

Der umsetzbare Kohlenstoff als Indikator für die potenzielle bodenmikrobielle Aktivität in Auenböden

Jörg Rinklebe, Kathrin Heinrich, Heinz-Ulrich Neue

1 Einleitung und Ziel

Kohlenstoff ist das mengenmäßig wichtigste Bioelement. Etwa die Hälfte der organischen Bodensubstanz (OBS) setzt sich aus Kohlenstoff zusammen. Die OBS beeinflusst wesentlich die Bindungsformen, die Festlegung und die Mobilisierung von Nähr- und Schadstoffen, die Wasserspeicherkapazität sowie das Pflanzenwachstum (SCHEFFER ET AL. 1998). Sie begünstigt die Bildung und Stabilität eines grobporigen Aggregatgefüges. Redoxpotenzialänderungen sind essentiell an das Vorhandensein der organischen Bodensubstanz gebunden (SCHINNER UND SONNLEITNER 1996, GISI 1997).

In Auenböden ist der Einfluss periodischer Überschwemmungen und die hierdurch ausgelösten Prozesse der Erosion und Sedimentation für die Quantität und Qualität der organischen Bodensubstanz bestimmend. Auenböden können sehr hohe Humusgehalte aufweisen, dies ist die Folge des additiven Effektes von

1. durch die Sedimentation fluvial transportierten Materials mit einem hohen Gehalt an organischer Substanz (sedimentäre organische Substanz) und
2. durch eine in situ-Humusbildung von abgestorbenen Pflanzenresten.

Die chemische Zusammensetzung der OBS, insbesondere der sedimentären organischen Substanz ist weitestgehend ungeklärt, da sie sich vielfältig entsprechend ihrer Herkunft aus dem gesamten Stromeinzugsgebiet und ihrer zahlreichen Bindungs- und Lösungsmechanismen zusammensetzt. Im mitteldeutschen und sächsischen Raum wurden während des fluvialen Transportes Braun- und Holzkohlereste mit organischen Substanzen und schluffig/ lehmigen Substraten vermengt und im pedogenetischen Verlauf locker oder fest aneinander gebunden.

Die Bodenmikroorganismen sind direkt von der Quantität und Qualität der organischen Bodensubstanz abhängig, die OBS dient ihnen als Nährstoff- und Energiequelle (SCHEFFER ET AL. 1998). Der organische Kohlenstoffgehalt im Boden kann dabei als ein erstes, sehr grobes Maß für die potenzielle mikrobielle Stoffumsatzleistung herangezogen werden. Jedoch ist nicht der gesamte organische Kohlenstoff im Boden mikrobiell verfügbar (umsetzbar). Dieser Anteil der OBS muss determiniert werden, wenn eine direkte Bestimmung bodenmikrobieller Kennwerte (z.B. der mikrobiellen Bodenbiomasse und spezieller Bodenenzymaktivitäten) nicht möglich ist und trotzdem präzise Aussagen hierüber benötigt werden. Eine Fraktionierung der organischen Bodensubstanz in einen umsetzbaren (mikrobiologisch wirksamen) und einen inerten Anteil an Auenböden vornehmen zu können, wäre sinnvoll.

Der umsetzbare Teil der OBS ist von entscheidender Bedeutung für den Nährstoffhaushalt von Böden, aber analytisch nicht direkt messbar (KÖRSCHENS UND SCHULZ, 1999). Eine einfache und praktikable Methode zur Bestimmung des umsetzbaren Kohlenstoffanteils durch die Fraktionierung der OBS nach ihrem Umsetzbarkeitsgrad mittels einer chemischen Heißwasserextraktionsmethode verwenden KÖRSCHENS ET AL. (1990) sowie SCHULZ (1997). Diese Fraktionierung entspricht weitestgehend natürlichen Verhältnissen, da Wasser als Extraktionsmittel dient (SCHULZ 1990, 1997). Nach SCHULZ (1997) und KÖRSCHENS UND SCHULZ (1999) enthält der umsetzbare (heißwasserlösliche) Teil der OBS Teile der mikrobiellen Bodenbiomasse, einfache organische Verbindungen sowie unter den Extraktionsbedingungen durch Wasser hydrolysierbare bzw. depolymerisierbare, also die am leichtesten umsetzbaren Teile der OBS. Diese chemische Heißwasserextraktionsmethode zur Bestimmung des umsetzbaren Teils der OBS validierten an grundwasserfernen, agrarisch genutzten Böden (KÖRSCHENS UND SCHULZ 1999).

Die Methode wurde auf Auenböden übertragen, angewendet und die Beziehungen zwischen der heißwasserextrahierbaren Kohlenstofffraktion sowie bodenmikrobiellen Kennwerten quantifiziert und statistisch abgesichert.

Die Hauptfunktion der Bodenorganismen sind der Ab- und Umbau der organischen Substanz und die Rückführung der Stoffe in eine anorganische Form, in der sie von den Pflanzen wieder aufgenommen werden können (GISI 1997). An den vielfältigen Stoffumsetzungen im Boden wie z.B. bei der Mineralisierung, bei der Humifizierung oder bei Redoxprozessen sind Enzyme als Biokatalysatoren entscheidend beteiligt (SCHINNER UND SONNLEITNER 1996, GISI 1997).

Die Bodenmikroorganismen haben durch ihre Bedeutung beim enzymatischen Abbau der komplexen organischen Substanz und bei der Freisetzung von Nähr- und Spurenstoffen aus dem mineralischen Bodenbestandteilen eine entscheidende Stellung in den Stoffkreisläufen. Die Stoffwechselleistungen im Boden werden durch das mikrobielle Artenspektrum bestimmt, welches durch die anfallenden Pflanzenreste, die Bodenform und andere Umweltbedingungen beeinflusst wird. (SCHINNER ET AL. 1993, SCHINNER UND SONNLEITNER 1996). In Auenökosystemen wirkt als stark prägender Umweltfaktor das Wasser auf den Boden und seine Stoffwechselleistungen ein.

