

Prognose von Redoxpotenzialveränderungen in Auenböden der Elbe

Kathrin Heinrich, Jörg Rinklebe, Heinz-Ulrich Neue

1 Einleitung

Die Verfügbarkeit von Nährstoffen für Pflanzen wird in Auenböden wesentlich durch chemische und mikrobielle Oxidations- und Reduktionsprozesse bestimmt, welche durch den Gehalt des Bodens bzw. des Porenwassers an Sauerstoff kontrolliert werden. Solange in einem Boden molekularer Sauerstoff zur Verfügung steht, unterliegen ausschließlich Sauerstoff, anorganische Stickstoff- und Manganverbindungen Oxidations- und Reduktionsreaktionen. Kommt es zu einer Überflutung des Bodens, so werden nach Verbrauch des molekularen Sauerstoffs bis dahin inaktive Redoxsysteme, wie anorganische Fe^{3+} -Verbindungen, Sulfate und CO_2 (CO_3^{2-} bzw. HCO_3^-) durch anaerobe bzw. fakultativ anaerobe Mikroorganismen reduziert. Die Intensität dieser Reduktionsprozesse hängt stark vom Gehalt des Bodens an organischer Substanz sowie von der Temperatur ab (GLINSKI ET AL. 1986). Die Konsequenz dieser Reaktionen ist ein Absinken des Redoxpotenzials des Bodens und ein Ansteigen des pH-Wertes (DOWDELL UND SMITH 1974). D'ANGELO UND REDDY (1994) zeigten, dass die Produktivität sowie die Wasserqualität von Auenböden wesentlich durch die Umsetzung der organischen Substanz des Bodens bestimmt wird. Dabei wird die Art und Menge an freigesetzten Nährstoffen nicht nur von der mikrobiellen Aktivität des Bodens bestimmt, sondern auch von der chemischen Zusammensetzung (Umsetzbarkeit) der organischen Substanz des Bodens (FENCHEL UND JORGENSEN 1977). MCLATCHY UND REDDY (1998) zeigten, dass beim Übergang von oxidierenden zu reduzierenden Bedingungen die Umsatzraten der organischen Substanz des Bodens abnehmen, was mit einem Absinken der mikrobiellen Biomasse und der Enzymaktivität verbunden ist.

In Naturböden bzw. langjährig gleich bewirtschafteten Flächen stellt sich über lange Zeiträume hinweg ein Fließgleichgewicht zwischen dem Aufbau und der Zersetzung von organischer Substanz des Bodens und damit des organischen Kohlenstoffs ein (KÖRSCHENS 1997). Für die Betrachtung des Einflusses der organischen Substanz des Bodens auf Transformationsprozesse von Nähr- und Schadstoffen im Boden ist nur der Teil der organischen Substanz des Bodens bedeutsam, der in praktisch relevanten Zeiträumen Umsatzprozessen unterliegt. KÖRSCHENS ET AL. (1990) klassifiziert die organische Substanz des Bodens in einen inerten, an den Transformationsprozessen weitgehend unbeteiligten Teil und einen umsetzbaren Teil. Böden mit sehr hohen Anteilen an umsetzbarer organischer Substanz des Bodens können demnach auch hohe Mengen an Nähr- und Schadstoffen transformieren. Dabei kann es zur Überversorgung mit Nährstoffen und erhöhten Mobilität von Schadstoffen kommen, die das Ökosystem nachteilig beeinflussen.

In den folgenden Versuchen wurde der Einfluss von bodenmikrobiologischen Leistungsparametern, der organischen Substanz des Bodens sowie deren umsetzbarer Teil auf das Redoxverhalten von überstauten Auenböden getestet. Beispielhaft werden hier diese Zusammenhänge an Auengleyen diskutiert, da diese Böden im Falle einer Überflutung am längsten überstaut sind und für eine mögliche Nähr- bzw. Schadstoffmobilisierung das höchste Gefahrenpotenzial aufweisen.

