

Hochwasserereignisse und ihre Widerspiegelung im rezenten Seesediment eines Flusstausees

F.W. JUNGE, K. JENDRYSCHIK, P. MORGENSTERN, H.-C. TREUTLER, L. ZERLING^{*)}

Keywords: ^{137}Cs Caesium, high water level, lake sediment, lamination, river reservoir, trace element, Tschernobyl impact

Zusammenfassung: Sedimentkerne aus dem von der Mulde durchflossenen Bitterfelder Muldestausee (Sachsen-Anhalt, Deutschland) sind ein ausgezeichnetes Beispiel für das hohe Potential von Flusstauseen, die bei Hochwasserereignissen eintretenden Veränderungen in der Schwebstoff- und Sedimentqualität objektiv abzuschätzen. Voraussetzung hierfür bilden gesicherte Daten zur zeitlichen Zuordnung der in den Sedimentkernen auftretenden Ereignis- bzw. Hochwasserlagen.

Konnektierungen mit Durchflussdaten der Mulde seit 1975 geben die Möglichkeit, die in den Sedimentkernen auftretenden Ereignislagen konkreten Hochwässern der Mulde mit einem Durchfluss größer $300 \text{ m}^3/\text{s}$ zu zuordnen. Darüberhinaus bilden markante Zeitmarken: (a) das durch den Tschernobyl-Fallout hervorgerufene ^{137}Cs -Aktivitätsmaximum, (b) der seit der politischen Wende (1989/90) einsetzende Rückgang in der organischen Belastung und (c) der mit der Schließung des Berg-

und Hüttenwesens Industrie im Muldeinzugsgebiet ebenfalls einhergehende Trend abnehmender Element- und Isotopenkonzentrationen.

Am Beispiel eines im September 2002 aus dem Friedersdorfer Becken des Bitterfelder Muldestausees gewonnenen Kurzkernes werden die Ergebnisse der auf verschiedene Methoden gestützten zeitlichen Konnektierung von Sedimentlagen zu konkreten Hochwasserereignissen vorgestellt. Die im Sedimentkern auftretende jüngste und im Ergebnis des August-2002-Hochwassers abgesetzte Ereignislage erweist sich hinsichtlich Mächtigkeit des Sedimentauftrages und geochemischer Eigenschaften als eine besonders markante Hoch-wasserzeitmarke.

Abstract: Studies of sediment cores originating from a reservoir of the River Mulde near Bitterfeld (Saxony-Anhalt, Germany) confirmed that river reservoirs act as excellent archives of flood events. The records were performed by significant changes of the composition and quality of suspended matter and sediment. To combine the investigated sediment core with a reliable time scale, suitable reference data (e.g. radionuclides, geochemical markers) were included into the study. Subsequently, flow data of the Mulde (from 1975 up to now) were used to assign specific floods ($>300 \text{ m}^3/\text{s}$) to the event layers detected in the sediment cores. In addition to this, further time markers were inspected towards a more reliable adjustment of the time scale. In detail we made use of the ^{137}Cs activity maximum (caused by Chernobyl fallout), as well as of the drop in organic pollution (following the collapse of East Germany's industrial sector 1989/90), and finally of the decrease in the concentration levels of elements and isotopes (a consequence of the reduced activities of mines and metallurgical plants in the River Mulde catchment).

^{*)}Anschriften der Verfasser: F.W. JUNGE, K. JENDRYSCHIK, Sächsische Akademie der Wissenschaften zu Leipzig, Arbeitsstelle Schadstoffdynamik in Einzugsgebieten, Karl-Tauchnitz-Straße 1, 04107 Leipzig (Tel.: 0341-7115318, Fax: 0341-7115344; E-mail: junge@saw-leipzig.de); P. MORGENSTERN, H.-C. TREUTLER, UFZ-Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH, Permoserstraße 15, 04303 Leipzig; L. ZERLING, Sächsische Akademie der Wissenschaften zu Leipzig, Kommission für Umweltprobleme, Karl-Tauchnitz-Straße 1, 04107 Leipzig

Exemplarily we present the results for a short sediment core, which originates from the Friedersdorf basin of the Mulde reservoir (sampled in September 2002). The most recent such layer occurring in this sediment core was caused by the flood in August 2002. This event proved to be an outstanding flood time marker with regard to its thickness and geochemical properties.

1 Einleitung

Seesedimente, die in weitgehend geschlossenen und maximal mit dem Grundwasserregime in Verbindung stehenden Hohlformen abgelagert wurden (z.B. Maarseen, Toteissen u.a.), zählen zu den besten Geo-Archiven für paläoklimatische und paläoökologische Rekonstruktionen der jüngeren geologischen Vergangenheit bis Gegenwart. In ihnen werden die mittel- bis langfristig wirksamen regionalen und globalen Trends der Umwelt- und Klimaveränderungen widergespiegelt. Abrupte, kurzfristige Veränderungen des hydrologischen Kreislaufes (z.B. Hochwässer) werden in diesen nicht an das oberirdische Abflußregime direkt angeschlossenen Sedimentfallen nur unzureichend und mit geringem Auflösungsgrad dokumentiert. Für

eine detaillierte Rekonstruktion dieser Ereignisse sind deshalb kontinuierlich durchflossene natürliche oder anthropogen geschaffene Flussstauräume prädestiniert.

Seit 1975 wird die Mulde, einer der am stärksten schadstoffbelasteten Nebenflüsse der Elbe, durch das Restloch des ehemaligen Braunkohlentagebaues Muldenstein geleitet. Langjährige Untersuchungen zur Hydrodynamik, zum Sedimentationsgeschehen und zur Schwermetallbilanz weisen den dadurch entstandenen Bitterfelder Muldestausee (Fläche: 6,1 km², Volumen: 118 Mio. m³; Einzugsgebiet: 6170 km²) als bedeutsame Sediment- und Schadstoffsenke für das Gebiet der unteren Mulde und Elbe aus (Abb. 1; ZERLING et al. 2001). Da die dem Muldestausee zugeliferten Schwebstoff- und Schadstofffrachten in extremer Weise von der Wasserführung der Mulde abhängig sind, kommt der Untersuchung des Zusammenhanges zwischen Hochwasserereignis und Depositionsrate eine zentrale Bedeutung zu. Die Fracht eines einzigen Hochwasserereignisses kann diejenige einer mehrmonatigen Niedrigwasserperiode mehrfach übersteigen. Abschätzungen zur Depositionsrate sind aus Differenzmessungen zwischen der dem Flusstausee zugeführten und der den Flusstausee passierenden Sediment-

