

M. Hupfer
 UFZ-Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH
 Sektion Gewässerforschung Magdeburg

Änderungen im Ökosystem bei der Abdeckung des mineralischen Untergrundes durch biogene Sedimente

Anliegen des Beitrages

Die biogeochemischen Prozesse in der Sediment-Wasser-Kontaktzone haben entscheidenden Einfluß auf den Stoffhaushalt von Seen. Diese in der Limnologie weitgehend akzeptierte Aussage soll im folgenden Beitrag unter dem Aspekt der allmählichen qualitativen Veränderung des Seebodens während der Alterung von Bergbaurestseen betrachtet werden. Um steuernd auf die Wasserqualität einzuwirken sowie die Prognosesicherheit bezüglich der zukünftigen Wasserqualität zu erhöhen, sind Kenntnisse über den Transport sowie die Festlegung von Stoffen im Sediment unbedingt erforderlich. Da bisher kaum Feldstudien über den Einfluß der limnischen Sedimente in Bergbaurestseen verfügbar sind, stützen sich die hier getroffenen Bewertungen auf Erkenntnisse an anderen Seetypen und tragen deshalb hypothetischen Charakter. Praktische Bedeutung hat in diesem Zusammenhang die Frage, ob durch präventive Maßnahmen, z.B. durch den Bau von Flußkläranlagen, die Nähr- und Schadstoffzufuhr in das System gemindert werden muß oder ob diese Stoffe durch eine dauerhafte Fixierung im Sediment unwirksam gemacht werden. Die Nutzung oder Förderung dieser „Gratisleistungen“ des Systems könnten präventive Maßnahmen oder eine nachträgliche Restaurierung überflüssig machen und zur Kostenersparnis beim Management der Wasserqualität beitragen.

Seesediment und Stoffhaushalt

Limnische Sedimente bilden sich durch Einträge aus dem terrestrischen Einzugsgebiet (*allochthon*) sowie aus Stoffen, die im Seewasser durch chemische und biologische Prozesse synthetisiert werden (*autochthon*). Eine Sedimentschicht von wenigen Millimetern kann dieselbe Menge eines Stoffes enthalten wie in der gesamten darüberliegenden Wassersäule. Folglich würde die Freisetzung einer kleinen Menge des im Sediment akkumulierten Stoffvorrates ausreichen, um die Wasserqualität sehr nachhaltig zu beeinflussen. Abb. 1 zeigt die Dimensionen der wichtigsten Kompartimente in einem See und die wichtigsten Größen der Stoffbilanz. In dem Grenzbereich zwischen Seewasser und Sediment laufen intensive biogeochemische Umwandlungsreaktionen ab, welche darüber entscheiden, ob ein Stoff in gelöster Form wieder in das Tiefenwasser diffundiert oder in das Sediment eingebaut wird, wo er über geologische Zeiträume der Biosphäre entzogen bleibt. Die Intensität dieser Stoffumwandlungen (Diagenese) wird wesentlich vom organischen Gehalt sowie den Redox- und pH-Bedingungen bestimmt. Die Aktivität der Sedimente spiegelt sich in Stoffgradienten im Wasserkörper wider. Besonders während der thermischen Schichtung kann es zum Verbrauch oder zur Akkumulation von Stoffen im Tiefenwasser kommen. Während die Bildung von N_2 unter Nitratverbrauch infolge der Denitrifikation im Sediment zu einer Stickstoff-Entlastung des Systems führt, ist die Bildung von Schwefelwasserstoff meist ein unerwünschter Effekt. Abb. 2 zeigt einige Beispiele für die Wirkungen des Untergrundes auf die Sauerstoff- und pH-Verhältnisse in Tagebaurestseen. Das Sediment kann wegen des Bindevermögens für

Stoffe als Puffer gegen externe Belastungen wirken und das Antwortverhalten (z.B. die Erhöhung der Primärproduktion) verzögern. Entscheidend für das Ausmaß dieser Pufferung ist die Belastbarkeit der als Senken dienenden Sedimente. In jungen Bergbauseen, die mit Flußwasser geflutet werden, könnte daher zunächst die Wasserqualität besser als erwartet sein. Es dominieren Eliminationsmechanismen durch Sedimentation gegenüber der Rücklösung aus Sedimenten (vgl. Abb. 1). Erst im weiteren Verlauf der Sukzession des Bergbausees könnten sich die Verhältnisse im grundnahen Bereich durch die verstärkte Sedimentation von organischen Material so verändern, daß ein Teil der zunächst fixierten Stoffe wieder in das Wasser abgegeben wird. Die Wasserqualität verschlechtert sich, obwohl keine externen Belastungsquellen mehr vorhanden sind. Das mögliche Gefährdungspotential durch die Primärfüllung belasteter Sedimente ist in Abb. 3 dargestellt.

Der interne Kreislauf verzögert oder verhindert oftmals auch die Wirkung externer Sanierungsmaßnahmen in natürlichen Seen. Interne Restaurierungsmaßnahmen zielen deshalb häufig darauf, diesen internen Kreislauf zu unterbinden oder wirkungslos zu machen. Folgende Steuermöglichkeiten werden dafür in der Praxis genutzt:

1. Erhöhung der Sedimentation durch Fällmittelzusatz (z.B. Applikation von Fe-Salzen, künstliche Calcitfällung)
2. Verringerung der Rücklösung durch Sedimentkonditionierung (Oxidation mittels Sauerstoff oder Nitrat, Zugabe von Bindungspartnern)
3. Entfernung des Sedimentes (Entschlammung) oder der rückgelösten Stoffe (Tiefenwasserableitung)
4. Beeinflussung der Morphometrie, um die Schadstoffe der Sedimente zu akkumulieren (gebagerte Sedimentfallen) und technisch zu entfernen

Langfristig wirken die Sedimente eines Sees aber immer als Stoffsenken. Durch Vergleich des Importes und des Exportes läßt sich die Stoffretention im Sediment (Nettosedimentation) berechnen. Abb. 4 zeigt die Orthophosphat-Frachten der Mulde vor und nach dem Restsee Muldenstein. Zwischen 1989 und 1993 wurden durchschnittlich 30% des o-PO_4 - Importes eliminiert. Trotz der abnehmenden P-Fracht in den letzten Jahren reicht die gegenwärtige Flächenbelastung mit Orthophosphat aus, um hocheutrophe Verhältnisse zu erhalten.

Die stoffliche Zusammensetzung des Sedimentes kann als integrierendes Maß die Belastungssituation über eine bestimmte Zeitperiode charakterisieren, die durch Wasseranalysen nicht oder nur unzureichend nachweisbar sind. Die zeitlich nacheinander abgelagerten Sedimentschichten werden darüberhinaus oft zur Rekonstruktion der Seengeschichte benutzt. Neben der Möglichkeit, sogar Klimaschwankungen nachzuweisen, können Sedimente die momentane oder zeitlich zurückliegende Schadstoffbelastung aufzeichnen (Sedimente als Umweltarchive). Das Prinzip für derartige Bewertungen ist in Abb. 5 dargestellt. Bei der Interpretation der vertikalen Konzentrationsverteilung innerhalb von Sedimenten ist zu beachten, daß einige Stoffe mobilisiert werden und innerhalb des Sedimentes migrieren können.