Enzyme gehören zu den Proteinen und katalysieren biochemische Reaktionen extra- und intrazellulär. Sie umfassen ein breites Spektrum an Hydrolasen, Oxidoreduktasen, Transferasen und Lyasen (BURNS 1978). Bodenenzyme sind an der Umwandlung unterschiedlicher Substrate im Boden beteiligt. Sie können als zellfreie Enzyme mobilisiert in der Bodenlösung oder an Humus- und Tonkolloide sorbiert vorliegen (BURNS 1982). Sie sind mikrobiellen, tierischen oder pflanzlichen Ursprungs. Der Anteil der immobilisierten Enzyme in einem Boden ist abhängig von der Oberflächen- und der Ionenaustauschkapazität der organischen Substanz und der Tonminerale im Boden.

Die Enzymaktivität eines Bodens erlaubt, die Einflüsse unterschiedlicher Umweltfaktoren zu beurteilen (ALEF 1991).

Die mikrobielle Biomasse in Böden und die bodenmikrobielle Aktivität nach ihren speziellen Stoffumsatzleistungen einzelner Elementkreisläufe und/oder ihrer Kombinationen (z.B. des C, N, P oder S-Kreislaufes) im Labor zu bestimmen, ist jedoch aufwendig.

Das Ziel war, ein einfaches und praktikables Maß (einen robusten Indikator) für potenzielle bodenmikrobielle Stoffumsatzleistungen in Auenböden zu finden, dessen Auswahl zu begründen und statistisch abzusichern, die Grenzen seiner Gültigkeit abzustecken und dessen Aussagegenauigkeit zu quantifizieren.

2 Standorte und Methoden

Die „Schöneberger Wiesen“ bei Steckby befinden sich zwischen den Elbstromkilometern 283 und 285,5, die „Schleusenheger Wiesen“ bei Wörlitz zwischen den Stromkilometern 241,7 und 243,6 und „Dornwerder“ bei Sandau zwischen den Stromkilometern 417 und 418. Die Untersuchungsgebiete Steckby und Wörlitz liegen im Biosphärenreservat „Mittlere Elbe“, das UG Sandau im Landschaftsschutzgebiet „Untere Havel“. Die Auenböden drei räumlich voneinander entfernter Untersuchungsgebiete (UG) der Mittleren Elbe gewährleisten die Repräsentanz „aumentypischer“ Bodenformen und ermöglichen grundsätzlich eine Übertragbarkeit der Indikation. Alle drei Gebiete befinden sich im Deichvorland, so dass periodische Überschwemmungen durch die Elbe, bis zu 5 m variierende Grundwasserstände und der Wechsel von Nass- und Trockenphasen die Böden prägen. Die Erkundung der Bodenverbreitung erfolgte flächendeckend (RINKLEBE ET AL. 2000A,B). In den Elbauen wurden 20 Bodenprofile angelegt, detailliert nach der ARBEITSGRUPPE BODEN (1994), dem ARBEITSKREIS FÜR BODENSYSTEMATIK DER DEUTSCHEN BODENKUNDLICHEN GESELLSCHAFT (1998) und FAO-UNESCO (1990) feldbodenkundlich beschrieben, klassifiziert, horizontweise beprobt und laboranalytisch (bodenchemisch, -biologisch und -physikalisch) charakterisiert. Detaillierte Standortbeschreibungen finden sich in FRANKE UND NEUMEISTER (1999) und RINKLEBE ET AL. (1999, 2000A,B,C).

Für die bodenmikrobiologischen Untersuchungen wurden pro Horizont 4 Proben (Replikationen) im Abstand von ca. 25 cm feldfrisch entnommen, auf 2 mm gesiebt, tiefgefroren und zur Analyse allmählich (24 h bei 5 °C und nachfolgend 4 h bei 22 °C) aufgetaut. Die Mittelwerte der Replikationen dienten als Ausgangsbasis für die statistischen Analysen.

Die Bestimmung der mikrobiellen Biomasse (C_{mik}) erfolgte nach ANDERSON UND DOMSCH (1978) in der Heinemeyeranlage nach HEINEMEYER ET AL. (1989)(SIR). Die β-Glucosidase- (Gluc) wurde nach

HOFFMANN UND DEDEKEN (1965), die Dehydrogenase- (DH) nach THALMANN (1968) und die Proteaseaktivität (Prot) nach LADD UND BUTLER (1972) bestimmt. Das Dimethylsulfoxid-Reduktionsvermögen (DMSO) wurde nach ALEF UND KLEINER (1989) ermittelt.

Die Gesamtkohlenstoff- und Gesamtstickstoffgehalte (Ct und Nt) wurden an lufttrockenem Boden mittels C/N/S-Analyser (Vario EL Heraeus) gemessen. Der anorganische Kohlenstoff wurde mittels des Gerätes Ströhlein C-mat 550 ermittelt. Die untersuchten Auenböden wiesen keinen anorganischen Kohlenstoff auf, so dass für diese Böden gilt: Gesamtkohlenstoffgehalt = organischer Kohlenstoffgehalt. Die Fraktionierung der organischen Substanz des Bodens erfolgte nach der Heißwasserextraktionsmethode nach SCHULZ (1990) bzw. nach KÖRSCHENS UND SCHULZ (1999).

Für die statistischen Analysen wurden die Proben aller in den UG auftretenden Bodenformen (20 Profile) einbezogen (Tab. 1).

Tab. 1. Bodenformen der drei geografisch entfernten UG Steckby, Wörlitz und Sandau an der Mittleren Elbe

Vega aus Auentonschluff über (tiefem) Auensand	Pseudogley-Gley aus Auenschluffton über (tiefem) Auensand
Vega aus Auennormallehm über (tiefem) Auensand	Auengley aus Auenschluffton über Auensand
Vega aus Auensandlehm	Auengley aus Auentonschluff/Auenlehm über (tiefem) Auensand
Vega aus Auenlehmsand über (tiefem) Auensand	Auengley aus flachem Auenlehm über Auensand über Auentonschluff
Paternia aus Auensand	Auengley aus Auensand über (tiefem) Auenschluffton
Gley-Paternia aus Auensand	Tschernitzza aus Auenschluff über (tiefem) Auensand
Gley-Vega aus Auenlehm	
Vega-Gley aus Auenlehm über (tiefem) Auensand	
Pelosol-Gley aus Auenton	

Die statistischen Verrechnungen erfolgten mittels des Programmpaketes SPSS 7,5 FÜR WINDOWS (1997). Zur Charakterisierung der Stichproben diente das arithmetische Mittel. Zur Prüfung auf Normalverteilung (NV) innerhalb der Stichproben (SP) wurde der Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest ($n \geq 10$) angewendet. Bei Normalverteilung (NV) der Stichproben wurden Pearson-, bei nicht normalverteilten Stichproben Spearman-Rho-Korrelationsanalysen durchgeführt. Die Abbildungen wurden mit der Software STATSOFT, INC. STATISTICA 5.1 (1997) erstellt.