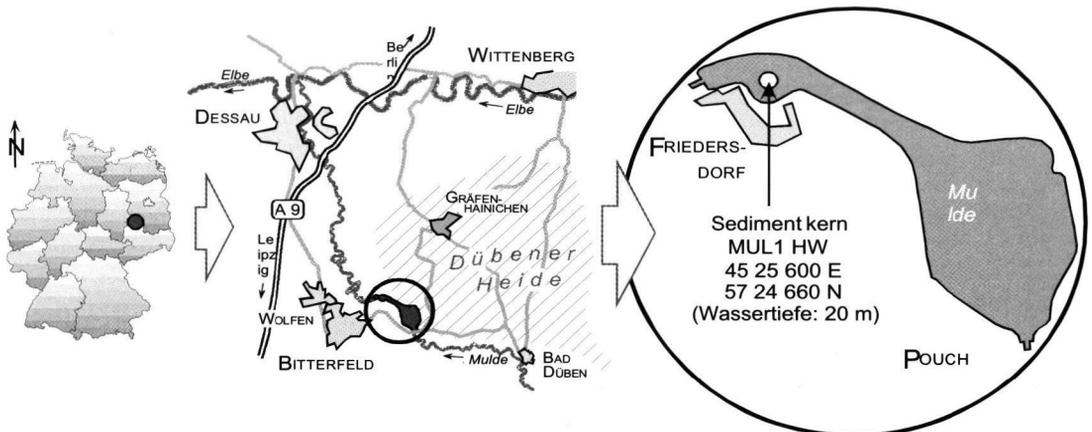


Abb. 1: Geographische Lage des Bitterfelder Muldestausee mit Position des Sedimentkernes MUL1HW.

fracht möglich und liegen für den Muldestausee als berechnete Monats- bzw. Jahresfrachten seit 1991 vor (JENDRYSCHIK 2003). Für die Verifizierung dieser berechneten Depositionsraten und für eine ereignisspezifische Zuordnung des real im Stausee zur Ablagerung gelangten Schwebstoffes sind Detailuntersuchungen am Seesediment notwendig.

Zu diesem Zweck wurden im April und im September 2002 Sedimentkerne aus dem Friedersdorfer Becken und aus dem Hauptbecken des Muldestausees entnommen. Dabei konnten mit den von einer Schwimmplattform abgeteuften Kernbohrungen die im Muldestausee seit Flutungsbeginn 1975 in den beiden Teilbecken abgesetzten Seesedimente durchteuft und in ihrer Mächtigkeit erfasst werden (JUNGE et al. 2004). Kurzkerne wurden mittels eines Mondseecorers (Fa. UWITEC, Mondsee/Österreich) insbesondere für die ungestörte Erfassung der jüngsten Seeablagerungen gewonnen. Alle Sedimentkerne wiesen eine deutliche Lamination auf, in denen sich die Hochwasserereignisse der Mulde seit 1975 dokumentieren.

Mit der vorliegenden Arbeit werden die Ergebnisse eines im September 2002 gewonnenen Kurzkernel aus dem Friedersdorfer Becken vorgestellt (Kern MUL1HW: 4525600 Ost, 5724660 Nord; siehe Abb. 1). Den Schwerpunkt der Arbeit bildet dabei die auf verschiedenen Methoden (Gammaskpektrometrie, Röntgenfluoreszenzmethode, Hydrologie) beruhende zeitliche Zuordnung der im Sedimentkern dokumentierten Hochwasserlagen.

2 Methodik

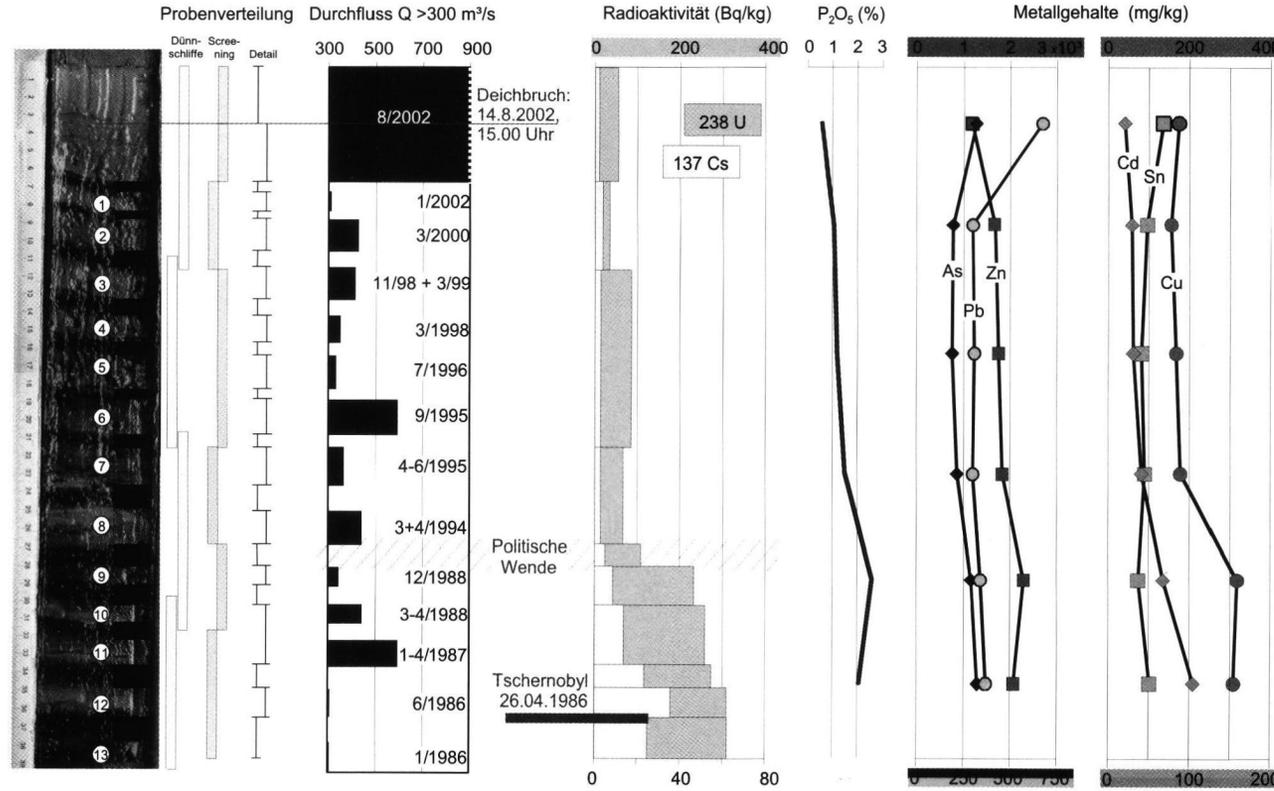
Probenvorbereitung: Nach Gewinnung des Kernes wurde dieser mittels Folie luftdicht verpackt und bei 4°C bis zu seiner Öffnung kühl gelagert. Mit der Kernöffnung im Labor erfolgte die makroskopische Beschreibung, die fotografische Dokumentation und eine Zerteilung

des Kernes in Einzelproben entsprechend der Lithologie und den geplanten Untersuchungen. Für geochemische Untersuchungen wurde der Kern MUL1HW in 6 Screeningproben und 25 Detailproben zerlegt, wobei mit letzteren einzelne Sedimentlagen separat erfasst werden konnten (siehe Abb. 2). Die für geochemische Untersuchungen gewonnenen Einzelproben wurden unter Edelgasatmosphäre (He) in Folientüten eingeschweisst und im Gefrierschrank bei Temperaturen kleiner 0°C bis zu ihrer weiteren Bearbeitung aufbewahrt.

