13046 konnte die Stechzylinderbeprobung aufgrund der erhöhten Skelettanteile nicht durchgeführt werden. Hier kamen Ministechzylinder mit einem Volumen von 6 cm³ für die Probenahme zum Einsatz (jeweils zehn Wiederholungen).

Bei den Standorten mit Stechzylinderbeprobung wurde der Siebrückstand nach Siebung mit der Maschenweite 2 mm dahingehend geprüft, ob sich Fraktionen > 20 mm in der Probe befanden. Dies traf in keinem Fall zu. Bei den Standorten mit Ministechzylinderbeprobung wurden die Skelettmassen lediglich für die Ermittlung von TRD_{FB} nach der oben genannten Gleichung herangezogen. Sie wurden nicht weiter für Aussagen zum Anteil der Skelettfractionen 2-20 mm verwendet, da hierfür das Probenvolumen der Ministechzylinder zu gering ist. In diesen Fällen wurde der Anteil der Fraktion 2 – 20 mm in Gew.-% aus einer gestörten Probe (Spaten/Schippe) ermittelt.

Das Grobbodenmaterial wurde mit weiterem Bodenskelett einer zusätzlichen Beutelprobe flächen- und tiefenstufenweise vereint, um mittels Pyknometer jeweils die durchschnittliche Dichte dieses Materials zu bestimmen.

Tab. 7: Trockenrohddichte des Feinbodens (TRD_{FB}) und Grobbodenanteil der Fraktion 2 - 20 mm

Fläche	Tiefenstufe [cm]	TRD _{FB} [g/cm ³]	Standardabw. TRD _{FB} [g/cm ³]	Grobboden 2-20mm [Gew.-%]	Standardabw. Grobboden 2-20mm [Gew.-%]
3031	17-22	0,89	0,09	36,0	4,9
3031	30-45	0,86	0,07	35,1	3,8
3031	60-75	0,83	0,14	42,5	5,2
12002	17-22	1,36	0,06	5,3	0,6
12002	30-45	1,42	0,09	7,4	1,2
12002	60-75	1,48	0,05	8,5	2,1
12142	17-22	1,40	0,10	3,8	0,3
12142	30-45	1,51	0,06	4,2	0,4
12142	60-75	1,55	0,06	3,5	0,3
12147	17-22	1,26	0,10	36,9	2,2
12147	30-45	1,27	0,14	39,7	2,9
12147	60-75	1,45	0,18	42,6	3,0
13046	17-22	1,36	0,12	9,1	2,9
13046	30-45	1,43	0,13	32,3	3,2
13046	60-75	1,46	0,19	33,6	6,3

4.3.2 Ergebnisse der nicht volumengerechten Probennahme

Beim „Kombinierten Verfahren“ wird angestrebt, die Grobbodenfraktion im Bereich von Mittel- und Grobgrus bzw. Mittel- und Grobkies (6,3 - 63 mm Äquivalentdurchmesser) anhand einer gestörten Probe, welche mittels Spaten oder Schippe entnommen werden kann, zu ermitteln. Um Aussagen zur hierfür notwendigen Probenmenge zu erhalten, wurde der Bodenaushub, welcher bei der „Bällchenmethode“ (Kap. 3.3) gewonnen wurde, herangezogen.

In Abb. 17 ist die Abweichung des Anteils der Fraktion 6,3 - 63 mm für bestimmte Entnahmemengen von den jeweiligen Referenzwerten dargestellt. Als Referenzwerte dienen die Anteile der Fraktion 6,3 - 63 mm am Gesamtaushub (ca. 120 bzw. 160 kg pro Standort). Es wurden die Ergebnisse der Standorte 12147 und 13046 berücksichtigt, da hier mit 10 bzw. 15 Gew.-% erhöhte Skelettgehalte im fraglichen Bereich vorliegen.

Es zeigt sich, dass die dargestellten Abweichungen bei einer entnommenen Bodenmasse von ca. 2 – 5 kg nur wenig von den Abweichungen bei Entnahme von 13 – 17 kg Boden differieren. Insgesamt liegen die Abweichungen bei sehr geringen Probenmengen (< 2 kg) tendenziell im negativen Bereich, d.h. die Skelettgehalte der genannten Fraktion werden unterschätzt. Um die absoluten Abweichungen auf den Bereich von +/- 2 Gew.-% zu reduzieren, deutet sich bei diesen Standorten an, dass das minimale Entnahmevervolumen optimalerweise mindestens 5 - 10 kg betragen sollte. Allerdings scheinen hohe Entnahmemengen (> 10 kg) nur unwesentlich genauere Ergebnisse zu liefern als die dargestellten geringen Entnahmevervolumen. Eine Menge von 2 kg sollte jedoch auf keinen Fall unterschritten werden. Eine Übertragung dieser Ergebnisse auf Standorte mit noch höheren Grobbodenanteilen (> 15 Gew.-%) im Körnungsbereich 6,3 – 63 mm ist jedoch nicht möglich. In diesem Fall wäre die notwendige Beprobungsmenge vermutlich größer.

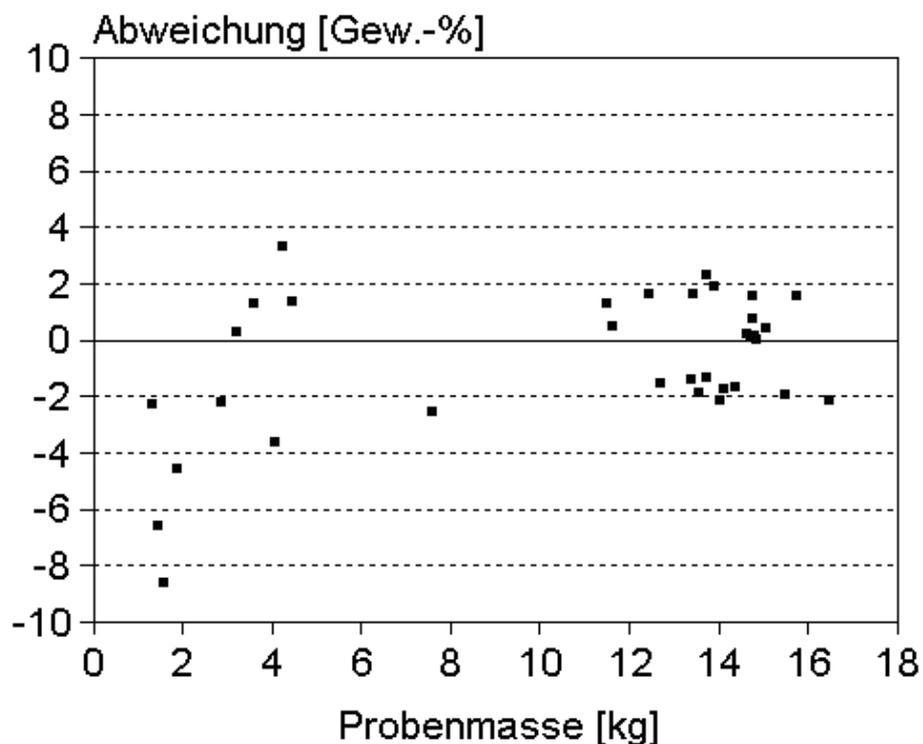


Abb. 17: Abweichung des Grobbodenanteils 6,3 - 63 mm vom Referenzwert (= Anteil dieser Fraktion am Gesamtaushub von 120 bzw. 170 kg) in Abhängigkeit von der Probenmasse

In Tab. 8 sind die aus der nicht volumengerechten Probe ermittelten Grobbodenanteile der Fraktion 20 - 63 mm an der Gesamtprobe in Gew.-% dargestellt. Zur Ermittlung dieser Werte wurden jeweils ca. 7 kg mit Hilfe einer Schippe entnommenes Bodenmaterial herangezogen. Der Vergleich dieser Werte mit den Grobbodenanteilen der Fraktion 2 – 20 mm (Tab. 7) macht deutlich, dass die aus der volumengerechten Probe abgeleiteten Fraktionen für die Gesamtgrobbodenabschätzung der hier untersuchten Standorte wesentlich bedeutsamer sind. Der Grobgrus- bzw. Grobkiesanteil (20 - 63 mm) ist gegenüber dem Anteil an Fein- und Mittelgrus bzw. Fein- und Mittelkies (2 – 20 mm) um einen 10er Faktor geringer.

Tab. 8: Grobbodenanteile der Fraktion 20 – 63 mm

Fläche	Tiefenstufe [cm]	Grobboden 20-63 mm [Gew.-%]
3031	17-22	2,8
3031	30-45	5,2
3031	60-75	4,7
12002	17-22	1,4
12002	30-45	2,1
12002	60-75	1,6
12142	17-22	0,6
12142	30-45	0,2
12142	60-75	0,1
12147	17-22	1,4
12147	30-45	1,3
12147	60-75	3,4
13046	17-22	1,7
13046	30-45	5,7
13046	60-75	9,8

4.3.3 Ergebnisse der Schätzung am Bodenprofil

Für die Ermittlung der Grobbodenfraktion > 6,3 mm ist im „Kombinierten Verfahren“ eine Schätzung an der Profilwand vorgesehen. Im Rahmen dieser Studie wurde nicht nur die Fläche der sichtbaren Skelettfractionen geschätzt, sondern zusätzlich wurden diese auch exakt vermessen (Kap. 3.3.1). Dadurch wurden für die Überprüfung der Anwendbarkeit des Verfahrens rein subjektive Schätzfehler weitgehend ausgeklammert. Es zeigte sich allerdings, dass es nicht ausreichend ist, einmalig an einer Profilwand diese Schätzung vorzunehmen. Vielmehr muss die visuelle Flächenschätzung mehrmals an wiederholt abgestochenen Profilwänden erfolgen und dann die Schätzergebnisse gemittelt werden. Im Gesamtergebnis ergaben sich die in Tab. 9 dargestellten Grobbodenanteile der Fraktion > 63 mm auf den einzelnen Untersuchungsflächen.

Tab. 9: Grobbodenanteile der Fraktion > 63 mm

Fläche	Grobboden > 63 mm [Vol.-%]
3031	5,9
12002	0,2
12142	0
12147	0
13046	0,5

4.3.4 Ermittlung von Gesamtgrobbodenvolumen und Feinbodenvorrat

Anhand der Grobbodenanteile der Fraktionen 2 – 20 mm (Tab. 7), 20 – 63 mm (Tab. 8) und > 63 mm (Tab. 9) lassen sich unter Berücksichtigung der Grobbodendichten die volumenbezogenen Gesamtgrobbodenanteile summarisch berechnen. Diese Berechnung erfolgte für den Bodenraum von 10 – 90 cm Tiefe, für welchen anhand der „Bällchenmethode“ ermittelte Referenzwerte des Grobbodenvolumens vorliegen.

