

Evelyn Claus, Petra Kasimir, Heinz-Jürgen John, Christel Möhlenkamp, Benjamin Becker, Gudrun Hillebrand und Peter Heininger

Untersuchung von Sedimenten in ausgewählten Staustufen, Nebenflüssen und Seitenstrukturen im Unterlauf der Saale

Investigation of sediments in selected barrages, tributaries and branches of the lower reach of the river Saale

Die Untersuchungen der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) und des Landesbetriebes für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft (LHW) Sachsen-Anhalt bilden einen Beitrag zum Sedimentmanagementkonzept der Internationalen Kommission zum Schutz der Elbe (IKSE 2014) und der Flussgebietsgemeinschaft Elbe (FGG ELBE 2013). Sie beziehen sich zum einen auf den als Bundeswasserstraße ausgewiesenen Abschnitt der Saale zwischen Bad Dürrenberg und der Mündung in die Elbe mit seinen Staustufen. Zum anderen wurden in Landesverwaltung befindliche Nebenflüsse und Seitenstrukturen dieses Abschnitts untersucht. Die Ergebnisse gestatten Schlussfolgerungen im Hinblick auf die Sedimentqualität der Saale, das im betrachteten Abschnitt akkumulierte und potenziell mobilisierbare partikuläre Schadstoffpotenzial und damit auf die Relevanz der Saale für das Sedimentmanagement im Elbegebiet. So erweist sich die Bundeswasserstraße Saale nach Klassifizierung gemäß Sedimentmanagementkonzept der IKSE (2014) als nahezu durchgängig belastetes Gewässer für 29 relevante anorganische und organische Schadstoffe. Der Schlüsselstollen ist die bedeutendste Punktquelle im Saalegebiet. Die mittlere Schwebstoffjahresfracht der Saale in die Elbe (2003–2008) beträgt ca. 128.000 t (Min. 83.000 t, Max. 228.000 t). Das entspricht einem Schwebstoffanteil an der Bilanzmessstelle Schnackenburg (Elbe) von durchschnittlich ca. 20 %. Die Verfrachtung von Schwebstoffen und Sedimenten in die Elbe erfolgt größtenteils (85–90 %) über die Wehre der Saale (Wehrsaale). In den Staustufen der Bundeswasserstraße Saale lagerte im Jahr 2013 dennoch ca. 108.000 m³ feinkörniges, potenziell remobilisierbares Sediment (davon ca. 54.000 m³ in Calbe, Rothenburg und Rischmühle), in den untersuchten Nebengewässern ca. 61.000 m³ und in den Seitenstrukturen ca. 150.000 m³. Im Zeitraum von 1994–2012 wurden der Bundeswasserstraße Saale ca. 194.000 m³ (252.000 t) Feinsedimente durch schiffahrtsbedingte Baggerungen entnommen. Im Jahreszeitraum ab Mai 2012 betrug der Zuwachs an Ablagerungen in den Staustufen ca. 14.400 m³. Die für die Mengenabschätzungen erforderlichen Untersuchungen fanden in ausgewählten, charakteristischen Gewässerabschnitten statt. Die Ergebnisse wurden durch Extrapolation der Daten auf das gesamte Untersuchungsgebiet übertragen. Die Untersuchungen zur Erosionsstabilität fanden ausschließlich in Seitenstrukturen und Nebengewässern und nicht in den Staustufen statt. In die Sedimentmengenbilanz gingen keine Ein- und Austräge aus der Fläche ein.

Schlagwörter: Bundeswasserstraße, Erosion, Menge, Nebenflüsse, Remobilisierung, Saale, Schadstoffe, Sedimente, Sedimentmanagement, Staustufen, Transport

Background studies of the Federal Institute of Hydrology (BfG) and the State Office for flood control and water management (LHW) of Saxony-Anhalt in the navigable part of the Saale between Bad Dürrenberg and the inflow in the Elbe are presented. The results refer both to the barrages of the federal waterway and to the relevant tributaries and side structures in the responsibility of the State Saxony-Anhalt. Conclusions are drawn for the sediment quality in the river Saale and for the potentially mobile amounts of contaminated fine sediments as well as for the impact of these sediments on the overall situation in the whole Elbe basin. Thus, the results substantially contribute to the sediment management concepts of the ICPEP (IKSE 2014) and of the FGG ELBE (2013). According to the classification scheme used in the sediment management concept of the ICPEP (IKSE 2014), the river Saale is an almost continuously contaminated water body in terms of 29 relevant contaminants. The creek Schlüsselstollen is the most important point source in the Saale catchment. The average annual load of suspended particulate matter of the river Saale into the Elbe (2003–2008) amounted to approximately 128,000 t (min. 83,000 t, max. 228,000 t). This corresponds to an averaged suspended matter portion of 20 % at the monitoring station Schnackenburg (Elbe). The main transport of suspended matter and sediments into the Elbe takes place via the weirs (85–90 %). Nevertheless, in 2013 approx. 108,000 m³ of fine grained, potentially mobile sediment (thereof approx. 54,000 m³ in Calbe, Rothenburg and Rischmühle) were deposited in the federal waterway Saale, with approx. 61,000 m³ in the surveyed tributaries and approx. 150,000 m³ in the branches. Between 1994 and 2012, approx. 194,000 m³ (252,000 t) of fine sediment were removed by dredging. The growth of deposits in the barrages amounted to approx. 14,400 m³ in a one-year period from May 2012 to April 2013. The studies for estimating the sediment quality and the amount of potentially mobile fine sediments took place in selected, characteristic water stretches. Results for the overall potential load were obtained by extrapolation of these data to the whole study area. Studies for erosion stability were conducted in branches and tributaries, not in the barrages. Entries and output of sediments from the river banks and surrounding areas were not included in the balance sum of sediment amounts/volumes.

Keywords: Branches, contaminants, erosion, federal waterway, remobilization, Saale river, sediments, sediment management, transport, tributaries

1 Einleitung

Ablagerungen belasteter Altsedimente in Nebengewässern, natürlichen und künstlichen Seitenstrukturen sowie technischen Bauwerken wie Staustufen bilden eine der Hauptquellen für

solche Schadstoffe im gesamten Elbegebiet, deren Vorkommen heute im Wesentlichen auf frühere industrielle und bergbauliche Aktivitäten zurückgeführt wird (BABOROWSKI & HEININGER 2013, FGG ELBE 2009, HEISE et al. 2005).

