

Frank W. Junge, Sebastian Schröer, Ganbaatar Khurelbaatar, Peter Otto, Hans-Joachim Stärk & Andreas Zehnsdorf*

* Unserem Freund, Mitautor und langjährigem Wegbegleiter Prof. Dr. Andreas Zehnsdorf in dankbarer Erinnerung gewidmet.

Aquatische Makrophyten als Indikatoren für die Elementverteilung im Fließgewässer Mulde (Mitteldeutschland)

Aquatic macrophytes as indicators for element distribution in river water in the Mulde River (central Germany)

Die Sedimente der Mulde sind sehr gut untersucht und gelten als Indikator für langfristige stoffliche Entwicklungen im Flusseinzugsgebiet. Untersuchungen aquatischer Makrophyten ermöglichen ergänzende zeit- und ortsspezifische Aussagen, allerdings liegen dafür kaum Daten vor. Selbst über die Besiedlung der Mulde durch aquatische Makrophyten ist in Literatur und Herbarien nur wenig bekannt.

Die Beprobung von aquatischen Makrophyten kann im Vergleich zum Sediment mit geringem Aufwand, ohne Verfrachtung von Teilen der Probe mit dem fließenden Wasser erfolgen. Zur elementanalytischen Bestimmung wurden aquatische Makrophyten entlang der Flussläufe der Freiberger, Zwickauer und Vereinigten Mulde entnommen, determiniert und analysiert. Am weitesten verbreitet waren Vertreter der Gattungen *Elodea*, *Myriophyllum* und *Ranunculus*. Die Elementgehalte der aquatischen Makrophyten widerspiegeln die für das Flussgebiet der Mulde in Wasser, Schwebstoff und Sediment ermittelte Verteilung. Typisch für die Freiberger Mulde sind erhöhte Gehalte an Blei, Cadmium und Silber; für die Zwickauer Mulde an Uran und Nickel. Die Vereinigte Mulde zeigt die Durchmischung der Teilströme. Bei den Elementen Aluminium, Blei, Chrom, Calcium, Eisen, Kalium, Molybdän, Nickel und Uran konnten eindeutige Trends in der Verteilung der Elementgehalte zwischen den Pflanzengattungen festgestellt werden.

Schlagwörter: aquatische Makrophyten, Schwermetalle, Gewässer Mulde, Schadstoffe, Bioverfügbarkeit, Akkumulation, Mitteldeutschland

The sediments of the Mulde River are well studied and provide insight into the long-term material development within the river catchment area. While studies of aquatic plants enable additional time and location-specific elemental insights to be gained, little data on aquatic plant species in the Mulde River are available. Little is known in the relevant literature and herbaria about the colonization of the Mulde by aquatic seed plants.

The sampling of aquatic plants requires little effort in comparison to the sampling of sediments, as it does not require the transport of parts of the sample with the flowing water. Samples of aquatic plants were taken along the Freiberger Mulde, Zwickauer Mulde and at their confluence, the Mulde River, identified, and analyzed with respect to their elemental contents.

The most widespread aquatic species were found to be representatives of the genera *Elodea*, *Myriophyllum*, and *Ranunculus*. The elemental contents of the aquatic macrophytes reflect the elemental distribution determined for the water, suspended matter and sediment of the Mulde River. The Freiberger Mulde River is characterized by elevated levels of lead, cadmium, and silver; the Zwickauer Mulde River is characterized by the presence of uranium and nickel. The Mulde River represents the mixing of the partial flows. Clear trends in the distribution of elemental contents between plant species could be identified for aluminum, lead, chromium, calcium, iron, potassium, molybdenum, nickel, and uranium.

Keywords: aquatic macrophytes, heavy metals, Mulde River, pollutants, bioavailability, accumulation, central Germany

1 Einleitung

1.1 Ausgangspunkt und Zielstellung

Seit Beginn der 1990er Jahre werden im Rahmen der Internationalen Kommission zum Schutz der Elbe (IKSE) und der Flussgebietsgemeinschaft Elbe (FGG Elbe) zahlreiche umwelt- und gewässerökologische Untersuchungen im mitteleuropäischen Flussgebiet der Elbe durchgeführt. Sie verfolgen das Ziel, über Strategien und Maßnahmen, die in internationalen Bewirtschaftungsplänen nach der europäischen Wasserrahmenrichtlinie (EUROPÄISCHE GEMEINSCHAFT, 2000) münden, einen langfristig guten Gewässerzustand der Elbe zu erreichen (FGG ELBE, 2013; IKSE, 2014; SCHMEDITZ, 2018). Im Ergebnis dieser Untersuchungen hat sich auf deutschem Gebiet die Mulde neben der Saale als wesentliche Quelle für den Eintrag von Schwermetallen und Arsen in den Elbestrom erwiesen. Dies ist durch zahlreiche Forschungen an den Komponenten Wasser, Schwebstoff und

Sediment unter unterschiedlichen Durchflusssituationen von Niedrig-, Mittel- und Hochwasser im 7.400 km² umfassenden Einzugsgebiet der Mulde belegt (BEUGE et al., 1994, 1999; KLEMM et al., 2005; GREIF, 2015). Die Ergebnisse zeigen, dass Kenntnisse zur Qualität und zur Quantität der im Muldesystem vorhandenen Schadstoffe inklusive ihrer Dynamik von überregionaler Bedeutung sind, um gesicherte Aussagen zur Schadstoffbilanz und ihrer langfristigen Entwicklung im Haupt- und Unterstrom der Elbe abzuleiten (WEIGOLD & BABOROWSKI, 2009; SCHWARTZ et al., 2015). Die bisherige Datenbasis im Muldesystem beruht im Wesentlichen auf systematischen Untersuchungen der Kompartimente Wasser, Schwebstoff und Sediment in ihren drei Teileinzugsgebieten von Zwickauer, Freiberger und Vereinigter Mulde. Systematische Forschungen zur geochemischen Qualität der im Muldestrom vorhandenen aquatischen Samenpflanzen (wichtigste Gruppe der aquatischen Makrophyten) und zu ihrem aus der Wechselwirkung mit den Kompartimenten resultierenden

Schadstoffpotenzial liegen bisher hingegen noch nicht vor. Diese Lücke soll mit der vorliegenden Arbeit geschlossen werden.

Aquatische Makrophyten sind kohärenter Bestandteil von Flüssen und Bächen verschiedener Fließgeschwindigkeiten und Trophiestufen. Als Organismengruppe fehlen sie nur, (1) wenn im Oberlauf das Substrat zu grob ist oder (2) wenn im Wasser in starkem Maße phytotoxische Substanzen vorhanden sind.

Somit sind aquatische Makrophyten in natürlichen und naturnahen Gewässern bei geeignetem Substrat stets präsent. Ihre ufernahen Bestände sind gut wahrzunehmen und eine Probenahme kann vergleichsweise leicht erfolgen. Aus einer Identifikation der Pflanzen bis auf Gattungs- oder Artniveau lassen sich überwiegend aussagekräftige Indikationen zu den ökologischen Verhältnissen ableiten. Man erhält allerdings erst durch die Kenntnis der stofflichen Zusammensetzung der Pflanzen hinreichend präzise Auskunft über das pflanzliche Lebensumfeld von Wasser, die Geochemie des Gewässerbodens, Hydrochemie, biologischen Interaktionen und Licht. Aquatische Makrophyten stellen "lokale Resultanten abiotischer und biotischer Wechselwirkungen" dar, die aus den unmittelbaren Bedingungen ihrer Umgebung von (Fluss-)Wasser, (Fluss-)Schwebstoff und (Fluss-)Sediment erwachsen. Substrat und Qualität des Flusssedimentes (insbesondere sein Nährstoff- und Schadstoffgehalt), die im Flusswasser enthaltene Schwebstoffmenge (Lichtdurchflutung des Wasserkörpers) sowie die Dynamik (Fließgeschwindigkeit) und die Qualität des Flusswassers sind wesentliche Einflussfaktoren von Prozessen, die das Auftreten von Samenpflanzen im Gewässer zulassen, unterbinden und/oder qualitativ/quantitativ beeinflussen.

In Ergänzung zum Sediment, das sich bei kontinuierlicher Akkumulation als ein vorzügliches Langzeitarchiv für langfristige Entwicklungen und Veränderungen im Flusseinzugsgebiet eignet, sind mit der Untersuchung aquatischer Makrophyten zeit- und ortsspezifische Aussagen möglich. So können aquatische Makrophyten aufgrund ihres jährlich und örtlich spezifischen Wachstums vorzugsweise als Indikatoren zur Erkennung temporärer bzw. lokal wirksamer Einflüsse genutzt werden. Der Nachweis örtlich begrenzter, bewirtschaftungsabhängiger Einträge (z. B. Landwirtschaft, Industrie) aus der Flussaue in den Hauptstrom wird ebenfalls durch die Untersuchung aquatischer Makrophyten möglich. Aber auch temporäre, regional wirksame Ereignisse, wie die Mobilisierung von Schadstoffen bei Hochwässern, erscheint in der Zusammensetzung der aquatischen Makrophyten im jeweiligen Flussgebiet abgebildet. Voraussetzung für derartige ort- und zeitspezifische Aussagen ist ein Erkenntnisstand, der einen Überblick über die Variation in der Verbreitung und qualitativen/quantitativen (Element-)Zusammensetzung der aquatischen Makrophyten im jeweiligen Flusssystem gibt. Dieser soll für das Flusssystem der Mulde mit der vorliegenden Publikation erreicht werden. Der Schwerpunkt der elementgeochemischen Untersuchungen und Auswertungen der aquatischen Makrophyten in dieser Arbeit sind auf die Schwermetalle und Arsen gelegt.

1.2 Untersuchungsgebiet und Flussgebietsbeschreibung

Die Mulde ist ein flächen- und abflussseitig bedeutsamer, belastungsrelevanter Zufluss im Mittellauf der Elbe. Mit ihren drei Hauptläufen und Teileinzugsgebieten der Freiburger Mulde (2.985 km²; Länge 123,4 km), der Zwickauer Mulde (2.360 km², Länge 166,7 km) und der Vereinigten Mulde (2.055 km², Länge

147,0 km) stellt sie den Hauptentwässerungsstrom für das durch jahrhundertelangen Erzbergbau gekennzeichnete Sächsische Erzgebirge dar. Die stoffliche Besonderheit des Muldestroms besteht in einer erhöhten natürlichen Grundlast an Erzkomponenten mit einer großen Elementbandbreite (Arsen, Blei, Cadmium, Eisen, Silber, Kobalt, Kupfer, Nickel, Uran, Wolfram, Zinn, Zink). Sie erfuhr durch jahrhundertlange, intensive anthropogene Tätigkeiten von Bergbau, Verhüttung und metallverarbeitender Industrie eine geochemische Mobilisierung mit bis heute anhaltenden kontinuierlichen und punktuellen Einträgen an Schwermetallen und Arsen in das Gewässersystem und die Böden ihres Einzugsgebietes. Dabei sind im Verlauf der Mulde Belastungsschwerpunkte auszumachen, die den Teilströmen der Mulde eine geochemische Signifikanz geben.