Gammaskpektrometrie: Die gammaskpektrometrischen Untersuchungen erfolgten an den für die Messung in Plastedosen verwahrten separierten Einzelproben des Kernes. Für die Messungen wurden HPGe-Coaxial-Low Energy-Detektoren, n-type mit einem aktiven Volumen von 39 cm³ und einem Berylliumfenster mit 0,5 mm Dicke eingesetzt. Die Energieauflösung beträgt bei 122 keV (⁵⁷Co) ca. 570 eV. An beiden Detektoren wurde die Spektrenauswertung durch die spezielle Software GAMMAW unterstützt. Die Kalibrierung der Detektoren erfolgte mit einem zertifizierten Referenzmaterial der Internationalen Atomenergiebehörde (IAEA). Dabei handelt es sich um Uran-Referenzkerz BL-5, das mit SiO₂ auf einen Urangehalt von 400 (± 2,1) µg/g eingestellt wurde (IAEA-RGU-1), und um Material aus dem Canadian Certified Reference Materials Project (reference britholite ore OKA-2), das mit SiO₂ auf einen Thoriumgehalt von 800,2 (± 15,8) µg/g Thorium (IAEA-RGTh-1) eingestellt wurde. Für die Auswertung der Gammaskpektren wurden für die interpretierten Nuklide ²³⁸U und ¹³⁷Cs die folgenden Gammaenergien herangezogen: U-238 wird aus dem Tochternuklid bestimmt: ²³⁴Th: 63,3 keV (3,8 %); ¹³⁷Cs 661,6 keV (85,1 %).
Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA). Die Konzentrationsbestimmung für die in dieser Arbeit diskutierten Spurenelemente As, Ba, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Sn, Th, U und Zn erfolgte mit der Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) am Gesamt-

Sedimentkern Bitterfelder Muldestausee (MUL1HW)

18.9.2002, Friedersdorfer Becken (45 25 600 E, 57 24 660 N), Wassertiefe 20 m



©&© by El Zett

Abb. 2: Aufbau des 39 cm langen Kernes, zeitliche Einordnung und Verteilung ausgewählter Radionuklide (^{238}U , ^{137}Cs), P_2O_5 als Indikator der organischen Belastung und Gehalte ausgewählter Elemente und Schwermetalle.

(Die Elementgehalte wurden mittels RFA an der Gesamtfraction (<2mm) bestimmt. In den rechten beiden Kolonnen sind die oberen Skalen gültig für Zn bzw. Cu; die unteren für As, Pb bzw. Cd, Sn).

material (<2mm). In Vorbereitung zur RFA wurde das vorher mittels einer Achatkugelmühle zerkleinerte Probenmaterial bei 105 °C getrocknet und anschließend mit 20% Hoechst-Wachs versetzt, homogenisiert und zu Pellets gepresst. Die analytischen Messungen wurden an einem wellenlängendispersiven Röntgenspektrometer (Siemens SRS 3000) durchgeführt. Dieser Spektrometertyp ist mit einer 3 kW Rh - Endfensterröhre (125 µm Be), einem 60 kV Röntgengenerator und Kristallwechsler für acht Analysatorkristalle ausgerüstet. Für die Steuerung des Meßablaufes und die Datenauswertung wurde die Gerätesoftware SPECTRA 3000 benutzt. Die Messungen erfolgten im Vakuum unter Verwendung der 34 mm Kollimatormaske und unter Einbeziehung der Analysatorkristalle OVO 55, Ge, LIF 200 und LIF 220. Ausführliche Angaben zur verwendeten Methodik und zu den Nachweisgrenzen sind in JUNGE et al. (2001) enthalten.

3 Makroskopische Kernbeschreibung

Der im September 2002 gewonnene ca. 0,40 m lange Kern MUL1HW (4525600 Ost, 5724660 Nord) besteht durchgängig aus laminierten Seesediment mit insgesamt 14 hellen und 13 dunklen Lagen, die eine cm-Wechselagerung (Lamination) von (a) dunklen, schwärzlich-grauen bis schwarzen organikreichen Lagen und von (b) hellen, gelb bis gelblichgrauen, in unteren Kernbereichen mehr graugefärbten Lagen mit höheren klastischen Anteilen dokumentieren. Nach den makroskopischen Befunden können die hellen Lagen als Ereignislagen in Folge von Hochwässern angesehen werden, die die normale, in den Sommermonaten vor allen biogen gesteuerte und von dunklen Lagen widergespiegelte Seesedimentbildung unterbrechen. Sie sind häufig gradiert und feinlaminiert. Makroskopisch ist der Kern deutlich zweigeteilt. Der oberste ca. 0,26 m mächtige und insgesamt

hell erscheinende Abschnitt besteht aus einer Wechselagerung von 9 hellen und 8 dunklen Lagen mit scharfen Schichtgrenzen. Der untere ca. 0,14 m mächtige Kernabschnitt macht auf Grund höherer Organikanteile einen dunkleren Eindruck, wobei die Grenzen zwischen den Lagen (5 helle, 5 dunkle) mehr verschwommen erscheinen. Die jüngste dunkle Lage des Kernes schließt zeitlich an das Hangende eines im April an derselben Position gewonnenen Sedimentkernes an und spiegelt die überwiegend biogen-bestimmte Sedimentation des Sommerzeitraumes 2002 (April bis 12. August) wider. Darüber ist als jüngste und den Top des Kernes MUL1HW bildende Sedimentschicht eine helle klastische Lage von ca. 55 mm Mächtigkeit (bei weitgehend unkompakter Lagerung) entwickelt. Diese Lage kann dem August-Hochwasser der Mulde zugeordnet werden, das im Zeitraum zwischen dem 13. und 16. August 2002 im Gebiet seinen Höchststand erreichte. Im Sedimentkern erscheint sie hinsichtlich Farbe und Korngröße zweigeteilt. Die unteren 26 mm sind von gelblichgrauer Farbe und enthalten höhere Anteile gröberer Materials; die oberen 29 mm sind gelblich gefärbt und weisen höhere Feinstanteile auf. Ursache dieser makroskopischen und lithologischen Zweiteilung der Hochwasserlage könnten die während des August-2002-Hochwassers stattgefundenen Deichbrüche unmittelbar oberhalb des Muldestausees sein (14.8.2002), die zu Schwankungen in der Transportenergie und Schwebstoffführung der Mulde führten. Erste auf der Basis von Sedimentdünnschliffen ermittelte bisher unpublizierte Korngrößendaten (Methode in MAGNUS 1998) zeigen, dass das Sediment zu über 90 % aus der <63 µm-Fraktion (Ton und Schluff) und geringen Anteilen der 63-200 µm-Fraktion (Feinsand) zusammengesetzt ist. Nur in den Hochwasserlagen sind gröbere Korngrößenanteile nachweisbar (200-630 µm-Fraktion; Mittelsand). Die mittlere Mächtigkeit aller hellen Lagen

(ohne Einbeziehung der jüngsten August-2002-Hochwasserlage) im Kern MUL1HW beträgt 16,6 mm ($\pm 4,4$; Maximum: 25 mm; Abb. 2).