Aus den Stechzylinderproben lässt sich der Volumenanteil des Grobbodens aus Grobbodenmasse und -dichte berechnen (Tab. 10; Spalte 3).

Für die Ableitung des volumetrischen Grobbodenanteils der Fraktion 20 – 63 mm ist zunächst die Berechnung des Volumens der Spaten-/Schippenprobe notwendig, welches sich bei bekannter Feinbodendichte nach folgender Gleichung bestimmen lässt:

$$V_{ges}SCH = \frac{M_{ges}SCH - M_{GB}SCH + TRD_{FB} \times \frac{M_{GB}SCH}{D_{GB}}}{TRD_{FB}}, \text{ wobei}$$

$V_{ges}SCH$	Volumen der Schippen-/Spatenprobe in ungestörter Lagerung [cm ³]
TRD_{FB}	Trockenrohddichte des Feinbodens [g/cm ³]
$M_{ges}SCH$	Masse der Schippen-/Spatenprobe [g]
$M_{GB}SCH$	Masse des Grobbodens in der Schippen-/Spatenprobe [g]
D_{GB}	Dichte des Grobbodens [g/cm ³].

Bei bekanntem Volumen des Schippenaushubs lässt sich der Volumenanteil des Grobbodens der Fraktion 20 – 63 mm aus Grobbodenmasse und -dichte berechnen (Tab. 10; Spalte 4).

In Spalte 5 der Tab. 10 sind die geschätzten volumetrischen Grobbodenanteile der Fraktion > 63 mm angegeben.

Die Summe der Grobbodenfraktionen ist Spalte 6 in Tab. 10 zu entnehmen.

Tab. 10: Volumetrische Grobbodenanteile der Fraktion 2 – 20 mm, 20 –63 mm und > 63 mm sowie Gesamtgrobbodenanteil

Fläche	Tiefenstufe [cm]	Grobboden 2-20 mm [Vol.-%]	Grobboden 20-63 mm [Vol.-%]	Grobboden > 63 mm [Vol.-%]	Gesamtgrobbodenanteil [Vol.-%]
3031	17-22	16,8	1,0	5,9	23,7
3031	30-45	15,8	1,9		23,6
3031	60-75	19,8	1,6		27,3
12002	17-22	3,0	0,8	0,2	4,0
12002	30-45	4,4	1,2		5,8
12002	60-75	5,3	1,1		6,6
12142	17-22	2,2	0,3	0	2,5
12142	30-45	2,6	0,1		2,7
12142	60-75	2,2	0,1		2,3
12147	17-22	21,8	0,7	0	22,5
12147	30-45	24,1	0,6		24,7
12147	60-75	28,9	1,9		30,8
13046	17-22	5,2	0,9	0,5	6,6
13046	30-45	21,5	3,4		25,4
13046	60-75	22,9	6,0		29,4

Für den Vergleich der Grobbodenanteile und Feinbodenvorräte, die mit Hilfe des Volumenersatzverfahrens („Bällchenmethode“) ermittelt worden sind, werden die für die Tiefenstufen 17 – 22 cm, 30 – 45 cm und 60 – 75 cm vorliegenden Daten wie folgt auf den Tiefenbereich 10 - 90 cm umgerechnet:

Werte aus 17 – 22 cm: verwendet für die Spanne 10 – 25 cm

Werte aus 30 – 45 cm: verwendet für die Spanne 25 – 50 cm

Werte aus 60 – 75 cm: verwendet für die Spanne 50 – 90 cm

Der Feinbodenvorrat errechnet sich dann für die Spanne 10 – 25 mm (Mächtigkeit $d = 15$ cm) beispielsweise für Standort 3031 wie folgt (vgl. Tab. 7, Tab. 10):

$$\begin{aligned}
 \text{FBV [t/ha]} &= \text{TRD}_{\text{FB}} * d * 100 * (1 - \text{Grobbodenanteil} / 100) \\
 &= 0,89 \text{ g/cm}^3 * 15 \text{ cm} * 100 * 0,763 \\
 &= 1018,6 \text{ t/ha}
 \end{aligned}$$

Die Feinbodenvorräte und Grobbodenvolumina im Bereich 10 – 90 cm Tiefe sind in Tab. 11 zusammenfassend dargestellt. Des weiteren sind hier die gesamten mittleren Grobbodenanteile für den Bereich 10- 90 cm Tiefe in Vol.-% wiedergegeben, welche durch Gewichtung der Spannen mit den jeweiligen Mächtigkeiten berechnet wurden. Die dargestellten Werte lassen sich direkt mit den aus dem Volumenersatzverfahren („Bällchenmethode“) abgeleiteten vergleichen, was im folgenden Abschnitt geschieht.

Tab. 11: Feinbodenvorräte und Grobbodenanteile im Tiefenbereich 10 – 90 cm

Fläche	<i>Feinboden- vorrat 10-25 cm [t/ha]</i>	<i>Feinboden- vorrat 25-50 cm [t/ha]</i>	<i>Feinboden- vorrat 50-90 cm [t/ha]</i>	Feinbodenvorrat 10-90 cm Tiefe [t/ha]	Grobbodenanteil 10-90 cm Tiefe [Vol.-%]
3031	1019	1642	2413	5074	25,5
12002	1958	3344	5529	10831	5,9
12142	2047	3673	6057	11778	2,5
12147	1464	2390	4013	7869	27,3
13046	1905	2666	4123	8695	23,9

4.3.5 Vergleich mit den Referenzwerten der „Bällchenmethode“

Mit Hilfe des Volumenersatzverfahrens nach der hier eingesetzten „Bällchenmethode“ (Kap. 3.3) wurden die in Tab. 12 dargestellten Massenanteile und Bodenvolumina ermittelt, welche für die Berechnung der Referenzwerte dienen. Aus den dargestellten Werten ergeben sich durchschnittliche Trockenrohdichten für die kompletten ausgehobenen Bodenmonolithe von 1,22 g/cm³ bis 1,64 g/cm³ bzw. auf den Feinboden bezogene Trockenrohdichten von 0,81 g/cm³ bis 1,58 g/cm³. Entsprechend den Ausführungen in Kap. 4.4.3 zur Messgenauigkeit der Grobbodendichte wurde für die volumenbezogenen Grobbodenanteile eine Skelettdichte von einheitlich 2,65 g/cm³ verwendet. Die ermittelten Feinbodenvorräte und Grobbodenvolumenanteile gehen aus Tab. 13 hervor. Ihnen sind die Werte, die sich aus dem „Kombinierten Verfahren“ (Kap. 4.3.4) ergaben, gegenübergestellt.

Tab. 12: Aus dem Volumenersatzverfahren („Bällchenmethode“) resultierende Fein- sowie fraktionierte Grobbodenmassen

Fläche	Volumen des ausgehobenen Bodenmonolithen [cm ³]	Masse Feinboden [g]	Masse Fraktion 2-20 mm [g] ^{*)}	Masse Fraktion 20-63 mm [g]	Masse Fraktion > 63 mm [g]
3031	175.869	109.760	98.050	6.115	815
12002	262.063	333.756	27.319	4.630	2.290
12142	175.869	266.443	9.627	8.050	1.190
12147	87.932	89.157	45.923	1.270	0
13046	181.912	236.347	43.909	14.010	6.371

Tab. 13: Gegenüberstellung von Feinbodenvorrat und Grobbodenvolumenanteil aus Volumenersatzverfahren (Referenzwert) und „Kombiniertem Verfahren“

Fläche	Referenzwert		„Kombiniertes Verfahren“	
	Feinbodenvorrat 10-90 cm Tiefe [t/ha]	Grobbodenanteil 10-90 cm Tiefe [Vol.-%]	Feinbodenvorrat 10-90 cm Tiefe [t/ha]	Grobbodenanteil 10-90 cm Tiefe [Vol.-%]
3031	4993	22,53	5074	25,5
12002	10317	4,93	10831	5,9
12142	11980	4,05	11778	2,5
12147	8111	20,25	7869	27,3
13046	10473	13,34	8695	23,9

Es zeigt sich, dass die Feinbodenvorräte - außer bei Standort 13046 - nur geringe Unterschiede (< 5 %) zwischen Referenzwert und Wert aus dem „Kombinierten Verfahren“ aufweisen. Bei Standort 13046 wurde ein gegenüber dem Referenzwert zu geringer Grobbodenanteil ermittelt, was dazu führt, dass der Feinbodenvorrat um fast 20 % zu gering berechnet wird. Dies ist vor allem auf zu geringe Anteile der mit der Stechzylinderbeprobung zu erfassenden Grobbodenfraktionen zurückzuführen, und ist in der kleinräumigen Variabilität der Grobbodenanteile begründet. Diese wurden anhand der fünf Stechzylinderparallelen offensichtlich nicht repräsentativ erfasst. Es zeigt sich indes, dass die Ergebnisse der Rammkernsondenbeprobung in diesem Fall zu repräsentativeren Ergebnissen geführt haben (Tab. 14). Die Gegenüberstellung von Grobbodenanteilen aus dem „Kombinierten Verfahren“

^{*)}Im Gelände wurde die Fraktion < 6,3 mm ausgesiebt. Die Masse des Feinbodens kann berechnet werden anhand des Anteils des Feinbodens an der gesamten Fraktion < 6,3 mm, welcher anhand der im Labor auf 2 mm ausgesiebten Proben gewonnen wurde. Diese Anteile stellen sich wie folgt dar:

Standort	Anteil Feinboden an der Fraktion < 6,3 mm	Anteil Grobboden an der Fraktion < 6,3 mm
3031 Oberboden	78,4	21,6
3031 Unterboden	65,1	34,9
12002 Oberboden	96,7	3,3
12002 Unterboden	94,2	5,8
12142 Oberboden	97,4	2,6
12142 Unterboden	98,5	1,5
12147 Oberboden	72,3	27,7
12147 Unterboden	69,9	30,1
13046 Oberboden	91,9	8,1
13046 Unterboden	88,9	11,1

bzw. aus der Rammkernsondenbeprobung und den Referenzwerten verdeutlicht, dass bei mindestens *mittel* skeletthaltigen Böden bei beiden Verfahren mit Fehleinschätzungen von 5 – 10 Vol.-% Grobboden zu rechnen ist (Abb. 18).

