

**Technische Universität Berlin
Institut für Ökologie
Bodenkunde**



**Untersuchungen zur
thermischen und biologischen Stabilität
der organischen Bodensubstanz**

Habilitationsschrift

von Christian Siewert

- Berlin, April 2001 -

Zusammenfassung

Mit dem Ziel einer einfachen, jedoch praxisnahen und leicht anwendbaren Bewertung der organischen Bodensubstanz (OBS) wurden traditionelle Schwerpunkte der Humusanalytik und aktuelle Entwicklungstendenzen der Umweltforschung analysiert. Überlegungen zur erdgeschichtlichen Prägung heutiger Bodenbildungsprozesse unterstützten eine darauf aufbauende Ableitung von Untersuchungsmethoden.

Diese Vorgehensweise führte zur Berücksichtigung der Wasserbindungsfähigkeit von Böden bei der Analyse der OBS und zur Ausrichtung der experimentellen Arbeiten auf Thermogravimetrie und Inkubationsexperimente. Bodenproben unterschiedlicher Klimaregionen und Ausgangssubstrate sollten Beziehungen zwischen OBS – Komponenten und ihrem biologischen Umsatzverhalten erkennen und bewerten helfen.

Die Ergebnisse verwiesen auf eine Eignung der Thermogravimetrie zur Quantifizierung von biologisch umsetzbaren und humifizierten Bestandteilen der OBS. Zusätzlich wurden enge Korrelationen dieser Komponenten zur Menge gebundenen Wassers und zum Tongehalt nachgewiesen. Sie traten unabhängig vom Klima, der Vegetation und anderen Bodenbildungsfaktoren in vom Menschen unbeeinflussten Böden auf. Ackerböden zeigten hingegen charakteristische Abweichungen, die sich für eine Diagnostik von Veränderungen eignen.

In den Inkubationsexperimenten zeigte sich eine divergierende Dynamik der Bodenatmung nach Wiederbefeuchtung lufttrockener Proben. Die Unterschiede waren an die Bodengese und Vegetation in natürlichen Ökosystemen gebunden wurden durch Ackerbau verändert. Feuchteänderungen sind demnach ein Einflussfaktor auf die Dynamik von biologischen Umsatzprozessen, deren Bedeutung in bisher publizierten Experimenten zur Bodenatmung bei konstantem Wassergehalt nicht sichtbar werden konnte.

Die Ergebnisse beider Methoden wurden für die Erarbeitung eines Verfahrens der thermogravimetrischen Bodenanalyse (TGBA) genutzt. Es unterstützt die Erfassung regionaler Spezifika der OBS, hilft bei der Unterscheidung zwischen der OBS in natürlichen und genutzten Böden und ermöglicht eine Abschätzung von Bodeneigenschaften.

Geringe Arbeitsaufwendungen begünstigten eine Anwendungsprüfung der TGBA, bei der eine hohe Aussagefähigkeit zur OBS bestätigt wurde. Bei der Einbeziehung extremer Standorte fanden sich eine eingeschränkte Auswertbarkeit von Ergebnissen bei hydromorphen Böden, aber auch zahlreiche Hinweise auf interessante Erweiterungsmöglichkeiten.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	1
2. Stand der Forschung.....	2
2.1. Ergebnisse der traditionellen Humusanalytik.....	2
2.2. Aktuelle Entwicklungstendenzen	5
3. Zielstellung.....	6
4. Grundlagen der experimentellen Vorgehensweise.....	7
5. Material und Methoden.....	12
5.1. Auswahl der Analysemethoden	12
5.2. Methodenbeschreibungen	13
5.2.1. Thermogravimetrie	13
5.2.2. Inkubationsexperimente	14
5.2.3. Sonstige Methoden.....	16
5.3. Probenmaterial.....	17
6. Ergebnisse.....	20
6.1. Thermische Stabilität der OBS	20
6.1.1. Übersicht	20
6.1.2. Identifikation von Komponenten.....	21
6.1.3. Diagnostische Temperaturbereiche einzelner OBS-Komponenten.....	28
6.1.4. Beziehungen zwischen OBS-Komponenten.....	30
6.1.5. Korrelationen zu Bodeneigenschaften	34
6.1.6. Die OBS im Vergleich zu Seesedimenten, Pflanzenproben und extrahierten Humussäuren.....	36
6.1.7. Diskussion ausgewählter Aspekte	38
6.1.8. Zusammenfassung.....	42
6.1.9. Schlussfolgerungen.....	43
6.2. Biologische Umsatzprozesse	44
6.2.1. Übersicht	44
6.2.2. Quantifizierung umsetzbarer Komponenten.....	45
6.2.3. Jahreszeitliche Variationen	46
6.2.4. Dynamik der Bodenatmung.....	46

6.2.5. Änderungen der Bodenatmung durch Glucoseapplikation	48
6.2.6. Einflussfaktoren auf die Dynamik der Bodenatmung	50
6.2.7. Beziehungen zu Bodeneigenschaften	54
6.2.8. Spezifika der Reaktion von Einzelproben	56
6.2.9. Ergebnisse zusätzlicher Experimente	57
6.2.10. Diskussion	59
6.2.11. Zusammenfassung	64
6.2.12. Schlussfolgerungen	64
6.3. Beziehungen zwischen biologischer und thermischer Stabilität	65
6.3.1. Ergebnisse	65
6.3.2. Diskussion	71
6.3.3. Zusammenfassung	76
6.3.4. Schlussfolgerungen	76
7. Charakterisierung von Böden mittels Thermogravimetrie	77
7.1. Bestimmung umsetzbarer Komponenten der OBS	78
7.1.1. Methodenvergleich	78
7.1.2. Zusätzliche Möglichkeiten der Thermogravimetrie	81
7.2. Kennzeichnung humifizierter Bestandteile	86
7.3. Abschätzung von Bodeneigenschaften	87
7.3.1. Gesamtkohlenstoffgehalt (C_T)	87
7.3.2. Tongehalt	90
7.3.3. Sonstige Bodeneigenschaften	91
7.3.4. Zuverlässigkeit der Ergebnisse und Prüfverfahren	92
7.4. Anwendungsbeispiele	93
7.4.1. Antarktische Böden	94
7.4.2. Böden der feuchten Tropen	97
7.4.3. Böden der trockenen Tropen	100
7.5. Diagnostik von Artefakten	101
7.5.1. Nachweisbarkeit von Veränderungen der OBS	101
7.5.2. Anwendungsbeispiele	104
7.5.3. Zusammenfassung, Schlussfolgerungen und Ausblick	108
7.6. Zusammenfassung	109
8. Schlussfolgerungen	110

1. Einleitung

Die organische Bodensubstanz (OBS) gehört zu den wichtigsten Merkmalen von Böden. Ihre Eigenschaften prägen sich in Abhängigkeit von vielfältigen biotischen und abiotischen Faktoren in Ökosystemen, wie dem Klima, der Bodentextur, der Mineralzusammensetzung, Qualität und Menge organischer Rückstände, dem Adaptionsverhalten von Organismen und anderen Faktoren. Die Wirkungen der organischen Bodensubstanz sind ebenso heterogen. Sie verändern physikalische und chemische Bodeneigenschaften und bestimmen Funktionen des Bodens als Lebensraum der Organismen (107). Der Bewertung der OBS kommt daher in vielen Wissensgebieten eine zentrale Bedeutung zu.

Wechselwirkungen und Abhängigkeiten der OBS von Umweltfaktoren waren vielfach Gegenstand von Untersuchungen (150, 92, 118, 142). Dennoch war es bisher nicht möglich, allgemein anwendbare Qualitätsmerkmale mit eindeutigen Bezug zu Regelmechanismen ihres Gehaltes nachzuweisen (118). Mehrere Jahrzehnte intensiver Forschung reichten nicht zur Ableitung einer allgemein akzeptierten Methode der Qualitätsbewertung der OBS.

Gegenwärtig stehen Beziehungen regionaler Ökosysteme zu globalen Veränderungen (z.B. Klima) im Mittelpunkt. Damit ändern sich Ansprüche und Herangehensweisen an die Qualitätsbewertung der OBS. Im Unterschied zu bisherigen Bemühungen stehen ökosystemare Zusammenhänge und das Verständnis von Stoffkreisläufen im Vordergrund (142, 110, 30).

Zukünftige Verfahren der Qualitätsbewertung sollten aus dieser Sicht nicht nur ertragsrelevante Kenngrößen liefern, sondern auch standortspezifische Variationen der Bodenbildung beschreiben, Veränderungen in Ökosystemen erkennen und das komplizierte Adaptionsverhalten komplexer Organismengemeinschaften in Ökosystemen erfassen helfen.

Diese Überlegungen waren Anlass einer Auseinandersetzung mit Ergebnissen der klassischen Humusanalytik und mit aktuellen Entwicklungstendenzen in der Umweltforschung. Sie führten zur Integration von evolutionsbiologischen Fragestellungen in die Bodenkunde und damit zu einem neuen Ausgangspunkt für das Verständnis sehr komplexer und sehr langfristiger, erdgeschichtlicher Entwicklungsprozesse in der Biosphäre. Darauf aufbauend wurde versucht, Verhaltensweisen der organischen Bodensubstanz unter heutigen Umweltbedingungen zu beschreiben und experimentelle Ansätze für ihre Qualitätsbewertung abzuleiten.

2. Stand der Forschung

2.1. Ergebnisse der traditionellen Humusanalytik

Der Beginn der Humusforschung ist eng an die Entstehung der Bodenkunde als Wissenschaft geknüpft. Die ursprüngliche Betrachtungsweise des Bodens von Dokuchaev (36, 37) über den Boden als „Produkt der Aktivität lebender und toter Organismen, des Ausgangsmaterials, des Klimas und des Reliefs“ ist bis heute aktuell (vergl. Abb. 1). Sie beeinflusste die Entwicklung erster Ansätze zur Analyse der OBS (organische Bodensubstanz).

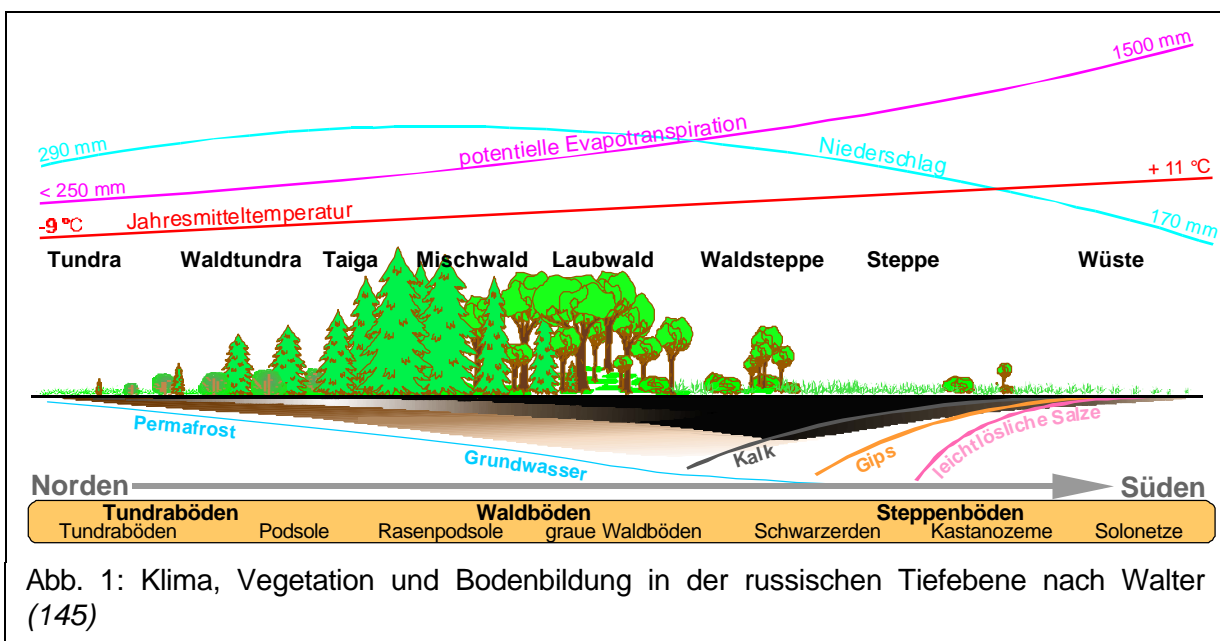


Abb. 1: Klima, Vegetation und Bodenbildung in der russischen Tiefebene nach Walter (1945)

Ausgehend von der besonderen Eignung der Schwarzerden für den Ackerbau wurde nach Bestandteilen der OBS gesucht, die für ihre hohe Fruchtbarkeit verantwortlich sind. Dabei kamen unterschiedliche Extraktionsmittel wie z.B. mineralische Säuren und Basen zum Einsatz (137). Die Ergebnisse dieser Experimente sind für die klassische Humusanalytik charakteristisch und meist gut bekannt. Sie dokumentieren den Ausgangspunkt des heutigen Wissensstandes zu solchen OBS-Komponenten, wie Huminsäuren und Fulvosäuren (107). Sie waren zugleich Ausgangspunkt vielfältiger weiterführender Untersuchungen. Zusammenfassende Darstellungen finden sich u.a. bei Ziechmann (150) und Orlov (92).

Die Ergebnisse der klassischen Humusanalytik wurden über Jahrzehnte unter Berücksichtigung immer neuer Fragestellungen mit neuen Erkenntnissen zu biologischen Prozessen und Fragen der Pflanzenernährung verknüpft. Dabei fanden sich viele Zusammenhänge zur Bodenbildung, die bis heute verwendet werden. Abb. 2 zeigt dazu ein anschauliches Beispiel aus

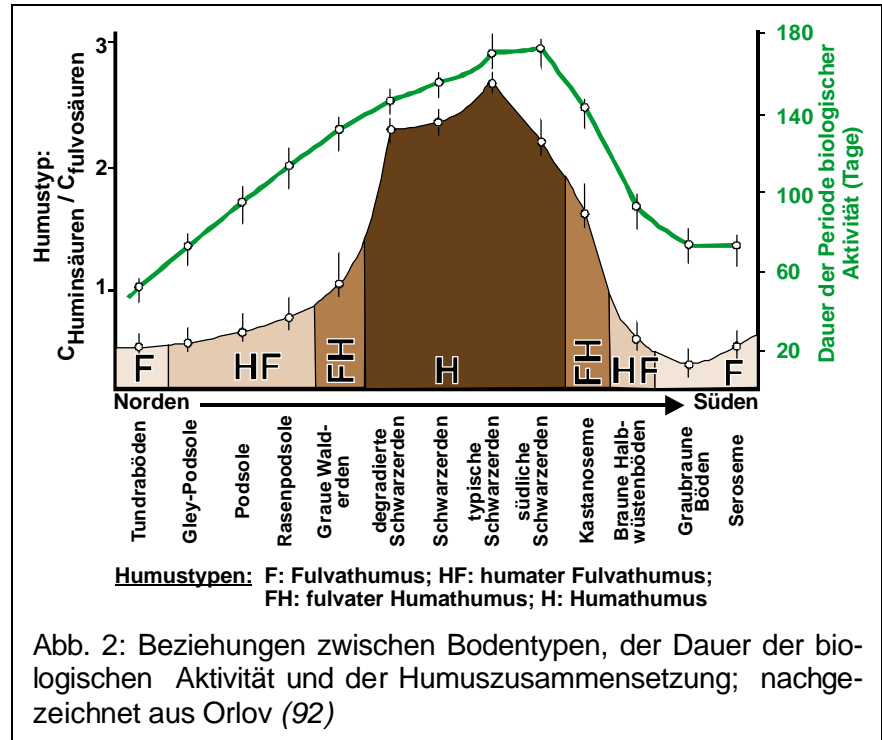
Russland von Orlov (92). Es beschreibt das Verhältnis von Huminsäuren (laugenextrahierbare säurefällbare Fraktion der OBS) zu Fulvosäuren (laugenextrahierbare, säurelösliche Fraktion der OBS) für zonale Bodentypen in Abhängigkeit von Einflussfaktoren auf biologische Umsatzprozesse.

Ungeachtet der Vielfalt und Intensität von Bemühungen um eine Aufklärung von Eigenschaften der OBS blieb jedoch die Nutzbarkeit der chemischen Charakterisierung für praktische Fragen der Bodenbewertung und Bodennutzung unbefriedigend.

Immer wieder wurde deshalb nach neuen Möglichkeiten gesucht.

In Russland stand dabei die Weiterentwicklung klassischer Ansätze im Vordergrund. Sie führte zur Entwicklung neuer Extraktions- und Fraktionierungsverfahren z.B. nach der Dichte, der Farbe, der biologischen Umsetzbarkeit etc.; aber auch nach der Löslichkeit insbesondere in Wasser (138, 93, 9, 6, 42, 135, 103). Die wasserlöslichen Komponenten wurden als "nicht-spezifische" oder "bodenunspezifische" Verbindungen beschrieben, um ihre relative Unabhängigkeit von Merkmalen der Bodenbildung hervorzuheben, ihr Vorkommen außerhalb von Böden (z.B. in Komposten, pflanzlichen Rückständen, abgestorbener Biomasse) zu unterstreichen und ihre herausragende Bedeutung für Fragen der Bodenfruchtbarkeit zu betonen.

Gleiche Schwerpunkte in der Humusanalytik resultieren in den entwickelten Industrieländern aus der Zuwendung zu ökologischen Problemen. Zusammen mit dem Wasserhaushalt wurde und wird den wasserlöslichen Komponenten der OBS als DOM, DOC, DON (dissoluble organic matter, carbon oder nitrogen) eine große Bedeutung für die Bewertung des Verhaltens von Schadstoffen beigemessen. Dies zeigt sich in vielen Untersuchungen. Sie beschäftigen sich mit der chemischen Zusammensetzung und den Eigenschaften dieser Komponenten (2,



32, 85, 87, 95, 102, 135, 134), analysieren ihre Herkunft (24, 52, 104), bewerten Wirkungen auf das Transportverhalten von Schadstoffen (70, 148, 88), quantifizieren Abhängigkeiten von Umweltfaktoren (52, 58, 59) und Beziehungen zu biologischen Umsatzprozessen (50, 77) oder beschäftigen sich mit der Aufklärung anderer funktionaler Aspekte (7, 72).

Unabhängig davon wurde weltweit immer wieder nach neuen Ansatzpunkten für eine allgemein anwendbare Qualitätsbewertung der OBS gesucht. Diese Bemühungen dienten meist der Aufklärung von Eigenschaften und Funktionen einzelner Fraktionen nach dem Vorbild der klassischen Humusanalytik (40, 46, 53, 69, 71, 75, 82, 111, 113, 130, 150). Damit verbundene Neuentwicklungen bei experimentellen Analysetechniken waren und sind eine wichtige Quelle von Erkenntnissen zum Wesen bodengebundener Transformationsprozesse, der Funktionalität von OBS - Komponenten und ihrer Abhängigkeit von Bodenbildungsbedingungen.

Darüber hinaus bildete die Suche nach praktikablen, leicht nutzbaren Ansätzen bei der Bewertung der organischen Bodensubstanz einen weiteren Schwerpunkt der Auseinandersetzung um die OBS-Qualität. Ausgangspunkt waren meist landwirtschaftliche Dauerversuche (76, 81, 94) und Analysen zu Wirkungen der Bodennutzung auf den C-Gehalt. Zu den Ergebnissen gehört - in Anlehnung an ursprüngliche Vorstellungen zum Nähr- und Dauerhumus - eine relativ einfache und leicht handhabbare Unterteilung der OBS in biologisch umsetzbare und biologisch stabile, humifizierte Komponenten.

Ungeachtet dieser Vereinfachungen der ansonsten sehr schwer definierbaren Zusammensetzung der OBS lieferten vor allem diese Untersuchungen neue Erkenntnisse über die Abhängigkeit des C-Gehaltes von Umweltfaktoren. Sie ermöglichten eine Definition optimaler C-Gehalte für landwirtschaftlich genutzte Böden sowie eine Bewertung von Maßnahmen des Acker- und Pflanzenbaus.

Im ökosystemaren Kontext sind vor allem die Ergebnisse über die Abhängigkeit des "inerten" Kohlenstoffs vom Tongehalt der Böden (139) wichtig. Die tonabhängige Quantifizierung biologisch stabiler Bestandteile der OBS ist Grundlage von Simulationsmodellen zum Stoffumsatz (98), vieler Ansätze zur Minimierung von Umweltbelastungen und Gegenstand der Verbindung des C-Gehaltes mit biologischen Umsatzprozessen.

Kernpunkt der anwendungsbezogenen Bewertung der OBS ist jedoch bis heute die Quantifizierung umsetzbarer Bestandteile der OBS. Sie basiert auf einer Extraktion mit Wasser (77, 99). Damit werden methodische Parallelen unterschiedlicher Entwicklungsrichtungen der OBS-Analyse deutlich, die den heutigen Erkenntnisstand zur Qualitätsbewertung der OBS wesentlich mitbestimmen.

2.2. Aktuelle Entwicklungstendenzen

Gegenwärtig werden neue Methoden in der Humusanalytik (47, 114, 115, 73) verstärkt zur Lösung bodengenetischer Fragen diskutiert (74, 128). Dieser Trend ist Folge der zunehmenden Einbeziehung überregionaler Aspekte in bodenkundliche Untersuchungen an einzelnen Standorten und von Untersuchungen zu globalen Stoffkreisläufen (118, 89, 80, 45). Er zeigt sich auch in der geplanten Auseinandersetzung mit Stabilisierungsmechanismen der OBS (118) und impliziert eine Verbindung bisher getrennter Aspekte der Aufklärung chemischer und funktionaler Grundlagen mit Fragestellungen der praktischen Bodennutzung. Diese Herangehensweise impliziert eine Verbindung bisher getrennter Untersuchungen zu:

- umsetzbaren und inerten Bestandteilen
- bodengenetischen und aktuellen Prozessen
- bodengenetischen Aspekten, der Ökosystemsukzession und von langfristigen Wirkungen der Evolution der Organismen auf Eigenschaften der heutigen Biosphäre.

Darin spiegelt sich zugleich die Überzeugung wider, dass nachhaltige Lösungen aktueller, regionaler Fragestellungen eine Auseinandersetzung mit globalen Zusammenhängen und langfristigen Entwicklungstendenzen erfordern (108, 109). Dies betrifft sowohl Aspekte der Diversität von Arten (30), als auch die Produktivität von Ökosystemen (26), das Verständnis langfristiger ökosystemarer Entwicklungstendenzen (28), Beziehungen des Kohlenstoffkreislaufs zu anderen Nährstoffen, wie z.B. des Stickstoffs (91) oder des Sauerstoffs (15), als auch Fragen der regionalen Wasserversorgung (110), des globalen Stoffhaushaltes und andere Probleme.

Für das Verständnis der OBS - Qualität sind Untersuchungen zu globalen, erdgeschichtlichen Aspekten der Klimaentwicklung, von Stoffkreisläufen und Umweltproblemen offenbar besonders wichtig. Dies zeigt sich nicht nur in der Vielfalt fachübergreifender Publikationen (21, 22, 33, 90, 99, 110, 132). Es wird zudem eine gegenseitige Abhängigkeit von Klimaänderungen und der Kohlendioxidkonzentration vermutet (8, 55), die aus langfristigen Adaptionsprozessen terrestrischer Ökosysteme und einer co-evolutiv veränderlichen Funktion von Böden als Senke und Quelle für Kohlenstoff resultiert (48, 146).

Zwar bestehen nur sehr begrenzte Möglichkeiten der Beweisführung für einen Zusammenhang zwischen C-Akkumulation in Böden und evolutiven Entwicklungstendenzen der Organismen (31, 63) oder ihres Zusammenlebens in komplexen Gesellschaften bzw. Ökosystemen. Auch die Mechanismen einer gegenseitigen Adaption von Ökosystemfunktionen und globalen Umweltfaktoren sind bisher nur unzureichend bekannt (110). Dennoch scheinen gerade diese

Aspekten für die Lösung aktueller Fragen des Umweltschutzes und der Nutzung natürlicher Ressourcen wichtig.

Weitere Argumente hierzu liefert die Kohlenstoffverteilung in der Biosphäre. So sind nach Bouwman (20) 11 % des weltweit bilanzierten CO₂ an terrestrische Lebensformen gebunden. Trumbore (142) ermittelte insgesamt 1500 pg Kohlenstoff in der OBS. Mit 81 % Anteil handelt es sich dabei um das größte aktive Reservoir (18). Modellvorstellungen zu gegenseitigen Abhängigkeiten der Atmosphäre, der Vegetation und der Böden (25, 26, 41, 61) liefern weitere Indizien. Die Ergebnisse dieser Analysen verweisen auf eine notwendige Berücksichtigung überregionaler, d.h. sehr langfristiger ($> 10^5$ Jahre) Entwicklungsprozesse in der Biosphäre bei der Beantwortung von Fragen zu Gesetzmäßigkeiten der Akkumulation des Kohlenstoffs in Böden einzelner Regionen.

So scheint beispielsweise die Anreicherung von Böden mit Kohlenstoff nicht allein eine Frage der stofflichen Zusammensetzung zu sein (25). Solche Unterschiede werden durch evolutive Adaptionsprozesse der Organismengemeinschaften ausgeglichen (21, 30, 28) - ein Aspekt der, im Unterschied zu vielen traditionellen Annahmen aus der Humusforschung, mit der essenziellen Ausrichtung der Organismen an verfügbare Ressourcen konform geht. In Ergänzung zu chemischen Spezifika akkumulierter Substanz in Böden wird daher Adaptionsprozessen der Organismen und ihrer globalen Vernetzung eine Schlüsselbedeutung für die Qualitätsbewertung der OBS beigemessen.

Diese Aspekte sind zugleich für die Etablierung heutiger Klimabedingungen in der Erdgeschichte verantwortlich (110) und stellen somit aus unterschiedlicher Sicht eine sinnvolle Ergänzung heutiger Ansätze zur OBS - Analytik dar.

3. Zielstellung

Aus diesen Überlegungen leitete sich die methodische Vorgehensweise und die Zielstellung der vorliegenden Arbeit ab. Es wurde versucht, die erdgeschichtliche Entwicklung von Umweltbedingungen als Ursache der Prägung heutiger Bodenbildungsprozesse seit dem Beginn terrestrischen Lebens zu verstehen. Der darin enthaltene Bezug auf Prozesse der Evolution sollte methodische Ansatzpunkte für eine einfache, überregional einheitlich Kennzeichnung der OBS liefern.

Das darauf aufbauende Ziel der Arbeit bestand in einer Verifikation der Aussagefähigkeit evolutionsbiologisch begründeter Ansätze zur Qualitätsbewertung der OBS.

Die Erarbeitung eines neuen Analyseverfahrens gehörte nicht zur Zielstellung (vergl. Arbeitsthesen zum DFG - Projekt Si 488/1-2, 126). Dies trifft auch für eine Beweisführung der im folgenden Abschnitt dargestellten Überlegungen zu, weil keine Methoden zur Verifikation evolutionsbiologischer Kontexte der Prägung von Bodenbildungsprozessen in erdgeschichtlich langen Zeiträumen ($> 10^6$ Jahre) bekannt sind.

4. Grundlagen der experimentellen Vorgehensweise

Bodenbildung und Evolution: Die Bodenbildung gilt als ein essentieller Begleitfaktor der Ökosystemsukzession. Sie gewährleistet das Überleben vielfältiger Organismenarten, die Entwicklung stabiler Interaktionen zwischen unterschiedlichen Organismen und die Etablierung von Organismengemeinschaften (29, 143). Diese Vorstellungen basieren auf dem klassischen Verständnis von Böden als „Produkt der Aktivität lebender und toter Organismen, des Ausgangsmaterials, des Klimas und des Reliefs“ (36).

Die Aktivität heutiger Organismen ist ein Ergebnis ihrer evolutiven Entwicklung (131). Sie ist für biologische Bodenbildungsprozesse verantwortlich (107). Die Bedeutung der Evolution für die Bodenbildung bleibt aber nicht auf direkte Wirkungen heute lebender Organismen begrenzt. Es ist zu berücksichtigen, dass die meisten abiotischen Existenzbedingungen in der Biosphäre, d.h. nahezu alle abiotischen Einflussfaktoren auf die Bodenbildung einer tiefgreifenden erdgeschichtlichen Prägung unterlagen. So zählen heutige Klimabedingungen und das Vorhandensein von Sauerstoff in der Atmosphäre ebenfalls zu den unumstrittenen Folgen der Entwicklung des Lebens, welche die heutige Bodenentwicklungsprozesse entscheidend beeinflussen. Heutige Umweltbedingungen, einschließlich vieler geologischer Substrate, sind demnach nur scheinbar eine selbstverständliche Voraussetzung der heutigen Bodengenese.

Untersuchungen zur erdgeschichtliche Herausbildung von Bodenbildungsprozessen sind hingegen nicht bekannt. Über die Bedeutung dieser Prozesse für die heutige Biosphäre, die Akkumulation einzelner geologischer Substrate, eventuelle Rückwirkungen auf das Zusammenleben heutiger Organismen in komplexen Gesellschaften und damit verbundene Adaptionsprozesse von Ökosystemen auf anthropogene Einflüsse lässt sich nur spekulieren.

Dies ist bemerkenswert, weil die Abhängigkeit der Evolution der Organismen von Umweltbedingungen unumstritten ist, biotechnologische Ansätze zu den Schlüsseltechnologien zählen, die Bodenbildung tiefgreifende Veränderungen der Umweltbedingungen im Lebensraum

der Organismen auf dem Festland markiert und diesbezügliche Veränderungen durch neue Technologien zu erwarten sind.

Als unumstritten gilt hingegen, dass Organismen die Umwelt tiefgreifend verändert haben und diese Veränderungen Rückwirkungen auf die Artenentwicklung initiierten. Ebenso eindeutig lässt sich feststellen, dass sich daraus immer wieder neue Modifikationen in der Umwelt und bei der Evolution der Organismen im Laufe vieler Jahrtausende entwickelten. Dies erklärt die wechselseitige Abhängigkeit heutiger Organismen und der Biosphäre (83).

Für das Verständnis einer erdgeschichtlichen Prägung von Bodenbildungsprozessen scheint daher ein Rückblick auf Ursachen der Herausbildung heutiger Umweltbedingungen durchaus sinnvoll (vergl. 84). Aus bodenkundlicher Sicht wird dazu eine Unterscheidung zwischen zwei Zeitskalen vorgeschlagen:

- a) In Jahrhunderten und Jahrtausenden sind die Gesetzmäßigkeiten der Bodengenese ein stabiler, relativ unveränderlicher Faktor der Ökosystemsukzession und eine quasikonstante Einflussgröße auf die Organismenentwicklung. Die Bodenbildung selbst beschreibt einen Modifikationsprozeß vorhandener geologischer Substrate, der von der Aktivität lebender Organismenarten und ihren veränderlichen Interaktionen getragen wird und sich nach geologischen Ereignissen, Klimaänderungen etc. nach jeweils gleichem Schema vollzieht. Die Qualität und Quantität geologischer Ausgangssubstrate wird nicht bzw. nur marginal verändert.
- b) Über Jahrtausende sind Bodenbildungsprozesse veränderlich, weil von Umweltbedingungen abhängig (z.B. Sauerstoffatmosphäre). Sie zählen zu den terrestrischen Einflussfaktoren für die Bildung geologischer Substrate mit unterschiedlichen Eigenschaften. Für die Prägung von Bodenbildungsprozessen wird den Organismen seit dem Beginn terrestrischen Lebens und der damit verbundenen Adaption an einen veränderten Wasserhaushalt eine besondere Bedeutung beigemessen. Möglicherweise kennzeichnet die bisher nicht analysierte erdgeschichtliche Prägung von Bodenbildungsprozessen eine erdgeschichtliche Durchsetzung ökosystemarer Selbstorganisationsprozesse, deren Folgen sich in der Etablierung der heutigen Atmosphäre, des Klimas und der Gesetzmäßigkeiten der heutigen Bodengenese zeigen (vergl. 8, 25, 55).

Hierarchien und Ähnlichkeiten. Die Biosphäre wird im allgemeinen als höchste hierarchische Organisationsebene des Lebens gesehen (83). Ist dies richtig, stellen Ökosysteme eine Organisationsebene dar, welche die Entwicklung der Organismen in Gesellschaften mit der Biosphäre verbindet (8). Übergänge zwischen den hierarchischen Ebenen lassen sich nicht nur

innerhalb der Organismen (Zellen, Gewebe, Organe etc.), sondern auch oberhalb der Organismen, d.h. zwischen Organismen und Ökosystemen sowie zwischen Ökosystemen und der Biosphäre mit einer "Evolution von Evolutionsmechanismen" im Sinne von Eigen (38) erklären.

Demnach ist die Bodenbildung ein Umweltkompartiment, dessen veränderliche Wirkungen für die erdgeschichtliche Entwicklung von Organismengesellschaften ebenso wichtig sind, wie für die sukzessive Etablierung heutiger Ökosysteme. Aus gleichen Gründen ist die heutige Bedeutung der Bodenbildungsprozesse für Ökosysteme nur im Kontext einer erdgeschichtlichen Prägung plausibel. Sie kann mit anderen Worten nicht aus dem Nichts durch Zufälle entstanden sein. Eine evolutionsbiologisch motivierte Auseinandersetzung mit der Bodenbildung sollte also zur Schließung von Wissenslücken zwischen Bodenkunde, Ökologie und Evolutionsbiologie beitragen können.

Der erste Versuch einer Verbindung zwischen Organismen und Ökosystemen verdeutlicht interessante Ähnlichkeiten:

1. Die Entwicklung von Individuen spiegelt die Stammesgeschichte der Arten wider (Zusammenhänge zwischen Onto- und Phylogenese). Analog dazu beginnt die Sukzessionsentwicklung von heutigen Ökosystemen mit der Akkumulation organischer Substanz, d.h. mit einem Prozess, der seit dem Beginn terrestrischen Lebens Wirkungen der Organismen auf ihre Umwelt dokumentiert und z.B. die Bildung großer Kohlelagerstätten ermöglichte.
2. Cairns-Smith (23) verbindet die Entstehung von Genen mit Modifikationen von Tonoberflächen mittels organischer Substanzen durch erste organismenähnliche Lebensformen. Gleiche Prozesse scheinen auf höherem Niveau für Ökosysteme charakteristisch. So dokumentiert die Bodengenese einen Modifikationsprozeß von Eigenschaften geologischer Ausgangssubstrate mittels Akkumulation organischer Substanz (107). Dieser Prozess ist von Tonmineralen abhängig (77, 107).
3. Die genetische Information der Organismen gewährleistet das Überleben von Individuen. Sie bestimmt die Interaktionen des Individuums mit seiner abiotischen Umwelt. Die Bodengenese und Akkumulation von organischer Substanz gewährleistet die Stabilität von Ökosystemen und das Überleben komplexer Organismengesellschaften. Sie determiniert die Interaktionen der Organismengesellschaften mit Eigenschaften der Biosphäre.
4. Die Realisierung genetischer Informationen in Organismen (Genexpression) wird durch ein Netzwerk von DNA-Sequenzen und Proteinen in der Promotorregion der Gene moduliert. Die Entwicklung von Organismengesellschaften in Ökosystemen ist Folge eines Netz-

werks physikalischer, chemischer und biologischer Prozesse, die von Modulationen der OBS als dem Promotor von Bodenfunktionen in Ökosystemen getragen wird.

Diese und ähnliche Parallelen (122) zwischen der Organismenentwicklung und Bodengenese wurden bisher weder in der Bodenkunde, noch in der Evolutionsbiologie berücksichtigt. Insbesondere das letzte Beispiel beschreibt jedoch nur gut bekannte und allgemein akzeptierte Zusammenhänge.

Die Innovation, ihre Probleme und Vorteile. Hauptunterschied zu bisherigen Vorstellungen und Definitionen der Bodenqualität (35) ist die gleichzeitige Berücksichtigung

- a) der Abhängigkeit der Organismenentwicklung von Umweltbedingungen und
- b) der Bedeutung von Umweltbedingungen für die Evolution der Organismen

als gleichermaßen wichtige Faktoren einer gemeinsamen erdgeschichtlichen Entwicklung.

Dieser Unterschied impliziert eine Analyse der Bodengenese als einen Modifikationsprozeß regionaler Umweltbedingungen, der sich im globalen Kontext in der erdgeschichtlichen Entwicklung der Biosphäre bzw. Atmosphäre widerspiegelt zeigt und in erdgeschichtlich großen Zeiträumen durchaus veränderlich ist.

Kritisch ist dabei die Annahme, dass die erdgeschichtliche Prägung von Bodenbildungsprozessen von gleichen Gesetzmäßigkeiten der Evolution getragen wird, wie die Entwicklung der Arten und der Biosphäre. Diese These wurde experimentell nicht bewiesen, wird aber häufig verwendet. Sie spiegelt sich im hierarchischen Prinzip der Ökologie wider und ist Grundlage einer zunehmenden Zahl von Untersuchungen (29, 83, 84, 143, 144).

Zu gleichen Bedingungen lassen sich die Ergebnisse aus anderen Wissensgebieten mit der Bodenkunde auf neue Weise verknüpfen und für die Erarbeitung neuer methodischer Ansätze der OBS - Qualitätsbewertung nutzen, was an Hand des folgenden Beispiels verdeutlicht werden soll.

Wasserhaushalt und organische Bodensubstanz. Ziel ist eine Reduktion der kaum überschaubaren Variabilität von Adaptionprozessen und ständig veränderlichen Interaktionen von Organismen in heutigen Ökosystemen (21, 30, 108, 110). Dies führt zu wahrscheinlichen Schlüsselfaktoren der Herausbildung heutiger Bodenbildungsprozesse, die seit dem Beginn terrestrischen Lebens die Prägung funktionaler Eigenschaften der OBS steuern.

Seit dem Beginn terrestrischen Lebens kommt dem Wasserhaushalt eine besondere Bedeutung zu. Er ist entscheidend für die evolutive Entwicklung von Organismen (131), für ihr Zusammenleben in Gesellschaften und für die Ökosystemsukzession (110). Der Wasserhaushalt

bestimmt auch in heutigen Ökosystemen die Akkumulation organischer Substanzen und gehört zu den wichtigsten Einflussfaktoren auf die Bodenbildung (107).

Es wird daher vermutet, dass

- funktionale Eigenschaften der OBS mit dem Wasserhaushalt verknüpft sind,
- nicht allein die chemische Zusammensetzung, sondern auch die Wasserbindungsfähigkeit der OBS ihre Funktionen und Wirkungen in Böden steuert,
- vom Wasserhaushalt abhängige Variationen organismischer Interaktionen einen Schlüssel zum Verständnis der OBS-Qualität darstellen und
- sich die Bedeutung des Wasserhaushalts für die OBS - Qualität in der empirischen Orientierung von Untersuchungsmethoden auf die Wasserextraktion widerspiegelt.

Bisherige Ansätze in der Humusanalytik analysieren die Wasserlöslichkeit der OBS. Der Wasserbindungsfähigkeit der OBS wurde hingegen nur wenig Aufmerksamkeit geschenkt. Dies zeigt sich schon in der üblichen Standardaufbereitung von Bodenproben (Lufttrocknung, Siebung auf 2 mm). Sie enthält keine Festlegungen zu den Trocknungsbedingungen. Bisherige Untersuchungen konnten somit keine Hinweise auf eine Bedeutung der Wasserbindungsfähigkeit für Funktionen der OBS liefern.

Bei Untersuchungen zur Menge gebundenen Wassers in Bodenproben zeigten sich oft enge Beziehungen zum Tongehalt (107). Darauf aufbauende Schlussfolgerungen über eine Abhängigkeit der Hygroskopizität vom Tongehalt gehen mit Untersuchungsergebnissen zur Hygroskopizität von absolut kohlenstofffreien Tonmineralen konform. Die Kausalität eines Zusammenhangs zwischen Tongehalt und der Wasserbindungsfähigkeit in Bodenproben ist damit jedoch nicht bewiesen. Die Plausibilität einer solchen Übertragbarkeit von Aussagen stand jedoch Untersuchungen zur Bindungsfähigkeit von Wasser an die OBS entgegen. Aus heutiger Sicht weisen Korrelationen von humifizierten Komponenten zum Tongehalt (77) und zur Menge gebundenen Wassers auf alternative Interpretationsmöglichkeiten hin. Gleichgerichtete Beziehungen zwischen Wasserbindungsfähigkeit und Tongehalt bei Böden und kohlenstofffreien Tonmineralen können demnach durchaus unterschiedliche Ursachen haben (s. Ausführungen auf S. 40 im Abschnitt 6.1.7.).

Die Wasserbindungsfähigkeit organischer Substanzen stellt aus evolutionsbiologischer Sicht einen besonders interessanten Ansatzpunkt dar. So wurde das Überleben erster Organismen auf dem Festland vermutlich von Wirkungen organischer Rückstände auf die Speicherung von Wasser begünstigt. Die massenhafte Ausbreitung C - akkumulierender Pflanzen im semiterrestrischen Bereich weist auf eine solche Möglichkeit hin und führte offensichtlich zur Bildung großer Vorräte an fossilen Brennstoffen.

Gestützt wird diese Annahme durch:

- die Bedeutung der Wasserbindung für die Torfakkumulation

- Konsequenzen der erdgeschichtlichen C-Akkumulation (z.B. Kohle) für die Entwicklung globaler Stoffkreisläufe und der Sauerstoffatmosphäre
- Rückwirkungen durch Organismenaktivitäten veränderter C - Kreisläufe auf die evolutive Entwicklung der Arten (bis hin zur Entstehung von C4 - Pflanzen) und
- die Bedeutung des Wasserhaushalts für die Akkumulation organischer Substanzen in heutigen Ökosystemen.

Dementsprechend schien eine Berücksichtigung der Wasserbindungsfähigkeit der OBS und eine Untersuchung von Beziehungen zum mikrobiellen Stoffumsatz ein geeigneter, neuer Ansatzpunkt zur Qualitätsbewertung der OBS.

5. Material und Methoden

5.1. Auswahl der Analysemethoden

Für die Untersuchungen zur Wasserbindungsfähigkeit wurde die Thermogravimetrie (TG) ausgewählt (122). Sie erfasst mit sehr geringen Arbeitsaufwendungen gebundenes Wasser über Gewichtsverluste um 100 °C.

Desweiteren ermöglicht die TG eine gleichzeitige Quantifizierung humifizierter Komponenten der organischen Bodensubstanz (OBS). Diese Anwendung geht auf Vorschläge von Konèic und Èernikov (75), Ševcova und Sidorina (105) zurück. Sie fanden Zusammenhänge zwischen Gewichtsverlusten (GV) extrahierter Humusstoffen um 500 °C und der Bodenbildung in unterschiedlichen Klimazonen.

Demnach lassen sich mit Hilfe der TG GV (Gewichtsverluste) in hohen (um 500 °C) und niedrigen (um 100 °C) Temperaturbereichen zur Quantifizierung von Humusstoffen und der Wasserbindungsfähigkeit nutzen. Enge Korrelationsbeziehungen zwischen den GV beider Temperaturbereiche wurden erwartet, falls die Vorstellungen über eine vom Wasserhaushalt abhängige Prägung der bodengenetisch akkumulierten OBS richtig sind.

Neben humifizierten Komponenten stellt die Menge biologisch abbaubarer Komponenten der OBS einen traditionell häufig untersuchten und wichtigen Faktor der Bodenfruchtbarkeit dar (s. Abschnitt 2, S. 2). Biologisch abbaubare OBS-Komponenten beeinflussen die kurzfristige Entwicklung von Organismen und repräsentieren wichtige Komponenten ökosystemarer Stoffkreisläufe (99, 77).

Es schien daher zweckmäßig, die Untersuchungen zu humifizierten Komponenten mit einer Quantifizierung umsetzbarer Komponenten zu verbinden. Dazu wurden Inkubationsexperimente unter Laborbedingungen durchgeführt.

Erste Studien mit beiden Methoden zu Pflanzensubstanzen verwiesen auf enge Beziehungen zwischen der CO₂-Freisetzung im Inkubationsversuch und thermischen GV (Gewichtsverlusten) zwischen 200 °C und 450 °C (123). Auf dieser Grundlage wurden thermische GV frischer und inkubierter Bodenproben verglichen. Die größten Unterschiede wurden auch hier im Temperaturbereich zwischen 200 °C und 450 °C gefunden (124).

Demnach erlaubt die Thermogravimetrie eine gleichzeitige Quantifizierung des gebundenen Wassers, der biologisch abbaubaren und der humifizierten Komponenten in einer einfachen Analysenprozedur. Folgende Temperaturbereichen sind dabei zu unterscheiden:

- A) Gebundenes Wasser: Gewichtsverluste von 25 °C bis 190 °C (Temperaturbereich A bzw. TB A)
- B) Biologisch veränderliche bzw. abbaubare Komponenten: Gewichtsverluste von 200 °C bis 450 °C (Temperaturbereich B bzw. TB B)
- C) Humifizierte Komponenten der OBS: Gewichtsverluste von 460 °C bis 650 °C (Temperaturbereich C, TB C).

5.2. Methodenbeschreibungen

5.2.1. Thermogravimetrie

Die thermogravimetrischen Bodenanalysen wurden mit einer Thermowaage (STGA 851e) der Mettler-Toledo GmbH durchgeführt. Sie beinhalteten eine Erwärmung lufttrockener Bodenproben von 25 °C auf 1000 °C mit einer Heizrate von 5 °C pro Minute in einem Luftstrom von 200 ml pro Minute mit 76 % relativer Luftfeuchte bei 20 °C.

Vor der Analyse wurden die Bodenproben über mindestens 14 Tage bei 76 % relativer Luftfeuchte im Exsikkator in einer Schicht von max. 3 mm Höhe konditioniert, um vergleichbare Gehalte an gebundenem Wasser einzustellen. Alternativ erfolgte für methodische Vergleichsuntersuchungen eine Konditionierung über Kieselgel und bei ca. 100 % relativer Luftfeuchte.

Die Analyseneinwaage betrug jeweils 0.5 bis 1.2 g. Die Aufzeichnungsdichte der Messdaten wurde auf einen Messwert je 4 Sekunden bzw. je 0.33 °C Temperaturerhöhung eingestellt, so dass für jede analysierte Probe insgesamt 2925 Datensätze vorlagen. Bei den meisten Auswer-

tungen wurde diese Datenmenge auf 1 Datensatz je 1 °C Temperaturerhöhung (1000 Datensätze je Analyse und Probe) oder 1 Datensatz je 5 °C Temperaturerhöhung (200 Datensätze je Analyse und Probe) reduziert. Die Darstellungsdichte der Messdaten in den folgenden Abbildungen ist daher um einen Faktor 3 bis 15 kleiner als die Aufzeichnungsdichte.

5.2.2. Inkubationsexperimente

Die Inkubationsexperimente basieren auf einer „RESPIROCOND“-Anlage von NORDGREEN INNOVATIONS. Diese Anlage ermöglicht eine gleichzeitige und quasikontinuierliche Messung der Bodenatmung in 96 Messkanälen über die veränderte elektrische Leitfähigkeit von Kalilauge bei Absorption des aus dem Boden freigesetzten CO₂.

Die Messdichte wurde im Laufe des Versuchs kontinuierlich angepasst. Bei Versuchsbeginn erfolgte eine Aufzeichnung von einem Mittelwert aus 15 Einzelwerten je Messzelle alle 20 Minuten. Diese Messdichte wurde bis zum Versuchsende auf einen Mittelwert aus 100 Einzelmessungen je Messzelle alle 12 Stunden reduziert. Bei der Auswertung erfolgte eine weitere Reduktion des Datenmaterials. Die Darstellungsdichte der Messdaten ist daher auch hier deutlich kleiner als die tatsächliche Anzahl der Messungen.

Für die Durchführung der Experimente wurden lufttrockene Proben verwendet. Dies sollte

- eine gleichzeitige Untersuchung von Bodenproben aus unterschiedlichen Klimazonen unter gleichen Bedingungen vereinfachen und
- gleichzeitig Besonderheiten der Dynamik der Bodenatmung bei Feuchteänderungen erfassen helfen.

Die meisten in der Literatur beschriebenen Ergebnisse zur Bodenatmung beziehen sich demgegenüber auf Inkubationsbedingungen mit konstanter Feuchte. Um eigene Untersuchungen mit diesen Experimenten vergleichen zu können, wurden die Proben ausreichend lange bei unterschiedlichen Temperaturen unter Einbeziehung von Frostperioden inkubiert (s. Tabelle 1). Dabei wird davon ausgegangen, dass die sich im Laufe der Experimente einstellende Basalatmung mit Messwerten zur CO₂-Freisetzung frischer, nicht getrockneter Bodenproben vergleichbar ist.

Die Probeneinwaage für die Inkubationsexperimente betrug jeweils 25 g. Die Proben wurden vor dem Beginn der Messungen auf 60 % ihrer maximalen Wasserhaltefähigkeit (bestimmt an gesiebten Proben) befeuchtet. Nach der Wasserzugabe wurden die Proben sofort intensiv gemischt, um die Ausbildung von Lösungsmittelfronten zu verhindern und die Heterogenität der

CO₂-Freisetzung bei Wiederholungsmessungen zu reduzieren. Unmittelbar nach der Wiederbefeuchtung wurde mit der Messung der CO₂-Freisetzung begonnen.

Um die Bedeutung der Temperatur für die Dynamik der CO₂-Freisetzung zu prüfen, wurde bei den Experimenten folgendes Temperaturprogramm eingehalten:

Tabelle 1: Temperaturprogramm der Inkubationsexperimente

Versuchsphase	Beginn - Ende (Versuchstage)	Dauer (Tage)	Inkubationstemperatur
I	0 – 35	35	20 °C
II	36 – 37	2.3	30 °C
III	38 – 39	0.4	20 °C
IV	40 – 42	2.1	5 °C
V	43 – 45	1.8	20 °C
VI	47 – 48	0.7	-10 °C
VII	49 - 52	2.2	20 °C
VIII	53 – 54	1.2	-10 °C
IX	54 – 55	0.4	20 °C
X	57 – 57	0.3	-10 °C
XI	58 - 60	2.3	20 °C

Es dient folgenden Zielstellungen:

- Versuchsphase I: Analyse der Dynamik der Bodenatmung nach Wiederbefeuchtung unter optimalen Bedingungen
- Versuchsphase II: Veränderungen der sich zum Ende von Versuchsphase I eingestellten Basalatmung bei Temperaturerhöhung um 10 °C
- Versuchsphasen III und V: Quantifizierung von Veränderungen der Basalatmung durch andauernden Verbrauch umsetzbarer Substanz, gegebenenfalls Analyse dynamischer Veränderungen der Bodenatmung nach Temperaturvariationen
- Versuchsphase IV: Veränderungen der Basalatmung bei reduzierter Temperatur
- Versuchsphasen VI, VIII und X: Simulation von Frosteffekten, keine Messung möglich durch gefrieren der Kalilauge, keine Auswertung

- Versuchsphasen VII, IX und XI: Messung der Bodenatmung nach mehrfachen Frostwirkungen, Quantifizierung von Veränderungen der Basalbodenatmung durch fortschreitenden Verbrauch umsetzbarer Substanz.

Zur Verifikation von Wirkungen der Lufttrocknung wurden die Proben nach Ablauf der Experimente nochmals luftgetrocknet, wieder befeuchtet und einer nochmaligen Inkubation unterzogen. Darüber hinaus wurde der Einfluss der Verfügbarkeit leicht umsetzbarer organischer Substanzen auf die Dynamik der Bodenatmung analysiert. Dazu wurde Glucose als Modellsubstanz in einer Aufwandmenge von 8 mg Glucose je 25 g Boden verwendet. Zum Einsatz kamen in mehreren Experimenten frisch entnommene, luftgetrocknete Proben und mehrfach wiederbefeuchtete, inkubierte und luftgetrocknete Bodenproben (aus vorhergehenden Inkubationsexperimenten) mit jeweils gleicher Einwaage. Die Applikation der Glucose erfolgte immer in gelöster Form während der Wiederbefeuchtung der lufttrockenen Proben.

5.2.3. Sonstige Methoden

Probenentnahme und -aufbereitung: Die Entnahme der Bodenproben erfolgte durch mindestens 60 Einstiche mit GÖTTINGER BOHRSTÖCKEN in 0 bis 30 cm Tiefe in einem Areal von mind. 60 m Durchmesser zu mehreren Terminen an jeweils gleichen Standorten (siehe Übersicht auf S. 17). Die feldfrischen Proben wurden bei max. 25 °C in möglichst dünnen Schichten luftgetrocknet und auf 2 mm gesiebt. Die Lagerung der lufttrockenen Proben erfolgte im Kühlschrank bei 5 °C.