Auf Grundlage von im Gelände erhobenen Überflutungszeiträumen und Bodenfeuchte-messungen sowie unter Laborbedingungen ermittelter Redoxpotenzialänderungen pro Tag wurde für Auengleye der Standorte Wörlitz und Steckby der Versuch unternommen, das Mobilisierung-/Verlagerungspotenzial redoxsensitiver Elemente nach Überstauungssituationen vorherzusagen.

2 Material und Methoden

Im Biosphärenreservat Mittlere Elbe wurden entsprechend der Intensität und Dauer der Überflutung Bodenleitprofile angelegt, die bis auf das Bodenvarietäten- bzw. Substratsubtypenniveau klassifiziert und horizontbezogen beprobt wurden. Die Ansprache der Bodenprofile erfolgte nach der ARBEITSGRUPPE BODEN (1994) (KA 4). Das Biosphärenreservat ist durch Niederschlagswerte zwischen 540 und 570 mm gekennzeichnet. Die mittlere Jahresschwankung der Temperatur liegt bei 18,5°C (Monatsmittel 0°C, Juli 18,5°C).

Um eine Überflutung der Bodenprofile zu simulieren, wurde der Verlauf des pH-Wertes und des Redoxpotenzials im Laborversuch in horizontspezifischen Bodensuspensionen (Boden/ Wasser_(bidest)-Verhältnis 1:8, 4 Replikationen) über 120 Tage verfolgt. Es wurde die mittlere Redoxpotenzialänderung pro Tag ermittelt, wobei bei den Unterbodenhorizonten über die gesamte Versuchszeit und bei den Oberbodenhorizonten nach Erreichen des niedrigsten Redoxpotenzialwerts gemittelt wurde.

Die Fraktionierung der organischen Substanz des Bodens erfolgte nach der Heißwasserextraktionsmethode (SCHULZ 1990). Die Bestimmung der mikrobiellen Biomasse erfolgte nach ANDERSON UND DOMSCH (1978) in der Heinemeyeranlage (SIR). Die beta-Glucosidase wurde nach HOFFMANN UND DEDEKEN (1965), die alkalische Phosphatase nach TABATABAI UND BREMNER (1969) sowie nach EIVAZI UND TABATABAI (1977) und die Proteaseaktivität nach LADD UND BUTLER (1972) bestimmt.

Die Bodenfeuchtemessungen erfolgten mittels TDR-Technik. Die Wasserstandsmessungen erfolgten über Druckmessungen mittels Multisensormodul (Firma UIT-GmbH Dresden).

3 Ergebnisse und Diskussion

Aufgrund hoher organischer Kohlenstoffgehalte, besonders in den oberen Horizonten der Böden, wurde nach Überflutung mit einer drastischen Absenkung des Redoxpotenzials gerechnet. So konnten SCHWARTZ ET AL. (1999) in Feldversuchen zeigen, dass nach einer großflächigen Überflutung eines Deichvorlands im Bereich der unteren Mittel-Elbe drastische Redoxpotenzialabsenkungen in Abhängigkeit vom organischen Kohlenstoffgehalt (C_{org}) beobachtet werden konnten.

In den Laborexperimenten konnte gezeigt werden, dass die Redoxpotenzialabsenkungen in den humusreichen Oberbodenhorizonten deutlich unterschiedlich zu den anderen Bodenhorizonten verliefen. Bei einer Versuchsdauer von 120 Tagen wurden auch in den jeweiligen Oberbodenhorizonten trotz hoher C_{org} -Gehalte keine negativen Redoxwerte erreicht. Die Minimalwerte des Redoxpotenzials lagen bei 60 mV, wobei das Redoxpotenzial in Flutrinnenbereichen deutlich schneller als in den höher gelegenen Grünlandbereichen sank. Es scheint, dass der organische Kohlenstoff zwar die Kinetik der Redoxpotenzialänderung, nicht aber die Kapazität der Potenzialabsenkung beeinflusst.