4 Zeitliche Zuordnung der Hochwasserlagen

Für die zeitliche Zuordnung der im Kern MUL1HW dokumentierten Hochwasserlagen kamen folgende methodische Ansätze zur Anwendung:

- radiometrische Bestimmung der Konzentrationsverläufe an den Radionukliden ^{137}Cs und ^{238}U im Sedimentkern.
Das durch den Tschernobyl-Fallout (26.4.1986) hervorgerufene eng begrenzte ^{137}Cs -Aktivitätsmaximum sollte für den vom Sedimentkern erfassten Zeitraum die Möglichkeit einer punktuellen Zeitmarke liefern. Ebenfalls sollte der mit der politischen Wende 1989/1990 einsetzende abrupte Rückgang des aktiven Uranbergbaus der WISMUT GmbH sich in einem Rückgang der ^{238}U -Radionuklid- und Urangesamthalte im Sediment widerspiegeln.
- Der 1989/1990 mit der Schließung des Berg- und Hüttenwesens im Muldeinzugsgebiet ebenfalls einhergehende Trend abnehmender Elementkonzentrationen sollte sich im Seesediment reflektieren (u.a. As, Ba, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Sn, Zn). Dieser Rückgang sollte unabhängig von den für das Muldeinzugsgebiet typischen, kontinuierlichen Schwermetallausträgen aus Halden und Grubenanlagen erkennbar sein. Ebenfalls sollte sich die seit der politischen Wende beobachtete geringere organische Belastung der Mulde ebenfalls in der Zusammensetzung des Seesedimentes dokumentieren.
- Auf der Basis der obengenannten "geochemisch verifizierten Zeitmarken" geben die Durchflussdaten der Mulde (Flusspegel Bad Düben; jährlich publiziert in Deutsches

Gewässerkundliches Jahrbuch, LFU Sachsen-Anhalt) die Möglichkeit, die in den Kerne auftretenden Ereignislagen konkreten Hochwässern der Mulde zu zuordnen.

4.1 Zeitmarken mittels Radiometrie

Um eine erste Übersicht über die Tiefenverteilung der natürlichen Radionuklide aus der ^{238}U -Zerfallsreihe und des anthropogenen ^{137}Cs zu gewinnen, wurden in einer ersten Messserie die 6 Screening-Proben des Kernes MUL1HW untersucht (Abb. 2). Dabei zeigte sich im Teufenbereich zwischen 0,31-0,38 m ein deutliches Aktivitätsmaximum in der ^{238}U - (151 Bq/kg) und ^{137}Cs -Konzentration (12,3 Bq/kg). Um aus der ^{137}Cs -Tiefenverteilung die Zeitmarke 1986 (Tschernobyl-Reaktorunfall vom 25./26.04.1986) genauer setzen zu können, wurde dieser Teufenbereich durch die vorhandenen Detailproben ergänzt. Dadurch konnte ein deutliches ^{238}U -Konzentrationsmaximum (309-311 Bq/kg im Teufenbereich 0,34-0,38 m) und ein noch ausgeprägteres ^{137}Cs -Konzentrationsmaximum (35,2 Bq/kg) gefunden werden.

Im Kern MUL1HW kann auf Grund der ^{137}Cs -Verteilung das Sedimentalter von 16 Jahren (Tschernobyl) auf den Teufenbereich von 0,34-0,35 m eingegrenzt werden. Das ^{137}Cs -Konzentrationsmaximum liegt innerhalb einer Hochwasserlage (Ereignislage Nr. 12, Abb. 2), wobei die darunterliegende organikreiche dunkle Lage ebenfalls noch eine erhöhte Aktivitätskonzentration (24,6 Bq/kg) aufweist. Der Tschernobyl-Reaktorunfall fand im Frühsommer 1986, in der Nacht vom 25./26. April 1986 statt. Hochwasserereignisse mit Maximaldurchflüssen um $300 \text{ m}^3/\text{s}$ wurden um den Zeitpunkt des Reaktorunfalls herum am 21.01.1986 (Winterhochwasser) und am 31.5./1.6.1986 (Sommerhochwasser) beobachtet. Aus dieser Konstellation ergibt sich die fol-

gende Zuordnung der Ereignislagen: Während des Winterhochwassers vom 21.01.1986 kam es zur Sedimentation der untersten, mit dem Kern MUL1HW erfassten Ereignislage (Ereignislage Nr. 13, Abb. 2). Die beginnende organische Sedimentation im Frühsommer 1986 (Zeitraum Februar bis Ende Mai 1986) wird durch die sich darüber befindliche organikreiche, dunkle Lage reflektiert. Innerhalb dieses Zeitraumes ereignete sich der Tschernobyl-Reaktorunfall mit der Folge des Eintrages von ^{137}Cs in das Seesediment. Im Ergebnis des darauffolgenden Sommerhochwassers vom 31.5./1.6.1986 kam es zu einer verstärkten Abschwemmung von ^{137}Cs -kontaminiertem Bodenmaterial und damit zu dem beobachteten ^{137}Cs -Aktivitätsmaximum innerhalb dieser im Muldestausee abgesetzten Hochwasserlage (Ereignislage Nr. 12, Abb. 2). Seit dieser Zeit führten die jüngeren Muldehochwässer zu einem weiteren, aber abklingenden ^{137}Cs -Eintrag in das Sediment des Muldestausees. Die durch den Reaktorunfall von Tschernobyl verursachte Cs-Kontamination, die in einigen Gebieten Deutschlands Belastungen bis 61000 Bq/m^2 erreichte (EINSELE & PFEFFER 1990), betraf im wesentlichen die obersten organischen Bodenschichten sowie die humosen Mineralbodenhorizonte. Eine Wasserlöslichkeit von Radiocaesium und damit eine einhergehende Verlagerung ist auszuschließen (BÖHM & PFEFFER 1990). Verursacht durch die enge Bindung des Radiocaesiums an die organische Substanz ist allerdings im Zuge von Abspülungsprozessen und dem damit verbundenen Austrag von Bodenfeinmaterial eine Überführung von ^{137}Cs in die Schwebstofffraktion gegeben. Diese Verlagerungsprozesse fanden entsprechend der ^{137}Cs -Verteilung im Kern MUL1HW bis zu Beginn der neunziger Jahre statt und können danach dann nicht mehr nachgewiesen werden (ab Ereignislage Nr. 8, Abb. 2). Mit dem Jahrhunderthochwasser im August 2002 war ebenfalls keine erneute ^{137}Cs -Mobilisierung verbunden.

Das ^{238}U -Radionuklid (Abb. 2) und die Gesamturangehalte zeigen innerhalb des Kernes MUL1HW einen vom Liegenden zum Hangenden abnehmenden Konzentrationsverlauf. Dabei ist im Teufenbereich von 0,24-0,28 m eine sprunghafte Abnahme der ^{238}U -Aktivität auf das Niveau der mittleren natürlichen Konzentration zu beobachten. Dieser obere Kernbereich, der gegenüber dem unteren Kernbereich eine um das 6-fache geringere ^{238}U -Aktivität und eine Halbierung des Gesamturangehaltes (20-41 ppm gegenüber 60-78 ppm U) im Seesediment des Muldestausees aufweist, kennzeichnet den Zeitabschnitt der neunziger Jahre und jünger ("Postwendezeit"). In ihm zeigt sich der abrupte Niedergang des Uranbergbaus und der Uranaufbereitung (Zwickauer Mulde; BEUGE AT AL. 1994) sowie der Verhüttungsindustrie im Freiburger Bergbaurevier. Die "Vorwende- bzw. DDR-Zeit" (vor 1989/90) ist durch maximale Urangelhalts- und Uranisotopenkonzentrationen gekennzeichnet. In den jüngeren Kernabschnitten ist im Zuge von Hochwasserereignissen eine schwache Mobilisierung von ^{238}U nachweisbar (Hochwässer 1995 und 2002).