Im Teileinzugsgebiet der **Freiberger Mulde** bildet der zwischen Berthelsdorf, Muldenhütten, Freiberg und Halsbrücke im oberen Freiburger Muldestrom liegende Berg-, Hütten- und Sanierungsstandort Freiberg einen Schwerpunkt für signifikante Einträge an Silber, Cadmium, Blei und Zink. Sie können als "Leitschadstoffe" der Freiburger Mulde gelten. Im Teileinzugsgebiet der **Zwickauer Mulde** sind in ihrem Oberlauf zwischen Aue und Hartenstein (Belastungsschwerpunkt Schlema/Schneeberg) und zwischen Zwickau und Schlunzig (Belastungsschwerpunkt Crossen) signifikante Einträge an Nickel, Kobalt, Wismut und Uran auszumachen. Insbesondere die Elemente Nickel und Uran erweisen sich hier als "Leitschadstoffe" der Zwickauer Mulde. Die Elemente Arsen und Kupfer sind beiden Flusssystemen zuzuordnen, wobei erhöhte Gehalte an Arsen häufiger in der Zwickauer Mulde und an Kupfer in der Freiburger Mulde zu beobachten sind (GREIF, 2015). Mit dem Muldenzusammenfluss zur **Vereinigten Mulde** bei Sermuth kommt es im **Mittellauf der Vereinigten Mulde** bis zum Muldestausee (Abschnitt Sermuth – Grimma – Wurzen – Bad Dübener – Pouch) zu einer weitgehenden Vermischung und Verdünnung der von den Mulde-Oberströmen mitgebrachten Elementfrachten. Eine signifikante Veränderung des Element- und Schadstofftransportes in der Vereinigten Mulde tritt mit ihrer Durchströmung durch den **Bitterfelder Muldestausee** ein. Als großflächige wasserberuhigte Zone im Gewässersystem der Mulde ist er seit dem Jahr 1975 als bedeutsame Senke für den Sediment- und Schadstoffrückhalt mit überregionaler Wirkung für die Gewässer- und Sedimentqualität des unteren Elbesystems bis Hamburger Hafen und Nordsee ausgewiesen. Der mengenmäßig größte Anteil der von der Vereinigten Mulde partikulär transportierten Schwebstofffracht mit hohen Schadstoffanteilen (357.435 Tonnen pro Jahr) gelangt im Muldestausee zur Sedimentation. Die im Muldestausee abgelagerten Schwebstoffe und Sedimente sind durch grenzwertüberschreitende, hohe anorganische Schadstoffgehalte an Arsen, Cadmium, Chrom, Quecksilber, Nickel, Blei und Zink ausgewiesen (JUNGE & SCHULTZE, 2016; JUNGE, 2015; JUNGE et al., 2004a,b; JUNGE & JENDRYSCHIK, 2003). Ihr Rückhalt im Muldestausee entlastet den **Unterlauf der Vereinigten Mulde**. In den Flussabschnitt unterhalb des Muldestausees bis zur Mündung in die Elbe bei Dessau gelangen infolge dessen nur mengenmäßig geringe, aber mitunter hochbelastete Feinstfrachten an Schwebstoff und vorwiegend gelöst-transportierte Schadstoffanteile (Arsen). Zusätzliche organische (u. a. Dioxine) und anorganische Schadstoffeinträge (u. a. Quecksilber) erfolgen in diesem Bereich über Zuflüsse aus der vom ehemaligen Wolfen-Bitterfelder Chemiedistrikt belasteten Spittelwasser-Niederung.

2 Methoden

2.1 Probenahme

2.1.1 Entnahmepunkte

Die Probenahme der Makrophytenbiomasse erfolgte entlang der Flussläufe der Freiberger, Zwickauer und Vereinigten Mulde. Für den ortsspezifischen Vergleich der Elementkonzentrationen aquatischer Makrophyten (Kap. 3.3) erfolgte im August/September 2018 zusätzlich eine vergleichende Probenahme entlang des Flusslaufes der Weißen Elster. Im Gelände wurden die Entnahmeorte und die Orte, an denen keine aquatischen Makrophyten gefunden wurden, mittels handelsüblichem GPS-Gerät ermittelt. Diese sind georeferenziert in den Abbildungen 1 bis 3 dargestellt. Eine Verdichtung der Probenahmeorte erfolgte im Gebiet um Sermuth, da dort die Zwickauer Mulde und die Freiberger Mulde zur Vereinigten Mulde zusammenfließen (Abb. 4). Die Entnahmeorte wurden in der Regel fotografisch dokumentiert (Abb. 5).

2.1.2 Probennahme, -transport und -lagerung

Die Probenahmen erfolgten meistens vom Ufer aus mit einem sechsarmigen Krauthaken, der an einem zehn Meter langen Seil befestigt war. Bei schwierigem Untergrund und niedrigem Wasserstand wurden die Proben per Hand direkt im Fluss genommen. Für die Beprobungen der verschiedenen Muldenlaufabschnitte wurden mehrere Kampagnen durchgeführt: Freiberger Mulde (Mai 2017, August 2017, Mai 2018), Zwickauer Mulde (Mai 2017, Oktober/November 2017, Mai 2018), Vereinigte Mulde oberhalb Muldestausee (Juni 2015, Mai/Juni 2017, November 2017, Mai 2018), Bitterfelder Muldestausee (März, Juni 2015, Juni 2017), Vereinigte Mulde unterhalb Muldestausee (Juli/August 2017, September 2018) sowie Spittelwasser (Juni bis August 2017, September 2018). Die Makrophyten wurden im Flusswasser sorgfältig gewaschen und in verschleißbare LDPE-Beutel überführt. Die Probemenge betrug durchschnittlich 200 g Pflanzenfrischmasse. Im Anschluss an die Probenahme wurden die Beutel in einer Kühlzelle bei 7 °C gelagert und mit Lagerungszeiten von maximal einer Woche schnellstmöglich weiterbearbeitet.

2.1.3 Probenvorbereitung

Die Makrophytenproben wurden im Laboratorium mit Leitungswasser gewaschen und das Wasser so oft verworfen, bis es klar blieb. Holz, Blätter und andere Störstoffe wurden aussortiert. Anschließend wurden die Proben mit einem Papiertuch getrocknet, um das anhaftende Wasser vor der Analyse zu entfernen.

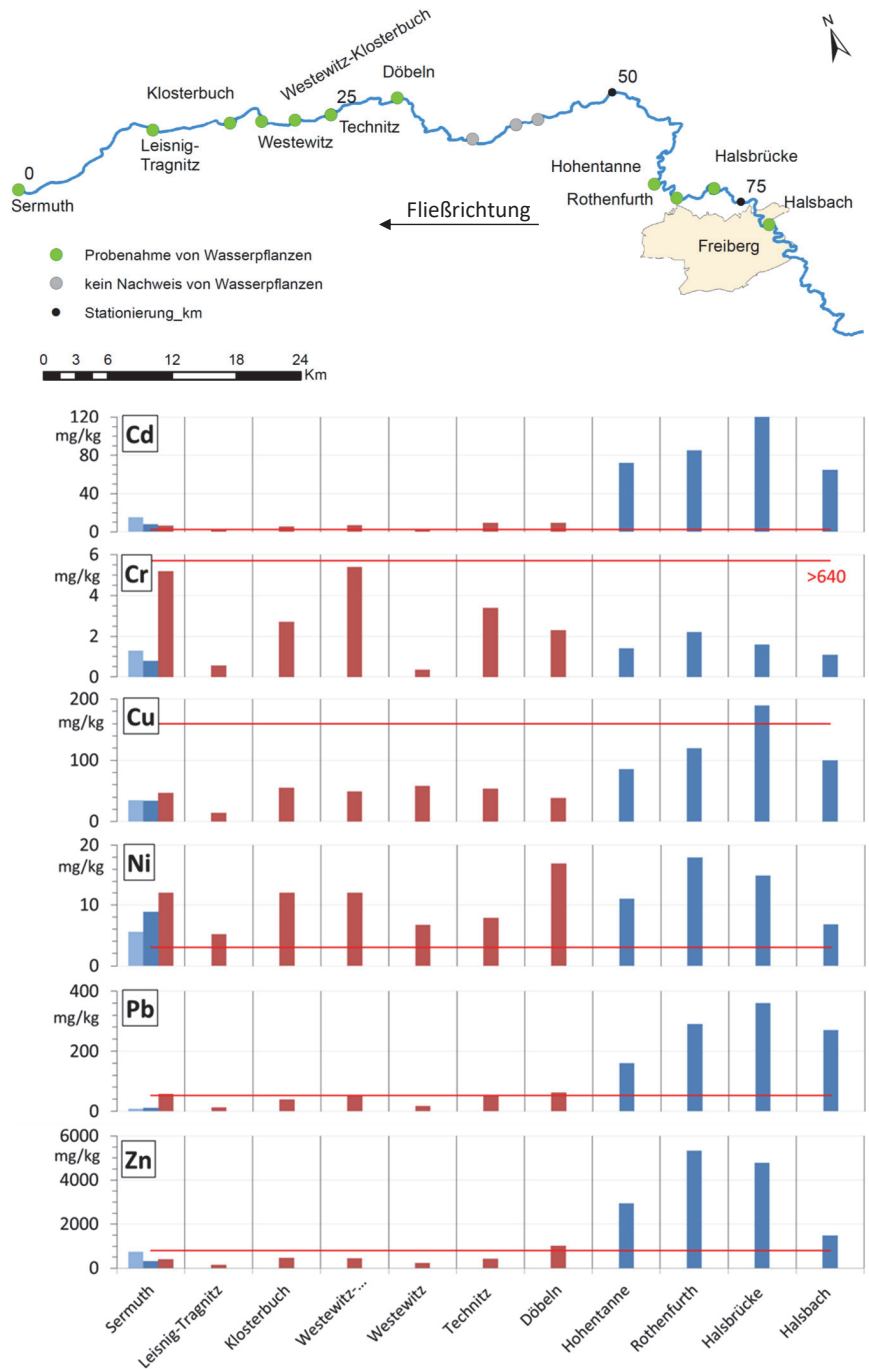


Abbildung 1

Ausgewählte Schwermetalle in aquatischen Makrophyten im Fluss Freiberger Mulde (hellblau: *Ranunculus* (Mai), blau: *Ranunculus* (August), rot: *Myriophyllum*, rote Linie: Schwellenwert nach Schadstoff/Sedimentmanagementkonzept, grauer Punkt im Flusslauf: keine Pflanzen vorhanden). *Selected heavy metals in aquatic macrophytes in the Freiberger Mulde River (light blue: Ranunculus in May, blue: Ranunculus in August, red: Myriophyllum, red line: Threshold according to pollutant/sediment management concept, gray point in the river: no plants present).*

2.2 Analysemethoden

2.2.1 Bestimmung der Trockensubstanz (TS)

Die frischen Pflanzenproben wurden in große Petrieschalen gelegt, gewogen und bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet, um ihre Trockensubstanz zu bestimmen.