Tab. 14: Gegenüberstellung von Grobbodenvolumenanteil [Vol.-%] aus Volumenersatzverfahren (Referenzwert), „Kombiniertes Verfahren“ und Rammkernsondenbeprobung (RKS)

Fläche	Grobbodenanteil in Vol.-%				
	Referenzwert (Volumenersatz- verfahren 10–90 cm Tiefe)	„Kombiniertes Verfahren“	RKS 17-22 cm	RKS 30-45 cm	RKS 60-75 cm
3031	22,5	25,5	10,0	8,7	23,5
12002	4,9	5,9	1,9	3,2	7,5
12142	4,1	2,5	2,1	4,1	1,5
12147	20,3	27,3	21,1	19,0	23,2
13046	13,3	23,9	5,6	13,3	16,6

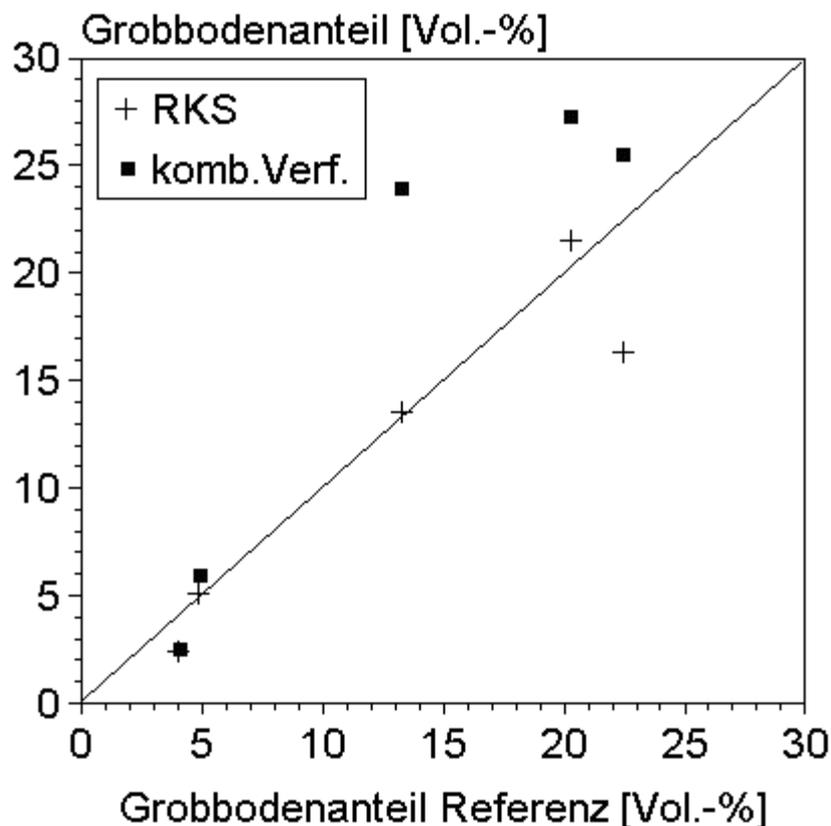


Abb. 18: Gegenüberstellung von Grobbodenanteil ermittelt aus der Rammkernsondenbeprobung bzw. dem „Kombinierten Verfahren“ und den jeweiligen Referenzwerten nach dem Volumenersatzverfahren („Bällchenmethode“)

Die Fehleinschätzung beim „Kombinierten Verfahren“ ergibt sich vor allem durch die nicht repräsentative Beprobung der Fraktion 2 – 20 mm mittels Stechzylinder, die bei den hier untersuchten Standorten den weitaus größten Teil des Grobodens ausmacht. Genauere Ergebnisse wären in vielen Fällen zu erzielen, wenn die Grobbodenfraktion 6,3 – 20 mm aus der gestörten Schippen-/Spatenprobe abgeleitet und die Stechzylinderprobe lediglich für die Fraktion 2 – 6,3 mm herangezogen würde. Die Zuarbeit zur BZE-Arbeitsanleitung bzw. zum Handbuch Forstliche Analytik (vgl. Lösungsalgorithmen in Kap. 4.4 sowie Anhang 1) erfolgte zu einem Zeitpunkt als die Geländeergebnisse dieser Studie noch nicht vollständig ausgewertet waren. Die dargelegten Befunde verdeutlichen nunmehr, dass der Grobgrus- bzw. Grobkiesanteil (20 - 63 mm) gegenüber dem Anteil an Fein- und Mittelgrus bzw. Fein- und Mittelkies (2 – 20 mm) bei den untersuchten Standorten um einen 10er Faktor geringer ist. Auf ähnlichen Standorten wäre es deshalb grundsätzlich empfehlenswert, die Fraktion 2 - 6,3 mm aus den Stechzylinderproben, die Fraktion 6,3 – 20 mm (bzw. 6,3 - 63 mm) aus der gestörten Probe und die Fraktion > 20 mm (bzw. > 63 mm) aus der Profilsprache zu ermitteln. Generell sollten die Grenzen für die einzelnen Beprobungsvarianten variabel gehandhabt und den jeweiligen Standortsbedingungen angepasst werden. Die Befunde in Kap. 4.2.4 ergaben zwar, dass die Fraktion 2 – 20 mm hinreichend genau mit Stechzylindern erfasst werden kann, doch erscheint es auf vielen Standorten sinnvoller, die Skelettanteile > 6,3 mm anhand der voluminöseren und deshalb repräsentativeren Schippen-/Spatenprobe zu ermitteln. Die im anschließenden Kap. 4.4 dargestellten Lösungsalgorithmen wären in diesem Fall entsprechend geringfügig zu modifizieren.

4.4 Lösungsalgorithmen beim „Kombinierten Verfahren“

4.4.1 Bestimmung der Trockenrohdichte

4.4.1.1 Trockenrohdichte des Gesamtbodens (TRD_{ges})

Die Trockenrohdichte (TRD) des Mineralbodens („Bodendichte“ nach Scheffer & Schachtschabel, 1998) ist die bei 105°C getrocknete Masse einer Bodenprobe bezogen auf ihr Volumen in natürlicher Lagerung. Die Trockenrohdichte bezieht sich mithin nach herkömmlicher Definition auf den Gesamtboden (Fein- und Grobboden; inklusive Poren). Sie wurde deshalb in dieser Studie als TRD_{ges} bezeichnet um sie von TRD_{FB} , welche sich ausschließlich auf den Feinboden bezieht, abzugrenzen.

Die Bestimmung von TRD_{ges} kann nach Hartge & Horn (1992) prinzipiell auf zweierlei Arten durchgeführt werden:

1. durch Entnahme von Bodenproben bekannten Volumens mit einem dafür eingerichteten Gerät, meistens mit Stechzylindern
2. durch Entnahme von Bodenproben beliebigen Volumens und anschließender Messung der dabei entstandenen Hohlform (Volumenersatzverfahren).

Verfahrenstechnisch gleichzusetzen mit der Stechzylinderbeprobung sind die im Rahmen der BZE II zum Einsatz kommenden Methoden der volumengerechten Beprobung mittels Murachschem Wurzelbohrer, Rammkernsonde und AMS Core Sampler mit Liner.

Die Trockenrohdichte des Gesamtbodens (TRD_{ges}) hat den Nachteil, dass sie bei skeletthaltigen Böden in hohem Maße vom Probenahmegerät bzw. von dessen Bohrkern Durchmesser und Beprobungsvolumen abhängig ist. Je nach erfasstem Bodenvolumen und Durchmesser des eingesetzten Stechzylinders enthält die Bodenprobe

Skelett von unterschiedlichem Äquivalentdurchmesser. Ein zu gering gewähltes Beprobungsvolumen induziert, dass vorhandene Skelettfaktionen über einem bestimmten Äquivalentdurchmesser nicht erfasst werden. Mit zunehmendem Skelettgehalt in der volumengerechten Bodenprobe steigt tendenziell auch TRD_{ges} , da die Substanzdichte des Skeletts (z.B. Quarz: 2.65 g/cm^3) deutlich höher liegt als die Trockenrohddichte des natürlich gelagerten Feinbodens inklusive dessen luftführender Poren. Daraus folgt, dass die TRD_{ges} bei skeletthaltigen Böden tendenziell zu gering eingeschätzt wird, wenn nicht alles vorhandene Bodenskelett bei der Probennahme repräsentativ erfasst wird. Dies ist am ehesten bei Einsatz der Rammkernsonde der Fall, falls man davon ausgehen kann, dass größeres Skelettmaterial von diesem Gerät durchschlagen wird und sich dann anteilmäßig im Bohrkern befindet. Bei allen anderen Verfahren der volumengerechten Probennahme ist das Beprobungsvolumen aus Gründen der kleinräumigen Variabilität von Bodenstruktureigenschaften möglichst groß zu wählen, um repräsentative Aussagen zur Trockenrohddichte des Gesamtbodens treffen zu können. Hinsichtlich der technischen Durchführbarkeit der Probennahme sind dem jedoch Grenzen gesetzt.

Es wird deutlich, dass die Bodendichte nach der traditionellen Definition wenig operabel ist und nur im Sonderfall eines skelettfreien Bodens eine vom Beprobungsvolumen bzw. –gerät unabhängige Vergleichbarkeit der Werte gewährleistet. Es wird deshalb empfohlen, grundsätzlich nur Angaben zu der auf den Feinboden bezogenen Bodendichte (TRD_{FB}) zu verwenden, die in Zusammenhang mit Angaben zum Skelettgehalt den Vergleich von Böden für bodenökologische oder -physikalische Zwecke zulässt.

4.4.1.2 Trockenrohddichte des Feinbodens (TRD_{FB})

Für die Ermittlung von TRD_{FB} ist eine volumengerechte Probennahme (z.B. mittels Stechzylinder, Rammkernsonde, AMS Core Sampler mit Liner, Murach'scher Wurzelbohrer) notwendig. An dieser Probe sind im Labor der Skelettgehalt (V_{GB}/V_{ges}) sowie die Dichte des Skeletts (D_{GB}) zu ermitteln. Die Trockenrohddichte des Feinbodens ist die bei 105°C getrocknete Feinbodenmasse (Fraktion $< 2 \text{ mm}$) einer Bodenprobe bezogen auf das Volumen des Feinbodens in natürlicher Lagerung. Das Volumen des Feinbodens ergibt sich aus dem gesamten Beprobungsvolumen abzüglich des Volumens der Skelettfraktion. Dem liegt die Vorstellung zugrunde, dass der gesamte Bodenraum in natürlicher Lagerung zwischen den Partikeln $> 2 \text{ mm}$ (Grobboden) mit Feinboden (Partikel $< 2 \text{ mm}$) erfüllt ist.