Drei Faktoren sind ausschlaggebend für das Ausmaß des Risikos derartiger Sedimentdepots für unterliegende, im Extremfall bis in die Nordsee reichende Gewässerabschnitte:

1. die Höhe der Schadstoffbelastung ausgedrückt als Schadstoffkonzentration,
2. das Frachtpotenzial als Gesamtmenge des schadstoffbelasteten Feinsediments und
3. die Mobilisierbarkeit als Funktion von Sedimenttextur und hydraulischer Exposition.

Die Saale spielt als großer Nebenfluss mit langer Industrie- und Bergbaugeschichte eine besondere Rolle für die Schadstoffsituation in der gesamten Elbe. Eine Erhebung zum Bestand an Altsedimenten und die Abschätzung des darin fixierten Schadstoffpotenzials in den Nebengewässern, Seitenstrukturen und Staustufen der Saale stellt deshalb eine wesentliche Grundlage für die Ableitung von Handlungsempfehlungen aus überregionaler Sicht dar. In den Sedimentmanagementkonzepten der IKSE (2014) und der FGG ELBE (2013) werden diese Zusammenhänge im Detail dargelegt. Sie basieren auf Studien, deren Ergebnisse hier vorgestellt werden.

Ursachen, Ausmaß und Trends der Schadstoffbelastung der Saalesedimente waren auf der Grundlage sowohl langjähriger Monitoringprogramme als auch anlassbezogener Studien Gegenstand von Veröffentlichungen (BUCHINGER et al. 2013, FRANKE et al. 1995, GUHR et al. 2003, HANISCH et al. 2005, HEININGER et al. 1998, HEININGER et al. 2003). Eine umfassende Beschreibung und Literaturlauswertung ist nicht Gegenstand dieses Beitrages. Zentrale Aspekte der qualitativen Sediment- und Schwebstoffbelastung im Einzugsgebiet der Saale und deren Nebenflüssen wurden in CLAUS et al. (2014) zusammenfassend betrachtet. Grundsätzlich gilt, dass ein Rückgang der Schadstoffbelastung nach 1990 deutlich erkennbar ist, aber sowohl Umweltqualitätsnormen als auch einschlägige Richtwerte auch im Untersuchungszeitraum 2010–2013 nur selten erreicht werden.

2 Untersuchungsprogramm

2.1 Untersuchungsgebiet

Die Saale gehört zu den wasser- und schwebstoffreichsten Zuflüssen im Elbeeinzugsgebiet. Ihr langjähriger, mittlerer Abfluss beträgt 115 m³/s (1931–2012). Das Einzugsgebiet weist eine Größe von ca. 24.000 km² auf. Von km 124,16 bei Bad Dürrenberg bis zur Mündung in die Elbe bei Barby (bei Elbe-km 290,78) ist die insgesamt 413 Kilometer lange Saale eine Bundeswasserstraße und wird durch das Wasser- und Schifffahrtsamt Magdeburg unterhalten. Die Bundeswasserstraße ist geprägt durch zwölf Staustufen (Abb. 1), der Saaleoberlauf durch den Betrieb von Talsperren. Die Saale mit ihren Nebengewässern entwässert ein intensiv landwirtschaftlich genutztes und urban geprägtes Gebiet. Schadstoffbelastete Direkteinleitungen im Einzugsgebiet der Saale erfolgten vor 1990 vorrangig durch die chemische sowie die Papier- und Zellstoffindustrie, die Textil- und Lederindustrie und durch kommunales Abwasser der größeren Anrainerstädte. Diese zurückliegenden Direkteinleitungen stellten eine wesentliche Schadstoffquelle für belastete Altsedimente in den Gewässern selbst und in den Seitenstrukturen dar.

Der durch Staustufen geregelte Unterlauf wird schiffahrtstechnisch bewirtschaftet. Im Rahmen der schiffahrtlichen Unterhaltung werden Sedimente in Abhängigkeit ihrer stofflichen Belastung aus dem Gewässer entfernt oder dort umgelagert.



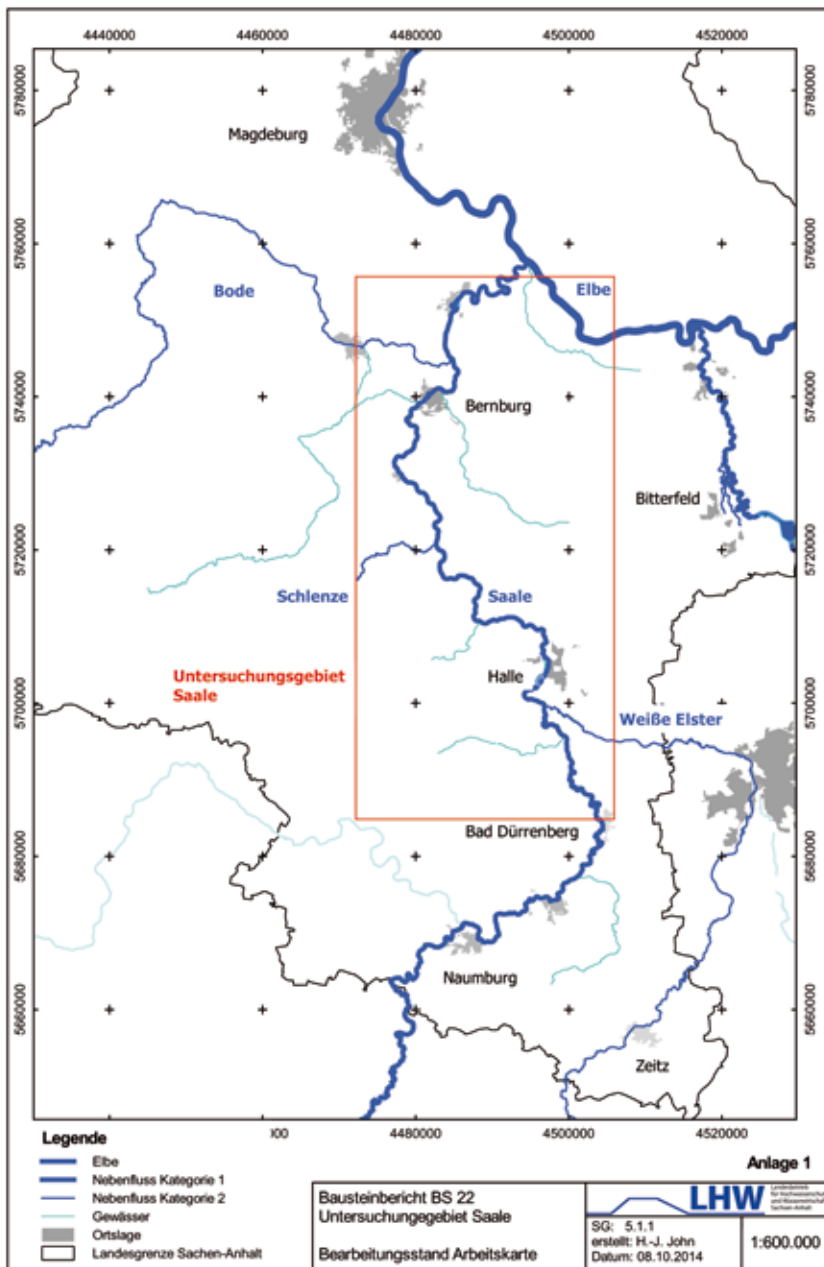
Abbildung 1

Die Staustufen in der Bundeswasserstraße Saale (Quelle: WSD Ost)
Barrages in the German federal waterway Saale (Source: Federal Waterways and Shipping Directorate East)