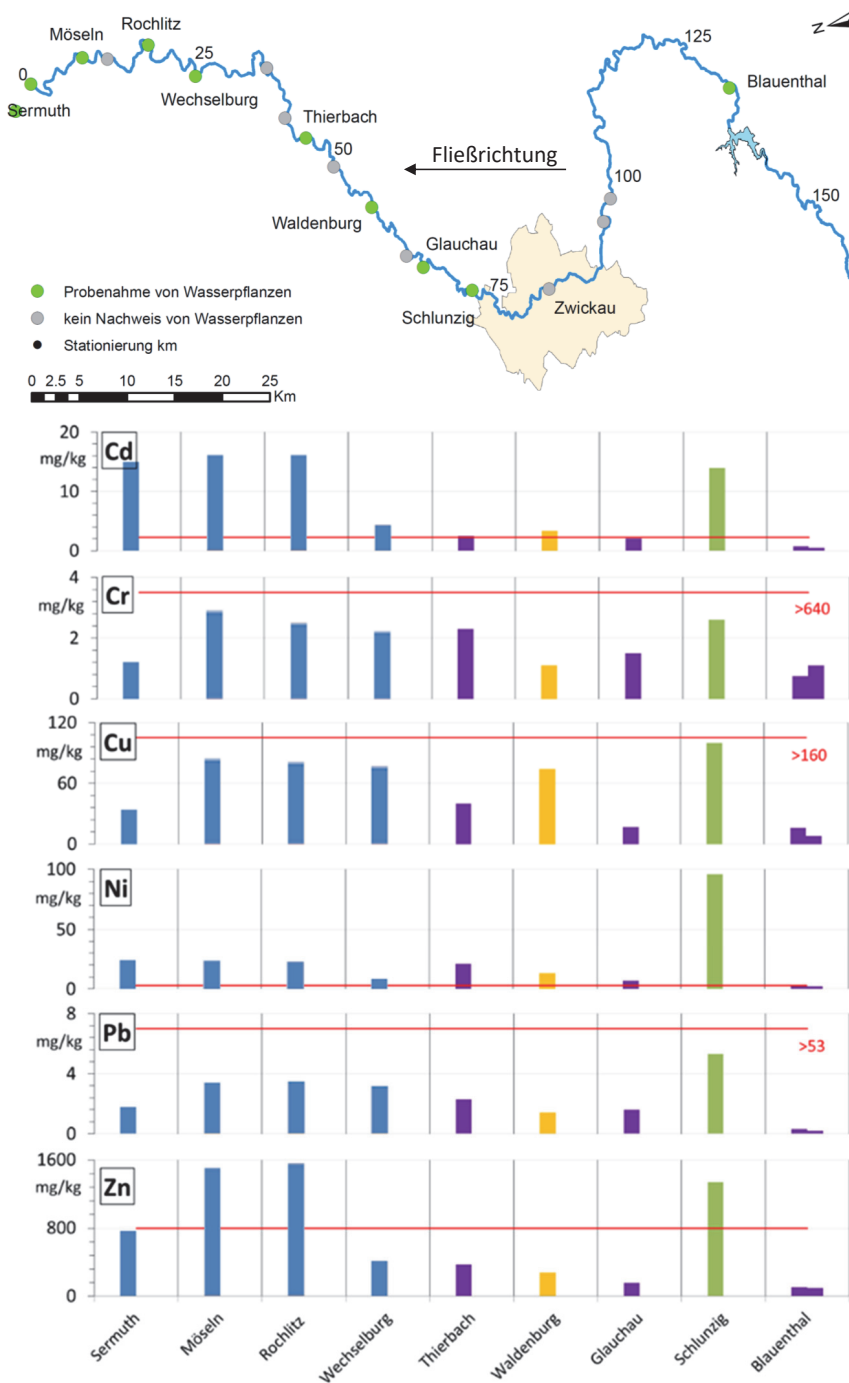


Abbildung 2
 Ausgewählte Schwermetalle in aquatischen Makrophyten im Fluss Zwickauer Mulde (blau: *Ranunculus*, lila: *Phalaris*, gelb: *Potamogeton*, grün: *Elodea*, rote Linie: Schwellenwert nach Schadstoff/Sedimentmanagementkonzept, grauer Punkt im Flusslauf: keine Pflanzen vorhanden).
Selected heavy metals in aquatic macrophytes in the Zwickauer Mulde River (blue: Ranunculus, purple: Phalaris, yellow: Potamogeton, green: Elodea, red line: Threshold according to pollutant/sediment management concept, gray point in the river: no plants present).

2.2.2 Bestimmung des Kohlenstoff-Stickstoff-Verhältnisses

Zur Bestimmung der in den Pflanzenproben enthaltenen Kohlenstoff- und Stickstoffmengen wurden diese bei 950 °C in einem Elementanalysator mit Wärmeleitfähigkeitsdetektor verbrannt. Das C/N-Verhältnis wurde dann aus den ermittelten C- und N-Gehalten berechnet.

2.2.3 Bestimmung der Elemente

Für die elementanalytischen Bestimmungen wurden die getrockneten und homogenisierten Pflanzenproben mit Salpetersäure und Wasserstoffperoxid im Mikrowellenaufschlussgerät aufgeschlossen (ISO 15587-2). Die Elemente Aluminium, Bor, Kalzium, Eisen, Kalium, Magnesium, Mangan, Natrium, Phosphor, Schwefel und Zink wurden in den Lösungen mittels ICP-OES nach DIN EN ISO 11885 bestimmt. Die geringer konzentrierten Elemente Arsen, Cadmium, Kobalt, Chrom, Kupfer, Molybdän, Nickel und Blei wurden mit dem ICP-MS nach DIN EN ISO 17294 gemessen.

2.3 Bestimmung der Pflanzen

Die Determination von aquatischen Samenpflanzen ist in verschiedenen Verwandtschaftskreisen problematisch und nur bei Vorhandensein von Blüten, teils auch Früchten zuverlässig durchführbar. Sofern nicht vor Ort bis auf Art rang bestimmbar, sind mit Sorgfalt Belege anzufertigen, die später durch Spezialisten identifiziert werden können. Da es im Rahmen dieser Studie nicht möglich war, sämtliches gesammeltes Pflanzenmaterial sachgerecht für eine Identifikation aufzubereiten und zu trocknen, wurden nur ausgewählte Pflanzen herbarisiert. Diese wurden nach der Untersuchung in den Sammlungsbestand des Herbariums der Universität Leipzig integriert (Tab. 1). Vor allem für die Gattung *Ranunculus* (Abb. 5) gelang wegen des Fehlens generativer Strukturen oft keine sichere Ermittlung der Art. Solche Schwierigkeiten bei der Bestimmung führten zum Entschluss, die Elementanalysen für alle Pflanzen einheitlich auf Gattungs- und nicht auf Artniveau durchzuführen.

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Kommentare zur Besiedlung der Mulde durch aquatische Makrophyten und deren Nachweise im Untersuchungsgebiet

Über die Besiedlung der Mulde durch Samenpflanzen ist für das 20. Jahrhundert in Literatur und Herbarien nur wenig zu erfahren. Eine für das Untersuchungsgebiet beachtenswerte Studie dieses Zeitraums stellt die Arbeit von SCHROEDER (1939) dar, der auf Seite 61 feststellt: "Höhere Wasserpflanzen fehlen gegenwärtig im Oberlauf und Mittellauf der Mulde fast gänzlich." Als Ursache sind starke Wasserverschmutzungen anzunehmen. Genannt werden u. a. sulfithaltige Abwässer der Zellstoff- und Papierindustrie, kupferhaltige Beizereiabwässer und Phenole. Schroeder stellt durch Algen gewährleistete Selbstreinigungsprozesse heraus und verweist für den Muldeunter-

lauf auf eine bessere Wasserqualität sowie auf Vorkommen von Gelber Teichrose und Kanadischer Wasserpest (Abb. 6).

Wie sich die Besiedlungsverhältnisse danach entwickelt haben, lässt sich nicht sicher rekonstruieren. Gewisse Hinweise geben Fundverzeichnisse in der Zentralen Artdatenbank Sachsens (ZenA) des Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG) in Freiberg. Für die 1970er und 1980er Jahre werden in dieser Datenbank für den Bereich der Mulde verschiedene aquatische Makrophyten genannt, ohne den Fluss als Fundort explizit zu benennen. Da im genannten Zeitraum die Mulde gemäß den damaligen Kenntnissen und Erfahrungen hohe Schadstoffmengen aufwies, sind als Fundorte dieser aquatischen Makrophyten weniger stark belastete Zuläufe zur Mulde und nahe gelegene Stillgewässer mit vergleichsweise sauberem Wasser wahrscheinlich. Diese wären somit Refugien und Ausgangspunkte für eine Wiederbesiedlung nach dem Zeitalter einer starken industriellen Kontamination des Gewässersystems Mulde. Dank der deutlichen Verbesserung der Wasserqualität durch höhere Umweltstandards seit der Wiedervereinigung Deutschlands besitzt die Mulde in heutiger Zeit eine großräumige und als stabil zu bezeichnende aquatische Makrophytenvegetation. Die Datenbank des LfULG weist ab den 1990er Jahren einen deutlichen Zuwachs an Fundnachweisen für den Bereich der Mulde auf und benennt für den Fluss selbst unter anderem rezente Vorkommen von Schild-Wasserhahnenfuß (*Ranunculus peltatus*), Pinselblättrigem Wasserhahnenfuß (*Ranunculus penicillatus*) und Teichfaden (*Zannichellia*). Zu beachten und bei Interpretationen von Funddaten zu berücksichtigen ist, dass in den letzten drei Jahrzehnten der Gewässerbesiedlung deutlich mehr Aufmerksamkeit geschenkt wurde als zu Zeiten der Deutschen Demokratischen Republik.

Noch aussagekräftiger als die genannte Datensammlung ist jene der Staatlichen Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft, Fachbereich Gewässerökologie (BFUL) in Nossen, in die Nachweise von Messstellen des Monitorings zur Einhaltung der EG-Wasserrahmenrichtlinie (EG-WRRL) einfließen. Deshalb wurden diese Makrophytenkartierungen für den Zeitraum von 2008 bis 2016 für das Flusssystem der Mulde in Bezug auf die in dieser Studie beprobten Standorte ausgewertet. Zusammenfassend ist in dieser Hinsicht herauszustellen, dass bis auf den bei den Kartierungen in der unteren Mulde festgestellten *Ranunculus fluitans* alle anderen Makrophyten der BFUL-Datenbank auch für die vorliegende Studie nachgewiesen