Die Berechnung von TRD_{FB} erfolgt dann nach folgender Gleichung.

$$TRD_{FB} = \frac{M_{FB}}{V_{FB}} = \frac{M_{ges} - M_{GB}}{V_{ges} - V_{GB}} = \frac{M_{ges} - M_{GB}}{V_{ges} - \frac{M_{GB}}{D_{GB}}}$$

wobei

M_{FB}	Masse des Feinbodens (Skelett, Fraktion $< 2 \text{ mm}$) [g]
V_{FB}	Volumen des Feinbodens [cm^3]
M_{ges}	Masse des Grob- und Feinbodens [g]
V_{ges}	Volumen der Gesamtprobe [cm^3]
M_{GB}	Masse des Grobbodens (Skelett, Fraktion $> 2 \text{ mm}$) [g]
V_{GB}	Volumen des Grobbodens [cm^3]
D_{GB}	Dichte des Grobbodens (Skelett, Fraktion $> 2 \text{ mm}$) [g/cm^3]

Einen Sonderfall stellt die volumengerechte Beprobung mit Hilfe von Stechkappen dar. Hier wurde angenommen, dass diese Beprobung auch bei skeletthaltigen Böden ausschließlich die Feinbodenfraktion erfasst (Heinkele et al. 2005) und somit $TRD_{FB} = TRD_{ges}$ gesetzt werden

kann. Neuere Untersuchungen zeigen indes, dass die Stechkappen auch Partikel der Grobbodenfraktion (Feinkies / -grus) mit erfassen (J. Block, mündl. vom 07.02.2006). Da die Stechkappendurchmesser 15 mm umfassen, erscheint dies bei Böden mit bedeutendem Grobbodenanteil im Bereich von Feingrus / -kies (Äquivalentdurchmesser 2 mm – 6.3 mm) plausibel. Bei der Ermittlung der Trockenrohddichte des Feinbodens müsste demzufolge analog zur Probennahme mit Stechzylinder verfahren werden, d.h. eine Trennung zwischen Fein- und Grobboden mittels Siebanalyse wäre durchzuführen. Ein Ausgießen der Stechkappenproben zur Gewinnung der Fraktionen < 2mm und > 2 mm erscheint insbesondere bei bindigem Material äußerst aufwändig, weil dieses Material nur schwer aus der Stechkappe zu entfernen ist. Eine Siebung kann daher standardmäßig nicht erfolgen.

Deshalb wird hier folgendes vereinfachte Vorgehen empfohlen:

Der Volumenanteil des Grobbodens in der Stechkappe kann näherungsweise über den Gewichtsanteil des Grobbodens mit Hilfe eines Korrekturfaktors f ($0 \leq f \leq 1$) berechnet werden. Der Korrekturfaktor f ergibt sich aus der Siebanalyse einer gestörten Schippen-/Spatenprobe. Um die Feinbodenmasse in der Stechkappe zu berechnen, wird die Gesamtmasse der Stechkappe durch Multiplikation mit dem Faktor f reduziert (Beispiel: $f = 0$ bedeutet, dass davon ausgegangen werden kann, dass sich nur Feinboden in der Stechkappe befindet; $f = 0,5$ bedeutet, dass davon ausgegangen wird, dass 50 % des Bodenmaterials in der Stechkappe der Grobbodenfraktion zugehörig ist).

Faktor f kann auf der Grundlage einer Siebanalyse der Schippen-/Spatenprobe wie folgt berechnet werden:

$$f = \frac{M_{GB2-6.3}SCH}{M_{GB<6.3}SCH}$$

wobei

$M_{GB2-6.3}SCH$ Masse der Fraktion 2 mm – 6.3 mm eines Aliquots der Schippen-/Spatenprobe [g]

$M_{GB<6.3}SCH$ Masse der Fraktion < 6.3 mm in diesem Aliquot der Schippen-/Spatenprobe [g].

Damit ergibt sich für TRD_{FB} anhand bei der Stechkappenbeprobung:

$$TRD_{FB} = \frac{M_{FB}}{V_{FB}} = \frac{M_{ges} - M_{GB}}{V_{ges} - V_{GB}} = \frac{M_{ges} - M_{GB}}{V_{ges} - \frac{M_{GB}}{D_{GB}}} = \frac{M_{ges} \times (1 - f)}{V_{ges} - \frac{M_{ges} \times f}{D_{GB}}}$$

Dieser Ansatz berücksichtigt nicht, dass unter bestimmten Gegebenheiten auch Partikel > 6.3 mm in die Stechkappen gelangen können, welche zu einer Erhöhung des Grobbodenanteils führen würden. Das Vorgehen dürfte aber dennoch bei Böden mit erhöhten Anteilen von Feinskelett deutlich bessere Ergebnisse erbringen, als wenn in diesen Fällen die Trockenrohddichte des Feinbodens der Trockenrohddichte des Gesamtbodens der Stechkappenprobe gleichgesetzt würde. Im Zweifelsfalle sollten exemplarische Stechkappen hinsichtlich des Vorkommens von Mittelgrus / -kies (Äquivalentdurchmesser 6.3 mm – 20 mm) untersucht und ggfs. verworfen werden.

In einer weiteren Vereinfachung kann der Faktor f – insbesondere bei nahezu skelettfreien Substraten – auch mittels Fingerprobe geschätzt und in diesem Fall gleich 0 gesetzt werden.

4.4.2 Feinbodenvorrat

Als Feinbodenvorrat wird hier die Masse des Feinbodens (Bodenfraktion < 2 mm Äquivalentdurchmesser) einer Bodenschicht pro Fläche bezeichnet. Im Rahmen der BZE I wurde hierfür der Begriff der „Feinbodenmenge“ verwendet. Die Berechnung des Feinbodenvorrats erfolgt auf der Grundlage der - nach einem der im vorigen Abschnitt beschriebenen Ansätze ermittelten - Trockenrohddichte des Feinbodens (TRD_{FB}) sowie dem Skelettgehalt. Für die Ermittlung des Skelettgehaltes sollten die in Tab. 18 dargestellten Verfahren im Rahmen der BZE II anerkannt werden und in die „Arbeitsanleitung für die zweite bundesweite Bodenzustandserhebung im Wald (BZE II)“ aufgenommen werden.

Tab. 15: Verfahren zur Bestimmung des Skelettanteils (GB = Grobboden)

1	Fortschreibung der Werte aus der BZE I
2	Schätzung (GB > 2 mm) an der Profilwand
3	Stechzylinder
4	Murachscher Wurzelbohrer
5	Rammkernsonde
6	Nmin-Bohrer
7	GB 2-20 mm aus volumengerechter Beprobung; GB > 20 mm aus Schätzung an der Profilwand
8	GB 2-20 mm aus volumengerechter Beprobung; GB 20-63 mm aus Schippen/Spaten-Beprobung; GB > 63 mm aus Schätzung an der Profilwand
9	GB 2-63 mm aus Schippen/Spaten-Beprobung; GB > 63 mm aus Schätzung an der Profilwand (i.A. nur bei Stechkappenbeprobung)
10	Volumenersatzverfahren
11	Viro Methode

Bei der Bestimmung des Skelettgehaltes sind verschiedene Fälle zu unterscheiden, die nachfolgend dargestellt werden:

Fall 1:

Die Bodenprobe der volumengerechten Beprobung (Stechzylinder, Murach'scher Wurzelbohrer, AMS Core Sampler mit Liner, Rammkernsonde) ist repräsentativ für den Skelettgehalt des Bodens. Außerdem liegt der geschätzte Grobbodenanteil unter 5 % (Konvention in Anlehnung an die Vorgaben der BZE I). In diesem Fall entspricht die Trockenrohddichte des Feinbodens (TRD_{FB}) annähernd der Trockenrohddichte des Gesamtbodens (TRD_{ges}) und kann dieser gleichgesetzt werden: $TRD_{FB} = TRD_{ges}$.

Für den Feinbodenvorrat gilt dann:

$$FBV = TRD_{FB} \times d \times 100$$

mit

$$TRD_{FB} = \frac{M_{ges}SZ}{V_{ges}SZ}$$

wobei

FBV Feinbodenvorrat (t/ha)

TRD_{FB} Trockenrohddichte des Feinbodens [g/cm^3]

d Mächtigkeit der Tiefenstufe [cm]

$M_{ges}SZ$ Masse der mittels Stechzylinder (bzw. Wurzelbohrer

etc.) entnommenen Bodenprobe [g]
 V_{gesSZ} Volumen des Stechzylinders (bzw. Bohrkerns aus dem Wurzelbohrer etc.) [cm³]

Fall 2:

Die Bodenprobe der volumengerechten Beprobung (Stechzylinder, Murach'scher Wurzelbohrer, AMS Core Sampler mit Liner, Rammkernsonde) ist wie im Fall 1 repräsentativ für den Skelettgehalt des Bodens. Es liegt jedoch ein erhöhter Skelettgehalt vor (gutachtlich geschätzter Grobbodenanteil > 5 %). In diesem Fall ist bei der Berechnung der Feinbodendichte das Volumen der Grobbodenfraktion im Stechzylinder vom gesamten Stechzylindervolumen abzuziehen und die Masse des Feinbodens auf dieses Volumen zu beziehen.

Die Trockenrohddichte des Feinbodens (TRD_{FB}) ergibt sich nach:

$$TRD_{FB} = \frac{M_{FB}SZ}{V_{FB}SZ} = \frac{M_{ges}SZ - M_{GB}SZ}{V_{ges}SZ - V_{GB}SZ} = \frac{M_{ges}SZ - M_{GB}SZ}{V_{ges}SZ - \frac{M_{GB}SZ}{D_{GB}}}$$

wobei

$M_{FB}SZ$ Masse des Feinbodens in der mittels Stechzylinder (bzw. Wurzelbohrer etc.) entnommenen Bodenprobe [g]
 $V_{FB}SZ$ Volumen des ungestörten Feinbodens in der mittels Stechzylinder (bzw. Wurzelbohrer etc.) entnommenen Bodenprobe [cm³]
 $M_{ges}SZ$ Masse der mittels Stechzylinder (bzw. Wurzelbohrer etc.) entnommenen Bodenprobe [g]
 $V_{ges}SZ$ Volumen des Stechzylinders (bzw. Bohrkerns aus dem Wurzelbohrer etc.) [cm³]
 $M_{GB}SZ$ Masse des Grobbodens in der mittels Stechzylinder (bzw. Wurzelbohrer etc.) entnommenen Bodenprobe [g]
 $V_{GB}SZ$ Volumen des Grobbodens in der mittels Stechzylinder (bzw. Wurzelbohrer etc.) entnommenen Bodenprobe [cm³]
 D_{GB} Dichte des Grobbodens [g/cm³]