Die Saale trägt – bezogen auf die Schwebstoffmessstelle Hitzacker – mit Anteilen von ca. 20 % wesentlich zum Feststofftransport der Elbe bei. Diese Abschätzung wurde auf der Grundlage der Datenreihe der Jahre 1992–2011 getroffen. Die Daten für die Messstellen Calbe (Saale-km 20,0) und Hitzacker (Elbe-km 522,6) stammen aus dem WSV-Schwebstoffdauermessnetz.

Neben den drei Staustufen Calbe, Rothenburg und Rischmühle wurden im Bereich der Bundeswasserstraße Saale zahlreiche Seitenstrukturen und die als relevant eingestuft Nebenengewässer Weiße Elster, Bode und Schlenze (IKSE 2014) untersucht (Abb. 2). Mit der gewählten Abgrenzung des Betrachtungsraumes für die Seitenstrukturen auf den Unterlauf der Saale bis Bad Dürrenberg wird sichergestellt, dass der schadstoffrelevante Einfluss der industriellen Schwerpunktbereiche am Gewässer erfasst wird.

Im Bereich der schiffbaren Saale existieren zahlreiche Seitenstrukturen in Form von Altarmen und Mühlgräben. In Abhängigkeit des Grades der hydraulischen Anbindung sind diese Strukturen durch geringere Fließgeschwindigkeiten und verminderte Durchflüsse charakterisiert, so dass die physikalischen Voraussetzungen für eine Sedimentation von Schwebstoffen und feinkörnigen Sedimenten gegeben sind.

**Abbildung 2**

Übersichtskarte des Untersuchungsgebietes (Quelle: LHW Sachsen-Anhalt)

Map of the investigation area (Source: State office for flood control and water management (LHW) of Saxony-Anhalt)

Die Bode und die Schlenze befinden sich vollständig im Zuständigkeitsbereich des Landes Sachsen-Anhalt. Für das Nebengewässer Weiße Elster ist die Zuständigkeit Sachsen-Anhalts (ST) auf eine Teilfläche im Raum Zeitz und auf den verlängerten Mündungsbereich in die Saale beschränkt. Für die Gewässerabschnitte der Weißen Elster, die sich im Zuständigkeitsbereich der Länder Sachsen (SN) bzw. Thüringen (TH) befinden, erfolgten Abschätzungen im Rahmen dieser Studie auf der Grundlage von Bestandsdaten.

Die **Weiße Elster** entspringt im tschechischen Elstergebirge. Sie ist 257 km lang, davon 245,4 km in Deutschland, und hat ein Einzugsgebiet von 5.154 km². Der mittlere Abfluss MQ beträgt 25,5 m³/s (1973–2010). Die Weiße Elster mündet bei Halle in die Saale.

Ehemalige Bergbaubereiche (u.a. Wismut-Standorte) in Thüringen, die langjährigen Standorte der chemischen Industrie im Großraum Böhlen und der industrielle Ballungsraum Leipzig werden über die Weiße Elster entwässert und sind als historische Schadstoffquellen für das Gewässer außerhalb von Sachsen-Anhalt zu berücksichtigen. Ein zurückliegender relevanter Schadstofftransfer in die Weiße Elster im Zuständigkeitsbereich von Sachsen-Anhalt ist nur im Bereich Zeitz vorrangig durch die ehemals ansässige Mineralölindustrie anzunehmen.

Die **Bode** ist ein linker Nebenfluss der Saale. Sie entspringt im Brockengebiet des Hochharzes und entwässert dieses in nordöstlicher Richtung, bis sie nach 169 km bei Nienburg in die Saale bei km 27,6 einmündet. Das Einzugsgebiet der Bode umfasst insgesamt 3.229 km². Die Betrachtung des Nebengewässers Bode im Rahmen der Bestandsanalyse an belasteten Altsedimenten ist auf den Unterlauf beschränkt. Schadstoffbelastungen sind im Wesentlichen an ehemalige Industriestandorte im Bereich Thale und Staßfurt geknüpft.

Im Gegensatz zu den Nebengewässern Bode und Weiße Elster ist die 15 km lange **Schlenze** eher ein Bach mit einem Fließquerschnitt zwischen 0,5 und 5 m. Sie entspringt südlich von Polleben und mündet bei Friedeburg im Mansfelder Land in die Saale. Eine charakteristische Einleitung dieser bergbauprägen Region stellt der Schlüsselstollen oberhalb von Friedeburg dar. Über den Schlüsselstollen wird das geflutete Mansfelder Kupferschieferrevier zu großen Teilen zentral entwässert.

2.2 Untersuchungsumfang

Schadstoffbelastete Sedimentablagerungen stellen in der Saale selbst und in relevanten Nebengewässern und Seitenstrukturen eine latente Schadstoffquelle dar. Zur Charakterisierung und Bewertung dieser Schadstoffquelle war es notwendig, eine Analyse bzgl. der Altsedimente mit Aussagen zur geographischen Lage schadstoffbelasteter Sedimente in den Gewässern, zu den Sedimentvolumina (ortskonkret), zur Höhe der Schadstoffbelastung und zur Remobilisierbarkeit sowie zu den daraus resultierenden Schadstofffrachten vorzunehmen.

Grundlage hierfür sind zum einen die Ergebnisse einer vom LHW beauftragten und im Jahr 2012 abgeschlossenen Bestandsanalyse belasteter Altsedimente in Gewässern von Sachsen-Anhalt (G.E.O.S. 2012) und zum anderen ein Projekt zur Ermittlung des Remobilisierungspotenzials belasteter Altsedimente (IWS 2013) sowie die Untersuchungen der BfG für das Hauptgewässer Saale in den Jahren 2010 bis 2013 (CLAUS et al. 2014). Für Details zum Untersuchungsumfang wird auf diese Studien verwiesen. Methodische Erläuterungen erfolgen zur besseren Verständlichkeit der Ergebnisse im Zusammenhang mit deren Darstellung in den folgenden Abschnitten.