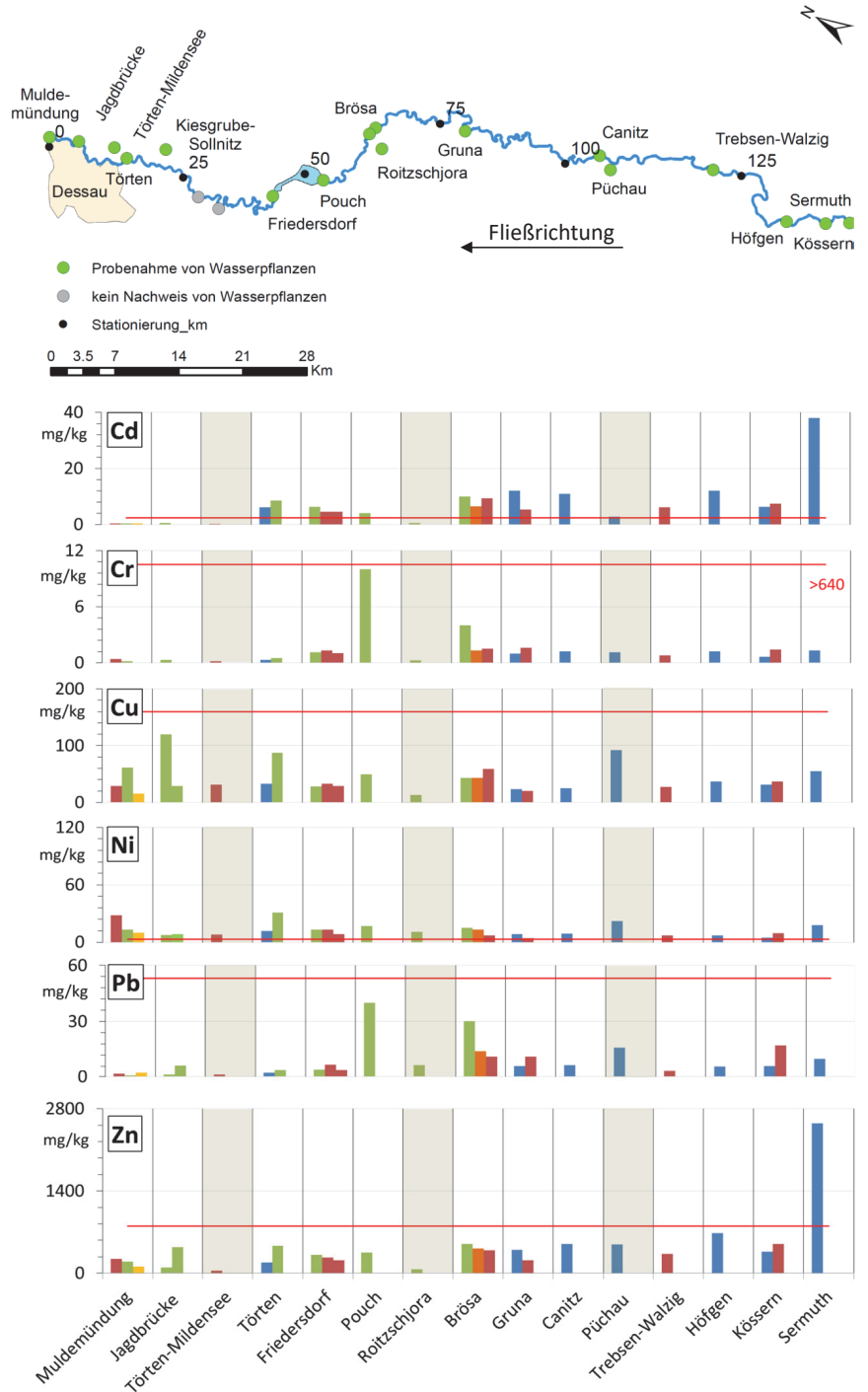


Abbildung 3 Ausgewählte Schwermetalle in aquatischen Makrophyten im Fluss Vereinigte Mulde (blau: *Ranunculus*, rot: *Myriophyllum*, grün: *Elodea*, gelb: *Potamogeton*, braun: *Zannichellia*, rote Linie: Schwellenwert nach Schadstoff/Sedimentmanagementkonzept, grauer Punkt im Flusslauf: keine Pflanzen vorhanden, grauer Balken: im Überschwemmungsgebiet außerhalb des Flusslaufes). *Selected heavy metals in aquatic macrophytes in the Mulde River (red: Myriophyllum, green: Elodea, yellow: Potamogeton, blue: Ranunculus, brown: Zannichellia, red line: Threshold according to pollutant/sediment management concept, gray point in the river: no plants present, gray background: in the flood area outside the river).*

und beprobt werden konnten. Gemäß dieser Datenbank treten *Ranunculus peltatus* und *Ranunculus penicillatus* bereits im Oberlauf der Freiburger Mulde auf, sind jedoch nicht für die obere Zwickauer Mulde nachgewiesen. Mit höherem Nährstoffgehalt und sinkenden Fließgeschwindigkeiten gesellen sich zu diesen

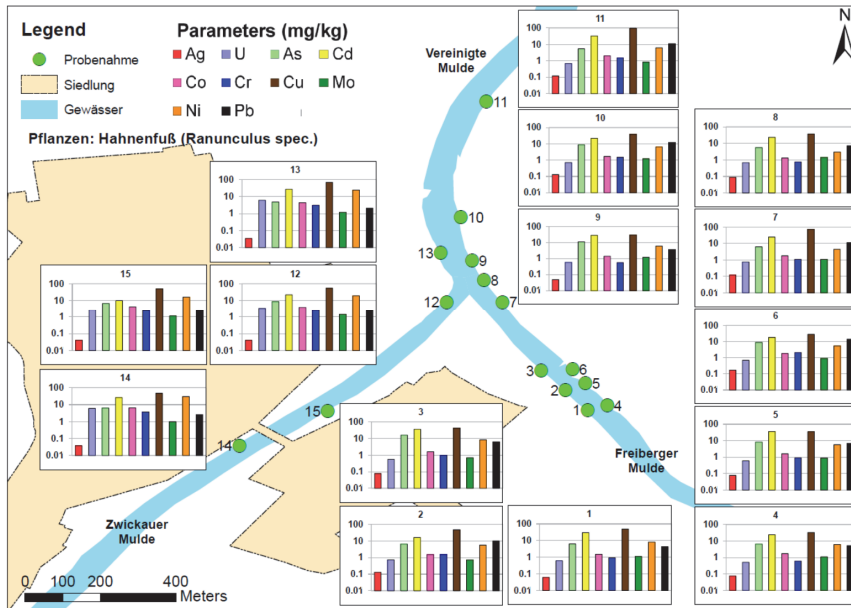


Abbildung 4

Ausgewählte Schwermetalle in aquatischen Makrophyten in den Flüssen Zwickauer Mulde, Freiburger Mulde und Vereinigte Mulde am Zusammenfluss bei Sermuth (in diesem Gebiet wurde nur *Ranunculus* gefunden).

Selected heavy metals in aquatic macrophytes in the Zwickauer Mulde River, Freiburger Mulde River, and Mulde River at the confluence in Sermuth (in this area only Ranunculus was found).

Wasserhahnfüßen bis in den Unterlauf der Vereinigten Mulde vor allem Ähren-Tausendblatt (*Myriophyllum spicatum*; Abb. 7) und die Schmalblättrige Wasserpest (*Elodea nuttallii*).

Abschließend sei noch der "Atlas der Farn- und Samenpflanzen Sachsens" von HARDTKE & IHL (2000) als wichtige Informationsquelle zur Verbreitung und Ökologie aquatischer Makrophyten genannt, der im Wesentlichen auf Kartierungsergebnissen der AG sächsischer Botaniker (AGsB) beruht. In den dort enthaltenen Verbreitungskarten gibt es vor allem Fundeintragungen für die untere Mulde. Für den mittleren Flussabschnitt sind beispielsweise keine rezenten Nachweise von Wasserhahnfüßen verzeichnet. Somit besteht deutlicher Aktualisierungsbedarf für die Karten.

Die oben getroffenen Aussagen charakterisieren die Mulde als inzwischen vergleichsweise gut floristisch untersuchtes und überwacht Flusssystem. Dennoch gibt es für viele Kilometer Flussabschnitt keine Daten zur Besiedlung aquatischer Makrophyten. So manche Bereiche sind nur schwer zugänglich und im tieferen Wasser bleibt Vieles verborgen und nicht gezielt sammelbar, weshalb auch die eigenen, nachfolgend knapp beschriebenen Funde eine deutliche Bereicherung der floristischen Kenntnisse über die Mulde darstellen und Eingang in sächsische Datenbanken gefunden haben (Tab. 1 und 2).

In den für diese Publikation relevanten Untersuchungsbereichen konnten mehrere Samenpflanzenarten nachgewiesen werden. Es handelt sich teils um amphibische und uferbewohnende überflutungstolerante Arten (Bitteres Schaumkraut und Rohrglanzgras), teils um Arten, die ständig untergetaucht im Wasser leben (Arten von Wasserpest, Tausendblatt und Wasserhahnfuß sowie Krauses Laichkraut und Teichfaden). Nur die Funde der

letzten genannten typisch aquatischen Arten seien abschließend kurz kommentiert.

Bei einem Vergleich von Florenlisten zeigt sich, dass in limnischen Gewässern der Anteil eingeschleppter, also nicht heimischer Pflanzenarten, auffallend hoch ist. In der Mulde konnten von diesen fremdländischen Arten mit Kanadischer Wasserpest und Schmalblättriger Wasserpest zwei sehr wuchskräftige Vertreter nordamerikanischer Herkunft festgestellt werden (ZEHNSDORF et al., 2015). Letztgenannter befindet sich in Sachsen aktuell in starker Ausbreitung (OTTO et al., 2018). Bei HARDTKE & IHL (2000) werden auch die Bestände des Teichfadens als in Zunahme begriffen bezeichnet. In Bezug auf Gewässerindikation und Naturschutz haben die Wasserhahnfüße einen besonderen Stellenwert. Einige der schwer bestimmbar Arten werden für Sachsen und Deutschland als rückläufig und gefährdet eingestuft (LANDESAMT FÜR UMWELT, LANDWIRTSCHAFT UND GEOLOGIE, 2013; METZING et al., 2018). In diesem Kontext ist erfreulich, dass der Pinselblättrige Wasserhahnfuß, der für Sachsen als "stark gefährdet" kategorisiert ist, in der Mulde in den letzten Jahren an mehreren

Lokalitäten nachgewiesen werden konnte (Datenbanken von LFULG, BfUL sowie eigene Funde). Unterhalb des Zusammenflusses von Freiburger und Zwickauer Mulde bei Sermuth konnte an der Muldebrücke bei Kössern (Abb. 5) ein Wasserhahnfuß mit intermediären Merkmalen nachgewiesen werden, bei dem es sich vermutlich um einen seltenen Hybriden von Schild-Wasserhahnfuß und Haarblättrigem Wasserhahnfuß (*Ranunculus trichophyllus* Chaix.) handelt.

3.2 Pflanzenspezifische Elementkonzentrationen im Flusslauf

Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurden die wichtigsten Schwermetalle (Cd, Cr, Cu, Ni, Pb und Zn) in den drei Flussabschnitten der Mulde (Freiburger Mulde, Zwickauer Mulde und Vereinigte Mulde) für die jeweils gefundenen Pflanzengattungen dargestellt (Abb. 1 bis 3) und ausgewertet (Tab. 3).

Da am Zusammenfluss der Freiburger Mulde und der Zwickauer Mulde nur eine Pflanzengattung gefunden wurde (*Ranunculus penicillatus* und *Ranunculus peltatus*), die Elementkonzentrationen aber ein heterogenes Bild zeigten, wurde dieses Areal im Mai 2018 noch einmal eingehend beprobt und die Pflanzenbiomasse analysiert (Abb. 4, Tab. 2). Die Pflanzenproben aus der Freiburger Mulde zeichnen sich bezogen auf den oberen Schwellenwert des Sedimentmanagementkonzeptes (IKSE, 2014) durch hohe Belastungen an Cadmium, Nickel, Blei und Zink aus. Typisch für die Freiburger Mulde sind die bergbaubedingten Silbergehalte (max. 2,6 mg/kg). In der Zwickauer Mulde erreicht Blei deutlich geringere und Nickel deutlich höhere Werte. Silber liegt deutlich unter den Gehalten in der Freiburger Mulde (max. 0,04 mg/kg), wohingegen Uran (max. 20 mg/kg) als bergbaubedingtes Leitelement prägend ist (Tab. 3). In der Vereinigten Mulde sind infolge des Zusammenflusses bei Sermuth und die damit einher-

gehende Vermischung beider Teilströme alle Elemente mit deutlich niedrigeren Konzentrationen vertreten. Detailuntersuchungen am Zusammenfluss der Freiburger Mulde und der Zwickauer Mulde ermöglichten mit Hilfe der Probenahme aquatischer Makrophyten eine lokale Differenzierung der örtlichen Elementkonzentrationen (Abb. 4).

3.3 Ortspezifischer Vergleich der Elementkonzentrationen aquatischer Makrophyten

Das gleichzeitige Vorkommen verschiedener Pflanzengattungen an einem Probenahmeort macht unter der Annahme gleicher ortsspezifischer Randbedingungen in den Kompartimenten Wasser, Schwebstoff und Sediment vergleichende Auswertungen und Aussagen zur pflanzenspezifischen Elementanreicherung möglich.

Für den ortsspezifischen Vergleich der Makrophytengattungen und ihrer Elementkonzentrationen wurde zur Erhöhung der Probenzahl zum Einzugsgebiet der Mulde ($n = 18$) das Einzugsgebiet der Weißen Elster ($n = 13$) einbezogen. In die Auswertung einbezogen wurden alle bisherigen Probenahmestellen im Flusssystem von Mulde und Weiße Elster, an denen gleichzeitig mindestens zwei verschiedene Pflanzengattungen gemeinsam auftraten.