Für den Feinbodenvorrat gilt dann:

$$FBV = TRD_{FB} \times d \times 100 \times \left(1 - \frac{V_{GB}SZ}{V_{ges}SZ} \right) = TRD_{FB} \times d \times 100 \times \left(1 - \frac{M_{GB}SZ}{D_{GB} \times V_{ges}SZ} \right)$$

wobei

FBV Feinbodenvorrat (t/ha)
 TRD_{FB} Trockenrohddichte des Feinbodens [g/cm³]
 d Mächtigkeit der Tiefenstufe [cm]
 $V_{GB}SZ$ Volumen des Grobbodens in der mittels Stechzylinder (bzw. Wurzelbohrer etc.) entnommenen Bodenprobe [cm³]
 $V_{ges}SZ$ Volumen des Stechzylinders (bzw. Bohrkerns aus dem Wurzelbohrer etc.) [cm³]

- M_{GBSZ} Masse des Grobbodens in der mittels Stechzylinder (bzw. Wurzelbohrer etc.) entnommenen Bodenprobe [g]
 D_{GB} Dichte des Grobbodens [g/cm^3]

Der Feinbodenvorrat kann alternativ auch direkt aus der Feinbodenmasse der Stechzylinderprobe und dem Stechzylindervolumen berechnet werden:

$$FBV = \frac{M_{FB}SZ}{V_{ges}SZ} \times d \times 100$$

wobei

- FBV Feinbodenvorrat (t/ha)
 $M_{FB}SZ$ Masse des Feinbodens in der mittels Stechzylinder (bzw. Wurzelbohrer etc.) entnommenen Bodenprobe [g]
 $V_{ges}SZ$ Volumen des Stechzylinders (bzw. Bohrkerns aus dem Wurzelbohrer etc.) [cm^3]
d Mächtigkeit der Tiefenstufe [cm]

Die Dichte des Grobbodens (D_{GB}) ist somit nur dann zu bestimmen, wenn die Trockenrohddichte des Feinbodens (TRD_{FB}) für weitere Auswertungen benötigt wird (Durchwurzelungsbedingungen, Wasserhaushaltskenngrößen usw.). Für die Berechnung des Feinbodenvorrates ist D_{GB} nicht notwendig.

Fall 3:

Im dritten Fall ist die volumengerechte Probennahme (Stechzylinderbeprobung, Wurzelbohrer etc.) nicht repräsentativ für den Grobbodenanteil. Es liegt Grobboden im Bereich von Grobkies / -grus, Steinen und / oder Blöcken vor, welcher aufgrund der begrenzten Öffnung des Beprobungsgerätes nicht erfasst werden kann.

In diesem Fall gibt es zwei Ansätze, den Grobboden zu berücksichtigen.

Im ersten Ansatz (Fall 3.1) erfolgt eine Schätzung des Grobbodens > 20 mm am Profil. Dabei wird unterstellt, dass die Fraktion < 20 mm durch die volumengerechte Probennahme annähernd repräsentativ erfasst wird. Im zweiten Ansatz (Fall 3.2) wird zudem eine nicht volumengerechte Bodenprobe entnommen (Schippen-/Spaten-Probe), an der die Grobbodenfraktion 20 mm bis 63 mm durch Sieben zu ermitteln ist. Auch hier wird unterstellt, dass die Fraktion < 20 mm durch die volumengerechte Probennahme annähernd repräsentativ erfasst wird. Am Profil wird in diesem Fall nur die Fraktion > 63 mm geschätzt, was die subjektive Komponente bei der Schätzung eingrenzt und gegenüber dem ersten Ansatz zu insgesamt genaueren Werten bei der Berechnung des Feinbodenvorrats führen wird.

Fall 3.1:

Die Ermittlung der Trockenrohddichte des Feinbodens (TRD_{FB}) erfolgt grundsätzlich wie im Fall 2 nach:

$$TRD_{FB} = \frac{M_{FB}SZ}{V_{FB}SZ} = \frac{M_{ges}SZ - M_{GB}SZ}{V_{ges}SZ - V_{GB}SZ} = \frac{M_{ges}SZ - M_{GB}SZ}{V_{ges}SZ - \frac{M_{GB}SZ}{D_{GB}}}$$

Wenn der Grobboden sich nach gutachtlicher Einschätzung ausschließlich aus den Fraktionen > 20 mm zusammensetzt, kann davon abgewichen werden. Die Wahrscheinlichkeit, dass die Bodenprobe der Stechzylinderbeprobung Skelett enthält, ist dann gering. Deshalb kann die Trockenrohddichte des Feinbodens (TRD_{FB}) nach dem für Fall 1 skizzierten Vorgehen berechnet werden; d.h. es wird die Trockenrohddichte des Feinbodens annähernd der Trockenrohddichte des Gesamtbodens (TRD_{ges}) gleichgesetzt: $TRD_{FB} = TRD_{ges}$.

In diesem Fall gilt:

$$TRD_{FB} = \frac{M_{ges}SZ}{V_{ges}SZ}$$

Für die Berechnung des Feinbodenvorrates ist die Schätzung des Anteils der Fraktion > 20 mm in Vol.-% am Profil notwendig. Überschlagsmäßig lässt sich der volumenbezogene Anteil aus dem flächenbezogenen Anteil durch Multiplikation mit dem Faktor 0.7 berechnen, sofern es sich um einzelne annähernd runde Steine / Blöcke handelt (z.B. Geschiebe). Dabei ist es notwendig, dass das Skelett am Profil herauspräpariert und soweit durchführbar etwa zur Hälfte freigelegt wird (vgl. Kap. 3.4). Wenn es sich hingegen um verwitterte Festgesteinsschichten mit sehr hohem Skelettgehalt handelt (z.B. Muschelkalk), kann der an der Profilwand sichtbare Flächenanteil dem Volumenanteil näherungsweise gleichgesetzt werden.

Für den Feinbodenvorrat gilt dann:

$$\begin{aligned} FBV &= TRD_{FB} \times d \times 100 \times \left(1 - \frac{V_{Ant_{GB>20}PROF}}{100} - \frac{V_{GB2-20}SZ}{V_{ges}SZ} \right) \\ &= TRD_{FB} \times d \times 100 \times \left(1 - \frac{V_{Ant_{GB>20}PROF}}{100} - \frac{M_{GB2-20}SZ}{D_{GB} \times V_{ges}SZ} \right) \end{aligned}$$

wobei

FBV	Feinbodenvorrat [t/ha]
TRD_{FB}	Trockenrohddichte des Feinbodens [g/cm ³]
d	Mächtigkeit der Tiefenstufe [cm]
$V_{Ant_{GB>20}PROF}$	Volumenanteil des Grobbodens der Fraktion > 20 mm nach Schätzung am Bodenprofil [Vol.-%]
$V_{GB2-20}SZ$	Volumen des Grobbodens der Fraktion 2 – 20 mm in der mittels Stechzylinder (bzw. Wurzelbohrer etc.) entnommenen Bodenprobe [cm ³]
$V_{ges}SZ$	Volumen des Stechzylinders (bzw. Bohrkerns aus dem Wurzelbohrer etc.) [cm ³]
$M_{GB2-20}SZ$	Masse des Grobbodens der Fraktion 2 – 20 mm in der mittels Stechzylinder (bzw. Wurzelbohrer etc.) entnommenen Bodenprobe [cm ³]
D_{GB}	Dichte des Grobbodens [g/cm ³]

Fall 3.2:

Die Ermittlung der Trockenrohdichte des Feinbodens (TRD_{FB}) erfolgt grundsätzlich wie im Fall 2 nach:

$$TRD_{FB} = \frac{M_{FB}SZ}{V_{FB}SZ} = \frac{M_{ges}SZ - M_{GB}SZ}{V_{ges}SZ - V_{GB}SZ} = \frac{M_{ges}SZ - M_{GB}SZ}{V_{ges}SZ - \frac{M_{GB}SZ}{D_{GB}}}$$

Wenn der Grobboden sich nach gutachtlicher Einschätzung ausschließlich aus den Fraktionen > 20 mm zusammensetzt, kann davon abgewichen werden. Dann kann die Trockenrohdichte des Feinbodens (TRD_{FB}) nach dem für Fall 1 skizzierten Vorgehen berechnet werden; d.h. es wird die Trockenrohdichte des Feinbodens näherungsweise der Trockenrohdichte des Gesamtbodens (TRD_{ges}) gleichgesetzt: $TRD_{FB} = TRD_{ges}$.

In diesem Fall gilt:

$$TRD_{FB} = \frac{M_{ges}SZ}{V_{ges}SZ}$$

Für die Berechnung des Feinbodenvorrates ist die Schätzung des Anteils der Fraktion > 63 mm in Vol.-% am Profil notwendig. Überschlagsmäßig lässt sich der volumenbezogene Anteil aus dem flächenbezogenen Anteil durch Multiplikation mit dem Faktor 0.7 berechnen, sofern es sich um einzelne annähernd runde Steine / Blöcke handelt (z.B. Geschiebe). Dabei ist es notwendig, dass das Skelett am Profil herauspräpariert und soweit durchführbar etwa zur Hälfte freigelegt wird (vgl. Kap. 3.4). Wenn es sich hingegen um verwitterte Festgesteinsschichten mit sehr hohem Skelettgehalt handelt (z.B. Muschelkalk), kann der an der Profilwand sichtbare Flächenanteil dem Volumenanteil näherungsweise gleichgesetzt werden.

Zusätzlich wird eine nicht volumengerechte Probe, die repräsentativ für die Grobbodenfraktion 2 mm – 63 mm sein muss, mit Schippe bzw. Spaten entnommen.