Herkunft und Zusammensetzung limnischer Sedimente

Eine Charakterisierung des Sedimentes kann hinsichtlich der Herkunft, der Zusammensetzung sowie der Wirkung und des Verhaltens erfolgen (Tab. 1).

Tab. 1 Klassifizierung von limnischen Sedimenten

I. Herkunft	II. Zusammensetzung	III. Qualitätskriterien ¹
1. Allochthone Einträge (gelöste und partikuläre Stoffe aus dem Einzugs- gebiet, atmosphärische Deposition, Stoffe aus Grundwasser)	1. Physiko-chemisch (Farbe, Textur, Korn- größen, organischer Gehalt, Anteil Weich- sedimente)	1. Vergleich mit „Background“- Werten 2. Vergleich des Interstial- mit dem Seewasser
2. hydrogenes Sediment (Fällungen im Wasser- körper- z.B. Fe-und Al- Fällung, Calcitfällung)	2. Biologische Parameter (Besiedlung, Umsatzra- ten, Enzymaktivitäten ...)	3. Gleichgewichtige Sedi- ment- Wasser
3. Biogenes Sediment (Ablagerung von leben- den und toten Organismen, Siliziumablagerung durch Diatomeen u.a.)	3. Chemisch (Stoffgehalte, Mineralien, C/N-Verhält- nisse u.a.)	4. Bioverfügbarkeit/Bio- assays (Dosis- Wirk- kungs-Beziehungen) 5. Verhalten in Lau- gungsmitteln

¹JRB Associates, Mc Lean Virginia: Background and Review Document on the Development of Sediment Criteria (zit. aus Förstner et al., 1987)

Das Langzeitverhalten von Schadstoffen in Sedimenten unter veränderlichen Bedingungen (siehe Abb. 3) läßt sich durch die Anteile typischer Bindungsformen besser charakterisieren als durch die Gesamtkonzentration des betreffenden Schadstoffs. Eine Abschätzung der Bindungsanteile z.B. von Schwermetallen erfolgt zur Zeit vor allem durch sequentielle Auslaugungsverfahren. Die dabei gewonnenen „Fraktionen“ entsprechen meist nicht einer definierten Stöchiometrie und Struktur, sondern sind durch die Wahl des Laugungsmediums und der speziellen Versuchsbedingungen definiert („operationelle Phasen“). Meist wird durch das Extraktionsmittel eine bestimmte, möglicherweise langfristig wirksame Umweltbedingung simuliert. Die Bewertung der Schadstoffe im Sediment durch Konzentrationsangaben absolut zu bewerten ist auch deshalb unzureichend, weil die Stoffvielfalt und die Bioverfügbarkeit meist nicht beschrieben werden können. Es wird daher gegenwärtig versucht, ökotoxikologische Testmethoden zu etablieren, die eine summarische Beurteilung der Effekte auf die Biozönose erlauben.

Die Konzentrationen im Porenwasser (Interstialwasser) ist der empfindlichste Indikator für die Art und das Ausmaß der Reaktionen, die zwischen Festphase und der mit ihr in Kontakt stehenden Lösungsphase stattfinden. Kleine Veränderung an den Feststoffphasen, die wegen der großen Oberfläche viel Schad- oder Nährstoffe gebunden haben, werden durch deutliche Signale in dem kleinen Volumen des eingeschlossenen Porenwassers angezeigt.

Mit zunehmender Alterung des Bergbausees ist mit einer qualitativen Veränderung bei der Sedimentbildung zu rechnen. In Abb. 6 ist die Bildung von limnischen Sedimenten in einem Restsee, der mit aufgehendem Grundwasser gefüllt wird, hypothetisch dargestellt. In der frühen Phase dominieren die allochthon eingetragenen Par-

tikel aus der Umgebung und Stoffeinträge durch das Grundwasser. Das Bodenrelief wird durch die Wasserbewegung bei der Füllung ausgeglichener. Der Seeboden ermöglicht die Wasser- und Stoffpassage in beide Richtungen. Die autochthone Sedimentbildung wird in dieser Phase durch Fällung von Al- und Fe-Verbindungen dominiert. In den späteren Stadien der Sukzession könnte es zunächst in den Senken zu einer Ablagerung von Sedimenten mit einem höheren biogenen Anteil kommen. Der Zustrom von Grundwasser verringert sich wegen des abnehmenden Gefälles und wegen der Kolmation der Grenzschicht zum Wasserkörper. Gegenüber der früheren Phase werden in einem älteren See interne Stoffkreisläufe (Austausch zwischen Sediment- und Wasser) zunehmend an Bedeutung gewinnen. Das Ausmaß dieses internen Stoffkreislaufes hängt vom Chemismus und der Produktivität des Gewässers ab. Die terrestrische Vegetation verhindert zunehmend die Erosion aus der unmittelbaren Umgebung des Restsees. Die frisch abgelagerten Sedimente werden höhere organische Gehalte aufweisen als die darunterliegenden Schichten. Es ist zu beachten, daß auch in natürlichen Seen die organischen Gehalte in Gewässersedimenten nicht als Maß für die Bioproduktion anzusehen sind, sondern sie spiegeln vielmehr die Relation allogener und endogener Mineralien im Vergleich zur Sedimentation von autochthoner organischer Substanz wider.

Ausgehend von der Darstellung 6 werden einige Kriterien vergleichend bewertet, die die Verhältnisse im Wasserkörper und im Sediment beeinflussen (Tab. 2).

Tab. 2 Vergleich von Restseen verschiedener Sukzessionsstufen mit einem natürlichen Gewässer hinsichtlich verschiedener Kriterien, die auf die Verhältnisse im Sediment und im Wasserkörper wirken

Kriterium	Restloch in Füllung	älterer Restsee	natürlicher See ¹
Allochthoner Stoffeintrag	hoch	mittel	niedrig
– Stoffeintrag durch Grundwasser oder Fremdfutung			
– Erosion			
Kontakt mit mineralischem Untergrund	hoch	gering	keiner
Einfluß oxidierter Kippen	hoch	gering	keiner
Fe- und Al-Ausfällung im Wasserkörper	sehr hoch	gering	gering
Interner Stoffkreislauf	niedrig	hoch	hoch
Nachschub von abbaubaren organischen Verbindungen	niedrig	hoch	hoch
Intensität von mikrobiellen Umsetzungen im Sediment	niedrig	hoch	hoch
Eutrophierungsgefahr nach P-Eintrag/P-Rücklösung	gering	möglich	möglich
Bindungspotential des Sedimentes für Schadstoffe	hoch	teilw. geringer	teilw. geringer

¹mit ähnlicher Geologie und Größe des Einzugsgebietes wie die betrachteten Restseen

Es wird deutlich, daß die sukzessive Annäherung eines Bergbaurestsees an einen natürlich entstandenen See auch an seinen Ablagerungen abzulesen ist. Tabelle 3 vergleicht die Beschaffenheit von Sedimenten aus dem Lausitzer Revier mit denen in Talsperren, natürlichen Seen und eines Abwasserteiches anhand ausgewählter Parameter. Auffällig sind die großen Unterschiede in den Sedimenten aus den Restseen sowie die extrem hohen Fe-Gehalte. Unerwartet hoch sind die organischen Gehalte und deren Schwankungsbreite. Als Ursachen dafür kommen abgelagerte Kohlepartikel oder der Eintrag von Huminstoffen aus dem Einzugsgebiet in Frage.