Beobachtet wurden an einem Ort das gemeinsame Auftreten der Pflanzengattungen *Ranunculus* und *Myriophyllum*, *Elodea* und *Myriophyllum* sowie *Elodea* und *Ranunculus*. Das gleich-



Abbildung 6

Die Kanadische Wasserpest (*Elodea canadensis*) tritt seit 1862 in Sachsen auf. Nachdem sie sich bis etwa 1900 stark ausbreiten und später behaupten konnte, wird sie seit etwa 30 Jahren von der Schmalblättrigen Wasserpest zunehmend verdrängt (dargestellter Bildbereich ca. 9 x 6 cm; Foto: D. Schories).

The Canadian waterweed (Elodea canadensis) could be found in Saxony since 1862. After it was able to spread strongly until about 1900 and maintain a strong presence thereafter, it has been increasingly displaced by Nuttall's waterweed (Elodea nuttallii) for about 30 years (picture area shown approx. 9 x 6 cm; photo: D. Schories).



Abbildung 5

Blühender Wasserhahnenfuß (vermutlich *Ranunculus-Hybrid peltatus x trichophyllum*) im Fluss Vereinigte Mulde bei Kössern (28. August 2018, 51°10'45,7" N, 12°46'41,9" E), Fotos: A. Zehnsdorf. *Flowering water-crowfoot in the Mulde River near Kössern (28 August 2018, 51 ° 10'45.7 "N, 012 ° 46'41.9" E), photos: A. Zehnsdorf.*

zeitige Auftreten aller drei Pflanzengattungen an einem Ort konnte nicht beobachtet werden. Für jedes untersuchte Element (Tab. 3) wurden dessen Gehalte in den gleichzeitig an einem Ort vorkommenden Pflanzenpaaren miteinander verglichen. Nur bei den Elementen Aluminium, Blei, Chrom, Calcium, Eisen, Kalium, Molybdän, Nickel und Uran konnten durchgehend gleiche Trends in der Verteilung der Elementgehalte zwischen den betrachteten Pflanzengattungen festgestellt werden. Das bedeutet, es waren durchgehend höhere oder niedrigere Gehalte in einer der im Vergleich betrachteten Pflanzengattungen feststellbar. Bei allen anderen untersuchten Elementen trat diese Ausschließlichkeit in der Anreicherung oder Abreicherung zwischen den Pflanzengattungspaaren nicht auf (Tab. 4).

LARRAS et al. (1981) stellten fest: "*Neben dem Wassermoos Fontinalis antipyretica reichern Elodea canadensis, Ranunculus aquatilis agg., Ranunculus fluitans und Myriophyllum verticillatum die meisten Schwermetalle am stärksten an. Sie können deshalb als Biomonitore für Schwermetallbelastung angesehen werden.*" Ein Vergleich der Elementkonzentrationen in der Biotrockenmasse für Vertreter dieser drei Makrophytengattungen, wenn sie am gleichen Standort entnommen wurden, erfolgte bisher nicht.

Intensiv untersucht wurde die Aufnahme von Schwermetallen hinsichtlich der potenziellen Eignung von aquatischen Makrophyten für die biologische Sanierung (Phytoremediation) von schwermetallhaltigen Gewässern (SIVACI et al., 2004). Exemplarisch soll hier auf einige dieser Studien näher eingegangen werden.

Bei Arten mit gut entwickeltem Wurzelsystem und überwiegend untergetauchten Blättern, wie die im Flusssystem der Mulde vorrangig gefundenen Vertreter der Gattungen *Myriophyllum*, *Elodea* und *Ranunculus*, sind die Aufnahmemechanismen von



Abbildung 7

Mitteuropäische Tausendblatt-Arten besitzen stark gefiederte Blätter und sind im sterilen Zustand nur schwer bestimmbar. Das gezeigte Ähren-Tausendblatt (*Myriophyllum spicatum*) ist die häufigste Art der Gattung im Untersuchungsgebiet und weist konstant 4 Blätter im Quirl auf (dargestellter Bildbereich ca. 9 x 6 cm; Foto: D. Schories).

The Central European watermilfoil species have finely, pinnately divided leaves and it's difficult to identify sterile plants. The depicted spiked watermilfoil is the most common species of the genus in the study area and consistently exhibits 4 leaves in a whorl (picture area shown approx. 9 x 6 cm; photo: D. Schories).

Schwermetallen komplex (ATRI, 1983; OUTRIDGE & NOLLER, 1991). Da diese im Sediment wurzelnden aquatischen Makrophyten das Potenzial haben, Schwermetalle sowohl aus dem Wasser als auch aus dem Sediment aufzunehmen (GUILIZZONI, 1991).

In einer Zusammenstellung der Schwermetallkonzentrationen in der Trockensubstanz (TS) aquatischer Makrophyten geben DHIR et al. (2009) für *Myriophyllum spicatum* für Blei 36.500 mg pro g TS und für Cadmium 2.800 mg pro g TS an. Gerade bei Pflanzen mit sehr feingliedrigeren Blattstrukturen wie *Myriophyllum spicatum* kann auch die Adsorption von Schwermetallen aus dem Wasser eine Rolle spielen. Für Zink, Blei und Kupfer beispielsweise zeigte *M. spicatum* eine höhere Adsorptionskapazität als *Ceratophyllum demersum* (KESKINKAN et al., 2007). Die Bioakkumulation von Kupfer wurde an vollständig untergetauchtem *Ranunculus tricophyllus* als Funktion der Expositionszeit und der Konzentration untersucht, dies mit dem Ergebnis, dass die Art ein guter In-

dikator für die Kupferkonzentration im Gewässer ist (MATERAZZI et al., 2012).

Für *Elodea nuttallii* wiesen LARRAS et al. (1981) am Beispiel von Cadmium nach, dass auch hohe umwelttypische Konzentrationen die Pflanzen nicht nachteilig beeinflussen, da toxische Mengen des Metalls schnell und effektiv in den Zellwänden abgelagert werden. KÄHKÖNEN et al. (1997) untersuchten die Wurzeln, Triebe und Blätter von *E. canadensis* unterschiedlicher Herkunft hinsichtlich der Schwermetalle Fe, Mn, Cu, Zn, Ni, Cr. Sie kamen zu dem Ergebnis, dass *E. canadensis* mehr Cr, Ni und Mn in den Blättern als in den Wurzeln oder Trieben sammelt, während Fe und Cu hauptsächlich in den Wurzeln gefunden wurden. Die Konzentration von Zink war in allen Pflanzenteilen nahezu gleich, was auf die hohe Mobilität dieses Schwermetalls zurückgeführt wurde. Anzeichen, dass bei *E. canadensis* das Vorhandensein von Zink der Phytotoxizität von Kupfer entgegenwirkt, fanden CEGŁOWSKA et al. (2016). Nach MALEVA et al. (2009) verfügt *E. canadensis* über Entgiftungsmechanismen, die es der Pflanze ermöglichen, Nickel effektiv im Gewebe zu akkumulieren. Die Schwermetallaufnahme ist bei *E. canadensis* bei gleichzeitigem Vorhandensein mehrerer Schwermetalle sogar effektiver, wie BUTA et al. (2014) am Beispiel von Cu, Zn und Cd zeigten. Aufgrund ihrer Fähigkeit, verhältnismäßig hohe Schwermetallkonzentrationen in der Biomasse anzusammeln, ohne ihre Vitalität einzubüßen, wird *E. canadensis* als Hyperakkumulator bezeichnet (MOSOARCA et al., 2018). Eine Studie von THIEBAUT et al. (2010) zeigte, dass die Akkumulation von Schwermetallen (Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, Zn und Fe) in *Elodea canadensis* und *Elodea nuttallii* keinen Einfluss auf deren Schmackhaftigkeit für Makroinvertebraten hat. Eine Abhängigkeit von Salinität, Wassertemperatur und Schwermetallaufnahme bei *E. canadensis* fanden FRITIOFF et al. (2005). Die Änderung der Elementkonzentrationen in der Biomasse von *Elodea spec.* im Jahresgang untersuchten ZEHNSDORF et al. (2017). Einen Überblick über die Konzentrationen von 18 Elementen in der Biomasse von 39 bei der Makrophytenernte in Fließ- und Standgewässern in Deutschland gewonnenen Proben geben MOELLER et al. (2018).

Im Flusssystem der Mulde wurden hauptsächlich Makrophyten der Gattungen *Myriophyllum*, *Elodea* und *Ranunculus* gefunden. Die Schwermetallkonzentrationen in der Biotrockenmasse, deren Proben keine Wurzeln enthielten, bestätigen mit ihren hohen Schwermetallgehalten die in der Literatur beschriebene Eignung als "Schwermetall/Metall-Akkumulator" (Tab. 3). Abgeleitet wurden Faktoren zur elementspezifischen Anreicherung in der Biomasse von Vertretern der Gattungen *Myriophyllum*, *Elodea* und *Ranunculus* unter der Voraussetzung, dass diese unter natürlichen Bedingungen am gleichen Standort wuchsen.

4 Schlussfolgerungen

Die aquatischen Makrophyten in den drei Abschnitten der Mulde dokumentieren die bergbaubürtige Belastung der Flusssedimente mit Schwermetallen und Arsen. Die Elementgehalte für Arsen, Cadmium, Chrom, Kupfer, Nickel, Blei und Zink in den aquatischen Makrophyten spiegeln die von GREIF (2015) für das gesamte Flussgebiet der Mulde für Wasser, Schwebstoff und Sediment ermittelte Verteilung wider. Typisch für die Freiburger Mulde sind erhöhte Gehalte an Blei, Cadmium und Silber, für die Zwickauer Mulde an Uran und Nickel. Die Vereinigte Mulde zeigt die Durchmischung der Teilströme.

Tabelle 1

Ausgewählte Funde aquatischer Makrophyten im Flusssystem der Mulde, deren Bestimmungen im Gelände nicht eindeutig vorgenommen werden konnte (in Ergänzung dazu siehe auch Funde der Tabelle 2). Die Arten wurden durch P. Otto bestimmt und in den Sammlungsbestand des Herbariums der Universität Leipzig integriert; (gesammelt: F.W. Junge [F.J.] und A. Zehnsdorf [A.Z.]).

Selected records of aquatic macrophytes in the Mulde River system that could not be clearly determined during the field work (see also records of table 2 for more information). The species were identified by P. Otto and were integrated into the herbarium of the University of Leipzig; (collected: F.W. Junge [F.J.] and A. Zehnsdorf [A.Z.]).

Pflanzenart	Fluss	Koordinaten	Datum	Sammler
<i>Myriophyllum spicatum</i> L. (Ähren-Tausendblatt)	FM	51°31'39,7" N / 12°36'28,4" E	31.05.2017	F.J.
<i>Phalaris arundinacea</i> L. (Rohrgranzgras)	ZM	50°55'04,3" N / 12°41'18,2" E	16.10.2017	A.Z.
<i>Potamogeton crispus</i> L. (Krauses Laichkraut)	ZM	50°52'23,7" N / 12°36'29,6" E	16.10.2017	F.J.
<i>Cardamine amara</i> L. (Bitteres Schaumkraut)	ZM	50°50'19,4" N / 12°39'45,0" E	14.11.2017	F.J.
<i>Elodea canadensis</i> Michx. (Kanadische Wasserpest)	ZM	50°47'56,0" N / 12°30'46,8" E	14.11.2017	A.Z.
<i>Phalaris arundinacea</i> L. (Rohrgranzgras)	ZM	50°30'49,9" N / 12°37'29,5" E	14.11.2017	F.J., A.Z.
<i>Myriophyllum spicatum</i> L. (Ähren-Tausendblatt)	oVM	51°36'25,3" N / 12°30'36,6" E 51°36'28,3" N / 12°30'29,6" E	09.06.2017	A.Z.
<i>Myriophyllum spicatum</i> L. (Ähren-Tausendblatt)	oVM	51°13'51,9" N / 12°39'45,1" E	03.11.2017	F.J.
<i>Elodea nuttallii</i> (Planch.) H. St. John (Schmalblättrige Wasserpest)	oVM MST	51°35'43,7" N / 12°30'02,7" E 51°37'16,0" N / 12°25'00,6" E 51°39'16,9" N / 12°21'41,9" E	09.06.2017	F.J., A.Z.
<i>Myriophyllum spicatum</i> L. (Ähren-Tausendblatt)	MST	51°39'16,9" N / 12°21'41,9" E	09.06.2017	A.Z.
<i>Potamogeton crispus</i> L. (Krauses Laichkraut)	MST	51°39'16,9" N / 12°21'41,9" E	09.06.2017	F.J.
<i>Elodea nuttallii</i> (Planch.) H. St. John (Schmalblättrige Wasserpest)	uVM	51°51'33,5" N / 12°15'23,8" E 51°52'22,9" N / 12°14'19,5" E 51°48'00,0" N / 12°16'44,6" E	28.07.2017	F.J., A.Z.
<i>Zannichellia palustris</i> L. (Teichfaden)	uVM	51°52'22,9" N / 12°14'19,5" E	28.07.2017	F.J., A.Z.