Eine mögliche Ursache dafür ist eine unzureichende Menge an umsetzbaren Kohlenstoff, denn nur dieser Anteil der organischen Bodensubstanz beeinflusst die im Boden ablaufenden Prozesse der Stofftransformation entscheidend und wird in Abhängigkeit von dessen Eigenschaften und Standortbedingungen auch mineralisiert. Gleiches gilt auch für den Stickstoff. Als Maß für die im Boden ablaufenden Umsetzungs- und Mineralisierungsprozesse wurde als umsetzbarer Anteil der organischen Bodensubstanz der heißwasserlösliche Kohlenstoff (C_{hwl}) bestimmt, da ein hoher C_{org} nicht zwingend einen hohen umsetzbaren Anteil der organischen Substanz bedingt.

Neben einer ausreichenden Menge an umsetzbaren Kohlenstoff ist auch die Leistungsfähigkeit (Aktivität) der mikrobiellen Biomasse entscheidend, da die Redoxpotenzialänderungen wesentlich durch mikrobielle Prozesse gesteuert werden. Im Gegensatz zu C_{org} und N_t regieren mikrobiologische Parameter in der Regel auch schneller und empfindlicher auf veränderte Umweltbedingungen und können als empfindliche Indikatoren für Veränderungen der Qualität und Quantität der organischen Bodensubstanz dienen (ANDERSON UND DOMSCH 1989, BECK 1984, MCGILL ET AL. 1986, POWLSON ET AL. 1987). Zusammenhänge von Redoxpotenzialänderungen zu bodenchemischen und bodenbiologischen Kennwerten finden sich in Tab. 1. Dabei wurden Beziehungen zur mikrobiellen Biomasse sowie zu

mikrobiellen Leistungsparametern des C-Kreislaufes (beta-Glukosidase), des N-Kreislaufes (Protease) sowie des P-Kreislaufes (alkalische Phosphatase) erstellt, denn eine hohe mikrobielle Biomasse bedingt nicht zwangsläufig eine hohe mikrobielle Aktivität.

Tab. 1. Zusammenhänge von Redoxpotenzialänderungen zu bodenchemischen und bodenbiologischen Kennwerten, ausgewiesen für Auengleye der Standorte Wörlitz und Steckby (Rangkorrelationskoeffizienten nach Spearman, Rho, $p = 99\%$)

	delta Eh/ Tag	C _{org}	C _{hwil}	N _t	N _{hwil}	mikrobielle Biomasse	beta-Gluco- sidase	Prote- ase	alk. Phos- phatase
delta Eh/ Tag	1								
C _{org}	-,858(**)	1							
C _{hwil}	-,863(**)	,975(**)	1						
N _t	-,727(**)	,784(**)	,720(**)	1					
N _{hwil}	-,890(**)	,922(**)	,887(**)	,754(**)	1				
mikrobielle Biomasse	-,876(**)	,846(**)	,826(**)	,674(**)	,863(**)	1			
beta-Glucosidase	-,845(**)	,829(**)	,824(**)	,707(**)	,853(**)	,853(**)	1		
Protease	-,803(**)	,856(**)	,819(**)	,677(**)	,864(**)	,860(**)	,971(**)	1	
alkalische Phosphatase	-,856(**)	,717(**)	,650(**)	,808(**)	,649(**)	,689(**)	,639(**)	,600(**)	1

C_{org}: organischer Kohlenstoff [%], N_t: Gesamtstickstoffgehalt [%], C_{hwil}: heißwasserlöslicher Kohlenstoff [mg/100g Boden], N_{hwil}: heißwasserlöslicher Stickstoff [mg/100g Boden], mikrobielle Biomasse: [µgC/g Boden], beta-Glukosidase: [µg Saligenin/g TS*3h], Protease: [µg Tryosin/g TS*2h], alkalische Phosphatase: [µg p-Nitrophenol/g TS*h]