Zur Bestimmung der Bodeneigenschaften wurden folgende Methoden angewendet:

Karbonatbestimmung: CO₂-Freisetzung nach Säurezugabe mit Hilfe der Respirocond-Anlage

Gehalte an Gesamt - C und - N: trockene Verbrennung, Analyse mit Elementar - Analyzer von Carlos Erba (auf 0.2 mm gemahlene und bei 105 °C getrocknete Proben)

Wasserhaltefähigkeit / Feldkapazität: gravimetrisch an gesiebten, lufttrockenen Proben nach 24-stündigem Überstau und nacheinanderfolgender Einstellung einer Saugspannung von pF 1.8 und pF 2.0 mit Hilfe keramischer Platten

pH-Werte: Standardanalyse per Elektrode in Wasser und KCl - Lösung

Anionen (Nitrate, Phosphate, Chloride, Sulfate): Extraktion mit Wasser und 200 ppm CaCl₂-Lösung, Verhältnis Boden zur Extraktionslösung = 1:5; Quantifizierung

durch Messung der elektrischen Leitfähigkeit nach chromatographischer Trennung mit DIONEX

Kationen (Si, Mn, Al, Fe, Ca, Mg, K, Na): Extraktion mit Wasser und 200 ppm CaCl₂-Lösung, Verhältnis Boden zur Extraktionslösung = 1:5; Analyse der Kationen mit Atomabsorptionsspektrometer

Körnung/Textur: Standard-Pipettanalyse mit gravimetrischer Bestimmung nach Zerstörung von Karbonaten (soweit vorhanden), Humuszersetzung mit H₂O₂ und Dispergierung mit Natriumpyrophosphat

5.3. Probenmaterial

Für die Untersuchungen wurde ein Probensatz aus 54 Böden aller wichtigen Klimazonen Ost- und Mitteleuropas auf unterschiedlichen geologischen Substraten unter natürlicher Vegetation, Ackerbau und Forstwirtschaft zusammengestellt. Die Entnahmetiefe entsprach, soweit nicht anders angegeben, jeweils dem A_p oder A_h und bei größerer Mächtigkeit des humosen Horizontes einer Tiefe von 30 cm. Die jeweiligen Standorte wurden im Herbst 1992, im Frühjahr 1993 und im Sommer 1993 beprobt. Die folgende Liste enthält eine Aufstellung dieser Standorte. (fett gedruckte Zahlen in „[]“-Klammern bezeichnen in folgenden Abbildungen und Tabellen verwendete Probennummern)

I. Proben aus Russland

a) **Zimljansk** im Rostower Gebiet (Nähe Donstaubecken); Trockensteppe / Halbwüste

- **Auenböden** auf Löß mit kastanosemäßlichen Eigenschaften nach jahrzehntelanger Grundwasserferne in Folge eines Staudammbaus: **[1]** mit unveränderter Steppenvegetation, **[2]** unter landwirtschaftlicher Nutzung
- **Schwarzerden** auf Löß: **[3]** mit unveränderter Steppenvegetation, **[4]** unter landwirtschaftlicher Nutzung, **[6]** unter Eichenmischwald
- **Schwarzerde** auf Schwemmsand: **[5]** unter jungem Kiefernforst
- **Kastanoseme** auf Löß: **[7]** mit unveränderter Steppenvegetation, **[8]** erodiert mit unveränderter Steppenvegetation, **[9]** unter landwirtschaftlicher Nutzung

b) **Kursk** im Kursker Gebiet; Steppe

- **typische Schwarzerden** auf Löß aus dem Biosphärenreservat Kursk: **[27]** mit unveränderter Steppenvegetation, **[28]** unter langjähriger Schwarzbrache, **[49]** unter Wald

- **typische Schwarzerden** auf Löß: landwirtschaftliche Versuchspartellen der Kursker Filiale des Dokucaev-Institutes in Moskau: [29] Kartoffelmonokultur ohne Düngung, [30] Kartoffelmonokultur mit Mineraldüngung, [31] Kartoffelmonokultur mit Stallmistdüngung
- **typische Schwarzerde** auf Löß: landwirtschaftliche Versuchspartelle des Kursker Institutes für Erosionsforschung: [32] Fruchtfolge mit Stallmist- und Mineraldüngung

c) **Moskau** (Feldversuchsstation und Waldversuchsstation der Timirjasev-Akademie); Übergang Waldsteppe - südliche Taiga

- **Rasenpodsole** (Podsoluvisol nach FAO-Klassifikation) auf lößartigem Decklehm und aus Geschiebelehm unter: [10] landwirtschaftlicher Nutzung, [11] 120-jährigem Kiefernforst mit geringem Grundwasserabstand, [12] natürlichem Lindenmischwald, [13] natürlichem Eichenmischwald, [14] jungem Kiefernforst nach Ackerbau, [15] Lärchen-Linden-Forst nach Ackerbau und [16] Gartennutzung,

d) **Zagorsk** (heute: Sergiew Possad); Moskauer Gebiet (Dauerbeobachtungsflächen des Dokucaev-Institutes in Moskau); südliche Taiga

- **Rasenpodsole** (Podsoluvisol nach FAO-Klassifikation) auf lößartigem Decklehm: [17] unveränderter Boden unter natürlicher Waldvegetation (0-30 cm), [18] desgleichen aus 30-60 cm Tiefe, [19] desgleichen aus 60-90 cm Tiefe, Proben [20], [21] und [22] wie Proben 17, 18 und 19 ca. 250 m entfernt, [23] auf einer Aufschüttung (vermutlich B_t-Material) mit naturähnlicher Waldvegetation ca. 100 m von 17 entfernt, [24] mit Ahorn-Weide-Pappel-Mischwald nach natürlicher Sukzession, [25] Dauergrasland der natürlichen Sukzession nach Brache, [26] landwirtschaftliche Nutzung

II. Proben aus Deutschland

a) **Jena und Weimar** (Dauerbeobachtungs- und Versuchsflächen der LUFA Jena)

- **degradierte Schwarzerden** auf Keuper: [33] unter landwirtschaftlicher Nutzung, [35] kalkhaltiger Boden unter Trockenrasenvegetation am Mittelhang, [36] unter Trockenrasenvegetation, kalkfrei, gleiche Mittelhanglage
- **degradierte Schwarzerde** auf Löß: [34] unter Ackerbau
- **Parabraunerden** auf Löß auf dem Ettersberg bei Weimar unter: [37] jungem Birken-Buchen-Mischwald, [38] altem Eichen-Buchenwald aus 0-30 cm Tiefe, [39] aus 30-60 cm Tiefe

- **Parabraunerden** auf lehmigem Sand unter: [40] jungem Eichen-Kiefern-Forst und [41] mit landwirtschaftlicher Nutzung am Hangfuß

b) **Bad Lauchstädt** bei Halle (Sachsen-Anhalt, Statischer Versuch Bad Lauchstädt)

- **degradierte Schwarzerde** auf Löß: [42] unter landwirtschaftlicher Nutzung (Statischer Versuch, Parzelle mit Mineral- NPK und Stallmistdüngung)

c) **Bayreuth**

- **Braunerde-Rendzina** auf Muschelkalk: [43] unter altem Buchenforst
- **Parabraunerde** auf Löß unter: [44] Fichtenforst aus 0-5 cm Tiefe, [45] wie 44 aus 5-30 cm Tiefe, [46] Buchenforst aus 0-5 cm Tiefe, [47] wie 46 aus 5-30 cm Tiefe
- **Parabraunerde** auf Löß unter landwirtschaftlicher Nutzung [48]

d) **Hannover** (Hildesheimer Börde)

- **degradierte Schwarzerde** auf Löß unter: [50] Mischwald, [51] landwirtschaftlicher Nutzung
- **Parabraunerden** auf Löß unter: [52] altem Buchenmischwald aus 0-30 cm Tiefe, [53] wie 52 aus 30-60 cm Tiefe, [54] landwirtschaftlicher Nutzung

Details zu Probeneigenschaften finden sich im Anhang sowie in folgenden Publikationen: 123, 124, 125, 126.

Auf Grund der Bedeutung dieser Proben für die Zielstellung der Arbeit und ihre Funktion als Vergleichsbasis für Gegenüberstellungen mit Proben aus anderen Regionen (Böden aus feuchten und trockenen Tropen, der Antarktis, Tundra, Sibirien etc., siehe unten) werden sie bei den folgenden Darlegungen als "Standardproben" bezeichnet.

III. Sonstige Proben

- **18 Pflanzensubstanzen** landwirtschaftlicher Kulturen, (N = 18, s. 123),
- **56 extrahierte Humusstoffe** von 4 Varianten einer Löß-Schwarzerde (Statischer Versuch Bad Lauchstädt, Sachsen-Anhalt) und 6 Varianten eines Rasenpodsols (Feldversuchsstation der Timirjasev-Akademie, Moskau) (N= 56; vergl. 120, 121),
- **78 subhydrische Sedimente** aus mehreren Seen in Brandenburg und Sedimentkomposte (N = 78)
- **8 Torfproben** aus landwirtschaftlich genutzten Flächen im Rhinluch bei Berlin (mittel bis stark zersetzt) sowie 4 Hochmoortorfe aus typischen Mooren in Sibirien.

- **Bodenproben:** 85 Proben aus einem Transekt durch die Klimazonen Westsibiriens von der Tundra bis zur Trockensteppe, 54 Proben aus landwirtschaftlichen Dauerversuchen, 48 Proben aus einem Dauerversuch des ökologischen Landbaus, 12 Proben aus ehemaligen Rieselfeldern bei Berlin, 16 Böden aus einem Hang - Transekt bei Bökendorf (Mecklenburg-Vorpommern), 20 Proben aus der arktischen Tundra, 15 Proben aus Costa Rica, 16 Proben aus Schwarzerden der Uckermark (128) einschließlich von Paläoböden, 22 Proben aus dem Amazonas Becken (Brasilien), 25 hydromorphe Gründlandböden (34), 27 Proben aus der Antarktis (19) und 33 Vertisole aus einem Transekt durch die Gezira - Region in Afrika.

6. Ergebnisse

6.1. Thermische Stabilität der OBS

6.1.1. Übersicht

Abb. 3 zeigt den Verlauf der thermischen Degradation von Bodenproben an Hand von Mittelwerten der Standardproben (s. Aufstellung auf S. 17). Dargestellt ist die Dynamik der summarischen Gewichtsverluste (TG, linke Y-Achse) und die erste Ableitung dieser Kurve (DTG, rechte Y-Achse, dünne Linie).

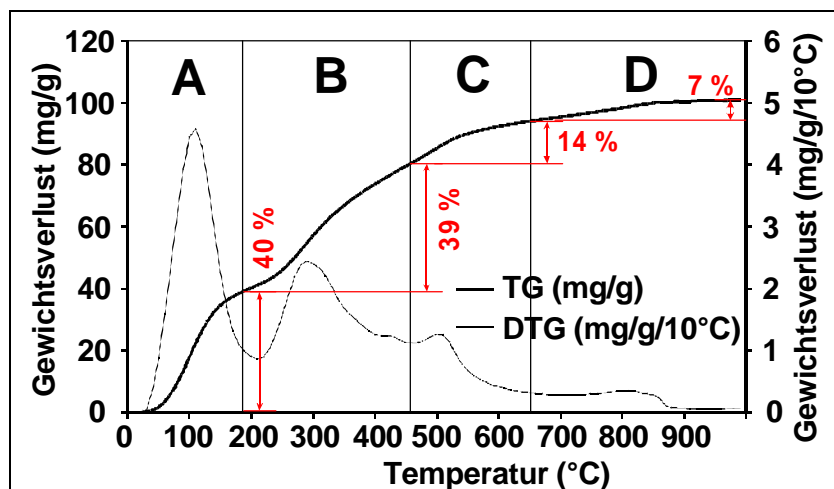


Abb. 3: Mittlere Dynamik thermischer Gewichtsverluste von Bodenproben mit Zuordnung der Temperaturbereiche A, B, C und D, einschließlich Angaben zum mittleren Anteil am Gesamtgewichtsverlust, Standardproben, N = 54 (TG: summarische Gewichtsverluste, linke Achse; DTG: erste Ableitung von TG, Dynamik der Gewichtsverluste, rechte Achse)

In der Grafik sind zusätz-

lich Grenzen mehrerer Temperaturbereiche eingezeichnet. Sie markieren Phasen des thermischen Abbaus von Komponenten und werden in den folgenden Abschnitten näher beschrieben:

- Temperaturbereich A: 25 - 190 °C (TB A)

- Temperaturbereich B: 200 - 450 °C (TB B)
- Temperaturbereich C: 460 - 650 °C (TB C)
- Temperaturbereich D: 650 - 1000 °C (TB D).

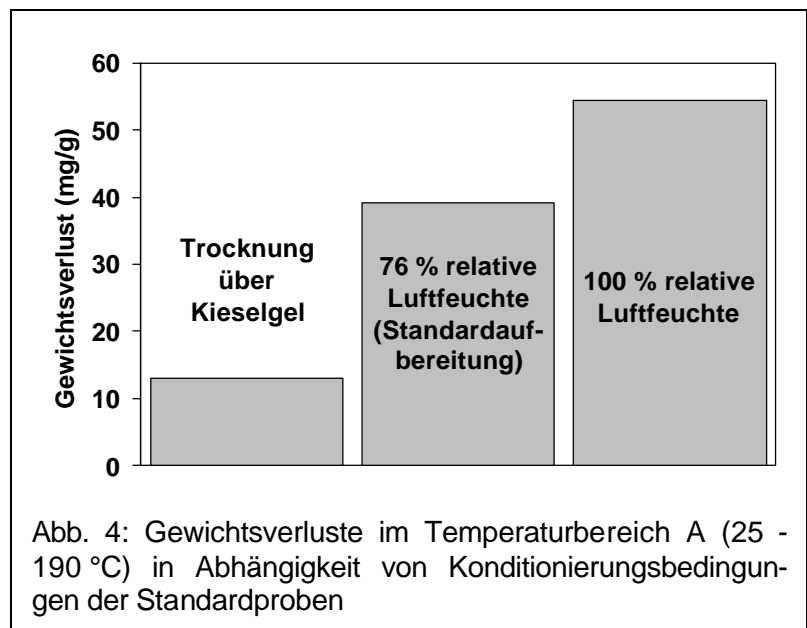
6.1.2. Identifikation von Komponenten

Um die Gewichtsverluste in den einzelnen Temperaturbereichen Bestandteilen der OBS zuzuordnen, werden die Ergebnisse mehrerer Experimente vorgestellt.

Temperaturbereich A (25 °C - 190 °C, TB A)

Abb. 4 zeigt die Mittelwerte von Gewichtsverlusten im Temperaturbereich A (TB A) nach unterschiedlicher Konditionierung (Standardproben).

Eine Trocknung über Kieselgel (ca. 18-25 % relative Luftfeuchte) führt zu einer Reduktion der Gewichtsverluste (GV) im Vergleich zur Lagerung bei 76 % relativer Luftfeuchte. Die Konditionierung



der Proben bei 100 % relativer Luftfeuchte erhöht die GV. Die Wirkungen unterschiedlicher Luftfeuchte waren bei allen Proben gleichermaßen ausgebildet. Aus technischen Gründen (die Einstellung einer konstanten Luftfeuchte ist im Grenzbereich zur Kondensation schwierig) war die Variabilität der Wiederholungsmessungen bei Trocknung über Kieselgel und bei 100 % Luftfeuchte größer als bei 76 % relativer Luftfeuchte.

Die Abhängigkeit der Ergebnisse in Abb. 4 von der Luftfeuchte wurde als Folge einer dominanten Bedeutung der Menge gebundenen Wassers für die GV im TB A interpretiert.

Eine Reduktion der Gewichtsverluste im TB A auf Null, z.B. durch Trocknung über konzentrierter Schwefelsäure war nicht möglich. Bei einem solchen Versuch zeigten mehrere Proben Veränderungen der GV weit oberhalb von 200 °C, ohne dass sich die GV im TB A auf Null reduzieren ließen. Dies trifft auch auf eine Probentrocknung im Trockenschrank bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz zu. Demnach ist eine Beteiligung von chemisch schwach gebunde-

nem Wasser aus organischen Substanzen an den GV im TB A möglich. Sie standen einer weiteren Erhöhung der Austrocknung entgegen. Zugleich ist nicht ausgeschlossen, dass die GV im TB A nicht nur eine Abgabe von Wasser beschreiben, sondern auch erste Zerfallsprodukte organischer Substanz (z.B. Abspaltung von CO₂ aus Polykarbonsäuren). Für eine Klärung dieser Sachverhalte sind zusätzliche Untersuchungen notwendig, die noch ausstehen (z.B. durch Kopplung der TG mit Gaschromatographie).

Im Unterschied zu Literaturergebnissen wurden in keinem der durchgeführten Experimente Anhaltspunkte gefunden, die zur Nullsetzung der Gewichtsverluste um 190 °C bis 200 °C berechtigten (vergl. z.B. 75, 96, 105, 140). Soweit die Gewichtsverluste unterhalb von 200 °C in der Literatur in die Auswertung einbezogen wurden (z.B. 119), fanden sich ähnliche Gewichtsverluste, wie hier dargestellt.

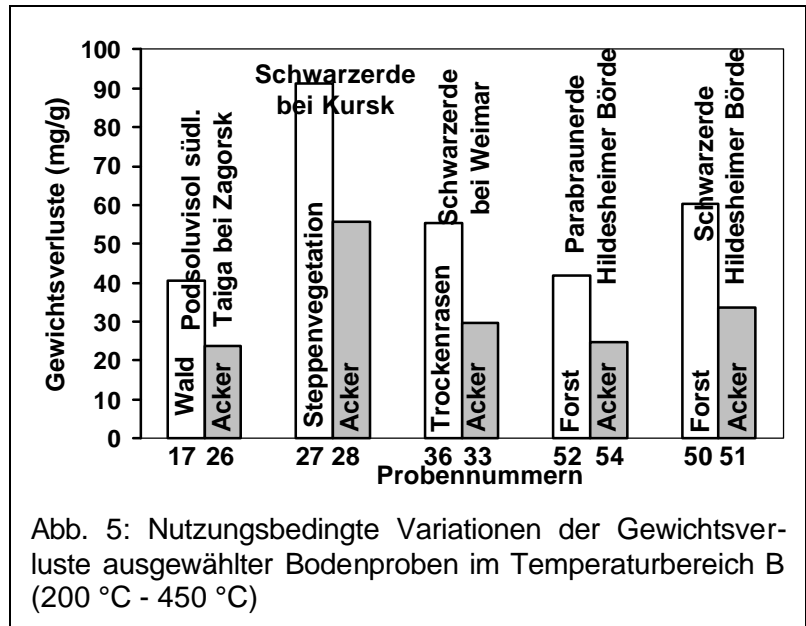
Temperaturbereich B (200 °C - 450 °C, TB B)

Ausgangspunkt für die Festlegung des Temperaturbereiches B waren Ergebnisse von Vorversuchen zu Pflanzensubstanzen (123). Enge Beziehungen zwischen GV im TB B und der biologischen Umsetzbarkeit bei Inkubation unter Laborbedingungen wiesen auf die Quantifizierbarkeit umsetzbarer Komponenten hin.

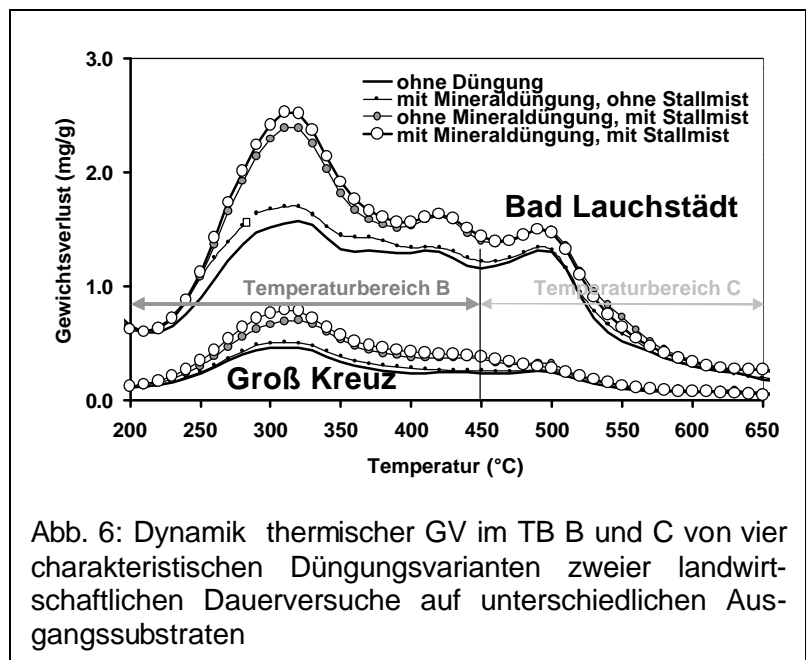
Um diese Ergebnisse für Mineralböden zu verifizieren, wurden die Gewichtsverluste im TB B in Abhängigkeit von Faktoren untersucht, welche die Anteile umsetzbarer Komponenten in Böden maßgeblich beeinflussen:

- a) landwirtschaftliche Bodennutzung im Vergleich zur natürlichen Vegetation,
- b) Düngungsvarianten landwirtschaftlicher Dauerversuche,
- c) Entnahmetiefe von Bodenproben,
- d) Paläobodenbildung (s. Abb. 8, 128),
- e) Korrelationen zu Ergebnissen anderer Methoden zur Bestimmung umsetzbarer Bestandteile in der OBS (s. Abschnitt 7, S. 77),
- f) biologischer Abbau während der Inkubation unter Laborbedingungen (s. Abschnitt 6.2, S. 44 und 124) und
- g) Probennahmetermine (124).

Abb. 5 dokumentiert den Einfluss des Ackerbaus auf die GV im TB B am Beispiel ausgewählter Versuchsstandorte in Russland und Deutschland (Standardproben). Zu erkennen sind jeweils deutlich reduzierte Gewichtsverluste bei Ackernutzung im Vergleich zur natürlichen Vegetation und zur forstwirtschaftlichen Bodennutzung. Diese Ergebnisse gehen mit Erfahrungen zum Einfluss der Bodennutzung auf Anteile umsetzbarer Komponenten konform (76, 77, 99). Demnach spiegeln die GV im TB B charakteristische Veränderungen umsetzbarer Komponenten der OBS durch landwirtschaftliche Bodennutzung wider.



Innerhalb einzelner Regionen lassen sich sehr kleine Variationen der GV im TB B den Wirkungen von Maßnahmen des Acker- und Pflanzenbaus eindeutig zuordnen. Abb. 6 zeigt dazu ein Beispiel.



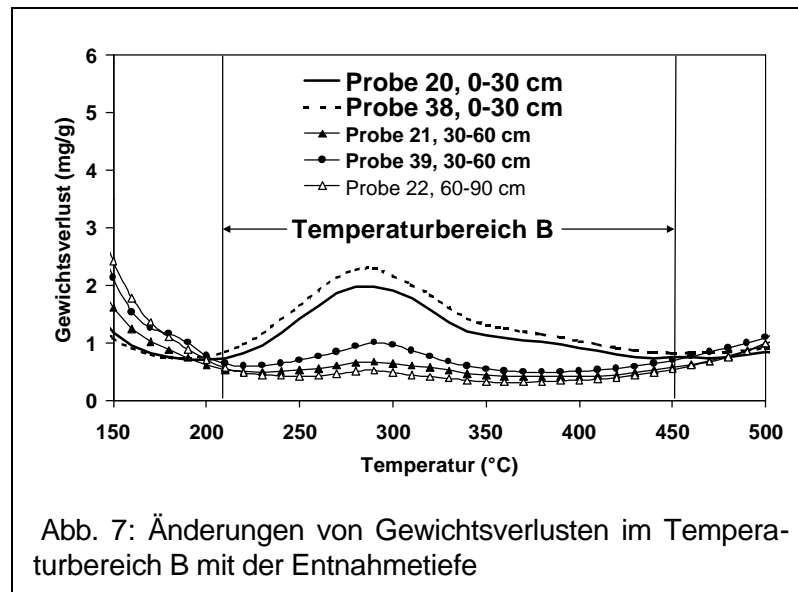
Dargestellt ist an Stelle der summarischen GV ihre Dynamik im TB B (und TB C) bei Böden mit unterschiedlicher Düngung in zwei landwirtschaftlichen Dauerversuchen (Bad Lauchstädt und Groß Kreuz).

Varianten mit schlechter Versorgung mit organischer Substanz (ohne Düngung) zeigen jeweils die kleinsten Werte. Varianten mit Mineraldüngung haben gewöhnlich höhere Erträge, eine größere Wurzelbildung, demzufolge größere Zufuhr an organischen Rückständen. Dementsprechend finden sich in diesen Varianten im TB B etwas höhere GV im Vergleich zu Varianten ohne Düngung. Die größten GV wurden hingegen bei organischer Düngung mit Stallmist und insbesondere bei

einer kombinierten organischen und mineralischen Düngung gefunden. Auch diese Ergebnisse gehen mit Erfahrungen zum Einfluss ackerbaulicher Maßnahmen auf den Gehalt umsetzbarer Komponenten konform.

Analoge Ergebnisse wurden in Dauerversuchen in Thyrow, Puch, Prag, Müncheberg, Seehausen, Methau, Dikopshof, Bad Lauterbach und anderen nachgewiesen, so dass eine Bewertung der umsetzbaren Komponenten über die GV im TB B möglich scheint.

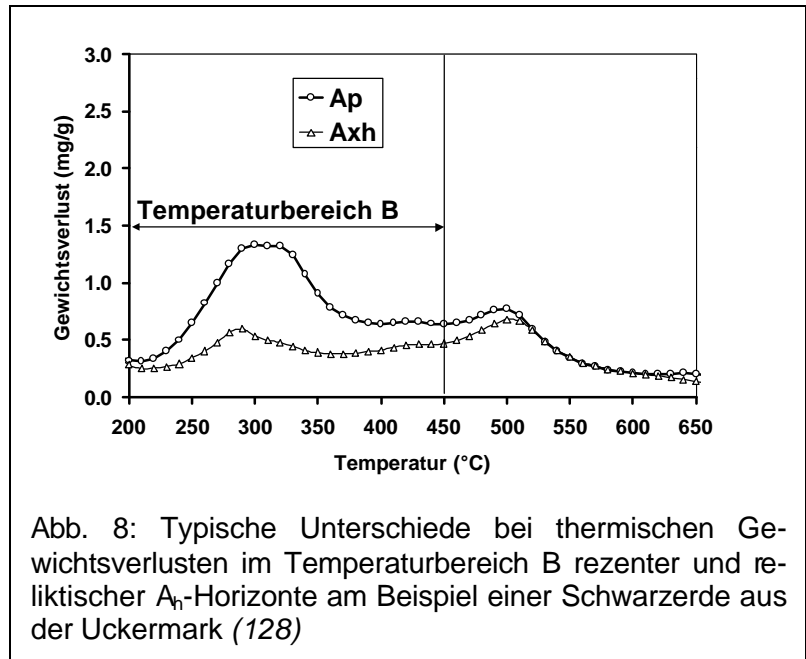
Größere Änderungen der Gewichtsverluste im Temperaturbereich B fanden sich mit zunehmender Entnahmetiefe von Bodenproben. Abb. 7 zeigt hierzu eine Gegenüberstellung der GV von Proben an zwei Standorten (Standardproben). Mit der Entnahmetiefe gehen die Gewichtsverluste im TB B auf ein sehr kleines



Niveau zurück. Dies trifft auf alle bisher untersuchten Bodenprofile zu, soweit keine Anreicherung mit organischer Substanz in tiefen Schichten vorhanden war (z.B. durch kolluviales A_h -Material, reliktsche Torfbildung, Hydromorphie) und die oberen Bodenschichten nicht aus Material mit reduziertem C-Gehalt bestanden (z.B. Kolluvien aus C- und B-Horizonten, Aufschüttungen).

Mit der Entnahmetiefe nimmt die Zufuhr frischer Rückstände und die biologische Aktivität ab. Die Abnahme der GV im TB B mit zunehmender Bodentiefe lässt sich daher ebenfalls widerspruchsfrei als Folge reduzierter Anteile umsetzbarer Verbindungen interpretieren.

Eine Gegenüberstellung von Proben rezenter und relikti-scher Bodenhorizonte führte zu gleichen Schlussfolgerungen hinsichtlich einer Quanti-fizierbarkeit umsetzbarer Komponenten über thermi-sche GV im TB B. Abb. 8 (folgende Seite) zeigt dazu das Beispiel einer Schwarzerde in der Uckermark. Im be-grabenen A_{xh} -Horizont finden sich deutlich kleinere Ge-



wichtsverluste im Vergleich zum rezenten A_T -Horizont. Die Unterschiede weisen auf einen Abbau der im Temperaturbereich B erfassten OBS- Komponenten in den relikti-schen Horizonten hin (128).

Ein Vergleich mehrerer Probennahmeterminen (Herbst, Frühjahr, Sommer) bestätigte die Mög-lichkeit einer Erfassung biologisch veränderlicher Komponenten ebenfalls. Jahreszeitliche Variationen der GV waren im TB B deutlich ausgeprägt (124). Gleiche Schlussfolgerungen ergaben sich bei einem Vergleich von inkubierten und frischen Bodenproben (124). Darüber hinaus korreliert die Höhe der GV im TB B mit der Bodenatmung (s. Abschnitt 6.3., S. 65), mit der bakteriellen Biomasse, ihrem Volumen und anderen Eigenschaften der Bodenorga-nismen (19) und mit der Menge des heißwasserlöslichen Kohlenstoffs in A_p - Horizonten - dem gegenwärtig gängigsten Verfahren zur Quantifizierung umsetzbarer Komponenten (s. Abb. 43, S. 79).

Auf letztere Aspekte wird im Zusammenhang mit der Anwendungsprüfung des thermogravi-metrischen Auswerteverfahren nach der Diskussion einzelner Fragestellungen zur Quanti-fizierung umsetzbarer Komponenten nochmals eingegangen (s. Abschnitt 7.1., S. 78).

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass sich Variationen der GV im TB B sehr gut mit Unterschieden im Gehalt an schnell veränderlichen, biologisch umsetzbaren Komponenten erklären lassen. Die GV im TB B eignen sich demnach zur Quantifizierung biologisch um-setzbarer Komponenten.

Temperaturbereich C (460 °C - 650 °C, TB C)

Als humifizierte Komponenten der OBS werden Bestandteile der OBS bezeichnet, die sich während der Bodengenese anreichern und biologisch relativ stabil sind (92, 107, 150). Unter Berücksichtigung dieser Festlegung weisen Kenntnisse zur Thermodynamik der Humusbildung (92), zu Humifizierungsprozessen (3, 5) und Ergebnisse von Ševcova und Sidorina (105) auf eine Erfassung humifizierter Komponenten durch thermische GV bei Temperaturen oberhalb von 450 °C bis ca. 650 °C hin.

Unter dem Einfluss einer intensiven biologischen Umsetzung, d.h. bei Inkubation von Bodenproben unter optimalen Bedingungen im Labor über lange Zeiträume lassen sich tatsächlich Veränderungen der GV im TB C nur bei Proben nachweisen, die über geringe Anteile umsetzbarer Komponenten verfügen (124, 126). Dies bestätigt Möglichkeiten einer Zuordnung der GV im TB C zu Humusstoffen, weil Humusstoffe wegen ihrer Stabilität nur unter ungünstigen Bedingungen von Bodenorganismen als Nährstoffquelle verwendet werden.

Gleiche Aussagen fanden sich bei einer Gegenüberstellung von Proben unterschiedlicher Probennahmetermine (Frühjahr, Sommer, Herbst; 124). Erste Untersuchungen zu Paläoböden lieferten analoge Ergebnisse. Jahreszeiten, wie auch Jahrhunderte günstiger Umsatzbedingungen (Temperaturen um 8 °C und optimale Feuchte) ändern die GV im TB C nicht oder nur in den Randbereichen (s. z.B. rechte Seite von Abb. 8, S. 25 oder 128). Demnach ist die Masse thermisch stabiler OBS-Komponenten biologisch stabil und lässt sich humifizierten Komponenten der OBS zuordnen.

Nach Angaben verschiedener Autoren (99, 76, 77) korreliert die Menge biologisch stabiler OBS bzw. humifizierter Komponenten mit dem Tongehalt von Böden. Dies konnte für die Gewichtsverluste im TB C eindeutig bestätigt werden (s. Abschnitt 6.1.5., S. 34 und Abb. 52 auf S. 90). Dementsprechend finden sich bei Untersuchungen landwirtschaftlicher Dauerversuche kaum Unterschiede in Abhängigkeit von der Düngung im TB C, während bei einem Vergleich mehrerer Versuchsstandorte Unterschiede mit Variationen des Tongehaltes erklärbar sind (s. Abb. 6, S. 23, Tongehalt in Groß Kreuz: 6 %; Bad Lauchstädt: 21 %).

Aus diesen Ergebnissen wurde die Schlussfolgerung abgeleitet, dass die GV im TB C tatsächlich zum größten Teil durch biologisch stabile, humifizierte Komponenten der OBS verursacht werden.

Bei der Quantifizierung humifizierter Komponenten muss jedoch mit Überlagerungen der GV aus benachbarten Temperaturbereichen gerechnet werden. Dies zeigt sich in der Variabilität

der Ergebnisse im unteren Bereich des TB C bei Varianten landwirtschaftlicher Dauerversuche (s. Abb. 6, S. 23), aber auch bei Proben unterschiedlicher Entnahmetermine (124).

Um eine Beeinflussung der Ergebnisse durch umsetzbare Komponenten einzuschränken, wird die Verwendung kleinerer "diagnostischer" Temperaturintervalle vorgeschlagen. Auf diese Problematik wird im folgenden Abschnitt näher eingegangen, weil sie auch für die Quantifizierung anderer Komponenten der OBS wichtig ist.

Temperaturbereich D (650 °C - 1000 °C)

Oberhalb von 650 °C sind bei der thermischen Analyse von Bodenproben häufig nur sehr kleine Gewichtsverluste nachweisbar (<< 1 % des Gesamtgewichtsverlustes). In karbonathaltigen Materialien verursacht hingegen die thermische Aufspaltung von Karbonaten sehr große Gewichtsverluste (teilweise über 50 % des Gesamtgewichtsverlustes). Bei Gegenüberstellung der Gewichtsverluste im TB D mit klassisch bestimmten Karbonatgehalten zeigen sich dementsprechend sehr enge Korrelationen.

Dies trifft auch für die untersuchten Standardproben zu (s. Abb. 9). Über 99 % der Variationen von Gewichtsverlusten im TB D werden durch Variationen im Karbonatgehalt verursacht. Bei Einbeziehung von Proben anderer Standorte verringerte sich das Bestimmtheitsmaß der Beziehung nur unwesentlich.

Die dargestellte Korrelation geht auf einen kausalen Zusammenhang zurück, der mit der chemischen Reaktion



beschrieben werden kann. Das gasförmig entweichende Kohlendioxid ist für die Gewichtsverluste verantwortlich, so dass sich Gewichtsänderungen im TB D zur Quantifizierung von Karbonaten verwenden lassen (127, 129). Voraussetzung dafür ist, dass keine thermisch extrem stabilen organischen Verbindungen in den Proben enthalten sind. Dies lässt sich – im Unterschied zu bisher üblichen Methoden - für Einzelproben verifizieren, wodurch Fehlermöglichkeiten eingeschränkt werden (vergl. Abschnitte 7.4., S. 93; 7.5., S. 101, sowie Ausführungen zu Kontrollkriterien der thermogravimetrischen Bodenanalyse (TGBA), 129).

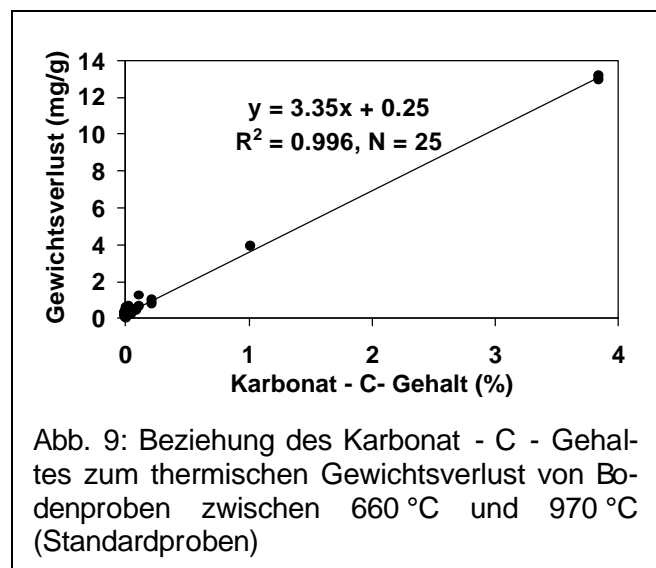


Abb. 9: Beziehung des Karbonat - C - Gehaltes zum thermischen Gewichtsverlust von Bodenproben zwischen 660 °C und 970 °C (Standardproben)

6.1.3. Diagnostische Temperaturbereiche einzelner OBS-Komponenten

Ungeachtet der eindeutigen Zuordnungsmöglichkeiten von OBS - Komponenten zu Temperaturbereichen (TB) ist in vielen Fällen eine eindeutige Trennung zwischen GV unterschiedlicher Bestandteile nicht möglich. Nur schwach ausgebildete Minima in der thermischen Zerfallsdynamik zwischen Temperaturbereichen (vergl. Abb. 3, S. 20) deuten auf eine problematische Trennbarkeit hin. Atypische Abhängigkeiten von Einflussfaktoren belegen eine Überlagerung der GV benachbarter Temperaturbereiche. Folgende Aspekte sind ausschlaggebend:

- Nicht nur bei den Standardproben (s. Abb. 3, S. 20), sondern auch in sehr C- und tonarmen Substraten sind die GV um 200 °C, d.h. zwischen den TB A und B immer von Null verschieden. Eine eindeutige Trennung der GV gebundenen Wassers und umsetzbarer Komponenten ist daher schwierig.
- Zwischen den TB B und C existiert häufig gar kein deutlich erkennbares Minimum.
- Ist ein Minimum nachweisbar, liegt es selten genau bei 450 °C. Häufig steigen im TB B bereits oberhalb von 400 °C die GV wieder an. Dieser Anstieg ist mit Variationen des Gehaltes biologisch umsetzbarer Komponenten selten erklärbar, wird in mehreren Abbildungen sichtbar (s. Abb. 7, und 8, S. 25) und deutet auf eine Beteiligung humifizierter Komponenten an den GV im TB B hin.
- Im unteren Bereich des TB C finden sich häufig Variationen in Abhängigkeit von biologischen Abbauprozessen, Entnahmetermen, Düngungsvarianten etc. (s. z.B. Abb. 8, S. 25). Sie resultieren aus einer Überlagerung mit umsetzbaren Bestandteilen.

Für eine genaue Quantifizierung einzelner OBS-Komponenten ist demnach die Verwendung großer Temperaturbereiche ungünstig. Um mögliche Fehlinterpretationen zu reduzieren, wurde versucht, kleinere, "diagnostische" Temperaturintervalle (TI) zu finden, die einzelne Komponenten ohne Überlagerung durch GV anderer Bestandteile beschreiben.

Für die **Quantifizierung umsetzbarer Komponenten** erwies sich das TI (Temperaturintervall) von ca. 260 °C bis ca. 300 °C als besonders geeignet, wobei folgende Aspekte berücksichtigt wurden:

- größte Variationen der GV innerhalb des TB B in Abhängigkeit von Umsatzprozessen bei Inkubation unter Laborbedingungen (s. Abschnitt 6.2.3., S. 46, Abb. 6, S. 23, 124),
- größte Veränderungen der GV in Abhängigkeit von Probennahmetermen (124),
- besonders enge Korrelationen zur Bodenbiomasse und zum heißwasserlöslichen Kohlenstoff (siehe Abschnitte 7.1., S. 78 und 7.4.1., S. 94),

- kleinste Gewichtsverluste bei C-armen Proben aus B- und C- Horizonten (Abb. 7, S. 24),
- kleine GV in reliktschen A_h- Horizonten (s. Abb. 8),
- größte Gewichtsverluste bei Proben mit bekanntermaßen hohem Anteil an unzersetzten Rückständen (organische Auflagen, Pflanzensubstanzen etc., in Abb. 17, S. 37 durch Umrechnung auf Anteile nur teilweise sichtbar) und
- Beziehungen zu anderen OBS-Komponenten (s. Abschnitt 6.1.4., S. 30).

Besonders aussagekräftige Schlussfolgerungen zu unterschiedlichen Fragestellungen ergaben sich im Mittel aller bisher untersuchten Proben bei einer weiteren Einengung der GV auf ein TI 280-290 °C. Diese Einengung reduziert jedoch das Niveau erfasster GV. Die Nutzung setzt daher sehr genaue Gewichtsmessungen voraus, die sich gegenwärtig nur mit modernen Thermowaagen der Mettler-Toledo GmbH kostengünstig realisieren lassen. Gleichzeitig nimmt die Bedeutung von Wiederholungsmessungen und der Aufzeichnungsdichte der Daten zu, um Fehlinterpretation bei eventuellen Störungen auszuschließen. Dadurch steigen die Arbeitsaufwendungen.

Viele andere TI (z.B. 270 °C - 280 °C) zeigten in Einzelfällen eine noch bessere Aussagefähigkeit. Die Anwendbarkeit dieser TI blieb jedoch stets auf einzelne Fragestellungen oder Proben ausgewählter Standorte, Regionen oder Nutzungsrichtungen begrenzt. Betreffs des TI 270-280°C bestanden beispielsweise die engsten Korrelationen zum heißwasserlöslichen Kohlenstoff. Diesbezüglich geprüft wurden aber nur landwirtschaftlich genutzte Böden einer relativ kleinen Region unter Ausschluss einzelner Standorte (s. Abschnitt 7.1., S. 78). Auf Grund ihrer Vielfalt und der begrenzten Einsatzmöglichkeiten wird hier auf diese TI nicht näher eingegangen.

Für die Eingrenzung diagnostischer Temperaturintervalle zu **humifizierten Komponenten** waren die Beziehungen der thermischen GV zum Tongehalt ausschlaggebend. Sie werden im Abschnitt 6.1.5. (S. 34) erläutert und führten zur Verwendung des Temperaturintervalls von 520 °C bis 530 °C. Dieses TI zeigte zugleich die engsten Beziehungen zu anderen Komponenten der OBS (siehe folgender Abschnitt).

Eine Ermittlung besonders geeigneter TI im TB A zur Quantifizierung der **Menge gebundenen Wassers** war nur an Hand von Gegenüberstellungen mit anderen Komponenten und Bodeneigenschaften (Abschnitt 6.1.5., S. 34) möglich. Dabei ergaben sich mehrere, dicht nebeneinander liegende TI mit unterschiedlicher, jedoch gleichwertiger Aussagefähigkeit:

- a) TI 110-120 °C korreliert besonders eng mit dem Tongehalt
- b) TI 120-130 °C korreliert besonders eng mit umsetzbaren OBS-Komponenten
- c) TI 130-140 °C korreliert besonders eng mit humifizierten Komponenten der OBS.

6.1.4. Beziehungen zwischen OBS-Komponenten

6.1.4.1. Autokorrelationen absoluter Gewichtsverluste

Ausgehend von den theoretischen Überlegungen im Abschnitt 4. (S. 7) wurde nach Zusammenhängen zwischen OBS-Komponenten und der Menge gebundenen Wassers gesucht.

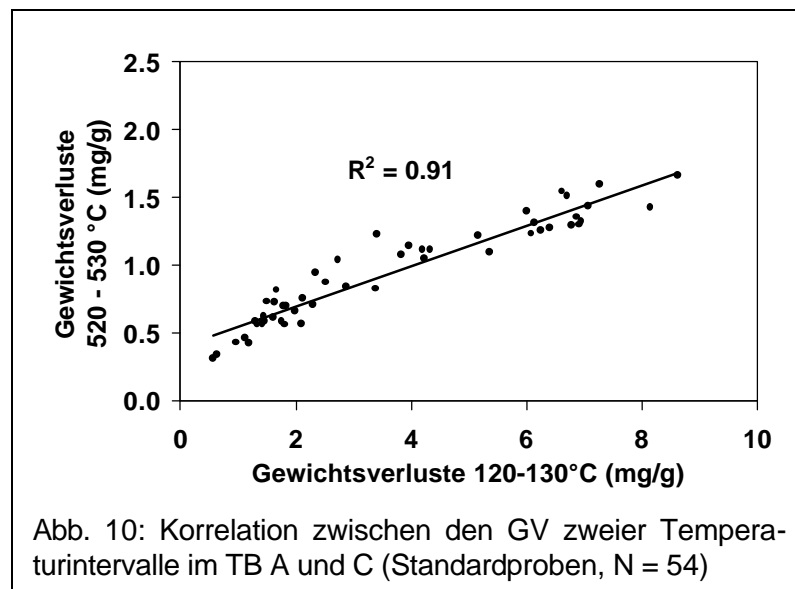
Dazu wurden Autokorrelationsanalysen des thermogravimetrischen Datenmaterials durchgeführt. Sie beinhalteten die Berechnung von linearen Autokorrelationskoeffizienten für alle GV in TI mit 10 °C - Schritten von 30 - 970 °C unter Einbeziehung aller Standardproben.

Mit anderen Worten wurde das Datenmaterial in insgesamt 94 Temperaturintervalle (TI) aufgeteilt (20-30°C, 30-40°C, 40-50°C, ..., 940 - 950 °C). Jeder der Datensätze (TI) enthielt über 180 Werte von 54 Proben mindestens zweier Probennahmeterminen mit Wiederholungsmessungen. Anschließend wurde jeder dieser Datensätze mit jedem anderen korreliert. Die Anzahl der dabei berechneten Korrelationskoeffizienten betrug $94^2 = 8836$ (126).

Auf diese Weise wurde eine Vielzahl von Informationen über Ähnlichkeiten und Divergenzen zwischen OBS - Komponenten gewonnen (126). Die Autokorrelationsanalysen lieferten erste Hinweise auf die Existenz von sehr engen Beziehungen zwischen thermogravimetrisch quantifizierbaren Komponenten der OBS an Hand hoher Korrelationskoeffizienten zwischen GV unterschiedlicher, oft weit voneinander entfernter TI.

Abb. 10 zeigt eine solche Beziehung für die Standardproben eines Probennahmetermins. Die gleiche Beziehung war für beliebige andere Probennahmeterminen, aber auch für Proben anderer Standorte nachweisbar.

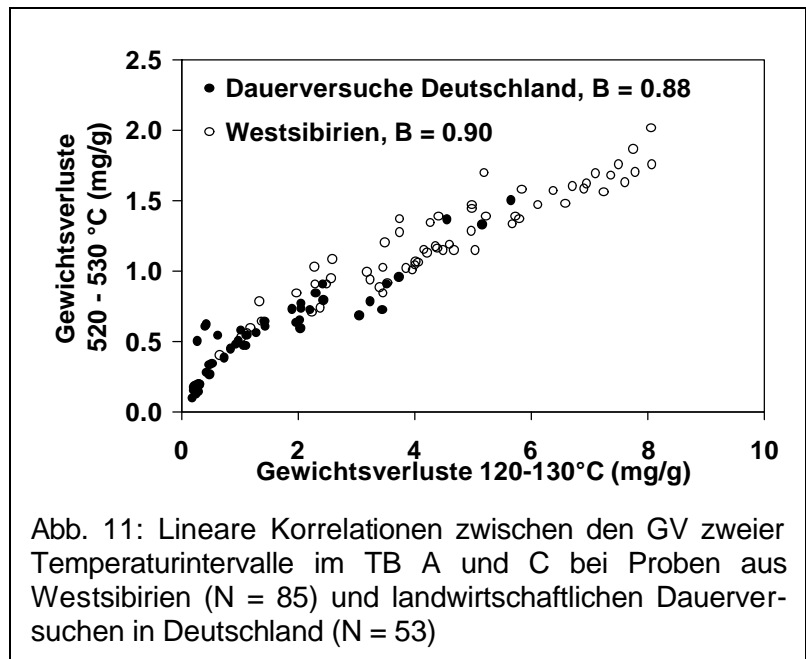
Abb. 11 zeigt dazu Beispiele von 85 Proben aus einem Transekt durch die Klimazo-



nen in Westsibirien (16 Standorte mit mehreren Profilen unter Einbeziehung aller Horizonte) und von 53 A_p - Horizonten landwirtschaftlicher Dauerversuche aus Deutschland. Die Regressionsparameter der Korrelationen von Abb. 10 und 11 unterscheiden sich nicht signifikant.

Bei den Proben aus landwirtschaftlichen Dauerversuchen fanden sich aber Hinweise auf eine Abweichung von der Linearität der Beziehung.

Ein großer Teil der Proben aus landwirtschaftlichen Dauerversuchen zeigt sehr kleine Tongehalte und kleine GV in den TB A und C. Es wird daher vermutet, dass bei solchen Proben ein nichtlineares Glied



in der (bisher) linearen Regressionsgleichung berücksichtigt werden muss. Leider ließen sich die Parameter dieser Ergänzung mit der vorhandenen Anzahl tonarmer Proben nur unbefriedigend quantifizieren, so dass auf eine Darstellung der Regressionsparameter und ihrer Schwankungsbreiten verzichtet wurde.

6.1.4.2. Autokorrelationen von Anteilen einzelner Komponenten am Gesamtgewichtsverlust

Die OBS von Böden unterscheidet sich nicht nur hinsichtlich der Menge einzelner Komponenten. Auch die Anteile umsetzbarer, humifizierter und anderer Bestandteile können variieren. Um diese qualitativen Unterschiede von quantitativen zu trennen, wurden die Gewichtsverluste aller Komponenten (bzw. die GV der TI in 10 °C - Schritten) auf Anteile am Gesamtgewichtsverlust der Proben umgerechnet. Das dabei erhaltene Datenmaterial wurde ebenfalls einer Autokorrelationsanalyse unterzogen.

Im Ergebnis dieser Auswertungen wurden mehrere hochsignifikante Korrelationen nachgewiesen. Die Abbildungen 12 und 13 dokumentieren Beziehungen mit den größten Bestimmtheitsmaßen für die Standardproben. Sie wurden unter anderem zur Definition "diagnostischer" TI verwendet (siehe Abschnitt 6.1.3., S. 28).

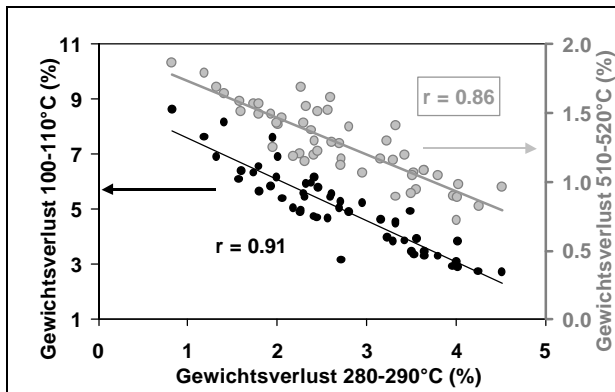


Abb. 12: Korrelationsbeziehungen der GV im TI 280-290°C zu den GV im TI 100-110°C und TI 510-520°C, Standardproben (N = 54)

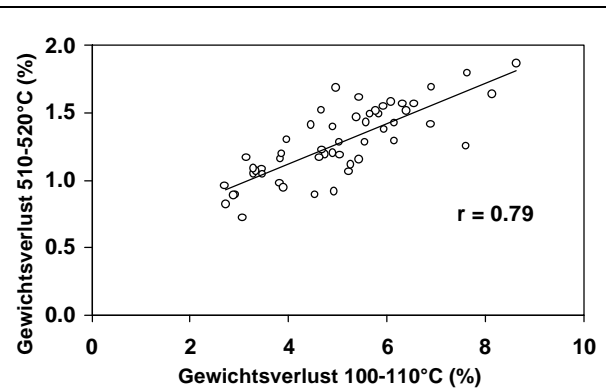


Abb. 13: Korrelationsbeziehungen der GV im TI 100-220°C zu den GV im TI 510-520°C, Standardproben (N = 54)

Die Existenz dieser Beziehungen war auch bei Proben anderer Standorte und Herkunft nachweisbar. Dabei ergaben sich meist nur geringfügige Variationen der TI mit maximalen Korrelationskoeffizienten.

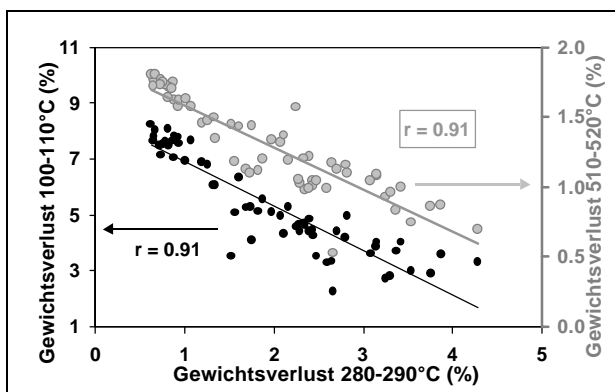


Abb. 14: Korrelationsbeziehungen der GV im TI 280-290°C zu den GV im TI 100-110°C und TI 510-520°C, Proben aus Westsibirien

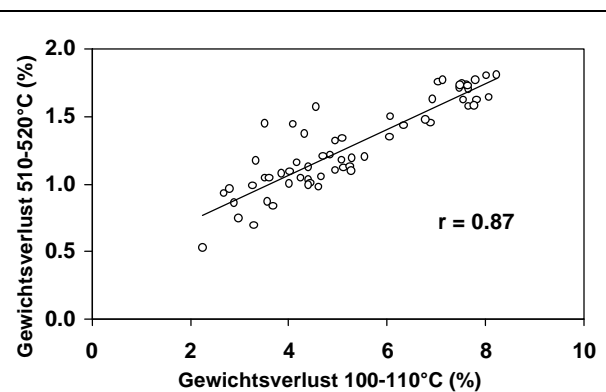


Abb. 15: Korrelationsbeziehungen der GV im TI 100-110°C zu den GV im TI 510-520°C, Proben aus Westsibirien

Bei Proben aus Westsibirien wurden beispielsweise die Korrelationen mit den größten Bestimmtheitsmaßen zwischen folgenden TI beobachtet:

- a) TI 110-120°C - TI 510-520°C: $r = 0.97$
- b) TI 100-110°C - TI 300-310°C: $r = 0.93$
- c) TI 350-360°C - TI 520-530°C: $r = 0.95$

Wurden bei den Berechnungen gleiche TI wie in Abb. 12 und 13 vorgegeben, ergaben sich bei den Proben aus Westsibirien ebenfalls signifikante Korrelationen. Sie sind in den Abb. 14

und 15 dargestellt, etwas kleiner als die maximalen, aber auf gleichem oder höherem Niveau im Vergleich zu analogen Korrelationen bei den Standardproben. Die Regressionsparameter der Beziehungen waren bei den einzelnen Probenkollektiven bei Vorgabe gleicher TI ähnlich (nicht signifikant verschieden).