Da die Trockenrohdichte des Feinbodens (TRD_{FB}) bekannt ist, lässt sich das Volumen der entnommenen Schippen-/Spatenprobe in ungestörter Lagerung ermitteln. Für die Schippen-/Spatenprobe gilt:

$$TRD_{FB} = \frac{M_{ges}SCH - M_{GB}SCH}{V_{ges}SCH - \frac{M_{GB}SCH}{D_{GB}}}$$

und damit:

$$V_{ges}SCH = \frac{M_{ges}SCH - M_{GB}SCH + TRD_{FB} \times \frac{M_{GB}SCH}{D_{GB}}}{TRD_{FB}}$$

Damit lässt sich der volumenbezogene Anteil der Grobbodenfraktion 2 mm – 63 mm am Gesamtvolumen der Schippen-/Spatenprobe wie folgt berechnen:

$$V_{Ant_{GB2-63}}SCH = \frac{V_{GB2-63}SCH}{V_{ges}SCH} \times 100 = \frac{M_{GB2-63}SCH}{D_{GB}} \times \frac{1}{V_{ges}SCH} \times 100$$

Für den Feinbodenvorrat ergibt sich damit:

$$FBV = TRD_{FB} \times d \times 100 \times \dots$$

$$\dots \times \left(1 - \frac{V_{Ant_{GB>63}PROF}}{100} - \frac{M_{GB2-63SCH}}{D_{GB}} \times \frac{TRD_{FB}}{M_{gesSCH} - M_{GB2-63SCH} + TRD_{FB} \times \frac{M_{GB2-63SCH}}{D_{GB}}} \right)$$

wobei

TRD_{FB}	Trockenrohddichte des Feinbodens [g/cm ³]
d	Mächtigkeit der Tiefenstufe [cm]
$V_{Ant_{GB>63}PROF}$	Volumenanteil des Grobbodens der Fraktion > 63 mm nach Schätzung am Bodenprofil [Vol.-%]
M_{gesSCH}	Masse der Schippen-/Spatenprobe [g]
M_{GBSCH}	Masse des Grobbodens in der Schippen-/Spatenprobe [g]
V_{gesSCH}	Volumen der Schippen-/Spatenprobe in ungestörter Lagerung [cm ³]
D_{GB}	Dichte des Grobbodens [g/cm ³]
$V_{Ant_{GB2-63}SCH}$	Volumenanteil des Grobbodens der Fraktion 2 mm – 63 mm in der Schippen-/Spatenprobe [Vol.-%]
$V_{GB2-63SCH}$	Volumen des Grobbodens der Fraktion 2 mm – 63 mm in der Schippen-/Spatenprobe [cm ³]
$M_{GB2-63SCH}$	Masse des Grobbodens der Fraktion 2 mm – 63 mm in der Schippen-/Spatenprobe [cm ³]

Fall 4:

In diesem Fall kann kein Stechzylinder (bzw. Murach'scher Wurzelbohrer etc.) eingesetzt werden, weil dies durch einen zu hohen Grobbodenanteil verhindert wird. Unter diesen Bedingungen (und nur dann) sind Stechkappen zu verwenden, um die Trockenrohddichte des Feinbodens im Material zwischen dem Bodenskelett zu ermitteln.

Die Ermittlung von TRD_{FB} erfolgt wie oben beschrieben unter Verwendung eines Schätzfaktors f , der den Grobbodenanteil in der Stechkappe zum Ausdruck bringt:

$$TRD_{FB} = \frac{M_{FB}SK}{V_{FB}SK} = \frac{M_{ges}SK - M_{GB}SK}{V_{ges}SK - V_{GB}SK} = \frac{M_{ges}SK - M_{GB}SK}{V_{ges}SK - \frac{M_{GB}SK}{D_{GB}}} = \frac{M_{ges}SK \times (1-f)}{V_{ges}SK - \frac{M_{ges}SK \times f}{D_{GB}}}$$

wobei

$M_{FB}SK$	Masse des Feinbodens in der Stechkappe entnommenen Bodenprobe [g]
$V_{FB}SK$	Volumen des ungestörten Feinbodens in der mittels Stechkappe entnommenen Bodenprobe [cm ³]
$M_{ges}SK$	Masse der mittels Stechkappe entnommenen Bodenprobe [g]
$V_{ges}SK$	Volumen der Stechkappe [cm ³]
$M_{GB}SK$	Masse des Grobbodens in der mittels Stechkappe entnommenen Bodenprobe [g]

V_{GBSK}	Volumen des Grobbodens in der mittels Stechkappe entnommenen Bodenprobe [cm ³]
D_{GB}	Dichte des Grobbodens [g/cm ³]

Wenn die Stechkappenmethode eingesetzt wird, muss eine ungestörte Schippen-/Spatenprobe entnommen werden, um den Faktor f zu ermitteln. Daher kann die Bestimmung der Feinbodenmenge dann gemäß Fall 3.2 erfolgen (Kombination aus Profilsprache, Schippen-/Spatenbeprobung und Stechkappe); d.h. es gilt:

$$FBV = TRD_{FB} \times d \times 100 \times \dots$$

$$\dots \times \left(1 - \frac{V_{Ant_{GB>63}PROF}}{100} - \frac{M_{GB2-63}SCH}{D_{GB}} \times \frac{TRD_{FB}}{M_{ges}SCH - M_{GB2-63}SCH + TRD_{FB} \times \frac{M_{GB2-63}SCH}{D_{GB}}} \right)$$

wobei

TRD_{FB}	Trockenrohddichte des Feinbodens [g/cm ³]
d	Mächtigkeit der Tiefenstufe [cm]
$V_{Ant_{GB>63}PROF}$	Volumenanteil des Grobbodens der Fraktion > 63 mm nach Schätzung am Bodenprofil [Vol.-%]
$M_{ges}SCH$	Masse der Schippen-/Spatenprobe [g]
D_{GB}	Dichte des Grobbodens [g/cm ³]
$M_{GB2-63}SCH$	Masse des Grobbodens der Fraktion 2 mm – 63 mm in der Schippen-/Spatenprobe [cm ³]

4.4.3 Festsubstanzdichte

Die Festsubstanzdichte ist die Masse der Bodenfestsubstanz pro Volumeneinheit – ohne Berücksichtigung des Bodenhohlraumsystems – nach Trocknung bei 105 °C in g/cm³. Die Festsubstanzdichte des Grobbodens (D_{GB}) ist bei skeletthaltigen Böden eine wichtige Zwischengröße zur Berechnung des Feinbodenvorrats. Sie lässt sich mittels Pyknometer oder Tauchwägung ermitteln.

Im Rahmen dieser Studie wurden ein Wasser- sowie ein Heliumpyknometer eingesetzt. Von Heinkele et al. (2005) wurden die Grobbodendichten derselben Standorte durch Tauchwägung ermittelt. Dabei zeigten sich verfahrensabhängig erhebliche systematische Unterschiede zwischen den Messwerten (Abb. 19). Die von Heinkele et al. (2005) ermittelten Grobbodendichten variieren geringfügig zwischen 2,2 g/cm³ und 2,5 g/cm³ und liegen damit deutlich unter dem für Quarz bekannten Wert von 2,65 g/cm³. Die im Rahmen dieser Studie ermittelten Werte umfassen die Spanne von 2,3 – 2,8 g/cm³. Dagegen sind die an der TU Berlin mittels Heliumpyknometer gewonnenen Dichten mit einer Spanne von 2,8 – 3,2 g/cm³ erheblich höher. Die Messsicherheit dürfte beim Heliumpyknometer am größten sein. Auch erscheinen die Werte $\geq 2,6$ g/cm³ aufgrund der mineralischen Zusammensetzung der Substrate plausibler als die mittels Wasserpyknometer bzw. Tauchwägung bestimmten. Eine Korrelation zwischen den Werten der unterschiedlichen Verfahren ist nicht erkennbar. Es erscheint notwendig, die eingesetzten Verfahren einer tiefergehenden Studie zu unterziehen, um mögliche Ursachen für die unterschiedlichen Größenordnungen der Messwerte

aufzudecken und eine einheitliche methodische Grundlage für die Dichtebestimmung des Grobbodens zu schaffen.

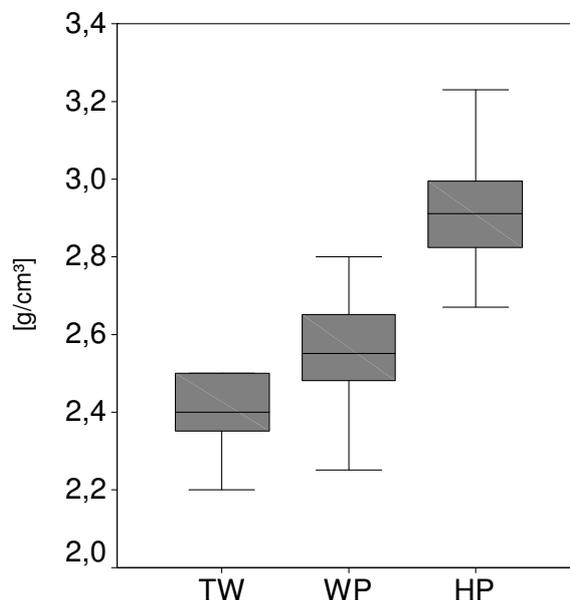


Abb. 19: Spanne der Dichte des Grobbodens ermittelt durch Tauchwägung (TW; vgl. Heinkele et al., 2005), Wasseryknometer (WP) sowie Heliumpyknometer (HP)

Für die Zielsetzung der vorliegenden Studie ist es vor allem wichtig, die Sensitivität der in den vorangegangenen Abschnitten dargelegten Gleichungen gegenüber ggfs. methodisch bedingten Variabilitäten der Grobbodendichte näher zu betrachten. Anhand der Zielgröße Feinbodenvorrat, die für alle im Rahmen dieser Studie genommenen volumengerechten Bodenproben berechnet wurde, erfolgte die folgende Sensitivitätsuntersuchung. Der auf 1 dm Bodenmächtigkeit bezogene Feinbodenvorrat in t/ha wurde zum einen unter Verwendung der Dichte des Grobbodens von $D_{GB} = 2,5 \text{ g/cm}^3$ und zum anderen unter Verwendung der Grobbodendichte von $D_{GB} = 2,9 \text{ g/cm}^3$ berechnet. Die unterschiedlichen Feinbodenvorräte sind in Abb. 20 vergleichend gegenübergestellt. Die absoluten Abweichungen zwischen den Werten geht aus Abb. 21, die prozentualen Abweichungen aus Abb. 22 hervor.

Es zeigt sich, dass die Auswirkung der unterschiedlichen Grobbodendichten auf den Feinbodenvorrat überwiegend lediglich im Bereich von 1 – 2 % liegt. Die Gleichungen zur Ermittlung des Feinbodenvorrates weisen eine so geringe Sensitivität gegenüber Abweichungen der Festsubstanzdichte des Grobbodens auf, dass vereinfachend und bis zur Definition einer einheitlichen Methode zur D_{GB} -Bestimmung ein konstanter Wert für bestimmte Substrat- / Mineralgruppen (z.B. Quarz 2.65 g/cm^3) verwendet werden kann. Es ist davon auszugehen, dass selbst bei genereller Verwendung von $D_{GB} = 2.65 \text{ g/cm}^3$ bei skeletthaltigen Böden ausreichend genaue Werte für den Feinbodenvorrat gewonnen werden können.