Bei Betrachtung aller Auengleye der Standorte Steckby und Wörlitz (Tab. 1) konnten sowohl für die Gesamtgehalte an C (C_{org}) und N (N_t), die umsetzbaren Anteile an C (C_{hwil}) und N (N_{hwil}), die mikrobielle Biomasse als auch für die mikrobiellen Leistungsparameter hochsignifikante Zusammenhänge zu Änderungen des Redoxpotenzials erstellt werden. Diese Parameter erweisen sich somit als geeignet, Redoxpotenzialänderungen in Auenböden festzustellen und vorherzusagen. Engere Korrelationen zu den umsetzbaren Anteilen C_{hwil} und N_{hwil} sowie zu den bodenmikrobiologischen Parametern zeigen, dass Redoxpotenzialänderungen in stärkerem Maße durch diese Parameter als durch den in der Literatur zumeist verwendeten C_{org} gesteuert werden. Weiterhin wird deutlich, dass die beta-Glukosidase als ein Enzym des C-Kreislaufes, welches den Polysaccharidabbau steuert und eine wichtige Rolle beim vollständigen Abbau von Cellulose zu Glukose spielt, auch eng mit dem C_{org} und C_{hwil} korreliert. Ebenso ist die Protease als ein Enzym des N-Kreislaufes, welches den ersten Abbauschritt komplexer organisch gebundener N-Verbindungen zu Amino-N katalysiert, mit dem N_t und sogar deutlich besser mit dem N_{hwil} korreliert. Die engen Korrelationen zwischen dem heißwasserlöslichen C und N und bodenmikrobiologischen Parametern zeigen, dass mikrobiologische Parameter in hohem Maße durch umsetzbare Kohlenstoffanteile im Boden bestimmt werden.

Auf Grundlage von im Gelände erhobenen Überflutungsdauern (Pegelstandmessungen mittels Multi-Sensormodul) und Bodenfeuchtemessungen sowie unter Laborbedingungen ermittelter Redoxpotenzialänderungen pro Tag wurde für die Auengleye an den Standorten Wörlitz und Steckby der Versuch unternommen, das Mobilisierungs-/Verlagerungspotenzial redoxsensitiver Elemente nach Überstauungssituationen vorherzusagen (Tab. 2). Dazu wurde anhand der im Labor ermittelten Redoxpotenzialänderungen pro Tag sowie der im Gelände durch Pegelstands- bzw. Feuchtemessungen ermittelten Tage an denen das Profil überstaut war, ein zu erwartendes Redoxpotenzial errechnet und daraus das Potenzial der zu erwartenden Nährstoffmobilisierung nach den Angaben in Tab. 3 abgeschätzt. Aus Tab. 2 bzw. 3 ist zu sehen, dass auf dem Standort Wörlitz trotz eines mit Steckby vergleichbaren Überflutungszeitraums mit Ausnahme von Nitrat nicht mit einer Mobilisierung von Nährstoffen zu rechnen ist. Dagegen weist der Standort Steckby ein ganz erhebliches Gefahrenpotenzial hinsichtlich einer erhöhten Nährstoffverlagerung auf. In den obersten 30 cm besteht die Gefahr einer verstärkten Ammonium-, Fe²⁺- und Mn²⁺-Bildung und, verbunden mit einer in diesen Redoxbereichen möglichen Sulfatreduktion, Bildung von schwerlöslichen Sulfiden. Auch muss mit der Bildung des klimarelevanten Spurengases Methan gerechnet werden. Mit der Verlagerung von löslichen N- und Mn²⁺-Verbindungen über eine Tiefe von 100 cm muss ebenfalls gerechnet werden, da auch in einer Tiefe von 100 cm die

Redoxpotenziale unter einen für die Manganreduktion kritischen Wert von 450 mV sinken können. Eine mögliche Ursache für das unterschiedliche Verhalten beider Standorte ist in dem am Standort Wörlitz (325 mg/100g für Steckby, 113 mg/100g Wörlitz bezogen auf den obersten Bodenhorizont) deutlich geringeren Anteil an umsetzbaren Kohlenstoff zu suchen.