Tabelle 3 Chemische Charakterisierung von Sedimenten aus 14 Bergbauseen der Lausitz (Schultze, unveröff.) im Vergleich mit Sedimenten aus anderen Seen anhand ausgewählter Parameter (OS-organische Substanz, TM-Trockenmasse)

		OS %	P _{ges.} mg/gTM	Fe mg/gTM	Mn mg/gTM	Al mg/gTM
Bergbauseen	Mittel	22	1.5	192	0.58	21
	min	9	0.3	15	0.03	7
	max	35	3.8	890	2.30	62
Tegernsee	meso	10	0.8	21	0.85	-
Sempachersee	eu	13	1.3	15	0.93	7
TS Neunzehnhain	oligo ¹	35	1.4	28	1.82	68
TS Saidenbach	eu	19	3.7	25	2.08	24
Abwasserteich	hy	32	23.5	17	0.30	36

¹ bewaldetes Einzugsgebiet mit Versauerungsproblemen

Sediment als „mikrobielles“ Gradientsystem

Ein Teil der bei der Primärproduktion gebildeten chemischen Energie und des organischen Kohlenstoffs erreicht die Sedimentoberfläche. Während und nach der Sedimentation setzen biogene Reduktionsvorgänge ein, die bei der Zersetzung organischer Substanzen durch Mikroorganismen verursacht werden. Sie laufen normalerweise in einer definierten Folge ab, die mit der Sauerstoffzehrung beginnt und über die Mangan-, Nitrat und Eisenreduktion bis zur Reduktion von Sulfat führt. Steht noch abbaubares organisches Material zur Verfügung, mündet der Abbau in der Methanogenese. Der Geruch nach Schwefelwasserstoff oder das Aufsteigen von Gasblasen sind deutliche Zeichen einer hohen Stoffwechselaktivität eines Gewässersedimentes. Abb. 7 zeigt die Abfolge im Verbrauch der Elektronenakzeptoren und die dazugehörigen Redox-Bereiche. Die Dominanz bestimmter Umsetzungen ist in vielen Fällen an einer Zonierung in der oberen Sedimentschichten visuell erkennbar. Bei Sauerstoffkontakt sieht die oberste Schicht meistens hellbraun aus (oxidierte Fe-Verbindungen) während die tieferen Horizonte infolge der Sulfidbildung schwarz gefärbt sind. Nachweisen läßt sich diese Zonierung auch in der vertikalen Konzentrationsverteilung der Oxidationsmittel im Porenwasser. Weil der Ort des Verbrauches tiefer liegt, dringt z.B. Sulfat tiefer als das Nitrat in das Sediment ein. Die Lage der Übergangszone zwischen aeroben und anaeroben Bedingungen hängt vom

Nachschub organischer Stoffe ab und unterliegt auch innerhalb eines Sees jahreszeitlichen Schwankungen. Die Grenze zu anaeroben Bedingungen kann bekanntermaßen auch über dem Sediment liegen. Abb. 7 illustriert drei unterschiedliche Situationen mit den Auswirkungen für die Phosphat-Freisetzung. Unter winterlichen Bedingungen kann die oxidierte Schicht bis einige Zentimeter dick sein. Durch zunehmende Sedimentation von organischem Material (während des Frühjahrs) erhöht sich die Intensität des aeroben Abbaus so, daß der Verbrauch von Sauerstoff schneller verläuft als die diffusionslimitierte Nachlieferung aus dem Wasserkörper. Ist der Sauerstoff verbraucht, wird nach dem nitratgebundenen Sauerstoff auch das dreiwertige Eisen reduziert. Da das Fe(II) in Lösung geht oder sulfidisch festgelegt wird, werden auch die an Eisen gebundenen Phosphate mobilisiert. Solange genügend andere metallische Bindungspartner vorhanden sind oder die Kapazität der oxidierten Schicht nicht erschöpft ist, wird Phosphat nicht in das Wasser abgegeben. Mit eintretendem Sauerstoffschwund im überstehendem Wasser kann oftmals auch eine Akkumulation von rückgelöstem Phosphat im Tiefenwasser eines Sees beobachtet werden.

Auswirkungen der Sedimente auf Eutrophierung und Versauerung

Angesichts der hohen Al- und Fe-Konzentrationen in den Sedimenten von Bergbauseen ist mit einer effizienten Immobilisierung von Phosphat an Metalloberflächen (u.a. Fe-III Oxihydrate, Fe-III-Komplexe, Al-/Fe-Oxide) zu rechnen. Kommt es dennoch zu einer Eutrophierung, trägt die gebildete Biomasse zur Verfrachtung von Phosphat in das Sediment bei. Diese biologische Selbstreinigung wird bei Trinkwassertalsperren durch den Bau von Vorsperren und Unterwasserbarrieren bewußt gefördert (BENNDORF et al. 1975). Bisherige Befunde an teilweise gefüllten Restlöchern führen zu der Hypothese, daß es trotz relativ hoher Gesamt-P-Gehalte nicht zu der aus Modellvorstellungen erwarteten Bioproduktion kommt.

Die Anreicherung von organischen Substanzen im Sediment befördert die Umkehr des Versauerungsprozesses durch Sulfatreduktion. Dabei entsteht FeS oder FeS₂ (Pyrit). Gemäß der beschriebenen Redoxhierarchie muß zunächst der Sauerstoff, das vierwertige Mangan, das Nitrat sowie das Eisen aufgebraucht sein, ehe bei heterotrophen Umsetzungen das Sulfat als Elektronenakzeptor verwendet wird. Untersuchungen von LOVLEY (1987) haben allerdings gezeigt, daß bei ausreichend hohem Angebot an leicht abbaubaren C-Quellen die Sulfatreduktion auch bei Anwesenheit von amorphen Fe(III)-Oxihydroxiden ablaufen kann. Diesen Prozeß zur Bekämpfung der Versauerung bewußt zu fördern, wird Gegenstand von zukünftigen Forschungsarbeiten sein. Abb. 8 faßt stark vereinfacht mögliche Rückkopplungen bei der Stimulation der Sulfatreduktion mit dem Phosphat-Austausch zusammen. Mit der dosierten Zugabe von leicht abbaubarem organischen Material könnte folgender Vorgang induziert werden: Eisen- und Sulfatreduktion sind nicht mehr substratlimitiert. Die dabei erfolgte Bildung von FeS oder FeS₂ führt zur pH-Erhöhung und zur Verdrängung von eisengebundenem Phosphat. Die Freisetzung von Phosphat aus Sedimenten durch die Sulfatreduktion in natürlichen Seen ist durch Untersuchungen von CARACO et al. (1994) belegt. Die pH-Erhöhung als auch die P-Versorgung aus dem Sediment stimulieren die Primärproduktion und erhöhen die Sedimentation von organischer Substanz. Die autochthon gebildete Biomasse lagert sich ab und versorgt die Sulfatreduzierer mit Substrat. Der Kreislauf ist dann geschlossen. Die künstlich zugebene C-Quelle fungiert als Starthilfe für den beschriebenen Kreislauf und kann somit den Zeitraum der Alkalinisierung verkürzen. Tatsächlich sind die ablaufenden Prozesse und die mögliche technische Realisierung wesentlich komplizierter als hier dargestellt.