Die Hauptelemente im Muldeverlauf zeigen bis auf Natrium keine signifikanten Differenzierungen. Natrium weist die höchsten Konzentrationen in Makrophyten der Gattung *Elodea* (max. 2,1 mg/kg) unterhalb des Muldestausees auf, was möglicherweise auf frühere Industrieleitungen aus dem Bitterfeld-Wolfener-Industriekomplex zurückzuführen ist. Im Spittelwasser, einem Kleingewässer, das historisch als Vorfluter für Industrieabwässer diente, wurden ähnlich hohe Konzentrationen in

Makrophyten der Gattungen *Elodea* (1,3 mg/kg) und *Callitriche* (1,5 mg/kg) nachgewiesen.

Elementspezifische Unterschiede für die Anreicherung in der Makrophytenbiomasse wurden für einzelne Pflanzengattungen festgestellt. So ist beispielsweise die Anreicherung von Nickel in Pflanzen der Gattung *Elodea* deutlich höher als bei *Ranunculus* (Tab. 4).

Tabelle 2

Probenahme von Wasserhahnenfüßen (*Ranunculus* spp.) am 28.05.2018, gesammelt: F.W. Junge und A. Zehnsdorf, bestimmt: P. Otto, Nummerierung wie in Abbildung 4 (Probenherkunft: Freiburger Mulde: Proben 1-8/Zwickauer Mulde: Proben 12, 14, 15/Vereinigte Mulde: Proben 9-11, 13).

Sampling of water buttercups (Ranunculus spp.) on 28 May 2018, collected: F. W. Junge and A. Zehnsdorf, determined by P. Otto, numbering as in Figure 4 (Extraction of samples: Freiburger Mulde: Samples 1-8/Zwickauer Mulde: Samples 12, 14, 15/Vereinigte Mulde: Samples 9-11, 13).

Pflanzenart	Nr.	Koordinaten	Pflanzenart	Nr.	Koordinaten
<i>R. penicillatus</i> (Dumort.) Bab.	1	51°09'26,6" N 012°48'03,3" E	<i>R. penicillatus</i> (Dumort.) Bab.	9	51°09'39,5" N 012°47'53,4" E
<i>R. peltatus</i> Schrank	2	51°09'28,3" N 012°48'01,4" E	<i>R. peltatus</i> Schrank	10	51°09'43,2" N 012°47'52,4" E
<i>R. peltatus</i> Schrank	3	51°09'30,0" N 012°47'59,3" E	<i>R. penicillatus</i> (Dumort.) Bab.	11	51°09'53,0" N 012°47'54,6" E
<i>R. cf. penicillatus</i> (Dumort.) Bab.	4	51°09'27,0" N 012°48'05,0" E	<i>R. cf. penicillatus</i> (Dumort.) Bab.	12	51°09'35,9" N 012°47'51,2" E
<i>R. penicillatus</i> (Dumort.) Bab.	5	51°09'28,9" N 012°48'03,1" E	<i>R. cf. penicillatus</i> (Dumort.) Bab.	13	51°09'40,1" N 012°47'50,7" E
<i>R. penicillatus</i> (Dumort.) Bab.	6	51°09'30,1" N 012°48'02,0" E	<i>R. peltatus</i> cf. Schrankw	14	51°09'22,3" N 012°47'31,6" E
<i>R. cf. penicillatus</i> (Dumort.) Bab.	7	51°09'35,9" N 012°47'56,0" E	<i>R. peltatus</i> cf. Schrank	15	51°09'26,5" N 012°47'41,0" E
<i>R. penicillatus</i> (Dumort.) Bab.	8	51°09'37,8" N 012°47'54,4" E			

Bemerkung: cf. (confer) = gesammeltes Pflanzenmaterial war nicht eindeutig bestimmbar

Tabelle 3
Elementkonzentration von *Elodea* (El), *Myriophyllum* (My) und *Ranunculus* (Ra) in der Freiburger Mulde (FM), Zwickauer Mulde (ZM), in der oberen Vereinigten Mulde (oVM), im Muldestausee (MST) und in der unteren Vereinigten Mulde (uVM), in Klammern = Anzahl der Proben, fett = Mittelwerte und darunter die Spannweite vom niedrigsten zum höchsten analysierten Wert, Einschätzung des Belastungsgrades der aquatischen Makrophyten nach Grenzwerten des Sedimentmanagementkonzeptes: Oberer Schwellenwert/Unterer Schwellenwert (mg/kg): **As**: 40/7,9; **Cd**: 2,3/0,22; **Cr**: 640/26; **Cu**: 160/14; **Ni**: 3/3; **Pb**: 53/25; **Zn**: 800/200; rot = Überschreitungen des Oberen Schwellenwertes (hoher Belastungsgrad), gelb = Überschreitungen des Unteren Schwellenwertes (mittlerer Belastungsgrad).
SElemental concentration of *Elodea* (El), *Myriophyllum* (My) and *Ranunculus* (Ra) in the Freiburger Mulde (FM) River, the Zwickauer Mulde (ZM) River, the upper part of the Mulde (oVM) River, lake Muldestausee (MST), and the lower part of the Mulde (uVM) River. Values formatted: in parentheses = number of samples, in bold = means, and the bottom entry is the range of analyzed values from lowest to highest. Estimation of the load level of aquatic macrophytes according to sediment management concept thresholds is determined as upper threshold/lower threshold (mg/kg): **As**: 40/7,9; **Cd**: 2.3/0.22; **Cr**: 640/26; **Cu**: 160/14; **Ni**: 3/3; **Pb**: 53/25; **Zn**: 800/200; red highlight = exceedance of the upper threshold value (high load level), yellow highlight = exceedance of the lower threshold value (mean load level).

	FM			ZM			oVM			MST			uVM		
	El (0)	My (7)	Ra (14)	El (1)	My (0)	Ra (7)	El (1)	My (5)	Ra (12)	El (2)	My (1)	Ra (0)	El (9)	My (2)	Ra (4)
Ag mg/kg	-	0,3 (3) 0,3-0,3	0,5 (11) 0,1-2,6	-	-	0,04 (3) 0,04-0,04	-	< 0,2 (4) <0,2-<0,2	0,1 (6) 0,0-0,2	0,3 (1) 0,3	< 0,2 <0,2	-	0,1 (2) 0,1-0,1	0,1 (1) 0,1	0,1 (3) 0,1-0,2
Al %	-	0,15 0,02-0,29	0,06 0,01-0,14	0,14 0,14	-	0,07 0,04-0,10	0,03 0,03	0,07 0,05-0,11	0,05 0,00-0,15	0,26 0,05-0,48	0,07 0,07	-	0,09 (8) 0,00-0,27	0,04 0,01-0,07	0,11 0,00-0,20
As mg/kg	-	24 14-40	27 5,5-160	53 53	-	7,4 3,8-11	20 20	18 12-26	14 2,8-100	53 24-81	19 19	-	38 13-84	86 78-94	53 7,8-170
B mg/kg	-	18 14-22	16 13-21	18 18	-	18 14-24	13 13	16 14-18	15 12-17	16 12-19	32 32	-	22 15-35	19 17-22	28 22-35
C %	-	37 34-40	39 (6) 38-40	35 35	-	38 (4) 36-40	-	34 (4) 24-40	39 (7) 31-44	34 33-34	37 37	-	34 27-38	38 38-38	35 33-37
Ca %	-	1,32 1,02-1,72	0,96 0,65-1,29	1,19 1,19	-	0,76 0,63-0,96	1,57 1,57	1,27 0,76-1,85	0,90 0,61-1,41	3,93 1,80-6,07	1,26 1,26	-	4,53 1,28-13,9	1,30 1,09-1,51	1,29 0,82-1,71
Cd mg/kg	-	5,9 1,5-9,3	41 8,1-120	14 14	-	16 4,3-26	5,4 5,4	6,5 3,8-9,4	18 6,1-38	5,2 4,1-6,3	4,6 4,6	-	3,5 (8) 0,3-8,5	1,4 0,4-2,4	5,6 4,9-6,3
Co mg/kg	-	4,9 1,6-8,3	5,9 1,3-28	34 34	-	5,7 3,4-8,3	3,2 3,2	5,1 1,8-9,1	3,2 1,4-12	7,3 4,6-10	7,3 7,3	-	14 1,6-32	27 11-42	17 5,6-34
Cr mg/kg	-	2,8 0,4-5,4	1,2 0,6-2,2	2,6 2,6	-	2,5 1,2-3,7	0,5 0,5	1,5 1,3-1,8	1,5 0,6-4,0	5,6 1,1-10	1,3 1,3	-	2,3 (8) 0,2-6,1	1,7 0,4-3,1	3,0 0,3-5,3
Cu mg/kg	-	45 14-58	65 28-95	100 100	-	61 34-84	30 30	38 20-59	42 23-98	39 28-49	33 33	-	51 21-120	22 14-29	29 24-35
Fe %	-	0,20 0,06-0,33	0,09 0,02-0,29	0,29 0,29	-	0,12 0,05-0,18	0,06 0,06	0,11 0,07-0,20	0,10 0,02-0,58	0,51 0,06-0,96	0,09 0,09	-	0,21 0,03-0,47	0,51 0,27-0,76	0,40 0,03-1,22
K %	-	1,95 1,51-2,71	3,29 2,50-4,25	3,75 3,75	-	3,66 2,98-4,40	4,15 4,15	1,81 1,62-2,11	3,50 2,14-4,18	3,27 3,16-3,37	1,66 1,66	-	4,04 3,20-6,64	2,17 1,52-2,82	4,08 2,95-4,90
Mg %	-	0,23 0,19-0,25	0,20 0,19-0,24	0,23 0,23	-	0,23 0,21-0,26	0,20 0,20	0,22 0,17-0,29	0,21 0,19-0,24	0,25 0,25-0,25	0,24 0,24	-	0,26 0,20-0,37	0,24 0,19-0,28	0,22 0,19-0,25
Mn %	-	0,26 0,07-0,55	0,13 0,04-0,47	0,81 0,81	-	0,15 0,08-0,27	0,06 0,06	0,18 0,04-0,34	0,08 0,03-0,27	0,15 0,10-0,19	0,42 0,42	-	0,39 0,05-1,03	0,81 0,43-1,18	0,62 0,22-1,51
Mo mg/kg	-	2,4 1,8-2,9	2,0 0,7-5,9	2,1 2,1	-	1,2 1,0-1,4	0,6 0,6	1,8 1,3-2,5	1,0 0,7-1,3	0,7 0,4-1,0	0,8 0,8	-	1,0 (8) 0,5-1,7	2,3 1,7-2,9	2,0 0,8-2,8
N %	-	3,6 3,3-4,1	3,8 (6) 2,2-4,5	4,0 4,0	-	4,1 (4) 4,0-4,3	-	2,8 (4) 1,4-3,5	3,8 (7) 3,0-5,0	3,9 3,8-3,9	3,6 3,6	-	3,0 2,3-3,9	2,8 2,3-2,8	3,0 2,3-3,9