3 Abschätzung des partikulären Schadstoffpotenzials

3.1 Relevante Schadstoffe

Die Oberflächensedimente für die chemischen Untersuchungen in den Staustufen wurden mit van Veen-Greifern entnommen, wobei in der Regel eine Sedimentschicht von ca. 0–20 cm erfasst wurde. In einigen Fällen wurden teufenabhängige Schichtungen untersucht. Diese Proben wurden in den Staustufen mit durchsichtigen Plexiglasstechrohren entnommen, die gleichzeitig eine Betrachtung der Schichtung zuließen. In den Seitenstrukturen kamen Pistonsampler zum Einsatz (Abb. 3).

Für die Bewertung der Qualität der Sedimente wurde die dreistufige Klassifizierung gemäß Sedimentmanagementkonzept der IKSE (IKSE 2014) verwendet (Tab. 1).

Von den im Elbeinzugsgebiet als relevant eingestuft 29 Schadstoffen/Schadstoffgruppen überschreiten 24 den oberen Schwellenwert in mindestens einem, in der Regel jedoch in



Abbildung 3

Sedimentbeprobung mit Pistonsampler (links) und Plexiglasstechrohr (rechts)

Sampling of sediments with piston sampler (left) and plexiglass core (right)

Tabelle 1

Klassifizierung gemäß Sedimentmanagementkonzept der IKSE (IKSE 2014)
Classification scheme according to the ICPER sediment management concept

Nr.	Stoff	Maßeinheit	1	2	3
			Unterer Schwellenwert		Oberer Schwellenwert
1	Hg	mg/kg	<0,15	0,15 – 0,47	>0,47
2	Cd	mg/kg	<0,22	0,22 – 2,3	>2,3
3	Pb	mg/kg	<25	25 – 53	>53
4	Zn	mg/kg	<(60)- 200	(60)-200 – 800	>800
5	Cu	mg/kg	<14	14 – 160	>160
6	Ni	mg/kg	<(3)		>(3)
7	As	mg/kg	<7,9	7,9 – 40	>40
8	Cr	mg/kg	<26	26 – 640	>640
9	α-HCH	µg/kg	<0,5	0,5 – 1,5	>1,5
10	β-HCH	µg/kg	<5		>5
11	γ-HCH	µg/kg	<0,5	0,5 – 1,5	>1,5
12	p,p'-DDT	µg/kg	<1	1 – 3	>3
13	p,p'-DDE	µg/kg	<0,31	0,31 – 6,8	>6,8
14	p,p'-DDD	µg/kg	<0,06	0,06 – 3,2	>3,2
15	PCB 28	µg/kg	<0,04	0,04 – 20	>20
16	PCB 52	µg/kg	<0,1	0,1 – 20	>20
17	PCB 101	µg/kg	<0,54	0,54 – 20	>20
18	PCB 118	µg/kg	<0,43	0,43 – 20	>20
19	PCB 138	µg/kg	<1	1 – 20	>20
20	PCB 153	µg/kg	<1,5	1,5 – 20	>20
21	PCB 180	µg/kg	<0,44	0,44 – 20	>20
22	Pentachlorbenzol	µg/kg	<1	1 – 400	>400
23	HCB	µg/kg	<0,0004	0,0004 – 17	>17
24	Benzo[a]pyren	mg/kg	<0,01	0,01 – 0,6	>0,6
25	Anthracen	mg/kg	<0,03	0,03 – 0,31	>0,31
26	Fluoranthen	mg/kg	<0,18		>0,18
27	Σ PAK 5*	mg/kg	<0,6	0,6 – 2,5	>2,5
28	TBT	µg/kg	<0,02		>0,02
29	Dioxine und Furane	ng TEQ/kg	<4	4 – 20	>20

*Benzo[a]pyren, Benzo[b]fluoranthen, Benzo[k]fluoranthen, Benzo[ghi]perylene, Indeno[123cd]pyren

mehreren oder sogar in allen betrachteten Gewässerabschnitten. Eine Ausnahme bilden lediglich die PCB-Kongenere 28, 138, 153, 180 und das Pentachlorbenzol. Eine gewässerspezifische Auflistung der relevanten Schadstoffe für das betrachtete Untersuchungsgebiet ist Tabelle 2 zu entnehmen.

3.2 Sedimentmengen

3.2.1 Staustufen der Saale

Die Grundlage aller Untersuchungen in den Staustufen der Bundeswasserstraße Saale bildete ein gemeinsames Konzept von BfG und WSA Magdeburg.

Die Staustufen, insbesondere ihre Vorhäfen, sind strömungsberuhigte Sedimentationsräume für feinkörnige Sedimente. Das Flussbett der frei fließenden Saale hingegen ist durch kieshaltige Sedimente gekennzeichnet.

Aus den regelmäßigen Peilungen der WSV (Flächen- und Tiefenpeilungen per Echolot) konnten zunächst Anhaltspunkte über Sedimentationsschwerpunkte ermittelt werden. Im Jahr 2011

fanden zusätzlich Querprofilpeilungen des WSA Magdeburg mit dem Boot „Profil“ (Echolot) in den Vorhäfen der Saale und den Wehrsaalen statt. Ermittelt wurden die Gesamtmengen an Ablagerungen bis zur Sollsohle. Diese Peilungen gingen über die Fahrrinne hinaus und zeigten auch Sedimentationsräume in den Randgebieten der Staustufen. Die Daten der Profilpeilungen dienten letztendlich zur Validierung der durch die BfG erhobenen Daten.

Detaillierte Untersuchungen der BfG zur Erfassung der Sedimentmächtigkeiten mit Hilfe von Peilstangen und zur Identifizierung von Sedimentschichten (Plexiglasstechrohr) an ausgewählten Messpunkten erfolgten im Mai/Juli 2012 sowie im April und im September 2013. Dazu wurden die Staustufen Rischmühle (km 115,2), Rothenburg (km 58,7) und Calbe (km 20,0) beispielhaft unter den zwölf Staustufen der Bundeswasserstraße Saale ausgewählt. Diese Staustufen unterscheiden sich in ihrer Größe und geographischen Lage im Flussverlauf und sollen damit die Gesamtsituation an der Bundeswasserstraße Saale so repräsentativ wie möglich wiedergeben.