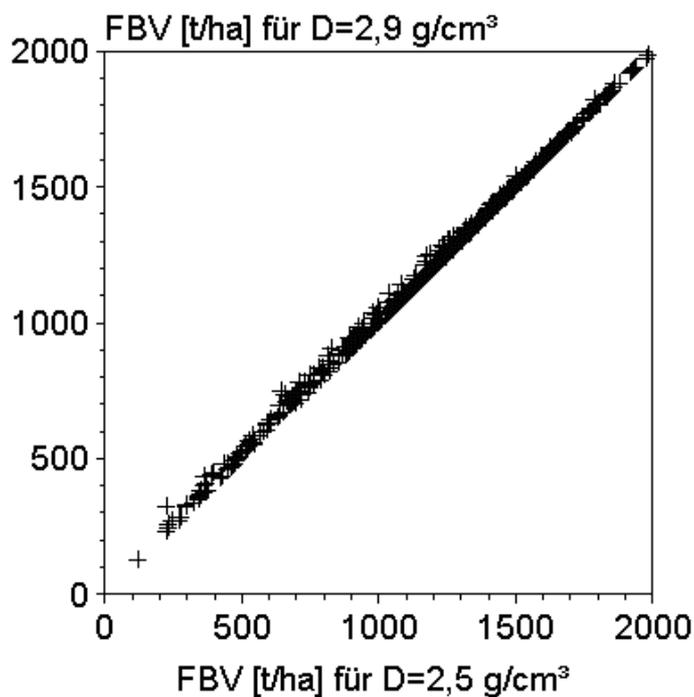


Abb. 20: Gegenüberstellung der Feinbodenvorräte (FBV) pro dm Tiefe [t/ha] berechnet für $D_{GB} = 2,9 \text{ g/cm}^3$ und $D_{GB} = 2,5 \text{ g/cm}^3$

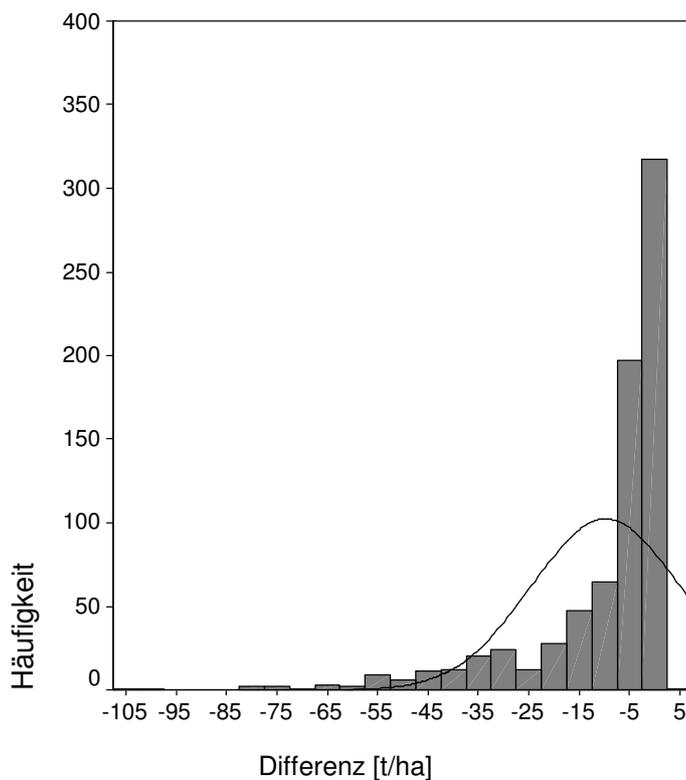


Abb. 21: Häufigkeitsverteilung der Differenz aus Feinbodenvorrat [t/ha, dm] mit $D_{GB} = 2,5 \text{ g/cm}^3$ berechnet und Feinbodenvorrat [t/ha, dm] mit $D_{GB} = 2,9 \text{ g/cm}^3$ berechnet

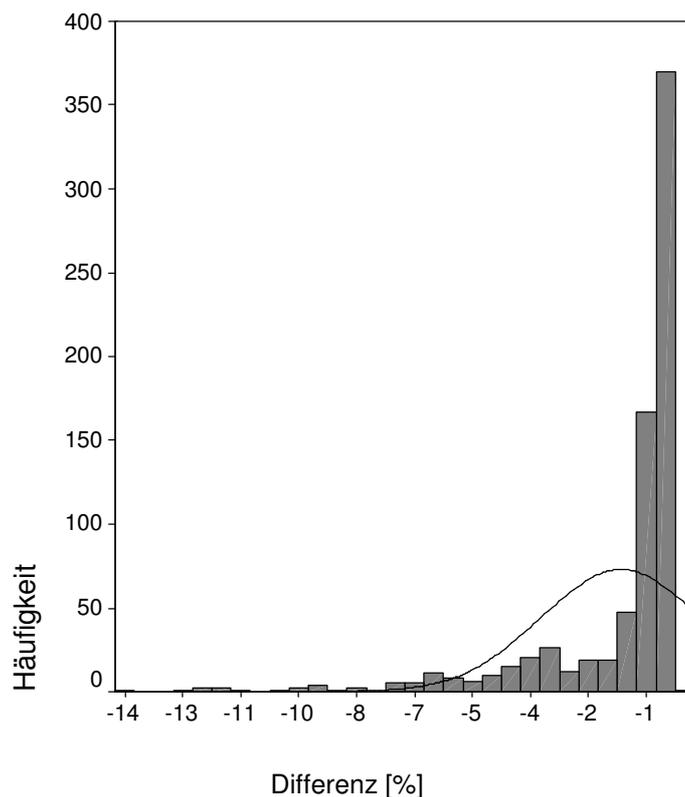


Abb. 22: Häufigkeitsverteilung der prozentualen Abweichung zwischen Feinbodenvorrat mit $D_{GB} = 2,5 \text{ g/cm}^3$ berechnet und Feinbodenvorrat mit $D_{GB} = 2,9 \text{ g/cm}^3$ berechnet

4.5 Anwendung von Pedotransferfunktionen

Im Rahmen der europäischen Bodenzustandserhebung ist die Schätzung der Trockenrohddichte (TRD) mit Hilfe von Pedotransferfunktionen zulässig. Das europäische Manual schlägt folgende Ableitung nach Adams (1973) vor:

$$TRD = \frac{100}{\frac{\%OS}{0,244} + \frac{100 - \%OS}{TRD_{mod}}}, \text{ wobei}$$

TRD Trockenrohddichte

%OS Prozent der organischen Substanz

TRD_{mod} geschätzte Trockenrohddichte des Mineralbodens ohne organische Substanz

Für TRD_{mod} wird pauschal der Wert $1,33 \text{ g/cm}^3$ oder anhand des Sand- bzw. Tongehaltes ein Wert nach Rawls & Brakensiek (1985) abgeschätzt. Da in der vorliegenden Studie keine Bodenarten des Feinbodens bestimmt worden sind, konnte für TRD_{mod} nur ein Pauschalwert differenziert nach der Hauptbodenart eingesetzt werden. Für die Sande und Lehmsande (Kap. 3.1) wurde in Anlehnung an Rawls & Brakensiek (1985) TRD_{mod} = $1,65 \text{ g/cm}^3$ und für die Lehme bzw. (Lehm-)Schluffe TRD_{mod} = $1,35 \text{ g/cm}^3$ verwendet.

In Abb. 23 ist die Beziehung zwischen organischer Bodensubstanz und Trockenrohddichte stratifiziert nach der Entnahmetiefe dargestellt. Humusfreie Bodenproben wurden nicht

berücksichtigt. Es zeigt sich ein lockerer Zusammenhang über das Gesamtkollektiv, welcher bei Betrachtung der einzelnen Tiefenstufen sich sehr unterschiedlich eng darstellt. Im Unterboden (60 – 75 cm Tiefe) besteht praktisch keine Beziehung aufgrund sehr geringer in einer engen Spanne variierender Gehalte an organischer Substanz. Im Oberboden (17 – 22 cm Tiefe) ist der Zusammenhang zwischen Trockenrohddichte und organischer Bodensubstanz sehr locker. Am deutlichsten ist die Beziehung im mittleren Tiefenbereich (30 – 45 cm) ausgeprägt.

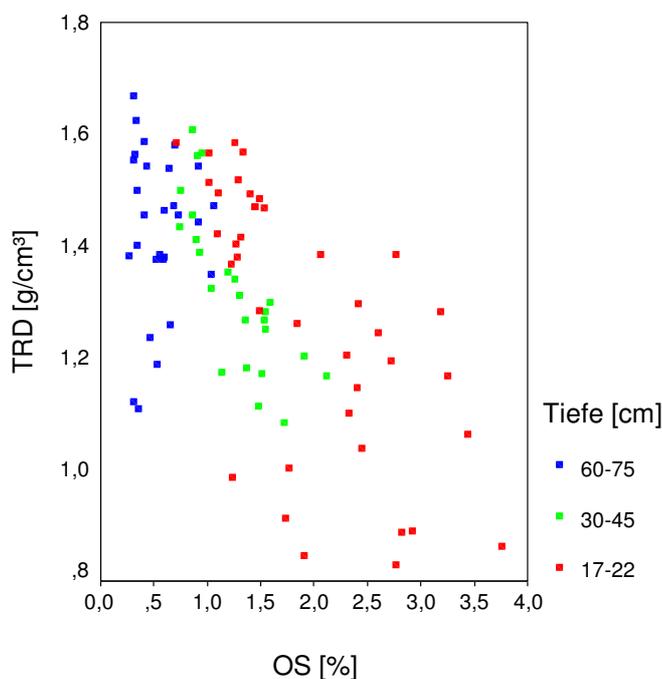


Abb. 23: Streudiagramm zwischen organischer Bodensubstanz und Trockenrohddichte stratifiziert nach Entnahmetiefe

Die Gegenüberstellung der nach Adams (1973) berechneten TRD-Werte und der tatsächlichen Messwerte zeigt weist auf eine systematische Überschätzung der TRD durch die verwendete Pedotransferfunktion (Abb. 24). Die in Abb. 25 dargestellten prozentualen Differenzen zwischen berechneten und tatsächlichen TRD-Werten verdeutlichen, dass in den meisten Fällen von einer Überschätzung von bis zu 25 % auszugehen ist; in Einzelfällen beträgt die Überschätzung bis zu 75 %. Im Mittel beträgt die Überschätzung der Trockenrohddichte 14,5 %, was sich entsprechend auf die daraus abgeleitete Feinbodenmenge auswirkt. Die differenziertere Verwendung der von Rawls & Brakensiek (1985) vorgeschlagenen TRD_{mod} -Werte, für welche die Bodenartbestimmung mittels Fingerprobe notwendig ist, dürfte dieses Ergebnis verbessern.