3 Ergebnisse und Diskussion

Abb.1 zeigt die Punkteverteilung der auf dem Niveau von 0,01 hochsignifikanten Korrelation ($r = 0,895$) zwischen dem heißwasserlöslichen (C_{HWL}) und dem organischen Kohlenstoffgehalt (C_{org}) an 107 Horizont bezogenen Bodenproben von 20 Auenböden aus drei geografisch entfernten Abschnitten der Mittleren Elbe. Die Berechnung integriert alle „auentypische“ Bodenformen. Damit ist ein äußerst breites Substratspektrum (von Auenreinsand bis Auenschluffton), eine sehr große Variation der organischen Kohlenstoffgehalte (C_{org} von 0,02 bis 12,87 %) sowie der heißwasserlöslichen Kohlenstoffgehalte (C_{HWL} von 0,58 bis 325,4 mg/100g) erfasst.

In den untersuchten Auenböden besteht folglich ein von Bodenformen und Bodenarten unabhängiger sehr enger Zusammenhang zwischen der organischen Substanz und seines umsetzbaren Anteils. (In ackerbaulich genutzten Böden fanden diesen Zusammenhang MANZKE (1995), SCHULZ (1997) und KÖRSCHENS UND SCHULZ (1999).) Bei Differenzierung nach Bodenformen oder Bodenarten kann der Korrelationskoeffizient höhere Werte aufweisen und das Konfidenzintervall (95 %) mehr Messpunkte einschließen, obwohl die Variabilität bodenmikrobieller und -chemischer Kennwerte unabhängig von den Bodenformen ist (RINKLEBE ET AL. 2001A).

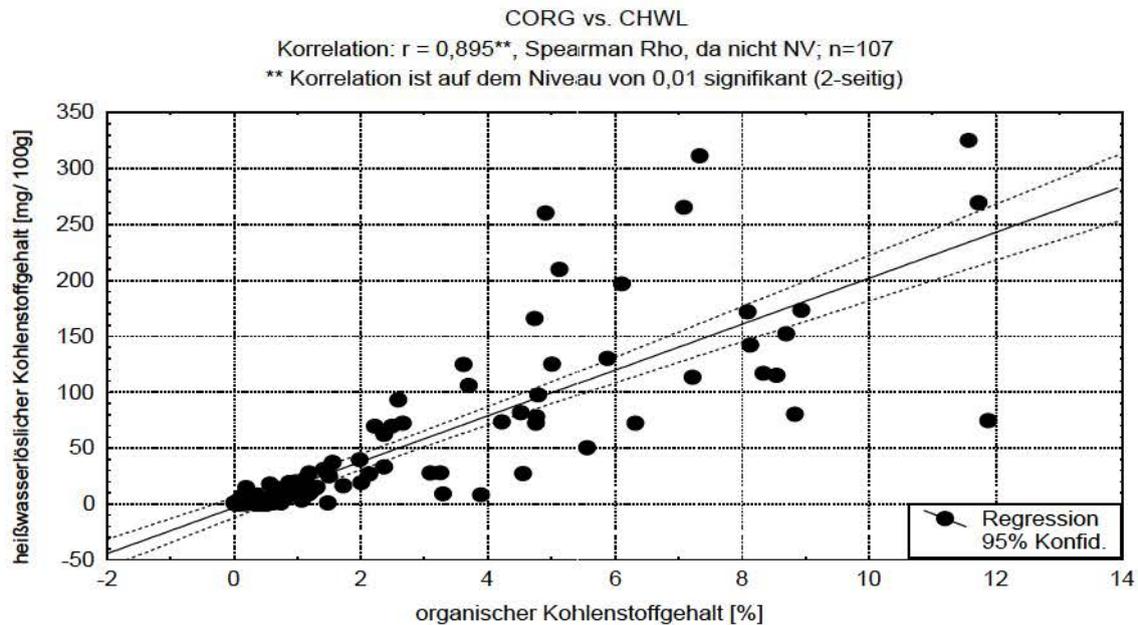


Abb. 1. Korrelation zwischen dem heißwasserlöslichen und dem organischen Kohlenstoffgehalt an 107 Horizont bezogenen Bodenproben von 20 Auenböden aus drei geographisch entfernten Abschnitten der Mittleren Elbe

Die mikrobielle Bodenbiomasse wird definiert als Anteil der organischen Substanz im Boden, der aus lebenden Mikroorganismen besteht (ALEF 1991). Sie wird als mikrobieller Kohlenstoff (C_{mik}) in $\mu\text{g C/g}$ Boden ausgedrückt. Die mikrobielle Biomasse ist ein wichtiger Zwischenspeicher von Pflanzennährstoffen. Sie besitzt die größte Umsatzrate aller organischen Kompartimente, obwohl sie nur einen geringen Anteil (ca. 3 %) an der organischen Substanz der Böden einnimmt. Bodenmikroorganismen sind als Vermittler beim Stoffumsatz an einer Vielzahl aller im Boden ablaufenden Prozesse beteiligt, rein chemische Stoffumsetzungen sind die Ausnahme. Die wichtigste ökologische Funktion der Mikroorganismen ist die Rückführung der durch autotrophe Pflanzen festgelegten Elemente und Nährstoffe in deren jeweilige Kreisläufe (JÖRGENSEN 1995, 1996).

Zwischen dem bodenmikrobiellen (C_{mik}) und dem organischen Kohlenstoff (C_{org}) aller untersuchten Auenböden besteht eine hochsignifikante Korrelation mit $r = 0,809$, $p < 0,01$, $n = 109$ (Abb. 2). Für ackerbaulich genutzte Böden ist dies generell bekannt (ANDERSON UND DOMSCH 1989, KAISER ET AL. 1992, MANZKE 1995, HAYNES 2000). In Auenböden wurde dieser Zusammenhang bisher jedoch noch nicht überprüft.