Tabelle 2

Relevante Stoffe in Altsedimenten im Einzugsgebiet der Saale (Auswahlkriterium: Schadstoffgehalt im Sediment > oberer Schwellenwert gemäß IKSE 2014)

Relevant pollutants in old sediments of the river Saale catchment (Criterion: sediment concentration > upper threshold value according to IKSE 2014)

Nr.	Stoff	Saale	Weißer Elster	Bode	Schlenze
1	Quecksilber	X	X	X	
2	Cadmium	X	X	X	X
3	Blei	X	X	X	X
4	Zink	X	X		X
5	Kupfer	X	X	X	X
6	Nickel	X	X	X	X
7	Arsen	X	X		
8	Chrom		X		
9	α-HCH	X			
10	β-HCH	X			
11	γ-HCH	X			
12	p,p'-DDT	X		X	X
13	p,p'-DDE	X		X	X
14	p,p'-DDD	X		X	X
15	PCB 28				
16	PCB 52	X		X	
17	PCB 101	X		X	
18	PCB 118			X	
19	PCB 138				
20	PCB 153				
21	PCB 180				
22	Pentachlorbenzol				
23	Hexachlorbenzol	X	X	X	
24	Benzo[a]pyren	X	X	X	
25	Anthracen	X		X	
26	Fluoranthen	X	X	X	X
27	Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe (Σ 5 PAK)*	X	X	X	
28	Tributylzinnhydrid (TBT)	X	X		X
29	Dioxine und Furane	X	X	X	

*Benzo[a]pyren, Benzo[b]fluoranthen, Benzo[k]fluoranthen, Benzo[ghi]perylen, Indeno[123cd]pyren

Zwischen den Probenahmen von April und September 2013 ist im Juni 2013 ein extremes Hochwasserereignis eingetreten.

In den Ober- und Unterhäfen, Schleusenammern und Wehrsaa-len der Staustufen Calbe, Rothenburg (Abb. 4) und Rischmühle wurden an 50, 22 bzw. 21 Messpunkten diese Untersuchungen durchgeführt.

Exemplarisch wird hier das Ergebnis für die Staustufe Rothenburg vorgestellt. Die Tiefenpeilungen mit Hilfe von Peilstangen zur Ermittlung der Sedimentmächtigkeiten fanden im Mai/Juli 2012 sowie im April/September 2013 an jeweils 22 Messpunkten statt (Abb. 5) statt. Die Methode war sehr gut bis zu einer Sedimenttiefe von ca. zwei Metern bei einer durchschnittlichen Wassertiefe von ein bis zwei Metern einsetzbar. In den Ober- bzw. Unterhäfen der Schleuse Rothenburg lagern demnach in den Jahren 2012 und 2013 Feinsedimente in einer Schichtdicke zwischen 40 und 150 cm, durchschnittlich sind es 60 bis 70 cm. Die Auflage an frisch abgelagerten Sedimenten beträgt ca. 15 bis 100 cm, durchschnittlich 40 cm. Die Schleusenammern sowie die Wehr- und Stromsaale enthalten lediglich sehr geringe Mengen an feinkörnigen Sedimenten.

Aus der flächenmäßigen Größe der Staustufen (aus Orthofotos abgeschätzte Wasserflächen) und der Kenntnis der Sedimentmengen aus den modellhaften Peilungsuntersuchungen in den Staustufen Calbe, Rothenburg und Rischmühle konnten Sedimentvolumina berechnet werden. Dazu wurden die Daten zum Ablagerungsverhalten dieser drei Staustufen zunächst im Vergleich mit den Ergebnissen der Profilpeilungen der WSV validiert. Berechnet wurden sowohl per Hand als auch unter Verwendung einer GIS-Methode die Volumina der Gesamtsedimentmengen und deren frisch abgelagerter Anteil (Frachtpotenzial). Eine Extrapolation der Daten auf alle anderen Staustufen der Saale fand im Anschluss ausschließlich für die frisch abgelagerten, potenziell remobilisierbaren Sedimente statt.

Zum Untersuchungszeitpunkt 2012 lagerte in den Ober- und Unterhäfen der Schleusen der zwölf Staustufen der Bundeswasserstraße schätzungsweise 96.000 m³ (91.000 m³ ohne Schleusenammern) frisches Sediment, 2013 sind es 108.000 m³ (103.000 m³) gewesen. Das entspricht einer Zunahme von 12.000 m³ zwischen den beiden Untersuchungskampagnen (innerhalb von 10 Monaten), auf ein Jahr gerechnet entsprechend ca. 14.400 m³ oder 18.700 t unter Annahme einer durchschnittlichen Feuchtdichte der Sedimentablagerung von 1,3 g/cm³.

3.2.2 Nebengewässer und Seitenstrukturen der Saale

Die Abschätzung der Mengen an Altsedimenten und die Bestimmung des darin enthaltenen Schadstoffpotenzials erfolgte in fünf Bearbeitungsschritten. Neben Recherchen, Befragungen und Gewässerbegehungen zur Erfassung von relevanten Ablagerungen von Feinsediment und deren Mächtigkeiten (G.E.O.S. 2012) erfolgten, wie in den genannten Staustufen (Kap. 3.2.1), Peilstangensondierungen an ausgewählten Sedimentablagerungen zur Abschätzung der ausgebildeten Gesamtsedimentvolumina. Danach folgten eine standortkonkrete Unterteilung der abgeschätzten Gesamtvolumina in teufenorientierte Sedimentvolumen und Sedimenttrockenmassen sowie eine ebenfalls standortkonkrete Abschätzung des teufenorientierten Schadstoffpotenzials. Auf dieser Grundlage wurden durch den LHW als relevante Sedimentablagerungen in variierenden Größen-



Abbildung 4
Schleuse Rothenburg
The lock of Rothenburg

ausbildungen (a) acht Ablagerungen in der Bode, (b) zwei in der Schlenze, (c) drei in der Weißen Elster und (d) zwölf in den Seitenstrukturen der Saale identifiziert. Es wurde ein Gesamtvolumen von ca. 61.000 m³ (inkl. Anteile Weiße Elster von Thüringen) für die Nebengewässer bzw. ca. 150.000 m³ in den Seitenstrukturen ermittelt.