Analoge Aussagen ergaben sich zu großen Probenkollektiven anderer Standorte soweit sie nicht vorrangig aus extrem gestörten Proben (z.B. Rieselfeld- und Trümmerschuttböden) bestanden oder durch Hydromorphie beeinflusst waren. Bei Proben aus landwirtschaftlichen Dauerversuchen wurden die niedrigsten Bestimmtheitsmaße mit Werten um max. 0.8 ermittelt. Signifikante Unterschiede bei den Regressionsparametern wurden hingegen auch hier nicht festgestellt. Mit anderen Worten waren die in Abb. 12 und 13 dargestellten Beziehungen zwischen Anteilen von OBS-Komponenten bei allen Probenkollektiven (ohne extrem gestörte und hydromorphe Böden) nachweisbar und ließen sich durch gleiche Regressionsparameter mit unterschiedlicher Genauigkeit beschreiben.

Ein weiteres Ergebnis der Autokorrelationsanalyse bestand in eindeutigen Hinweisen darauf, dass Anteile umsetzbarer Komponenten der OBS mit Anteilen gebundenen Wassers korrelieren, das über 100 °C Gewichtsverluste verursacht. Anteile umsetzbarer Komponenten zeigen hingegen keine Beziehungen zu GV unterhalb von 100 °C. Demnach ist eine Unterteilung des TB A in zwei Teilbereiche (A I und A II) sinnvoll, weil den ober- und unterhalb von 100 °C erfassten GV eine unterschiedliche Bedeutung zukommt. Beide Teilbereiche des TB A (ober- und unterhalb 100 °C) beschreiben zwar die Abgabe von Wasser, jedoch liegen offenbar divergierende Bindungsverhältnisse, Entstehungsbedingungen oder andere Abhängigkeiten von Einflussfaktoren vor, die bisher nicht eingegrenzt werden konnten.

Bestätigt werden diese Aussagen dadurch, dass zwischen GV ober- und unterhalb von 100 °C keine signifikanten Autokorrelationskoeffizienten nachgewiesen werden konnten. Innerhalb der TB B, C und D waren hingegen die Autokorrelationskoeffizienten zwar unterschiedlich groß, jedoch immer signifikant. Sie wiesen damit auf eine unterschiedliche, jedoch stets eindeutige Zusammengehörigkeit der Daten innerhalb der TB B, C und D hin (126).

Um die Bedeutung des gebundenen Wassers auf die Nachweisbarkeit der festgestellten Beziehungen zu testen, wurden gleiche Autokorrelationsanalysen mit den bei 100 % Luftfeuchte und über Kieselgel gelagerten Standardproben durchgeführt. Dabei ergaben sich veränderte Anteile aller Komponenten und veränderte Regressionsparameter. Hinsichtlich der Enge der

Korrelationen und der TI mit den größten Bestimmtheitsmaßen ergaben sich hingegen keine signifikanten Unterschiede zu den bei 76 % Luftfeuchte gelagerten Proben.

Für den Nachweis von Zusammenhängen zwischen OBS-Komponenten ist somit nicht die Höhe der Lufttrocknung bzw. die Methode der Probenkonditionierung entscheidend, sondern lediglich ihre Einheitlichkeit.

Ausgeschlossen sind jedoch Probentrocknungen, bei denen die relative Luftfeuchte Werte von ca. 30 % unterschreitet. So führt eine Trocknung über Schwefelsäure und oft auch schon eine Erwärmung von Proben im Trockenschrank zu unterschiedlichen, irreversiblen Veränderungen der Menge gebundenen Wassers, die einem Nachweis der hier dargestellten Beziehungen entgegen stehen (vergl. Abschnitt 6.1.7., S. 38).

6.1.5. Korrelationen zu Bodeneigenschaften

Um die Bedeutung von Bodeneigenschaften für die thermogravimetrisch erfaßbaren OBS-Komponenten zu quantifizieren, wurden die Gewichtsverluste aller TI in 10 °C - Schritten (30-40°C, 40-50°C, ..., 940-950°C) mit den Bodeneigenschaften korreliert. Dabei fanden sich folgende Beziehungen, die in allen untersuchten Probenkollektiven nachweisbar waren:

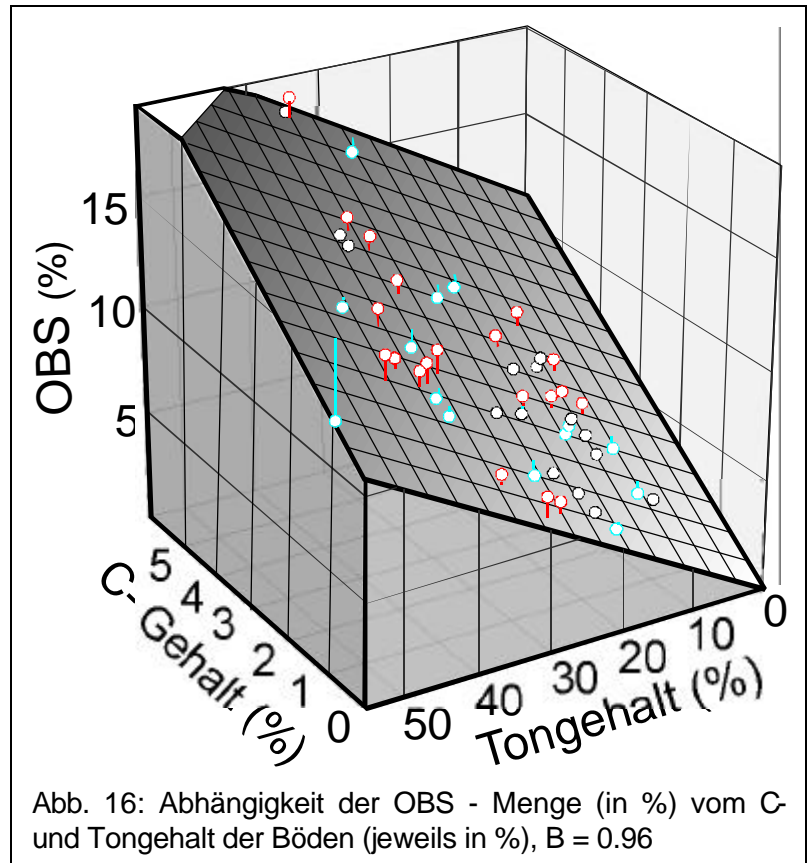
- a) Der Gesamt - C - Gehalt der Proben korreliert mit den thermischen GV ab 200 °C bis 500 °C signifikant. Das größte Bestimmtheitsmaß mit einem B von 0.98*** wurde für GV von 350 bis 360°C ermittelt (s. Abb. 48, S. 87).
- b) Der Gesamt - N - Gehalt der Proben korreliert mit den thermischen GV ab 180 °C bis 520 °C signifikant, größtes Bestimmtheitsmaß (B = 0.94***) im TI 400-410°C (127).
- c) Der Tongehalt der Proben korreliert mit GV im TB A und C. Die beiden größten Bestimmtheitsmaße liegen um 0.8 für GV im TI 110-120 °C und 0.9 für die GV im TI 520-530°C (s. Abb. 52, S. 90). Bei Normierung der GV im TB A und C auf einen einheitlichen C- oder N-Gehalt ließen sich noch engere Beziehungen nachweisen (B_{max}: 0.98, N = 198; 126; 127)
- d) Der Karbonatgehalt der Proben korreliert mit den Gewichtsverlusten oberhalb von 560 °C signifikant. (B_{max} = 0.996 für GV im TI 750-950 °C, s. Abb. 9, S. 27)

Desweiteren korrelierten die GV in unterschiedlichen TI bei den Standardproben mit folgenden Parametern:

- Wasserkapazität bei pF 2.0 ($B_{\max} = 0.35$),
- pH_{CaCl} ($B = 0.34$),
- Feinschluffgehalt: $B_{\max} = 0.34$).

Beziehungen thermischer GV zur Kationenaustauschkapazität, zum Sand-, Mittelschluff - und Grobschluffgehalt, zu den C/N - Verhältnissen und zum pH-Wert wurden ebenfalls geprüft, zeigten aber lediglich zufällige Zusammenhänge.

Bei einer Gegenüberstellung der thermogravimetrisch bestimmten OBS-Menge (GV im TI 25-550°C) mit den Bodeneigenschaften fanden sich multiple Korrelationen. Demnach erklären Variationen des C- und Tongehaltes über 96 % der Variationen der OBS-Menge. Nebenstehende Abbildung zeigte diese Beziehung. An Stelle des C-Gehaltes ließen sich die GV im TI 340-350°C und an Stelle des Tongehaltes die GV im TI 110-120°C oder im TI 520-530°C



verwenden. Dabei stieg das Bestimmtheitsmaß auf Werte über 0.98. Für diese Beziehung wurden folgende Parameter festgestellt:

$$\text{GGV} = 8.04 * \text{GV1} + 25 * \text{GV2} + 17.6 \quad [2]$$

mit: GGV = thermogravimetrischer Gesamtgewichtsverlust der OBS (GV im TI 25-650°C), GV1: GV im TI 110-120 °C und GV2: GV im TI 340-350 °C.

Die Einbeziehung anderer Probenkollektive führte zu gleichen Ergebnissen, d.h. es wurden keine signifikanten Abweichungen von hier dargestellten Regressionsparametern und nur unwesentliche Variationen der Bestimmtheitsmaße festgestellt.

6.1.6. Die OBS im Vergleich zu Seesedimenten, Pflanzenproben und extrahierten Humussäuren

Abb. 17 (folgende Seite) dokumentiert die Dynamik thermischer Gewichtsverluste organischer Substanzen unterschiedlicher Herkunft. Es handelt sich um Mittelwerte von:

- 41 Präparaten extrahierter Humussäuren aus mehreren Varianten eines Rasenpodsol (landwirtschaftlicher Dauerversuch der Timirjasew-Akademie, Moskau) und einer Löß-Schwarzerde (Statischer Versuch, Bad Lauchstädt) (120, 121)
- 18 Pflanzensubstanzen (landwirtschaftliche Kulturen, 123)
- Aminosäuren (Lysin, Phenylalanin, Treonin, Tryptophan, Valin) und Glucose
- 78 Seesedimente aus mehreren Seen Mecklenburg - Vorpommerns und Brandenburgs sowie Seesedimentkomposte

Tabelle 2: Anteile organischer Substanz in Substraten unterschiedlicher Herkunft

Probenbezeichnung	organische Substanz (%) ¹⁾
Glucose, Aminosäuren	100
extrahierte Humussäuren	92
Pflanzensubstanzen	88
Seesedimente	51
OBS (Standardproben)	10

¹⁾ einschließlich gebundenes Wasser

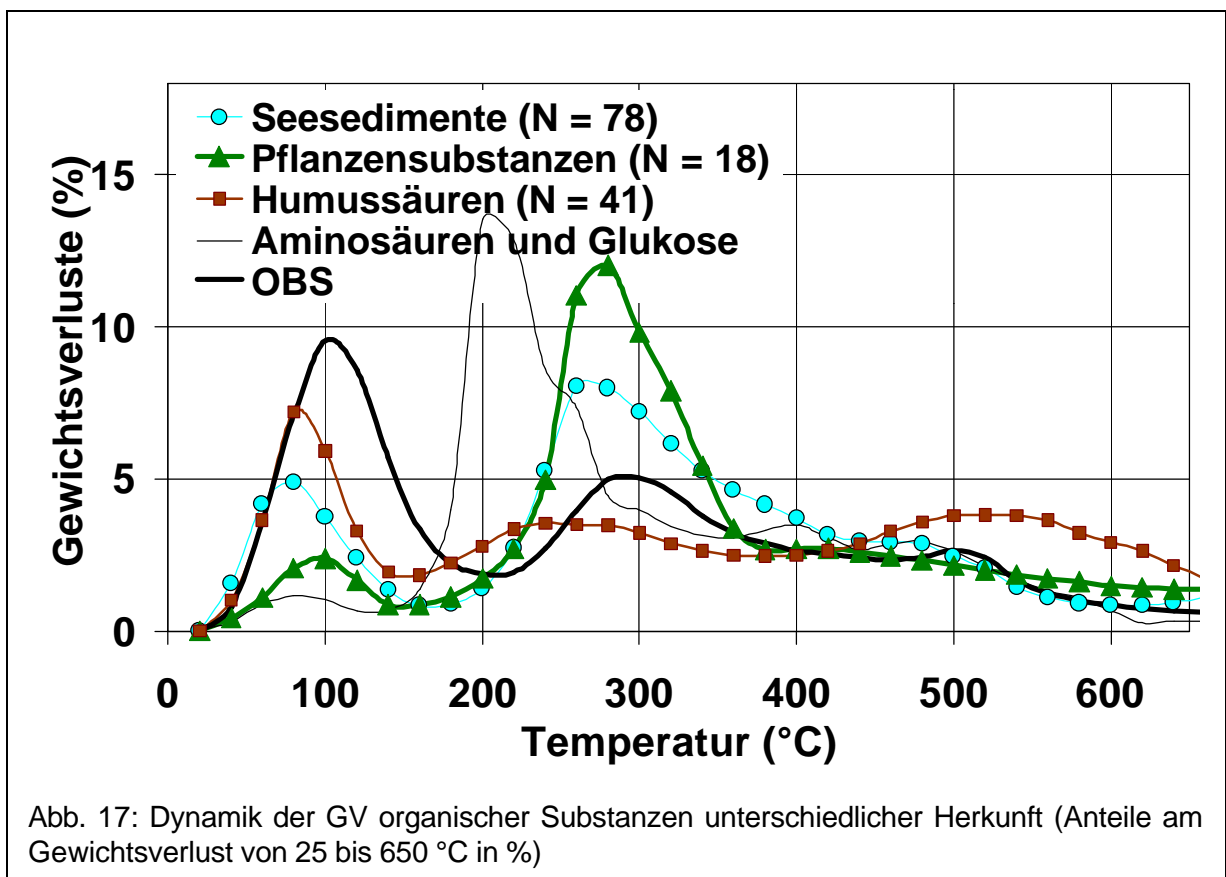
Für den Vergleich wurden die Messergebnisse auf Anteile am Gesamtgewichtsverlust (GV von 25 - 650 °C) umgerechnet. Dadurch werden die sehr unterschiedlichen Gehalte an organischer Substanz ausgeglichen und die Ergebnisse vergleichbar. Tabelle 2 dokumentiert die Unterschiede im Gehalt an organischer Substanz.

(Ohne Berücksichtigung der Unterschiede im Aschegehalt, d.h. bei Darstellung der absoluten GV, sind die Ergebnisse von Böden im Vergleich zur Pflanzensubstanz um den Faktor 10 kleiner, so dass sich die Dynamik der Gewichtsverluste visuell sehr schwer vergleichen läßt.)

Zu erkennen ist in Abb. 17 eine zur Abb. 3 (S. 20) ähnliche Einteilbarkeit in die Temperaturbereiche A, B und C. Bei Aminosäuren und extrahierten Humussäuren beginnt die thermische Zersetzung organischer Komponenten früher als bei den anderen Substanzen.

Die Anteile der GV in den einzelnen TB sind unterschiedlich groß. Im Temperaturbereich A wurden im Mittel aller Proben 1/5 der gesamten GV registriert. Sie nehmen in folgender Reihenfolge zu: Pflanzensubstanzen (10 %) < Aminosäuren + Glucose (11 %) < Seesedimente (19 %) < extrahierte Humussäuren (30 %) < OBS (42 %). Nach diesen Ergebnissen steigt mit der Humifizierung der Anteil an gebundenem Wasser, wobei die unvollständige Extrahierbar-

keit von Humussäuren zu berücksichtigen ist sowie ein möglicher Einfluss von Tonen auf die Menge gebundenen Wassers in Mineralböden.



Im TB B finden sich bei Aminosäuren, Glucose, Pflanzenrückständen und Seesedimente größere GV im Vergleich zu extrahierten Humusstoffen und der OBS. Desweiteren lassen sich deutliche Unterschiede in der Dynamik erkennen. Aminosäuren und Glucose zeigen eine schnellere Zersetzung zum Beginn des Temperaturbereiches im Vergleich zu Pflanzensubstanzen und Seesedimenten. Bei extrahierten Humusstoffen und der OBS ist die Dynamik der Abbaurrate weit schwächer ausgeprägt.

Dabei ist zu berücksichtigen, dass Fulvosäuren und wasserlösliche Fraktionen im Vergleich zu säurefällbaren Huminstoffen eine tendenziell größere Dynamik zeigen. Analog dazu waren bei der Analyse der OBS die GV in A_h - Horizonten zum Beginn der TB B höher als bei Proben aus B- und C - Horizonten (vergl. Abb. 8, S. 25). Im Durchschnitt wurden bei Pflanzensubstanzen, Aminosäuren, Glucose und Seesedimente ca. 70 % der GV im TB B registriert, bei der OBS und extrahierte Humussäuren ca. 40 %.

Im TB C fallen bei den extrahierten Humusstoffen, bei der OBS und bei einigen Seesedimenten Steigerungen der Zerfallsraten auf. Der Anteil am Gesamtgewichtsverlust ist insbesondere

bei den extrahierten Humusstoffen hoch (ca. 30 %). Bei Pflanzensubstanzen, Aminosäuren und Glucose nimmt demgegenüber mit dem Ende des TB B (teilweise weit davor) die Zerfallsrate kontinuierlich ab, so dass unter 16 % der GV im TB C erfaßt wurde.

Analog zum Abschnitt 6.1.4. durchgeführte **Autokorrelationsanalysen** (unter Einbeziehung aller TI in 10 °C - Schritten) zeigten keine mit der OBS vergleichbaren Beziehungen. Eine Ausnahme bilden die extrahierten Humusstoffe mit folgenden Beziehungen:

- a) GV im TI 140-160°C zu GV im TI 420-440°C, $r = -0.85$
- b) GV im TI 100-120°C zu GV TI 500-520°C, $r = 0.56$.

Demnach handelt es sich bei den in vorherigen Abschnitten diskutierten Korrelationen zwischen thermogravimetrisch identifizierbaren Komponenten und gebundenen Wassers um ein spezifisches Phänomen der organischen Substanz in Mineralböden, dass nach Extraktion von Humusstoffen nur noch bedingt nachweisbar ist.

6.1.7. Diskussion ausgewählter Aspekte

Die gefundenen Ergebnisse verweisen auf eine hohe Aussagefähigkeit thermischer Analysen zur OBS. Bei der Auswertung sind jedoch viele offene Fragen zu berücksichtigen.

Eine besondere Bedeutung kommt den Beziehungen zwischen OBS-Komponenten und der Menge gebundenen Wasser zu. Die Beziehungen zwischen humifizierten Komponenten und gebundenem Wasser gehen mit einer vermuteten Prägung der Wasserbindungsfähigkeit von organischen Rückständen während der Bodengenese konform. Die Beziehungen von Anteilen biologisch umsetzbarer zu humifizierten Komponenten scheinen Rückwirkungen der humifizierten Komponenten auf biologische Umsatzprozesse zu bestätigen.

Unabhängig von der Richtigkeit dieser Überlegungen bestätigt die Existenz der Beziehungen die Notwendigkeit einer einheitlichen Aufbereitung von Bodenproben für Analysen zur OBS.

Um in diesem Zusammenhang die Bedeutung der Lufttrocknung und der Menge gebundenen Wassers zu verifizieren, wurden Modellexperimente durchgeführt. Sie beinhalteten eine Simulation variabler Bedingungen bei der Probenaufbereitung / Lufttrocknung durch eine Mischung aller Ergebnisse nach Lagerung der Proben über Kieselgel, bei 76 % und 100 % relativer Luftfeuchte.

Bei diesem Experiment verschwanden sämtliche Beziehungen zwischen OBS Komponenten. Alle Bestimmtheitsmaße gingen ausnahmslos auf Werte unter die Signifikanzgrenze zurück. Das Fehlen einer vergleichbaren Menge gebundenen Wassers behinderte nicht nur den Nach-

weis eines korrelativen Zusammenhangs zwischen absoluten Gewichtsverlusten humifizierter Komponenten und gebundenen Wassers. Der divergierende Wassergehalt der Proben führte auch zu unterschiedlichen Gesamtgewichtsverlusten. Dadurch veränderten sich die Anteile aller OBS - Komponenten und es waren keine gegenseitigen Beziehungen nachweisbar. Bei der Verwendung von Proben mit nicht definierter Lufttrocknung besteht außerdem auch keine multiple Abhängigkeit der OBS-Menge vom Ton- und C-Gehalt der Proben. Zusätzliche Experimente mit wenigen Proben ohne Konditionierung zeigten, dass schon Variationen der Luftfeuchte um 5 % einem Nachweis signifikanter Beziehungen zwischen OBS - Komponenten entgegenstehen.

Damit wurde die Bedeutung gebundenen Wassers eindeutig bestätigt. Es stellt sich jedoch die Frage, ob die gefundenen Korrelationen tatsächlich kausale Zusammenhänge widerspiegeln.

Erste, sehr vage Hinweise hierzu liefert die Existenz der Beziehungen bei Proben aus unterschiedlichen Regionen. Der Nachweis aller hier diskutierten Beziehungen war unabhängig von Nutzungsrichtungen, Klimazonen, geologischen Substraten, Entnahmeterritorien etc. möglich. Bei grundwasserbeeinflussten bzw. hydromorphen Böden, Pflanzensubstanzen, Torfen, Seesedimenten, Komposten etc. fehlen analoge Korrelationen. Demnach handelt es sich um ein für grundwasserferne Mineralböden spezifisches, jedoch gut reproduzierbares Phänomen, dessen weitere Untersuchung lohnt.

Daraufhin wurden die festgestellten Beziehungen einer Residuenanalyse unterzogen. Sie sollte eine Eingrenzung von Faktoren ermöglichen, die für die Ausbildung der Korrelationen verantwortlich sind. Dabei zeigte sich, dass keine Abhängigkeit von Standorten und folglich von standortbezogenen Einflussfaktoren (Korngrößenzusammensetzung, Mineralzusammensetzung der Tone, Klima, Vegetation etc.) besteht. Im Gegenteil, die jeweils größten Abweichungen waren stets an menschliche Eingriffe in die Bodenbildung gebunden und zwar unabhängig von Standorten, Klimazonen, Ausgangssubstraten etc.. So sind große Residuen insbesondere bei Proben des intensiven Ackerbaus und Böden mit geringer Versorgung an frischer organischer Substanz, hoher Bearbeitungsintensität und niedrigen Erträgen häufig (Beispiele s. Abb. 47, S. 85; Abb. 54, S. 95, Abb. 55, S. 97). Bei Weidenutzung waren Abweichungen selten und nicht von anderen Faktoren (z.B. Bodenerosion, Kontamination mit Schadstoffen, Hydromorphie) zu trennen.

Bei der Untersuchung von Proben aus Rieselfeldern, Böden auf Trümmerschutt, Straßenfugenmaterial, Torfen und anderen Substraten war eine Residuenanalyse auf Grund der Höhe

der Abweichungen nicht möglich (vergl. dazu Abschnitt 7.5., S. 101). Sie scheiterte an einer Ausreißer - Analyse, d.h. die Abweichungen waren für eine Residuenanalyse zu groß.

Im Gegensatz dazu stieg die Enge aller berechneten Korrelationskoeffizienten, wenn viele Böden ohne menschlichen Einfluss aus immissionsfreien Gebieten in den geprüften Probenkollektiven enthalten waren. So wurden die engsten Korrelationen zwischen OBS-Komponenten und der Menge gebundenen Wassers bei Böden aus dem Transekt durch die Klimazonen Westsibiriens gefunden (s. Abschnitt 6.1.4.2., S. 31, Abb. 14 und 15, S. 32). Bei diesen Proben dominieren Böden ohne menschlichen Einfluss (ca. 50 % der Profile) und mit Weidenutzung, während nur ca. 10 % Proben von typischen Ackerflächen stammen, die zudem nur in Ausnahmefällen intensiv genutzt werden (Proben aus organogenen Böden wurden aus diesen Analysen ausgeschlossen).

Die Ergebnisse zu Westsibirien stehen damit im Gegensatz zu dem Probenkollektiv landwirtschaftlicher Dauerversuche in Deutschland (100 % ackerbaulich bewirtschaftet, minimale Bestimmtheitsmaße). Ein Versuch zum Nachweis der Beziehungen zwischen OBS-Komponenten und gebundenem Wasser an definitiv gestörten Böden (Proben aus Rieselfeldern, Straßenrandmaterial, unterschiedlich kontaminierte Böden etc.) scheiterte. Es wurden keinerlei Beziehungen zwischen Bestandteilen nachgewiesen.

Demnach ist der Nachweis von Beziehungen zwischen OBS-Komponenten und dem gebundenen Wasser nicht nur an eine einheitliche Aufbereitung der Proben gebunden. Er setzt auch eine Einbeziehung von Böden aus vom Menschen unbeeinflussten Ökosystemen voraus.

Diese Ergebnisse forcierten die Frage nach der Herkunft des gebundenen Wassers und seiner funktionalen Bedeutung in natürlichen, vom Menschen unbeeinflussten Böden. Eine Klärung war bisher nicht möglich. Traditionell werden Gewichtsverluste durch Wasserabgabe der Hygroskopizität von Tonmineralen zugeordnet (107). Dieser Interpretation stehen folgende Argumente gegenüber:

1. Das Auftreten von gebundenem Wasser ist ein charakteristisches Merkmal nicht nur von Tonmineralen, sondern mindestens in gleichen Größenordnungen auch von Humusstoffen (s. GV im TB A in Abb. 17, S. 37).
2. Bei Tonen ist die Hygroskopizität von der Mineralzusammensetzung abhängig und damit variabel. Bei Humusstoffen ist sie an funktionale Gruppen gebunden und vermutlich immer ausgebildet. Bei den untersuchten Böden wurden gleiche Regressionsparameter bei Proben von unterschiedlichen Standorten und Regionen festgestellt.

3. Es wurden bisher keinerlei Hinweise auf eine Abhängigkeit der Residuen von natürlichen Bodenbildungsbedingungen (einschließlich geologischer Substrate) gefunden.

(Die Mineralzusammensetzung wurde bisher leider nicht bestimmt. Für einen Teil der Standardproben sind aber große Unterschiede aus der Literatur bekannt. Bei der Residuenanalyse hätten sich daher Hinweise auf eine Bindung von Abweichungen an Standorte ergeben müssen. Dies war nicht der Fall).
4. Die Hygroskopizität von Tonoberflächen spiegelt ihre Bindungsaffinität gegenüber organischen Substanzen wider. Weil wasserlösliche organische Verbindungen in Mineralböden immer nachweisbar sind, ist eine Reaktion zwischen Tonen und organischer Substanz sehr wahrscheinlich. Mit der Bindung organischer Substanz sollte die Reaktivität der Tonoberflächen und demnach auch ihre Hygroskopizität verschwinden. Die Hygroskopizität von Böden muss daher – im Unterschied zu absolut kohlenstofffreien Tonmineralen - nicht zwingend eine Hygroskopizität der enthaltenen Tonminerale widerspiegeln.
5. Die Wahrscheinlichkeit des Auftretens C - freier, hygroskopischer Tonoberflächen sinkt mit der Dauer der Bodenbildung (es sei denn, die Tonneubildung wird durch menschliche Eingriffe oder Klimaänderungen forciert). Damit steigt die Wahrscheinlichkeit einer Substitution der Hygroskopizität von Tonmineralen durch eine Hygroskopizität tonabhängig akkumulierter Humusstoffe. Diese Möglichkeit wird durch Korrelationen humifizierter Komponenten zur Tonmenge gestützt (77). Die Anlagerung von Humusstoffen an Tone ist zudem ein anerkanntes Merkmal der Bodenbildung (107).
6. Korrelationen zwischen Tongehalt und Hygroskopizität sind für den Nachweis einer Herkunft des Wassers von Tonen meines Erachtens nicht ausreichend. Nachgewiesen wurde bisher ein kausaler Zusammenhang zwischen Tongehalten und der Hygroskopizität für absolut C - freie Tonminerale. Weil zwischen Wasserbindungsfähigkeit und dem Tongehalt ebenfalls enge Korrelationen nachweisbar waren, werden bis heute gleiche Ursachen vermutet. Direkte experimentelle Beweise für die Richtigkeit dieser Annahme habe ich nicht gefunden. Ein solcher Beweis dürfte schwierig sein, da bisher keine Unterscheidungsmöglichkeiten zwischen Wasser aus Tonmineralen und tonabhängig akkumulierten Humusstoffen in Böden bestehen.

Weiterführende Experimente müssen demnach zeigen, inwieweit die Menge gebundenen Wassers in Böden - im Unterschied zu absolut kohlenstofffreien Tonmineralen - an Humusstoffe und/oder Tonminerale gebunden ist. Die Nachweisbarkeit von hochsignifikanten Beziehungen zwischen dem Tongehalt und GV im TI 510-520°C (Indikator für humifizierte OBS-Komponenten) in Proben mit extrem geringen C - Gehalten (< 0.2 % C in B und C- Horizonten) läßt eine Substitution der Hygroskopizität von Tonen durch eine Hygroskopizität

tonabhängig akkumulierter Humusstoffe in sehr frühen Stadien der Bodenbildung vermuten. Trifft dies zu, stellt sich die Frage, ob die Menge gebundenen Wassers Regulationsmechanismen der Qualität und Quantität der OBS widerspiegelt, wie diese Ergebnisse zur Bewertung der OBS - Qualität genutzt werden sollten und inwieweit Untersuchungen chemischer Strukturen zur Aufklärung von Funktionen und Wirkungen der OBS ausreichen.

In diesem Zusammenhang ist die Möglichkeit einer Quantifizierung des Gesamtkohlenstoffgehaltes einer Bodenprobe mittels sehr kleiner Ausschnitte aus der OBS bemerkenswert (s. Abschnitte 6.1.5., S. 34 und 7.3.1., S. 87ff, insbesondere Abb. 48, S. 87). Es stellt sich die Frage, wieso eigentlich GV in dem sehr schmalen TI 340-350°C eine Abschätzung der Gesamtmenge an Kohlenstoff in einer Probe mit einer sehr hohen Genauigkeit ermöglichen, obwohl nur max. 2% der OBS erfaßt werden. Möglicherweise kommt den betreffenden Komponenten bei der Regulation des C-Gehaltes in Mineralböden eine gewisse Bedeutung zu.

6.1.8. Zusammenfassung

Bei der Analyse der thermischen Zerfallsdynamik der organischen Bodensubstanz (OBS) fanden sich eindeutige Zuordnungsmöglichkeiten der Gewichtsverluste (GV) in mehreren Temperaturbereichen (TB) zu umsetzbaren und humifizierten Komponenten der OBS sowie zur Menge gebundenen Wassers. In den Randbereichen der TB treten Überlagerungen der GV verschiedener Komponenten auf. Sie stehen einer Quantifizierung der Komponenten über GV in großen TB mit hoher Genauigkeit entgegen.

Vergleichende Untersuchungen zu Bodenproben mit unterschiedlichen Gehalten an einzelnen Komponenten ermöglichten eine Definition kleinerer "diagnostischer" Temperaturintervalle (TI) innerhalb der TB. Sie beschreiben OBS-Komponenten mit minimalen Störungen durch GV benachbarter TB und scheinen daher für eine Charakterisierung der qualitativen Zusammensetzung der OBS besser geeignet.

Autokorrelationsanalysen führten zum Nachweis hochsignifikanter Beziehungen zwischen umsetzbaren und humifizierten Komponenten der OBS und dem gebundenen Wasser, die unabhängig von Einflussfaktoren auf die Bodenbildung in natürlichen Böden nachweisbar waren. Sie bestätigten die Aussagefähigkeit von GV in relativ kleinen TI zur Charakterisierung der OBS.

Gleiche Aussagen ergaben sich aus Korrelationen der thermischen Gewichtsverluste zu Bodeneigenschaften. Es stellte sich heraus, dass die GV in sehr kleinen TI methodisch nutzbare

Zusammenhänge zum Gesamt - C- Gehalt von Bodenproben und zum Gesamt - N - Gehalt zeigen, obwohl jeweils nur sehr kleine Anteile der OBS (< 2 %) erfaßt werden. Ähnlich enge Beziehungen fanden sich auch zwischen GV und dem Tongehalt sowie zwischen GV und dem Karbonatgehalt. Darüber hinaus waren ungeachtet einer sehr großen Heterogenität des Probenmaterials eine hochsignifikante multiple Abhängigkeit der OBS-Menge vom C- und Tongehalt nachweisbar.

Die Ursachen dieser Beziehungen sind nicht geklärt.

6.1.9. Schlussfolgerungen

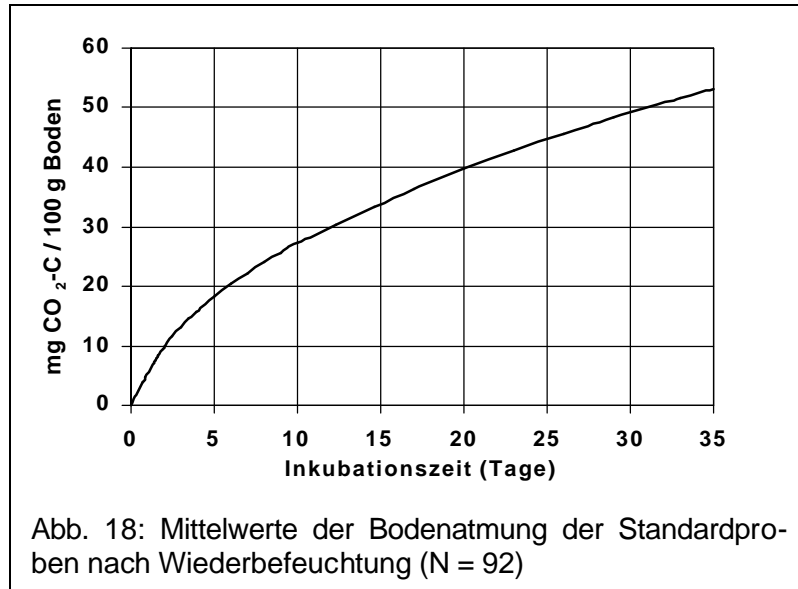
- (a) Umsetzbare und humifizierte Komponenten der OBS sind thermogravimetrisch quantifizierbar. Ihre vollständige Erfassung über GV in großen Temperaturbereichen ist mit größeren Ungenauigkeiten behaftet als eine Bewertung mittels GV in relativ kleinen „diagnostischen“ Temperaturintervallen.
- (b) Zwischen der Menge an gebundenem Wasser, humifizierten und biologisch umsetzbaren Komponenten der OBS existieren in Böden natürlicher, vom Menschen unbeeinflusster Ökosysteme sehr enge Beziehungen, deren Kausalität und Bedeutung für die OBS-Qualität in weiteren Untersuchungen geklärt werden muss.
- (c) Die Herkunft des gebundenen Wassers in Bodenproben ist offen. Im Unterschied zu kohlenstofffreien Tonmineralen gehören in Böden sowohl Tonoberflächen als auch tonabhängig akkumulierte Humusstoffe zu den möglichen Quellen gebundenen Wassers.
- (d) Die Berücksichtigung der Wasserbindungsfähigkeit von Böden und die Einbeziehung von natürlichen, vom Menschen unbeeinflussten Böden erwiesen sich als essentielle Voraussetzungen für den Nachweis von Beziehungen zwischen OBS-Komponenten.

6.2. Biologische Umsatzprozesse

6.2.1. Übersicht

Einen ersten Überblick zu den Ergebnissen der Bodenatmung vermittelt Abb. 18. Sie dokumentiert die mittlere Dynamik der summierten CO_2 -Freisetzung aller Proben (Standardproben).

Die Ergebnisse zeigen einen für Atmungsprozesse nach Wiederbefeuchtung typischen Verlauf. Er ist durch einen



steilen Anfangsanstieg charakterisiert, der sich mit zunehmender Versuchsdauer verringert. Die Atmungsrate bzw. die CO_2 -Freisetzung je Stunde ist unmittelbar nach Versuchsbeginn am größten und wird mit zunehmender Inkubationszeit kleiner. Dies geht aus dem kleiner werdenden Anstieg der Summenkurve mit zunehmender Inkubationsdauer hervor.

Im Mittel aller untersuchten Proben wurden bei 20°C bis zum 35. Inkubationstag zwischen 17 und 132 mg C / 100 g Boden als CO_2 freigesetzt (im Mittel: 53 mg C / 100 g Boden). Diese Menge entspricht 0.5 bis 4.5 % des Gesamtgehaltes an organischem Kohlenstoff (im Mittel 2.3 %).

6.2.2. Quantifizierung umsetzbarer Komponenten

Die CO₂-Freisetzung in Inkubationsexperimenten dient häufig als Vergleichsmaßstab zur Quantifizierung umsetzbarer Bestandteile, weil die Bodenatmung Ausdruck biologischer Umsatzprozesse ist. Dementsprechend wurde eine deutliche Abhängigkeit der Ergebnisse zur Bodenatmung von der Bodennutzung erwartet.

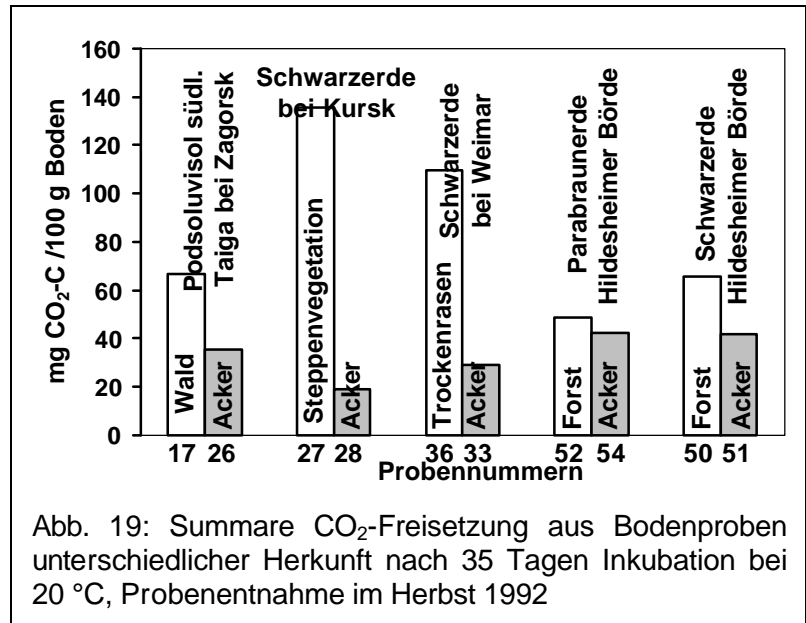


Abb. 19: Summäre CO₂-Freisetzung aus Bodenproben unterschiedlicher Herkunft nach 35 Tagen Inkubation bei 20 °C, Probenentnahme im Herbst 1992

Abb. 19 zeigt dazu einen Vergleich der freigesetzten CO₂ - Menge von ausgewählten Bodenproben nach 35 Tagen unter optimalen Umsatzbedingungen (20 °C, 60 % der Wasserbindungsfähigkeit). Zu erkennen ist an den einzelnen Standorten eine reduzierte Bodenatmung bei Ackernutzung im Vergleich zu Böden unter natürlicher Vegetation und Forstwirtschaft. Diese Ergebnisse bestätigen eine Reduktion der biologischen Aktivität und der Menge umsetzbarer Komponenten der OBS durch die ackerbauliche Bodennutzung (99). Analoge Ergebnisse wurden für alle anderen Standorte gefunden.

Dauerschwarzbrache (z.B. Probe 28 in Abb. 19) führte zur größten Reduktion der Bodenatmung. Landwirtschaftliche Versuchsvarianten mit Fruchtfolge und mit hoher organischer Düngung führten zu jeweils größeren Werten im Vergleich zu Bracheflächen, zeigten jedoch stets kleinere Werte als Böden unter natürlicher Vegetation oder Wald.

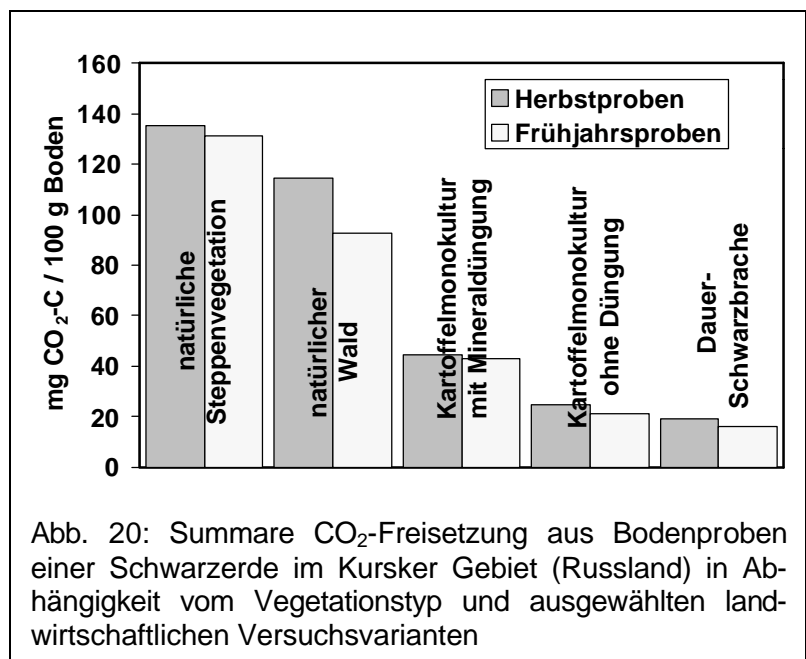


Abb. 20: Summäre CO₂-Freisetzung aus Bodenproben einer Schwarzerde im Kursker Gebiet (Russland) in Abhängigkeit vom Vegetationstyp und ausgewählten landwirtschaftlichen Versuchsvarianten

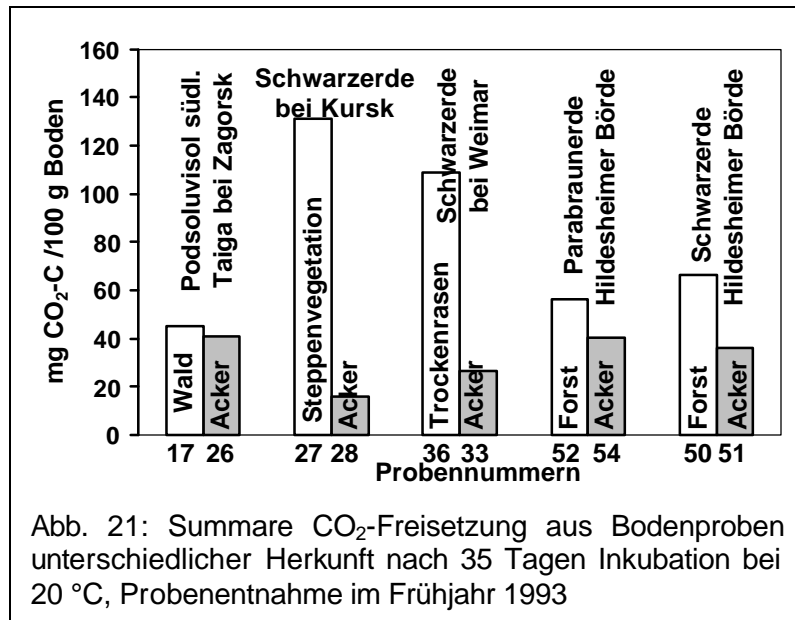
Abb. 20 zeigt diese Unterschiede am Beispiel einer typischen Schwarzerde im Kursker Gebiet

(Russland) unter Einbeziehung von Proben aus dem Biosphärenreservat Kursk und benachbarter landwirtschaftlicher Versuchsflächen. Die Inkubationsexperimente spiegeln demnach auch graduelle Variationen im Gehalt an umsetzbarer Substanz wieder.

6.2.3. Jahreszeitliche Variationen

Analog zu den Ergebnissen der Thermogravimetrie zeigen die Inkubationsergebnisse eine Abhängigkeit vom Entnahmeterrain der Bodenproben. So sind die Inkubationsergebnisse vom Herbst 1992 (Abb. 19) und vom Frühjahr 1993 (Abb. 21) bei mehreren Standorten signifikant verschieden.

Bei fast allen Proben wurden im Herbst höhere Werte fest-



gestellt. Dementsprechend fallen in Abb. 21 die Werte für die CO₂-Freisetzung der Proben 17 und 27 kleiner aus, als in Abb. 19. Analog dazu zeigen sich in Abb. 20 (S. 45) bei allen Varianten der Schwarzerden bei Kursk im Herbst höhere Werte, als im Frühjahr. Nur selten finden sich entgegengesetzte Veränderungen, wie z.B. bei der Probe 52 in Abb. 21 und 19.

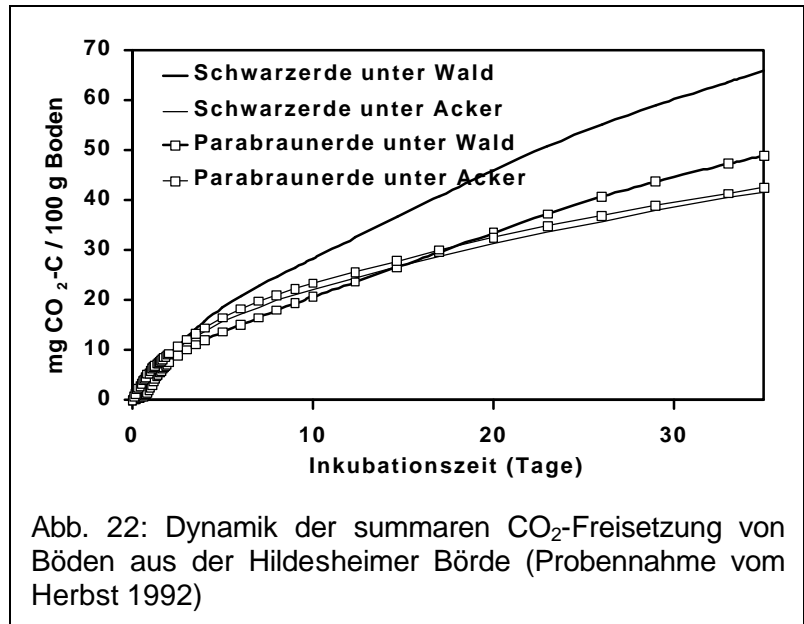
Weitere Ergebnisse zum Einfluss der Probenentnahmetermine auf die Bodenatmung und die Menge umsetzbarer Substanzen finden sich in 124, 125 und 126. Sie sind für die Zielstellung der Arbeit und die folgenden Ausführungen von untergeordneter Bedeutung und spiegeln bekannte Aspekte wider. Auf eine detaillierte Darstellung wird daher an dieser Stelle verzichtet.

6.2.4. Dynamik der Bodenatmung

Um Wirkungen von Feuchteänderungen auf Umsatzprozesse am Beispiel der Wiederbefeuchtung zu analysieren, wurde neben der summären Bodenatmung ihre Dynamik erfaßt. Abb. 22 zeigt dazu Ergebnisse am Beispiel von Böden aus der Hildesheimer Börde. Diese Böden unterschieden sich nicht (bzw. nur wenig) hinsichtlich der klimatischen und geologischen Ausgangsbedingungen, weisen jedoch eine unterschiedliche Genese auf.

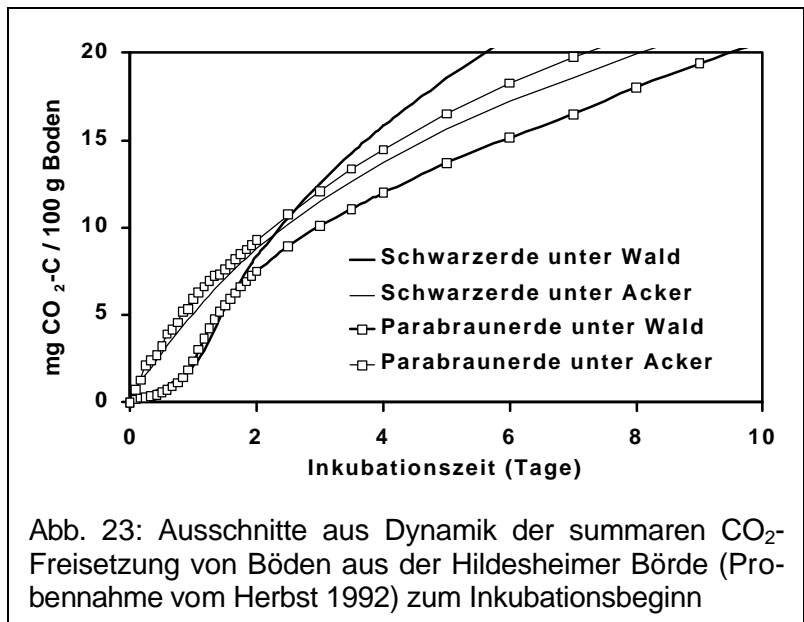
Die Abbildung zeigt Unterschiede in der summaren CO_2 -Freisetzung nach 35 Tagen Inkubation. Die Böden unter Ackernutzung (dünne Linien) weisen im Vergleich zu Böden unter Wald (dicke Linien) eine reduzierte Bodenatmung auf.

Desweiteren ist erkennbar, dass sich die Verbindungslinien der eingezeichneten Messpunkte bei ca. 3 und 15 Tagen Inkubation kreuzen.



Die Atmungsraten der dargestellten Bodenproben entwickeln sich demnach nicht proportional. Dies bedeutet, die festgestellten Unterschiede zwischen den Böden sind vom Zeitpunkt der Messung nach Wiederbefeuchtung abhängig und die summare CO_2 -Freisetzung nach 35 Tagen erfasst nicht alle Merkmale des Umsatzverhaltens der OBS nach Feuchteänderungen.

Um die Veränderungen in der Dynamik der Bodenatmung zu verdeutlichen, enthält Abb. 23 einen Ausschnitt der Ergebnisse von Abb. 22. Hier wird ein schnellerer Anstieg der Bodenatmung bei Proben unter Acker im Vergleich zu den Proben unter Wald besser sichtbar.



Aus einem Vergleich beider Abbildungen geht demnach

hervor, dass die Proben unter Ackernutzung einen reduzierten Gehalt an umsetzbarer Substanz (s. summare Bodenatmung nach 35 Tagen, Abb. 19, 21 und 22) aufweisen, gleichzeitig jedoch einen schnelleren Anfangsanstieg der CO_2 -Freisetzung nach Wiederbefeuchtung zei-

gen. Proben unter Wald reagieren demgegenüber langsam, zeigen jedoch langfristig höhere Atmungsraten.

Dieses Phänomen ließ sich an vielen anderen Standorten ebenfalls nachweisen. Es bestätigt Vermutungen über eine Abhängigkeit biologischer Prozesse von Feuchteänderungen (nicht allein vom Niveau des Wassergehaltes, wie bisher angenommen) und wird daher in folgenden Abschnitten näher analysiert.

6.2.5. Änderungen der Bodenatmung durch Glucoseapplikation

Wirkungen unterschiedlicher Gehalte an umsetzbarer Substanz sind ein bekannter Einflussfaktor auf die Zusammensetzung der Bodenorganismen und auf die Dynamik der Bodenatmung.

Um dies für hier verwendete Proben zu überprüfen, wurde durch Glucosezugabe während der Wiederbefeuchtung ein unterschiedlicher Anfangsgehalt an umsetzbarer Substanz simuliert.