Tab. 2. Aus der Redoxpotenzialänderung pro Tag und der Dauer der Überstauung (Pegelstandsmessungen, Bodenfeuchtemessungen) errechnete Redoxpotenziale zweier Auengleye

Standort	Horizonttiefe [cm]	Anzahl der Überflutungstage laut Pegelstandsmessung	Anzahl der Überflutungstage laut Feuchtemessung	Zu erwartendes Eh laut Pegelstandsmessung	Zu erwartendes Eh laut Feuchtemessung
Steckby	30	221	308	-3 mV	-157 mV
	60	237	315	109 mV	8 mV
	100	276	279	395 mV	395 mV
Wörlitz	30	198	217	453 mV	441 mV
	60	234	258	560 mV	558 mV
	100	276	191	494 mV	525 mV

* bezieht sich auf Einbautiefe der Feuchtesensoren

Tab. 3. Experimentell ermittelte Redoxpotenziale für verschiedene Redoxreaktionen (SCHEFFER 1998)

Redoxreaktion	Eh [V] bei pH=7
Beginn der NO_3^- Reduktion	+0,45 bis +0,55
Beginn der Mn^{2+} -Bildung	+0,35 bis +0,45
O_2 nicht mehr nachweisbar	+0,33
NO_3 nicht mehr nachweisbar	+0,22
Beginn der Fe^{2+} -Bildung	+0,15
Beginn der Sulfatreduktion und Sulfidbildung	-0,05
Beginn der CH_4 -Bildung	-0,12
Sulfat nicht mehr nachweisbar	-0,18

4 Zusammenfassung

In Laborversuchen wurde der Einfluss der organischen Substanz des Bodens (C_{org}), des Gesamtstickstoffgehaltes (N_t), deren umsetzbarer Teil (heißwasserlöslicher Kohlenstoff (C_{hwl}) und Stickstoff (N_{hwl})) sowie ausgewählter bodenmikrobiologischer Leistungsparameter auf das Redoxverhalten von überstauten Auengleyen getestet. Dazu wurde der Verlauf des pH-Wertes und des Redoxpotenzials in Bodensuspensionen (Boden/Wasser-Verhältnis 1:8) verfolgt.

Bei Betrachtung aller untersuchten Auengleye der Standorte Steckby und Wörlitz konnten sowohl für die Gesamtgehalte an C (C_{org}) und N (N_t), die umsetzbaren Anteile an C (C_{hwl}) und N (N_{hwl}), die mikrobielle Biomasse als auch für die mikrobiellen Leistungsparameter hochsignifikante Zusammenhänge zu Änderungen des Redoxpotenzials erstellt werden. Es konnte gezeigt werden, dass zur Prognose von Redoxpotenzialänderungen nach Überstauungssituationen die Bestimmung von umsetzbaren C-Fractionen sowie von mikrobiellen Leistungsparametern besser geeignet sind als der C_{org} . Auf dieser Datengrundlage besteht die Möglichkeit, im Überstauungsfall die Fähigkeit von Böden, Nähr- und Schadstoffe zu transformieren, abzuschätzen bzw. vorherzusagen.

Die unter Laborbedingungen ermittelten Redoxpotenzialänderungen pro Tag wurden zu im Gelände erhobenen Überflutungszeiträumen in Beziehung gesetzt und ein Gefahrenpotenzial hinsichtlich einer verstärkten Nährstofffreisetzung ausgewiesen. Gerade in den Flutrinnenbereichen muss aufgrund der sehr langen Überflutungszeiträume und einhergehenden Gehalten an leicht zersetzbarem Kohlenstoff mit einer verstärkten Nährstoffmobilisierung gerechnet werden.