3.3 Schadstoffquellen

3.3.1 Altsedimentdepots

Im Kontext des Sedimentmanagementkonzepts (FGG ELBE 2013, IKSE 2014) werden elbweit Altsedimentdepots als potenziell relevante Schadstoffquellen im Gewässer angesprochen. Zu deren Einstufung im Vergleich mit anderen Quellen als Voraussetzung für eine flussgebietsbezogene Priorisierung wurde auch das Frachtpotenzial an belasteten Sedimenten in der Saale abgeschätzt. Insbesondere wurde zur Wichtung und Quantifizierung der betrachteten Gewässereinheiten (Hauptgewässer, Nebengewässer, Seitenstrukturen) das Potenzial an belasteten Sedimenten in Form von schadstoffspezifischen Schwermetall- und Arsenfrachten abgeschätzt und den Gewässereinheiten zugeordnet. Zur groben Abschätzung des unter Hochwasserereignissen erosionsgefährdeten Sedimentanteils wird unter Anwendung des Vorsorgeprinzips zunächst davon ausgegangen, dass max. 75 % des Sedimentbestandes erodieren (vgl. Kap. 3.4). Die Spalten „ges. und erosionsgefährdet“ für das Einzugsgebiet Saale werden als Summe der aufgeführten Teilmengen gebildet. Da für die Weiße Elster Thüringen (TH) und Sachsen (SN) keine Abschätzungen für „erosionsgefährdet“ (Tab. 3) vorliegen, ergeben sich variierende prozentuale Anteile.

Die Ergebnisse sind in Tabelle 3 zusammengefasst und der Schadstofffracht des Referenzjahres 2005 an der Messstelle Rothenburg gegenübergestellt.

Zusammenfassend lassen sich diese Altsedimentdepots als Schadstoffquellen wie folgt charakterisieren:

Das elberelevante Schadstoffspektrum ist in den untersuchten Sedimenten der Saale und der Seitenstrukturen nahezu vollständig abgebildet. Die in den Nebengewässern ermittelten Sedimentvolumina und die darin akkumulierten Schadstoffpo-

**Abbildung 5**

Messpunkte in der Staustufe Rothenburg (Quelle der Hintergrundkarte: Bundesamt für Kartographie und Geodäsie)

Sampling points of the Rothenburg barrage (Source of the background map: Federal Agency for Cartography and Geodesy)

tenziale sind in Summe geringer als der in den Seitenstrukturen nachgewiesene Bestand. Belastungsschwerpunkte der Seitenstrukturen bilden aufgrund der abgeschätzten großvolumigen Sedimentablagerungen der Altarm Calbe/Tippelskirchen und die Mühlgräben Wettin, Halle (Peißnitz) und Holleben. Eine hydraulisch bedingte Verlagerung von Sedimenten ist im Hochwasserfall nicht auszuschließen.

In den betrachteten schiffbaren Bereichen der Saale ist ausschließlich in den zwölf Ober- und Unterhäfen der Staustufen von relevanten Sedimentablagerungen auszugehen. Das hierfür aktuell abgeschätzte gesamte Sedimentvolumen beträgt ca. 108.000 m³. Abgeschätzte Schadstofffrachtpotenziale liegen nur für die Staustufen Rischmühle, Rothenburg und Calbe vor. Die Summen der Schadstofffrachten aus diesen drei Staustufen übersteigen in der Regel die entsprechenden Summen der Schadstofffrachten in den Nebengewässern und sind vergleichbar mit den Schadstofffrachten in den Seitenstrukturen. Der mobilisierbare Anteil konnte auf der gegebenen Datenbasis für die Sedimentablagerungen in den Staustufen nicht belastbar abgeschätzt werden. In Bewertung der Ergebnisse der Remobilisierungsuntersuchungen in den Nebengewässern und den Seitenstrukturen sollte jedoch auch für die Staustufen von Sedimentmobilisierungen im Hochwasserfall ausgegangen werden.

Die im Saaleunterlauf konzentrierten Staustufen wirken als Fallen für den Teil der Sedimente, der nicht über die Wehre transportiert wird. Insbesondere die Ober- und Unterhäfen der Schleusen sind durch eine kontinuierliche Sedimentzunahme bzw. Umlagerung der Sedimente zwischen den Schleusen gekennzeichnet. Die jährliche Volumenzunahme wurde in Summe für die zwölf Staustufen auf ca. 14.400 m³ bzw. 18.700 t abgeschätzt (vgl. Kap.

3.2.1). Dies entspricht ca. 15 % einer langjährig ermittelten, durchschnittlich aus der Saale in die Elbe eingetragenen Schwebstofffracht. In Abhängigkeit der Beräumungszyklen der Staustufen und beim Auftreten von Hochwasserereignissen findet lokal und temporär eine diskontinuierliche Minderung dieser Schadstoffpotenziale statt. Aus den Jahren 1994–2012 sind die Baggergutmengen bekannt. Insgesamt wurden in dem genannten Zeitraum ca. 194.000 m³ (252.000 t) Schlamm entnommen (WEISE 2011). Dies entspricht einem Sedimenteintrag von durchschnittlich ca. 11.000 m³/a. Die aus den Untersuchungen der BfG abgeschätzte Menge von 14.400 m³ für den Jahreszeitraum 2012/2013 erscheint daher plausibel, zumal Schwankungen durch unterschiedliche hydrologische Bedingungen in den einzelnen Jahren sehr wahrscheinlich sind (CLAUS et al. 2014). Unter normalen

Abflussbedingungen werden sich in exponierten Gewässerabschnitten der Sedimentbestand und damit auch das Schadstoffpotenzial erhöhen. Altsedimente/Sedimentablagerungen stellen daher keine permanent wirkende Schadstoffquelle dar. Es ist von einem Wechsel zwischen Zeiträumen mit Sedimentablagerung (Senkenfunktion) und kurzzeitigen Sedimentmobilisierung (Quellenfunktion) auszugehen.

3.3.2 Schwermetalleinträge aus Punktquellen

Im Rahmen des Sedimentmanagements sind auch Schadstoffeinträge aus Punktquellen zu berücksichtigen. Derartige Einträge erfolgen in Abhängigkeit der Schadstoffeigenschaften entweder partikelgebunden oder in gelöster Form. Die partikulär eingetragenen Schadstoffe können in Stillwasserzonen sedimentieren und vorhandene Sedimente überlagern. Die in gelöster Form in das Gewässer eingetragenen Schadstoffe unterliegen Wechselwirkungen mit den Schwebstoffen und vorhandenen Sedimentablagerungen im Gewässer und können sich je nach Stoff im Sediment anreichern. Die höchsten punktuellen Frachteinträge aller Schwermetalle in die Elbe stammen aus der Saale. Unter den Punktquellen tragen kommunale und industrielle Abwasserleitungen nur in geringem Maße zur Gesamtbelastung der Gewässer mit Schwermetallen und Arsen bei.