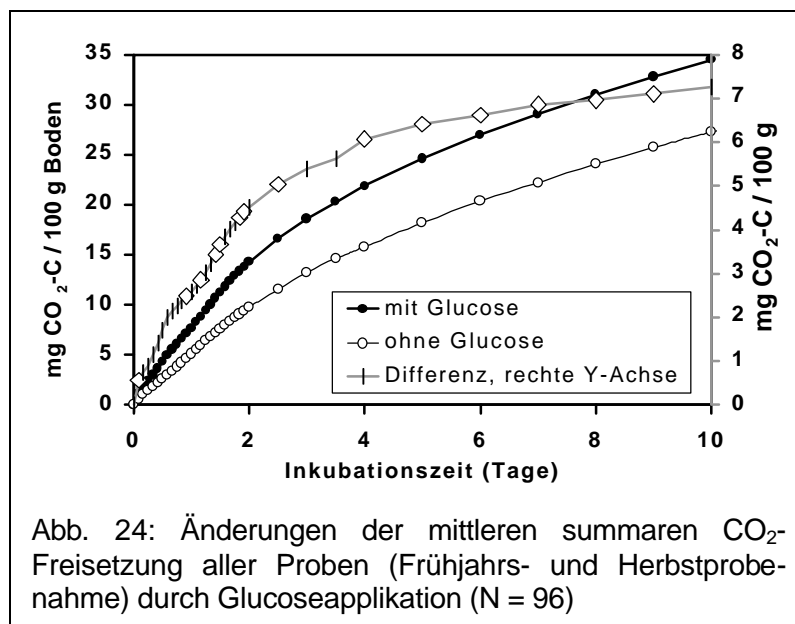


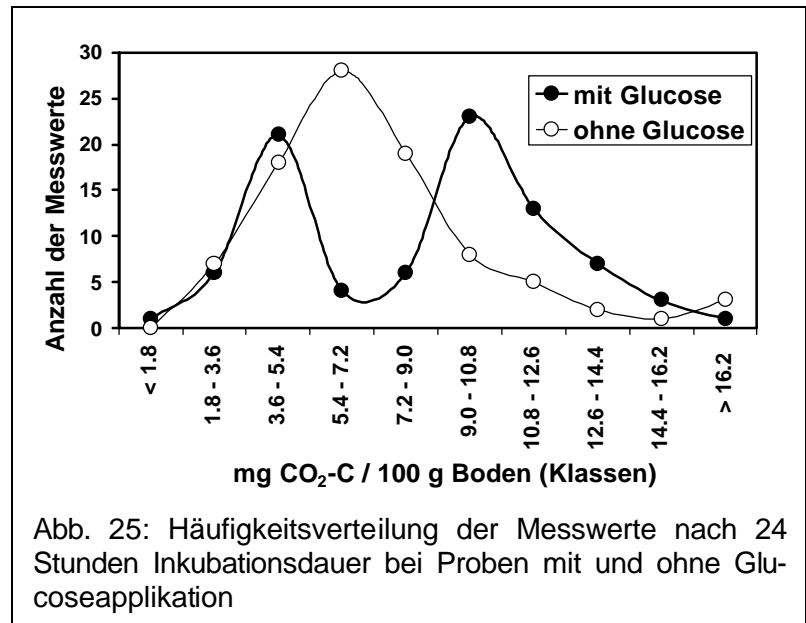
Abb. 24: Änderungen der mittleren summarischen CO₂-Freisetzung aller Proben (Frühjahrs- und Herbstprobenahme) durch Glucoseapplikation (N = 96)

Abb. 24 veranschaulicht die Veränderungen der CO₂-Freisetzung durch Glucose im Mittel aller Standardproben. Die Abbildung enthält dazu neben den Mittelwerten der CO₂-Freisetzung mit und ohne Glucose auch die Differenz der Ergebnisse beider Messserien in einem getrennten Maßstab (rechte y-Achse, graue Linie). An Hand dieser Darstellung lassen sich Veränderungen in der Dynamik der Bodenatmung durch die Glucoseapplikation leicht erkennen.

Erwartungsgemäß steigert die Glucose die Bodenatmung. Der Abstand der Kurven für die Bodenatmung mit und ohne Glucose nimmt mit steigender Versuchsdauer zu. Die größten Wirkungen der Glucose finden sich zum Versuchsbeginn. Dies geht aus dem Anstieg der Differenzkurve hervor. Er ist unmittelbar nach Messbeginn am größten und verringert sich dann mehr oder weniger kontinuierlich. Nach 10 Tagen sind im Mittel aller Proben ca. 7.2 mg Glucose bzw. 91 % der zugegebenen Menge abgebaut.

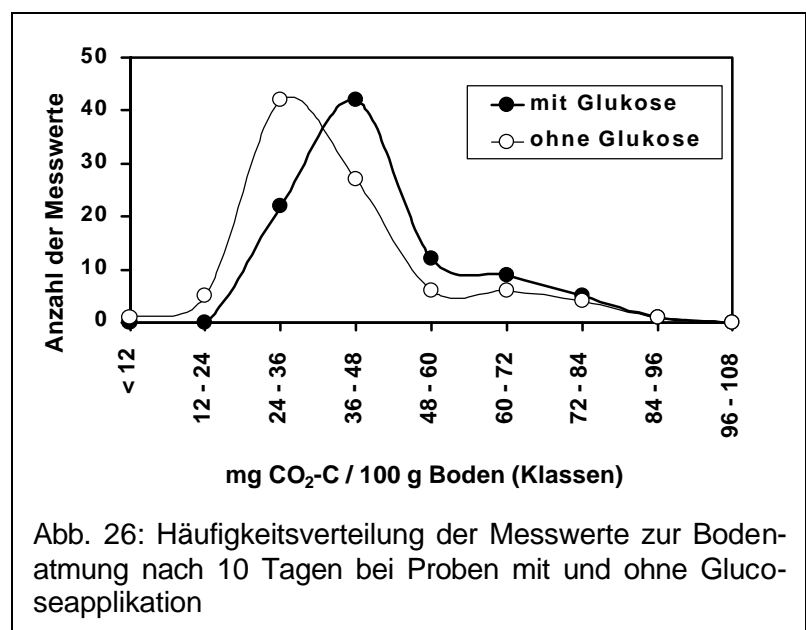
Um den Wirkungszeitraum der Glucose auf die Dynamik der Bodenatmung eindeutiger abzugrenzen, wurde zunächst die Häufigkeitsverteilung der Messwerte zu mehreren Zeitpunkten analysiert. Dabei zeigten sich zum Teil deutliche Abweichungen von einer erwarteten normalen oder halbseitig schiefen Verteilungshäufigkeit. Diese Spezifik stand einer Quantifizierung der Glucosewirkungen auf die Bodenatmung mit statistischen Standardverfahren entgegen.

Eine weitergehende Analyse führte zum Nachweis einer zweigipfeligen Häufigkeitsverteilung. Sie bildet sich während der ersten 24 Stunden nach Inkubationsbeginn aus und verschwindet dann wieder. Abb. 25 dokumentiert die Ergebnisse dieser Auswertungen am Beispiel der Bodenatmung nach 24 Stunden.



Ohne Glucose sind die Ergebnisse der Atmungsmessungen erwartungsgemäß normalverteilt. Lediglich eine leichte Schiefe der Kurve nach rechts weist darauf hin, dass sehr hohe Messwerte etwas häufiger auftreten, als sehr kleine. Mit Glucose findet sich hingegen eine signifikante Zweiteilung. Sie zeigt sich in zwei Häufigkeitsmaxima um 4.5 und 11 mg CO₂-C / 100 g Boden.

Zum Vergleich dokumentiert Abb. 26 die Ergebnisse der Häufigkeitsanalyse nach 10 Tagen. Zwischen den Ergebnissen mit und ohne Glucose bestehen keine signifikanten Unterschiede in den Verteilungsmustern. Bei den Experimenten mit Glucose ist lediglich eine Verschiebung nach rechts erkennbar. Sie resultiert aus höheren Mittelwerten der



Bodenatmung durch die Glucoseapplikation, auf die im Zusammenhang mit Abb. 24 bereits eingegangen wurde.

Im weiteren Verlauf der Auswertungen wurde an Stelle der summaren Bodenatmung die Atmungsrate (mg CO₂-C / 100 g Boden pro Stunde) analysiert. Die folgende Abbildung dokumentiert die glucosebedingte Änderung der Atmungsrate als Differenz der Atmungsrate mit und ohne Glucoseapplikation.

Aus dieser Abbildung wird eine zeitlich gestaffelte Steigerung der Reaktion auf die Glucose deutlich. Einer Phase erhöhter Atmungsrate um 12 Stunden folgt eine Periode in der die Wirkung der Glucose schwächer wird. Nach einem Zeitraum von ca. 25 Stunden nehmen die glucoseinduzierten Unterschiede wieder zu.

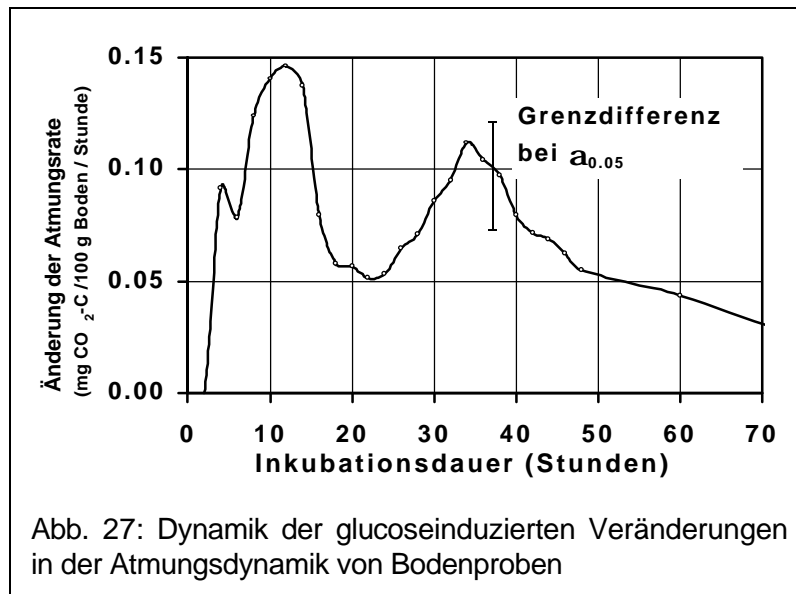


Abb. 27: Dynamik der glucoseinduzierten Veränderungen in der Atmungsrate von Bodenproben

Dieser Effekt hält bis zu 36 Stunden nach Inkubationsbeginn an und verschwindet dann wieder. In der Abb. 24 (S. 48) zeigt sich dieses Verhalten im unterschiedlichen Anstieg der Differenzkurve (graue Linie).

Ein Teil der Proben reagiert auf das höhere Angebot an umsetzbarer Substanz in Form von Glucose offensichtlich innerhalb von 12 Stunden. Er ist für das erste Maximum in Abb. 27 verantwortlich. Ein anderer Teil der Proben reagiert hingegen erst nach über 20 Stunden und induziert einen nochmaligen Anstieg der mittleren Bodenatmung zwischen 30 und 40 Stunden.

Alternative Erklärungen ließen sich nicht bestätigen. Insbesondere fanden sich nur wenige, nicht signifikante Anhaltspunkte für eine zeitlich gestaffelte Reaktion bei einzelnen Proben. Die Ergebnisse unterschieden sich darin von Experimenten, bei denen die Glucose zu vorinkubierten und konstant feuchten Proben appliziert wurde (10, 13).

6.2.6. Einflussfaktoren auf die Dynamik der Bodenatmung

Um die Unterschiede in der glucoseinduzierten Reaktion einzelner Proben zu analysieren wurde ein Respirationsquotient berechnet. Er beschreibt das Verhältnis der Bodenatmung bei

35 Stunden zur Bodenatmung bei 12 Stunden. Proben mit hohen Umsatzraten zum Beginn der Inkubation und niedrigen Umsatzraten bei 35 Stunden liefern sehr kleine Quotienten. Proben mit umgekehrten Verhältnissen liefern hingegen sehr große Werte, während Proben mit mehrfach veränderlicher oder konstanter Atmungsrate (Mehrfachreaktion auf die Glucose) mittlere Quotienten erzeugen.

Vorteilhaft ist der Quotient vor allem, weil er Unterschiede in der absoluten Höhe der Umsatzrate nivelliert. Dies erleichtert eine Trennung zwischen quantitativen und qualitativen Unterschieden in der Dynamik der Bodenatmung und somit eine Unterscheidung der Proben hinsichtlich ihrer Reaktion auf die Glucose insbesondere bei unterschiedlichem Gehalt an umsetzbaren Komponenten.

Abb. 28 zeigt die Häufigkeitsverteilung des Respirationsquotienten. Er führt erwartungsgemäß zu einer eindeutigen Trennung der Proben mit Glucosezusatz. Messwerte zwischen den beiden Maxima (A und B) sind selten und betrafen ausschließlich Proben mit einer gestörten Bodenbildung (Probe 23, s. S. 17, 126).

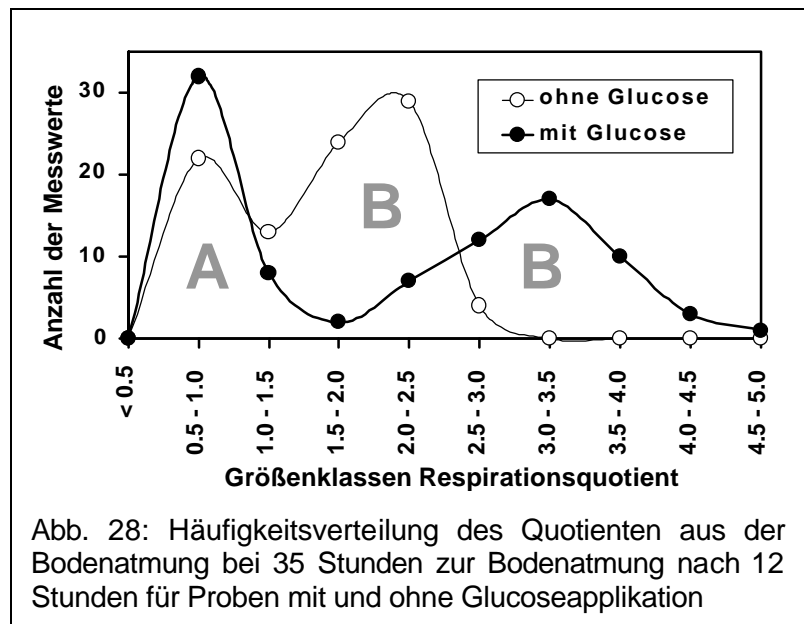


Abb. 28: Häufigkeitsverteilung des Quotienten aus der Bodenatmung bei 35 Stunden zur Bodenatmung nach 12 Stunden für Proben mit und ohne Glucoseapplikation

Das erste Maximum (A) kenn-

zeichnet einen Respirationsquotient von kleiner 1.5. Es erfasst Böden, deren Atmungsrate (CO_2 -Freisetzung in mg / h) nach 35 Stunden die Bodenatmung nach 12 Stunden maximal um den Faktor 1.5 überschreitet (schnelle Reaktion auf die Glucose). Diese Art der Reaktion wurde mit einem "A" gekennzeichnet, weil sie für Böden arider Klimate charakteristisch ist (siehe unten). Beim zweiten Maximum ist die Bodenatmung nach 35 Stunden mindestens um den Faktor 1.5 größer als nach 12 Stunden. Es erfasst Proben mit einem späten bzw. langsamen Anstieg der Bodenatmung und wurde als Reaktionstyp "B" bezeichnet.

Wider Erwarten zeigte sich eine signifikante zweigipfelige Häufigkeitsverteilung des Respirationsquotienten auch bei den Inkubationsexperimenten ohne Glucosezusatz. Demnach kann die Glucose nicht Ursache des divergierenden Anstiegs der Bodenatmung nach Wiederbe-

feuchtung sein. Die Glukoseapplikation verbessert lediglich die Nachweisbarkeit einer divergierenden Reaktion von Böden auf die Wiederbefeuchtung.

Diese These wurde mit Hilfe mehrerer statistischer Auswerteverfahren überprüft. Dabei ergaben sich folgende Ergebnisse:

- 1) Der Reaktionstyp ist für Proben vom Herbst und Sommer gleichermaßen nachweisbar, d.h. er tritt unabhängig vom Zeitpunkt der Probennahme auf.
- 2) Der Klimatyp (Unterteilung in Böden des ariden und humiden Klimas) hat einen signifikanten Einfluss (**Irrtumswahrscheinlichkeit** $\ll 1\%$). Böden des ariden Klimas reagieren nur in Ausnahmefällen mit einem langsamen Anstieg der Bodenatmung auf die Glucoseapplikation.
- 3) Der Einfluss der Bodentypen ist ebenfalls hochsignifikant, jedoch vom Einfluss des Klimas statistisch nicht trennbar, weil die hier untersuchten Bodentypen an einen Klimatyp gebunden sind.
- 4) Die Abhängigkeit des Reaktionstyps vom Bodentyp bzw. Klima wird durch die Bodennutzung verändert (**Irrtumswahrscheinlichkeit** $\ll 1\%$). In Böden des humiden Klimas wird bei landwirtschaftlicher Bodennutzung die Reaktion auf die Glucose schneller (Änderung des Reaktionstyps von B zu A).
- 5) Der Vegetationstyp und die Bodennutzung beeinflussen den Reaktionstyp signifikant und überlagern Klimawirkungen (Irrtumswahrscheinlichkeit $< 5\%$).
- 6) Ein Einfluss des N-Gehaltes, C-Gehaltes, des löslichen Stickstoffs oder anderer Bodeneigenschaften war nicht nachweisbar. Betreffs des Tongehaltes wurde eine tendenzielle (nicht signifikante) Häufung des Reaktionstyps B bei tonreicheren Böden festgestellt.
- 7) Wirkungen der Glucose auf den Reaktionstyp waren nicht signifikant. Jedoch waren Abhängigkeiten von Einflussfaktoren bei den Proben mit Glucoseapplikation statistisch eindeutiger nachweisbar.

Tabelle 3 dokumentiert eine Zusammenstellung der Proben nach ihrem Reaktionstyp unter Berücksichtigung der signifikanten Einflussfaktoren. Sie zeigt:

1. Böden aus humiden Klimaregionen unter Wald reagieren auf eine Wiederbefeuchtung stets mit einem langsamen Anstieg der Bodenatmung (Reaktionstyp B). In diesen Böden erhöht die Glucose die Bodenatmung erst nach über 15 Stunden.

2. Böden aus ariden Klimagebieten unter Steppenvegetation zeigen einen schnellen Anfangsanstieg der Bodenatmung bei Wiederbefeuchtung und eine sofortige Steigerung der CO₂-Freisetzung bei Glucoseapplikation (Reaktionstyp A).
3. Bei Böden unter Ackerbau fand sich immer ein schneller Anfangsanstieg der Bodenatmung bei Wiederbefeuchtung und eine sofortige Steigerung der CO₂-Freisetzung bei Glucoseapplikation (Reaktionstyp A) unabhängig von der Klimazone, dem Bodentyp, der Vegetation und anderen Faktoren.

Tabelle 3: Auftreten von Reaktionstypen in Abhängigkeit von signifikanten Einflussfaktoren (in Klammern: Anzahl der Proben)

Variationsquelle		Bodennutzung / Reaktionstyp		
Bodentyp	Klimatyp	Wald oder Forst	Steppenvegetation	Ackerbau
Rasenpodsole	humid	B (18) ¹⁾	entfällt	A (6) ²⁾
Braunerden / Parabraunerden	humid	B (14)	entfällt	A (6)
Schwarzerden (Deutschland)	humid (?)	B (6) ³⁾	A (4) ⁴⁾	A (8)
Schwarzerden (Russland)	arid	A (6)	A (4)	A (8)
Kastanoseme	arid	entfällt	A (4)	A (2)
Auenboden-Kastanoseme	arid	entfällt	A (2)	A (2)

- 1) einschließlich Forstanpflanzungen nach Ackerbau, ohne Probe 23 (durch Aushub gestörte Bodenbildung, Reaktionstyp ließ sich weder A noch B zuordnen)
- 2) einschließlich Proben mit Gartennutzung
- 3) Schwarzerdeproben aus der Hildesheimer Börde
- 4) Schwarzerdeproben unter Trockenrasenvegetation bei Weimar

Abb. 29 dokumentiert gleiche Ergebnisse in grafischer Form. Dargestellt ist die Dynamik der Bodenatmung von Proben mit unterschiedlichem Reaktionstyp. Böden arider Klimate mit natürlicher Vegetation und Böden aus allen Klimaregionen unter Ackerbau wurden zusammengefasst. Sie reagieren auf die Wiederbefeuchtung mit einer sofortigen CO₂-Freisetzung, d.h. die CO₂ - Freisetzung in mg CO₂ pro Stunde. In diesen Fällen ist der Anstieg der Summenkurven in Abb. 29 unmittelbar nach Wiederbefeuchtung am größten und sinkt im Laufe der Inkubation. Böden humider und semiarider Klimate unter Wald bilden eine zweite Gruppe. Sie reagieren mit einer allmählichen Steigerung der CO₂-Freisetzung. Die größte Umsatzrate (größter Anstieg der Summenkurve) stellt sich erst nach über 15 - 40 Inkubationsstunden ein. Nach über 10 Tagen Inkubation war der Mittelwert der summaren CO₂-Freisetzung von

Proben beider Reaktionstypen nahezu gleich; nach über 30 Tagen Inkubation bei Böden mit Reaktionstyp B größer (nicht dargestellt).

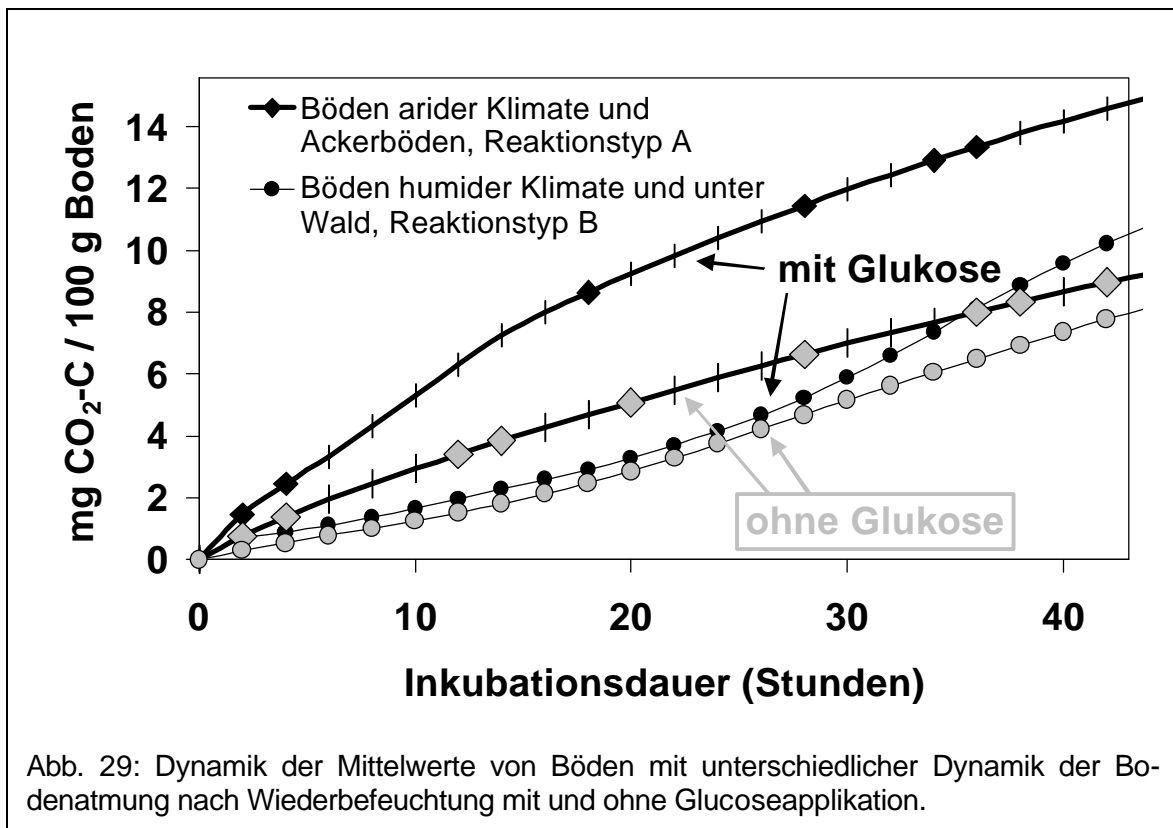


Abb. 29: Dynamik der Mittelwerte von Böden mit unterschiedlicher Dynamik der Bodenatmung nach Wiederbefeuchtung mit und ohne Glucoseapplikation.

Demnach verändert die Glucoseapplikation in Übereinstimmung mit den Ergebnissen der statistischen Auswertung nicht die Zuordnung der Proben zu den Reaktionstypen. Sie erleichtert jedoch eine Unterscheidung der Proben, weil die applizierte Glucose bestehende Unterschiede in der Anfangsbodenatmung vergrößert.

6.2.7. Beziehungen zu Bodeneigenschaften

Um Ursachen des divergierenden Anfangsanstiegs der Bodenatmung nach Wiederbefeuchtung einzugrenzen, wurden die Inkubationsergebnisse mit den Bodeneigenschaften korreliert.

Abb. 30 dokumentiert die dabei gefundenen Ergebnisse am Beispiel von Korrelationen des pH-Wertes zur Bodenatmung. Unmittelbar nach der Wiederbefeuchtung (2 Inkubationsstunden) ist ein signifikanter Zusammenhang zwischen Bodenatmung und pH-Wert nachweisbar. Das berechnete Bestimmtheitsmaß zeigt, dass 65 % der Variationen bei der Bodenatmung durch Variationen des pH-Wertes erklärt werden.

Im Laufe der Inkubation ändert sich jedoch die Enge dieses Zusammenhangs. Nach 35 Tagen ist die Beziehung nicht mehr nachweisbar, das Bestimmtheitsmaß tendiert gegen Null.

Hauptursache für das Verschwinden des Zusammenhangs ist ein überproportionaler Anstieg der Bodenatmung in Böden mit niedrigen pH-Werten. Er gleicht anfängliche

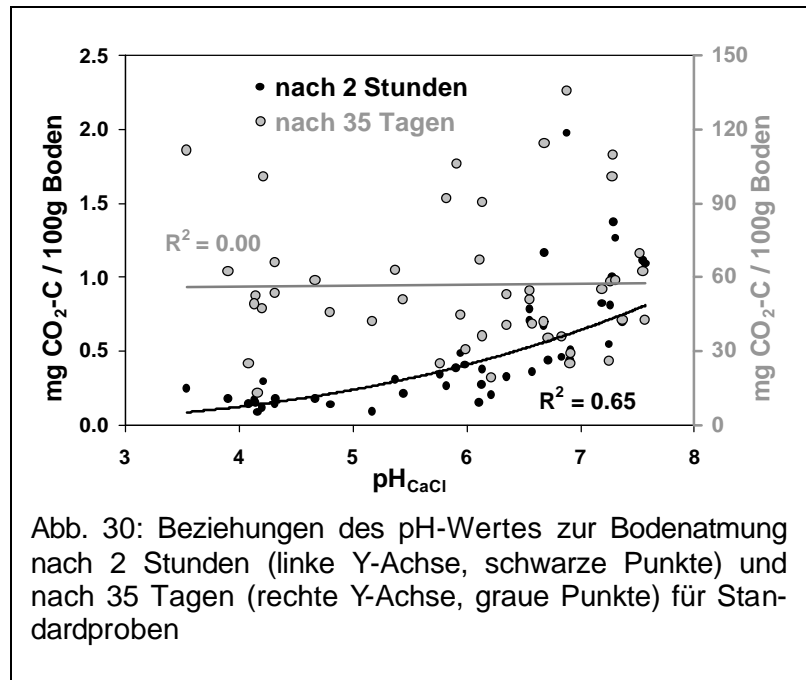


Abb. 30: Beziehungen des pH-Wertes zur Bodenatmung nach 2 Stunden (linke Y-Achse, schwarze Punkte) und nach 35 Tagen (rechte Y-Achse, graue Punkte) für Standardproben

Abhängigkeiten aus, so dass zwischen pH-Wert und Bodenatmung kein langfristig stabiler Zusammenhang besteht.

Abb. 31 veranschaulicht die zeitliche Dynamik von Veränderungen der Beziehung zwischen Bodenatmung und pH-Wert. Dargestellt ist die Abhängigkeit der Korrelationskoeffizienten von der Inkubationsdauer.

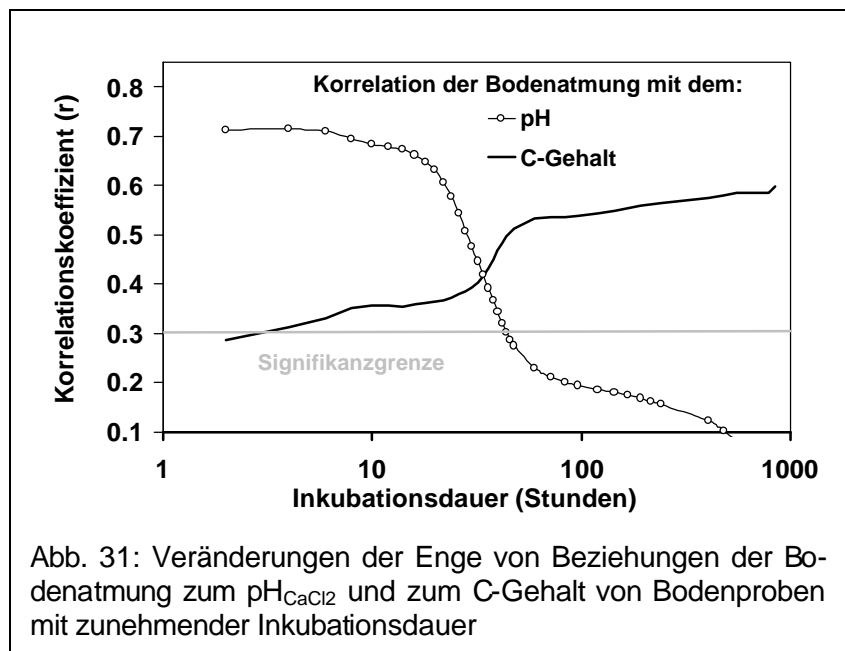


Abb. 31: Veränderungen der Enge von Beziehungen der Bodenatmung zum $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ und zum C-Gehalt von Bodenproben mit zunehmender Inkubationsdauer

Anfänglich enge Beziehungen der Bodenatmung zum pH-Wert (hohe Korre-

lationskoeffizienten) verlieren sich mit fortschreitender Inkubation innerhalb von ca. 60 Stunden (niedrige Korrelationskoeffizienten).

Gleichzeitig wird die Beziehung der Bodenatmung zum C-Gehalt enger. Für die Bodenatmung unmittelbar nach Wiederbefeuchtung spielt demnach der Gesamtkohlenstoffgehalt eine unbedeutende Rolle oder sein Einfluss wird von anderen Faktoren überlagert (z.B. Menge abgestorbener Biomasse).

Analoge Abhängigkeiten von der Inkubationsdauer wurden auch für Beziehungen von folgenden Bodeneigenschaften zur Bodenatmung nachgewiesen: Wasserhaltefähigkeit bei pF 1.8 ($B_{\max} = 0.42$ nach ca. 50 Stunden), Tongehalt ($B_{\max} = 0.32$ zum Inkubationsbeginn), C / N - Verhältnis ($B_{\max} = 0.16$ zum Inkubationsbeginn).

Auffallend ist, dass der Zeitraum signifikanter Änderungen in der Enge gegenseitiger Beziehungen von Bodenatmung und Bodeneigenschaften zwischen den beiden Maxima in Abb. 27 liegt. Eine Abhängigkeit der Beziehungen von den im Abschnitt 6.2.6. dargestellten Faktoren war jedoch nicht nachweisbar. Weder der pH-Wert, der C-Gehalt, das C/N - Verhältnis, die Nitratkonzentration zum Inkubationsbeginn noch andere Faktoren ließen sich als mögliche Ursache der Reaktionstypen der Bodenatmung statistisch bestätigen.

Proben mit niedrigem pH-Wert und geringem Anfangsumsatz waren beispielsweise sowohl bei Proben mit Reaktionstyp B als auch bei Proben mit Reaktionstyp A nachweisbar. Gleiches traf auf Proben mit hohem pH-Werten und großen Umsatzraten zu.

6.2.8. Spezifika der Reaktion von Einzelproben

Eine detaillierte Analyse der Atmungsrate bei Einzelproben führte zur Aufdeckung eines weiteren Phänomens. Aus der Literatur ist eine sofortige Steigerung der Bodenatmung durch Glucose bekannt (10, 11, 13, 54, 62, 65, 86). Allerdings wurde die Glucose immer zu feuchten Proben appliziert. Hier wurde hingegen zielstellungsbedingt die Glucoseapplikation an eine Wiederbefeuchtung gebunden.

Dabei stellte sich heraus, dass Glucose eine zeitlich begrenzte, sehr schwache, jedoch eindeutig signifikante Reduktion der Atmungsrate induzieren kann (Irrtumswahrscheinlichkeit $\ll 1\%$).

Abb. 32 zeigt dazu mehrere Beispiele. Unmittelbar nach dem Inkubationsbeginn (bis max. 10 Stunden) sind die Ergebnisse bei Glucoseapplikation höher im Vergleich zu Experimenten ohne Glucose (positive Werte in Abb. 32).

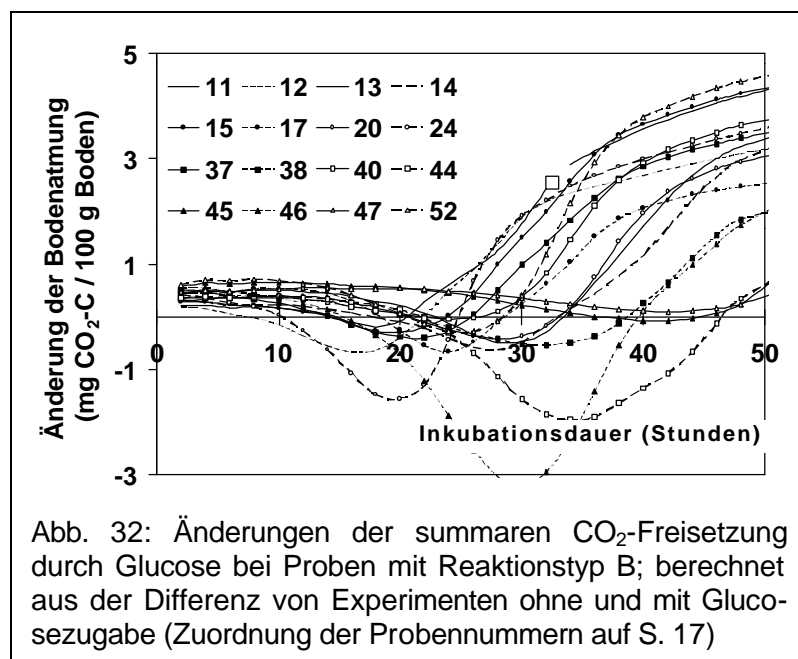
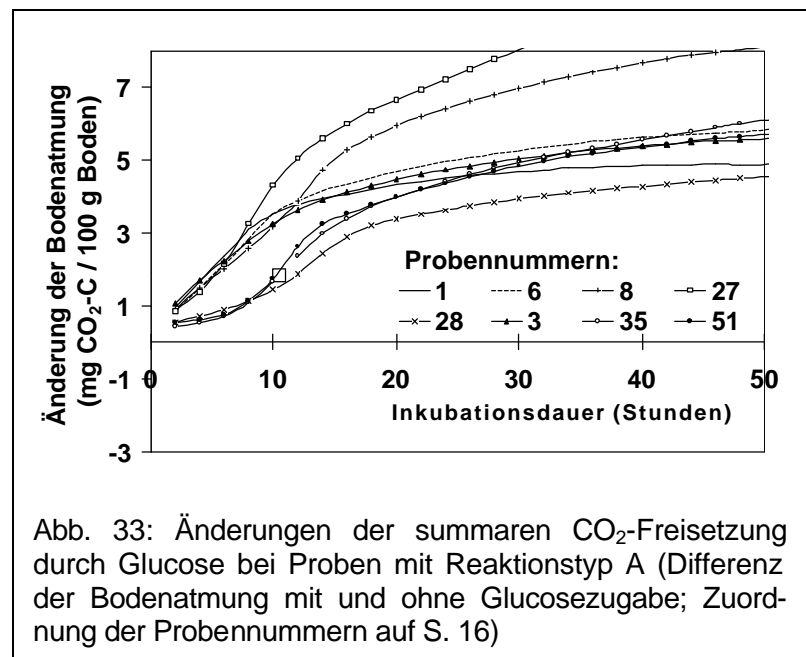


Abb. 32: Änderungen der summarischen CO_2 -Freisetzung durch Glucose bei Proben mit Reaktionstyp B; berechnet aus der Differenz von Experimenten ohne und mit Glucosezugabe (Zuordnung der Probennummern auf S. 17)

Mit der Inkubationsdauer steigt die CO₂-Freisetzung bei allen Proben (s. Abb. 24, S. 48). Dieser Anstieg ist jedoch bei einigen Proben bei Zugabe von Glucose signifikant niedriger. Dies zeigt sich in der Abb. 32 in Form negativer Werte.

Dieses Phänomen war ausschließlich für Böden vom Reaktionstyp B, d.h. für Proben aus humiden Klimagebieten unter Waldvegetation nachweisbar (vergl. Probennummern in Abb. 32 mit der Probenübersicht auf S. 17).

Proben mit dem Reaktionstyp A reagierten hingegen immer mit einer gesteigerten Bodenatmung bei Glucoseapplikation (s. Abb. 33). Ausnahmen wurden bei diesen Proben nicht beobachtet.



6.2.9. Ergebnisse zusätzlicher Experimente

Wirkungen des Klimas auf die Bodenbildung lassen sich nur selten eindeutig interpretieren. Es kann sich um Folgen unterschiedlicher Niederschläge handeln, seiner zeitlichen Verteilung, der Sonneneinstrahlung, der Temperatur und anderer Faktoren. Klimaabhängige Wirkungen von Bodenorganismen, Veränderungen der Artenzusammensetzungen, der Aktivität einzelner Populationen und Adaptionsprozesse des Zusammenlebens von unterschiedlichen Organismen müssen ebenfalls berücksichtigt werden.

Der Nachweis einer Abhängigkeit der Reaktionstypen vom Klima liefert daher nur unbefriedigende Hinweise auf die Kausalität der festgestellten Phänomene. Gleiches gilt für den Einfluss der Vegetation und Bodennutzung. Diese Faktoren können Wirkungen von Pflanzen auf Bodenorganismen widerspiegeln, eine veränderte Qualität von Rückständen, Einflüsse einer divergierenden Bodenlockerung durch Organismen oder die Bodenbearbeitung, Düngungseffekte etc..

Leider sind keine Verfahren bekannt, die eine vollständige Erfassung der Bodenorganismen und ihrer physiologischen Wirkungen im Ökosystem oder die Bodenbildung ermöglichen oder Wirkungen chemisch identifizierbarer Komponenten auf biologische Abbauprozesse durch Organismengemeinschaften vollständig beschreiben. Im Gegenteil, selbst Analysen einzelner Arten und Populationen und ihrer Anpassungsreaktionen liefern meist keine verwertbaren Rückschlüsse auf das Verhalten komplexer Ökosysteme (97).

Um dennoch Ursachen der festgestellten Reaktionstypen einzugrenzen, wurden zusätzliche Inkubationsexperimente durchgeführt. Sie beinhalteten die Prüfung von Feuchte- und Temperaturänderungen auf die Häufigkeitsverteilung der Inkubationsergebnisse und den Reaktionstyp bei Glucoseapplikation (126).

Dazu wurden die Proben ohne Glucoseapplikation bei unterschiedlichen Temperaturen inkubiert, anschließend luftgetrocknet, nochmals befeuchtet und inkubiert, wieder luftgetrocknet und anschließend mit einer Glucoselösung nochmals befeuchtet und inkubiert. Die dabei erhaltenen Ergebnisse wurden mit gleicher Methodik wie oben dargestellt ausgewertet. Es ergaben sich folgende Aussagen (125, 126):

- Unterschiedliche Temperaturen haben keinen Einfluss auf den Reaktionstyp. Die Temperatur bestimmt lediglich die Höhe der CO₂-Freisetzung. Veränderungen bei der Dynamik der Bodenatmung waren - in Übereinstimmung mit Experimenten aus der Literatur - mit konstant feuchten Proben nicht nachweisbar.
- Dies trifft auch auf die Atmungsrate nach Frostperioden zu. Letztere verändern die Atmungsrate, bleiben aber ebenfalls ohne Einfluss auf die Dynamik der Bodenatmung und induzieren keine zweigipfeligen Häufigkeitsverteilungen der Ergebnisse.
- Wiederholte Inkubation und Wiederbefeuchtung reduzieren den Anteil an umsetzbarer Substanz und die Höhe der CO₂-Freisetzung. Unterschiede in der Dynamik der Bodenatmung waren vorhanden, jedoch statistisch kaum noch sicherbar.
- Der Anfangsanstieg der Bodenatmung bei Proben mit Reaktionstyp B wurde durch mehrfache Zwischentrocknung beschleunigt.
- Reduzierte Gehalte an umsetzbarer Substanz stehen dem Nachweis einer divergierenden Dynamik der Bodenatmung nach Wiederbefeuchtung entgegen.

Der letzten Aussage kommt eine wichtige methodische Bedeutung zu. So verschwinden die Nachweismöglichkeiten für unterschiedliche Reaktionstypen durch Inkubation, wenn eine fortschreitende Inkubation den Gehalt an umsetzbaren Komponenten zu stark reduziert. Unter diesen Bedingungen ist eine Trennung der Maxima in Abb. 28 (S. 51) nicht mehr möglich.

Dieser Effekt ließ sich durch Auswertung der Bodenatmung mehrfach inkubierter Proben nachweisen und durch Applikation von Glucose wieder rückgängig machen.

Bei mehrfacher Inkubation und Zwischentrocknung verändert sich jedoch gleichzeitig die Geschwindigkeit der Reaktion auf Glucose bei Proben mit Reaktionstyp B, so dass zur Darstellung des Reaktionstyps veränderte Zeitpunkte seit Inkubationsbeginn berücksichtigt werden müssen.

Abb. 34 zeigt die Häufigkeitsverteilung eines Respirationsquotienten aus der Bodenatmung nach 15 Stunden zur Bodenatmung nach 12 Stunden bei dreifach luftgetrockneten und über jeweils 30 Tage zweifach inkubierten Proben, die vor dem dritten Experiment mit Glucoselösung wiederbefeuchtet wurden. Zu erkennen sind zwei deutlich

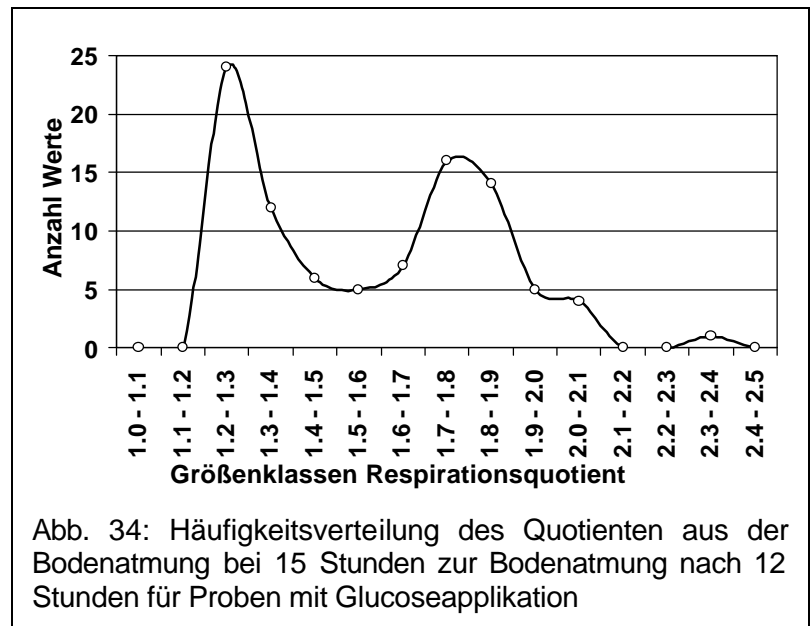


Abb. 34: Häufigkeitsverteilung des Quotienten aus der Bodenatmung bei 15 Stunden zur Bodenatmung nach 12 Stunden für Proben mit Glucoseapplikation

voneinander getrennte Maxima mit gleichen Zuordnungsmöglichkeiten der Proben, wie oben beschrieben (Irrtumswahrscheinlichkeit < 5 %). Wurde hingegen der gleiche Respirationsquotient, wie in Abb. 28 (S. 51) verwendet, bestand keine Möglichkeit für eine Unterteilung der Proben nach ihrer Atmungs dynamik.

6.2.10. Diskussion

Die hier dargestellten Ergebnisse zur Bodenatmung gehen mit Literaturergebnissen weitgehend konform. Dies betrifft:

- die Höhe der Bodenatmung
- ihre Abhängigkeit von der Temperatur, einschließlich Frostwirkungen (126)
- die Erfassung biologisch umsetzbarer Komponenten
- Beziehungen der Bodenatmung zu Standortbedingungen und zur Bodennutzung
- jahreszeitliche Variationen
- die Dynamik der CO₂-Freisetzung bei gleichmäßiger Bodenfeuchte

und andere.

Unterschiede zu Literaturergebnissen ergaben sich vor allem durch Untersuchungen der Atmungsdynamik nach Wiederbefeuchtung. Hier zeigten sich eindeutige Zuordnungsmöglichkeiten eines divergierenden Anfangsanstiegs der CO₂ - Freisetzung zum Klima, zur Bodengene-
nese, Vegetation und Bodennutzung, die in der Literatur bisher nicht beschrieben wurden.

Als Ursache des Phänomens wurden zunächst Bodeneigenschaften, wie z.B. der pH-Wert vermutet, weil in der Literatur geringe pH-Werte als Ursache geringer Umsatzraten beschrieben werden. Diese These ließ sich jedoch nicht bestätigen. Bei Böden mit niedrigem pH – Wert finden sich lediglich tendenzielle Häufungen mit einem langsamen Anstieg der Bodenatmung, keine signifikanten Zuordnungsmöglichkeiten. Gleiche Argumente sprechen gegen eine Abhängigkeit der Reaktionstypen von anderen Bodeneigenschaften (C-, N-, Karbonatgehalt, KAK, Nitratkonzentration etc.) und von Ausgangssubstraten der Bodenbildung (z.B. Tongehalt).

Gegen eine kausale Abhängigkeit der Reaktionstypen vom pH-Wert spricht zudem das Verschwinden der festgestellten Korrelationen zwischen Bodenatmung und pH-Wert mit zunehmender Inkubationsdauer. Dies läßt sich mit einer Adaption der Bodenorganismen an niedrige pH-Werte erklären (Vermehrung azidophiler Organismen) und geht mit dem heutigen Verständnis der evolutiven Entwicklung von Organismen konform. Gleiche Argumente widersprechen aber der verbreiteten Annahme eines kausalen Zusammenhangs zwischen pH-Wert und Akkumulation organischer Rückstände bzw. einer durch niedrige pH-Werte reduzierten Abbaubarkeit organischer Substanzen, die aus Korrelationen abgeleitet wurde.

Desweiteren sind die Reaktionstypen - im Gegensatz zu Beziehungen zwischen pH und Dynamik der Bodenatmung - auch nach mehrfachen Zwischentrocknungen reproduzierbar (s. Abschnitt 6.2.9., S. 57). Dies bedeutet:

- a) entweder wird die Adaption der Bodenorganismen durch die Trocknung in charakteristischer Weise gestört. In diesem Fall sind nicht die pH-Werte Ursache der Reaktionstypen, sondern physiologische Eigenschaften der Bodenorganismen (z.B. begrenzte Trockenresistenz azidophiler Zersetzergemeinschaften). Dies würde bedeuten, dass niedrige pH-Wert nicht Ursache, sondern Folge der biologischen Transformation organischer Rückstände in Böden sind und eine häufige, aber nicht ursächliche Begleiterscheinung des Reaktionstyps B darstellen. (vergl. Anhang: Thesen zum Wirkungsprinzip der Humusstoffe).
- b) die Ursachen der Reaktionstypen sind nicht an die Zusammensetzung der Bodenorganismen, sondern an andere bisher unbekannte Ursachen gebunden.

Beide Erklärungsmöglichkeiten sind aus heutiger Sicht unbefriedigend.

Zusammensetzungen der Bodenorganismen werden in der Literatur häufig als Ursache einer unterschiedlichen Dynamik der Bodenatmung genannt. Tatsächlich finden sich in Böden unter Wald und insbesondere in organischen Auflagen höhere Gehalte an Pilzen, die sich bekanntermaßen durch geringe Trockenresistenz im Vergleich zu Bakterien auszeichnen (12, 133, 49). Dies könnte eine langsamere Reaktion der Bodenatmung auf Wiederbefeuchtung erklären, weil für eine hohe CO₂-Freisetzung die Regeneration der ursprünglichen Biomasse erfordert. Allerdings wurden in den meisten Studien zu Artenzusammensetzungen keine Böden unter Wald aus humiden und ariden Klimaten verglichen und / oder keine Standorte mit natürlicher Vegetation einbezogen. Zudem ist eine dauerhafte Dominanz von Pilzen in Waldinseln der Steppen (meist Forste bzw. Windschutzstreifen) und Waldsteppen allein wegen ihrer Empfindlichkeit gegenüber pH-Werten über 7 und der häufigen Austrocknung eher unwahrscheinlich. Dennoch zeigen auch solche Böden bisher immer eindeutig einen Reaktionstyp B. Gegen eine Interpretation der Bodenorganismen als Ursache der Reaktionstypen spricht die hohe zeitliche Stabilität der Reaktionstypen. Im Gegensatz zur Bodenbiomasse ließ sich keine Abhängigkeit der Reaktionstypen von Jahreszeiten, mehrfachen Zwischentrocknungen, der Temperatur, der Verfügbarkeit umsetzbarer Bestandteile, Ausgangssubstraten der Bodenbildung, Klimazonen etc. nachweisen, obwohl diese Faktoren die Entwicklung der Bodenbiomasse, die Artenzusammensetzung und Aktivität einzelner Organismenpopulationen nachweislich beeinflussen.

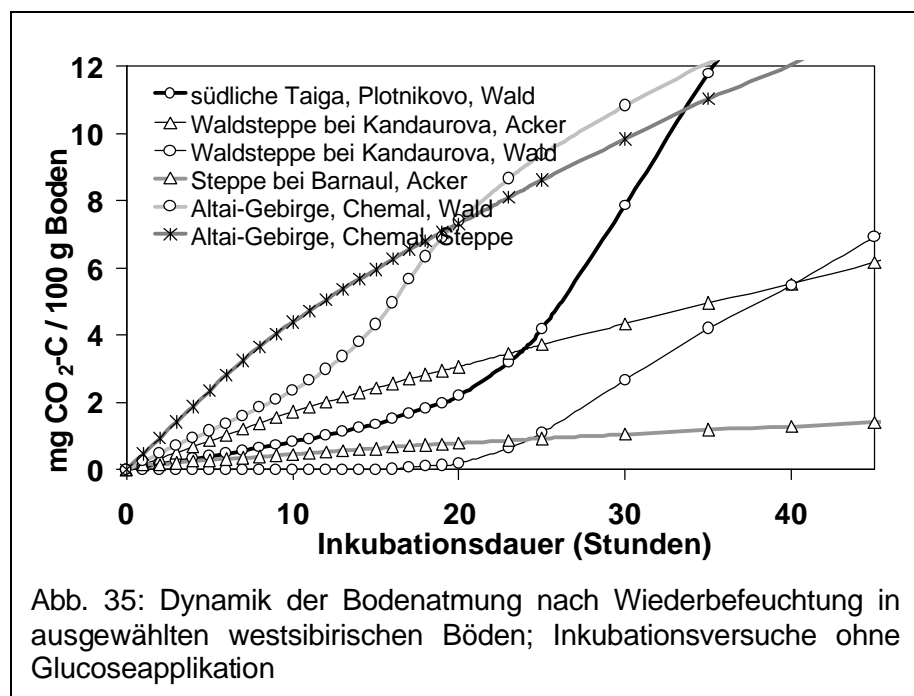
Gleiche Argumente stehen einer Begründung des Reaktionstyps mit Unterschieden bei organischen Rückständen entgegen. Die Menge an umsetzbarer Substanz zeigte weder beim Vergleich der Böden noch bei Modellexperimenten mit applizierter Glucose einen eindeutigen Zusammenhang zum Anfangsanstieg der Bodenatmung nach Wiederbefeuchtung. Die Unabhängigkeit des Reaktionstyps von der Glucoseapplikation verweist darüber hinaus auf eine weitgehende Unabhängigkeit von der Qualität der Rückstände. Diese wurde in den analysierten Proben zwar nicht bestimmt, jedoch durch die Glucoseapplikation modifiziert, ohne dass sich Auswirkungen auf den Reaktionstyp ergaben.

Die Unabhängigkeit der Reaktionstypen von variablen Umweltfaktoren verweist auf einen Zusammenhang zu langfristigen Bodenbildungsprozessen. Diese Annahme wird durch Änderungen des Reaktionstyps bei langjährigem Ackerbau bestätigt. Auch die fehlenden Zuordnungsmöglichkeiten von Proben mit gestörter oder veränderter Bodenbildung zu einem der beiden Reaktionstypen gehen mit einer solchen These konform. So war Probe 23 (Aufschüttung von B₁-Material unter Wald) keinem der beiden Reaktionstypen eindeutig zuzuordnen.