4.2 Zeitmarken aus elementgeochemischen Untersuchungen

Gestützt auf die radiometrischen Ergebnisse, erbrachte die Analyse der Screeningproben des Kernes MUL1HW (Abb. 2) auf ihren Spurenelementgehalt und ihren Glühverlust (Organikäquivalent) eine Aufteilung des Kernes in zwei geochemisch voneinander unterscheidbare Sedimentationszeiträume: einen Kernabschnitt, der die „Vorwendezeit bzw. DDR-Zeit“ (1989 und älter; Teufenbereich: größer 0,26 m); und einen Kernabschnitt, der die „Postwendezeit“ (90iger Jahre; Teufenbereich 0 bis 0,26 m) widerspiegelt. Sie unterscheiden sich deutlich in ihren Elementgehalten (Gesamtkorngrößenfraktion), wobei das während der DDR-Zeit im Muldes-

tausee zur Ablagerung gelangte Sediment in der Regel höhere Konzentrationen insbesondere an organischen Elementindikatoren und Schwermetallen aufweist (Tabelle 1).

Im Vergleich zum „Postwendezeitraum“ spiegelt sich der höhere organische Eintrag der Mulde in das während des „Vorwende-Zeitabschnittes“ (1989 und älter) abgelagerte Seesediment in deutlich erhöhten Gehalten an Gesamtphosphor (Mittelwert aller untersuchten Kerne: ca. 2,1 % gegenüber ca. 1,1 % des „Postwendezeitraumes“), an Schwefel (im Mittel ca. 1,1 % gegenüber ca. 0,6 %) und im höheren Glühverlust (Kern MUL1HW: ca. 19 % gegenüber ca. 15 % in der <20µm-Sedimentfraktion) wider. Umgekehrt werden die geringeren klastischen Anteile innerhalb dieses Kernabschnittes durch niedrigere SiO_2 - (im Mittel ca. 45 % gegenüber ca. 53 %), Al_2O_3 - (im Mittel ca. 13 % gegenüber ca. 14 %; Tonmineralanteil) und Zr-Gehalte (im Mittel ca. 200 ppm gegenüber ca. 120 ppm; Schwermineralanteil) ausgewiesen.

Die zu DDR-Zeiten aus dem aktiven Berg- und Hüttenwesens stammende Freisetzung von Schwermetallen und anderer erzgebundener Elemente wird in dem hohen Konzentrationsniveau der Elemente As, Pb, Sn, Zn, Cd, Cr, Ni, Cu (siehe Tabelle 1), sowie U (im Mittel ca. 74 ppm gegenüber 30 ppm), Ba (im Mittel ca. 1372 ppm gegenüber ca. 939 ppm) und Sr (ca. 158 ppm gegenüber 117 ppm) deutlich.

Die Gehalte an den Elementen Zn, Cd, Pb, Cu, As und Sn dokumentieren innerhalb des Kernes vom Liegenden zum Hangenden einen kontinuierlichen Trend abnehmender Konzentrationen. Dabei zeigt sich, vor allem bei den Elementen Cu, Cd und Zn sichtbar, ab einem Teufenbereich von 0,26 m (ab Ereignislage Nr. 8; Abb. 2) eine sprunghafte Gehaltsabnahme. Damit wird nach elementgeochemischen Befunden die Zeitmarke der „politischen Wende“ (1989/90) fixiert, die mit der Schließung des Berg- und Hüttenwesens im Einzugsgebiet von Zwickauer und Freiburger Mulde einen abrupt-

ten Rückgang in den Einträgen der genannten Elemente verursachte.

Die Untersuchungsergebnisse der Screeningproben zeigen, dass mit den im Kern MUL1HW dokumentierten Hochwasserereignissen (Ereignislagen 1 bis 13; Abb. 2) keine maßgebliche Erhöhung in den Elementkonzentrationen (Schwermetalle und Erzelemente) im Seesediment verbunden ist. Eine Ausnahme bildet das August-2002-Hochwasser, das an den Bohrpunkten im Muldestausee einen 5-fach höheren Sedimentauftrag auf die Seebodenoberfläche des Muldestausees erbrachte. Dabei sind mit dem Sedimentauftrag deutliche Konzentrationserhöhungen bei den Elementen Sn, As und Pb im Oberflächensediment nachweisbar, die offenbar während des Hochwassers abgeschwemmtem Haldenmaterial (Freiberger Mulde) entstammen. Hingegen fügen sich die Gehalte der Elemente Zn, Cd, Cr, Ni, Cu (Tabelle 1) und U des Hochwassersedimentes in den seit den neunziger Jahren allgemein beobachteten Trend einer Verbesserung der Sedimentqualität ein.

4.3 Hochwasserereignisse und ihre Widerspiegelung im Seesediment abgeleitet aus Durchflussdaten der Mulde

Für eine verifizierbare Zuordnung der Hochwasserereignisse aus den Durchflussdaten der Mulde zu konkreten Ereignislagen im Seesediment sind die folgenden Überlegungen notwendig: Das Seesediment des Bitterfelder Muldestausees besteht aus einer makroskopisch sichtbaren Wechsellagerung heller Ereignislagen (Hochwasserlagen) und dunkler organikreicher Lagen. Nach den bisherigen Erfahrungen über das Schwebstoffangebot der Mulde bei erhöhten Durchflüssen führen Hochwässer mit einem mittleren Tagesdurchflusswert größer $300 \text{ m}^3/\text{s}$ (dies entspricht in etwa dem Fünffachen des mittleren Durchflusses der Mulde am ca. 15 Ki-

Tab. 1: Mittlere Elementgehalte im Sediment des Bitterfelder Muldestausees in Abhängigkeit vom Depositionszeitraum.

Zeitraum	n	As mg/kg	Pb mg/kg	Sn mg/kg	Zn mg/kg	Cd mg/kg	Cu mg/kg
August 2002 - Hochwasserlage	2	251 (±96) (183...319)	537 (±192) (401...673)	64 (±6) (59...68)	1225 (±59) (1183...1266)	21 (±1) (20...22)	160 (±20) (146...174)
„Postwende- zeitraum“ (1989/90 bis August 2002)	13	171 (±23) (135...216)	294 (±16) (262...330)	44 (±9) (36...72)	1676 (±127) (1447...1885)	34 (±7) (27...54)	170 (±22) (148...233)
„Vorwendezeitraum bzw. DDR-Zeit“ (1975 bis 1989/90)	9	283 (±90) (119...399)	340 (±63) (228...432)	46 (±8) (31...56)	2153 (±424) (1535...2895)	94 (±34) (41...145)	321 (±74) (216...435)
Tertiärer Untergrund	4	16 (±5) (11...23)	38 (±9) (31...50)	7 (±1) (6...8)	110 (±36) (76...155)	4 (±2) (2...7)	27 (±7) (21...36)
Oberflächensedi- ment (Gesamt- fraktion; BORN 1991)	36	225 (±60) (103...312)	327 (±44) (174...399)	n.b.	2490 (±430) (1160...3290)	78 (±19) (29...115)	286 (±64) (146...445)
Zeitraum	n	Cr mg/kg	Ni mg/kg	Ba mg/kg	U mg/kg	P ₂ O ₅ mg/kg	S mg/kg
August 2002 – Hochwasserlage	2	111 (±3) (107...111)	76 (±5) (69...76)	1112 (±124) (1024...120 0)	19 (±2) (17...20)	5916 (±303) (5701...6130)	2276 (±334) (2039...2512)
„Postwende- zeitraum“ (1989/90 bis August 2002)	13	120 (±11) (107...151)	89 (±6) (80...102)	939 (±112) (721...1168)	30 (±9) (20...45)	10735 (±2878) (7680...17260)	5951 (±2059) (3901...10950)
„Vorwendezeitraum bzw. DDR-Zeit“ (1975 bis 1989/90)	9	216 (±38) (158...279)	118 (±14) (102...137)	1372 (±176) (952...1564)	74 (±22) (43...119)	20931 (±8374) (10280...32370)	11504 (±4872) (4311...18600)
Tertiärer Untergrund	4	83 (±7) (77...92)	32 (±2) (29...34)	522 (±58) (465...596)	52 (±55) (3...100)	2883 (±565) (2400...3670)	6382 (±2136) (3179...7544)
Oberflächensedi- ment ^{a)} (Gesamt- fraktion; BORN, 1996)	36	178 (±27) (117...247)	116 (±26) (55...186)	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.