Der Korrelationskoeffizient zwischen dem bodenmikrobiellen (C_{mik}) und dem heißwasserlöslichen (umsetzbaren) Kohlenstoff (C_{HWL}) ist in den untersuchten Auenböden mit $r = 0,823$, $p < 0,01$, $n = 95$ jedoch höher als zwischen C_{mik} und C_{org} (Abb. 2 und 3).

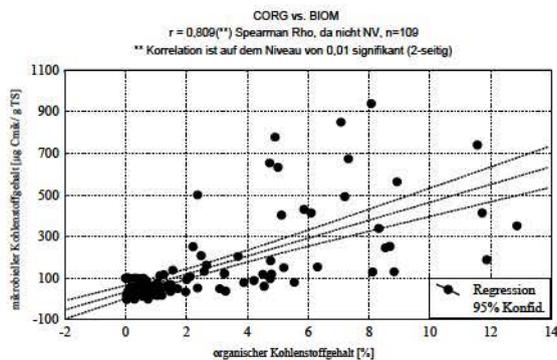


Abb. 2. Korrelation ($r = 0,809$) zwischen dem bodenmikrobiellen und dem organischen Kohlenstoffgehalt an 109 Horizont bezogenen Bodenproben von 20 Auenböden aus drei geografisch entfernten Abschnitten der Mittleren Elbe

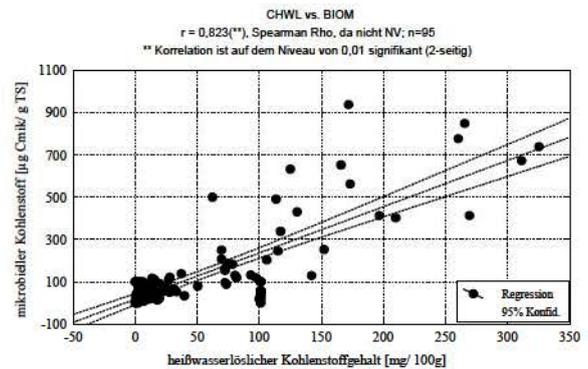


Abb. 3. Korrelation ($r = 0,823$) zwischen dem bodenmikrobiellen und dem heißwasserlöslichen Kohlenstoffgehalt an 95 Horizont bezogenen Bodenproben von 20 Auenböden aus drei geografisch entfernten Abschnitten der Mittleren Elbe

Der umsetzbare Kohlenstoff charakterisiert die potenziellen mikrobiellen Stoffumsätze präziser, da die Bodenmikroorganismen nur diesen Teil der OBS in relevanten Zeiträumen nutzen können.

In Auenböden ist ein Nachweis des Zusammenhangs zwischen dem umsetzbaren (heißwasserlöslichen) Kohlenstoff (C_{HWL}) und dem mikrobiellen Kohlenstoff (C_{mik}) bisher nicht erbracht worden.

MANZKE (1995) fand in ackerbaulich genutzten Schwarzerden aus Löss des Mitteldeutschen Trockengebietes ebenfalls engere Korrelationen zwischen C_{mik} und C_{HWL} als zwischen C_{mik} und C_{org} . Sie bestimmte den C_{HWL} nach KÖRSCHENS ET AL. (1990) und C_{mik} nach ANDERSON UND DOMSCH (1978) (SIR). SCHULZ (1997) fand in diesen Böden einen hochsignifikanten Zusammenhang zwischen der Bodenatmung (CO_2 -Exhalation) und dem umsetzbaren Kohlenstoff.

SPARLING ET AL. (1998) errechneten an neuseeländischen Böden hochsignifikante Korrelationen zwischen C_{mik} und C_{HWL} sowie zwischen dem Verhältnis von $C_{\text{HWL}}/C_{\text{org}}$ und dem metabolischen Quotienten (CO_2), allerdings führten sie die Heißwasserextraktion bei 70°C über 18 Stunden und nicht wie KÖRSCHENS UND SCHULZ (1999) bei Siedetemperatur über 1 Stunde aus.

HAYNES (2000) bestimmte in neuseeländischen Acker- und Grünlandböden zwischen C_{mik} und wasserlöslichen C-Fractionen an getrockneten und feldfrischen Bodenproben ebenfalls höhere Korrelationskoeffizienten als zwischen C_{mik} und C_{org} . Den mikrobiellen Kohlenstoff bestimmte er dabei mittels der Fumigation-Extraktions-Methode (nach VANCE ET AL. 1987). Für die wasserlöslichen C-Fractionen extrahierte er 20 ml destilliertes Wasser mit 10 g TS Boden 15 min, das Extrakt erhitze er dabei nicht. Anschließend zentrifugierte er bei 15 000 rpm 10 min, filterte das Extrakt ($41 \mu\text{m}$) und lagerte die Proben bei -10°C bis zur durchgeführten Analyse (dichromatisches Oxidationsverfahren). Der „cropping index“ korrelierte enger mit den wasserlöslichen C-Fractionen als mit C_{org} .

GREGORICH ET AL. (2000) fanden in ackerbaulich genutzten Böden Ost-Canadas enge Korrelationen zwischen C_{mik} und wasserlöslichen C-Fractionen. Den mikrobiellen Kohlenstoff bestimmten sie mittels der Fumigation-Extraktions-Methode (nach VORONEY ET AL. 1993). Für die Bestimmung der wasserlöslichen C-Fractionen erhitzen sie das Extrakt nicht, sondern zentrifugierten bei 10 000 rpm 10 min und filterten das Extrakt durch einen $45 \mu\text{m}$ Glasfaserfilter bei einem Druck von -7 kPa .

Kohlenstoff ist eine der wichtigsten Komponenten lebender Organismen. Sein Kreislauf in der Umwelt ist mit dem Energiefluss eng verbunden, da die hauptsächlichen Energiereserven der Organismen reduzierte Kohlenstoffverbindungen sind. Heterotrophe Mikroorganismen decken ihren Energiebedarf über die Oxidation organischer Substanzen, d.h. reduzierte Kohlenstoffverbindungen. Der Abbau dieser Verbindungen erfolgt enzymatisch.