Sukzessionsflächen zeigten ebenfalls Hinweise auf eine Kombination aus Merkmalen beider Reaktionstypen, d.h. eine schwache (nichtsignifikante) Sofortreaktion und eine intensive (signifikante) späte Reaktion auf Wiederbefeuchtung (Probe 24,) oder einen starken Anstieg der Anfangsbodenatmung und eine schwache nochmalige Reaktion nach 25 Stunden (Probe 25). Demnach könnte der organischen Bodensubstanz und insbesondere den stabilen Humusstoffen eine gewisse Bedeutung bei der Ausbildung von Reaktionstypen zukommen.

Zu berücksichtigen sind in diesem Zusammenhang Untersuchungen mit extrahierten Humusstoffen (Fulvosäuren und Huminsäuren) aus einer Schwarzerde aus dem Statistischen Versuch Bad Lauchstädt (Sachsen-Anhalt) und einem Podsoluvisol (Rasenpodsol der Feldversuchstation der Timirjasew - Akademie in Moskau). Sie wurden in Quarzsand eingemischt, auf optimalen Wassergehalt befeuchtet und inkubiert. Die Befeuchtung erfolgte mit Bodenlösung, die aus einem Gemisch aller untersuchten Bodenvarianten hergestellt wurde, um eine gleiche Zusammensetzung der Mikroorganismenpopulationen zu gewährleisten. Bei der Auswertung der Inkubationsergebnisse stellte sich heraus, dass die Dynamik der CO₂-Freisetzung gleiche Unterschiede zeigt, wie bei den hier vorgestellten Experimenten. Obwohl gleiche Zusammensetzungen der Bodenorganismen vorlagen, zeichnen sich die Humussäuren der Schwarzerde durch eine schnellere Umsatzdynamik im Vergleich zu den Humussäuren des Podsoluvisols aus. Signifikante Unterschiede im Gehalt an umsetzbaren Komponenten bestanden zwischen beiden Böden nicht, jedoch war - wie in der Literatur - der Anteil umsetzbarer Komponenten in den Fulvosäuren beider Böden größer als in Huminsäuren (120, 121).

Bestätigt wird eine wahrscheinliche Bindung der Reaktionstypen an überregional einheitliche Merkmale der Bodengeneses auch durch Untersuchungen an 85 Böden aus einem Transekt quer durch die Klimazonen Westsibiriens von der Tundra bis zur Steppe.



Ungeachtet der großen räumlichen Entfernung von den verwendeten Standardproben, extremer Klimaunterschiede, unterschiedlicher Vegetationsgesellschaften und einer vermutlich ebenso variablen Zusammensetzung von Bodenorganismen sowie divergierender Ausgangssubstrate der Bodenbildung konnten gleiche Unterschiede in der Dynamik der CO₂-Freisetzung nach Wiederbefeuchtung zweifelsfrei nachgewiesen werden. Abb. 35 zeigt dazu Beispiele. Sie bestätigen gleiche (signifikante) Zuordnungsmöglichkeiten der Böden unter Wald aus dem humiden Klima zum Reaktionstyp B (langsamer Anstieg der Bodenatmung) sowie von Ackerböden und Böden aus dem ariden Klima unter Steppenvegetation zum Reaktionstyp A (schneller Anstieg der Bodenatmung, s. Tabelle 3, S. 53).

Diese Zuordnungsmöglichkeiten waren auch hier unabhängig von der absoluten Höhe der Bodenatmung, d.h. Böden mit langsamer Reaktion zeigten teilweise höhere absolute Umsatzraten als Böden mit schneller Reaktion auf die Wiederbefeuchtung (z.B. bei Vergleich von Böden unter natürlicher Waldvegetation mit Böden unter Ackernutzung).

Die Bedeutung einer Wiederbefeuchtung für die Reaktionstypen scheint eindeutig, da in der Literatur und auch hier bei konstanter Feuchte keine analogen Phänomene beobachtet werden konnten.

Desweiteren ist der Grad der Wechselfeuchte offenbar auch unter Feldbedingungen ein prägender Faktor für den Reaktionstyp. Eine gleiche Frequenz der Feuchteänderungen bei allen Proben während der Inkubationsversuche führte - wie bereits erwähnt - zu einer Verkürzung der Reaktionszeiten auf die Glucose bei Proben mit Reaktionstyp B, d.h. zu einem Ausgleich der früheren Prägung.

Diese Aspekte gehen mit dem vermuteten Einfluss des ökosystemaren Wasserhaushalts auf Adaptionsprozesse der Organismen und vom Wasserhaushalt abhängige Rückwirkungen der OBS auf mikrobielle Umsatzprozesse konform (siehe Abschnitt 4, S. 7).

Den Reaktionstypen wird daher im Zusammenhang mit Untersuchungen zu Stoffkreisläufen und Wirkungen potentieller Klimaänderungen eine große Bedeutung beigemessen. Im Gegensatz zu bisherigen Parametern bodenbiologischer Prozesse fanden sich keine Beziehungen des Respirationsquotienten zum C-Gehalt und anderen Bodeneigenschaften.

Die Reaktionstypen sind demnach nicht von den kritischen Anmerkungen zur Aussagefähigkeit heutiger Kenngrößen biologischer Prozesse in Böden betroffen (100). Im Gegenteil, sie verbinden aktuelle Prozesse der biologischen Transformation von organischen Rückständen mit langfristigen Aspekten der Bodenbildung. Eine Aufklärung der kausalen Ursachen der

Reaktionstypen scheint daher zweckmäßig. Im Abschnitt 6.3. (S. 65) werden weitere Aspekte und plausible Erklärungskonzepte beschrieben.

6.2.11. Zusammenfassung

Die Einbeziehung der Wiederbefeuchtung lufttrockener Bodenproben in Studien zur Bodenatmung bestätigte zahlreiche bekannte Abhängigkeiten und Einflussfaktoren. Über bekannte Zusammenhänge hinaus ermöglichte sie den Nachweis eines unterschiedlichen Adaptionsverhaltens der Bodenatmung bei Feuchteänderungen. Böden humider und semiarider Klimate unter Wald reagieren mit einem langsameren Anstieg der Bodenatmung nach Wiederbefeuchtung. Im Unterschied dazu ist für Böden arider Gebiete unter Steppenvegetation und für Böden beliebiger Klimaregionen unter Ackerbau ein schneller Anstieg der Bodenatmung charakteristisch. Diese Unterschiede werden durch Applikation von Glucose verstärkt.

Die kausalen Ursachen dieses Phänomens sind nicht bekannt. Bisher durchgeführte Untersuchungen zeigen, dass keine Abhängigkeit von Bodeneigenschaften, der Temperatur und Menge umsetzbarer Substanzen besteht. Desweiteren ist ein Zusammenhang zur Artenzusammensetzung der Bodenorganismen und zur Menge und Qualität organischer Rückstände unwahrscheinlich. Die eindeutige Abhängigkeit der Reaktionstypen von der Wiederbefeuchtung, ihre Unabhängigkeit von Probenahmeterminen und von anderen Faktoren sowie insbesondere Experimente mit extrahierten Humusstoffen und gleichen Organismenpopulationen weisen auf eine Schlüsselbedeutung bodengenetischer Prozesse hin, die sich in Eigenschaften humifizierter Komponenten manifestieren. Die Vermutung eines Zusammenhangs zwischen ökosystemaren Wasserhaushalt, humifizierten Komponenten und der Spezifik biologischer Umsatzprozesse könnte demnach richtig sein.

Weiterführende Experimente müssen zeigen, inwieweit Humusstoffe bei der Ausbildung der Reaktionstypen von Bedeutung sind, welche Bedeutung der Menge gebundenen Wassers zukommt und welche Mechanismen den Anfangsanstieg der Bodenatmung nach Feuchteänderungen bestimmen.

6.2.12. Schlussfolgerungen

(a) Feuchteänderungen von Böden sind ein wichtiger Einflussfaktor auf biologische Umsatzprozesse. Das Verschwinden von Zusammenhängen zwischen dem pH-Wert und der Bodenatmung bei konstanter Feuchte (s. Abb. 31, S. 55 und Abb. 30, S. 55) bestätigt eine

bisher unterschätzte Bedeutung von Feuchteänderungen in Ökosystemen für die Dynamik biologischer Umsatzprozesse organischer Substanzen.

- (b) Bei Wiederbefeuchtung entwickelt sich die Bodenatmung unterschiedlich. Böden arider Klimate und Böden unter Ackerbau zeigen einen schnellen Anfangsanstieg der Bodenatmung, während die Bodenatmung humider Böden unter Wald durch einen langsamen Anfangsanstieg gekennzeichnet ist.
- (c) Diese als Reaktionstyp gekennzeichnete Verhaltensweise stellt einen ersten, experimentell reproduzierbaren Hinweis auf überregional gültige Zusammenhänge zwischen Merkmalen kurzfristiger biologischer Prozesse und der Bodengenese dar.
- (d) Ursachen und Wirkungsmechanismen des unterschiedlichen Verhaltens der Bodenatmung nach Wiederbefeuchtung sind ungeklärt.

6.3. Beziehungen zwischen biologischer und thermischer Stabilität

Die im Abschnitt 6.1. (S. 20) vorgestellten Untersuchungen dokumentieren Möglichkeiten einer thermogravimetrischen Kennzeichnung der organischen Bodensubstanz. Sie zeigen, dass dabei die Menge gebundenen Wassers zu berücksichtigen ist. Die durchgeführten Inkubationsexperimente verweisen auf Feuchteänderungen als Ursache von Unterschieden bei der Dynamik der Bodenatmung unterschiedlicher Böden.

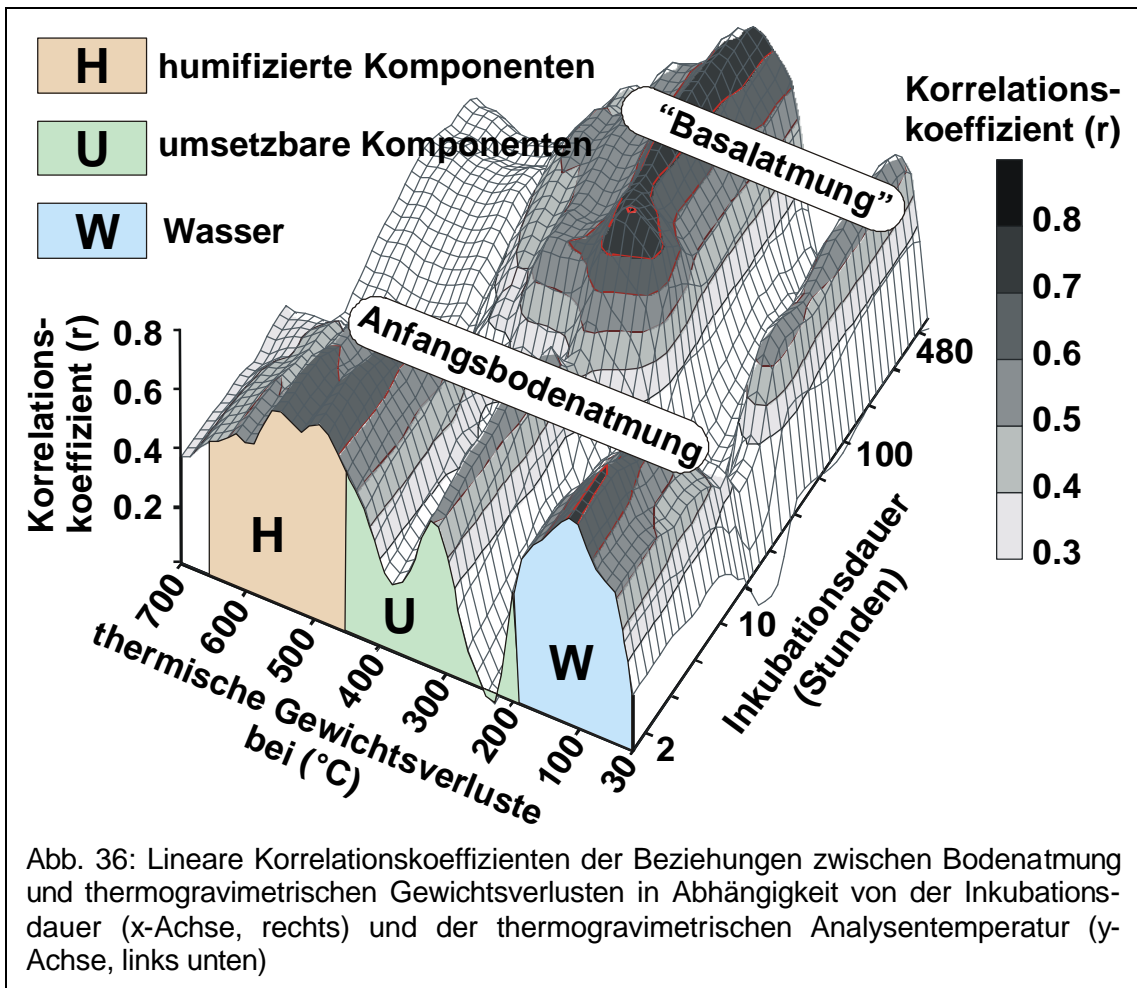
Vor diesem Hintergrund stellte sich die Frage nach möglichen Zusammenhängen zwischen thermogravimetrisch quantifizierbaren Komponenten der OBS und ihrem biologischen Umsatzverhalten. Dazu werden hier Beziehungen zwischen den Ergebnissen beider Methoden analysiert.

6.3.1. Ergebnisse

Abb. 36 (S. 66) enthält eine Gegenüberstellung der thermogravimetrischen Gewichtsverluste (GV) mit der CO₂-Freisetzung. Sie beschreibt die Enge der Beziehungen zwischen den Ergebnissen beider Methoden an Hand linearer Korrelationskoeffizienten in Abhängigkeit von der thermischen Analysentemperatur und der Inkubationsdauer.

Für die Erstellung der Grafik wurden mehrere Tausend Korrelationskoeffizienten berücksichtigt, die für Beziehungen der thermischen GV in 10°C-Schritten (GV im TI 30-40°C, 40-50°C, ...940-950°C) zur CO₂-Freisetzung in 1-Stunden Schritten (CO₂-Freisetzung nach 2, 3, 4,...480 Stunden) errechnet wurden.

Zur Verdeutlichung von Zuordnungsmöglichkeiten thermogravimetrisch identifizierbarer Komponenten wurden bisher verwendete Temperaturbereiche (TB) farblich und mit "H" für humifizierte Komponenten, "U" für umsetzbare Substanz und "W" für Wasser markiert. Die Zeitskala der Inkubationsexperimente wurde logarithmisch dargestellt, um Veränderungen der Bodenatmung nach Wiederbefeuchtung besser erkennen zu können. Durch diese Darstellung läßt sich die Bedeutung der OBS-Komponenten für die relativ kurze Anfangsphase der CO₂-Freisetzung nach Wiederbefeuchtung besser analysieren.



Bei der Interpretation der Abbildung ist jedoch zu berücksichtigen, dass die mit "Anfangsbodenatmung" gekennzeichnete Phase der Inkubation nur 2 % der Inkubationsdauer (10 von 480 Stunden) und 5 % der summaren CO₂-Freisetzung beschreibt (s. Abb. 37). In Abb. 36 sind hingegen der Anfangsbodenatmung durch die logarithmische Darstellung ca. 50 % der x-Achse zugeordnet. Angaben zur mittleren Höhe der thermischen GV gehen aus der DTG - Kurve in Abb. 3 (s. 20) hervor, die der Bodenatmung aus Abb. 18 (S. 44).

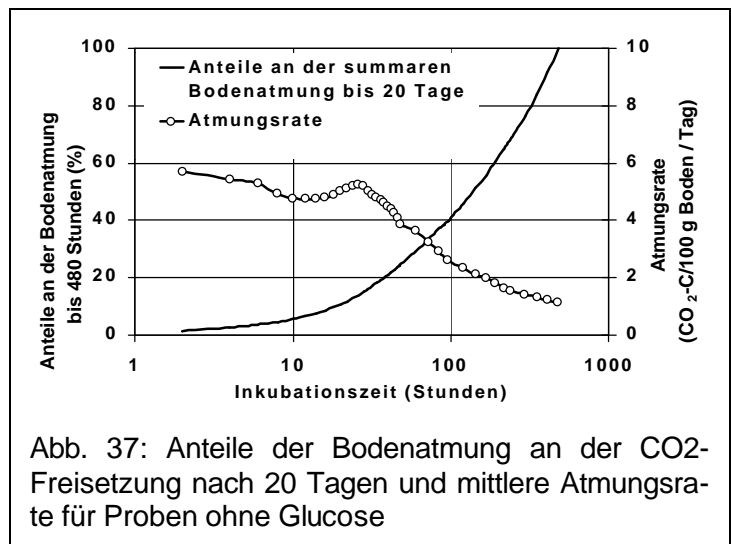


Abb. 37: Anteile der Bodenatmung an der CO₂-Freisetzung nach 20 Tagen und mittlere Atmungsrate für Proben ohne Glucose

Abhängigkeiten der Anfangsbodenatmung

Zum Inkubationsbeginn zeigen sich in der Abb. 36 signifikante Beziehungen der Bodenatmung zur Menge gebundenen Wassers, umsetzbaren Komponenten und Humusstoffen. Die Beziehungen zu den einzelnen Komponenten sind unterschiedlich stark ausgeprägt.

Die engsten Beziehungen finden sich mit einem Korrelationskoeffizienten von 0.72 zwischen der CO₂-Freisetzung nach 2 Stunden und den Gewichtsverlusten (GV) gebundenen Wassers im Temperaturintervall (TI) 100-130°C. Demnach sind ca. 50 % der Unterschiede bei der Anfangsbodenatmung mit Variationen der Menge gebundenen Wassers erklärbar. Die Enge dieser Beziehungen wird mit zunehmender Inkubationsdauer kleiner.

Den Humusstoffen kommt für die Anfangsbodenatmung eine analoge Bedeutung zu. Ihre Bedeutung sinkt mit steigender Inkubationsdauer ebenfalls.

Die Menge biologisch umsetzbarer Komponenten korreliert wider Erwarten mit der Anfangsbodenatmung relativ schwach. Ein Einfluss ist zwar statistisch nachweisbar, bleibt aber auf ein sehr schmales Temperaturintervall (TI) begrenzt. Die größten Bestimmtheitsmaße wurden für die Beziehung der GV im TI 320-330°C zur CO₂-Freisetzung nach 10 Stunden ermittelt. Sie erreichen lediglich Werte um $B = 0.35$.

Mit fortschreitender Inkubationsdauer ändern sich alle Beziehungen zwischen thermischen GV und der biologischen CO₂ - Freisetzung. Alle Korrelationskoeffizienten sinken bei 20 Stunden unter die Signifikanzgrenze ($r = 0.3$) und steigen dann aber wieder an. Die sich

nunmehr einstellenden Abhängigkeiten bleiben über den gesamten folgenden Beobachtungszeitraum relativ konstant. Diese Veränderungen waren ausschlaggebend für die Zuordnung der CO₂-Freisetzung nach über 60 Stunden zur "Basalbodenatmung".

Beziehungen der Basalbodenatmung zu thermischen Gewichtsverlusten (GV)

Schon nach ca. 40 Inkubationsstunden läßt sich in Abb. 36 eine deutliche Abhängigkeit der Bodenatmung von den GV im TB B erkennen, d.h. die Bedeutung biologisch umsetzbarer Komponenten nimmt deutlich zu. Die Korrelationskoeffizienten erreichen ein Niveau von ca. 0.81 (B = 0.65).

Die Höhe der Korrelationskoeffizienten innerhalb des TB B ist von der thermischen Analysentemperatur abhängig. Abb. 38 verdeutlicht dies an einem Ausschnitt aus Abb. 36 bei 410 Inkubationsstunden.

Zum Beginn des TB B sind die Beziehungen zur Bodenatmung nicht signifikant, werden dann enger und erreichen bei ca. 300 °C ein Maximum um 0.8. Oberhalb von 300 °C wird die Enge der Beziehungen wieder schwächer und fällt zum Beginn des TB C unter die Signifikanzgrenze. Die Höhe der Korrelationskoeffizienten spiegelt also in etwa die Größe der Gewichtsverluste wider (vergl. Abb. 3, 20), d.h. Komponenten mit hohen GV induzieren die engsten Beziehungen zur Bodenatmung.

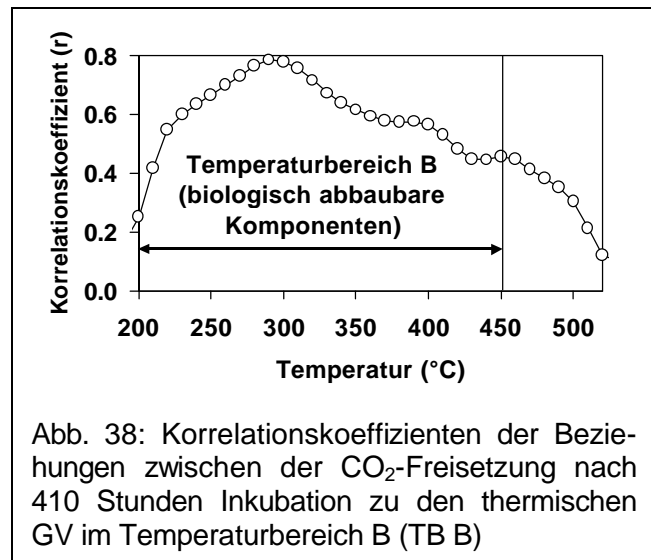
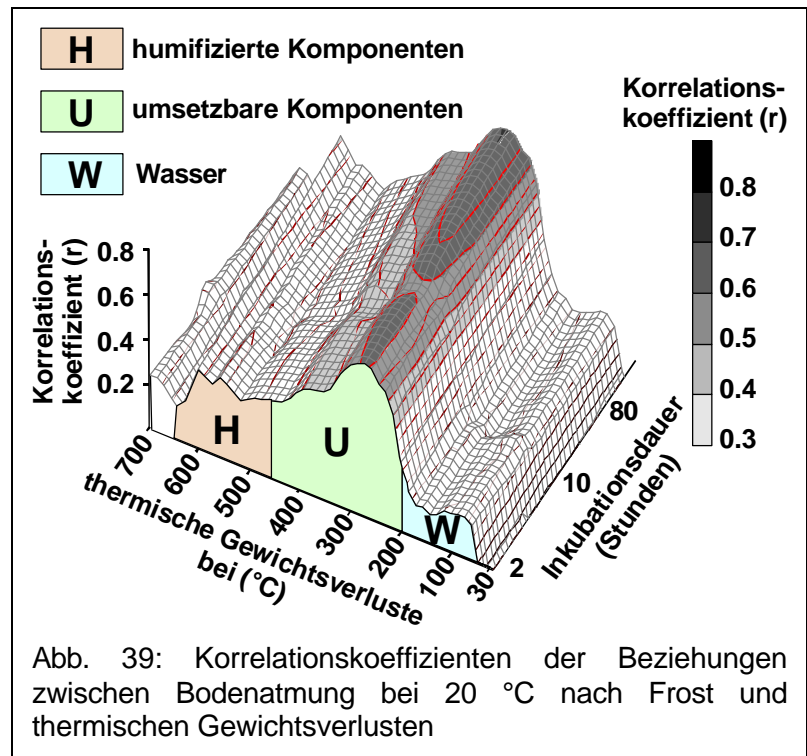


Abb. 38: Korrelationskoeffizienten der Beziehungen zwischen der CO₂-Freisetzung nach 410 Stunden Inkubation zu den thermischen GV im Temperaturbereich B (TB B)

Mit zunehmender Inkubationsdauer verändern sich auch die Beziehungen der Bodenatmung zu den GV in anderen Temperaturbereichen in Abb. 36. Die Beziehungen zur Menge gebundenen Wassers werden nach einem Minimum bei 20 - 30 Inkubationsstunden wieder enger. Die höchsten Korrelationskoeffizienten fanden sich zwischen der Bodenatmung bei 410 Inkubationsstunden und den GV im TI 50-60°C mit einem Bestimmtheitsmaß von 0.32 ($r = 0.57$). Es korrelieren somit nur die GV unterhalb von 100 °C signifikant mit der Basalbodenatmung, während die GV oberhalb von 100 °C signifikante Beziehungen zur Anfangsbodenatmung zeigen ($r < 0.1$, vergl. Ausführungen im Abschnitt 6.1.4.2., S. 33)

Ergebnisse weiterführender Experimente

Modifikationen der Inkubationstemperatur beeinflussen die Höhe der Bodenatmung und die Regressionsparameter der Beziehungen zwischen thermischen GV und Bodenatmung. Die Enge der Beziehungen wird jedoch nicht verändert. Dies geht aus den Ergebnissen der Abb. 39 hervor. Sie dokumentiert die Enge der Beziehungen zwischen thermischen GV und der Bodenatmung bei 20 °C nach 2 Ta-



gen bei ca. -15 °C. Analoge Abbildungen ergaben sich bei Variationen der Inkubationstemperatur zwischen 5 und 30 °C.

Signifikante Änderungen bei der Enge von Beziehungen zwischen Bodenatmung und thermischen GV waren nicht nachweisbar, obwohl sich die CO₂-Freisetzungsrates bei allen Proben durch Temperaturunterschiede veränderte (hier nicht dargestellt, s. 126). Die Korrelationskoeffizienten für Beziehungen der Menge gebundenen Wassers (GV im TB A) und der humifizierten OBS-Komponenten (GV im TB C) zur Bodenatmung blieben unterhalb der Signifikanzgrenze.

Eine wiederholte Trocknung und Wiederbefeuchtung der Proben unter gleichen Versuchsbedingungen induzierte im Unterschied dazu eine gleiche Struktur und zeitliche Dynamik der Korrelationskoeffizienten, wie in Abb. 36 (S. 66) dargestellt: Unmittelbar nach der Wiederbefeuchtung korrelierte die Bodenatmung mit GV humifizierter Komponenten und dem gebundenen Wasser ($TI > 100^\circ\text{C}$). Nach ca. 30 Stunden Inkubation dominieren Beziehungen der Bodenatmung zu den GV im TB B (umsetzbare Komponenten) und zur Menge gebundenen Wassers ($TI < 100^\circ\text{C}$!). Mit jedem Zyklus von Trocknung, Wiederbefeuchtung und Inkubation sank jedoch die Höhe der maximalen Korrelationskoeffizienten von ca. 0.8 (s. Abb. 36) auf max. 0.6.

Eine Applikation von Glucose statt Wasser zu den dreifach getrockneten, doppelt wiederbefeuchteten und zweifach über 35 Tage inkubierten Proben bei einem dritten Inkubationsversuch führte hingegen zu einem signifikanten Anstieg der Korrelationskoeffizienten auf 0.9. Dieser Anstieg betraf ausschließlich die Beziehungen der Anfangsbodenatmung zu den GV in den TB A und C. Der Einfluss der Glucose dauerte höchstens 30 Stunden und blieb auf Korrelationen der Bodenatmung zu den GV im TB A und C begrenzt. Eine Glucosewirkung auf Beziehungen der Basalbodenatmung zu den GV im TB B war nicht nachweisbar.

Bei analogen Untersuchungen zu Proben aus einem Transekt durch Westsibirien fanden sich ähnliche Ergebnisse. Abb. 41 zeigt die Veränderungen gegenseitiger Abhängigkeiten zwischen thermischen GV und der Bodenatmung mit zunehmender Inkubationsdauer analog zu Abb. 36. Unmittelbar nach der Wiederbefeuchtung dominieren Korrelationen der Bodenatmung zu den GV der TB A und C. Im Unterschied zu

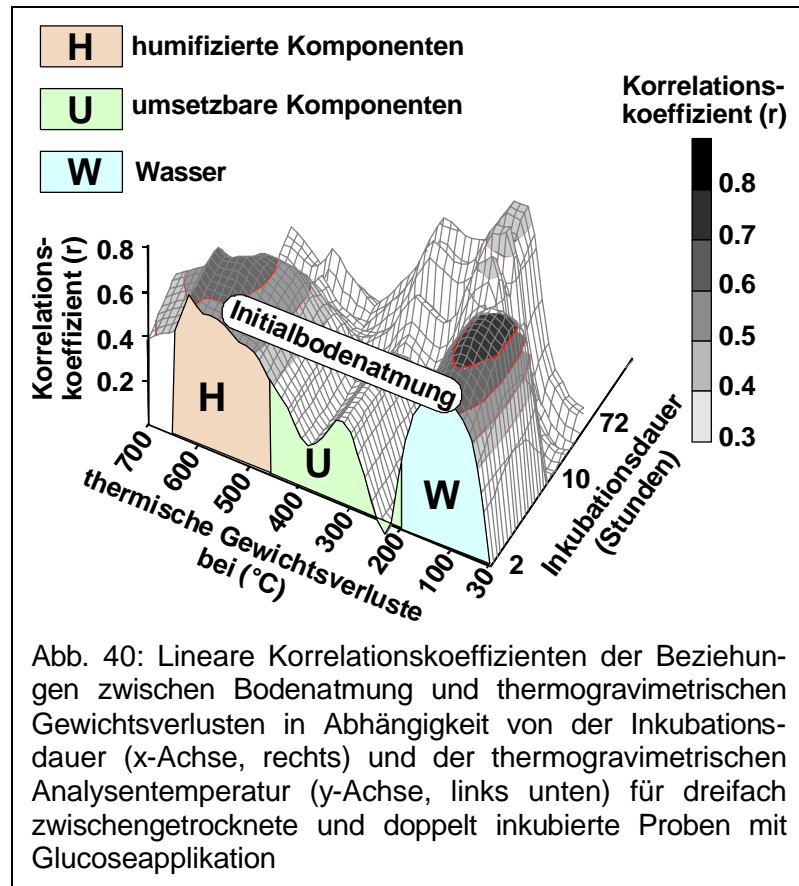


Abb. 40: Lineare Korrelationskoeffizienten der Beziehungen zwischen Bodenatmung und thermogravimetrischen Gewichtsverlusten in Abhängigkeit von der Inkubationsdauer (x-Achse, rechts) und der thermogravimetrischen Analysentemperatur (y-Achse, links unten) für dreifach zwischengetrocknete und doppelt inkubierte Proben mit Glucoseapplikation

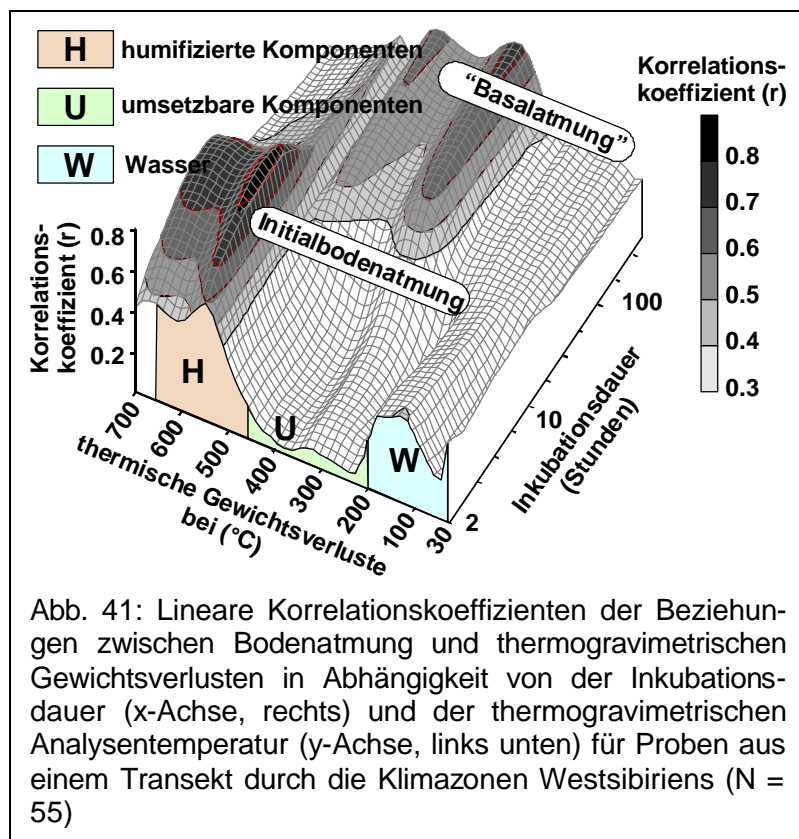


Abb. 41: Lineare Korrelationskoeffizienten der Beziehungen zwischen Bodenatmung und thermogravimetrischen Gewichtsverlusten in Abhängigkeit von der Inkubationsdauer (x-Achse, rechts) und der thermogravimetrischen Analysentemperatur (y-Achse, links unten) für Proben aus einem Transekt durch die Klimazonen Westsibiriens (N = 55)

Abb. 36 (S. 70) ist die Bedeutung der GV im TB B (umsetzbare Komponenten) und der GV im TB A geringer, während die Beziehungen der Bodenatmung zum TB C teilweise enger sind. Nach Ablauf von ca. 30 Inkubationsstunden ist wieder eine Abhängigkeit der Bodenatmung vom TB B (umsetzbare Komponenten) charakteristisch, die sich nicht durch Änderungen der Inkubationstemperatur beeinflussen ließ.

6.3.2. Diskussion

Die Ergebnisse verweisen auf eine Beteiligung thermogravimetrisch quantifizierbarer OBS - Komponenten an biologischen Umsatzprozessen nach Wiederbefeuchtung. Diese Beteiligung ist von der Inkubationsdauer bzw. von der Probenvorbereitung abhängig.

Der größte Teil der gefundenen Beziehungen geht mit verbreiteten Vorstellungen und bekannten Zusammenhängen konform. So spiegeln die Beziehungen zwischen thermischen GV im TB B und der Bodenatmung nach über 30 Stunden erwartungsgemäß eine Abhängigkeit der Bodenatmung von der Menge umsetzbarer Substanzen wider. Proben mit höheren Anteilen biologisch umsetzbarer Komponenten und größeren GV im TB B zeigen generell eine höhere CO₂ - Emission bei Langzeitinkubation unter konstanten Feuchtebedingungen.

Die Konsequenzen des biologischen Abbaus umsetzbare Komponenten während der Inkubation zeigen sich in Unterschieden zwischen thermischen GV inkubierter und nicht inkubierter Proben (124). Diese Ergebnisse belegen die Möglichkeit einer Quantifizierung umsetzbarer Bestandteile der OBS mittels Thermogravimetrie.

Ein Vergleich der Abb. 38 (S. 68) mit der DTG - Kurve in Abb. 3 (S. 20) liefert zusätzliche Hinweise. Die Höhe der Korrelationskoeffizienten im TB B steigt und fällt mit der Höhe der absoluten Höhe der Gewichtsverluste. Umsetzbare Komponenten, die in größeren Mengen vorhanden sind und größere thermische GV hervorrufen, haben demzufolge eine größere Bedeutung für die CO₂-Freisetzung im Inkubationsexperiment.

Im Gegensatz dazu, lassen sich die Beziehungen der Anfangsbodenatmung nach Wiederbefeuchtung zu den GV im TB A nicht mit kausalen Zusammenhängen erklären. Ein biologischer Abbau gebundenen Wassers zu CO₂ ist nicht möglich. Das gebundene Wasser kann folglich die CO₂-Freisetzung nicht erhöhen.

Ähnlich liegen die Verhältnisse bei den Beziehungen der Anfangsbodenatmung zu den GV im TB C. Ein Vergleich der GV inkubierter und nichtinkubierter Bodenproben zeigt, dass sich die GV im TB C durch die Inkubation nicht signifikant verändern (125). Bestätigt werden

diese Ergebnisse durch die hohe Stabilität von Humusstoffen gegenüber biologischem Abbau (107, 150). Eigene Experimente mit extrahierten Humussäuren von mehreren Varianten zweier Böden aus der Taiga und der Waldsteppe (120, 121) bestätigten diesen Aspekt. Folglich kann ein biologischer Abbau von Humusstoffen nicht das Auftreten signifikanter Beziehungen zwischen Bodenatmung und GV im TB C erklären. Dies trifft auch für Experimente mit Glucoseapplikation nach Mehrfachzwischenrocknung zu (Abb. 40, S. 70).

Aus gegenwärtiger Sicht stellt eine Pufferung aktiver mikrobieller Exoenzyme in Humusstoffen die einzige plausible Erklärung für dieses Phänomen dar. Enzyme enthalten bekanntermaßen große Mengen gebundenen Wassers. Sie können eine Umsetzung organischer Verbindungen unabhängig von der Aktivität von Bodenorganismen unmittelbar nach Wiederbefeuchtung von Bodenproben initiieren. Mikrobielle Exoenzyme lassen sich in Humusstoffen nachweisen (4, 51) und können außerhalb von Organismen sehr lange Zeiträume unter extremen Umweltbedingungen im aktiven Zustand überdauern (68). Wird der kolloidale Charakter und die extrem komplexe Struktur der meisten Humusstoffe berücksichtigt (92), sind Änderungen der Wirksamkeit gepufferter Exoenzyme bei Feuchteänderungen (z.B. Wiederbefeuchtung lufttrockener Proben) wahrscheinlich.

Eine Pufferung von Exoenzymen geht mit den theoretischen Überlegungen über eine vom Wasserhaushalt abhängige und erdgeschichtlich geprägte Rückwirkung bodengenetisch akkumulierter Substanzen auf biologische Umsatzprozesse in Ökosystemen bzw. die dafür verantwortliche Evolution der Organismenarten konform (vergl. 122).

Dies wurde nicht geprüft. Vorstellungen über Rückwirkung von Humusstoffen auf Abbauprozesse umsetzbarer Komponenten sind hingegen nicht neu. Bei umfangreichen klassischen Humusuntersuchungen ergaben sich ähnliche Schlussfolgerungen. So war Kleinhempel bereits 1968 (64) überzeugt, dass *"das Wesen der Huminstoffqualität ... in der sorptionsaktiven Oberfläche gelartiger, permeabler und diffensibler Huminstoffbildungen"* besteht. *"Die beste Humusqualität liegt dann vor, wenn einer größeren Menge an... Nichthumusstoffen Schutz vor mikrobiologischer Zersetzung gewährt werden kann..."*. Gepufferte Exoenzyme könnten die kausale Ursache derartiger Wirkungsmechanismen darstellen.

Mit dem Konzept gepufferter mikrobieller Enzymaktivitäten in Humusstoffen lassen sich alle gefundenen Ergebnisse widerspruchsfrei erklären. So erhöht die Inkubation unter Laborbedingungen vermutlich die Konzentration an gepufferten Exoenzymen in der Bodenlösung, denn mit der Aktivität der Organismen steigt die Enzymproduktion. Höhere Enzymkonzentra-

tion fördern eine Diffusion in Humusgele bzw. in das Innere der hochkomplexen Humussäuremoleküle. In Humusstoffen finden Enzyme keine geeigneten Reaktionspartner, weil Humusstoffe wegen ihrer Struktur (und Hydrathüllen?) nur bedingt umsetzbar sind.

Eine schnelle Austrocknung des Bodens nach Phasen hoher biologischer Aktivität müsste – wenn diese Annahme richtig ist – die Menge gepufferter Exoenzyme in der OBS erhöhen. Mit der Menge gepufferter Enzyme sollte auch die Menge gebundenen Wassers (124) steigen, weil Enzyme zu großen Teilen aus Wasser bestehen bzw. hygroscopisch

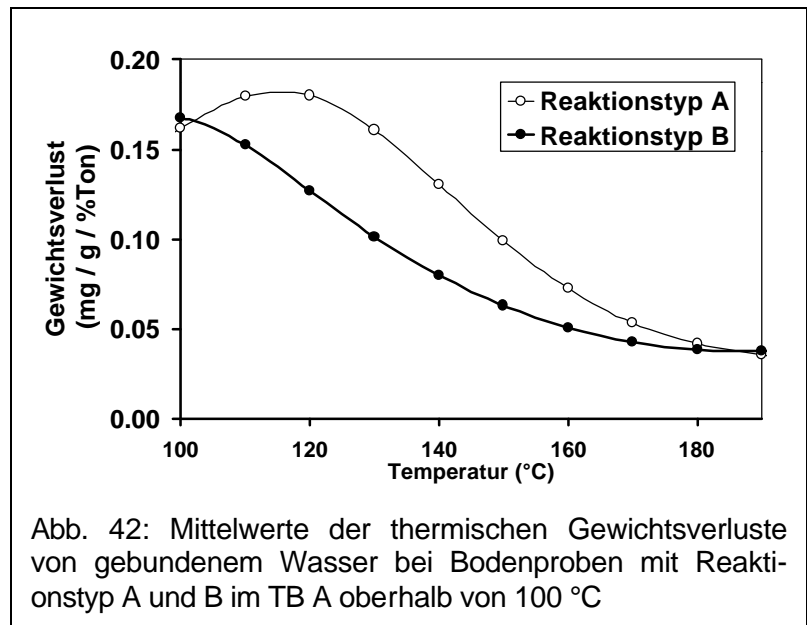


Abb. 42: Mittelwerte der thermischen Gewichtsverluste von gebundenem Wasser bei Bodenproben mit Reaktionstyp A und B im TB A oberhalb von 100 °C

sind. Tatsächlich zeichnen sich Böden mit Reaktionstyp A (Böden aus wechselfeuchten Bedingungen mit hohen Atmungsraten!) durch einen größeren Anteil gebundenen Wassers aus. Dies betrifft nicht nur auf die absoluten Gewichtsverluste, die traditionell als Folge unterschiedlicher Tongehalte interpretiert werden. Auch nach Nivellierung der Unterschiede im Tongehalt zeigt sich stets ein signifikant höherer Gehalt an gebundenem Wasser zwischen Proben mit Reaktionstyp A und B. Abb. 42 verdeutlicht dies. Der Unterschied ist in dem Temperaturbereich gut ausgebildet, der mit Humusstoffen am engsten korreliert (vergl. Ausführungen in den Abschnitten 6.1.3, S. 28 und 6.1.4.2, S. 31).

Auch bei einem Vergleich der thermischen Zerfallsdynamik inkubierter und nicht inkubierter Bodenproben fanden sich in den inkubierten Proben höhere Mengen gebundenen Wassers (124).

Die Lufttrocknung konserviert vermutlich produzierte Exoenzyme in Humusstoffen (vergl. 68). Dabei steigt die Menge gebundenen Wassers. Mit der Wasserzugabe bei Wiederbefeuchtung sollten demnach in Bodenproben die gepufferten Exoenzyme ihre Reaktivität zumindestens teilweise wieder erlangen. Dies könnte die sofortige und sehr große CO₂ - Emission der Proben in wiederbefeuchteten Proben erklären, die offenbar schneller erfolgt, als bekannten Anpassungen von Bodenorganismen an veränderliche Umweltbedingungen.

Eine Beschleunigung des Anfangsanstiegs der Initialbodenatmung bei allen Proben lässt sich auf analoge Weise mit Wirkungen einer häufigen Trocknung im Inkubationsversuch erklären (s. 126, hier nicht dargestellt).

Wirkungen gepufferter Enzyme sind aber nur nachweisbar, wenn bei der Wiederbefeuchtung umsetzbare Substanz in Kontakt mit den gepufferten Enzymen kommt. Die Wahrscheinlichkeit eines solchen Kontakts sinkt mit dem Abbau umsetzbarer Substanz, folglich mit der Dauer der Inkubation und der Häufigkeit von Austrocknung und Wiederbefeuchtung. Dies erklärt eine reduzierte Nachweisbarkeit von Reaktionstypen der Bodenatmung bei mehrfacher Inkubation und Wiederbefeuchtung (s. Abschnitt 6.2.6., S. 50).

Eine Applikation von Glucose erhöht die Menge sehr leicht umsetzbarer Substanz. Reaktionstypen bzw. unterschiedliche Grade der Anreicherung mit Exoenzymen lassen sich daher leichter nachweisen. Bei der Glukoseapplikation werden zugleich die Beziehungen der Bodenatmung zur Menge an Humusstoffen enger, weil sie die Pufferkapazität für Enzyme widerspiegeln (s. Abb. 40, S. 70 im Vergleich zu Abb. 36, S. 66).

Weil die Enzyme große Mengen Wasser binden, verengen sich durch die Glucoseapplikation vor allem die Beziehung zwischen gebundenem Wasser und der Bodenatmung. Die Korrelationen der Bodenatmung zu den GV im TB B bleiben weitgehend unbeeinflusst (vergl. Abb. 40, S. 70 und Abb. 36, S. 66). Dies ist plausibel, weil die vorhandenen umsetzbaren OBS-Komponenten von der Glukose vermutlich nicht beeinflusst werden und weil die applizierte Glucosemenge sehr klein war.

Aus diesen Überlegungen folgt, dass Proben mit hoher Versorgung an umsetzbarer Substanz und häufigem Wechsel der Bodenfeuchte auf eine Wiederbefeuchtung mit einem schnellen Anstieg der Bodenatmung bei Wiederbefeuchtung reagieren sollten. Die Ergebnisse der Tabelle 3 (S. 53) bestätigen diese Überlegungen: Ein schneller Anstieg der Bodenatmung ist für die OBS von Böden charakteristisch, die in Folge des Vegetationstyps und der Klimazone durch häufigere und/oder intensivere Veränderungen der Bodenfeuchte bei kurzfristig hohen Umsatzraten gekennzeichnet sind. Dies betrifft typische Steppenböden, aber auch die obersten Horizonte von Podsolen (schwarz gefärbter Humus?) und Umsatzprozesse in entwässerten Mooren, nicht jedoch typische Braunerden (relativ gleichmäßige Feuchte und Aktivität der Bodenorganismen) oder Kastanozeme (geringe biologische Umsatzraten in Folge stets unzureichender Wassergehalte) und intakte Hochmoore (braune organische Substanz, vergl. Thesen im Anhang).

Auch Ackerböden zeichnen sich im Vergleich zu Böden unter Wald durch eine höhere Variabilität der Bodenfeuchte aus. Sie wird durch die Bodenbearbeitung, das Fehlen der ursprünglichen Vegetation, eine reduzierte Wasserkapazität (verringerte Humusgehalte) etc. verursacht. Für A_p Horizonte ist nicht selten eine Grautönung der OBS im Vergleich zu ursprünglichen A_h (in Deutschland selten) oder darunter liegenden Horizonten charakteristisch.

Aus evolutionsbiologischer Sicht ist ein Zusammenhang des Anfangsanstiegs der Bodenatmung zum Vegetationstyp unabhängig von diesen Thesen plausibel. Die Produktivität und das Überleben der Steppenvegetationsgesellschaften ist an eine schnelle Nährstoffaufnahme im zeitigen Frühjahr gebunden, weil die Austrocknung des Bodens die Vegetationszeit verkürzt. Gepufferte Exoenzyme und eine intensive Bodenatmung nach Wiederbefeuchtung begünstigen eine schnelle Nährstofffreisetzung im zeitige Frühjahr, weil Enzyme in einem weitaus größeren Temperatur- und Feuchtebereich aktiv sind, als die enzymproduzierenden Organismen. Es scheint daher möglich, dass sich im Laufe der Erdgeschichte solche Organismengesellschaften bevorzugt verbreitet haben, deren Wechselwirkungen mit heterotrophen Organismen die Bildung solcher Humusstoffen bewirkte, die zur Pufferung von Exoenzymen fähig sind.

Diese Aspekte stellen attraktive Ansätze für eine Nutzung der OBS zur Beschreibung komplexer Zusammenhänge zwischen auto- und heterotrophen Organismengemeinschaften und ihren Wirkungen auf globale Entwicklungsprozesse der Biosphäre dar (*vergl. 117*).

Im Unterschied zu Abbauprozessen organischer Substanzen durch lebende Mikroorganismen ist bei der Zersetzung durch gepufferte Enzyme keine Aufeinanderfolge einzelner Abbaureaktionen möglich. Stickstoff - der in natürlichen Ökosystemen oft wachstumslimitierende Nährstoff - wird bei chaotischer Wirkung gepufferter Enzyme nicht nur in die Biomasse eingebaut, sondern verbleibt in Rückständen. Dies erklärt höhere Anteile an gebundenem Stickstoff in Humusstoffen typischer Schwarzerden im Vergleich zu Böden unter Wald bei der klassischen Humusanalytik (92) und andere Unterschiede in der chemischen Zusammensetzung und Struktur. Auch eine variierende stoffliche Zusammensetzungen der OBS (Anteile von Ligninen, Zellulosen etc.) geht mit Wirkungen gepufferter Exoenzyme konform (siehe Anhang).

Höhere Stickstoffgehalte unterstützen eine Polymerisation und folglich eine intensive Färbung der OBS, die offensichtlich für Böden und Horizonte mit hoher Amplitude und Frequenz von Feuchteänderungen und biologischer Aktivität charakteristisch ist.

Es bestehen somit eine Reihe durchaus plausibler Zusammenhänge, die einer weiteren Untersuchung Wert sind. Ungeachtet ihrer Plausibilität liegen jedoch keine experimentellen Belege für die Richtigkeit dieser Interpretationen vor. Die festgestellten Phänomene tangieren jedoch

eine Reihe aktueller Fragen der Regulation von C-Gehalten in Böden sowie Mechanismen globaler Stoffkreisläufe (s. 117) bis hin zu Gesetzmäßigkeiten der Entwicklung komplexer Organismengemeinschaften in Ökosystemen. Dies ist bemerkenswert, weil Ökosysteme von potentiellen Veränderungen durch neue Technologien (z.B. gentechnisch veränderte Organismen) betroffen sind und mit Eigenschaften der Biosphäre (z.B. Sauerstoffkonzentration) in einem direkten langfristig schwer kalkulierbarem Zusammenhang stehen. Sie sollten daher Gegenstand weiterführender Untersuchungen sein.

6.3.3. Zusammenfassung

Die Gegenüberstellung der Bodenatmung mit thermischen Gewichtsverlusten führte zum Nachweis einer veränderlichen Abhängigkeit der Bodenatmung von thermogravimetrisch identifizierbaren OBS - Komponenten. Unmittelbar nach der Wiederbefeuchtung fanden sich Korrelationen der Bodenatmung zur Menge gebundenen Wassers und zur Menge an Humusstoffen, die sich mit heutigen Kenntnissen nicht erklären lassen. Sie konnten für mehrere Probenkollektive nachgewiesen werden.

Mit zunehmender Inkubationsdauer nimmt die Abhängigkeit der Bodenatmung von thermischen Gewichtsverlusten im TB B bzw. von biologisch umsetzbaren Komponenten zu. Dieser Aspekt geht mit traditionellen Vorstellungen über eine Abhängigkeit der biologischen Aktivität von der Menge umsetzbarer Bestandteile in der OBS konform. Er bestätigt die Möglichkeit einer Quantifizierung umsetzbarer OBS-Komponenten mittels Thermogravimetrie.

Die Ursachen veränderlicher Beziehungen zwischen thermischen Gewichtsverlusten und der Bodenatmung sind bisher nicht geklärt. Auf Grund der großen Dynamik von Feuchteänderungen in Ökosystemen läßt sich jedoch eine große Bedeutung der Anfangsbodenatmung für Transformationsprozesse der OBS und Stoffkreisläufe in Ökosystemen vermuten, so dass weitergehende Untersuchungen sinnvoll sind.

6.3.4. Schlussfolgerungen

Über eine Bestätigung bekannter Zusammenhänge hinaus lassen die in diesem Abschnitt vorgestellten Ergebnisse folgende Schlussfolgerungen zu:

- (a) Bei Wiederbefeuchtung trockener Proben besteht eine Abhängigkeit der Bodenatmung von humifizierten Komponenten der OBS und der Menge gebundenen Wassers, die mit zunehmender Inkubationsdauer verschwindet.

- (b) Diese Abhängigkeiten verweisen auf einen Zusammenhang zwischen der thermogravimetrisch quantifizierbaren Menge gebundenen Wassers und biologischen Umsatzprozessen in Böden
- (c) Die Existenz dieser Beziehungen geht mit konzeptionellen Vorstellungen über Rückwirkungen humifizierter Komponenten der OBS auf biologische Prozesse und mit der vermuteten Abhängigkeit des ökosystemaren Stoffumsatzes von der Dynamik des Wasserhaushaltes konform.
- (d) Eine Aufklärung kausaler Ursachen des Zusammenhangs zwischen Bodenatmung, biologisch stabilen OBS-Komponenten und gebundenem Wasser ist sinnvoll. Sie stellt erste, experimentell verifizierbare und überregional einheitliche Anhaltspunkte zu erdgeschichtlich geprägten Mechanismen der Regulation von C-Gehalten in Böden dar. In dieser Frage unterscheiden sich die durchgeführten Experimente von bisherigen Ansätzen in der Humusanalytik.

7. Charakterisierung von Böden mittels Thermogravimetrie

Die Ergebnisse zur thermischen und biologischen Stabilität wurden über ursprüngliche Zielstellungen hinaus für die Erarbeitung eines neuen Verfahrens der thermogravimetrischen Bodenanalyse (TGBA) genutzt. Dieses Verfahren besteht aus methodischen Vorgaben zur Analyse von Bodenproben und einem Auswerteprogramm.