Ausblick

Ohne Einbeziehung der Gewässersedimente lassen sich Stoffumsetzungen im Wasserkörper eines Sees nur unzureichend verstehen. In Bergbauseen gibt die Beschaffenheit der Ablagerungen Auskunft über die dominierenden Stoffströme und damit über das Entwicklungsstadium des entstehenden Sees.

Das Langzeitverhalten von eingetragenen Last- und Nährstoffen, die im Sediment akkumuliert werden, müssen verstärkt in die Prognose zur Wasserqualität Eingang finden. Das erfordert Kenntnisse über das Vorhandensein schädigender Substanzen im Füllwasser und ihr Verhalten im Sediment unter verschiedenen Umweltbedingungen.

Da das Sediment langfristig immer als Senke für Stoffe wirkt, ist außerdem zu untersuchen, ob die durch eine einmalige Stoßbelastung eingetragenen Stoffe, z. B. bei der Fremdflutung mit Flußwasser, über einen bestimmten Zeitraum immobilisiert oder abgebaut werden können. Damit sind Aussagen möglich, wie die Regulation des Stoffzu- und abstromes (Einbindung in das Vorflutssystem) erfolgen sollte und ob das Sedimentationsverhalten durch konstruktive Veränderungen analog den Vorsperren und Barrieren in Talsperren begünstigt werden kann. Für die Forschungen zur Wechselwirkung zwischen Sediment und Freiwasser an Bergbaurestseen ergeben sich folgende Schwerpunkte:

- Wirkung der anstehenden Kohle auf die Wasserbeschaffenheit
- Untersuchung der Bindungsformen, der Pfade und der Mobilität von Schad- und Nährstoffen unter dem Einfluß typischer Umweltfaktoren
- Ermittlung von gesicherten Beziehungen zwischen den Belastungen sowie den Umweltveränderungen einerseits und der zeitliche Abfolge von Ablagerungen in Sedimenten andererseits

Aktuelle limnologische Fragestellungen, wie die biologischen und chemischen Wirkmechanismen unter dem Einfluß der Versauerung oder die Wechselwirkung zwischen Sulfatreduktion und P-Bindung lassen sich an Bergbaurestseen besonders gut studieren.

Literatur

BENNDORF, J., PÜTZ, K., KRINITZ, H. & W. HENKE (1975): Die Funktion der Vorsperren zum Schutz der Talsperren vor Eutrophierung.- Wasserwirtsch. Wassertechn. 25: 10-25

FÖRSTNER, U. und Mitarbeiter (1987): Qualitätskriterien für Gewässersedimente- Allgemeine Problematik und internationaler Stand der Diskussion.- Z. Wasser-Abwasser-Forsch 20: 54-59

LOVLEY, D.R. (1987): Organic matter mineralization with the reduction of ferric iron: A review.- Geomicrobiology Journal 5, 3/4:

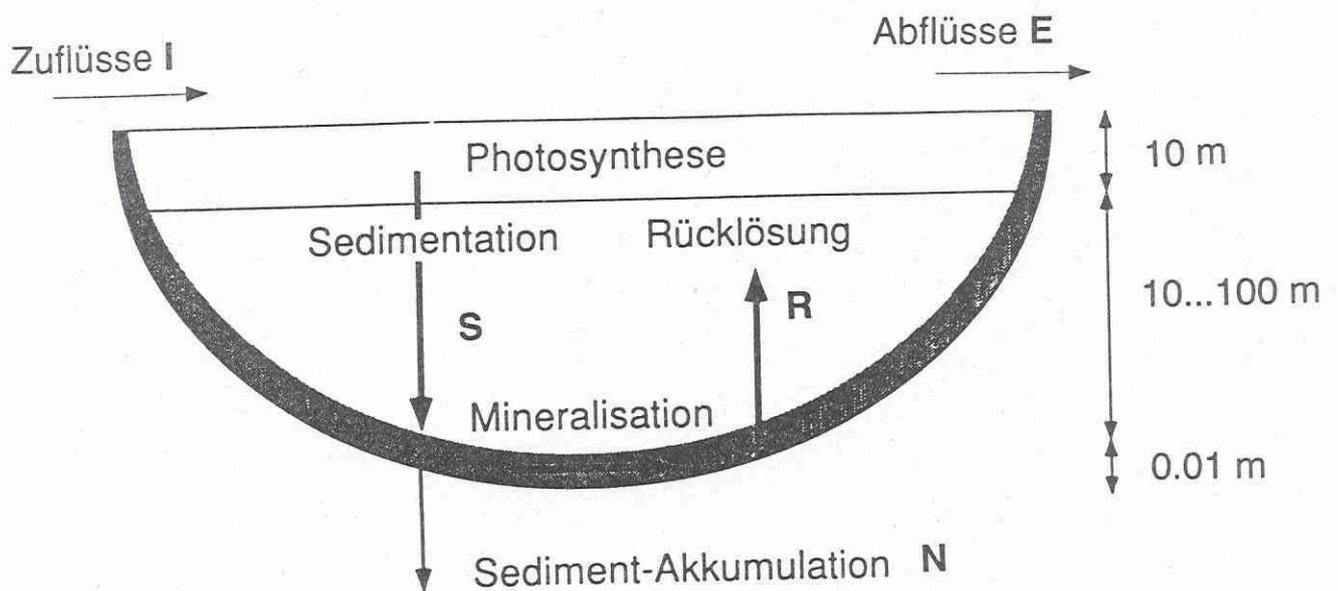
WEHRLI, B. (1993): Chemie am Seegrund.- Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich 138/2: 69-79

Weiterführende Literatur:

HAKANSSON, L. & M. JANSSON (1983): Principles of Lake Sedimentology.- Springer-Verlag Berlin, 316 S.