Literatur

- 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, J.P.E., Domsch, K.H. (1989) Ratios of microbial biomass carbon to total organic carbon in arable soils. *Soil Biol. Biochem.* 21: 471–479
- ARBEITSGRUPPE BODEN (1994) *Bodenkundliche Kartieranleitung. (KA 4) 4. Verb. u. erw. Aufl.* Hrsg. Bundesanstalt für Geowiss. u. Rohst. u. Geologische Landesämter d. BRD: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung Hannover
- Beck, T. (1984) Mikrobiologische und biochemische Charakterisierung landwirtschaftlich genutzter Böden, II. Mitt. Beziehungen zum Humusgehalt. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 147: 467–475
- D'Angelo E.M., Reddy, K.R. (1994) Diagenesis of organic matter in a wetland receiving hypereutrophic lake water: II Role of inorganic electron acceptors in nutrient release. *Journal of Environmental Quality*, 23, 937–943
- Dowdell, R.J., Smith, K.A. (1974) Field studies of the soil atmosphere. II. Occurrence of the nitrous oxide. *Journal of Soil Sciences*, 25: 231–238
- Eivazi, F., Tabatabai, M.A. (1977) Phosphatases in soils. *Soil Biol. Biochem.* 9: 167–172
- Fenchel, T.M., Jorgenson, B.B. (1977) Detritus foodchains of aquatic ecosystems: The role of bacteria. *Advanced Microbial Ecology*, 1, 1–58
- Glinski J., Bennicelli, R., Stepniewska, Z. (1986) Changes in the oxygen conditions of the soil of different degrees of compaction subjected to water and drying under the conditions of a model experiment. *Polish Journal of Soil Sciences*, 19: 21–26
- Hoffmann, G., Dedeken, M. (1965) Eine Methode zur colorimetrischen Bestimmung der beta-Glukosidase-Aktivität im Boden. *Zeitschrift f. Pfl.ernährg. Düngg. U. Bdkd.* 108: 193–198
- Körschens, M. (1997) Abhängigkeit der organischen Bodensubstanz (OBS) von Standort und Bewirtschaftung sowie ihr Einfluss auf Ertrag und Bodeneigenschaften. *Archiv für Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde*, 41/6: 435–464
- Körschens, M., Schulz, E., Klimanek, E.-M., Franko, U. (1990) Die organische Bodensubstanz-Bedeutung, Definition, Bestimmung. *Archiv für Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde*, 41/6: 427–434
- Ladd, J.N., Butler, J.H.A. (1972) Short-term assays of soil proteolytic enzyme activities using proteins and dipeptide derivatives as substrates. *Soil Biol. Biochem.* 4: 19–30
- McGill, W.B., Cannon, K.R., Robertson, J.A., Cook, F.D. (1986) Dynamics of soil microbial biomass and water-soluble organic C in Breton L after 50 years of cropping to two rotations. *Can. J. Soil Science* 66, 119
- McLatchey, G.P., Reddy, K.R. (1998) Regulation of organic matter decomposition and nutrient release in a wetland soil. *Journal of Environmental Quality*, 27: 1268–1274
- Powelson, D.S., Brookes, P.C., Christensen, B.T. (1987) Measurement of microbial biomass provides an early indication of changes in total soil organic matter due to straw incorporation. *Soil Biol. Biochem.* 19, 159–164
- Scheffer, F. (1998) *Lehrbuch der Bodenkunde: Scheffer; Schachtschabel. 14., neu bearb. und erw. Aufl./von P. Schachtschabel – Stuttgart: Enke. ISBN 3-432-84774-2*
- Schulz, E. (1990) Die heißextrahierbare C-Fraktion als Kenngröße zur Einschätzung des Versorgungszustandes der Böden mit organischer Substanz (OS). *Tag.-Ber. Akad. Landwirtsch.-Wiss., Berlin* 295, 269–275
- Schwartz, R., Gröngröft A., Miehlich, G. (1999) Die Bedeutung der Eindeichung auf den Wasser- und Stoffhaushalt ausgewählter Böden an der Mittel-Elbe. In: Friese, K., Kirschner, K., Witter, B. (Hrsg.) *Stoffhaushalt von Auenökosystemen der Elbe und ihrer Nebenflüsse. Umweltforschungszentrum Leipzig – Halle, UFZ-Bericht, 1/1999: 109–112*

Tabatabai, M.A., Bremner, J.M. (1969) Use of p-nitrophenyl phosphate for assay of soil phosphatase activity. *Soil Biol. Biochem.* 1: 301–307

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.