Die methodischen Vorgaben wurden im Abschnitt 5.2.1. (S. 13) erläutert und sind einfach einzuhalten. Zusätzlich ist eine Verfahrensbeschreibung verfügbar (129). Sie enthält zusätzlich Informationen über kritische Anwendungsbereiche, Fehlermöglichkeiten etc..

Das Auswerteprogramm

- berechnet Gehalte einzelner OBS – Komponenten (umsetzbare und humifizierte Bestandteile, gebundenes Wasser),
- schätzt Bodeneigenschaften (C-, N-, Ton- und Karbonatgehalt)
- prüft die Passfähigkeit der Ergebnisse zur OBS hinsichtlich von Beziehungen zwischen OBS - Komponenten in natürlichen Böden und
- stellt die Ergebnisse anschaulich dar.

Dadurch wird die Interpretation thermogravimetrischer Analysen wesentlich vereinfacht.

Folgende Beispiele dokumentieren Ergebnisse der TGBA, Stärken, Schwächen und Erweiterungsmöglichkeiten.

7.1. Bestimmung umsetzbarer Komponenten der OBS

7.1.1. Methodenvergleich

Die Quantifizierung biologisch umsetzbarer Komponenten der OBS ist ein zentrales Problem der Humusqualitätsbestimmung. Biologisch leicht umsetzbare Komponenten sind für die Freisetzung von Pflanzennährstoffen entscheidend, beeinflussen die biologische Aktivität von Böden, verändern sich unter dem Einfluss der Bodennutzung und sind daher für viele Fragen des Umweltschutzes und der produktiven Bodennutzung relevant.

Die Quantifizierung umsetzbarer Komponenten gehört zu den schwierigsten Problemen der klassischen Humusanalytik.

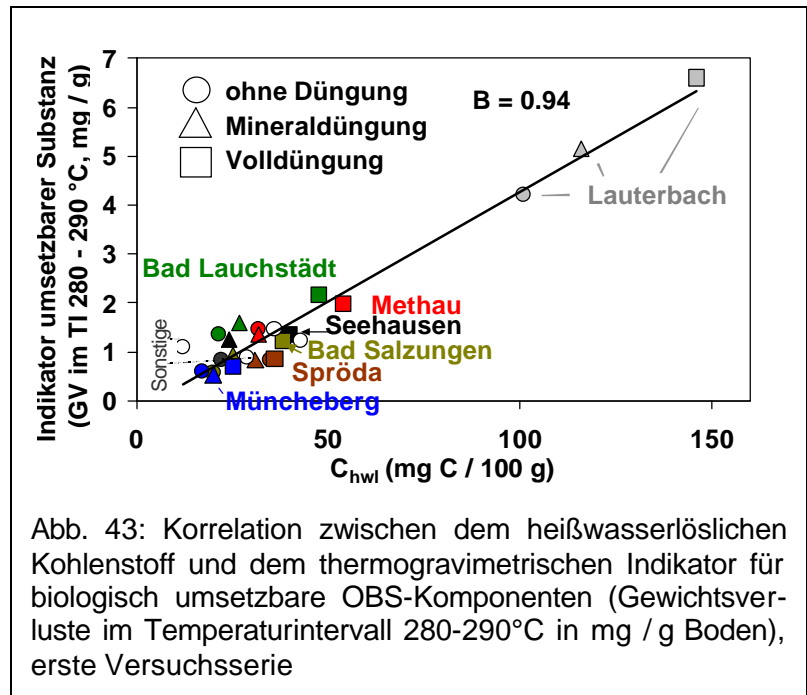
Gegenwärtig wird eine Erfassung umsetzbarer OBS-Komponenten mittels Heißwasserextraktion favorisiert (77). Grundlage dafür sind Beziehungen des heißwasserlöslichen Kohlenstoffs (C_{hwl}) zum C_t - Gehalt in landwirtschaftlichen Dauerversuchen unter Berücksichtigung der Menge tonabhängiger, biologisch stabiler Komponenten (77).

Eine Quantifizierung umsetzbarer Bestandteile ist auch thermogravimetrisch möglich (s. Abschnitt 6.1.2., S. 21 und 6.1.3., S. 28).

Um die Aussagefähigkeit der thermogravimetrischen Bestimmung zu verifizieren, wurden die Ergebnisse beider Methoden in bisher zwei Versuchsserien gegenübergestellt.

Bei der ersten Versuchsserie mit 26 Böden aus zehn landwirtschaftlichen Dauerversuchen in Deutschland zeigten sich sehr enge Beziehungen zwischen dem C_{hwl} und dem thermogravimetrischen Indikator für umsetzbare organische Substanz (UOS). Abb. 43 dokumentiert diese Beziehung. Das Bestimmtheitsmaß ist mit einem B von 0.94 sehr groß.

Varianten ohne Düngung (Kreise) zeigten innerhalb der Versuchsstandorte die kleinsten Werte, gefolgt von Varianten mit mineralischer Düngung (Dreiecke) und Volldüngung (mineralisch + organisch, Quadrate). Beide Methoden liefern demnach analoge Schlussfolgerungen zum Gehalt an umsetzbarer Substanz in Abhängigkeit von Düngungsvarianten.

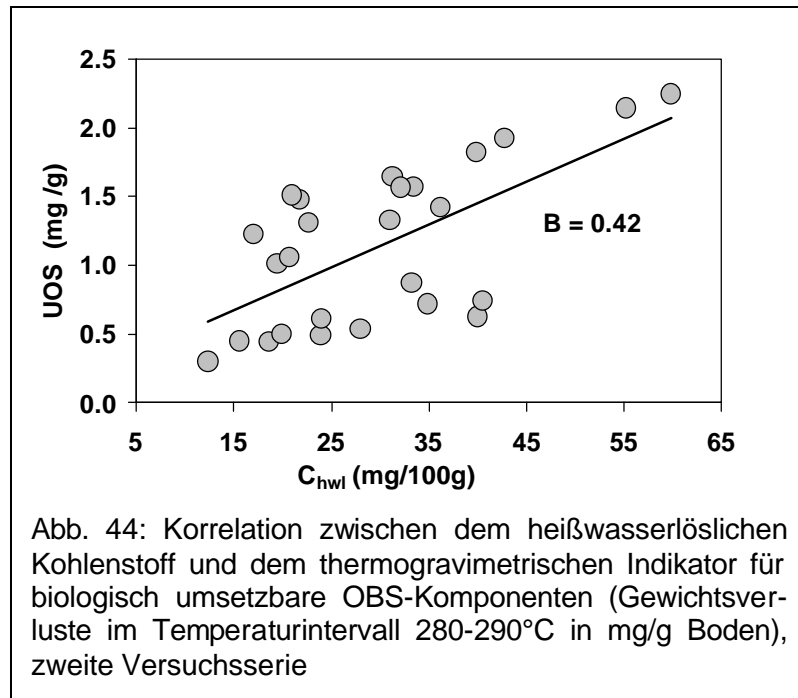


Gleichzeitig dokumentiert die Abbildung eine eingeschränkte überregionale Vergleichbarkeit der Ergebnisse. So zeigen beispielsweise alle Varianten des Versuchsstandortes Lauterbach ($C_{hwl} > 100$ mg C / 100 g Boden, in Abb. 43 grau markiert) höhere Werte als die übrigen Versuchsstandorte trotz einer ähnlichen Versorgung mit umsetzbarer Substanz.

Auf Grund dieser Abweichungen wurden Gebirgsstandorte (Lauterbach) aus den Untersuchungen zum C_{hwl} ausgeschlossen und die Prüfung unter Einbeziehung anderer landwirtschaftlicher Dauerversuche wiederholt.

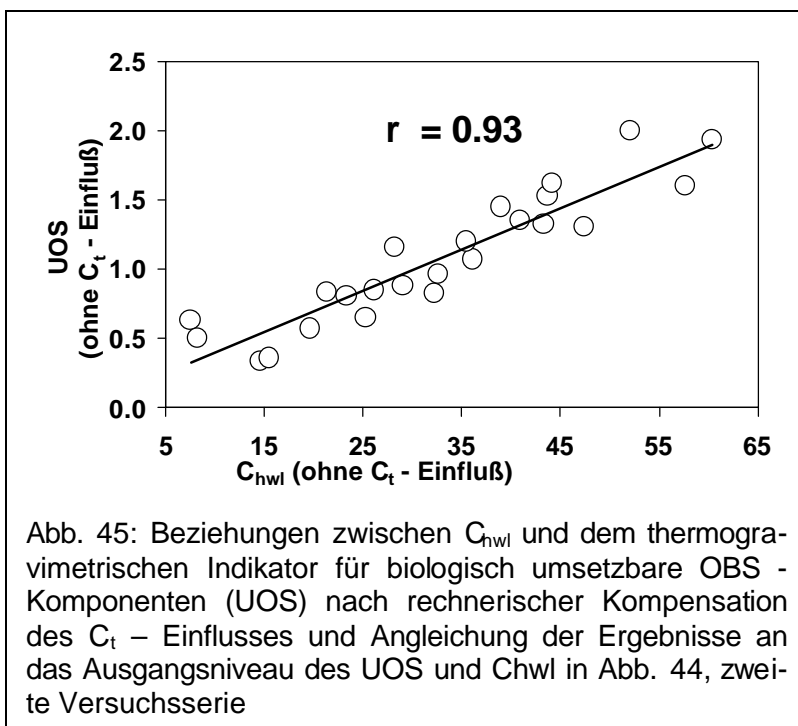
Bei dieser Versuchsserie ergaben sich die in Abb. 44 dargestellten Ergebnisse. Beide Methoden zeigen wieder die gleiche Abhängigkeit der Ergebnisse von landwirtschaftlichen Dauerversuchsvarianten (hier nicht eingezeichnet), d.h. innerhalb einzelner Standorte weisen Dauerversuchspartellen mit Volldüngung die größten Werte auf, gefolgt von Varianten mit reiner organischer Düngung, alleiniger mineralischer Düngung und ohne Düngung. Diese Aussagen sind für beide Methoden gleichermaßen zutreffend.

Auch die Parameter der Regressionsgeraden in Abb. 43 und Abb. 44 sind nicht signifikant verschieden. Die Korrelation zwischen den Ergebnissen beider Methoden ist jedoch in Abb. 44 mit einem B von nur 0.42 deutlich weniger eng. Die zweite Gegenüberstellung beider Methoden liefert demnach veränderte Schlussfolgerungen.



Um die Ursachen divergierender Aussagen beider Versuchsserien zu identifizieren, wurden die Ergebnisse zum C_{hwl} und zur UOS den Bodeneigenschaften gegenübergestellt. Dabei zeigten sich bei beiden Methoden signifikante Korrelationen der Ergebnisse zum C_t - Gehalt. Solche Korrelationen sind bei der Quantifizierung umsetzbarer Komponenten unerwünscht. Sie zeigen, dass stabile OBS-Komponenten mit erfaßt werden und die Ergebnisse beeinflussen.

Mit Hilfe der Regressionsparameter dieser Beziehungen wurde deshalb der Einfluss des C_t auf die Bestimmungsergebnisse rechnerisch eliminiert. Abb. 45 zeigt die Beziehung zwischen dem C_{hwl} und der UOS nach der Umrechnung. Die Beziehung ist deutlich enger als in Abb. 44 und das Bestimmtheitsmaß stieg auf Werte über 0.9.



Weiterhin wurden die Residuen der Beziehung in Abb. 44

analysiert. Es zeigte sich ein statistisch gesicherter Einfluss des Tongehaltes. Weil die Akku-

mulation der Humusstoffe in Mineralböden vom Tongehalt abhängig ist (77), spiegelt das Ergebnis der statistischen Auswertung gleiche Sachverhalte wie die Beziehung umsetzbarer Komponenten zum C_t - Gehalt wider: Biologisch stabile, tonabhängig akkumulierte OBS - Komponenten beeinflussen demnach die Bestimmungsergebnisse umsetzbarer Komponenten. Wirkungen des Tongehaltes lassen sich durch Darstellung der Ergebnisse je % Tongehalt kompensieren. Dabei steigt das Bestimmtheitsmaß der Korrelation zwischen C_{hwl} und UOS auf Werte um 0.8 (nicht dargestellt).

Auf Grund dieser Ergebnisse wurde die erste Versuchsserie (Abb. 43) hinsichtlich einer Beeinflussung durch den Ton- und C-Gehalt überprüft. Dabei wurde eine Abhängigkeit von Bodeneigenschaften der umsetzbaren Komponenten bestätigt, die sich rechnerische kompensieren ließ. Die Beziehungen zwischen dem C_{hwl} und der UOS in Abb. 43 wurden enger. Der Anstieg der Bestimmtheitsmaße war aber geringer (Anstieg von $B = 0.94$ auf $B = 0.96$).

Aus diesen Ergebnissen lässt sich schließen, dass beide Methoden nicht nur biologisch umsetzbare Komponenten erfassen. In die Angaben zum C_{hwl} und zur UOS gehen offenbar unterschiedliche Pools und Mengen des biologisch stabilen Kohlenstoffs im Boden ein. Sie beeinflussen die Enge der Beziehungen zwischen beiden Methoden negativ.

Die Möglichkeit einer rechnerischen Kompensation von Wirkungen stabiler OBS auf die Bestimmungsergebnisse weist auf eine gleichwertige und verbesserungswürdige Eignung beider Methoden zur Quantifizierung umsetzbarer Komponenten hin.

7.1.2. Zusätzliche Möglichkeiten der Thermogravimetrie

Die Quantifizierung umsetzbarer Komponenten OBS über Gewichtsverluste (GV) in einem engen Temperaturintervall (TI) dokumentiert die Möglichkeiten der Thermogravimetrie zur Charakterisierung der OBS nur teilweise. Ungeachtet geringerer Arbeitsaufwendungen im Vergleich zur Heißwasserextraktion liefert die TGBA zahlreiche zusätzliche Informationen auf die in den folgenden Abschnitten eingegangen wird.

7.1.2.1. Ausgabe korrigierter Bestimmungsergebnisse

Die thermogravimetrische Bestimmung ermöglicht eine gleichzeitige Abschätzung des C_t und Tongehaltes der analysierten Probe. Dadurch ist eine Umrechnung der Bestimmungsergebnisse und eine Korrektur der Bewertung umsetzbarer Komponenten ohne zusätzliche Experimente möglich. Lediglich die Regressionsparameter der Korrelation umsetzbarer Komponenten - C_t - Gehalt sind dafür erforderlich. Sie lassen sich in Versuchsserien leicht quantifi-

zieren. Vorläufige Angaben bauen auf oben dargestellten Untersuchungen zu ca. 50 Proben auf.

7.1.2.2. Proportionen umsetzbarer zu humifizierten Komponenten

Bei Untersuchungen von Böden aus natürlichen Ökosystemen wurde festgestellt, dass die Anteile umsetzbarer Komponenten mit Anteilen humifizierter Komponenten und gebundenen Wassers korrelieren (s. Abb. 12, S. 32 und Abb. 13, S. 32 im Abschnitt 6.1.4., S. 30). Zwischen OBS-Komponenten bestehen demnach überregional einheitliche Beziehungen.

Gleiche Aspekte spiegeln sich in der Abhängigkeit umsetzbarer Komponenten vom C- oder Tongehalt wider, worauf bereits eingegangen wurde (s. Abschnitt 7.1.1, S. 78). Daraus resultierende Probleme bei der Bewertung der OBS zeigen sich darin, dass Absolutgehalte umsetzbarer Komponenten oft nur innerhalb kleiner Regionen mit ähnlichem Klima und/oder Ausgangsmaterial vergleichbar sind (s. z.B. Abschnitt 7.1.1.).

Mit der Größe betrachteter Regionen wächst daher die Notwendigkeit einer Eichung von Bewertungsmaßstäben oder einer Gegenüberstellung mit stabileren Bestandteilen. Abb. 5 (S. 23) zeigt beispielsweise höhere Anteile umsetzbarer Komponenten in einer Schwarzbrache im Vergleich zu einer Braunerde unter Wald. Die mit umsetzbarer Substanz unterversorgte Schwarzerde verfügt demnach über höhere Gehalte an umsetzbarer Substanz, als ein gut versorgter Waldboden – ein Problem der überregionalen Vergleichbarkeit, das sich auch in Untersuchungen zur Bodenatmung zeigt.

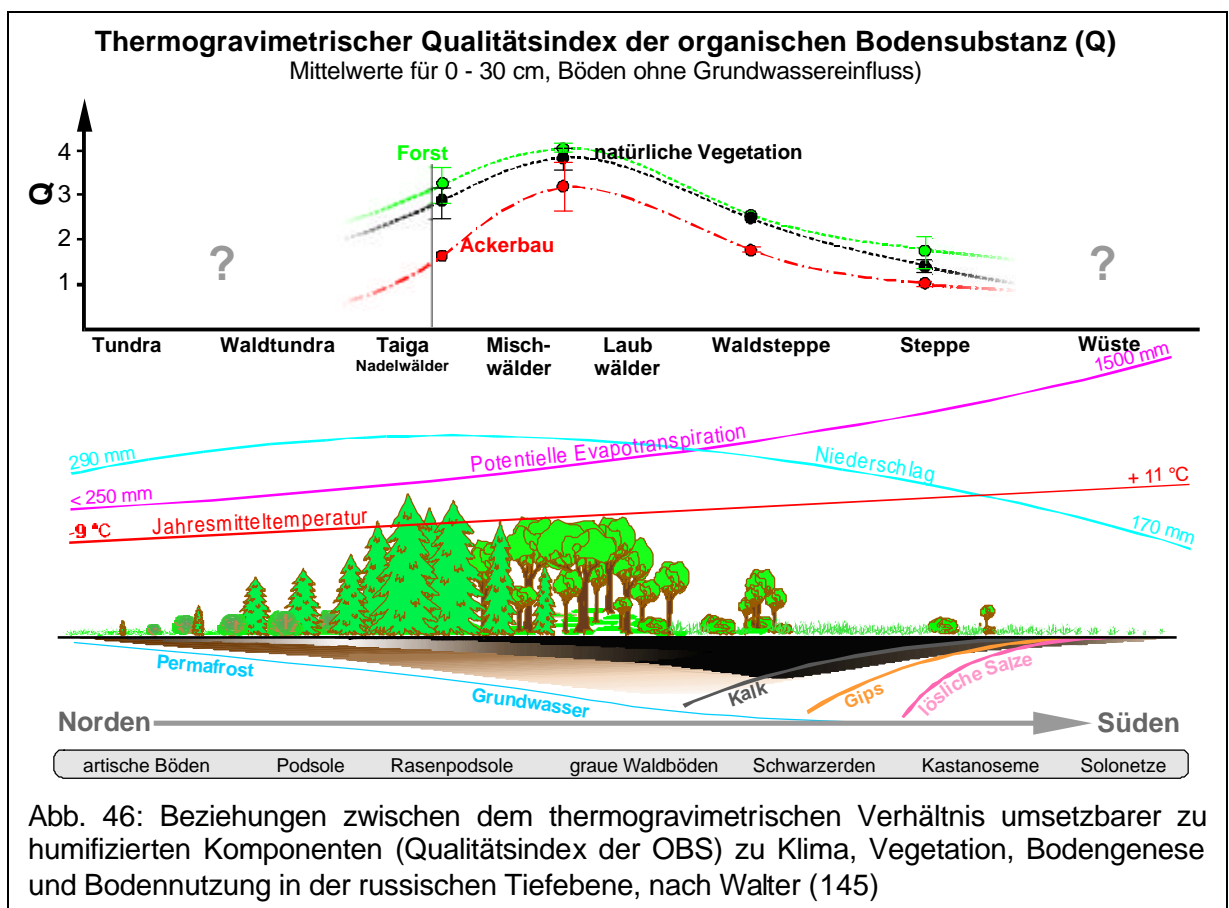
Dieses Problem ist seit den Anfängen der klassischen Humusanalytik bekannt und auch für moderne Verfahren der Strukturaufklärung charakteristisch.

So ist beispielsweise die Menge an Fulvosäuren (biologisch leicht umsetzbare, säurelösliche, chemisch aktivere Fraktion) nur innerhalb einzelner Standorte für eine Charakterisierung der OBS geeignet. Bei überregionalen Vergleichen steht das Verhältnis von Fulvosäuren zu Huminsäuren (biologisch stabile, säurefällbare Fraktion) im Vordergrund (s. Abb. 2, S. 3; 92).

Analog dazu werden bei modernen Analyseverfahren selten nur die biologisch umsetzbaren, chemisch instabilen, aliphatischen, peripheren, löslichen, aktiven etc. Bestandteile charakterisiert. Meist liefern Proportionen dieser Bestandteile zu biologisch stabilen, aromatischen, unlöslichen, inaktiven usw. (s. z.B. 27, 72) wichtige zusätzliche oder besser verwertbare Informationen. Gleiche Aussagen sind auch für Verfahren der Fraktionierung nach Partikelgrößen (82) der Dichte (60, 16, 140) und andere Methoden zutreffend.

Bei der TGBA (thermogravimetrischen Bodenanalyse) läßt sich ein Verhältnis umsetzbarer zu humifizierten Komponenten berechnen. Weil beide Komponenten von klimatischen und geologischen Einflüssen abhängen, werden so die Wirkungen divergierender Bodenbildungsbedingungen auf die Anteile umsetzbarer Komponenten nivelliert und die Ergebnisse überregional leichter vergleichbar.

Eine Gegenüberstellung von Böden mehrerer Klimazonen in Anlehnung an die Vorgehensweise in der klassischen Humuschemie bestätigt dies. Abb. 46 zeigt dazu die Ergebnisse von Böden aus der russischen Tiefebene. In dieser Region steigt die Temperatur und die Evapotranspiration von Nord nach Süd. In der gleichen Richtung nimmt der Niederschlag zunächst zu und dann wieder ab. Unter dem Einfluss dieser Faktoren entwickelt sich eine unterschiedliche Vegetation. Sie ist zusammen mit dem Klima für eine divergierende Bodengenese verantwortlich.



Werden die Absolutgehalte an umsetzbarer Substanz (z.B. UOS) für eine Bewertung der OBS genutzt, finden sich große Unterschiede, die sich überregional nicht vergleichen lassen. So reduziert zwar die Ackernutzung die Menge umsetzbarer Komponenten in allen Klimazonen. Ein überregionaler Vergleich der Standorte ist aber, wie das oben zitierte Beispiel zeigt,

schwierig: In Extremfällen ist der Gehalt an umsetzbaren Kohlenstoff in Böden mit Mangelversorgung an umsetzbarer Substanz höher als in Böden unter Waldvegetation mit sehr guter Versorgung an umsetzbarer Substanz.

Dieses Problem läßt sich durch einen Quotienten aus umsetzbarer zu humifizierten Komponenten deutlich reduzieren, weil z.B. Schwarzerden im Unterschied zu Braunerden über große Mengen an Humusstoffen verfügen. Eine vergleichende Bewertung der Menge umsetzbarer Komponenten wird so vereinfacht.

In Abb. 46 zeigen sich die größten Werte des Quotienten aus umsetzbarer zu humifizierter Substanz nicht in den typischen Steppengebieten (größte Gehalte an umsetzbarer Substanz), sondern an der Grenze zwischen Waldsteppe und Laubmischwäldern, d.h. in der Region mit der höchsten Primärproduktion (33) und dem höchsten landwirtschaftlichen Ertragspotential (92). Nach Norden und Süden nimmt die Produktivität ab (33). Im Norden reduzieren niedrige Temperaturen die Assimilationsleistung der pflanzlichen Biomasse; im Süden die abnehmende Wasserverfügbarkeit. Der Quotient aus umsetzbarer zu humifizierten Bestandteilen spiegelt diese Besonderheiten besser wider, als der Absolutgehalt umsetzbarer Komponenten und scheint demnach für überregionale Vergleiche gut geeignet.

Dies trifft auch auf einen Vergleich von Bodennutzungen zu. Unabhängig von Klimafaktoren reduziert die landwirtschaftliche Bodennutzung umsetzbare Komponenten (136, 99). Die humifizierten Bestandteile unterliegen hingegen keinen oder nur geringen Veränderungen (vergl. Beziehungen zum Tongehalt in Abschnitt 6.1.5., S. 34; 77). In Abb. 46 läßt sich daher eine Verringerung des Verhältnisses umsetzbarer zu humifizierten Komponenten durch die landwirtschaftliche Bodennutzung beobachten. Sie findet sich in allen Klimaregionen. Bei hoher organischer Düngung nähern sich die Werte den Verhältnissen natürlicher Böden an. An Standorten mit landwirtschaftlichen Dauerversuchen läßt sich daher in Abb. 46 eine größere Schwankungsbreite der Ergebnisse beobachten, wenn Proben mit größerer Spannweite zur Verfügung standen.

Auf Grund dieser Ergebnisse wird das Verhältnis umsetzbarer zu humifizierten Komponenten als sinnvolle Ergänzung zum Indikator für umsetzbare Komponenten bei überregionalen Vergleichen gesehen. Es ist mittels TGBA ohne zusätzliche experimentelle Aufwendungen quantifizierbar.

7.1.2.3. Unterschiede zwischen der OBS natürlicher, vom Menschen unbeeinflusster und ackerbaulich genutzter Böden

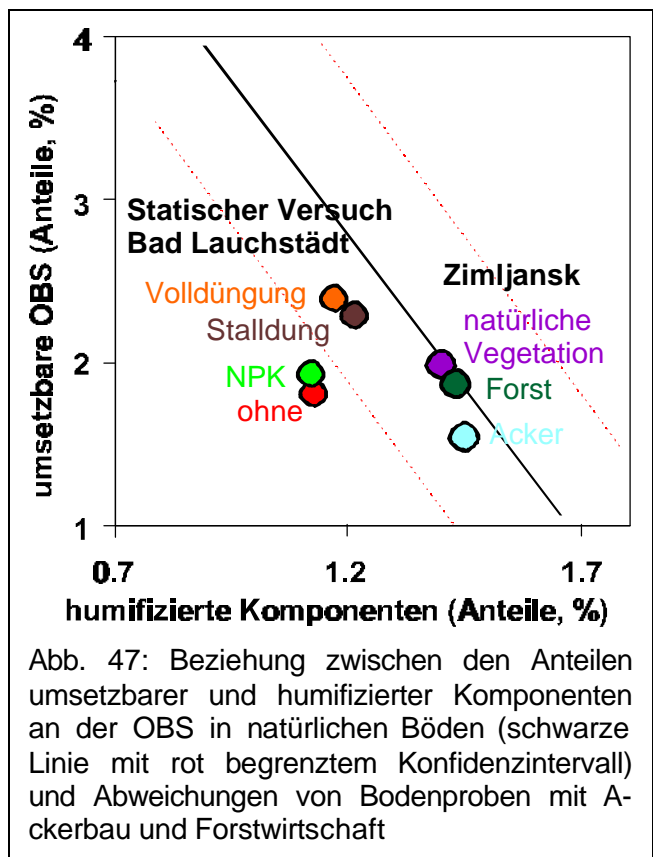
Das Auftreten von Beziehungen zwischen OBS - Komponenten in natürlichen Böden lässt sich ebenfalls für eine Bewertung der OBS verwenden.

Abb. 47 zeigt die Beziehung zwischen umsetzbaren und humifizierten Komponenten aus Abb. 12 (S. 32) mit Konfidenzintervall. Zusätzlich wurden die Bestimmungsergebnisse aus dem Statischen Versuch Bad Lauchstädt und von Proben aus der Trockensteppe bei Zimljansk, Rostover Gebiet, Russland, (Proben Nr. 3, 4 und 6, s. S. 17) eingezeichnet.

Die Schwarzerdeproben unter natürlicher Vegetation aus Zimljansk liegen genau auf der Korrelationsgeraden. Gleiches trifft auf die Probe unter Forst am gleichen Standort zu. Bei ackerbaulicher Bodennutzung zeigt sich hingegen eine Abweichung nach unten. Sie deutet auf reduzierte Anteile umsetzbarer Komponenten in der OBS hin. Die Reduktion ist relativ klein und geht mit einer extensiven Ackernutzung konform (ausschließlich organische Düngung, geringe Bodenbearbeitung, kein chemischer Pflanzenschutz über ca. 40 Jahre).

Beim landwirtschaftlichen Dauerversuch in Bad Lauchstädt liegen hingegen alle

Punkte unterhalb der Korrelationsgeraden. Sie weisen damit auf reduzierte Anteile umsetzbarer Substanz hin. Die größten Abweichungen finden sich bei der Parzelle ohne Düngung mit nur geringen Unterschieden zur Variante mit Mineraldüngung (NPK). Die Versuchsvarianten mit Stalldung und Volldüngung liegen noch innerhalb des Konfidenzintervalls. Aus dieser Ergebniskonstellation lässt sich schließen, dass die landwirtschaftliche Bodennutzung umsetzbare Anteile in unterschiedlichem Maße reduziert. Eine hohe Zufuhr an organischen Rückständen kompensiert die Wirkungen des Ackerbaus auf Anteile umsetzbarer Komponenten. Dies führt zu einer Annäherung an die (hier nur hypothetischen) Verhältnisse in natürlichen Böden. Analoge Ergebnisse wurden auch bei anderen Dauerversuchen gefunden.



Es bleibt zu klären, ob die an den Standardproben gewonnenen Korrelationsbeziehungen auf beliebige Standorte übertragbar sind und ob die Position einer Probe in Relation zur Korrelationsgeraden den Grad der Abweichungen vom ursprünglichen Zustand widerspiegelt.

Experimentelle Belege für eine solche Möglichkeit liegen mit wenigen Ausnahmen bisher noch nicht vor. Zahlreiche Indizien deuten jedoch darauf hin. Die Beziehungen zwischen OBS-Komponenten sind, wenn nicht global, so doch zweifelsfrei in größeren Regionen anwendbar und beschreiben Verhältnisse in natürlichen, vom Menschen unbeeinflussten Böden (s. Abschnitt 6.1.4., S. 30 und folgende Ausführungen).

7.1.2.4. Unterschiede in der stofflichen Zusammensetzung der OBS

Neben diesen Vorteilen bietet sich eine Analyse der Zerfallsdynamik umsetzbarer Komponenten für weiterführende Auswertungen an. Proben einzelner Standorte zeigen mit Ausnahme einiger Temperaturintervalle einen charakteristischen Verlauf der thermischen Degradation im Zerfallsbereich umsetzbarer Komponenten (Temperaturbereich B, 200 - 450 °C).

So findet sich beispielsweise in Abb. 6 (S. 23) bei allen Proben aus Bad Lauchstädt kurz vor der Obergrenze des Temperaturbereiches B (TB B) um 420 °C ein nochmaliger Anstieg der Gewichtsverluste. Dieser Anstieg ist bei Proben aus Thyrow nicht nachweisbar. Es handelt sich somit um ein charakteristisches Merkmal der OBS von Böden aus Bad Lauchstädt.

Die Ursachen dieser Unterschiede liegen vermutlich in der chemischen Zusammensetzung der OBS (123, 124). Damit verbundene Bewertungsmöglichkeiten wurden noch nicht untersucht.

7.2. Kennzeichnung humifizierter Bestandteile

Bei der TGBA liefert der Verlauf der thermischen Degradation nicht nur Informationen zur Menge umsetzbarer Komponenten, sondern auch zu humifizierten Komponenten der OBS. Die oben erwähnten Möglichkeiten zur Analyse der Zerfallsdynamik umsetzbarer Bestandteile sind daher auch auf humifizierte Komponenten übertragbar, jedoch ebenfalls noch kein Bestandteil der routinemäßigen Auswertung von thermogravimetrischen Analyseergebnissen.

In der traditionellen Humusanalytik wird häufig das Verhältnis von OBS-Menge zum Gehalt an organischen Kohlenstoff für eine Charakterisierung des Humifizierungsgrades genutzt.

Die Menge der OBS ist bei der TGBA über den Gewichtsverlust zwischen 25 °C und 550 °C quantifizierbar und inhaltlich mit dem Glühverlust identisch. Eine Abschätzung des Gesamt-

gehalten an organischen Kohlenstoff in Bodenproben ist mit der TGBA ebenfalls möglich (s. nächster Abschnitt 7.3.). Der Quotient aus OBS-Menge und C-Gehalt läßt sich daher ohne zusätzliche Aufwendungen bestimmen. Er liefert ergänzende Informationen zur analysierten Probe in Anlehnung an klassische Vorstellungen zur Charakterisierung der OBS.

7.3. Abschätzung von Bodeneigenschaften

Die Beziehungen zwischen thermischen Gewichtsverlusten zu Bodeneigenschaften (vergl. Abschnitt 6.1.5., S. 34) lassen sich für eine Abschätzung wichtiger Kenngrößen der Bodenbildung mit sehr geringen Arbeitsaufwendungen nutzen. Um diese Möglichkeiten zu verifizieren und die Genauigkeit der Abschätzung zu bewerten, wurden thermogravimetrisch und klassisch bestimmte Bodeneigenschaften in mehreren Versuchsserien miteinander verglichen.

7.3.1. Gesamtkohlenstoffgehalt (C_t)

Abb. 48 zeigt die Ergebnisse einer Gegenüberstellung der klassisch und thermogravimetrisch bestimmten C-Gehalte von Proben aus Deutschland und Russland (gleiche Standorte wie Standardproben, neuer Probennahmetermin).

Es ist eine sehr enge Beziehung erkennbar. Sie bestätigt die Möglichkeit einer thermogravimetrischen Quantifizierung

des C-Gehaltes von Bodenproben mit einer hohen Genauigkeit.

Gleiche Untersuchungen wurden auch für andere Probenkollektive durchgeführt. Bei der Einbeziehung von Böden aus landwirtschaftlichen Dauerversuchen fand sich die bisher schlechteste Übereinstimmung zwischen thermogravimetrischen und klassischen Bestimmungsergebnissen.

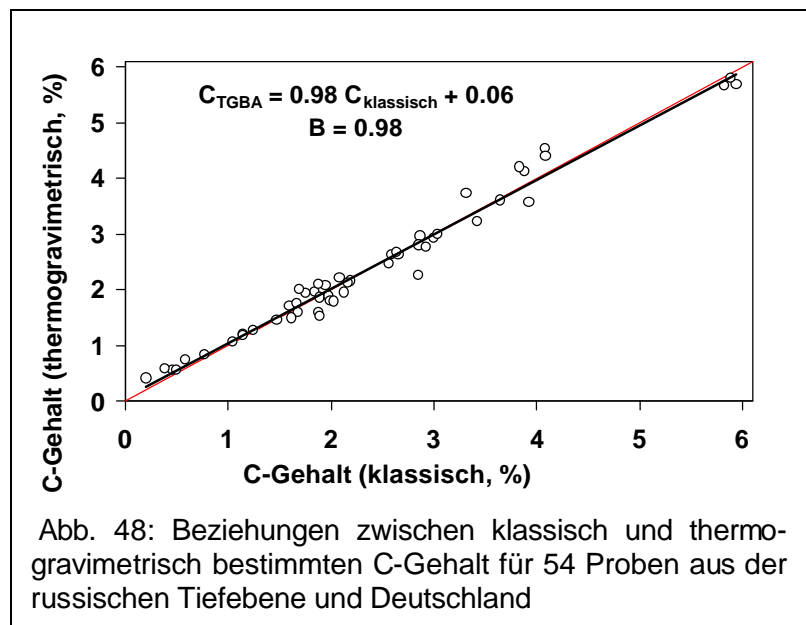
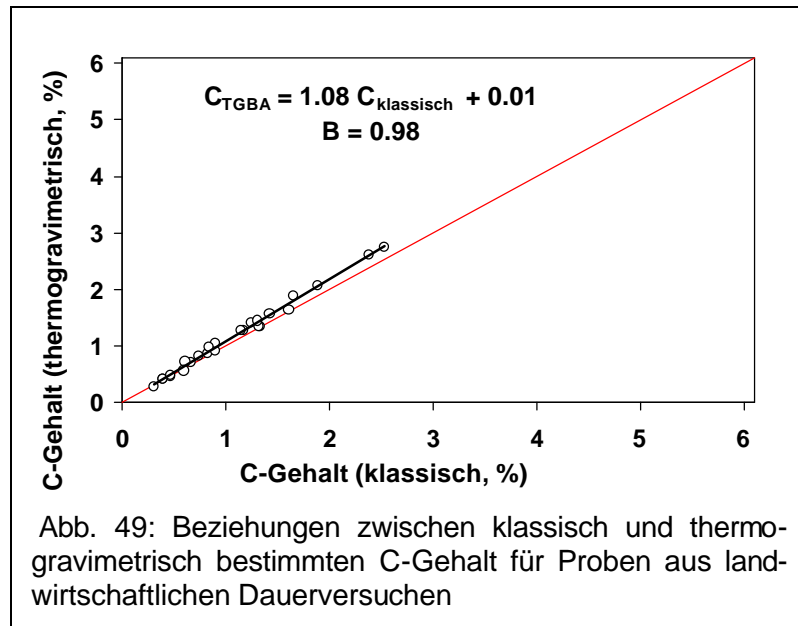


Abb. 49 dokumentiert die Ergebnisse der Gegenüberstellung. Sie weist auf eine Überschätzung des C-Gehaltes um bis zu 8 % hin. Bei einer detaillierten Auswertung dieser Ergebnisse zeigte sich, dass größere Abweichungen zwischen den Ergebnissen beider Methoden immer dann auftraten, wenn signifikante Abweichungen von den Beziehungen



zwischen OBS-Komponenten und dem gebundenen Wasser nachweisbar waren.

Dieser Aspekt wird **erstens** zur Kontrolle der Zuverlässigkeit einer thermogravimetrischen C - Bestimmung verwendet. Sind Abweichungen bei den Beziehungen zwischen OBS-Komponenten und dem gebundenen Wasser nachweisbar, kennzeichnet die Software zur TGBA die C- Bestimmung als unsicher oder sperrt die Ergebnisausgabe (je nach Größe der Abweichungen, s. Abschnitt 7.3.4., S. 92).

Zweitens scheint das gleichzeitige Auftreten von Abweichungen bei unterschiedlichen Korrelationen eine besondere Bedeutung der GV im TI 350-360°C für die Regulation des C-Gehaltes im Boden zu bestätigen. Hierzu liegen noch keine Untersuchungen vor.

Die unter Berücksichtigung der vorliegenden Testergebnisse ermittelte Genauigkeit der C - Abschätzung beträgt im Mittel ± 0.2 % C. Sie ist somit nur wenig kleiner als die Schwankungsbreite von Ergebnissen unterschiedlicher klassischer C - Bestimmungsverfahren (14) oder von Variationen des C-Gehaltes gleicher Proben von mehreren Entnahmetermen.

Eine genauere Abschätzung des C-Gehaltes scheint durch Verwendung größerer Temperaturbereiche durchaus möglich. So liefern die Gewichtsverluste zwischen 250 °C und 440 °C noch engere Korrelationen zum klassisch bestimmten C-Gehalt, als hier dargestellt. Die errechneten Bestimmtheitsmaße der GV in diesem Temperaturbereich zum C_t - Gehalt betragen **B = 0.99**. Dadurch sind Bestimmungsergebnisse mit einer theoretischen Genauigkeit von ± 0.1 % C_t erreichbar.

Zusätzlich wurde die thermogravimetrische C-Bestimmung mit der Quantifizierung des C-Gehaltes über Glühverluste bei Erwärmung auf 550 °C verglichen. Bei Verwendung des Standardprobenmaterials ergab sich dabei eine Genauigkeit von $\pm 0.5\%$ C für die Glühverlustbestimmung. Dies zeigt sich unter anderem in einem kleineren Bestimmtheitsmaß der Beziehung von Glühverlusten zum elementaranalytisch bestimmten C-Gehalt ($B = 0.88$). Lediglich bei einer (vorschriftsmäßigen) Begrenzung des Probenmaterials auf tonarme Böden stieg das Bestimmtheitsmaß der Beziehung auf Werte über 0.9.

Mittels Thermowaage wurde versucht, die wichtigsten Einflussfaktoren auf die Genauigkeit der Glühverlustbestimmung zu identifizieren. Dabei zeigte sich, dass eine Erhöhung der Trocknungsintensität die Enge der Beziehungen zum elementaranalytisch bestimmten C-Gehalt deutlich erhöhen kann und dass sich dabei die Abhängigkeit vom Tongehalt der Proben verringert.

Abb. 50 zeigt zwei Beispiele von Korrelationen bei unterschiedlicher Trocknungstemperatur. Bei Erhöhung der letzteren rücken die eingezeichneten Punkte in die Nähe der jeweiligen Korrelationsgeraden. So liegen die schwarzen Punkte (Trocknung bei 200 °C) dichter an der Korrelationsgeraden als die hellen großen. Demnach ist eine vorherige Trocknung bei 200 °C für eine C-Bestimmung besser geeignet als eine Trocknung bei 110 °C.

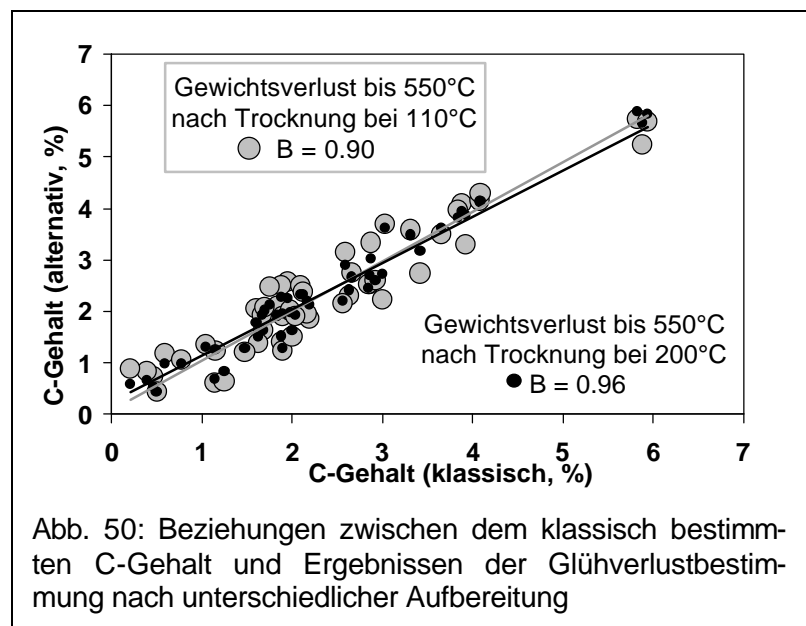


Abb. 50: Beziehungen zwischen dem klassisch bestimmten C-Gehalt und Ergebnissen der Glühverlustbestimmung nach unterschiedlicher Aufbereitung

herige Trocknung bei 200 °C für eine C-Bestimmung besser geeignet als eine Trocknung bei 110 °C.

Gleichzeitig ändern sich die Umrechnungsfaktoren für die ermittelten Glühverluste auf den C-Gehalt:

- a) bei Trocknung bis 110 °C: $C\text{-Gehalt} = 0.488 * \text{Glühverlust (in mg / g Boden)} - 0.644$
- b) bei Trocknung bis 200 °C: $C\text{-Gehalt} = 0.592 * \text{Glühverlust (in mg / g Boden)} - 0.591$

Die engsten Korrelationen zum elementaranalytisch bestimmten C-Gehalt fanden sich bei Verwendung von 550 °C als obere Temperaturgrenze nach einer vorherigen Erwärmung der Proben auf 220 °C ($B = 0.98$) ungeachtet einer Einbeziehung von Proben mit bis zu 40 %

Ton. Damit ist eine annähernd gleiche Genauigkeit der C - Abschätzung wie bei der thermogravimetrischen Bestimmung über die Gewichtsverluste (GV) im Temperaturintervall TI 340-350°C (s. Abb. 51) oder über die GV im TI 250- 440 °C möglich.

Diese Ergebnisse sind jedoch nur bedingt auf die Methodik nach DIN zur Glühverlustbestimmung übertragbar. Bei Trocknung von Proben im Trockenschrank und bei Ermittlung von Glühverlusten in Muffelöfen ist z.B. die Einhaltung genauer Temperaturen technisch schwierig. Hinzu kommen Fehler, die aus dem häufigen Transport der Proben im Labor, schwer kontrollierbaren Versuchsbedingungen (z.B. Luftfeuchte, Sauerstoffdiffusion) und aus fehlenden Möglichkeiten zur Automatisierung resultieren. Unabhängig von sonstigen Bedingungen wird daher die klassische Glühverlustbestimmung die Genauigkeit einer thermogravimetrischen Analyse nicht ausschöpfen können.

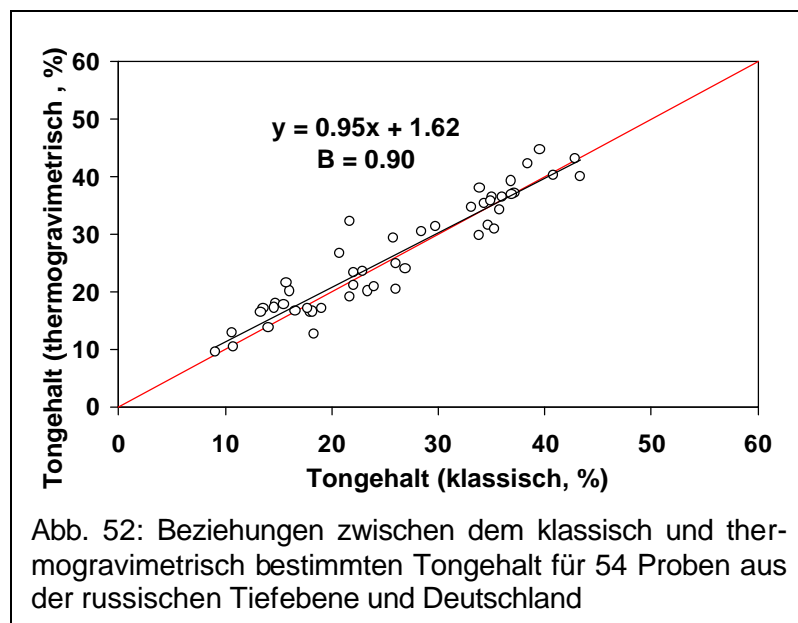
7.3.2. Tongehalt

Für die Abschätzung des Tongehaltes über thermische Gewichtsverluste lassen sich zwei Temperaturintervalle in den Temperaturbereichen A (gebundenes Wasser) und C (Humusstoffe) nutzen. Beide TI liefern Ergebnisse mit annähernd gleicher Genauigkeit. Eine Gegenüberstellung kann daher zur gegenseitigen Kontrolle von Ergebnissen verwendet werden (s. Abschnitt 7.3.4., S. 92).

Abb. 52 zeigt die Beziehungen zwischen den GV im TI 120-130°C und klassisch bestimmten Tongehalten. Deutlich erkennbar ist die Beziehung weniger eng, als bei der Abschätzung des C-Gehaltes. Die ermittelten Bestimmtheitsmaße überschritten selten ein Bestimmtheitsmaß von 0.9.

Die damit verbundene Genauigkeit der thermogravimetri-

schen Bestimmung des Tongehaltes liegt im Mittel bei $\pm 4\%$ Ton bei Einzelproben über $\pm 10\%$.



Die Ursachen der Variationen in Abb. 52 ließen sich bisher nicht eingrenzen.

Ein großer Teil der Residuen geht aber vermutlich auf Unzulänglichkeiten der klassischen Tongehaltsbestimmung zurück. So ist der Variationskoeffizient der Ergebnisse beim Vergleich mehrerer Probennahmeterminen bei beiden Methoden gleich groß. Die Schwankungsbreite lag im Mittel bei $\pm 2\%$ Ton mit Maxima bis 7% (beide Methoden).

Beide Methoden liefern demnach Unsicherheiten bei Untersuchung von Proben mit definitiv gleichem Tongehalt. Bei einer Bewertung der Tonbestimmung mittels Thermogravimetrie ist daher die Eichung an einer klassischen Methode zu berücksichtigen. Für eine Erhöhung der Bestimmungsgenauigkeit mittels Thermogravimetrie sind Verbesserungen der klassischen Tonbestimmung unumgänglich.

7.3.3. Sonstige Bodeneigenschaften

Analog zur Abschätzung des C- und Tongehaltes ist auch eine Abschätzung des N_t - und Karbonatgehaltes von Bodenproben möglich.

Für die Bestimmung des N_t - Gehaltes lassen sich annähernd gleiche Temperaturbereiche, wie bei der C_t - Bestimmung verwenden. Die ermittelten Bestimmtheitsmaße für Beziehungen zwischen thermischen GV und klassisch bestimmten N - Gehalten in Bodenproben liegen um $0.93 - 0.95$. Die damit erreichbare Genauigkeit der Abschätzung des N_t - Gehaltes liegt um $\pm 0.025\%$ N_t . Sie ist kleiner, als bei der C - Bestimmung und im Vergleich zur traditionellen N - Bestimmung relativ ungenau.

Bei der Karbonatbestimmung werden, wie bereits dargestellt, bekannte chemische Grundlagen genutzt (s. Abschnitt 6.1.2, S. 21). Problematisch ist eine mögliche Beeinflussung der Ergebnisse durch Beimengungen thermisch extrem stabiler organischer Substanz. Die damit verbundenen Gewichtsverluste können oberhalb von $650\text{ }^\circ\text{C}$ erhöhte Karbonatgehalte vortäuschen. Dies trifft insbesondere auf kontaminierte Böden zu, die thermisch stabilen Kohlenstoff in Kohlen, Schlacken, Ölen etc. enthalten. Solche Proben lassen sich jedoch durch integrierte Prüfverfahren der thermischen Analyse erkennen (s. Abschnitt 7.3.4., S. 92). Damit werden – anders als bei bisher üblichen Verfahren der Karbonatbestimmung - falsche Ergebnisse ausgeschlossen. Im Rahmen methodischer Erweiterungen ist eine Integration von Algorithmen zur Kompensation solcher Störungen vorgesehen, um auch in kritischen Proben den Karbonatgehalt mittels Thermogravimetrie quantifizieren zu können.

Die gegenwärtig erreichte Genauigkeit der Karbonat - C - Bestimmung für Proben ohne Beimengungen an bodenfremden Kohlenstoff liegt um $\pm 0.05\%$ Karbonat - C und ist damit rela-

tiv hoch. Bisher liegen aber nur wenige Erfahrungen zur Karbonatbestimmung mittels Thermogravimetrie vor, so dass ergänzende Untersuchungen notwendig sind.

7.3.4. Zuverlässigkeit der Ergebnisse und Prüfverfahren

Viele Schätzverfahren werden bei Bodenuntersuchungen wegen ihrer geringeren Arbeitsaufwendungen angewandt. Letzteres könnte auch auf die thermogravimetrische Bodenanalyse zutreffen.

Mit geringeren Aufwendungen sind jedoch häufig Unsicherheiten verbunden. So ist beispielsweise bei C-Bestimmung über den Glühverlust ein divergierender Tongehalt zu berücksichtigen. Beimengungen thermisch stabilen Kohlenstoffs lassen sich nicht erkennen und können Fehler verursachen. Aufwendigere Verfahren werden deshalb oft bevorzugt.

Hinsichtlich der Sicherheit der Ergebnisse bietet die thermogravimetrische Bodenanalyse Vorteile gegenüber anderen Methoden. Umfangreiche Prüfungen schränken die Möglichkeiten der Ausgabe fehlerhafter Ergebnisse ein.

Bei der C - Bestimmung werden beispielsweise folgende Kontrollen durchgeführt:

- a) Automatische Prüfung auf Einhaltung von Eichbereichen bei allen Gewichtsverlusten (mg/g) und dem Endergebnis (C-Gehalt in %)
- b) Parallele voneinander unabhängige Bestimmung des C-Gehaltes über mehrere Temperaturintervalle (GV im TI 350-360°C und im TI 220 - 440°C) mit anschließendem Vergleich der Ergebnisse.
- c) Prüfung auf Einhaltung der Beziehungen zwischen OBS Komponenten (zur Zeit werden GV in acht TI genutzt und fünf bilaterale Beziehungen zwischen OBS-Komponenten geprüft, siehe Abschnitt 6.1.4., S. 30).
- d) Überprüfung der Abhängigkeit der bestimmten OBS-Menge (25 – 550 °C) vom errechneten C_t-Gehalt und Tongehalt für die analysierte Probe (s. Abb. 16, S. 35).

Sind Abweichungen bei diesen Prüfungen oberhalb zulässiger Toleranzen nachweisbar, werden mit den Ergebnissen zur C-Bestimmung Warnungen ausgegeben. Bei mehreren oder sehr großen Abweichungen wird die Ausgabe von Ergebnissen mit einem Hinweis auf festgestellte Fehlerquellen unterbunden. In diesen Fällen ist eine Bestimmung des C-Gehaltes mittels anderer Methoden unumgänglich.

Dabei entfallen alle für die thermogravimetrische Analyse charakteristischen Kontrollmöglichkeiten. So liefert z.B. die erheblich aufwendigere klassische C-Bestimmung keinerlei Hinweise auf eventuelle Beimengungen an bodenfremden, thermisch extrem stabilen Kohlenstoffe, die das Bestimmungsergebnis verfälschen können.

Analog dazu wird bei der Ermittlung anderer Bodeneigenschaften vorgegangen (Ausnahme: beim Karbonatgehalt wird bisher nur die Einhaltung von Eichbereichen geprüft und die Ergebnisausgabe bei Hinweisen auf bodenfremden Kohlenstoff gesperrt).

Auf diese Weise wird eine hohe Zuverlässigkeit der Ergebnisse garantiert.