NEDWELL, D.B. & C.M. BROWN (Hrsg.) (1982): Sediment Microbiology.- New York

SLY, P.G. & B.T. HART (1989): Sediment/Water Interactions.- Kluwer Academic Publishers. Dordrecht/Boston/London, 533 pp



(verändert nach Wehrli 1993)

Abb. 1
 Bilanzgrößen eines Sees und die Dimensionen der drei Kompartimente: produktive Zone, Tiefenwasser, Biofilm an der Sedimentoberfläche
 Die Konzentrationsänderung eines Stoffes im Wasserkörper (dC/dt) lässt sich aus folgender Gleichung berechnen: $dC/dt = I - E - N$ (N-Nettosedimentation)

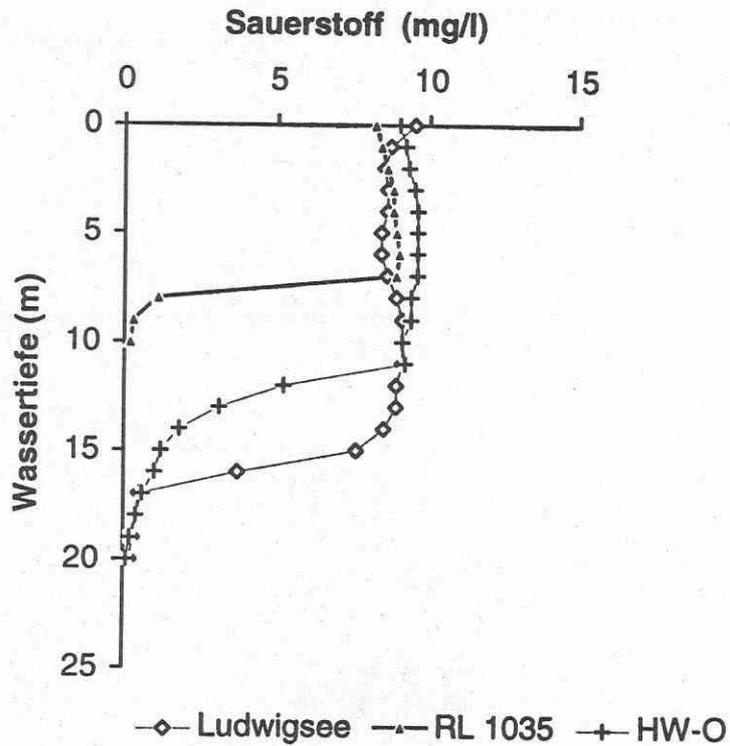
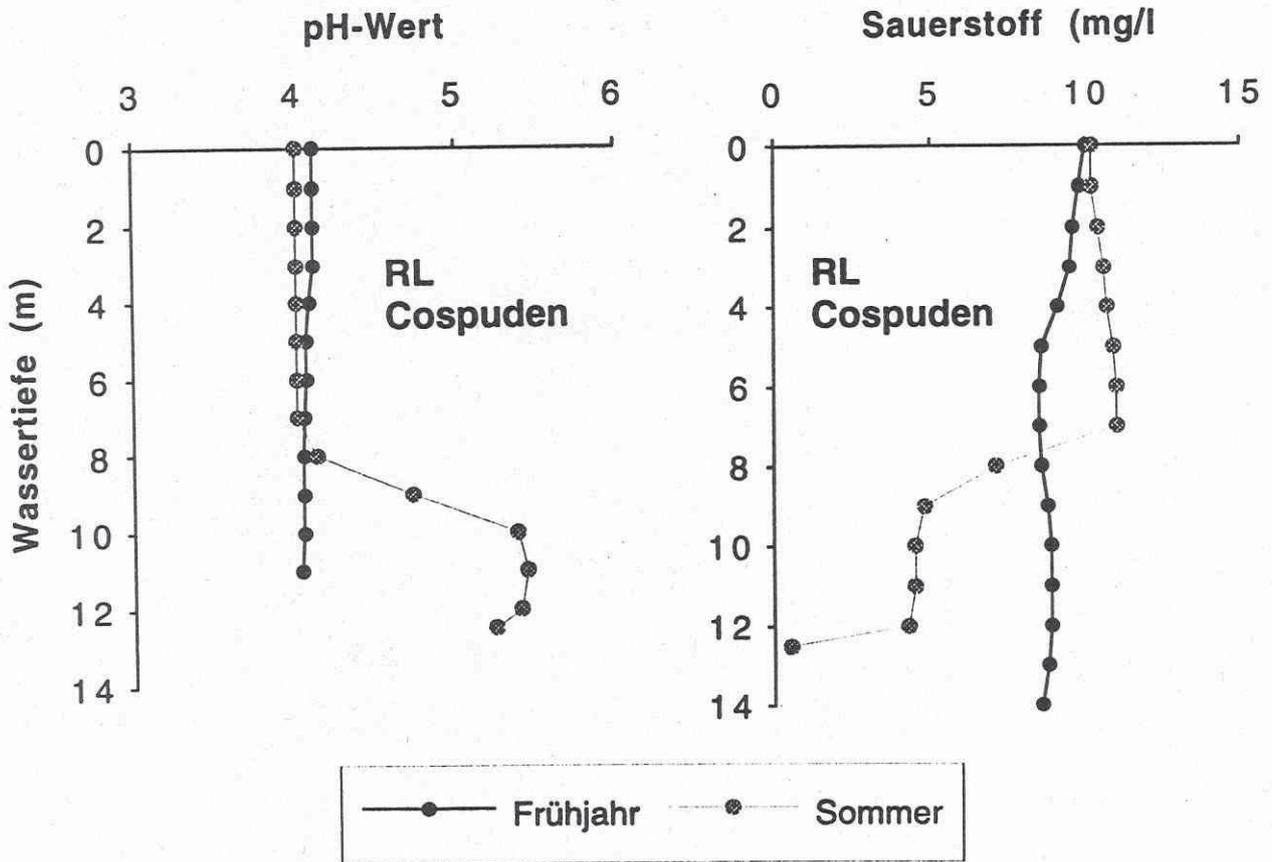


Abb. 2
 Sauerstoff- und pH- Verhältnisse im Wasserkörper in ausgewählten Restseen im Mitteldeutschen Raum (unten: Seen aus dem Holzweißiger Komplex bei Bitterfeld, Oktober 1994)