Erläuterungen: Angegeben sind der Median (oben), die Standardabweichung (Mitte) und Minimumwert und Maximumwert (unten, in Klammer) der mittels RFA am Gesamtsediment (<2mm) bestimmten Elementgehalte. Die Gehalte der Zeitabschnitte „Postwendezeit“ und „Vorwendezeit“ erfolgte auf der Basis der zeitlichen Zuordnung der Sedimentkernabschnitte nach den in der vorliegenden Arbeit beschriebenen Methoden. Eingegangen sind die Ergebnisse von insgesamt vier Kernen aus dem Friedersdorfer Becken und dem Hauptbecken des Bitterfelder Muldestausees. Den „tertiären Untergrund“ bilden die das Seesediment unterlagernden tertiären Schichten (ehemalige Tagebauoberfläche). ^{a)} nach BORN (1996); n.b. ... nicht bestimmt.

lometer unterhalb des Bitterfelder Muldestausees gelegenen Flusspegels Bad Dübén; mittlerer Durchflusswert der Mulde seit 1975: ca. 64 m³/s; Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch, LFU Sachsen-Anhalt) mit hoher Wahrscheinlichkeit zur Ausbildung makroskopisch deutlich sichtbarer Hochwasserlagen im Seesediment des Bitterfelder Muldestausees. In Abhängigkeit von der Depositionsposition im Stausee werden dabei Lagenmächtigkeiten im cm-Bereich und darüber erreicht. Die Ereignislagen wechseln sich mit organikreichen Sedimentabschnitten (dunkle Lagen) ab, die verstärkte Phasen der Bioproduktion widerspiegeln, wobei die Bildung letzterer auf die saisonal wärmeren Abschnitte im Jahresgang (Früh-, Hoch- und Spätsommer) konzentriert sind.

Die genannte Konstellation führt dazu, dass mehrere, während einer Winterperiode stattgefunden Hochwässer, sich im Sediment mehrere aufeinanderfolgende und innerhalb einundderselben Winterperiode stattgefunden Hochwässer sich im Sediment nur in der Ausbildung einer makroskopisch sichtbaren Ereignislage widerspiegeln. Diese erscheint zwar entsprechend der Zahl der Hochwässer und ihres Verlaufes im Dünnschliffbild häufig gradiert, ist aber nicht von organikreichen, dunklen Lagen unterbrochen. Die Besonderheiten der winterlichen Hochwassersituationen werden im mikroskopischen, weniger im makroskopischen Bild des Lagenaufbaus der entsprechenden Ereignislage sichtbar. Hingegen führt jedes Sommerhochwasser zur Ausbildung einer eigenständigen makroskopisch sichtbaren Ereignislage im Seesediment. Dies allerdings nur, soweit der zeitliche Abstand zwischen aufeinanderfolgenden Sommerhochwässern für die Aktivierung der Bioproduktivität im See ausreicht. Die normale, biogen bestimmte Sommersedimentation, die zur Ausbildung einer dunklen Lage führt, wird bei Abwesenheit von Hochwässern in der darauffolgenden Winterperiode makroskopisch nicht unterbrochen,

d.h. beim Auftreten von Wintern mit niedrigen bis mittleren Durchflüssen kommt es zu keiner Ausbildung einer makroskopisch sichtbaren, hellgefärbten und mächtigen klastischen Lage. Im mikroskopischen Bild erscheinen diese dunklen Lagen allerdings differenziert.

Bei der makroskopischen Zuordnung der Hochwasserereignisse zu den im Sediment des Kernes MUL1HW auftretenden Ereignislagen fanden die genannten, saisonal bedingten Effekte ihre Berücksichtigung (Tabelle 2).

Seit dem 1. Mai 1975, dem Beginn der Flutung des ehemaligen Tagebaurestloches Muldenstein durch die Mulde, wurden 33 Hochwässer mit einem mittleren Tagesdurchfluss größer 300 m³/s registriert (Flusspegel Bad Dübén; Gewässerkundliches Jahrbuch, LFU Sachsen-Anhalt). Unter Berücksichtigung der oben erläuterten saisonal bedingten Effekte würden diese 33 Hochwässer (einschließlich des August-2002-Hochwassers) sich in 22 makroskopisch sichtbaren und von dunklen organikreichen Lagen abgegrenzten Ereignislagen widerspiegeln, die insgesamt im seit 1975 zur Ablagerung gelangten Seesediment des Muldestausees sichtbar werden sollten (Tabelle 2).

Der hier vorgestellte Kern MUL1HW lässt einschließlich der während des August-2002-Hochwassers abgesetzten Sedimentlage in summa 14 makroskopische Ereignislagen erkennen. Auf Grund der radiometrischen Ergebnisse (¹³⁷Cs) wird der Sedimentationszeitraum auf den Zeitraum vom Januar 1986 bis August 2002 eingegrenzt. In diesem Zeitraum wurden insgesamt 21 Hochwassersituationen (größer 300 m³/s) registriert. Diese beinhalten 17 Winterhochwässer, verteilt auf 10 Winterperioden, und 4 Sommerhochwässer (Tabelle 2). Daraus ergibt sich, dass sich die registrierten 21 Hochwassersituationen entsprechend des oben erläuterten Konzeptes in 14 Ereignislagen im Sediment widerspiegeln müssten. Diese aus dem Modell abgeleitete Anzahl von Ereignislagen deckt sich mit den Feldbefunden, d.h. mit

Tab. 2: Zeitliche Zuordnung von Ereignislagen in Sedimentkernen aus dem Bitterfelder Muldestausee zu Hochwasserereignissen der Mulde mit einem Tagesdurchflusswert $Q \geq 300 \text{ m}^3/\text{s}$ unter besonderer Berücksichtigung des Kernes MUL1HW (Daten Flusspegel Bad Dübren, Angaben LfU Sachsen-Anhalt).