Die Vielfalt implementierter, teils miteinander vernetzter Prüfungen (s. weiter unten) ermöglicht eine sichere Diagnose sehr vieler Störungen (z.B. auch einzelner Fehlbedienungen der Thermowaage, Störungen im Heizprogramm, Datenausfälle, etc.). Selbst eine gegenwärtig noch unzulässige Anwendung der TGBA für organische Auflagen, Pflanzensubstanzen, Komposten etc. läßt sich erkennen.

Eine Ausnahme stellen hydromorphe Böden dar. Hier traten bei ca. 10 % der Proben Ergebnisse außerhalb zulässiger Toleranzen auf, die nicht als fehlerhaft erkannt wurden. Eine Analyse hydromorpher Böden mit der TGBA ist daher bis zur Implementierung neuer Prüfalgorithmen nicht zu empfehlen.

Zusätzliche experimentelle Aufwendungen oder Fachkenntnisse sind für die Durchführung der Prüfungen nicht notwendig. Das Programm enthält eine Datenbank mit Parametern, Eichbereichen, Konfidenzintervallen etc. und führt die Berechnungen automatisch durch. Optionale Programmeinstellungen ermöglichen jedoch eine Modifikation der Entscheidungskriterien (z.B. Ausschalten einzelner Prüfungen, Veränderungen der Konfidenzintervalle) und damit eine Modifikation des Niveaus der Zuverlässigkeit (Details siehe 129 oder www.tgba.de).

7.4. Anwendungsbeispiele

Die bisher vorgestellten Untersuchungen ließen – mit Ausnahme hydromorpher Böden - keine Hinweise auf eine beschränkte Anwendbarkeit der thermogravimetrischen Bodenanalyse (TGBA) erkennen. Im Gegenteil, die Vergleichbarkeit von Ergebnissen innerhalb einzelner Standorte und über mehrere Klimaregionen (s. z.B. Abb. 46, S. 83) sowie der Nachweis von Beziehungen zwischen OBS-Komponenten und gebundenem Wasser in mehreren Klimaregionen läßt auf ein breites Spektrum von Anwendungsmöglichkeiten schließen.

Um Beschränkungen zu erkennen, wurden Standorte mit extremen Klimabedingungen in die Verfahrensprüfung einbezogen. Bei den folgenden Ergebnissen handelt es sich folglich um Beispiele, die Anwendungen der TGBA in Grenzsituationen markieren. Dadurch werden bestehende Einschränkungen, aber auch Erweiterungsmöglichkeiten besonders deutlich.

7.4.1. Antarktische Böden

In Zusammenarbeit mit dem Institut für Polarforschung in Kiel wurden Bodenproben aus der Antarktis untersucht (19). Es handelt sich um Probenmaterial aus einer Tiefe von 0-5 cm, das das gesamte, sehr steinhaltige (15 - 43 % Steine) Bodenprofil erfasst.

Abb. 53 zeigt die Variationen des C-Gehaltes und der Menge umsetzbarer OBS - Komponenten in den untersuchten Proben. Letztere wurden aus zwei Transekten (A und B) entnommen, die jeweils Böden mit zunehmendem

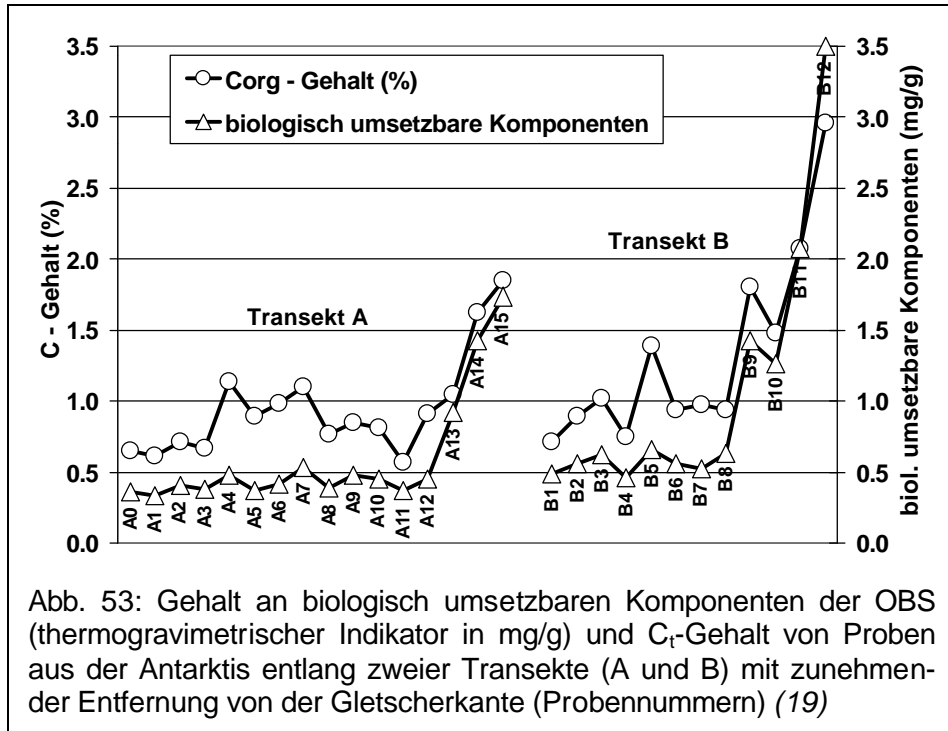


Abb. 53: Gehalt an biologisch umsetzbaren Komponenten der OBS (thermogravimetrischer Indikator in mg/g) und C_t-Gehalt von Proben aus der Antarktis entlang zweier Transekte (A und B) mit zunehmender Entfernung von der Gletscherkante (Probennummern) (19)

Abstand von der Gletscherkante (ansteigende Probennummern) auf dem King George Island (maritime Antarktis) bis zu einer Entfernung von ca. 500 m beschreiben.

Die C_t-Gehalte sind sehr unterschiedlich. Sie zeigen eine von vielen Ausnahmen geprägte zunehmende Tendenz mit der Entfernung vom Gletscher (ansteigende Probennummern). Die C_t - Gehalte liegen innerhalb der für Böden mit gleichem Tongehalt charakteristischen Größenordnungen.

Die Gehalte an umsetzbarer Substanz sind hingegen ungewöhnlich klein und nehmen mit deutlich weniger Ausnahmen mit der Entfernung vom Gletscher zu (19).

Abb. 54 zeigt die bereits mehrfach verwendete Beziehungen zwischen Anteilen umsetzbarer und humifizierter Komponenten mit Konfidenzintervall (Toleranzbereich) sowie die eingezeichneten Punkte der analysierten antarktischen Böden.

Deutlich erkennbar liegen alle Punkte außerhalb des Konfidenzintervalls. Proben mit den größten Abweichungen zeigen die kleinsten Anteile an umsetzbarer Substanz (nicht dargestellt) und befinden sich in unmittelbarer Gletschnähe. Bei den am weitesten entfernten Proben finden sich umgekehrte Verhältnisse. Probe A 14 zeigt die geringsten Abweichungen.

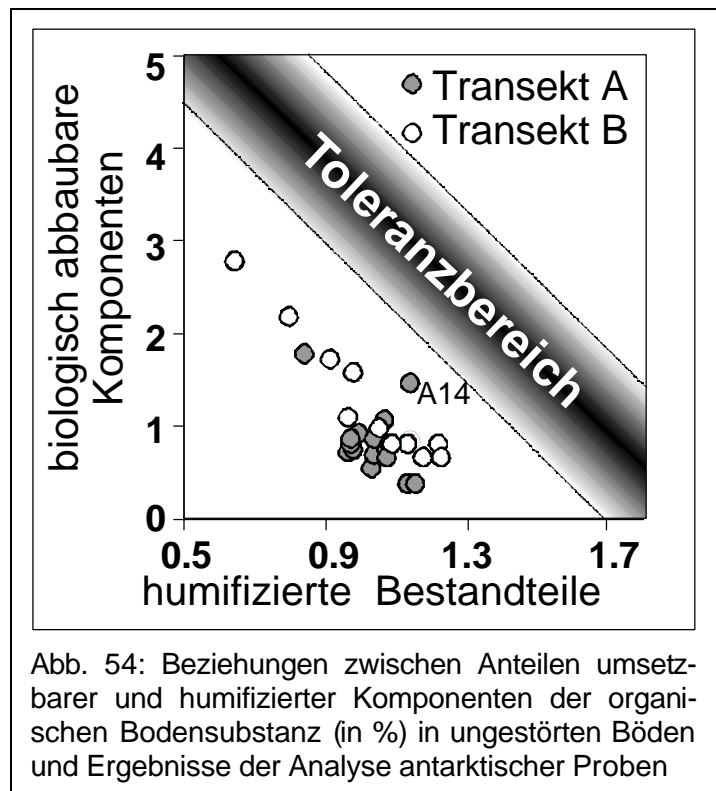
Darauf aufbauend ergeben sich folgende Schlussfolgerungen:

- Es liegt eine untypische Zusammensetzung der OBS vor oder die Charakterisierung der OBS ist gestört
- Die Anteile an umsetzbarer Substanz sind reduziert bzw. unnormal niedrig
- Der Grad der Abweichungen von einer "normalen" OBS bzw. einer Störung ihrer Zusammensetzung nimmt mit zunehmender Entfernung von der Gletscherkante ab.

Im Gegensatz dazu wurde ursprünglich mit Analysenergebnissen innerhalb des Konfidenzintervalls gerechnet, weil keine Informationen über eine gestörte Bodenbildung vorlagen. Diese These erwies sich jedoch als falsch und die Schlussfolgerungen der thermogravimetrischen Analyse als eine plausiblere Beschreibung von Spezifika der OBS in Böden der Antarktis, wie folgende Ausführungen zeigen.

Bei den untersuchten Böden aus der Antarktis ist zwar kein nennenswerter Einfluss menschlicher Tätigkeit auf die Bodenbildung bekannt. Das Niveau biologischer Bodenbildungsprozesse ist jedoch - im Unterschied zu den Böden gemäßigter Klimate - außerordentlich gering, d.h. im Vergleich zu geologischen und anderer standortspezifischen Faktoren (z.B. Pinguinkolonien) vernachlässigbar.

Dies zeigt sich bei einer Bewertung grundlegender Voraussetzung für eine Akkumulation von organischem Kohlenstoff. Die klimatischen Bedingungen sind sehr ungünstig. Eine Bodenbedeckung ist bei vielen Proben gar nicht oder nur teilweise vorhanden. Sie liegt bei den Proben



1 - 4 weit unter 1 % (einschließlich Flechten), steigt jeweils erst ab Probe 8 deutlich an und erreicht im Transekt A bei Probe 14 Werte nahe 100 %.

In Gletschernähe ist demnach eine durch biologische Prozesse initiierte Akkumulation von OBS und Bodenbildung im üblichen Sinne wenig plausibel. Dies läßt vermuten, dass die akkumulierte organische Substanz nicht auf autochthone Bodenbildung zurück geht, sondern aus einer Akkumulation von Sedimenten aus dem abschmelzenden Gletscher resultiert.

Alternativ lassen sich die sehr geringen Gehalte an umsetzbarer Substanz mit einer reliktschen Bodenbildung in einer früheren wärmeren Klimaperiode und anhaltender biologischer Aktivität im Boden unterhalb des Gletschers (in Folge des Wärmetransportes aus dem Erdinnern und der Isolationswirkung dicker Eisschichten) erklären. So zeigten sich ähnliche Abweichungen von der Beziehung zwischen umsetzbaren zu humifizierten Komponenten bei der Untersuchung reliktscher Schwarzerden in der Uckermark (128).

Bestätigt wird die Plausibilität beider Überlegungen durch Untersuchungen zur mikrobiellen Aktivität. Sie ist sehr gering und korreliert mit der sehr kleinen Menge umsetzbarer Komponenten ($B = 0.82, 19$).

Darüber hinaus sind Wirkungen von Pinguinkolonien insbesondere in den Proben A 4 bis A 10 zu berücksichtigen. Selbst geringfügige Einträge von Nährstoffen (bei Pinguinkolonien teils extrem hoch) werden in der Antarktis nicht durch Pflanzenentzug kompensiert. Hierin unterscheiden sich die Bodenbildungsbedingungen der Antarktis von anderen Klimaregionen. Die Auswaschung von Nährstoffen ist dementsprechend sehr hoch. Es liegen folglich keine Nährstoffkreisläufe vor, die für eine Akkumulation von OBS in Ökosystemen mit sich selbst organisierenden Organismengesellschaften charakteristisch sind.

Unabhängig von den möglichen Ursachen der festgestellten Abweichungen bei der OBS scheint somit eine Kennzeichnung der Proben als abweichend von einer „normalen“ OBS - Akkumulation gerechtfertigt. Die TGBA liefert Schlussfolgerungen die Spezifika der OBS an der Grenze der Lebensfähigkeit von Organismen unter Einfluß reliktscher Bodenbildungsprozesse oder abschmelzenden Gletschermaterials beschreiben.

7.4.2. Böden der feuchten Tropen

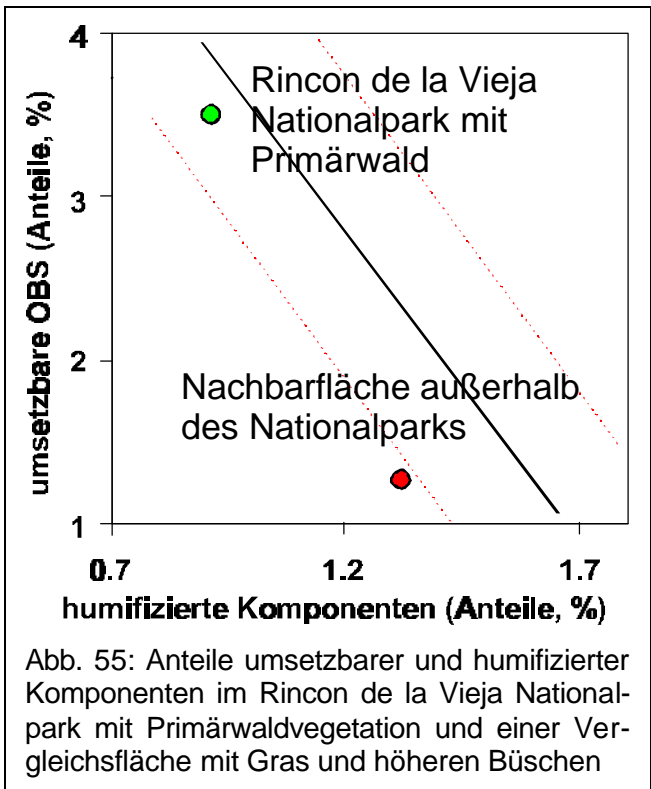
Abb. 55 zeigt Ergebnisse eines Bodens mit Primärwaldvegetation (vom Menschen weitgehend unbeeinflusst) aus dem Trocken-Regenwald im Rincon de la Vieja Nationalpark in Costa Rica und die Ergebnisse eines ackerbaulich genutzten Bodens in unmittelbarer Nähe.

Der Boden aus dem Nationalpark zeigt hohe Anteile umsetzbarer im Vergleich zu humifizierten Komponenten und somit für humide tropische Waldgebiete typische Merkmale.

Die Probe liegt zugleich innerhalb des Konfidenzintervalls. Dieser Aspekt verweist auf eine ungestörte OBS für den Fall, dass die Ergebnisse aus dem gemäßigten Klima auf tropische Verhältnisse übertragbar sind.

Die ackerbauliche Bodennutzung reduziert bekanntermaßen in tropischen Böden den Anteil umsetzbarer Komponenten. Die Reduktion der C-Gehalte fällt deutlicher aus, als im gemäßigten Klima (u.a. wegen der höheren Temperatur, guter Wasserversorgung, ständig hoher Aktivität der Bodenorganismen und geringeren Anteilen humifizierter, biologisch stabiler Bestandteile). Deshalb zählen abnehmende Gehalte an organischer Substanz zu den Hauptursachen einer nutzungsbedingten Reduktion der Bodenfruchtbarkeit innerhalb weniger Jahre und der Effizienz traditioneller Rotationsbrachen in tropischen Regionen.

Dieser Aspekt wird durch die Ergebnisse der thermogravimetrischen Analyse anschaulich bestätigt (s. Abb. 55). Die Anteile umsetzbarer Komponenten (Y-Achse) sind beim Vergleichsboden auf weniger als 50 % der ursprünglichen Menge reduziert. Dadurch steigt der Anteil der stabileren humifizierten Komponenten in der OBS und verursacht eine geringfügige Verschiebung der Vergleichsprobe nach rechts. Zusätzlich werden Abweichungen vom Konfidenzintervall der Beziehung sichtbar. Sie liefern eindeutige Hinweise auf eine nutzungsbedingte Veränderung der OBS.



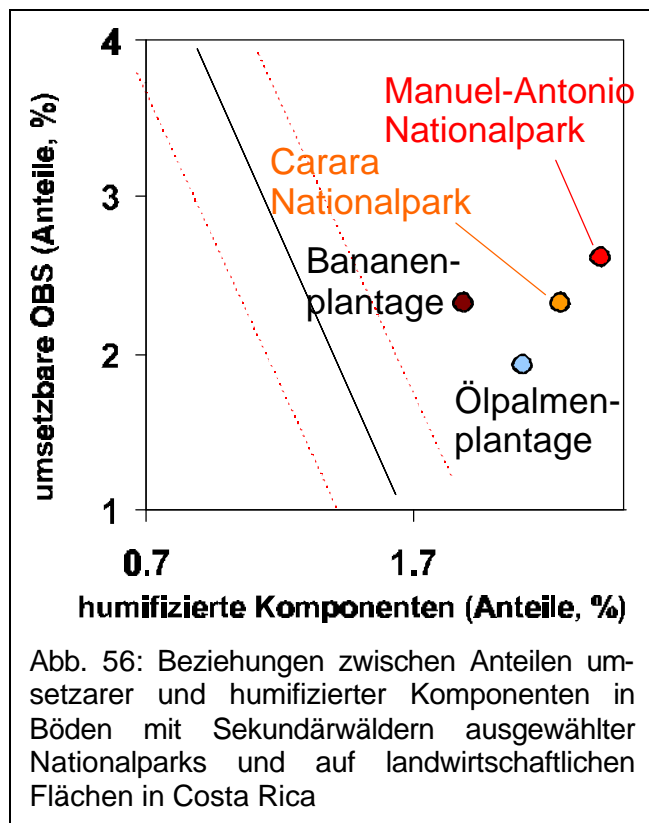
Die TGBA liefert demnach zu Böden der feuchten Tropen Ergebnisse, die sich mit Wirkungen der landwirtschaftlichen Bodennutzung erklären lassen und wichtige Informationen über den analysierten Boden und Veränderungen seiner OBS liefern.

Häufiger ist in landwirtschaftlich genutzten Böden der feuchten Tropen jedoch ein anderes Bild. Es dokumentiert zusätzliche, bisher nicht abschließend verifizierte Auswertemöglichkeiten der TGBA.

Die Böden vieler anderer Nationalparks zeichnen sich durch eine sekundäre Waldvegetation nach Brandrodung und eine sehr unterschiedliche Nutzungsgeschichte aus. Die Waldvegetation kompensiert den Rückgang umsetzbarer Komponenten. Gleiche Effekte lassen sich teilweise durch Maßnahmen des Ackerbaus erreichen (z.B. Zufuhr organischer Dünger). Mit steigendem Anteil umsetzbarer organischer Substanz nähert sich die Zusammensetzung der OBS ursprünglichen Gegebenheiten an. Dennoch finden sich in diesen Böden häufig deutliche Abweichungen vom Konfidenzintervall der Beziehungen zwischen umsetzbaren und humifizierten Komponenten.

Abb. 56 dokumentiert dazu einige Beispiele. Im Unterschied zu Abb. 55 liegen die Abweichungen der Punkte vom Konfidenzintervall in Richtung größerer Anteile humifizierter Komponenten.

Wahrscheinlichste Ursache dieser Modifikationen ist die Akkumulation von Holzkohle durch die in feuchten Tropen übliche Brandrodung. Holzkohle ist thermisch stabil und täuscht dadurch bei der thermogravimetrischen Analyse erhöhte Gehalte an Humusstoffen vor. In Böden mit ausreichender Versorgung an umsetzbaren Komponenten zeigen sich daher Wirkungen einer Brandrodung typischerweise in Abweichungen, wie aus Abb. 56 ersichtlich.



Ähnliche Ergebnisse wurden auch in Böden mit Holzkohle aus Deutschland und aus dem Amazonas-Gebiet gefunden. Die TGBA liefert demnach nicht nur Informationen zu Veränderungen umsetzbarer Komponenten, sondern auch zu anderen Aspekten der Bodennutzung.

Die Interpretation solcher Veränderungen der OBS ist jedoch sehr kompliziert. So setzt der Nachweis einer Brandrodung die Einbeziehung weiterer Beziehungen zwischen OBS-Komponenten voraus, um alternative Erklärungsmöglichkeiten auszuschließen.

So waren **erstens** bei den in Abb. 56 dargestellten Proben keine Abweichungen von der Beziehung zwischen Anteilen umsetzbarer Komponenten und gebundenen Wassers (vergl. Abb. 12, S. 32) nachweisbar (nicht dargestellt). Damit sind erhöhte Anteile umsetzbarer Komponenten als Ursache der Abweichungen in Abb. 56 unwahrscheinlich. Diese Argumentation ließ sich **zweitens** durch Einbeziehung der multiplen Beziehung zwischen dem thermogravimetrischen Gesamtgewichtsverlust, dem C- und Tongehalt (Abb. 16, S. 35) bestätigen. **Drittens** lieferte die Tongehaltsbestimmung über die Menge humifizierter Komponenten höhere Werte im Vergleich zur Tonbestimmung über das gebundene Wasser. Erstere waren nicht plausibel (Tongehalte teils über 100 %). Eine Verbindung von Aussagen der multiplen Korrelationen mit der divergierenden Tongehaltsbestimmung bestätigte **viertens** darauf Schlussfolgerungen über eine Störung der OBS durch bodenfremden Kohlenstoff. **Fünftens** bestanden Abweichungen bei der Beziehung zwischen der absoluten Menge an Humusstoffen und der Menge gebundenen Wassers (Abb. 10, S. 30, Abschnitt 6.1.4.1.) in Richtung überhöhter Gehalte an Humusstoffen. Weil Holzkohle im Gegensatz zu Humusstoffen keine großen Mengen Wasser bindet, weisen diese Abweichungen auf Beimengungen bodenfremden Kohlenstoffs hin.

Aus diesen Überlegungen Ergebnissen lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen:

- Die Diagnostik einer nutzungsbedingt veränderten Zusammensetzung der OBS sollte nicht nur auf der Interpretation einzelner Beziehungen aufbauen. Wichtig ist eine Berücksichtigung möglichst aller Beziehungen zwischen OBS-Komponenten.
- Für die Analyse von Ursachen festgestellter Abweichungen ist eine Bewertung von Abweichungsmustern mehrerer Beziehungen unbedingt erforderlich.
- Dies setzt Erfahrungen zur Bedeutung einzelner Störfaktoren der Bodenbildung auf jeder der bei Auswertungen berücksichtigten Beziehung voraus.

Einige weiterführende Aspekte hierzu werden im Abschnitt 7.5, S. 101 erläutert.

7.4.3. Böden der trockenen Tropen

Im Unterschied zu den Böden der feuchten Tropen ist die Aktivität der Vegetation unter trockenen tropischen Bedingungen gering und die Zufuhr an biologisch umsetzbaren organischen Rückständen klein. Die kurze Generationszeit vieler Bodenmikroorganismen und ihre Adaptionfähigkeit an Umweltbedingungen erlaubt jedoch nach seltenen Niederschlägen eine biologische Zersetzung umsetzbarer Komponenten. Dementsprechend wurden in Böden der trockenen Tropen (Wüstenregion) sehr geringe Gehalte an umsetzbarer Substanz erwartet.

In Übereinstimmung mit diesen Überlegungen deutete sich in Abb. 46 (S. 83) eine tendenzielle Abnahme umsetzbarer Komponenten von der Waldsteppe in Richtung Trockensteppe an. Sie sollte sich beim Übergang in Wüstenregionen verstärken, wenn gleiche Gesetzmäßigkeiten gültig sind.

Um diese Überlegungen zu verifizieren wurden 33 Vertisole aus einem Nord – Süd - Transekt durch die Gezira - Region zwischen dem Weißen und Blauen Nil analysiert (39).

Im Unterschied zu vielen anderen Untersuchungen bestätigte bei diesen Böden bereits die Dynamik thermische Gewichtsverluste Erwartungen hinsichtlich sehr geringer Gehalte an umsetzbarer OBS.

Die GV in den TB A und C sind vom Tongehalt bzw. tonabhängig akkumulierten Humusstoffen abhängig. Sie sind daher bei den analysierten

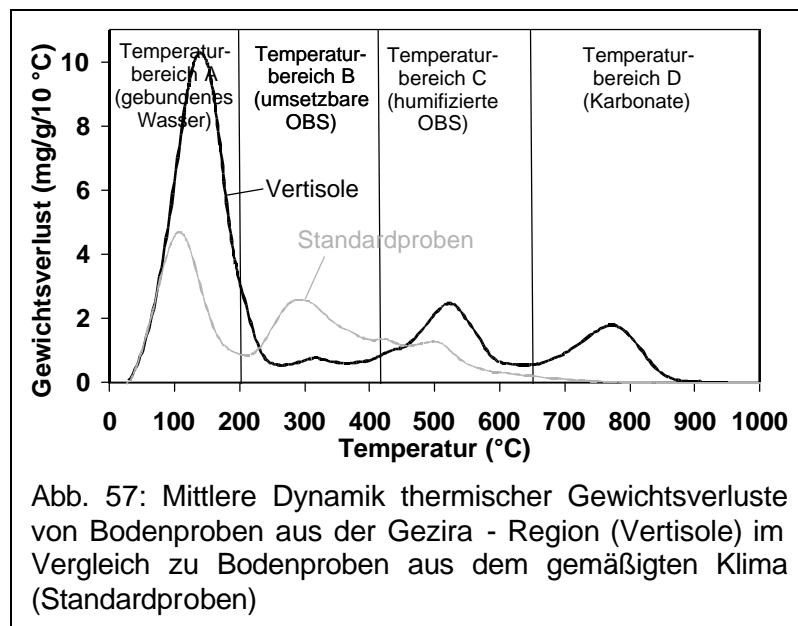


Abb. 57: Mittlere Dynamik thermischer Gewichtsverluste von Bodenproben aus der Gezira - Region (Vertisole) im Vergleich zu Bodenproben aus dem gemäßigten Klima (Standardproben)

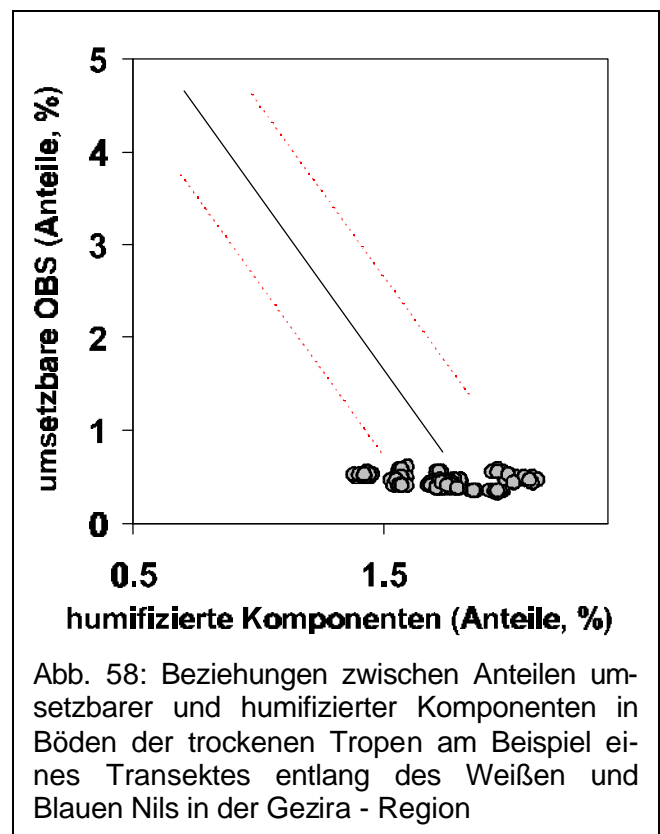
Vertisolen in Abb. 57 sehr hoch (größer als bei den Standardproben). Die GV im TB B zeigen hingegen sehr kleine Werte unterhalb des Niveaus von Böden gemäßigter Klimate.

Diese Ergebnisse spiegeln sich in der Beziehung zwischen Anteilen umsetzbarer und humifizierter Komponenten der OBS wider (Abb. 58). Dabei werden Spezifika der OBS deutlich. Sie zeigen sich nicht nur in geringen Anteilen umsetzbarer Komponenten, sondern zugleich in hohen Anteilen an humifizierten Komponenten.

Durch diese Besonderheiten sind die Proportionen zwischen umsetzbaren und humifizierten Komponenten zu Gunsten der humifizierten Bestandteile verschoben und die Punkte der analysierten Vertisole liegen in Abb. 58 in der rechten unteren Ecke. Demnach setzten sich im gemäßigten Klima festgestellte Tendenzen zur Reduktion umsetzbarer Anteile bei zunehmender Trockenheit in trockenen tropischen Wüstenregionen fort. Bei feuchten tropischen Bedingungen finden sich entgegengesetzte Verhältnisse (vergl. mit Abb. 55, S. 97).

Infolge der extrem trockenen Bedingungen liegen in Abb. 58 alle Punkte außerhalb der für Böden gemäßiger Klimate ermittelten Skalenbereiche. Die Überschreitungen der (verlängerten) Konfidenzintervalle sind hingegen gering und nur bei einzelnen Proben nachweisbar.

Es bleibt nunmehr zu klären, ob die untersuchten Böden als vom Menschen ungestört betrachtet werden können und die Annahme einer autochthonen Bodenbildung berechtigt ist. Trifft dies zu, ist eine Erweiterung der Korrelation und damit der Anwendungsmöglichkeiten der TGBA vorstellbar.



Zusammenfassend gehen die Ergebnisse der TGBA zu trockenen tropischen Böden mit ursprünglichen Erwartungen und bekannten Zusammenhängen konform. Die TGBA liefert Informationen zu einzelnen Standorten, die überregional gut vergleichbar sind.

7.5. Diagnostik von Artefakten

7.5.1. Nachweisbarkeit von Veränderungen der OBS

Die vorgestellten Anwendungsbeispiele zeigen, dass sich einzelne Wirkungen der Bodennutzung auf die OBS mittels thermogravimetrischer Untersuchungen identifizieren lassen. Es stellt sich daher die Frage, welche menschlichen und anderen Einflüsse mit welcher Sicherheit

nachgewiesen werden können bzw. in welchem Maße sich nachweisbare Abweichungen quantifizieren und für eine Bewertung der "Naturnähe" nutzen lassen. Die damit verbundenen Fragen sind sehr komplex und weitgehend ungelöst.

Der Nachweis von Veränderungen der OBS mittels TGBA ist – wie bereits dargestellt - an Überschreitungen der Konfidenzintervalle von Beziehungen zwischen OBS - Komponenten gebunden, die für weitgehend natürliche Böden ermittelt wurden. Kleinere Konfidenzintervalle begünstigen die Nachweisbarkeit von Veränderungen, setzten jedoch Untersuchungen von Böden mit großer "Naturnähe" voraus. Dieser Zustand "Naturnähe" lässt sich mit anderen Methoden bisher kaum bewerten. Nur selten wurden in der Literatur Böden ungestörter Ökosysteme in Untersuchungen zur Qualität der OBS einbezogen. Damit fehlen wichtige Voraussetzungen für eine Einengung der Konfidenzintervalle und folglich für eine verbesserte Nachweisbarkeit von Veränderungen.

Unabhängig davon sind mit der Herangehensweise bei der Auswertung thermogravimetrischer Daten weitere Probleme verbunden, die an einem Beispiel erläutert werden.

Das Problem: Die ackerbauliche Bodennutzung reduziert nicht nur die Anteile umsetzbarer Komponenten. Maßnahmen der Bodenbearbeitung, Brandrodung, organische Düngestoffe, Forstanpflanzungen etc. können auch den Gehalt thermisch stabiler Komponenten beeinflussen. Dabei kann es sich um Humusstoffe oder andere bodenuntypische Verbindungen (z.B. Schadstoffe, Pestizide, C in Aschen, Kohlerückstände) handeln. Reduzierte Anteile umsetzbarer Komponenten induzieren in der Beziehung zwischen umsetzbaren und humifizierten Komponenten Verschiebungen nach unten (vergl. Abb. 47, S. 85). Beimengungen thermisch stabiler Verbindungen (z.B. Beimengungen von Holzkohle) äußern sich in einer Verschiebung nach rechts. Treten beide Faktoren gemeinsam auf, ergibt sich eine Verschiebung nach rechts unten. Dadurch bleibt die analysierte Probe innerhalb des Konfidenzintervalls. Weder reduzierte Anteile umsetzbarer, noch überhöhte Anteile thermisch stabiler Komponenten lassen sich unter solchen Bedingungen nachweisen. Die Ergebnisse würden also naturnahe Verhältnisse vortäuschen, die nicht existieren.

Die Lösung: Mit solchen Aspekten verbundene Probleme lassen sich durch Einbeziehung anderer Beziehungen zwischen anderen OBS-Komponenten weitgehend einschränken.

Holzkohle verändert beispielsweise nicht oder nur unwesentlich die Menge umsetzbarer Komponenten noch die Menge gebundenen Wassers. Sie induziert lediglich höhere Ge-

wichtsverluste bei hohen Temperaturen und täuscht dadurch überhöhte Gehalte an humifizierten Komponenten vor. Daraus folgt, die für natürliche Böden charakteristische Beziehung zwischen umsetzbaren Komponenten und gebundenen Wasser bleibt bei Holzkohlebeimengungen bestehen.

Wird also eine Überlagerung von Holzkohlebeimengungen und reduzierter Anteil umsetzbarer Komponenten vermutet (z.B. in Folge ackerbaulicher Bodennutzung), ist die Beziehung zwischen umsetzbaren Komponenten und humifizierten Bestandteilen nicht auswertbar. Jedoch lassen sich beide Veränderungen über die Beziehungen zu Anteilen gebundenen Wassers diagnostizieren. Mit anderen Worten liefern Abweichungen von der Beziehung umsetzbare Komponenten – gebundenes Wasser Interpretationshilfen Hinweise auf Veränderungen umsetzbarer Komponenten während Holzkohle zu Abweichungen bei der Beziehung gebundenen Wassers zu thermisch stabilen Bestandteilen führt.

Eine Einbeziehung mehrerer Beziehungen potenziert somit die diagnostischen Möglichkeiten für multiple Veränderungen.

Schwächen: Mit der Anzahl sich überlagernder Veränderungen der OBS bzw. mit der Naturferne wächst jedoch der Aufwand und die Komplexität bei der Auswertung. Gleichzeitig steigt der Bedarf an interpretierbaren Beziehungen zwischen OBS-Komponenten. Die Anzahl dieser Beziehung ist aber begrenzt. Desweiteren setzt das oben dargestellte Beispiel eine Verifikation der Aussagen durch weitere Beziehungen voraus. Für den Nachweis einer Überlagerung von zwei Faktoren (z.B. reduzierte Anteile umsetzbarer Substanz und Holzkohlebeimengungen) sind somit mindestens 4 Beziehungen notwendig.

Darüber hinaus muss für jede zu identifizierende Störung der Charakter der Abweichungen von den einzelnen Beziehungen bekannt sein. Dies setzt Untersuchungen zu Böden voraus, die sich nur durch die Beeinflussung eines einzelnen Faktors unterscheiden oder klar definierbaren Kombinationen mehrerer, einzeln quantifizierbarer Störungen unterliegen.

Diesbezügliche Untersuchungen sind bisher völlig unzureichend, geeignete Untersuchungsobjekte nur selten nachweisbar. Letztere müssen zudem in mehreren Klimaregionen auf unterschiedlichen Ausgangssubstraten unter divergierender Vegetation vorhanden sein, um die Unabhängigkeit der Interpretationen von Bodenbildungsfaktoren verifizieren zu können.

Sehr viele Böden wurden bereits durch multiple Wirkungen der menschlichen Tätigkeit (land- und forstwirtschaftliche Nutzung, Düngung, Bearbeitung, Belastung mit Pestiziden, Immissionen von SO₂, Ozon, etc.) beeinflusst. In vielen Fällen sind daher zwar Abweichun-

gen nachweisbar. Eine Zuordnung von festgestellten Veränderungen zu Störfaktoren jedoch sehr schwierig. Insbesondere kombinierte Störungen der OBS lassen sich gegenwärtig nur selten Ursachen zuordnen (erste mögliche Ausnahme: gleichzeitiges Auftreten reduzierter Anteile umsetzbarer Komponenten und Anreicherung mit Holzkohle).

Gleichzeitig bestehen auch bei vielen monokausalen Veränderungen der OBS gegenwärtig nur eingeschränkte Interpretationsmöglichkeiten. Bei vielen Faktoren (z.B. saurer Regen, Pestizide) sind Veränderungen thermogravimetrischer Kenngrößen der OBS noch nicht bekannt.

Untersuchungen zu hydromorphen Böden führten beispielsweise nicht zu den erwarteten Ergebnissen. Hydromorphie äußert sich in sehr unterschiedlichen Veränderungen, die von Reduktionsprozessen mineralischer Komponenten mit Auswirkungen auf die Dynamik thermischer Gewichtsverluste bis zur Akkumulation von Torfen reichen. Hinzu kommen mögliche Wirkungen von Erosionsprozessen, unterschiedliche nutzungsbedingte Veränderungen, Immissionen und andere Aspekte, deren Wirkungen sich bisher nicht voneinander trennen ließen. Die bisher vorliegenden Erfahrungswerte reichen demnach nicht, um Auswirkungen der Hydromorphie auf die OBS zu bewerten. Demnach sind thermogravimetrische Analyseergebnisse für hydromorphe Böden gegenwärtig nur teilweise verwertbar.

Konsequenzen: Um diese Schwächen auszugleichen, werden durch die Software gegenwärtig insgesamt **14** Korrelationen ausgewertet, davon sechs Beziehungen von GV zu Bodeneigenschaften (s. Abschnitt 6.1.5., S. 34), fünf bilaterale Beziehungen zwischen OBS-Komponenten (s. z.B. Abb. 6.1.4., S. 30 und Abb. 59, S. 105) und drei multiple Beziehungen. Ein darauf aufbauender Nachweis von Veränderungen der OBS wird zwar als unbefriedigende, jedoch gegenwärtig beste Möglichkeit gewertet, Abweichungen der OBS von den Verhältnissen in Böden natürlicher, vom Menschen unbeeinflusster Ökosysteme zu definieren.

7.5.2. Anwendungsbeispiele

7.5.2.1. Analyse von Straßenfugenmaterial

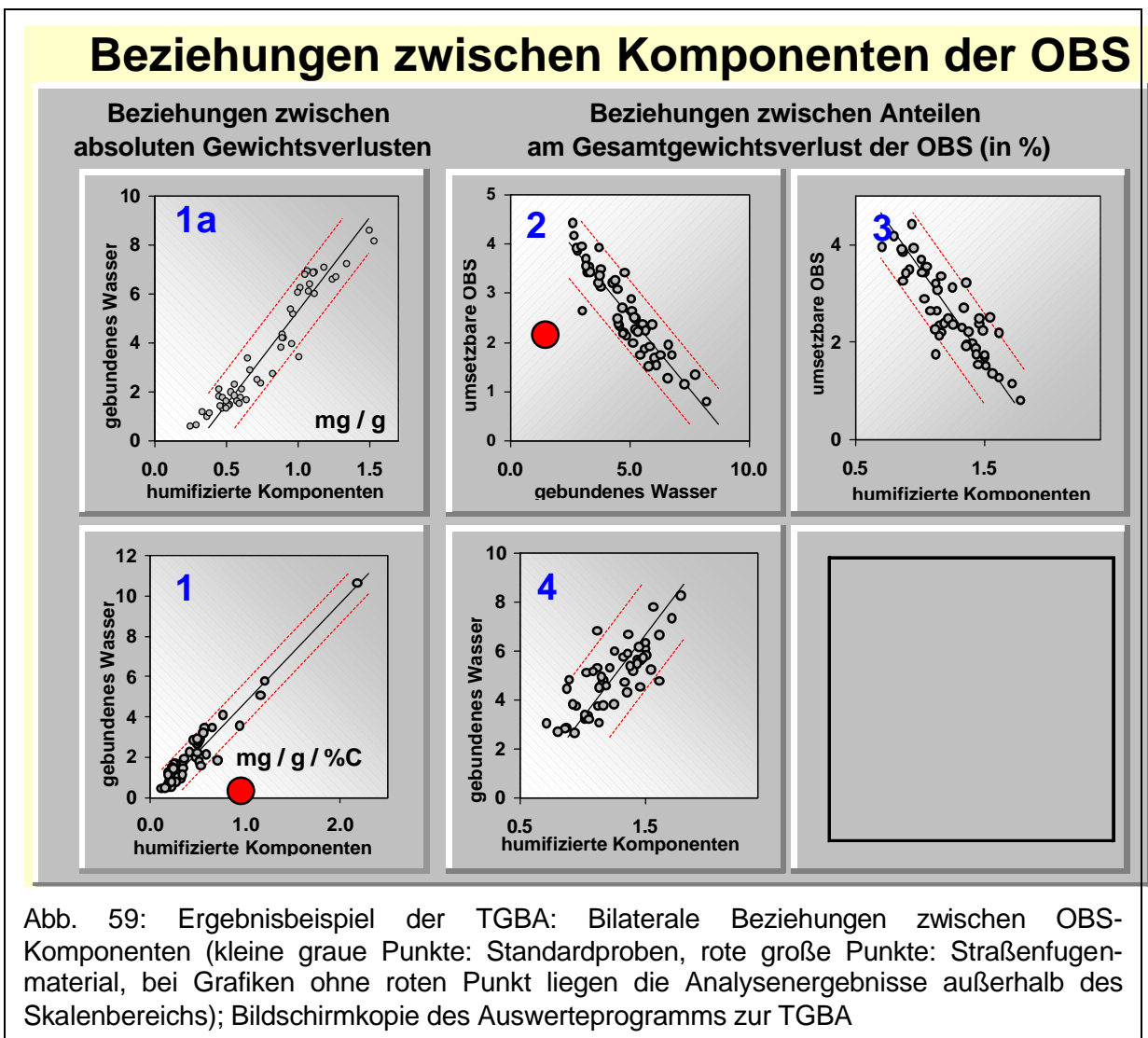
Mit der oben dargestellten Verfahrensweise ergaben sich bisher keine Fehlinterpretationen. Dies trifft insbesondere Bodenproben zu, bei denen traditionelle Analyseverfahren keine signifikanten Unterschiede zu natürlichen Böden zeigten, obwohl solche vorlagen.

Abb. 59 dokumentiert dazu ein Beispiel. Es handelt sich um die Analyse von Straßenfugenmaterial, das von Herrn Prof. Wessolek zur Verfügung gestellt wurde. Es unterscheidet sich

äußerlich nicht von einem humusreichen Sandböden und zeigt hinsichtlich des C-, N- und Tongehaltes sowie anderer Kenngrößen (KAK, pH etc.) keine Unterschiede zu Böden.

Dargestellt sind in Abb. 59 die fünf in der Auswertung thermogravimetrischer Analysen berücksichtigten bilateralen Beziehungen zwischen OBS-Komponenten. Zu Vergleichszwecken wurden die Ergebnisse der Standardproben (graue Punkte) eingezeichnet. Sie waren für die Definition der Konfidenzintervalle ausschlaggebend (95 % der Punkte liegen innerhalb der Begrenzungen). Die Analysenergebnisse des Straßenfugenmaterials sind durch große rote Kreise markiert.

Aus den einzelnen Teilabbildungen gehen massive Abweichungen bei allen Beziehungen zwischen thermogravimetrisch identifizierten Komponenten des Straßenfugenmaterials hervor. In drei der fünf Beziehungen führen die Abweichungen beim Straßenfugenmaterial zu einem Wert weit außerhalb der Skalierung, so dass kein großer roter Punkt zu sehen ist.



Der Nachweis einer gestörten Zusammensetzung der OBS ist damit eindeutig, die organische Substanz des Straßenfugenmaterials hat eine andere Zusammensetzung als die OBS natürlicher Böden.

Die Ursachen der festgestellten Unterschiede (Anreicherung von Ruß?, Gummiabrieb?, veränderte umsetzbare Komponenten?, Kontamination mit Schadstoffen?, veränderte Artenzusammensetzungen etc.) sind hingegen nicht identifizierbar.

Das Auswerteprogramm lieferte daher bei dieser Probe nur wenig Informationen. Sie werden an Hand der folgenden Abb. 60 dokumentiert. Die entsprechenden Hinweise auf registrierte Abweichungen werden mit einer geschätzten relativen Wahrscheinlichkeit ausgegeben, um einen Vergleich mit anderen Substraten zu vereinfachen.

Identifizierte Störungen

Startseite / Menü

Größe Überschreitung eines Toleranzbereiches:
7.4 -fache eines Grenzwertes (extrem große Störung)

GesamtFehlerIndex
238.6 overscaling!

Anmerkungen

Die Aussagen der festgestellten Abweichungen sind widersprüchlich! Der Fehlerindex ist zu groß!
Die Diagnostik von Störungen ist unvollständig (Es fehlen Erfahrungswerte zu festgestellten Abweichungsmustern!)

Fehlerprüfung aus
Toleranz erhöhen
Toleranz verringern
→ Programmoptionen

Störungen

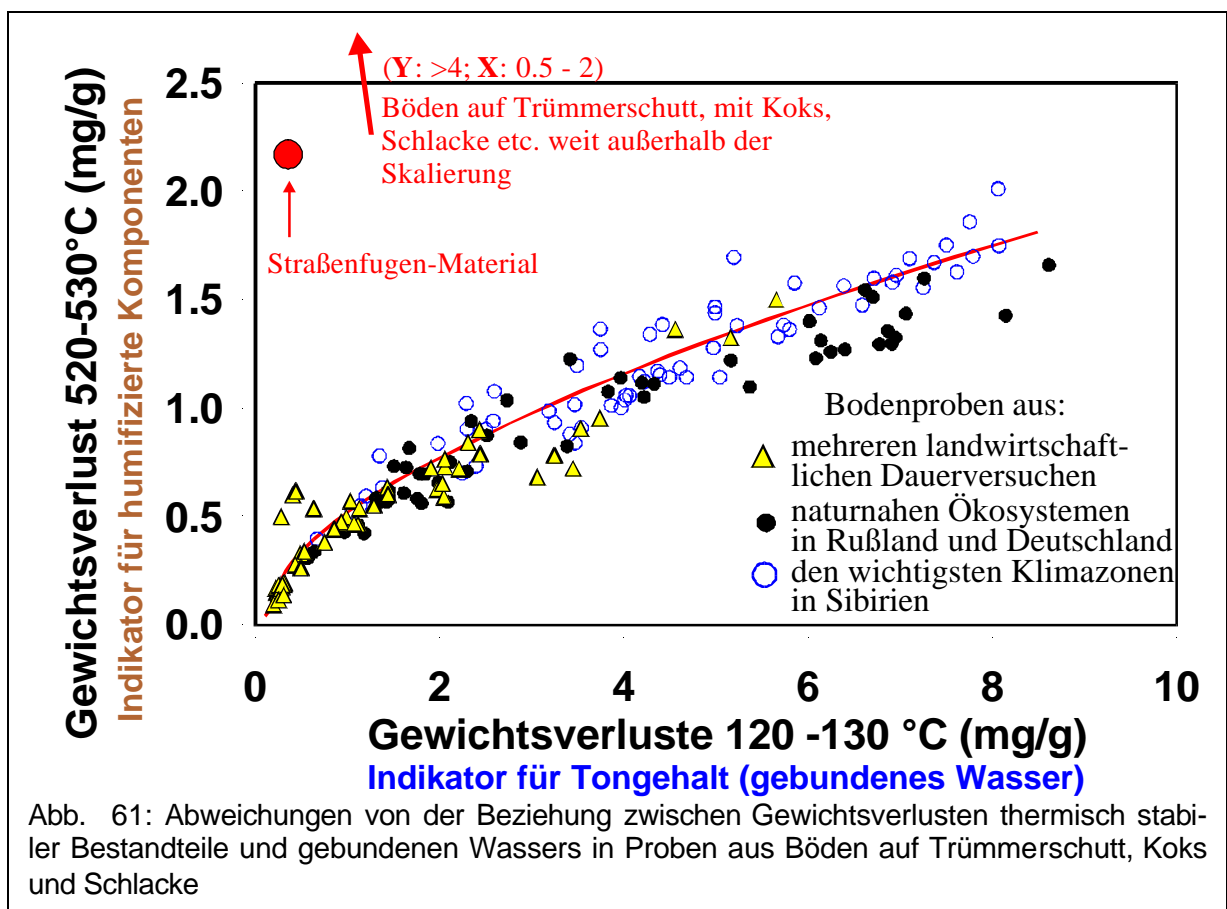
Nr.	Größe ¹⁾		Art der Störung	Bewertung der Störung
	%	abs.		
1	92	6.8	selektiver Abbau organischer Bodensubstanz oder Anreicherung mit bodenfremden Komponenten	extrem große Störung
2	76	5.6	Die Menge an humifizierten bzw. thermisch stabilen Komponenten ist zu groß	signifikant, sehr große Störung
3	68	5.0	Die Menge biologisch umsetzbarer Komponenten ist zu groß	signifikant, sehr große Störung
4	68	5.0	Die gemessenen Gesamtgewichtsverluste sind zu klein	signifikant, sehr große Störung
5	67	4.9	Die Menge gebundenen Wassers ist zu klein	signifikant, sehr große Störung
6	8	0.6	Die Gewichtsverluste zur Bestimmung des C-Gehaltes sind zu klein	eventuell noch vernachlässigbar

Größe¹⁾: Größe der Störung in %: relativ zur größten Abweichung (abzüglich widersprüchlicher Ergebnisse)
absolut: Überschreitung um das x-fache der zulässigen Toleranzgrenze

Abb. 60: Ergebnisbeispiel der TGBA zu Straßenfugenmaterial. Identifizierte Veränderungen im Vergleich zur OBS natürlicher, vom Menschen unbeeinflusster Böden. (Kopie der Bildschirmausgabe des Auswerteprogramms zur TGBA).

7.5.2.2. Analyse von Böden auf anthropogenen Substraten und anderen Substraten
Abbildung Abb. 61 zeigt ausgewählte Ergebnisse zu Bodenproben mit Beimengungen unterschiedlicher Substrate, die von Frau Mekiffer zur Verfügung gestellt wurden. Sie werden hier mit 3 Probenkollektiven zu Böden verglichen. Grundlage des Vergleichs ist die Beziehung zwischen Gewichtsverlusten thermisch stabiler Komponenten und gebundenem Wasser.

Die Abbildung bestätigt, dass unterschiedliche Probenkollektive relativ ähnliche Ergebnisse hinsichtlich der Proportionen zwischen den Indikatoren für thermisch stabile Komponenten und gebundenes Wasser liefern. Alle Ergebnisse zu Böden lassen sich durch eine mathematische Funktion beschreiben. Gleichzeitig wird deutlich, dass sich „Böden“ auf Trümmerschutt, Koks und mit Schlacke Beimengungen sehr deutlich von Böden ohne anthropogene Beimengungen unterscheiden. Die Abweichungen sind so groß, dass alle Punkte weit außerhalb der Skalierung für die Abbildung liegen. Ursache sind hohe Gewichtsverluste zwischen 510 und 520 °C über 4 mg/g bei Böden mit anthropogenen Substraten, die auf Beimengungen an thermisch stabilen Kohlenstoff hinweisen. Analoge Ergebnisse ergaben sich bei mehreren anderen Beziehungen.



Bei Einbeziehung von Pflanzensubstanzen, Komposten und anderen Substraten ergaben sich ähnliche Ergebnisse. Höhe und Richtung der Abweichungen und die Art der betroffenen Beziehungen waren von den untersuchten Substanzen abhängig.

Die Höhe festgestellter Abweichungen sinkt möglicherweise mit der Ähnlichkeit zu Böden. So waren beispielsweise bei Pflanzensubstanzen stets extrem hohe Gehalte an umsetzbarer Substanz nachweisbar. Bei Komposten fanden sich im Vergleich zu Pflanzensubstanzen deut-

liche kleinere Anteile biologisch umsetzbarer Komponenten und eine Reduktion der absoluten Gewichtsverluste des Indikators umsetzbarer Bestandteile mit steigendem Rottegrad. Dennoch blieben auch bei den Komposten die Anteile umsetzbarer Komponenten signifikant höher als in Böden.