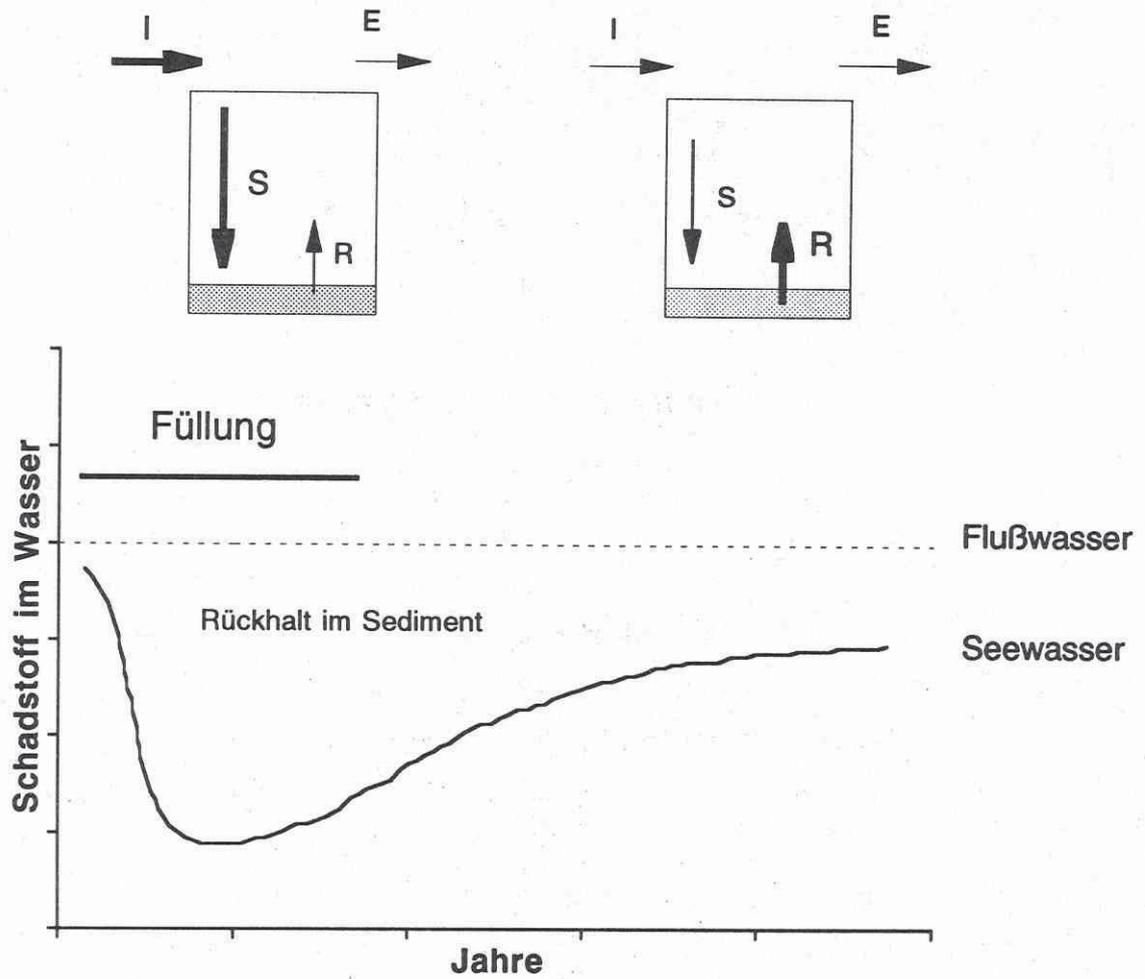


Abb. 3
 Hypothetischer Verlauf der Schad- oder Nährstoffkonzentration im Wasser eines Restsees während und nach der Flutung mit belasteten Flußwasser
 Oben: Veränderung der Bilanzgrößen (Abkürzung siehe Abb. 1)

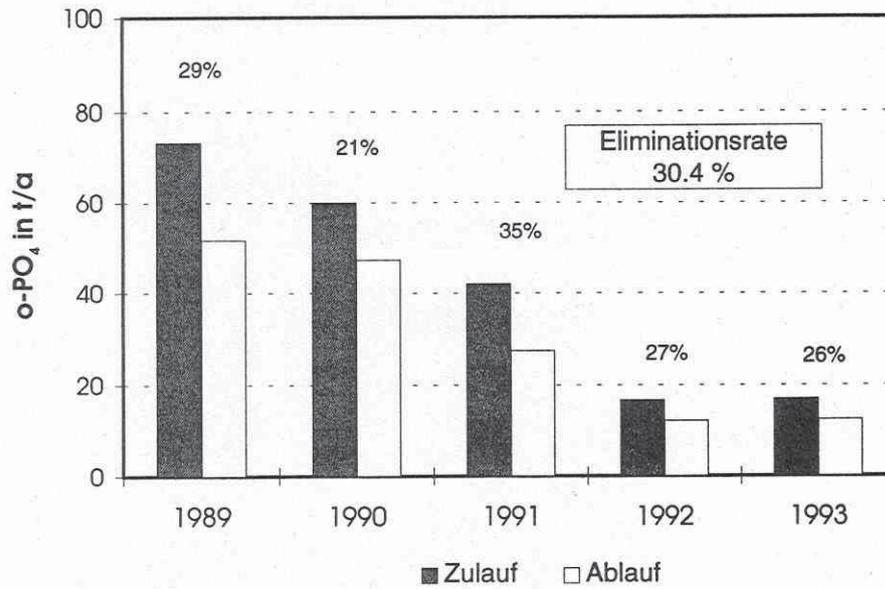


Abb. 4
Verminderung der P-Fracht der Mulde beim Durchfließen des Restsees Muldenstein (1989-93)

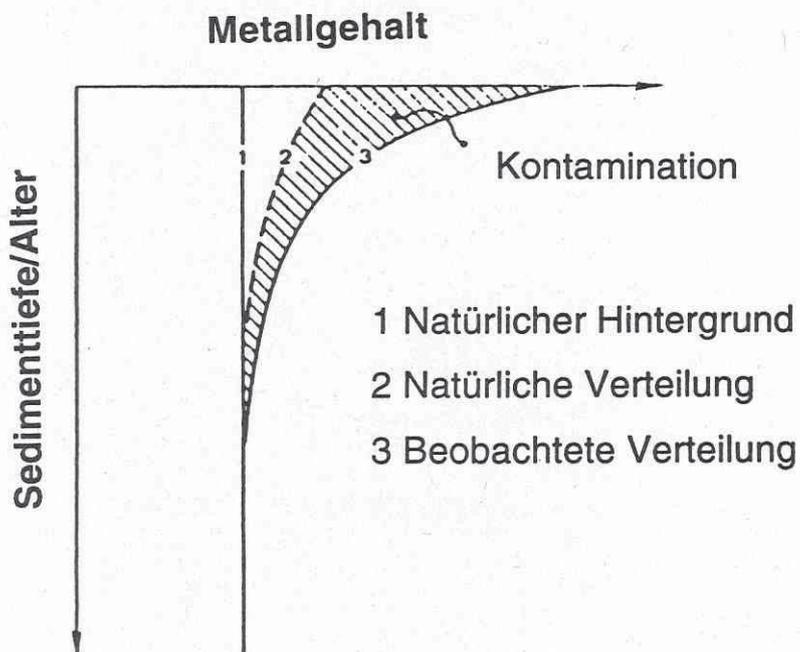


Abb. 5
Nachweis von erhöhten Schadstoffbelastungen durch Vergleich der tatsächlichen mit der natürlichen Stoffverteilung innerhalb von Sedimentkernen