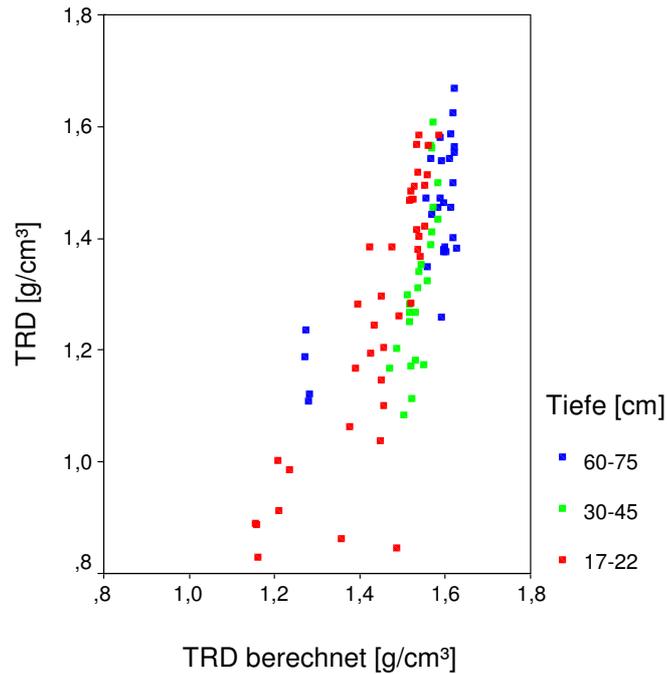


Abb. 24: Gegenüberstellung von berechneten und tatsächlichen Trockenrohdichten stratifiziert nach Entnahmetiefe

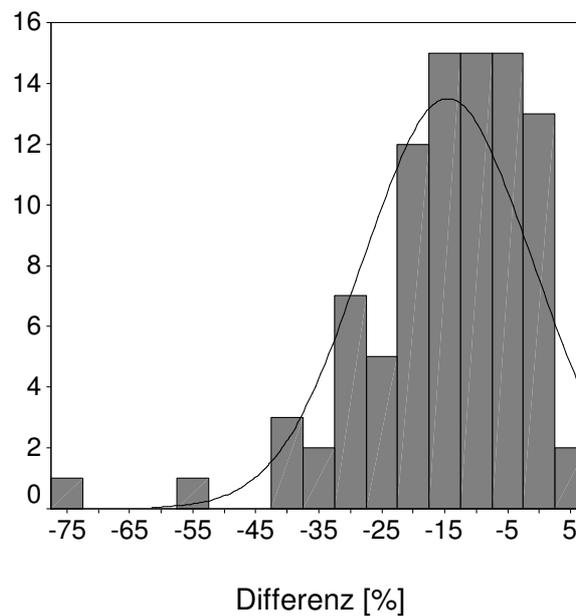


Abb. 25: Häufigkeitsverteilung der prozentualen Differenzen zwischen berechneten und tatsächlichen Trockenrohdichten

5 Schlussfolgerungen und Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Studie sollten die Probenahmegeräte Rammkernsonde, AMS Core-Sampler mit Liner sowie Murachscher Wurzelbohrer hinsichtlich ihrer Eignung für die volumengerechte Entnahme von Bodenproben und Bestimmung der Trockenrohdichte bzw. des Skelettgehaltes im Ober- und Unterboden überprüft werden. Es zeigte sich, dass jedes

dieser Geräte in Abhängigkeit von den Standortsbedingungen (Steingehalt, Durchwurzelung, Textur, aktuelle Bodenfeuchte) Vor- und Nachteile besitzt. Für die Oberbodenbeprobung sind grundsätzlich alle Verfahren geeignet, wenn die Standortsbedingungen den technischen Einsatz zulassen. Hinsichtlich der Unterbodenbeprobung erwies sich die Rammkernsonde als besonders vorteilhaft, da keine Bodenverschleppung von oben nach unten erfolgt. Der Murachsche Wurzelbohrer ist für die Unterbodenbeprobung nur geeignet, wenn zur Minimierung der Bodenverschleppung unterschiedliche Bohrerdurchmesser eingesetzt werden. Der AMS Core Sampler mit Liner erschien für die Beprobung des Unterbodens nicht geeignet. Bei der Oberbodenbeprobung machen bereits mäßige Skelettanteile den Einsatz dieses Gerätes aufgrund seiner wenig stabilen Bauweise unmöglich.

Generell ist bei allen Geräten von einer nicht unerheblichen Stauchung des Bohrkerns bei der Probenahme auszugehen. Bei der Rammkernsondenbeprobung wird diese konventionell durch Stauchungsfaktoren berücksichtigt, wodurch realistische Trockenrohddichten für einzelne Tiefenstufen erzielt werden können. Bei den beiden anderen Geräten führt die Nicht-Berücksichtigung der Stauchung zu einer erhöhten Trockenrohddichte. Dies wirkt sich jedoch nicht auf die Berechnung des Feinbodenvorrats aus, solange diese für die gesamte Bohrkernmächtigkeit erfolgt. Für geringmächtigere Teilschichten werden die Vorratsgrößen indes verfälscht. Es zeigte sich in diesem Zusammenhang, dass allein das verwendete Beprobungsverfahren bzw. die Berücksichtigung oder Nicht-Berücksichtigung der Bodenstauchung bei der Bohrkernentnahme zu Differenzen der ermittelten Trockenrohddichte führt, welche größenordnungsmäßig deutlich über der bestehenden Bodenvariabilität innerhalb der hier untersuchten Beprobungsflächen von ca. 300 m² liegen.

Im Rahmen der Studie wurde eine kombinierte Methode aus volumenbezogener Beprobung (z.B. Stechzylinder), nichtvolumengerechter Beprobung mittels Schippe- bzw. Spatenaushub und Skelettansprache am Bodenprofil entwickelt und angewendet. Bei der Anwendung des Verfahrens wurde die Grobbodenfraktion mit Äquivalentdurchmessern von 2 bis 20 mm sowie die Trockenrohddichte des Feinbodens aus Stechzylindern ermittelt, die Fraktion 20 bis 63 mm anhand der gestört entnommenen Bodenprobe und die Fraktion > 63 mm durch Schätzung am Bodenprofil. Es wurden Lösungsalgorithmen zusammengestellt, anhand derer die rechnerische Verknüpfung dieser drei Ansätze möglich ist. Die Rechenansätze wurden für das Handbuch Forstliche Analytik aufbereitet (vgl. Anhang 1). Diese „Kombinierte Methode“ lässt hinreichend genaue Aussagen zum Gesamtskelettgehalt zu und kann im Rahmen der BZE II eingesetzt werden. Es zeigte sich, dass das kombinierte Vorgehen zu Feinbodenvorräten und Skelettanteilen führt, welche auf den untersuchten Standorten i. a. auch denen der Rammkernsondenbeprobung entsprechen. Abweichungen zwischen dem anhand der Volumenersatzmethode ermittelten Referenzwerten und den Werten der „Kombinierten Methode“ resultieren v.a. aus einer Fehleinschätzung bei den feinen und mittleren Skelettanteilen, welche anhand der Stechzylinderproben ermittelt wurden.

Bei den untersuchten Standorten war der Grobgrus- bzw. Grobkiesanteil (20 - 63 mm) gegenüber dem Anteil an Fein- und Mittelgrus bzw. Fein- und Mittelkies (2 – 20 mm) um einen 10er Faktor geringer. Es zeigte sich zwar, dass die gesamte Kies-/ Grusfraktion (2 – 20 mm) prinzipiell hinreichend genau mit Stechzylindern erfasst werden kann, doch erscheint es auf vielen Standorten sinnvoll, die Skelettanteile > 6,3 mm anhand der voluminöseren und deshalb repräsentativeren Schippen-/Spatenprobe zu ermitteln. Generell sollten die Grenzen der mit den einzelnen Beprobungsvarianten im „Kombinierten Verfahren“ (Stechzylinder Spaten/Schippe, Schätzung an der Profilwand) erfassten Skelettfractionen variabel gehandhabt und den jeweiligen Standortsbedingungen angepasst werden. Hierzu wären die vorgelegten Lösungsalgorithmen für die Berechnung des Feinbodenvorrats nur als Vorlage zu betrachten und entsprechend den tatsächlichen Bedingungen jeweils hinsichtlich der Wahl der Fraktionsgrenzen zu modifizieren.

Anhand einer Probenauswahl (humose Bodenproben mit geringem Skelettgehalt) erfolgte die Überprüfung der von Adams (1973) vorgeschlagenen Pedotransferfunktion zur Ableitung der Trockenrohdichte aus dem Gehalt an organischer Substanz. Im Ergebnis zeigten sich Abweichungen der Trockenrohdichte von den tatsächlichen Werten von durchschnittlich ca. 15 %. Dieser Fehlbetrag würde sich entsprechend auf den anhand der Trockenrohdichte berechneten Feinbodenvorrat durchpausen. Für die BZE II sollte von einer Bestimmung der Trockenrohdichte mittels Pedotransferfunktionen möglichst abgesehen werden.

6 Literatur

Adams, W. A. (1973): The effect of organic matter and true densities of some uncultivated podzolic soils. *Journal of Soil Science*, 24 10-17.

AG Boden (2005): *Bodenkundliche Kartieranleitung*. 5. Auflage. Hannover.

AK Standortskunde (2003): *Forstliche Standortaufnahme*. 6. Auflage. München.

BMELF (1990): *Bundesweite Bodenzustandserhebung im Wald (BZE)*. Arbeitsanleitung. Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (Hrsg.). Bonn.

Drexler, R. (2005): *Ermittlung der Trockenrohdichte und des Skelettgehaltes stark skeletthaltiger Waldböden auf Lockersubstraten – Methodenvergleich*. Diplomarbeit am Fachgebiet Bodenkunde / Standortskunde der Fachhochschule Eberswalde. (unveröffentlicht)

Hartge, K.H., Horn, R. (1992): *Die physikalische Untersuchung von Böden*. Stuttgart.

Heinkele, T., Martin, N., Scherzer, J. (2005) *Erarbeitung von Empfehlungen zur Erfassung von Trockenrohdichte und Grobbodenanteil des Waldbodens im Rahmen der Bodenzustandserhebung im Wald (BZE)*. Studie im Auftrag des BMELV. (unveröffentlicht).

Palmer, C.J., Smith, W.D., Conkling, B.L. (2002): Development of a protocol for monitoring status and trends in forest soil carbon at a national level. *Environmental Pollution* 116, 209-219.

Rawls, W.J., Brakensiek, D.L. (1985): Prediction of soil water properties for hydrologic modeling in *Proceedings of Symposium on Watershed Management*, ASCE, pp. 293- 299.

Scheffer, F., Schachtschabel, P. (1998): *Lehrbuch der Bodenkunde*. Stuttgart.

Wellbrock et al. (2006): *Arbeitsanleitung für die zweite bundesweite Bodenzustandserhebung im Wald (BZE II)*. Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (Hrsg.). Bonn.

Anhang

1. Darstellung der Lösungsalgorithmen im „Kombinierten Verfahren“ für das Handbuch Forstliche Analytik
2. Fotodokumentation
3. Datenzusammenstellung