Zeitraum mit Tages- $Q \geq 300 \text{ m}^3/\text{s}$	Zuordnung der Ereignislagen im Kern MUL1HW	Hochwasserzeitraum (Datum)	Tagesdurchfluss Q (HW-Spitze; in m^3/s)	Maximaler Durchfluss Q (Einzelwert; in m^3/s)
<i>Zeitraum mit Tages-$Q < 300 \text{ m}^3/\text{s}$</i>				
HW-SoHj. 2002	0 hell	13.08.-18.08.2002	>>800	
<i>Sommer 2002</i>	<i>dunkel</i>			
HW-WiHj. 2001	1 hell	29.01.2002-30.01.2002	310 (30.01.2002)	
<i>Sommer2000+2001</i>	<i>dunkel</i>			
HW-WiHj. 2000	2 hell	10.03.2000-20.03.2000	426 (11.03.2000), 411 (19.03.2000)	
<i>Sommer 1999</i>	<i>dunkel</i>			
HW-WiHj. 1999	3 hell	03.03.1999-07.03.1999	414 (04.03.1999)	432 (04.03.1999)
HW-WiHj. 1999	hell	03.11.1998	305	335
<i>Sommer 1998</i>	<i>dunkel</i>			
HW-WiHj. 1998	4 hell	19.03.1998	344	357
<i>Winter 1996+Sommer 1997</i>	<i>dunkel</i>			
HW-SoHj. 1996	5 hell	10.07.1996	334	350
<i>Winter 1995+Frühsommer 1996</i>	<i>dunkel</i>			
HW-Spätsummer 1995	6 hell	02.09.1995-04.09.1995	588 (03.09.1995)	657 (03.09.1995)
<i>Sommer 1995 (Juli/August)</i>	<i>dunkel</i>			
HW-Frühsommer 1995	7 hell	03.06.1995-04.06.1995	360 (04.06.1995)	451 (04.06.1995)
HW-WiHj. 1995	hell	15.05.1995	263	311
HW-WiHj. 1995	hell	19.04.1995-21.04.1995	363 (20.04.1995)	371 (19.4.1995)
<i>Sommer 1994</i>	<i>dunkel</i>			
HW-WiHj. 1994	8 hell	14.04.1994	308	368
HW-WiHj. 1994	hell	16.03.1994-18.03.1994	444 (17.03.1994)	486 (17.03.1994)
<i>Zeitraum1989-1993</i>	<i>dunkel</i>			
HW-WiHj. 1989	9 hell	20.12.1988-26.12.1988	311 (20.12.1988) 336 (26.12.1988)	373 (21.12.1988)
<i>Sommer 1988</i>	<i>dunkel</i>			
HW-WiHj. 1988	10 hell	22.03.1988-9.4.1988	309 (09.04.1988) 441 (28.03.1988)	449 (28.03.1988)
<i>Sommer 1987</i>	<i>dunkel</i>			
HW-WiHj. 1987	11 hell	11.04.1987-14.04.1987	547 (12.04.1987)	654 (11.04.1987)
HW-WiHj. 1987	hell	28.03.1987-31.03.1987	377 (30.03.1987)	392 (30.03.1987)
HW-WiHj. 1987	hell	10.02.1987-12.02.1987	365 (11.02.1987)	454 (10.02.1987)
HW-WiHj. 1987	hell	30.12.1986-05.01.1987	591 (01.01.1987)	620 (01.01.1987)
<i>Sommer 1986</i>	<i>dunkel</i>			
HW-Frühsommer 1986	12 hell	31.05.1986- 01.06.1986	266 (01.06.1986)	279 (01.06.1086)
<i>Frühsommer 1986</i>	<i>dunkel</i>			
HW-WiHj. 1986	13 hell	21.01.1986	292	326
<i>Zeitraum1984-1986</i>	<i>xx (dunkel)</i>	Niedrigwasserperiode (einzelne Tages- Q bis max. 266)		
HW-SoHj. 1983	XX (hell)	06.08.1983-08.08.1983	657 (07.08.1983)	960 (6.8.83)
<i>Sommer1982 + Winter 1983</i>	<i>xx (dunkel)</i>			
HW-WiHj. 1982	XX (hell)	01.02.1982	368	400
HW-WiHj. 1982	hell	07.01.1982	343	357
HW-WiHj. 1982	hell	28.11.1981	327	
<i>Sommer 1982</i>	<i>xx (dunkel)</i>			
HW-WiHj. 1981	XX (hell)	11.03.1981-17.03.1981	859 (13.3.81)	1020
		09.02.1981	301	309
<i>Winter 1980 + Sommer 1981</i>	<i>xx (dunkel)</i>			
HW-SoHj. 1980	XX (hell)	23.07.1980-25.07.1980	569 (24.7.80)	729 (24.7.80)
Frühsommer1980	<i>xx</i>			
HW-WiH80	XX	29.04.1980-04.05.1980	358 (3.5.80)	367 (3.5.80)
HW-WiH80		07.02.1980-08.02.1980	308 (7.2.80)	339 (7.2.80)
<i>Sommer 1978 + 1979</i>	<i>xx</i>	Niedrigwasserperiode (einzelne Tages- Q bis max. 279)		
HW-Frühsommer 1978	XX	09.05.1978-11.05.1978	641 (10.5.78)	810 (10.5.78)
Spätsummer1977 + Winter 1978	<i>xx</i>			
HW-SoH77	XX	12.08.1977-13.08.1977	344 (13.8.77)	378 (13.8.77)
<i>Sommer 1976 + Winter 1977</i>	<i>xx</i>			
HW-WiH1976	XX	13.01.1976-18.01.1976	605 (16.1.76)	636 (16.1.76)
<i>Sommer 1975</i>	<i>xx</i>			
Flutungsbeginn des Muldestausees: 1.5.1975				

der im Kern MUL1HW gefundenen makroskopisch sichtbaren Anzahl von 14 Ereignislagen (Tabelle 2, Abb. 2).

Neben den radiometrischen Ergebnissen wird die Zuordnung der im Kern MUL1HW dokumentierten Ereignislagen zu den registrierten Hochwassersituationen der Jahre 1986 bis 2002 auch durch die elementgeochemischen Befunde gestützt. Der in Folge der „politischen Wende“ 1989/90 begründete und im Seesediment des Bitterfelder Muldestausees nachgewiesene Rückgang der Gehalte an Schwermetallen (u.a. Zn, Cd, Cu, Ni, Cr) und an anderen Indikatorelementen (z.B. Phosphor) fällt in den Bereich zwischen den registrierten Hochwasserereignissen der Winterperioden 1988 (Ereignislage Nr. 9) und 1994 (Ereignislage Nr. 10; Abb. 2, Tabelle 2). Er dokumentiert eine vierjährige Niedrigwasserperiode (1989-1993) und ist durch die Ausbildung einer dunklen organikreichen Lage ausgewiesen. Sie bildet den Abschluss des beschriebenen unteren ca. 0,14 m mächtigen Kernabschnittes, der auf Grund höherer Organikanteile makroskopisch einen deutlich dunkleren Eindruck macht und verschwommenere Lagengrenzen aufweist.

5 Schlussfolgerungen

Flussstauseen sind geeignete Sedimentfallen zur Rekonstruktion von Hochwässern und deren Auswirkungen in Vergangenheit und Gegenwart. Dabei erweist sich der Bitterfelder Muldestausee als Modellbeispiel, um den ereignisspezifischen realen Schwebstoffauftrag im Stausee bei Hochwassersituationen in Abhängigkeit verschiedener Einflussfaktoren (z.B. Durchfluss, Hochwasserverlauf u.a.) zu studieren. Insbesondere für die Hochwasserforschung historischer und geologischer Zeiten können die dabei gewonnenen Ergebnisse genutzt werden. Dies betrifft Schlussfolgerungen zur Sedimentationsrate, d.h. zum realen Auftrag an

Schwebstoff bzw. Feinstsediment in Seen, die einen Anschluss an ein Fließgewässer besitzen, und Schlussfolgerungen zur zeitlichen Fixierung von Ereignislagen in anderen geowissenschaftlich nutzbaren Hochwasserarchiven (z.B. Hochflutsedimente, Auelehm).