Das Polysaccharid Cellulose [Summenformel: $(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_n$] ist im Pflanzenreich weit verbreitet und stellt mengenmäßig den bedeutendsten Naturstoff dar. Holz enthält bspw. 40 bis 60 % Cellulose. Das der

Cellulose zugrunde liegende Disaccharid ist die Cellobiose. Cellobiose besteht aus 2 β -D-glucosidisch gebundenen Glucosemolekülen.

β -Glucosidasen sind Enzyme des Kohlenstoffkreislaufs. Sie hydrolysieren Kohlenhydrate mit β -D-glucosidischer Bindung, indem sie terminale β -D-Glucose abspalten. Durch ihre Aktivität wird die Cellobiose in Glucose überführt. Der Celluloseabbau wird somit gefördert und gleichzeitig den Organismen eine wichtige Energiequelle zur Verfügung gestellt (SCHINNER ET AL. 1993). β -Glucosidasen katalysieren folglich prinzipiell die Reaktion:

$\text{Glucosid} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Glucose} + \text{ROH}$ (SCHINNER UND SONNLEITNER 1996).

Die β -Glucosidaseaktivität zeigt eine enge Beziehung zum Gehalt der organischen Bodensubstanz (EIVAZI UND TABTABAI 1988).

In den untersuchten Auenböden errechnete sich zwischen der β -Glucosidaseaktivität (Gluc) und dem organischen Kohlenstoffgehalt eine hochsignifikante Korrelation ($r = 0,822$, $p < 0,01$, $n = 114$; Abb. 4).

Die Korrelation zwischen der β -Glucosidaseaktivität (Gluc) und dem umsetzbaren Kohlenstoffgehalt (C_{HWL}) wies jedoch im Vergleich von Gluc zu C_{org} einen höheren Korrelationskoeffizienten auf ($r = 0,860$, $p < 0,01$, $n = 99$; Abb. 5). Dieser ist sogar höher als der Korrelationskoeffizient zwischen C_{mik} und C_{org} sowie zwischen C_{mik} und C_{HWL} .

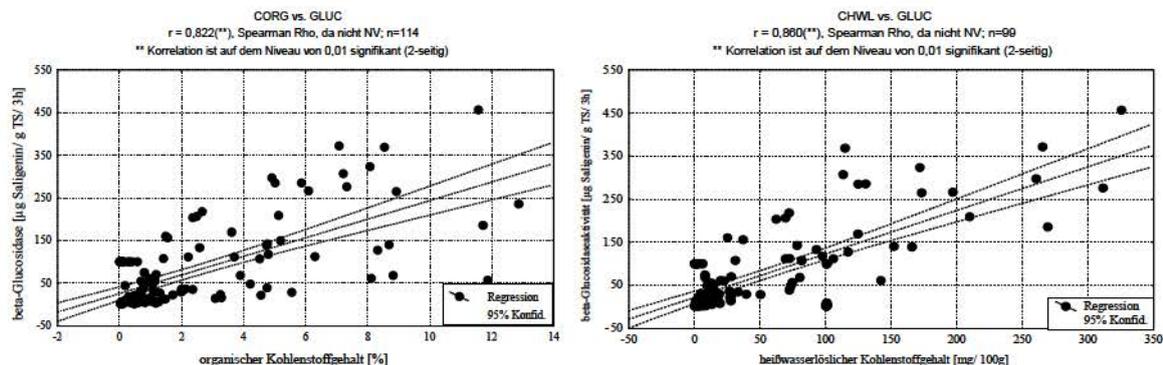


Abb. 4. Korrelation ($r = 0,822$, Niveau von 0,01) zwischen der β -Glucosidaseaktivität und dem organischen Kohlenstoffgehalt an 114 Horizont bezogenen Bodenproben von 20 Auenböden aus drei geografisch entfernten Abschnitten der Mittleren Elbe

Abb. 5. Korrelation ($r = 0,860$, Niveau von 0,01) zwischen der β -Glucosidaseaktivität und dem heißwasserlöslichen Kohlenstoffgehalt an 99 Horizont bezogenen Bodenproben von 20 Auenböden aus drei geografisch entfernten Abschnitten der Mittleren Elbe

Die Fraktionierung der OBS in einen inerten und einen heißwasserlöslichen Teil kennzeichnet unterschiedliche C-Poolgrößen. C_{org} ist die gesamte OBS, C_{HWL} ist ein umsetzbarer (mikrobiell verfügbarer) Teil des C_{org} . Der C_{org} beinhaltet nach LEINWEBER ET AL. (1995) 3 bis 5 % C_{HWL} . Die β -Glucosidaseaktivität korreliert enger mit dem umsetzbaren Teil der OBS (C_{HWL}) als mit dem organischen Kohlenstoff (C_{org}).

Die durch die Bodenmikroorganismen umgesetzte Glucosemenge korreliert hochsignifikant mit dem heißwasserlöslichen Anteil der OBS. Dieser Sachverhalt weist erstmalig in Auenböden indirekt nach, dass Glucose Teil des heißwasserlöslichen Anteils der OBS ist.

MANZKE (1995) fand in ackerbaulich genutzten Schwarzerden aus Löss des Mitteldeutschen Trockengebietes enge Korrelationen zwischen C_{HWL} und Gluc.

Das Disaccharid Cellobiose könnte hypothetisch ebenso Teil des C_{HWL} sein. Nach der Definition von SCHULZ (1997) enthält C_{HWL} Teile der mikrobiellen Bodenbiomasse, einfache organische Verbindungen sowie unter den Extraktionsbedingungen durch Wasser hydrolysierbare bzw. depolymerisierbare Teile der OBS. Cellulose als Polysaccharid (hochmolekulare Struktur mit unverzweigten Ketten und chemisch hoch beständig) wird vermutlich zu gewissen Teilen in der heißwasserlöslichen Fraktion der OBS enthalten sein.

Die Eignung des C_{HWL} als Indikator für potenzielle mikrobielle Stoffumsatzleistungen wurde desweiteren anhand des metabolischen Quotienten (qCO_2), der Dimethylsulfoxid-Reduktion (DMSO), der Protease- (Prot) und der Dehydrogenaseaktivität (DH) überprüft.