Der Schlüsselstollen ist die bedeutendste Punktquelle im Saaleinzugsgebiet. Über den Schlüsselstollen wird das geflutete Mansfelder Kupferschieferrevier zu großen Teilen zentral entwässert, so werden etwa 75 % des Grundwassers im ehemaligen Kupferschieferrevier abgeleitet. Daraus resultiert ein Abfluss zwischen 20 m³/min und 26 m³/min. Niederschlagsbedingt können kurzzeitig Abflüsse bis 50 m³/min auftreten. Der Schlüsselstollen ist über die Schlenze an die Saale angebunden und wirkt so

als punktförmiger Eintrag für gelöste Schwermetalle aus dem Altbergbau (BABOROWSKI & v. TÜMPLING 2012). Die mittleren Metallfrachten des Schlüsselstollens wurden aus langjährigen Messungen des Gesamtgehaltes arithmetisch bestimmt und zusätzlich gemäß den methodischen Vorgaben im Rahmen des Sedimentmanagementkonzepts Elbe (FGG ELBE 2013) auf Basis der Gesamtgehalte berechnet. Danach werden in besonders abflussreichen Jahren wie z.B. 2010 und 2011 Metallfrachten von bis zu 160 t/a (davon ca. 150 t/a Zink, 3 t/a Blei, 2,5 t/a Kupfer; alle übrigen Metalle zusammen ca. 2 t/a) und Salzfrachten von bis zu 600.000 t/a über die Schlenze in die Saale emittiert (PLEJADES 2013a). Der Schadstoffaustrag erfolgt überwiegend gelöst und nur in geringem Umfang partikulär.

Maßnahmen zur Reduzierung des Schadstoffaustrages aus dem Schlüsselstollen wurden umfänglich entwickelt, bewertet und in Form eines Variantenvergleiches geprüft. Im Ergebnis der Prüfung wurde festgestellt, dass es derzeit keine verhältnismäßigen Maßnahmen zur Reduzierung des Schadstoffaustrages aus dem Schlüsselstollen über die Schlenze in die Saale gibt. Zusammenfassend ergeben sich für die Auswirkung von Punktquellen im Saalegebiet folgende Aussagen: Punktquellen sind als permanente Schadstoffquellen einzustufen. Die wichtigste Punktquelle im Saaleinzugsgebiet ist der Schlüsselstollen. Kommunale und industrielle Abwassereinleitungen spielen vor die-

sem Hintergrund für die untersuchten Stoffe/Stoffklassen eine untergeordnete Rolle. Verhältnismäßige Maßnahmen für den Schlüsselstollen, die das Erreichen eines guten Zustandes gemäß EG-Wasserrahmenrichtlinie in Schlenze und Saale ermöglichen, sind nach umfangreicher und systematischer Prüfung aus gegenwärtiger Sicht nicht ableitbar (PLEJADES 2013b). Auch zukünftig ist deshalb von einem vergleichbaren Schadstofftransfer aus den Punktquellen über die Saale in die Elbe auszugehen. Dies ist auch im Hinblick auf die mögliche Ableitung weniger strenger Umweltziele gemäß Wasserrahmenrichtlinie – frühestens jedoch am Ende des dritten Bewirtschaftungszyklus – von Bedeutung.

3.3.3 Altlasten am Gewässer

Neben den Altsedimenten und den Punktquellen werden im Kontext des Sedimentmanagementkonzepts Elbe (FGG ELBE 2013, IKSE 2014) Altlasten am Gewässer, d.h. im Überflutungsbereich der Elbe und ihrer relevanten Nebenflüsse befindliche oder direkt an die Gewässer angebundene Altstandorte und Altablagerungen, als potenzielle Quellen für die Schadstoffbelastung von Sedimenten angesprochen. Aufgrund ihrer historischen Nutzung stellten und stellen diese Standorte eine mögliche Quelle für elbe- und sedimentrelevante Schadstoffe dar. Für die elbweit erhobenen Standorte erfolgte im Rahmen der Erarbeitung des Sedimentmanagementkonzeptes der FGG/IKSE eine systematische Überprüfung auf einheitlicher methodischer

Tabelle 3

Gewässerspezifische Schadstoffpotenziale von Schwermetallen in Altsedimenten – Qualifizierte Schätzung der Absolutmengen
Water specific potential loads of contaminated sediments (heavy metals) – qualified estimate of absolute quantities

		Jahresfracht 2005 Mess- stelle Rosen- burg	Einzugsgebiet Saale		Saale (schiffbar) 3 von 12 Staustufen		Saale (Seitenstrukturen)	
			ges.	erosions- gefährdet	ges.	erosionsge- fährdet	ges.	erosions- gefährdet
Sedimentvolumen	m ³		264900	141000	54400		149000	112000
Schadstoffpotenziale								
Quecksilber	kg	245	1910	1160	367		1510	1130
Cadmium	kg	244	862	450	235		547	410
Blei	kg	8700	25500	14600	5320		11300	8510
Zink	kg	65900	141000	59200	56000		65100	48800
Kupfer	kg	7540	26800	16200	4490		18100	13600
Nickel	kg	3450	7900	3870	2000		4260	3190
Arsen	kg	910	3420	2100	437		2010	1510

		Weißer Elster TH	Weißer Elster SN	Weißer Elster ST		Bode		Schlenze	
		ges.	ges.	ges.	erosions- gefährdet	ges.	erosions- gefährdet	ges.	erosions- gefährdet
Sedimentvolumen	m ³	22200		8920	6690	28790	21600	1140	855
Schadstoffpotenziale									
Quecksilber	kg			32	24	7,46	5,60	0,19	0,14
Cadmium	kg	26		19	14	32	24	2,54	1,91
Blei	kg	770		2100	1570	1860	1400	4150	3110
Zink	kg	5840		6990	5240	5920	4440	1530	1150
Kupfer	kg	702		1470	1100	1660	1240	372	279
Nickel	kg	747		414	310	466	349	14	11
Arsen	kg	183		518	389	248	186	30	23

Grundlage (FGG ELBE 2013). Eine überregional bedeutsame Mobilisierbarkeit sedimentrelevanter Schadstoffe ist lediglich für wenige Standorte, z.B. ökologische Großprojekte, auf der Grundlage von Experteneinschätzungen anzunehmen. Im Ergebnis kann für elbweit ca. 50 Altlastenverdachtsflächen ein Schadstofftransfer in die Oberflächengewässer gegenwärtig nicht ausgeschlossen werden. Das vorhandene Frachtpotenzial und die infrage kommenden Eintragswege (Erosion, Sickerwasser/Grundwasser) dürften jedoch in der überwiegenden Mehrzahl der Fälle zur Ausbildung kleinvolumiger, quellnaher Schadstoffdepots im Sediment führen. Für das Einzugsgebiet der Saale wurden Altlasten am Gewässer im Rahmen des ökologischen Großprojektes (ÖGP) Buna mit potenzieller Sedimentrelevanz für das Elbesystem identifiziert (IKSE 2014). Als relevante Schadstoffe wurden chlorierte Kohlenwasserstoffe sowie BTEX-Aromaten und Quecksilber ermittelt (www.laf-isa.de/altlasten-foerderprojekte/oegg-buna).