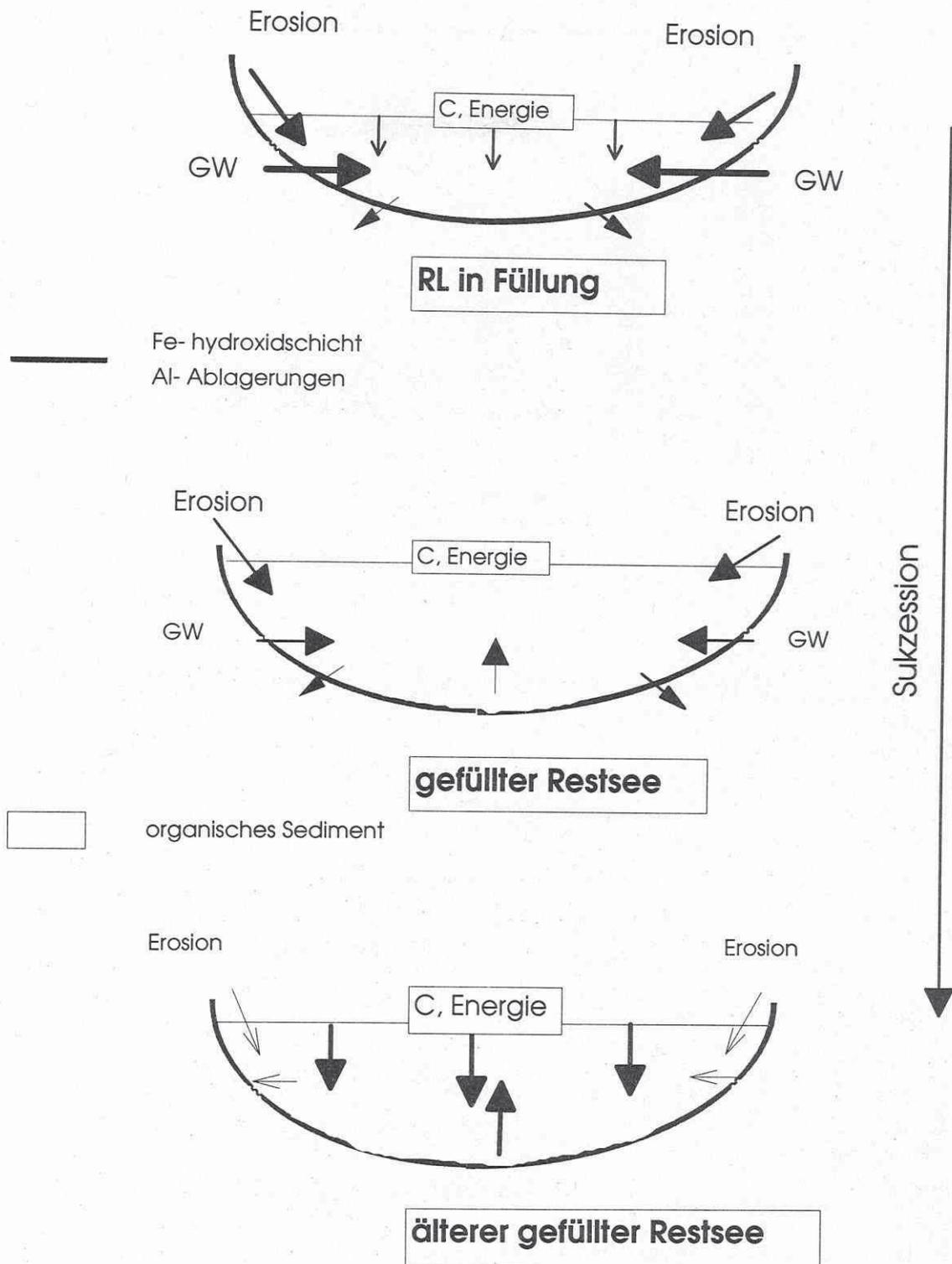


Abb. 6
 Bildung von organischen Sedimenten in einem Restsee und die Veränderung von medienübergreifenden Stoffströmen während der Sukzession

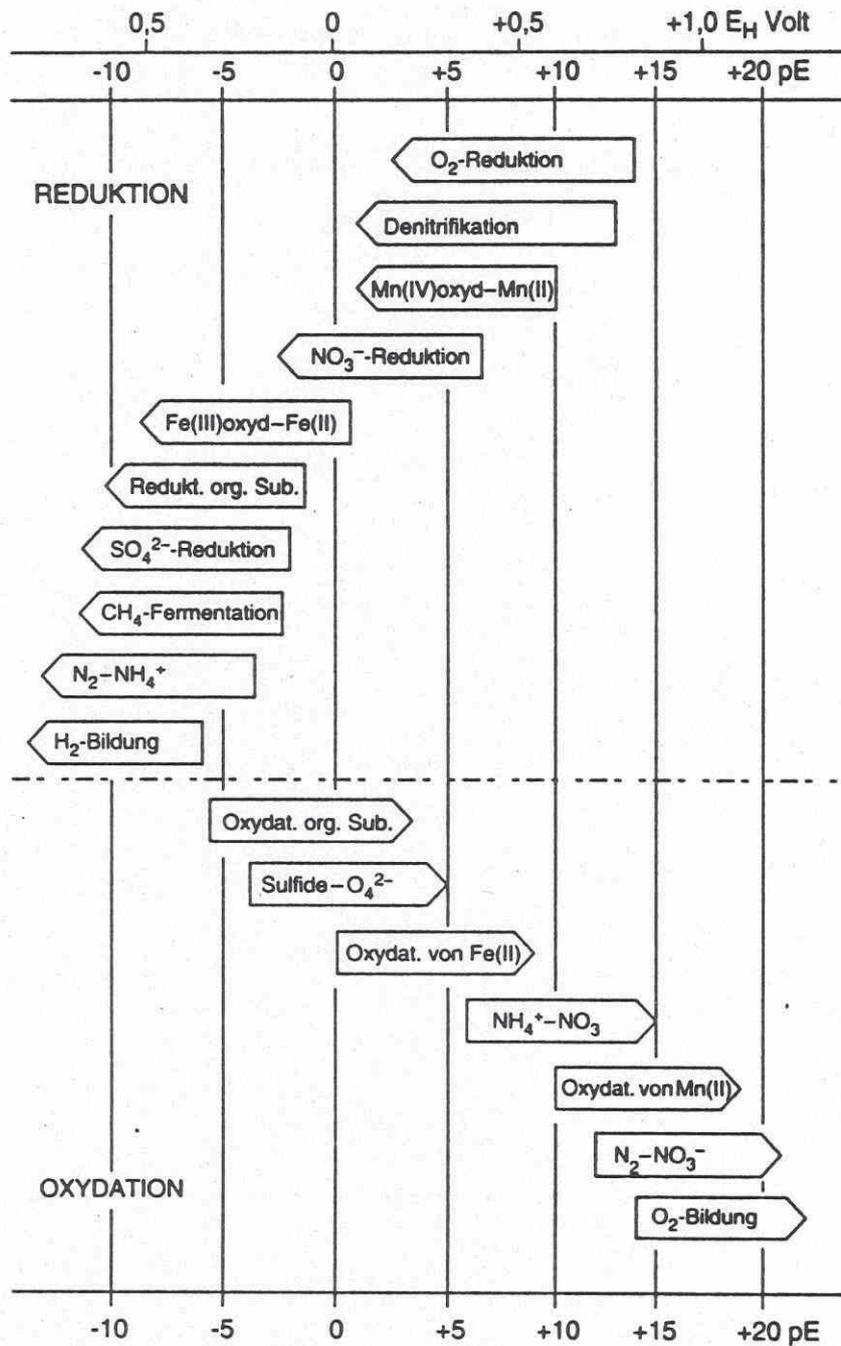


Abb. 7

Biogene Redoxprozesse mit den zugehörigen Redoxbereichen (kombiniert nach verschiedenen Autoren)