Der metabolische Quotient (qCO_2) ist definiert als Atmung bezogen auf die mikrobielle Biomasse. Je höher der qCO_2 ist, desto effizienter sind die mikrobiellen Umsatzleistungen (SCHEFFER ET AL. 1998).

Dimethylsulfoxid (DMSO) spielt eine wichtige Rolle im natürlichen S-Kreislauf. Die Dimethylsulfoxid-Reduktion ist auf die Aktivität lebender Mikroorganismen im Boden zurückzuführen. Über 95 % der untersuchten Kulturen verschiedener Mikroorganismen (Eukaryonten, Prokaryonten, Aerobier, Anaerobier) waren befähigt, DMS zu reduzieren. Deshalb kann die DMSO-Reduktion als Maß für die mikrobielle Aktivität in Boden und Kompost benutzt werden. (ALEF UND KLEINER 1989, ALEF 1991).

Proteine stellen im Boden eine leicht mobilisierbare Stickstoffquelle dar. Proteasen (Prot) gehören zur Gruppe der zellfreien Hydrolasen des Stickstoffumsatzes im Boden. Sie katalysieren die Spaltung von Proteinen zu Polypeptiden, Oligopeptiden und Aminosäuren. (ALEF 1991, SCHINNER ET AL. 1993).

Dehydrogenasen (DH) sind intrazelluläre Enzyme und geben über die aktive mikrobielle Biomasse Auskunft (SCHEFFER ET AL. 1998). Sie gehören zu den Oxidoreduktasen (SCHINNER UND SONNLEITNER 1996). Die DH ist keine Aktivität zellfreier Enzyme, sie benötigt die gesamte Integrität der Zelle (ALEF 1991). Sie kann als allgemeiner Parameter für die mikrobielle Aktivität im Boden betrachtet werden, da fast alle Mikroorganismen in der Lage sind, Triphenyltetrazoliumchlorid (TTC) zu reduzieren (ALEF 1991).

Alle geprüften bodenmikrobiellen Kennwerte wiesen in jedem Fall einen höheren Korrelationskoeffizienten (r) zum umsetzbaren Kohlenstoff im Vergleich zum organischen Kohlenstoff auf (Tab. 2). Insbesondere die Differenz des Korrelationskoeffizienten der DH zu C_{org} mit $r = 0,491$, $p < 0,01$, $n = 83$ und der DH zu C_{HWL} mit $r = 0,622$, $p < 0,01$, $n = 108$ ist hoch. Der metabolische Quotient korreliert, wenngleich mit niedrigem r , signifikant negativ nur mit dem C_{HWL} ($r = -0,219$, $p < 0,05$, $n = 95$; Tab. 2), während zwischen qCO_2 und C_{org} keine signifikante Korrelation nachweisbar war.

Tab. 2. Korrelationskoeffizienten zwischen dem heißwasserlöslichen (C_{HWL})/organischen Kohlenstoffgehalt (C_{org}) und der Dimethylsulfoxid-Reduktion (DMSO), dem metabolischen Quotienten ($q\text{CO}_2$), der Protease- (Prot) und der Dehydrogenaseaktivität (DH)

	DMSO	Prot	DH	$q\text{CO}_2$
C_{org}	0,861**	0,831**	0,491**	-0,183
Stichprobenzahl	42	115	83	108
C_{HWL}	0,887**	0,848**	0,622**	-0,219*
Stichprobenzahl	38	99	74	95

**** Korrelation auf dem Niveau von 0,01 signifikant (2-seitig); Spearman – Rho**

*** Korrelation auf dem Niveau von 0,05 signifikant (2-seitig)**

Der organische Kohlenstoff in Böden beeinflusst die bodenmikrobielle Biomasse und deren Aktivität. Der heißwasserlösliche Kohlenstoff charakterisiert das potenziell mikrobiell umsetzbare Substrat präziser, da die Bodenmikroorganismen nur diesen Teil der OBS in relevanten Zeiträumen nutzen können.

Der heißwasserlösliche Kohlenstoff kann als einfaches Maß für eine potenzielle mikrobielle Stoffumsatzleistung (Aktivität) genutzt werden. Er prognostiziert die potenzielle bodenmikrobielle Aktivität exakter als der organische Kohlenstoffgehalt und ist deshalb als Indikator für potenzielle mikrobielle Stoffumsatzleistungen geeigneter als dieser.

In Modifikation und Erweiterung an SCHULZ (1997) und KÖRSCHENS UND SCHULZ (1999) wurden Gehaltsklassen für den umsetzbaren Kohlenstoff in Auenböden empirisch abgeleitet. Diese ermöglichen eine sehr einfache und praktikable Prognose der potenziellen bodenmikrobiellen Aktivität in Auenböden.

Tab. 3. Prognose der potenziellen bodenmikrobiellen Aktivität mittels des heißwasserlöslichen Kohlenstoffs in Auenböden

C_{HWL} – Bereich [mg/100g]	C_{HWL} – Gehaltsklasse	Prognostizierte potenzielle bodenmikrobielle Aktivität
< 50	A sehr gering	A sehr gering
50 – 100	B gering	B gering
100 – 150	C mittel	C mittel
150 – 250	D hoch	D hoch
> 250	E sehr hoch	E sehr hoch

Der C_{HWL} ist relativ unabhängig vom Probenahmezeitpunkt (SCHULZ 1997). Bei einer einfachen Laborgrundausrüstung ist er schnell und kostengünstig zu bestimmen (SCHULZ 1997). Er ist in der 2. Stufe des bodenkundlichen Indikationssystems nach RINKLEBE ET AL. (2001B) einzuordnen.

Eine bodenmikrobiologische Diskriminierung nach spezifischen Stoffumsatzleistungen einzelner Elementkreisläufe und/oder ihrer Kombinationen (z.B. des C-, N-, P- oder S-Kreislaufes) ist nicht möglich.

Der C_{HWL} unterliegt im Boden vermutlich einer weniger heterogenen Verteilung als bodenmikrobiologische Parameter. Denn die bodeneigene Heterogenität der mikrobiellen Eigenschaften in Auenböden ist signifikant höher als die der bodenchemischen Kennwerte (RINKLEBE ET AL. 2001A).