Die am Sedimentkern aus dem Bitterfelder Muldestausee erzielten Ergebnisse der zeitlichen Zuordnung von Ereignislagen zu spezifischen Hochwassersituationen lassen weiterhin praktische Schlussfolgerungen zur Hochwasservorsorge und zum Hochwassermanagement zu. Sie zeigen, dass trotz des hohen Wirkungsgrades der Sedimentfalle „Bitterfelder Muldestausee“ (weit über 90% des gesamten von der Mulde transportierten Schwebstoffes gelangen im Flussstausee zur Ablagerung), der durch Hochwässer erfolgte reale Sedimentauftrag an Feinstschweb auf die Seebodenoberfläche pro Ereignis auch bei Extremhochwässern relativ gering ist und sich im cm-Bereich bewegt. Auf der Basis der historischen Häufigkeit von Hochwasserereignissen wird damit die Eignung des Bitterfelder Muldestausees als langjährig wirksame Sedimentfalle (mindestens 500 bis 700 Jahre) für das untere Mulde-Elbe-Gebiet bestätigt. Damit werden Möglichkeiten zur Einbindung anderer natürlich oder anthropogen geschaffener Staubebereiche in das Hochwassermanagement von Flusseinzugsgebieten aufgezeigt.

6 Danksagungen

Die Untersuchungen wären ohne die freundschaftliche und uneigennützig Hilfe und die vielfältigen Erfahrungen unseres Freundes und Kollegen PROFESSOR DR. B. SCHARF (Magdeburg) nicht möglich gewesen. Sie reichten von der Logistik, über die Gewinnung der Kernproben, ihrer Lagerung bis hin zur sachgerechten Öffnung der Kerne. Für die zeitweilige Unterstützung bei den durchgeführten Bohrkampagnen möchten wir den Herren M. HERZOG

(Magdeburg), DIPL.-GEOGR. ST. KNETSCH (Halle), DR. M. PIRRUNG (Jena) danken. Für die Mitarbeit bei der Öffnung der im April 2002 entnommenen Sedimentkerne danken wir DIPL.-ING. (FH) A. ARNOLD (Leipzig) recht herzlich. Die laborativen Arbeiten wurden in gewohnter sorgfältiger und gewissenhafter Art und Weise von TH. BERGER (Leipzig; Glühverlust) und I. FRÖHLICH (Leipzig; RFA) durchgeführt. Dem STAATLICHEN UMWELTFACHAMT LEIPZIG (Stufa) danken wir für die kostenlose Bereitstellung von Durchflussdaten der Mulde (Pegel Bad Dübén), dem WASSERSPORTCLUB FRIEDERSDORF E.V. für die Möglichkeiten zur Unterstellung unserer Boots-ausrüstungen. DIPL.-MIN. W. CZEGKA, M.Sc. und DIPL.-CHEM. CHR. HANISCH (Leipzig) möchten wir für zahlreiche fachliche Hinweise zur Probenchemie und -analytik danken. Teilergebnisse der Arbeiten erfuhren 2003/04 eine finanzielle Förderung im Rahmen des BMBF-Adhoc-Hochwasserprojektes (Nr. 0330492).

7 Literatur

- BEUGE, P., GREIF, A., HOPPE, T., KLEMM, W., KLEEBERG, R., KLUGE, A., MOSLER, U., STARKE, R., ALFARO, J., HAURAND, M., KNÖCHEL, A. & MEYER, A. (1994): Erfassung und Beurteilung der Schadstoffbelastung des Muldesystems. – In: Statusberichte 1994 "Die Belastung der Elbe Teil I – Elbenebenflüsse" Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie: 27-37; Forschungszentrum Karlsruhe GmbH.
- BÖHM M. & PFEFFER K.H. (1990): Geoökologische Studien in der durch den Reaktorunfall von Tschernobyl hoch kontaminierten Region südlich Tannheim/Oberschwaben. – Tübinger Geowissenschaftliche Arbeiten, Reihe C, 7: 31-65; Universität Tübingen.
- BORN J. (1996): Sedimentgeochemie des Muldestausees bei Bitterfeld. – Heidelberger Beitr. Umwelt-Geochemie, 9: 226 S.; Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg.
- EINSELE G. & PFEFFER K.-H. (1990): Untersuchungen über die Auswirkungen des Reaktorunfalls von Tschernobyl auf Böden, Klärschlamm und Sickerwasser im Raum von Oberschwaben und Tübingen. – Tübinger Geowissenschaftliche Arbeiten, Reihe C, 7: 151 S.; Universität Tübingen.
- JENDRYSCHIK K. (2003): Schwebstofffrachten der Mulde am Zufluss zum Bitterfelder Muldestausee in den Jahren von 1991 bis 2001 und die Sedimentation im See. – Jb. Sächs. Akad. d. Wiss. zu Leipzig, 2001-2002: 240-249; Stuttgart/Leipzig.
- JUNGE, F.W., DUCKHEIM, W., MORGENSTERN & P., MAGNUS, M. (2001): Sedimentologie und Geochemie obereozän-unteroligozäner Typusprofile aus dem Weißelsterbecken (Tagebau Espenhain). – Mauriana 18 (1): 25-59; Altenburg.
- JUNGE, F.W., HANISCH, CHR., ZERLING, L., CZEGKA, W., ARNOLD, A., JENDRYSCHIK, K.; MORGENSTERN, P., TREUTLER, H.-C. & SCHARF, B. (2004): Arbeitspaket 3.6.: Untersuchungen im Bitterfelder Muldestausee zu den Auswirkungen des Hochwassers vom August 2002 auf die Schwermetallgehalte von Schwebstoffen und Sedimenten.- In: W. Geller, K. Ockenfeld, M. Böhme, A. Knöchel (Hrsg.): Schadstoffbelastung nach dem Elbe-Hochwasser 2002 UFZ Leipzig-Halle GmbH u.a., Endbericht des BMBF-Adhoc-Verbundprojektes PTJ0330492: 136-158; Leipzig.
- LANDESAMT FÜR UMWELTSCHUTZ SACHSEN-ANHALT. Jährlich. Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch. Elbegebiet. Teil 1.
- MAGNUS, M. (1998): Mikroskopische Phasen- und Kornformanalyse klastischer Sedimentite mittels Bildanalyse am Beispiel des Unterturons der Elbezone. – Diss., TU Ber-

gakademie Freiberg, Institut für Geologie:
118 S.; Freiberg.

ZERLING, L., MÜLLER A., JENDRYSCHIK, K.,
HANISCH, C. & ARNOLD, A. (2001): Der
Bitterfelder Muldestausee als Schadstoff-

senke. Entwicklung der Schwermetallbelas-
tung von 1992 bis 1997. – Abh. d. Sächs.
Akad. d. Wiss. zu Leipzig, Math.-nat. Kl.,
59, (4): 69 S.; Stuttgart (Hirzel).