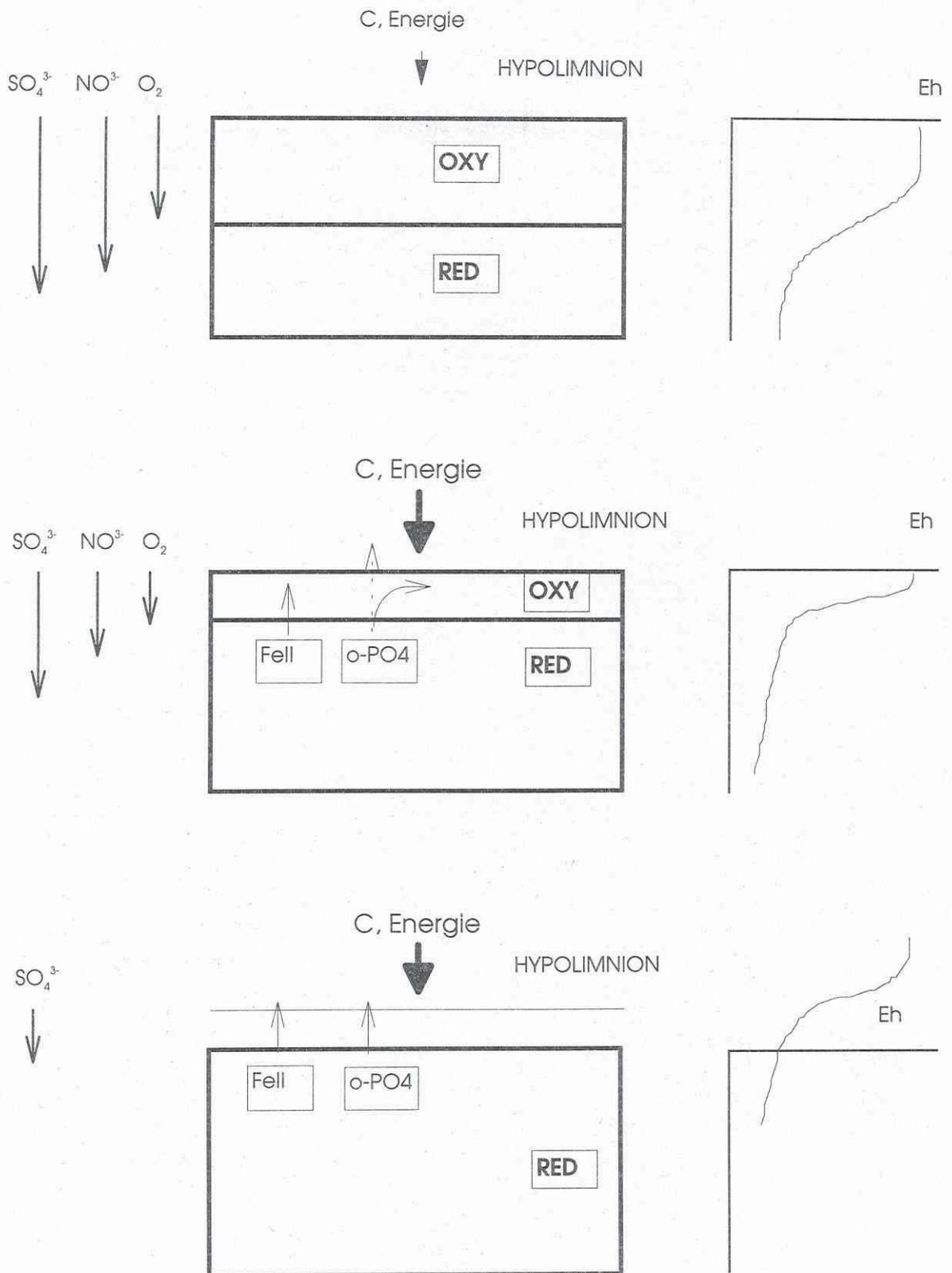


Abb. 8
Schematische Darstellung der Verhältnisse innerhalb eines Sedimentes durch Verlagerung der Grenze aerob/anaerob (OXY-oxidierter Sedimenthorizont, RED- sauerstofffreier Horizont, Eh- Redoxpotential)

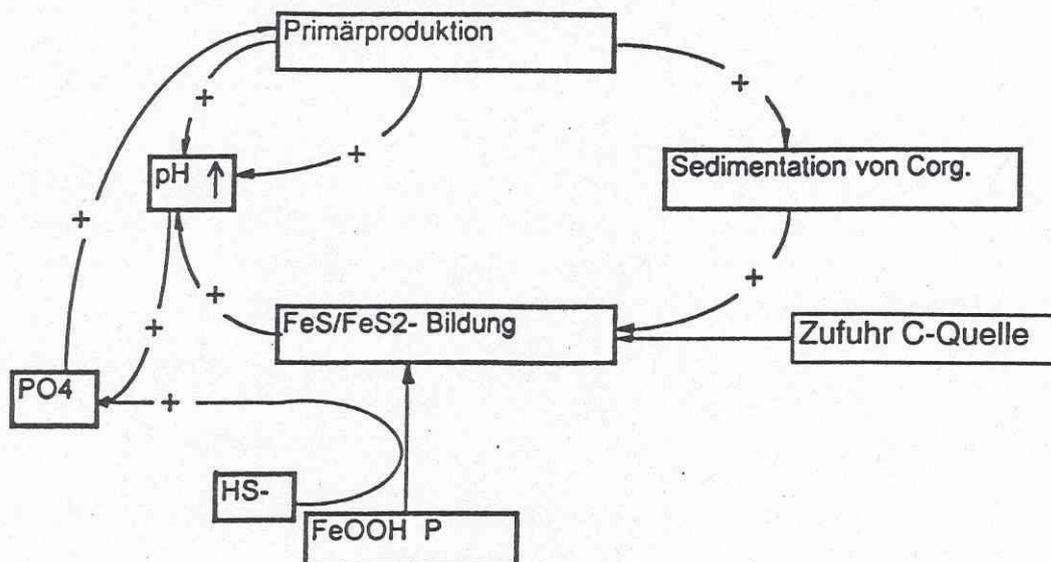


Abb. 9
Mögliche positive Rückkopplungen bei der Zugabe von künstlichem Substrat zur Stimulation der Sulfatreduktion auf den pH-Wert und die Primärproduktion



UFZ-Bericht

UFZ-Bericht • UFZ-Bericht • UFZ-Bericht • UFZ-Bericht

UFZ - Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH

Nr. 4/1995

**Beiträge
zum Workshop
"Braunkohlebergbaurestseen"**

**24.-25. November 1994
in Bad Lauchstädt**

Sektion Hydrogeologie
UFZ-Umweltforschungszentrum
Leipzig-Halle GmbH

ISSN 0948-9452