Der C_{HWL} charakterisiert sensibel das bodenmikrobiologische Potenzial, Stoffumsätze zu vollziehen. Er ersetzt detaillierte bodenmikrobiologische Analysen nicht, vielmehr muss er für prognostische bodenmikrobiologische Zwecke an diesen geeicht werden. In welchem Maße saisonale Umweltfaktoren den C_{HWL} in Auenböden beeinflussen, bedarf weiterführender Forschungen. Der C_{HWL} erspart Aufwand (Arbeit, Zeit, Kosten, Laboranalytik). Er ermöglicht eine einfache Prognose der potenziellen mikrobiellen Aktivität in Auenböden, so dass der wissenschaftlichen Praxis ein in seiner Zeigerfunktion sensibler und in seiner Anwendung robuster Indikator der potenziellen bodenmikrobiellen Aktivität in Auenböden zur Verfügung steht.

Literatur

- ALEF, K. (1991) Methodenhandbuch Bodenmikrobiologie. Aktivitäten, Biomasse, Differenzierung. ecomed Landsberg. ISBN: 3-609-65960-2
- ALEF, K., KLEINER, D. (1989) Rapid and sensitive determination of microbial activity in soils and soil aggregates by dimethylsulfoxid reduktion. *Biol. Fertil. Soils* 8. 349–355
- ANDERSON, J.P.E., DOMSCH, K.H. (1978) A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soils. *Soil Biol. Biochem.* 10. 215–221
- ANDERSON, T.-H., DOMSCH, K.H. (1989) Ratios of microbial biomass carbon to total organic carbon in arable soils. *Soil Biol. Biochem.* Vol. 21: No. 4:471–479
- ARBEITSGRUPPE BODEN (1994) Bodenkundliche Kartieranleitung. (KA 4) 4. Verb. u. erw. Aufl. Hrsg. Bundesanstalt für Geowiss. u. Rohst. u. Geologische Landesämter d. BR Deutschland. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung Hannover
- ARBEITSKREIS FÜR BODENSYSTEMATIK DER DEUTSCHEN BODENKUNDLICHEN GESELLSCHAFT (1998) Systematik der Böden und der bodenbildenden Substrate Deutschlands. *Mittlg. d. Dt. Bdkdl. Gesell.* Band 86, 1-180
- BURNS, R.G. (1978) *Soil enzymes.* Academic Press, New York London
- BURNS, R.G. (1982) Enzyme activity in soil: location and a possible role in microbial ecology. *Soil Biol. Biochem.* Vol. 14, 423–427
- EIVAZI, F., TABATABAI, M.A. (1988) Glucosidases and galactosidases in soils. *Soil Biol. Biochem.* 20: 601 – 606.
- FAO-UNESCO (1990) Soil map of the world. World Soil Resources Report 60. Revised Legend. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome. 119 S.
- FRANKE, C., NEUMEISTER, H. (1999) Räumliche Datendichte zur Abbildung der räumlichen Variabilität des pH-Wertes. *Leipziger Geowissenschaften.* Bd. 11., S. 105–112. ISSN: 0948-1257
- GISI, U. (1997) *Bodenökologie.2.,* neubearbeitete und erweiterte Auflage. Stuttgart: Georg Thieme Verlag. 350 S.
- GREGORICH, E.G., LIANG, B.C., DRURY, C.F., MACKENZIE, A.F., MCGILL, W.B. (2000) Elucidation of the source and turnover of water soluble and microbial biomass carbon in agricultural soils. *Soil Biol. Biochem.* 32. 581–587
- HAYNES, R.J. (2000) Labile organic matter as an indicator of organic matter quality in arable and pastoral soils in New Zealand. *Soil Biol. Biochem.* 32: 211–219
- HEINEMEYER, O., INSAM, H., KAISER, E.A., WALENZIK, G. (1989) Soil microbial biomass and respiration measurements: An automated technique based on infra-red gas analysis. *Plant and Soil* 1–6. 191–195
- HOFFMANN, G., DEDEKEN, M. (1965) Eine Methode zur colorimetrischen Bestimmung der β -Glucosidase-Aktivität im Boden. *Zeitschrift f. Pfl.ernähr., Düngg. u. Bdkd.* 108: 193–198
- JÖRGENSEN, R.G. (1995) Die quantitative Bestimmung der mikrobiellen Biomasse in Böden mit der Chloroform-Fumigations-Extraktions-Methode“. *Göttinger Bodenkundliche Berichte.* Band 104: 1–229
- JÖRGENSEN, R.G. (1996) Die Beziehung von mikrobieller Aktivität, Biomasse und Residualmasse in Böden“. *Mittlg. der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft.* Bd. 81. 175–178
- KAISER, E.-A., MUELLER, T., JOERGENSEN, R.G., INSAM, H., HEINEMEYER, O. (1992) Evaluation of methods to estimate the soil microbial biomass and the relationship with soil texture and organic matter. *Soil Biol. Biochem.* Vol. 24, No. 7: 675-683
- KÖRSCHENS, M., SCHULZ, E. (1999) Die organische Bodensubstanz. Dynamik-Reproduktion – ökonomisch und ökologisch begründete Richtwerte. UFZ-Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH, Sektion Bodenfor-schung. UFZ-Bericht 13. ISSN: 0948-9452
- KÖRSCHENS, M., SCHULZ, E., BEHM, R. (1990) Heißwasserlöslicher C und N im Boden als Kriterium für das N-Nachlieferungsvermögen. *Zentralbl. Mikrobiol., Jena* 145, 305–311
- LADD, J.N., BUTLER, J.H.A. (1972) Short-term assays of soil proteolytic enzyme activities using proteins and di-peptide derivatives as substrates. *Soil Biol. Biochem.* 4: 19–30
- LEINWEBER, P., SCHULTEN, H.-R., KÖRSCHENS, M. (1995) Hot water extracted organic matter: chemical composition and temporal variations in a long-term field experiment. *Biol. Fertil. Soils.* 20: 17–23
- MANZKE, F. (1995) Bodenmikrobiologische und bodenchemische Kenngrößen zur Beurteilung des Umsatzes organischer Bodensubstanz in unterschiedlichen Bodennutzungssystemen. *Inst. f. Pflanzenbau u. Pflanzen-züchtg. der Georg-August-Univ. Göttingen, Diss.* Cuvillier Verlag Göttingen. 161 S. + Anhang. ISBN: 3-89588-418-9
- RINKLEBE, J., EIBNER, C., KLIMANEK, E.-M., HEINRICH, K., NEUE, H.-U. (2001A) Die Heterogenität bodenmikrobieller und -chemischer Kennwerte in Bodenprofilen von Auenböden. *Mittlg. d. Dt. Bdkdl. Gesell.* Im Druck
- RINKLEBE, J., HEINRICH, K., NEUE, H.-U. (2000C) Auenböden im Biosphärenreservat Mittlere Elbe – ihre Klassifikation und Eigenschaften. In: Friese, K., Witter, B., Rode, M., Miehlich, G. (Hrsg.) *Stoffhaushalt von Auenöko-systemen. Böden und Hydrologie, Schadstoffe, Bewertungen.* Springer Verlag Berlin Heidelberg New York. ISBN: 3-540-67068-8. S. 37–46
- RINKLEBE, J., HEINRICH, K., NEUE, H.-U. (2001B) Indikation des Zustandes und der Qualität von Auenböden. *UFZ-Bericht.* In diesem Band
- RINKLEBE, J., HELBACH, C., FRANKE, F., NEUE, H.-U. (2000A) Großmaßstäbige Bodenformenkarte der Schöneberger Wiesen bei Steckby im Biosphärenreservat Mittlere Elbe. Mitteilung Nr. 6 der Bundesanstalt für Gewässer-kunde/ Projektgruppe Elbe Ökologie, Koblenz - Berlin. Tagungsband des Statusseminars Elbe - Ökologie vom 02. bis 05. November 1999 in Berlin. 225–226
- RINKLEBE, J., KLIMANEK, E.-M., HEINRICH, K., NEUE, H.-U. (1999) Tiefenfunktion der mikrobiellen Biomasse und Enzymaktivitäten in Auenböden im Biosphärenreservat Mittlere Elbe. *Mittlg. d. Dt. Bdkdl. Gesell.* 91 II: 699–702