	FM			ZM			oVM			MST			uVM		
	El (0)	My (7)	Ra (14)	El (1)	My (0)	Ra (7)	El (1)	My (5)	Ra (12)	El (2)	My (1)	Ra (0)	El (9)	My (2)	Ra (4)
Na	-	0,87	0,81	0,77	-	0,98	-	0,82	0,67	0,52	0,79	-	1,29	1,44	1,07
%	-	0,57-1,41	0,39-1,28	0,77	-	0,83-1,27	-	0,67-1,02	0,30-0,93	0,42-0,62	0,79	-	0,89-2,09	1,10-1,77	0,51-1,88
Ni	-	10	8,0	96	-	20	11	8,3	10	15	13	-	31	19	16
mg/kg	-	5,2-17	3,0-18	96	-	7,8-30	11	4,4-13	4,8-24	13-17	13	-	7,5-43	9,3-28	9,1-28
P	-	0,42	0,44	0,92	-	0,43	0,83	0,37	0,50	0,43	0,35	-	0,56	0,38	0,42
%	-	0,28-0,60	0,21-0,55	0,92	-	0,37-0,98	0,83	0,29-0,55	0,32-0,69	0,43-0,43	0,35	-	0,31-0,99	0,35-0,41	0,23-0,62
Pb	-	42	83	5,3	-	2,8	4,9	14	8,3	22	6,9	-	8,3	9,0	10
mg/kg	-	13-63	4,3-360	5,3	-	1,8-3,5	4,9	11-17	2,1-30	4,2-40	6,9	-	0,7-18	1,5-16	2,0-20
S	-	0,48	0,32	0,46	-	0,34	0,48	0,50	0,33	0,48	0,50	-	0,56	0,47	0,43
%	-	0,40-0,60	0,23-0,48	0,46	-	0,27-0,43	0,48	0,43-0,63	0,22-0,41	0,45-0,51	0,50	-	0,43-0,68	0,46-0,48	0,30-0,52
U	-	-	0,6 (8)	20	-	3,9 (6)	-	-	2,0	-	-	-	2,6 (5)	3,0 (1)	2,1 (3)
mg/kg	-	-	0,5-0,8	20	-	1,6-6,0	-	-	0,6-6,1	-	-	-	2,1-3,3	3,0	1,5-2,8
Zn	-	459	2048	1340	-	1215	205	342	1100	330	270	-	294 (8)	229	319
mg/kg	-	160-1020	330-5330	1340	-	410-2060	205	182-500	330-2550	310-350	270	-	100-470	218-240	180-411
C/N	-	10	11 (6)	8,6	-	9,4 (4)	-	13 (4)	10 (7)	8,7	10	-	12	14	12
	-	9,0-11	8,8-17	8,6	-	8,8-9,7	-	10-17	8,0-12	8,5-8,9	10	-	9,2-16	12-16	9,3-17
TS	-	5,6	6,7	-	-	7,8 (4)	-	9,3 (4)	7,6	6,9	8,4	-	7,8	8,7	8,2
%	-	4,3-7,0	4,9-9,4	-	-	7,0-8,9	-	7,6-10	6,6-8,2	6,7-7,0	8,4	-	6,0-11	6,9-10	6,6-8,8

Tabelle 4
 Ortspezifischer Vergleich der aquatischen Makrophyten der Gattungen *Myriophyllum*, *Ranunculus* und *Elodea* und ihrer Elementkonzentrationen als Mittelwerte (MW) und Spannweite der Werte.
Site-specific comparison of the water plants of the genera Myriophyllum, Ranunculus and Elodea and their elemental concentrations.

Makrophytenvergleich	Anzahl der Paare	Elemente + Anreicherungs-faktoren, MW (Min-Max)
<i>Myriophyllum</i> > <i>Ranunculus</i>	6	Cr 3,7 (1,6 – 7,4), Mo 2,3 (1,2-3,8), Pb 3,1 (1,7-5,1), Al 4,1 (1,5-9,1), Ca 1,9 (1,0-4,5), Fe 3,5 (1,6-6,3)
	3	U 1,6 (1,2-2,1)
<i>Ranunculus</i> > <i>Myriophyllum</i>	6	K 1,8 (1,3-2,2)
<i>Myriophyllum</i> > <i>Elodea</i>	6	Pb 1,8 (1,1-3,1)
<i>Elodea</i> > <i>Myriophyllum</i>	6	K 1,9 (1,1-2,5)
<i>Elodea</i> > <i>Ranunculus</i>	10	Ni 2,5 (1,3-4,4), Pb 2,0 (1,1-4,0)
	9	U 1,5 (1,0-2,6)

Die Probenahme aquatischer Makrophyten kann im Vergleich zum Sediment mit geringem Aufwand ohne Verfrachtung von Teilen der Probe mit dem fließenden Wasser erfolgen und dokumentiert im Gegensatz zu Sediment vergleichbar den Belastungszustand des Flusses auch bei kiesigem Gewässergrund. Die wurzelnde Wasserpflanze widerspiegelt die Situation am Ort ihres Vorkommens, während das oberflächennahe Sediment infolge von Verfrachtungsprozessen das Einzugsgebiet reflektiert.

Bei Einhaltung der Standards der EG-Wasserrahmenrichtlinie ist eine abundante Besiedlung von Fließgewässern durch aquatische Makrophyten nachhaltig gewährleistet. Welche Arten an welchen Gewässerabschnitten auftreten, hängt entscheidend von den Hydrochemischen und physikalischen Parametern ab. Je nach Präferenzen werden sich vom Ober- bis zum Unterlauf entsprechend adaptierte Pflanzenarten ansiedeln. Damit sind großräumig die biologischen Voraussetzungen gegeben, dass die vorliegende Studie Nachahmung und Optimierung erfährt.

Conclusions

The aquatic plants in the three sections of the Mulde River document the contamination of the river sediments with heavy metals and arsenic as a result of mining practices. The elemental contents for arsenic, cadmium, chromium, copper, nickel, lead and zinc in the aquatic macrophytes reflect the distribution determined by GREIF (2015) for the entire Mulde River catchment area for water, suspended matter and sediment. The Freiburger Mulde River is characterized by elevated levels of lead, cadmium and silver; the Zwickauer Mulde River is characterized by the presence of uranium and nickel. The Mulde River shows the mixing of the partial flows.

The main elements along the course of the Mulde River show no significant differentiation by location except for sodium. The highest concentration of sodium was detected in *Elodea* (up to 2.1 mg/kg) below lake Muldestausee, possibly due to earlier industrial discharges from the Bitterfeld-Wolfener industrial com-

plex. In the Spittelwasser River, a small river historically used as a receiving water body for industrial wastewater, similarly high concentrations were detected in aquatic macrophytes of the genera *Elodea* (1.3 mg/kg) and *Caltriche* (1.5 mg/kg).

Element-specific differences for enrichment in the aquatic plant biomass were determined for individual plant genera. For example, the enrichment of nickel in plants of the genus *Elodea* is significantly higher than in *Ranunculus* (Tab. 4).

The sampling of aquatic macrophytes requires little effort in comparison to sediment sampling, as it does not require transport of parts of the sample with the flowing water and, contrary to sediments, documents the load state of the river in a comparative manner, even in gravelly waters. The aquatic plant rooting reflects the elemental concentrations specific to its place of occurrence, while the near-surface sediment reflects the catchment area concentrations as a result of transport processes.

In compliance with the standards of the EU Water Framework Directive, an abundant colonization of watercourses by aquatic seed plants is sustainably ensured. The type of aquatic plant species and location of species occurrence depends crucially on the hydrochemical and physical parameters of the water body. Depending on preferences, adapted plant species will colonize from upper to lower reaches. Thus, the biological prerequisites exist on a large scale that the present study imitates and optimizes.

Danksagung

Die Autoren danken für die Unterstützung bei den Geländearbeiten Pauline Clauss und Maria Helm sowie für Probenvorbereitung und Analysen im Labor Grit Weichert und Jonas Köhne vom Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung in Leipzig. Des Weiteren sei für freundliche Unterstützung bei der Bereitstellung von Daten zum Vorkommen aquatischer Makrophyten in der Mulde Dr. Angela Döge, Matthias Greyer (beide BfUL), Antje Mickel, René Wetzig, Frank Richter (alle LfULG) sowie Dr. Uta Kleinknecht (Vorsitzende der AG sächsischer Botaniker) gedankt. Für die Bereitstellung von Fotos untersuchter Makrophyten danken wir Dr. Dirk Schories (Forschungszentrum Jülich) sehr herzlich.

In memoriam Andreas Zehnsdorf † (1965 bis 2019)

Mitten in der Phase der Manuskriptfertigstellung ist unser Freund, Initiator und Mitautor Professor Dr.-Ing. Andreas Zehnsdorf im Alter von 54 Jahren verstorben. Als ausgebildeter Facharbeiter für BMSR-Technik und Ingenieur für Verfahrens- und Umwelttechnik war er seit Gründung 1992 am Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ) in Leipzig tätig. Mit Leidenschaft, Ehrfurcht und Liebe zu Natur und Leben war sein wissenschaftlicher Fokus auf praxisrelevante Untersuchungen im natürlichen Wirkungsspektrum von Pflanze, Boden und Wasser gerichtet. "Geht los" war sein geflügeltes Wort nach Besprechungen und mit ihm ging es los. Seine umweltbiotechnologischen Arbeiten umfassen ein großes Spektrum, das von Forschungen schwermetallbelasteter Sedimente und Böden, zum Wasserpflanzenmanagement in Seen und Flüssen, zu Biogasverfahren und zu Gründachanlagen reichte. Die Weitergabe dieses Wissens an den studentischen Nachwuchs war ihm als Dozent und Professor an der Staatlichen Studienakademie Riesa eine Herzensangelegenheit. Die universelle Vielfalt seines Wirkens wird mit Büchern zu Tanzlinden und zum

Leben des deutschen Missionars Pater Manfred Jünemann OMI¹ in Paraguay deutlich. Andreas Zehnsdorf werden wir als starke Persönlichkeit, als Freigeist und Freund mit klaren Ansichten, offenem Denken, Neugier und Wissensdrang alter Schule sowie einer gesunden Portion Humor und Bodenhaftung in dankbarer Erinnerung behalten.