Untersuchungen zu organischen Auflagen von Waldböden zeigten ebenfalls von der OBS aus Mineralböden verschiedene Ergebnisse. Die absoluten Messwerte für umsetzbare Substanz (Gewichtsverluste um 280 °C) waren stets höher als in Mineralböden und der Verlauf der thermischen Gewichtsverluste den Pflanzensubstanzen sehr ähnlich. Bei räumlicher Annäherung an Ah-Horizonte gingen die extremen Werte für umsetzbare Bestandteile zurück, erreichten jedoch nicht das Niveau der Mineralbodenhorizonte, die Abweichungen von den Beziehungen zwischen Komponenten blieben signifikant.

Diese Ergebnisse zeigen, dass eine Unterscheidung der organischen Bodensubstanz von organischen Substanzen anderer Herkunft ungeachtet der extremen Heterogenität mittels Thermogravimetrie möglich sein könnte. Jedoch sind dafür weitere Entwicklungsarbeiten insbesondere hinsichtlich der Auswertelgorithmen thermogravimetrischer Analysen erforderlich.

7.5.3. Zusammenfassung, Schlussfolgerungen und Ausblick

Der gegenwärtige Stand der Methodenentwicklung zur TGBA ermöglicht eine relativ sichere Bewertung ausgewählter Folgen der Bodennutzung (z.B. Veränderungen umsetzbarer Komponenten durch Ackerbau) mit einfach verifizierbaren Erweiterungen für weitere Klimaregionen. Ein Nachweis von Veränderungen in der Zusammensetzung der OBS im Vergleich zu Böden unter natürlicher Vegetation ohne Beeinflussung des Menschen scheint ebenfalls möglich. Eine Zuordnung von Ursachen zu festgestellten Veränderungen wird jedoch auf Grund noch unzureichender Erfahrungswerte nur in Ausnahmefällen möglich sein. Eine Quantifizierung von Störfaktoren ist gegenwärtig noch nicht möglich.

Fehlende Erfahrungswerte zu geeigneten Vergleichsobjekten stellen zur Zeit den wichtigsten Begrenzungsfaktor für die Diagnostik von Störungen und Veränderungen der Bodenbildung an Hand von Abweichungen bei Beziehungen zwischen thermogravimetrisch identifizierbaren Komponenten der OBS natürlicher Böden dar. Die Anwendbarkeit der TGBA ist zudem auf grundwasserferne Mineralböden begrenzt.

Darauf aufbauend werden sich zukünftige Untersuchungen unter anderem mit folgenden Fragen beschäftigen:

- a) Anwendungsprüfung für weitere Standorte, Klimazonen etc. und Erweiterung der Gültigkeitsbereiche verwendeter Beziehungen
- b) Weiterentwicklung mathematischer Auswertelgorithmen thermogravimetrischer Daten (z.B. Suche nach weiteren Komponenten und Proportionen, Einengung von Konfidenzintervallen, Berücksichtigung nichtlinearer Abhängigkeiten)
- c) Identifikation typischer Abweichungsmuster für häufige Störungen der Bodenbildung (z.B. Beimengungen bodenfremden Kohlenstoffs, Wirkungen unterschiedlicher Humifizierung, saurer Regen, Kontamination mit organischen Schadstoffen und Schwermetallen)

Darauf aufbauend wird eine Erschließung neuer Anwendungsmöglichkeiten erwartet (z.B. Quantifizierung bodenfremden Kohlenstoffs, Bewertung von Komposten, Torfen, gärtnerischen Erden).

7.6. Zusammenfassung

Die Anwendung der thermogravimetrischen Bodenanalyse (TGBA) zur Bestimmung biologisch umsetzbarer Komponenten bestätigte eine zur Heißwasserextraktion gleichwertige Aussagefähigkeit. Bestehende Unzulänglichkeiten beider Methoden - wie z.B. eine Beeinflussung der Ergebnisse durch biologisch stabile Komponenten - lassen sich bei Anwendung der TGBA rechnerisch kompensieren. Grundlage dafür sind die Möglichkeiten der TGBA für eine Abschätzung von Bodeneigenschaften (C-, N-, Ton- und Karbonatgehalt) und humifizierter Komponenten der OBS.

Weiterhin bietet sich die TGBA für eine Reihe zusätzlicher Auswertungen an. Dazu gehören eine Bestimmung des Humifizierungsgrades der OBS, eine bisher nicht untersuchte Erfassung individueller Charakteristika über die thermische Zerfallsdynamik sowie die Ausnutzung von Beziehungen zwischen einzelnen OBS-Komponenten und der Menge gebundenen Wassers, die für natürliche, vom Menschen unbeeinflusste Böden charakteristisch sind.

Bisher geprüft wurden vorrangig die Beziehung zwischen umsetzbaren zu humifizierten Komponenten der OBS. Sie liefert leicht klassifizierbare und logisch plausible Informationen über Wirkungen unterschiedlicher Bodennutzungen, zu Variationen von Anteilen umsetzbarer Komponenten sowie zu anderen Spezifika der OBS auf einer überregional einheitlichen Grundlage.

8. Schlussfolgerungen

1. Eine Analyse aktueller Entwicklungstendenzen in der Umweltforschung führte zur Berücksichtigung der Wasserbindungsfähigkeit der organischen Bodensubstanz als Funktionsgrundlage.
2. Darauf aufbauend stellt eine Vereinheitlichung von Feuchtebedingungen bei der Probenaufbereitung die wichtigste Neuerung dieser Arbeit dar. Sie ermöglichte eine Erweiterung der Aussagefähigkeit traditioneller Untersuchungsmethoden und insbesondere der Thermogravimetrie.
3. Die Einbeziehung von Böden aus unbeeinflussten Ökosystemen als Referenzobjekte erwies sich als notwendig, um bei den Ergebnissen zwischen Merkmalen nutzungsbedingter Veränderungen der OBS und Hinweisen auf überregional einheitliche Zusammenhänge unterscheiden zu können.
4. Zwischen humifizierten und biologisch umsetzbaren Komponenten der OBS sowie der Menge gebundenen Wassers bestehen überregional einheitliche Korrelationsbeziehungen. Sie stellen eine erweiterungsfähige Grundlage zur Kennzeichnung der OBS und zur Beschreibung von Spezifika der Bodenbildung dar.
5. Die Ursachen festgestellter Beziehungen zwischen der Menge gebundenen Wassers in Böden und OBS-Komponenten sowie zwischen der thermischen und biologischen Stabilität der OBS sind ungeklärt.
6. Feuchteänderungen verursachen unterschiedliche Reaktionen der Bodenatmung mit eindeutigem Bezug zur Vegetation, Bodengenese und Bodennutzung. Sie wurden als wichtiger Einflussfaktor auf Umsatzprozesse in Böden bestätigt.
7. Dem gebundenen Wasser kommt dabei vermutlich eine zentrale Bedeutung zu. Im Unterschied zu C - freien Tonmineralen wird in Böden eine Beteiligung tonabhängig akkumulierter humifizierter Komponenten an der Wasserbindung vermutet.
8. Ungeachtet fehlender Kenntnisse zur Kausalität ließen sich die Ergebnisse und festgestellten Phänomene für die Erarbeitung eines neuen, sehr kostengünstigen Verfahrens der Bodenanalyse nutzen, das eine Reihe praktischer Vorteile bietet.

Literaturverzeichnis

1. Abramjan, S.A.; Galstjan, A. S. (1984): Fermentnaja aktivnost' razlichnykh frakcij gumu-sovykh kislot pochv. [Activities of enzymes in different humus fractions from soils]. Biol. zh. arm. - Erevan 37, 12, 999-1004.
2. Aiken, G. R.; McKnight, D. M.; Wershaw, R. L.; MacCarthy, P. (eds.) (1985): Humic Substances in Soil, Sediment and Water. Wiley, New York.
3. Aleksandrova, L.N.(1966): O mekhanizmach obrazovaniya gumusovykh veshchestv i proces-sach prevrascheniya ich v pocve. [Über die Mechanismen der Bildung von Humusstoffen und ihre Transformationsprozesse im Boden]. Gumus i biol. akumuljacija elementov v pocve. - Leningrad 105, 1, 3-10.
4. Albuzio, A.; Nardi, S.; Gulli, A. (1989): Plant growth regulator activity of small molecu-lar size humic fractions. Sci. Total Environ. 81-82, 671-674.
5. Aleksandrova, L.N.(1975): Nekotorye diskussionnye voprosy mekhanizma gumifikacii organiceskich ostatkov v pocve. [Offene Fragen der Humifizierungsmechanismen orga-nischer Rückstände im Boden]. Zap. Leningradskogo sel'sko-choz. Inst. - Leningrad - Puschkin 269, 8-22.
6. Aleksandrova, L.N.; Novickij, M.V.; Kolodka, V. P.(1984): Sostav organiceskich vesh-estv i ich znacenie v processach gumifikacii. [Die Zusammensetzung organischer Sub-stanzen und ihre Bedeutung für Humifizierungsprozesse]. Aktual'nye voprosy izucenija pocv i pocvenno-go pokrova Necernozemnoj zony. - Moskva, 45-54.
7. Amelung, W.; Bol, R.; Friedrich, C. (1999): Natural ^{13}C abundance: a tool to trace the in-corporation of dung-derived carbon into soil particle-size fractions. Rapid Communica-tions in Mass Spectrometry. vol. 13, Issue 3, 1291-1294.
8. Amthor, J. S. (1995): Terrestrial higher-plant response to increasing atmospheric CO_2 in relation to the global carbon cycle. Global Change Biol. 1, 243–247.
9. Andrejuk, E.; Iutinskaja, G.; Kigel, N.; Ivanova, N.(1989): Zur ökologischen Bedeutung der mikrobiellen Polysacharide des Bodens. Dokl. - AN USSR, B., 12, 48-51.
10. Alef, K.; Beck, T.; Zelles, L.; Kleiner, D. (1988): A comparison of methods to estimate microbial biomass and N-mineralization in agricultural and grassland soils. Soil Biology & Biochemistry, 20, 4, 561-565.
11. Beare, M.; Neely, C.; Coleman, D.; Hargrove, W. (1990): A substrate-induced respira-tion (SIR) method for measurement of fungal and bacterial biomass on plant residues. Soil Biology & Biochemistry, 22, 5, 585-594.
12. Beare, M.; Neely, C.; Coleman, D.; Hargrove, W. (1991): Characterization of a sub-strate-induced respiration method for measuring fungal, bacterial and total microbial biomass on plant residues. Agriculture, Ecosystems & Environment, 34, 1-4, 65-73.
13. Beck, T. (1991): Einsatzmöglichkeiten der substratinduzierten Atmungsmessung bei bo-denmikrobiologischen Untersuchungen. Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, 66, 1, 459-462.
14. Becker, K.-W. (1999): Results of soil ring test experiments. Sciences of Soil. submitted.
15. Berner, R. A. (1999): Atmospheric oxygen over Phanerozoic time. Proc. Nat. Acad. Sci. USA, vol. 96, 10955-10957.
16. Beudert, G. (1988): Mikromorphologische, nasschemische und ^{13}C - NMR - spektrosko-pische Kennzeichnung der organischen Substanz von Waldprofilen nach Dichtefraktio-nierung. Beyreuther Bodenkundliche Berichte. - Beyreuth 8, 103.
17. Blume, H.-P., Schneider, D. & Bölter, M. (1996). Organic matter accumulation in and podzolization of Antarctic soils. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde. 159, 411- 412.

18. Bohn, H.L. (1982): Considerations for Modelling Carbon Interactions between Soil and Atmosphere. In: Bouwman, A.F. (1990): Soils and the Greenhouse Effect. Wageningen.
19. Bölter, M.; Siewert, C.; Kuhn, D. (1999): Patterns of soil microbes and soil organic matter characteristics in a periglacial environment at King George Island (Maritime Antarctic). Proceedings of the Symposium "Ecology of Antarctic Coastal Oasis". South Moravia - Valtice, September 1999, submitted.
20. Bouwman, A.F. (1990): Soils and the Greenhouse Effect. Wageningen.
21. Braswell B. H.; Schimel, D. S.; Linder, E.; Moore III, B. (1997): The Response of Global Terrestrial Ecosystems to Interannual Temperature Variability. *Science*, 278, p 873.
22. Brian, H. W.; Stefen, W.; Canadell, J.; Ingram, S.J. (1999): The Terrestrial Biosphere and Global Change: Implications for Nature and Management Ecosystems. Cambridge University Press.
23. Cairns-Smith, A.G. (1985): Seven clues to the origin of life. Cambridge University Press, Cambridge 1985.
24. Candler, R.; Zech, W.; Alt, H. (1988): A comparison of water soluble organic substances in acid soils under beech and spruce in NE-Bavaria. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, 152, 2.
25. Cao, M.; Woodward, F. I. (1998): Dynamic response of terrestrial ecosystem carbon cycling to global climate change. *Nature*, vol. 393, 249-252.
26. Cao, M.; Woodward, F. I. (1988): Net primary and ecosystem productions and carbon stocks of terrestrial ecosystems and their response to climate change. *Global Change Biol.* 4, 185–198.
27. Capriel, P.; Beck, T.; Borchert, H.; Gronholz, J.; Zachmann, G. (1987): Hydrophobicity of the organic matter in arable soils. *Soil Biology and Biochemistry*. vol. 27, 11, pp. 1453-1458.
28. Chadwick, O. A.; Derry, L. A.; Vitousek, P. M.; Huebert, B. J. and Hedin, L. O. (1999): Changing sources of nutrients during four million years of ecosystem development. *Nature*, vol. 397, 491-497.
29. Chapin III, Stuart F. (1993): The evolutionary basis of biogeochemical soil development. *Geoderma*, 57, 3, 223-229.
30. Chapin III, F.S.; Brian, H.; Walker, R. J.; Hobbs, J.; David, U.; Hooper, J. H.; Lawton, O. E.; Tilman, D. (1997): Biotic Control over the Functioning of Ecosystems. *Science*, 277, 500 - 504.
31. Ciais, P.; Tan, P. P.; Trolier, M.; White, J. W. C.; Francy, R. J. (1995): A large northern hemisphere terrestrial CO₂ sink indicated by ¹³C/¹²C of atmospheric CO₂. *Science* 269, 1098 – 1102.
32. Christman, R. F.; Gjessing, E. T. (eds.) (1983): Aquatic and Terrestrial Humic Materials, Ann Arbor Science, Michigan.
33. Christopher, B. F.; Michael, J. B.; Randerson, J. T.; Falkowski, P. (1998): Primary Production of the Biosphere: Integrating Terrestrial and Oceanic Components. *Science*, 1998, vol. 281, 237.
34. Dill, S. (1999): Anwendungsüberprüfung der thermogravimetrischen Bodenanalyse von Grünlandböden im Oderbruch. Diplomarbeit, Technische Universität Berlin, FB 7 Umwelt und Gesellschaft, Institut für Ökologie.
35. Dilly, O. (1998): Discussion on "Defining Soil Quality" on Joint Meeting of Working Groups of COST Action 831 'Biotechnology of Soil: Monitoring, Conservation and Remediation', Rom.
36. Dokucaev, V.V. (1879): Abridged historical account and critical examination of principal soil classifications existing. *Trans. Petersburg Soc. of Nat.* 10, 64-67 (in Russian).

37. Dokuchaev, V.V. (1951): K izuceniju o zonach prirody. Gorizonta'nye i vertikal'nye pocvennye zony. [Zur Untersuchung der Naturzonen. Horizontale und vertikale Bodenzonen]. Soc., t. 6. AN SSSR. - Moskva - Leningrad.
38. Eigen, M. (1987): Stufen zum Leben. Piper, München.
39. Eltjani, A. E.; Alaily, F.; Siewert, C. (2000): Quality of organic matter components in selected profiles from the Gezira Vertisols of Sudan as determined by Thermogravimetry. In Vorbereitung.
40. Filip, Z. (1975): Wechselbeziehungen zwischen Mikroorganismen und Tonmineralen und ihre Auswirkungen auf die Bodendynamik. Diss. (B), Gießen.
41. Foley, J. A. et al. (1996): An integrated biosphere model of land-surface processes, terrestrial carbon balance, and vegetation dynamics. *Global Biogeochemistry Cycles*, 10, 603–628.
42. Fomina, G. (1983): Dynamics of organic matter transformation in podzolic type soils. *Transactions of the VIII. international Symposium Humus et Planta. (Abstracts) Prague*, 50, 362.
43. Forey, P.L. (Editor, 1981): *The Evolving Biosphere*. British Museum (natural History), London.
44. Franko, U. (1997): Modelling of soil organic matter turnover. *Archives of Agronomy and Soil Science*. 41, 6, 527 - 535
45. Freeman, K. H. (1997): A New Look at Old Carbon. *Science*, vol. 277, 5327, 777 - 778.
46. Frimmel, F.H.; Christman, R. F. (eds.) (1988): *Humic Substances and their Role in the Environment*. Wiley, Chichester.
47. Glaser, B; Haumaier, L.; Guggenberger, G.; Zech, W. (1997): Black carbon in soils: The use of benzene polycarboxylic acids as specific indicators. *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, Band 85, S. 237 - 240*.
48. Grace, J. et al. (1995): Carbon dioxide uptake by undisturbed tropical forests, 1992 and 1993. *Science*, vol. 270, 778–780.
49. Graefe, U. (1991): Die Gliederung von Zersetzergesellschaften für die standortsökologische Ansprache. *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, Band 66, S. 487-490*.
50. Greiner, A.; Monn, L. (1989): Feld- und Laborversuche zur N-Mineralisierung und Nitrifikation in sauren Böden unter Fichten- und Buchenwald im Schönbuch. *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, Band 59/1, S. 559-562*.
51. Grieser, K.; Ziechmann, W. (1988): Wechselwirkungen zwischen Huminstoffen und Peroxydase. *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, Band 56, S. 153-159*.
52. Guggenberger, G.; Zech, W. (1993): Dissolved organic control in acid forest soils of the Fichtelgebirge (Germany) as revealed by distribution patterns and structural composition analyses. *Geoderma*, 59, 109-131.
53. Hayes, M. H. B.; MacCarthy, P.; Malcolm, R. L.; Swift, R. S. (eds.) (1989): *Humic Substances II - In Search of Structure*. Wiley, Chichester.
54. Heinemeyer, O.; Kaiser, E.; Insam, H. (1985): Calibration of a new method to determine microbial biomass in soil samples using substrate induced respiration (SIR). *Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs-und Forschungsanstalten, Reihe Kongressberichte, No. 32, 701-706*.
55. Houghton, R. A.; Woodwell, G. M. (1989): Global climatic change. *Sci. Am. J.*, 260, 36–47.
56. Hungate, B.A.; Holland, E.A.; Jackson, R.B.; Chapin III, F.S.; Mooney, H.A.; Field, C.B. (1997): The fate of carbon in grassland under carbon dioxide enrichment. *Nature*, vol. 388, 576 – 579.

57. Hutchinson, G.E. (1965): *The Ecological Theater and the Evolutionary Play*. Yale University Press, New Haven
58. Ivarson, K.C.; Gupta, U.C. (1967): Effect of freezing on the sugars in soil. *Can. J. Soil Sci.*, 47, 74-75
59. Ivarson, K.C.; Sowden, F.J. (1970): Effect of freezing on the free amino acids in soils. *Can. J. Soil Sci.* 1970, 50, 191-198.
60. Janzen, H.H.; Campbell, C.A.; Brandt, S.A.; Lafond, G.P.; Townley-Smith, L. (1992): Light-Fraction Organic Matter in Soils from Long-Term Crop Rotations. *Soil Science Soc. of America J.*, vol. 56, No. 6, p. 1799-1807.
61. Johns, T. C. et al. (1997): The second Hadley Centre coupled ocean-atmosphere GCM: model description spinup and validation. *Clim. Dyn.* 13, 103–134.
62. Kaiser, E.; Mueller, T.; Joergensen, R.; Insam, H.; Heinemeyer (1992): Evaluation of Methods to estimate the soil microbial biomass and the relationship with soil texture and organic matter. *Soil biology and biochemistry*, vol. 24, 7, p. 675-683.
63. Keeling, R. F., Piper, S. C.; Heimann, M. (1996): Global and hemispheric CO₂ sinks deduced from changes in atmospheric O₂ concentration. *Nature*, 381, 218–22.
64. Kleinhempel, D. (1968): Ein Beitrag zum Huminstoffzustand als chemisches und produktionstechnisches Problem. Diss. (B), Leipzig.
65. Klimanek, E.-M. (1980): Mineralisierungsleistung unterschiedlicher Böden in Abhängigkeit von der Düngung. *Archiv für Acker- u. Pflanzenbau u. Bodenkunde*, Berlin 24, 4, S. 225-232.
66. Klimanek, E.-M. (1997): Importance of crop and root residues of agricultural crops for soil organic matter. *Archives of Agronomy and Soil Science*. 41, 6, 485-512
67. Klimanek, E.-M.; Schulz, E. (1997): C/N transformation processes during decomposition of primary organic matter (POM) in soil. *Archives of Agronomy and Soil Science*. 41, 6, 513 - 526
68. Koller, J.; Baumer, U. (1998): Embalming was used in Old Kingdom. *Nature*, 391, 343-344.
69. Kögel-Knabner, I. (1988): Aliphatische Komponenten der organischen Substanz in Waldböden. I. ¹³C-NMR-spektroskopische und nasschemische Untersuchungen. *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft*, Band 56, 197-202.
70. Kögel-Knabner, I.; Deschauer, H. (1989): Beeinflussung des Sorptionsverhaltens eines Herbizids durch wasserlösliche organische Bodensubstanz. *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft*, Band 50/1, S. 395-400.
71. Kögel-Knabner I. (1997): ¹³C and ¹⁵N NMR spectroscopy as a tool in soil organic matter research. *Geoderma*, 80, 243-270.
72. Kögel-Knabner, I.; Matzner, E.; Knicker, H.; Kandeler, E.; Guggenberger, G. (1998): Workshop summary: Refractory soil organic matter (RSOM): Structure and stability. *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft*, Band 87, 51-56.
73. Kögel-Knabner, I.; Knicker, H.; Schmidt, M.W.I.; Rumpel, C.; Kiem, R. (1999): Identification of non-native organic matter in soils. *Proc. 19th Int. Meeting of Organic Geochemistry*, Istanbul, September, 1999, 661-662.
74. Kögel-Knabner, I.; Schmidt, M.W.I.; Skjemstad, J.O.; Gehrt, E. (1999): The role of charred organic matter in the pedogenesis of chernozems. In: H. Armannsson (Hrsg.) *Fifth Int. Symp. "Geochemistry of the earth's surface"*, Balkema, Rotterdam, 267-270.
75. Konèic, V.A.; Èernikov, V.A. (1977): Differencial'no-termogravimetrieskij analiz guminovykh kislot vydelennykh razlicnymi metodami. [Differentialthermogravimetrische Analyse von Huminsäuren, die mit verschiedenen Methoden gewonnen wurden]. *Izv. TSCHA. Moskva*, 2, 88-98 (in Russisch).

76. Körschens, M. et al. (1994), Der Statische Düngungsversuch Bad Lauchstädt nach 90 Jahren. Teubner Verlagsgesellschaft, Stuttgart-Leipzig.
77. Körschens, M.; Schulz, E.; Klimanek, E.-M.; Franko, U. (1997): Soil organic matter – importance, definition, determination. Archives of Agronomy and Soil Science. 41, 6, 427-435
78. Körschens, M. (1997): Abhängigkeit der organischen Bodensubstanz (OBS) von Standort und Bewirtschaftung sowie ihr Einfluß auf Ertrag und Bodeneigenschaften. Archives of Agronomy and Soil Science. 41, 6, 435 - 464
79. Körschens, M.; Weigel, A.; Schulz, E. (1998): Turnover of Soil Organic Matter (SOM) and Long-Term-Balances - Tools for Evaluating Sustainable Produktivity of Soils. Z. Pflanzenernährung und Bodenkunde, 161, 409-424.
80. Kuhlbusch; Thomas, A. J. (1998): Black Carbon and the Carbon Cycle. Science, vol. 280, 5371, 1903 - 1904.
81. Leigh, R. A.; Johnston, A. E.; Eds. (1994): Long-Term Experiments in Agricultural and Ecological Sciences. CAB International, - Wallingford.
82. Leineweber, P.; Schulten, H.-R. (1992): Differential thermal analysis, thermogravimetry and pyrolysis-field ionisation mass spectrometry of soil organic matter in particle-size fractions and bulk soil samples. Thermochemica Acta 194, 175-187.
83. Lovelock, J.E. (1979): GAIA, a New Look at Life on Earth. Oxford Univ. Press, New York.
84. Lovelock, J.F. (1993): The soil as a model for the Earth. Geoderma, 57, 213-215.
85. Mark, D. B.; Vance, G. F.; Kahl, J. S. (1992): Chemistry of Dissolved Organic Carbon and Organic Acids in Two Streams Draining Forested Watersheds. Water Resources Research. 28, 2, S. 389-397.
86. Martens, R. (1987): Estimation of microbial biomass in soil by the respiration method: importance of soil pH and flushing methods for the measurement of respired CO₂. Soil Biology & Biochemistry 19, 1, 77-81.
87. Marschner, B.; Wilczynski, W.; Renger, M.; Stahr, K. (1989): Veränderungen von Humuszusammensetzung und bodenchemischen Eigenschaften einer Rostbraunerde nach einer Kalkungsmaßnahme. Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, Band 59/1, 417-422.
88. Marschner, B. (1999): Sorption von polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) und polychlorierten Biphenylen (PCB) im Boden. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 162, 1, 1-14.
89. Masiello, C. A.; Druffel, E. R. M. (1998): Black Carbon in Deep-Sea Sediments. Science, vol. 280, 5371, 1911 - 1913.
90. Matson, P. A.; Parton, W. J.; Power, A. G.; Swift, M. J. (1997): Agricultural Intensification and Ecosystem Properties. Science, vol. 277, 504- 508.
91. Norby, R. J.; Cotrufo, F. M. (1998): A question of litter quality. Nature, vol. 396, 17-18
92. Orlov, D.S. (1985): Chimija gumusa. [Humuschemie]. Izd. Mosk. un-ta. - Moskva, (in Russisch).
93. Pannikov, N.S.; Sadovnikova, L.K.; Fridlan, E.V. (1984): Nespecificeskie soedinenija pocvennogo gumusa. [Nichtspezifische Verbindungen des Bodenumus]. Izd. MGU, Moskau.
94. Paul, E. A. et al., Eds. (1997): Soil Organic Matter in Temperate Agroecosystems: Long-Term Experiments in North America, CRC Press, Boca Raton.
95. Perdue, E. M.; Gjessing, E. T. (eds.) (1990): Organic Acids in Aquatic Ecosystems. Wiley, Chichester.

96. Peschke, H.; Kretschmann, S.; Zeise, S. (1991): Thermogravimetrische Untersuchung von Huminsäurepräparaten aus Böden kohlenstoffextremer Prüfgliedpaare statischer Dauer- versuche. *Archiv für Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde* 35, 1, 49-55.
97. Petchey, O. L.; Timon, P.; McPhearson, T., M. C.; Peter, J. M. (1995): Environmental warming alters food-web structure and ecosystem function. *Nature*, vol. 402, 69-72.
98. Powlson, D. S.; Smith, P.; Smith, J. U. Eds. (1966): *Evaluation of Soil Organic Matter Models Using Existing Long-Term Datasets*, Springer-Verlag, Berlin.
99. Rasmussen, P. E.; Keith, W. T.; Goulding, J. R.; Brown, P. R.; Grace, Henry Janzen, H.; Körschens, M. (1998): Long-Term Agroecosystem Experiments: Assessing Agricultural Sustainability and Global Change. *Science*. vol. 282, 893 - 896.
100. Pingpank, J.; Beyer, L.; Sieling, K. (1999): Sind mikrobielle Parameter und die organische Bodensubstanz in landwirtschaftlich genutzten Oberböden Indikatoren der Bodenfruchtbarkeit. *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft*. 1999, im Druck.
101. Rodionov, A.; Amelung, W.; Urusevskaja, I.; Zech, W. (1999): Klimaaeinfluss auf Lignin und Polysaccharide in Partikelgrößen-Fraktionen zonaler Steppenböden Russlands. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, vol. 162, 2, 231-238.
102. Saiz-Jimenez, C.; Leeuw, J. D. (1985): Pyrolysis-gas chromatography-mass spectrometry of soil polysaccharides, soil fulvic acids and polymaleic acid. *Organic Geochemistry*, 6, 1, 287-293.
103. Safonov, A.P. (1986): Transformacija rastitel'ych ostatkov i organiceskich udobrenij v pachotnych dernovo-podzolistykh syglinistykh pocvach. [Die Transformation von Pflanzenrückständen und organischer Düngestoffe in gepflügten lehmigen Rasenpodsohlen]. Diss. (A). - Leningrad - Puschkin.
104. Savric, I.; Reemtsma, T.; Jekel, M. (1999): Einflussfaktoren auf die Freisetzung von DOC und AOX unter ehemaligen Abwasserversockerungsflächen. *Acta hydrochimica et hydrobiologica*. vol. 27, 3, 157 – 163.
105. Ševcova, L.K.; Sidorina, S.I. (1988): Vlijanie dlitel'nogo primenenija udobrenij na termograficeskie charakteristiki gumusovykh kislot. [Einfluss langjähriger Düngereanwendung auf thermogravimetrische Charakteristika von Humussäuren]. *Poèvovedenie*, 6, 130-136.
106. Schaumann, G.; Siewert, C. (2000): Soil Organic Matter Quality and Soil Organic Matter Interplay with Water. I. Effect of pre-moistening on dissolution kinetics of soil organic matter. *Journal of soil science and plant nutrition*. 163, 1-5.
107. Scheffer, F.; Schachtschnabel, P. et al (1989): *Lehrbuch der Bodenkunde*, Ferdinand-Enke-Verlag. Stuttgart.
108. Schimel, D. (1998): The Carbon equation. *Nature*, vol. 393, 208-209.
109. Schimel, D. (1999): From a particular to a global perspective. *Nature*, vol. 400, 522-523.
110. Schimel, D.S.; Brasswell, B. H.; Parton, W.J. (1997): Equilibration of the terrestrial water, nitrogen, and carbon cycles. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, vol. 94, 8280–8283, Colloquium Paper.
111. Schnitzer, M.; Khan, S. U. (1972): *Humic Substances in the Environment.*, Marcel Dekker, New York.
112. Schnitzer, M; Schulten, H. (1989): Pyrolysis-soft ionization mass spectrometry of aliphatics extracted from a soil clay and humic substances. *Science of the Total Environment*, 81, 19-30.
113. Schulten, H.-R.; Leinweber, P.; Sorge, C. (1993): Composition of organic matter in particle-size fractions of an agricultural soil. *Journal of soil science*, vol. 44, 4, 677-693.

114. Schmid, E.-M.; Knicker, H.; Bäuml, R.; Kögel-Knabner, I. (1999): An Approach for the Characterization of Neolithic Soils by Means of Chemolytic Techniques and ¹³C NMR Spectroscopy. Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, im Druck.
115. Schmidt, M.; Skemstad, J.O.; Gehrt, E.; Kögel-Knabner, I. (1999): Charred organic carbon in German chernozemic soils, *European Journal of Soil Science*, 50, 351-365.
116. Schnitzer, M.; Kodama, H.; Schulten, H.-R. (1987): Mineral Effects on the Pyrolysis-Field Ionization Mass Spectrometry of Fulvic Acid. *Soil Science Society of America Journal*, 58, 4, 1100-1108.
117. Shahid, N., Hahn, D. R.; Schuurman, G. (2000): Producer-decomposer co-dependency influences biodiversity effects. *Nature*, vol. 403, 762-764.
118. Ausschreibung zum Schwerpunktprogramm der Deutschen Forschungsgemeinschaft 1090 "Böden als Quelle und Senke für CO₂", Juli 1999.
119. Sevast'janov, A.Ju.; Ladonin, V.F.; Cernikov, V.A. (1989): Kineticeskie parametry termodestrukcii guminovykh kislot intensivno vozdelivaemykh dernovo-podzolitych povc. [Kinetische Parameter der thermischen Destruktion von Huminsäuren aus einem intensiv genutztem Rasenpodsol.]. *Tez. dokl. 8. Vses. sézda povcoved.*, Novosibirsk, kn. 2, kommis. 2-3, S. 85.
120. Siewert, C. (1988): Die Zusammensetzung und Umsetzbarkeit des extrahierbaren Humus der Loss-Schwarzerde im Statischen Versuch Bad Lauchstadt. *Archiv für Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde*, 32, 6, 355-361.
121. Siewert, C. (1989): Mineralisierungsverhalten von Humussäuren aus einem Rasenpodsolboden (Humic Podsol). *Arch. Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde*, 33,5, 261-266.
122. Siewert, C. (1994a): Ökosystemorientierte Grundlagen der Humusqualitätsbestimmung. Teil 1: Theoretisches Konzept zur Ableitung ökosystemarer Humusfunktionen. *Archiv für Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde*, 38, 127-147.
123. Siewert, C. (1994b): Ökosystemorientierte Grundlagen der Humusqualitätsbestimmung. Teil 2 (Methodische Grundlagen): Thermogravimetrische Charakteristika von Pflanzensubstanzen und ihre Beziehungen zur biologischen Umsetzbarkeit. *Archiv für Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde*, 38, 179-193.
124. Siewert, C. (1995a): Ökosystemorientierte Grundlagen der Humusqualitätsbestimmung. Teil 3 (Methodische Grundlagen): Veränderungen thermogravimetrischer Charakteristika der organischen Bodensubstanz bei biologischer Umsetzung. *Archiv für Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde*, 39, 53-68.
125. Siewert, C. (1995b): Ökosystemorientierte Grundlagen der Humusqualitätsbestimmung. Teil 4: Besonderheiten der Atmungs-dynamik unterschiedlicher Böden nach Luft-trocknung. *Archiv für Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde*, 39, 131-153.
126. Siewert, C. (1996): Untersuchungen zur thermischen und biologischen Stabilität der organischen Bodensubstanz. DFG-Forschungsbericht zum Projekt Si488 1-2, Berlin.
127. Siewert, C. (1998): Verfahren zur Bestimmung der qualitativen Zusammensetzung der organischen Bodensubstanz von Mineralböden, Patentschrift DD - GO1 N 196 38 731.
128. Siewert, Ch. (1999): Thermogravimetrische Analyse der organischen Bodensubstanz an Schwarzerden der Uckermark. In: R. Schmidt, H.-R. Bork und U. Fischer-Zuikov (hrsg.): Paläoböden und Kolluvien auf glazialen Sedimenten Nordostdeutschlands. ZALF-Bericht Nr. 37, Müncheberg, 57-61.
129. Siewert, Ch. (1998): Verfahrensbeschreibung der thermogravimetrischen Bodenanalyse, unveröffentlicht, www.tgba.de

130. Stevenson, F. J. (1982): *Humus Chemistry - Genesis, Composition, Reactions*. Wiley, New York.
131. Strasburger, E.; Noll, F.; Schenck, H.; Schimper, A.F.W. (1991): *Lehrbuch der Botanik*. Gustav-Fischer Verlag 1991.
132. Street-Perrott, F. A.; Yongsong Huang; Perrott, R. A.; Eglinton, E.; Barker, P.; Ben Khelifa, L.; Douglas, D.; Harkness, Daniel O. O. (1997): Impact of Lower Atmospheric Carbon Dioxide on Tropical Mountain Ecosystems. *Science*, vol. 278, 1422-1426.
133. Soulides, D.A.; Allison, F.E. (1961): Effect of drying and freezing soils on carbon dioxide production, available mineral nutrients, aggregation, and bacterial population. *Soil Sci.*, 91, 291-298.
134. Suffet, I. H.; MacCarthy, (eds.) (1989): *Aquatic Humic Substances - Influence on Fate and Treatment of Pollutants*. American Chemical Society, Washington DC.
135. Suvorov, A. K. (1973): O sostave vodnorastvorimych vescestv rastitel'nykh ostatkov i processakh ich vzaimodejstvija s pocvoj. [Über die Zusammensetzung wasserlöslicher Substanzen von Pflanzenrückständen und ihre Wechselwirkungen mit Böden]. *Gumus i pocvoobrazovanie*. - Leningrad - Puschkin 205, 75-83.
136. Tilman, D. (1999): The greening of the green revolution. *Nature*, vol. 396, 211- 212.
137. Tjurin, I. V. (1937): *Organiceskoe vescestvo pocv.* [Die organische Substanz von Böden]. Moskau.
138. Tjurin, I. V. (1966): *Voprosy genezisa i plodorodija pocv.* [Fragen der Genese der Bodenfruchtbarkeit]. Izd. Nauka. Moskau.
139. Torn, M. S.; Trumbore, S. E.; Chadwick, Oliver A.; Vitousek, Peter M.; Hendricks, David M. (1997): Mineral control of soil organic carbon storage and turnover. *Nature*, vol. 389, 170-173.
140. Travnikova, L.S. (1985): Opyt ispol'zovanija derivatograficeskogo metoda dlja analiza organiceskogo vescestva obrazcov pocv i granulometriceskich frakcij. [Versuche zur Anwendung der Thermogravimetrie zur Analyse der organischen Bodensubstanz von Proben unterscheidlicher granulometrischer Fraktionen]. *Fiziko-chimiceskie aspekty pocvennogo plodorodija*. Naucn. tr. pocv. in-ta im. Dokucaeva. - Moskau, 15-22.
141. Travnikova, L.S. (1987): Osnovnye principy i metody kolicestvennoj ocenki razlicnykh kategorij organiceskogo vescestva. [Hauptprinzipien und Methoden der quantitativen Bewertung unterschiedlicher Kategorien der organischen Substanz]. *Org. vescestvo pachotnykh pocv.* - Moskau, 44-51.
142. Trumbore, S.E. (1997): Potential response of soil organic carbon to global environmental change. *Proceedings of the National Academy of Science of the USA*, 94.
143. Van Breemen, N. (1993): Soils as biotic constructs favouring net primary productivity. *Geoderma*, 57 , 183-211.
144. Van Breemen, N. (1993): Soils: biotic construction in Gaian sense? In A. Teller, P. Harthy and J.N.R. Jeffers (Editors), *Resposes of Forest Ecosystems to Enviromental Changes*. Elsevier, London, 189-207.
145. Walter, H. (1968): *Die Vegetation der Erde in ökophysiologischer Betrachtung*. Bd. II: Die gemäßigten und arktischen Zonen. Fischer Verlag, Jena.
146. Wofsy, S. C.; Munger, J. E.; Bakwin, P. S.; Daube, B. C.; Moore, T. R. (1993): Net CO₂ uptake by northern woodlands. *Science* 260, 1314–1317.
147. *World Reference Base for Soil Resources* (1998). ISSS-ISRIC-FAO, FAO, *World Soil Resources Report No. 84*, Rome.
148. Yelpat'yevskiy, P.V.; Lutsenko, T.N. (1990): The role of water-soluble organic matter in the transport of technogenic metals through the profile of a mountain Burozem. *Soviet Soil Science*, 22, 8, 34-47, Translated from *Pochvovedeniye*, 6, 30-42.

149. Zech, W.; Haumaier, L. (1989): Zur Aromatizität der organischen Bodensubstanz. Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, Band 59/1, 501-504.
150. Ziechmann, W. (1980): Huminstoffe: Probleme, Methoden, Ergebnisse. Weinheim, Deerfield Beach, Florida, Basel.

Anhang

Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen und Begriffe

C _t :	Gesamtkohlenstoffgehalt im Boden
C _{hw} :	heißwasserlöslicher Kohlenstoff
GV:	Gewichtsverlust (in mg/g oder in Anteilen an der OBS-Menge in %)
GGV:	thermogravimetrischer Gesamtgewichtsverlust (Summe der GV aller TB, in mg/g), in karbonatfreien Proben gleich der OBS-Menge)
N _t :	Gesamtstickstoffgehalt im Boden
TB:	Temperaturbereich
TB A:	Temperaturbereich A (25 °C bis 190 °C, beschreibt in lufttrockenen Bodenproben gebundenes Wasser)
TB B:	Temperaturbereich B (200 °C bis 450 °C, spiegelt die Menge biologisch umsetzbarer Komponenten wider)
TB C:	Temperaturbereich C (460 °C bis 550 °C, erfaßt die Menge humifizierter OBS-Komponenten)
TB D:	Temperaturbereich D (560-1000 °C, beschreibt den Zerfall von Karbonaten)
TI:	Temperaturintervall (Teilbereiche von TB)
TGBA:	Thermogravimetrische Bodenanalyse
OBS-Menge:	thermische GV von 25 bis 550 °C, meist in mg je g Boden
OBS:	organische Bodensubstanz
UOS:	biologisch umsetzbare organische Bodensubstanz (thermogravimetrischer Indikator, entspricht den GV im TI 280-290°C)
s.:	siehe
z.B.:	zum Beispiel
vergl.:	vergleiche

Ausgewählte Eigenschaften der Standardproben

Probenzuordnung				Bodeneigenschaften											Bodenatmung nach:		therm. Gew.	
Nr. ⁷⁾	Bodentyp	Vegetationstyp ⁹⁾	Entnahmestort	N _t %	C _t %	C/N -	Karbonatgehalt %	Feldkapazität (pF 1.8) M % ¹⁾	pH H ₂ O	pH CaCl ₂	Kationen ³ ppm	Nitrat ³ ppm	Sand %	Schluff %	Ton %	10 Stunden	35 ² Tagen	verlust ⁶⁾ %
																mg CO ₂ -C ⁵⁾		
1	Auenboden	Steppe	Zimljansk	0.25	2.88	11.6	0.0	41.2	7.35	7.26	64	2	14	50	36	2.73	56.5	11.3
2	Auenboden	Acker	Zimljansk	0.17	1.88	10.9	0.0	35.7	7.25	6.91	61	2	15	50	35	2.16	31.6	10.2
3	Schwarzerde	Steppe	Zimljansk	0.21	2.50	11.5	<0.1	41.4	7.76	7.55	57	1	2	58	40	3.21	53.8	13.4
4	Schwarzerde	Acker	Zimljansk	0.18	2.00	11.1	0.0	36.1	7.69	7.25	57	23	2	57	41	2.14	26.0	12.6
5	Schwarzerde	Forst	Zimljansk	0.07	0.96	14.5	0.0	13.9	6.84	6.35	36	0	80	12	8	1.33	37.9	2.9
6	Schwarzerde	Forst	Zimljansk	0.25	2.94	11.8	0.0	40.3	7.31	6.58	50	6	2	56	42	2.27	48.3	14.1
7	Kastanosem	Steppe	Zimljansk	0.16	1.87	11.5	0.0	38.9	7.82	7.31	58	0	3	61	37	3.69	51.6	11.9
8	Kastanosem	Steppe	Zimljansk	0.18	1.95	10.8	0.0	39.1	7.76	7.19	60	1	6	58	36	3.35	51.2	11.4
9	Kastanosem	Acker	Zimljansk	0.16	1.79	10.8	0.0	37.5	7.93	7.57	56	8	3	59	38	3.08	37.7	12.1
10	Rasenpodsol	Acker	Moskau	0.14	1.76	12.7	0.0	29.3	6.82	5.99	31	16	30	55	15	1.48	29.0	5.9
11	Rasenpodsol	Forst	Moskau	0.17	2.96	17.2	0.0	38.9	6.02	4.31	32	12	34	52	14	0.80	52.3	7.4
12	Rasenpodsol	Wald	Moskau	0.14	2.19	15.3	0.0	33.4	6.66	5.38	27	4	39	48	13	1.18	26.4	6.1
13	Rasenpodsol	Wald	Moskau	0.18	2.95	16.7	0.0	38.8	6.15	4.67	25	3	31	53	16	0.76	58.0	8.1
14	Rasenpodsol	Forst	Moskau	0.17	3.15	19.0	0.0	38.4	6.14	4.15	31	3	28	57	15	0.62	52.4	7.8
15	Rasenpodsol	Forst	Moskau	0.12	1.86	15.0	0.0	31.2	6.29	5.17	22	10	49	41	10	0.57	39.4	5.1
16	Rasenpodsol	Garten	Moskau	0.20	3.51	17.7	0.0	37.3	6.90	6.35	38	3	34	49	16	2.41	52.9	9.3
17	Rasenpodsol	Wald	Zagorsk	0.14	1.80	12.2	0.0	38.9	6.67	6.14	30	1	4	78	18	1.07	66.7	7.0
18	Rasenpodsol	Wald	Zagorsk	0.04	0.47	10.5	0.0	30.5	6.70	5.06	32	0	3	73	25	n.b.	n.b.	5.8
19	Rasenpodsol	Wald	Zagorsk	0.04	0.42	9.4	0.0	31.3	6.41	4.89	29	0	2	65	33	n.b.	n.b.	7.9

Probenzuordnung				Bodeneigenschaften											Bodenatmung nach:		therm. Gew.	
Nr. ⁷⁾	Bodentyp	Vegetationstyp ⁹⁾	Entnahmestort	N _t	C _t	C/N	Karbo-	Feldka-	pH	pH	Kat-	Ni-	Sand	Schluff	Ton	10	35 ²	therm. Gew.
				%	%	-	natge-	pazität	H ₂ O	CaCl ₂	ionen ³	trat ³				Stunden	Tagen	
							halt	(pF 1.8)			ppm	ppm				mg CO ₂ -C ⁵⁾		%
20	Rasenpodsol	Wald	Zagorsk	0.12	1.65	13.8	0.0	37.0	6.54	6.12	30	0	5	76	19	0.61	60.3	6.9
21	Rasenpodsol	Wald	Zagorsk	0.04	0.46	10.3	0.0	32.5	6.68	5.18	27	0	3	71	26	n.b.	n.b.	6.8
22	Rasenpodsol	Wald	Zagorsk	0.03	0.23	7.8	0.0	32.9	6.41	4.89	29	0	3	67	30	n.b.	n.b.	7.0
23	Rasenpodsol	Wald	Zagorsk	0.12	2.38	19.3	1.0	29.7	7.77	7.28	63	0	43	36	21	3.59	84.0	12.0
24	Rasenpodsol	Wald	Zagorsk	0.15	1.94	12.7	0.0	42.6	6.70	5.83	31	0	6	77	17	1.69	86.7	7.0
25	Rasenpodsol	DG ⁹⁾	Zagorsk	0.19	2.06	10.5	<0.1	42.1	6.66	5.91	25	0	6	75	19	1.83	89.9	7.7
26	Rasenpodsol	Acker	Zagorsk	0.12	1.28	10.6	0.0	33.4	7.08	6.72	43	3	5	71	24	1.85	37.8	6.3
27	Schwarzerde	Steppe	Kursk	0.45	5.72	12.6	0.0	51.0	7.41	6.88	48	15	0	73	27	7.17	131.8	18.0
28	Schwarzerde	Brache	Kursk	0.25	3.27	13.1	0.0	35.1	6.81	6.22	33	2	0	74	26	0.85	17.3	12.9
49	Schwarzerde	Wald	Kursk	0.43	5.71	13.4	0.0	47.9	7.05	6.69	46	11	0	66	33	5.84	102.3	17.4
29	Schwarzerde	Acker	Kursk	0.31	3.79	12.4	0.0	38.7	6.81	5.95	59	26	1	65	34	1.69	43.0	14.0
30	Schwarzerde	Acker	Kursk	0.28	3.68	12.9	0.0	34.9	7.02	5.77	42	9	0	64	36	1.14	22.4	14.0
31	Schwarzerde	Acker	Kursk	0.31	4.03	13.0	0.0	35.9	7.10	6.19	45	9	1	64	35	n.b.	n.b.	14.6
32	Schwarzerde	Acker	Kursk	0.32	4.09	12.6	0.0	40.7	7.24	6.72	48	10	1	62	37	n.b.	n.b.	14.6
33	Schwarzerde	Acker	Jena	0.15	1.65	10.6	0.0	32.3	7.49	6.92	66	12	10	57	33	1.88	27.5	9.3
34	Schwarzerde	Acker	Jena	0.16	1.66	10.7	0.0	32.8	7.19	6.56	61	5	5	67	28	1.83	37.0	8.8
35	Schwarzerde	TR ⁹⁾	Jena	0.16	5.61	11.2	3.8	37.1	7.81	7.52	77	0	12	45	44	4.45	76.1	26.0
36	Schwarzerde	TR ⁹⁾	Jena	0.27	3.44	12.1	0.1	40.5	7.60	7.29	65	0	11	35	54	6.49	108.0	16.1
37	Parabraunerde	Wald	Jena	0.10	1.68	15.9	0.0	35.1	6.39	4.80	35	0	2	79	19	1.00	47.3	6.7
38	Parabraunerde	Wald	Jena	0.13	1.96	14.7	0.0	38.6	6.09	4.20	40	2	2	75	23	0.48	46.0	7.6
39	Parabraunerde	Wald	Jena	0.06	0.68	11.1	0.0	33.8	7.27	6.60	42	0	3	66	31	n.b.	n.b.	7.6

Probenzuordnung				Bodeneigenschaften												Bodenatmung nach:		therm. Gew.
Nr. ⁷⁾	Bodentyp	Vegetationstyp ⁹⁾	Entnahmestort	N _t %	C _t %	C/N -	Karbonatgehalt %	Feldkapazität ¹ (pF 1.8) M %	pH H ₂ O	pH CaCl ₂	Kationen ³ ppm	Nitrat ³ ppm	Sand %	Schluff %	Ton %	10 Stunden	35 ² Tagen	verlust bis 970 °C ⁶⁾ %
																mg CO ₂ -C ⁵⁾		
40	Parabraunerde	Forst	Jena	0.09	1.83	19.7	0.0	32.6	5.31	3.90	35	1	27	57	17	0.61	49.7	6.5
41	Parabraunerde	Acker	Jena	0.11	1.21	11.4	0.0	22.3	6.97	6.14	69	23	67	23	10	1.58	37.9	3.6
42	Parabraunerde	Acker	Lauchstädt	0.22	2.81	12.8	0.0	32.9	7.41	6.84	109	21	9	62	25	1.85	31.9	9.6
43	Braunerde	Forst	Bayreuth	0.15	2.18	14.1	0.0	37.8	6.81	5.44	26	1	6	48	47	1.87	54.8	13.7
44	Parabraunerde	Forst	Bayreuth	0.29	5.09	17.8	0.0	46.0	5.19	3.54	32	1	7	68	24	0.71	53.9	13.7
45	Parabraunerde	Forst	Bayreuth	0.10	1.34	13.7	0.0	34.6	6.57	4.08	22	0	8	70	22	0.41	26.8	7.0
46	Parabraunerde	Forst	Bayreuth	0.23	3.75	16.0	0.0	44.2	5.78	4.21	28	3	10	69	21	1.01	88.4	10.7
47	Parabraunerde	Forst	Bayreuth	0.07	1.01	13.4	0.0	32.9	5.81	4.16	14	0	9	69	22	0.20	26.9	5.8
48	Parabraunerde	Acker	Bayreuth	0.17	1.96	11.4	<0.1	34.9	7.31	6.55	42	8	5	65	29	2.58	50.2	9.3
50	Schwarzerde	Forst	Hannover	0.30	4.04	13.5	0.0	46.2	5.31	4.32	61	23	3	73	24	0.78	65.2	11.9
51	Schwarzerde	Acker	Hannover	0.19	2.03	10.9	0.0	35.3	7.18	6.68	45	3	3	76	21	2.25	38.3	8.2
52	Parabraunerde	Forst	Hannover	0.17	2.64	15.6	0.0	42.2	5.62	4.14	38	3	2	84	14	0.55	52.0	7.2
53	Parabraunerde	Forst	Hannover	0.03	0.38	11.2	0.0	31.8	5.66	4.42	46	1	3	79	18	n.b.	n.b.	4.4
54	Parabraunerde	Acker	Hannover	0.15	1.52	10.3	0.2	34.0	7.78	7.37	68	4	5	81	14	2.57	40.8	6.5
Mittel				0.174	2.40	13.0	0.1	36.4			44	5	12	62	26	2.00	52.3	9.8 ⁸⁾

- 1) Wasserhaltefähigkeit der aufbereitete Proben (luftgetrocknet und auf 2 mm gesiebt) in Masse %
2) Grenzdifferenz für die Mittelwerte nach 35 Tagen aus Wiederholungsmessungen und Probennahmeterminen: 4.1 mg CO₂-C / 100 g Boden
3) Summe wasserextrahierbarer Kationen: Ca, Mg, K, Na, Fe, Al, Mn, Si
4) Anteile entsprechend der Mächtigkeit der beprobten Horizonte am Mittelwert der Schicht 0-30 cm
5) je 100 g Boden
6) summarer, absoluter thermogravimetrischer Gewichtsverlust, mg/g Einwaage
7) lt. Probenübersicht auf S. 17
8) nach Umrechnung auf karbonatfreie Proben: 9.38 %
9) Vegetationstyp DG: Dauergrasland; TR: Trockenrasen, Details s. Probenübersicht auf S. 17
n.b.: nicht bestimmt

Danksagung:

Ich bedanke mich für die langjährige, wohlwollende, kritische und stets hilfreiche Unterstützung bei Herrn Prof. Dr. Körschens sowie seinen Mitarbeitern, bei Herrn Prof. Dr. Renger und meinen Kollegen an der TU Berlin.

Bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft möchte ich mich für die Finanzierung der Untersuchungen bedanken. Der Mettler-Toledo GmbH danke für eine sehr großzügige Unterstützung bei der Verfahrensentwicklung und insbesondere für die kostenlose Bereitstellung modernster Analysetechnik von 1996 bis Ende 1999.