- RINKLEBE, J., MARAHRENS, S., BÖHNKE, R., AMARELL, U., NEUE, H.-U. (2000b) Großmaßstäbige bodenkundliche Kartierung im Biosphärenreservat Mittlere Elbe. In: Friese, K., Witter, B., Rode, M., Miehlich, G. (Hrsg.) Stoffhaushalt von Auenökosystemen. Böden und Hydrologie, Schadstoffe, Bewertungen. Springer Verlag. ISBN: 3-540-67068-8. S. 27–35
- SCHEFFER, F. (1998) Lehrbuch der Bodenkunde. 14., neu bearbeitete und erweiterte Auflage von P. Schachtschabel, Blume, H.-P., Brümmer, G., Hartge, K.-H., Schwertmann, U. Ferdinand Enke Verlag. Stuttgart. ISBN 3-432-84774-2
- SCHINNER, F., ÖHLINGER, R., KANDELER, E., MARGESIN, R. (HRSG.) (1993) Bodenbiologische Arbeitsmethoden. 2. überarbeitete und erweiterte Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York. ISBN: 3-540-56206-0
- SCHINNER, F., SONNLEITNER, R. (1996) Bodenökologie: Mikrobiologie und Bodenenzymatik. Bd. I. Grundlagen, Klima, Vegetation und Bodentyp. Springer Verlag. Berlin Heidelberg New York. ISBN: 3-540-61010-3
- SCHULZ, E. (1990) Die heißwasserextrahierbare C-Fraktion als Kenngröße zur Einschätzung des Versorgungszustandes der Böden mit organischer Substanz (OS). Tag. Ber. Akad. Landwirtsch.-Wiss., Berlin 295, 269-275
- SCHULZ, E. (1997) Charakterisierung der organischen Bodensubstanz (OBS) nach dem Grad ihrer Umsetzbarkeit und ihre Bedeutung für Transformationsprozesse für Nähr- und Schadstoffe. Arch. Acker-Pfl. Boden., Berlin 41: 465–484
- SPARLING, G., VOJVODIC-VUKOVIC, M., SCHIPPER, L. A. (1998) Hot-Water-soluble C as a simple measure of labile soil organic matter: The relationship with microbial biomass C. Soil Biol. Biochem. Vol. 30, No. 10/11. 1469-1472
- SPSS 7,5 FÜR WINDOWS (1997)
- STATSOFT, INC., STATISTICA 5.1 (1997)
- THALMANN, A. (1968) Zur Methodik der Bestimmung der Dehydrogenaseaktivität im Boden mittels Triphenyltetrazoliumchlorid (TTC). Landwirtsch. Forsch. 21. 249 – 258
- VANCE, E.D., BROOKES, P.C., JENKINSON, D.S. (1987) An extraction method for measuring microbial biomass C. Soil Biol. Biochem. 19: 703–707
- VORONEY, R.P., WINTER, J.P., BEYAERT, R.P. (1993) Soil microbial biomass C and N. In: Carter, M.R. (Ed.) Soil Sampling and Methods of Analysis. Lewis Publishers, Boca Raton. 227–286

Danksagung

Frau Dr. habil. E.-M. Klimanek danken wir für viele hilfreiche Hinweise und Ratschläge zu allen bodenbiologischen Fragen und Unterstützung jeglicher Art einschließlich der Hilfen bei den Bestimmungen der mikrobiellen Biomasse und der Bodenenzyme durch ihr Laborteam. Ebenso möchten wir Frau Dr. E. Schulz Dank sagen für alle Erläuterungen, Hilfen, Ratschläge und Unterstützung zur Methodik der Heißwasserextraktion von C und N einschließlich der Durchführung und Analyse durch das von ihr geleitete Laborteam.

Indikation in Auen

Präsentation der Ergebnisse
aus dem RIVA-Projekt

Mathias Scholz, Sabine Stab, Klaus Henle (Hrsg.)

UFZ-Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH
Projektbereich Naturnahe Landschaften und Ländliche Räume

Das dem Bericht zugrunde liegende Projekt wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF, Projektträger BEO) unter dem Förderkennzeichen 0339579 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt der Beiträge liegt bei den Autoren.