Anschriften der Verfasser

Dr. habil. Frank W. Junge
Junge Erdwissen
Pönitzer Weg 2
04425 Taucha
junge@junge-erdwissen.de

Sebastian Schröer
Dr.-Ing. Ganbaatar Khurelbaatar
Prof. Dr. Andreas Zehnsdorf †
Department Umwelt- und Biotechnologisches Zentrum,
Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH – UFZ
Permoserstraße 15
04318 Leipzig
sebastian.schroer@ufz.de
ganbaatar.khurelbaatar@ufz.de

Dr. Peter Otto
Universität Leipzig
Institut für Biologie, Herbarium LZ
Johannisallee 21-23
04103 Leipzig
otto@rz.uni-leipzig.de

Dr. Hans-Joachim Stärk
Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH – UFZ
Department Analytik
Permoserstraße 15
04318 Leipzig
ha-jo.staerk@ufz.de

Literaturverzeichnis

- ATRI, F.R. (1983): Schwermetalle und Wasserpflanzen.- Gustav Fischer Verlag, Stuttgart.
- BEUGE, P., GREIF, A., HOPPE, T., KLEMM, W., KLUGE, A., MOSLER, U., STARKE, R., ALFARO, J., HAURAND, M., KNÖCHEL, A. & A. MEYER (1994): Erfassung und Beurteilung der Schadstoffbelastung des Muldesystems.- In: Furrer, R. (Hrsg.): Die Belastung der Elbe. Teil 1: Elbenebenflüsse.- Forschungszentrum Karlsruhe: 27-36.
- BEUGE, P., GREIF, A., HOPPE, T., KLEMM, W., KLUGE, A., MOSLER, U., STARKE, R., ALFARO, J., HAURAND, M., KNÖCHEL, A. & A. MEYER (1999): Die Schwermetallsituation im Muldesystem.- Schlussbericht zu den BMBF-Fördervorhaben 02 WT 9113, 02 WT 9114, TIB Hannover.
- BUTA, E., TÖRÖK, A., CSOG, A., ZONGO, B., CANTOR, M., BUTA, M. & C. MAJDIK (2014): Comparative Studies of the Phytoextraction Capacity of Five Aquatic Plants in Heavy Metal Contaminated Water.- Not Bot Horti Agrobo, 42 (1), 173-179.
- CEGŁOWSKA, A., SOKOŁOWSKA, K., SAMECKA-CYMERMAN, A., KOLON, K., JUSIK, S. & A.J. KEMPERS (2016): Copper and zinc in *Elodea canadensis* from rivers with various pollution levels.- Ecol. Indic. 67, 156-165.

1 OMI: Missionarische Ordensgemeinschaft der römisch-katholischen Kirche = Oblaten der Unbefleckten Jungfrau Maria (lateinisch: Oblati Mariae Immaculatae)

- COSIO, C. (2013): Physiological and proteomic changes suggest an important role of cell walls in the high tolerance to metals of *Elodea nuttallii*.- *J. Hazard. Mater.*, 263, 575-583, doi: 10.1016/j.jhazmat.2013.10.016.
- DHIR, B., SHARMILA, P. & P.P. SARADHI (2009): Potential of Aquatic Macrophytes for Removing Contaminants from the Environment.- *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.*, 39 (9) 754-781, doi: 10.1080/10643380801977776.
- EUROPÄISCHE GEMEINSCHAFT (2000): Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Massnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik.- *Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften vom 22.12.2000, DE L327: 1-72.*
- FGG ELBE (2013): Sedimentmanagementkonzept der FGG Elbe. Vorschläge für eine gute Sedimentmanagementpraxis im Elbegebiet zur Erreichung überregionaler Handlungsziele.- *Flussgebietsgemeinschaft Elbe (Hrsg.)*, Magdeburg: 85 S.
- FRITIOFF, A., KAUTSKY, L. & M. GREGER (2005): Influence of temperature and salinity on heavy metal uptake by submersed plants.- *Environ. Pollut.*, 133, 265-274.
- GREIF, A. (2015): Das Einzugsgebiet der Mulde oberhalb des Muldestausees im Spiegel des erzgebirgischen Bergbaus.- *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 59 (6) 318-331.
- GUILIZZONI, P. (1991): The role of heavy metals and toxic materials in the physiological ecology of submersed macrophytes.- *Aquat. Bot.*, 41, 87-109.
- HARDTKE, H.-J. & A. IHL (2000): Atlas der Farn- und Samenpflanzen Sachsens.- Hrsg.: Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie. Materialien zu Naturschutz und Landschaftspflege, Dresden, 1-806.
- IKSE (2014): Sedimentmanagementkonzept der internationalen Kommission zum Schutz der Elbe. Vorschläge für eine gute Sedimentmanagementpraxis im Elbegebiet zur Erreichung überregionaler Handlungsziele.- *Ad-hoc-Expertengruppe Sedimentmanagement*, 200 Seiten, <https://www.ikse-mkol.org/publikationen/wasserrahmenrichtlinie/1/>, aufgerufen am 15.03.2019.
- JUNGE, F.W. & M. SCHULTZE (2016): Open cast mines as river sediment and pollutant sinks. The example Mulde Reservoir (East Germany).- *Tagungsbeitrag International Mine Water Association (IMWA)*, Leipzig 11.-15.07.2016; In: *Proceedings "Mining Meets Water - Conflicts and Solutions"*, Carsten Drebenstedt, Michael Paul (Eds.), TU Bergakademie Freiberg: 159-166.
- JUNGE, F.W. (2015): Der Bitterfelder Muldestausee als Sediment- und Schadstoffsene.- *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung (HyWa)* Jg. 59, H.6: 354-365. WM Druck+Verlag Rheinbach (ISSN 1439-1783).
- JUNGE, F.W., HANISCH, C., ZERLING, L., CZEGKA, W., ARNOLD, A., JENDRYSCHIK, K., MORGENSTERN, P., TREUTLER, H.-C. & B. SCHARF (2004a): Arbeitspaket 3.6.: Untersuchungen im Bitterfelder Muldestausee zu den Auswirkungen des Hochwassers vom August 2002 auf die Schwermetallgehalte von Schwebstoffen und Sedimenten.- In: *Endbericht BMBF-FKZ PTJ 0330492 "Schadstoffbelastung nach dem Elbe-Hochwasser 2002"*, Geller W., Ockenfeld K., Böhme M. & A. Knöchel (Eds.), UFZ-Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH, Department Fließgewässerökologie Magdeburg: 136-158.
- JUNGE, F.W., JENDRYSCHIK, K., MORGENSTERN, P., TREUTLER, H.-C. & L. ZERLING (2004b): Hochwasserereignisse und ihre Widerspiegelung im rezenten Seesediment eines Flußstausees.- *Eiszeitalter und Gegenwart* 54, Hannover: 124-137.
- JUNGE, F.W. & K. JENDRYSCHIK (2003): Investigations into the distribution of element concentrations in a recent dam and their seasonal and hydrographical correlation (Bitterfelder Muldestausee, Saxony-Anhalt).- *Acta hydrochim. hydrobiol.* 31, 4-5: 378-390.
- KÄHKÖNEN, M.A., PANTSAR-KALLIO, M. & K.G. MANNINEN (1997): Analyzing heavy metal concentrations in the different parts of *Elodea canadensis* and surface sediment with PCA in two boreal lakes in southern Finland.- *Chemosphere*, 35 (1) 2645-2656.
- KESKINKAN, O., GOKSU, M.Z.L., YUCEER, A. & M. BASIBUYUK (2007): Comparison of the Adsorption Capabilities of *Myriophyllum spicatum* and *Ceratophyllum demersum* for Zinc, Copper and Lead.- *Eng. Life Sci.* 7 (2) 192-196. doi: 10.1002/elsc.200620177.
- KLEMM, W., GREIF, A., BROEKAERT, J.A.C., SIEMENS, V., JUNGE, F.W., VAN DER VEEN, A., SCHULTZE, M. & A. DUFFEK (2005): A Study on Arsenic and the Heavy Metals in the Mulde River System.- *Acta hydrochim. hydrobiol.* 33, 5: 475-491.
- LANDESAMT FÜR UMWELT, LANDWIRTSCHAFT UND GEOLOGIE (Hrsg., 2013): Rote Liste und Artenliste Sachsens. Farn- und Samenpflanzen.- Dresden: 1-310.
- LARRAS, F., REGIER, N., PLACHON, S., POTÉ, J., RENAUT, J., LEDL, G., JANAUER, G.A. & O. HORAK (1981): Die Anreicherung von Schwermetallen in Wasserpflanzen aus einigen Österreichischen Fließgewässern.- *Acta hydrochim. hydrobiol.* 9 (6) 651-663.
- MATERAZZI, S., CANEPARI, S. & S. AQUILI (2012): Monitoring heavy metal pollution by aquatic plants.- *Environmental Science and Pollution Research*, 19 (8) 3292-3298. doi: 10.1007/s11356-012-0846-8.
- MALEVA, M.G., NEKRASOVA, G.F., MALEC, P., PRASAD, M.N.V. & K. STRZAŁKA (2009): Ecophysiological tolerance of *Elodea canadensis* to nickel exposure.- *Chemosphere*, 77, 392-398.
- METZING, D., HOFBAUER, N., LUDWIG, G. & G. MATZKE-HAJEK (2018): Rote Liste gefährdeter Tiere, Pflanzen und Pilze Deutschlands. Band 7: Pflanzen. Naturschutz und Biologische Vielfalt, Bonn, 70 (7), 1-784.
- MOELLER, L., BAUER, A., WEDWITSCHKA, H., STINNER, W. & A. ZEHNSDORF (2018): Crop Characteristics of Aquatic Macrophytes for Use as a Substrate in Anaerobic Digestion Plants — A Study from Germany.- *Energies*, 11 (11), art. 3016.
- MOSOARCA, G., VANCEA, C., POPA, S. & S. BORAN (2018): Adsorption, Bioaccumulation and Kinetics Parameters of the Phytoremediation of Cobalt from Wastewater Using *Elodea Canadensis*.- *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, 100, 733-739. doi: 10.1007/s00128-018-2327-3.
- OTTO, P., KELLNER, R., KINDLER, A. & A. ZEHNSDORF (2018): Untersuchungen zur Verbreitung, Ökologie und Morphologie der *Elodea*- und *Myriophyllum*-Arten der Leipziger Region.- *Berichte AG sächs. Botaniker N.F.* 23, 33-69.
- OUTRIDGE, P.M. & B.N. NOLLER (1991): Accumulation of Toxic Trace Elements by Freshwater Vascular Plants.- *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 121, 1-63.
- SCHMEDTJE, U. (2019): Zustand und Belastungen der Gewässer Europas 2018.- *Korrespondenz Wasserwirtschaft* 12 (2) 88-94.
- SCHROEDER, H. (1939): Die Algenflora der Mulde. Ein Beitrag zur Biologie saprober Flüsse.- *Pflanzenforschung* 21, 1-88.
- SCHWARTZ, R., BERGEMANN, M. & I. KELLER (2015): Entwicklung der partikulären Schadstoffbelastung der Elbe.- *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 59, 6, 396-413.
- SIVACI, E.R., SIVACI, A. & M. SOKMEN (2004): Biosorption of cadmium by *Myriophyllum spicatum* L. and *Myriophyllum triphyllum* orchard.- *Chemosphere* 56 (11) 1043-1048. doi: 10.1016/j.chemosphere.2004.05.032.
- THIÉBAUT, G., GROSS, Y., GIERLINSKI, P. & A. BOICHÉ (2010): Accumulation of metals in *Elodea canadensis* and *Elodea nuttallii*: Implications for plant-macroinvertebrate interactions.- *Sci. Total Environ.*, 408, 5499-5505.
- WEIGOLD, F. & M. BABOROWSKI (2009): Consequences of delayed mixing for quality assessment of river water: Example Mulde-Saale-Elbe.- *Journal of Hydrology* 369: 296-304.

- ZEHNSDORF, A., MOELLER, L., STÄRK, H.-J., AUGÉ, H., RÖHL, M. & W. STINNER (2017): The study of the variability of biomass from plants of the *Elodea* genus from a river in Germany over a period of two hydrological years for investigating their suitability for biogas production.- *Energy. Sustain. Soc.*, 7:15, 1-7.
- ZEHNSDORF, A., HUSSNER, A., EISMANN, F., RÖNICKE, H. & A. MELZER (2015): Management options of invasive *Elodea nuttallii* and *Elodea canadensis*.- *Limnologica*, 51, 110-117.

Für Aussagen zur Verbreitung aquatischer Makrophyten in der Mulde wurden öffentlich zugängliche Daten aus den Datenbanken des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (<https://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/natur/8048.htm> und <https://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/infosysteme/ida/pages/map/default/index.xhtml>), der Staatlichen Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft (<https://www.bful.sachsen.de>) und des Datenportals des Gewässerkundlichen Landesdienstes Sachsen-Anhalts (<http://gldweb.dhi-wasy.com/gld-portal/>) genutzt.