3.4 Remobilisierungspotenzial

Neben dem Stoffspektrum und den Schadstoffkonzentrationen sowie der quellenbezogenen Schadstoffmenge (Frachtpotenzial) stellt die Mobilisierbarkeit dieses Potenzials den dritten Faktor zur Abschätzung des von einer potenziellen Quelle ausgehenden überregionalen Risikos dar. Stark konsolidierte, auch unter extremen Abflussbedingungen lagestabile Altsedimente können zwar hoch belastet und von großer Menge, auf Grund ihrer Immobilität jedoch von geringer überregionaler Bedeutung sein. Untersuchungen zur Mobilisierbarkeit von Altsedimentdepots wurden im Rahmen des Projektes „Remobilisierungspotenzial belasteter Altsedimente in relevanten Gewässern Sachsen-Anhalts“ umgesetzt (IWS 2012). Bestandteil der Untersuchungen waren sowohl in-situ-Messungen als auch Untersuchungen im Technikum. Die Untersuchungen fanden ausschließlich an Sedimenten aus Seitenstrukturen und Nebengewässern statt, nicht jedoch aus Staustufen.

Abbildung 6 veranschaulicht das methodische Vorgehen. Für die Untersuchungen im Gewässer wird ein Erosionslängsgerinne auf einen zu beprobenden Sohlabschnitt aufgesetzt. Eine rechteckige Aussparung in einem Teil des Gerinnebodens definiert das Messfeld (Abmessungen B x L: 100 mm x 290 mm, die Kanalhöhe beträgt 50 mm). Das Umgebungswasser wird durch eine regelbare Pumpe am Auslauf des Kanals am Messfeld vorbei durch das Gerät hindurch abgesaugt. Die Pumpe wird dabei so geregelt, dass über dem Messbereich vorab bestimmte, definierte Scherströmungen generiert werden. Im Auslaufbereich des Gerätes wird die Trübung kontinuierlich überwacht, so dass von einem detektierten, signifikanten Trübungsanstieg auf einen Erosionsbeginn und damit im Umkehrschluss auf die Erosionsstabilität der Sedimente im Bereich des definierten Messfeldes geschlossen werden kann.

Im Technikum wurden zusätzlich Untersuchungen der Erosionsstabilität (kritische Sohlschubspannung und Erosionsraten) an ungestörten Sedimentkernen durchgeführt. Die Bestimmung der kritischen Sohlschubspannungen erfolgte über das SETEG-System (Strömungskanal zur Ermittlung der tiefenabhängigen Erosionsstabilität von Gewässersedimenten, KERN et al. 1999, NOACK et al. 2014). Das SETEG-System besteht aus einem geschlossenen rechteckigen Kanal, der mit Druckabfluss betrieben wird und eine kreisförmige Öffnung am Boden besitzt, in der die Sedimentkerne sohlbündig mit der Kanalinnenseite eingeführt

werden. Der Durchfluss wird langsam und kontinuierlich gesteigert, bis Erosion auftritt. Danach wird das Sedimentmaterial um die gewünschte Schrittweite nach oben verschoben und sohlbündig abgeschnitten, so dass die kritische Erosionschubspannung für die nächste Sedimenttiefe ermittelt werden kann. Letztlich kann so ein Vertikalprofil der kritischen Erosionschubspannungen des untersuchten Sedimentkerns abgeleitet werden.

Für die quantitative Bestimmung der Erosionsraten wurde ein optisches Messverfahren eingesetzt (SED CIA, Sediment Erosion Rate Detection by Computerised Image Analyses, WITT & WESTRICH 2003). Hierfür projiziert ein Laser parallele Laserlinien auf die Sedimentoberfläche des Kerns, die kontinuierlich von einer CCD-Kamera aufgenommen werden. Im Falle einer Erosion werden die Laserlinien durch die Veränderung der Topographie abgelenkt, woraus mittels Triangulation das Erosionsvolumen abgeleitet werden kann. In Verbindung mit einem zeitlichen Abstand der aufgenommenen Momentaufnahmen ist es schließlich möglich, Erosionsraten für diskrete Durchflüsse bzw. Sohlschubspannungen zu bestimmen.

Während bei nicht-kohäsivem Material die kritische Sohlschubspannung vorwiegend durch die Korngrößenverteilung bestimmt wird, sind bei kohäsiven Sedimenten die Wechselwirkungen zwischen physikalischen, chemischen und biologischen Prozessen zu berücksichtigen (ABERLE et al. 2003, BALE et al. 2007, GERBERSDORF et al. 2005, GERBERSDORF & WIEPRECHT 2015, KRONE 1999, LAU & DROPPA 2000, MOSTAFA et al. 2008, WIDDOWS et al. 2006). Aus diesem Grund wurden als zusätzliche Parameter im Tiefenprofil die Lagerungsdichte, die Korngrößenverteilung sowie der TOC- und der Chlorophyll-a-Gehalt gemessen.

Auf der Basis der Messwerte wurde die Erosionsstabilität für jeden Untersuchungsstandort in den Seitenstrukturen abgeschätzt. Zur Bewertung des Remobilisierungspotenzials der Sedimente erfolgte eine Gegenüberstellung der labortechnisch bestimmten kritischen Sohlschubspannungen mit real im Gewässer wirkenden, die für definierte Abflussbedingungen gewässerspezifisch in Näherung berechnet wurden. Die auf diese Weise erhaltenen Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen: Die durch das IWS untersuchten Sedimentablagerungen sind weitestgehend durch kritische Sohlschubspannungen zwischen 0,3 bis 6 N/m² gekennzeichnet. Die im Hochwasserfall für die Gewässer abgeschätzten, wirkenden Sohlschubspannungen liegen im Bereich von 10 bis 50 N/m². Die erfassten Sedimentablagerungen sind

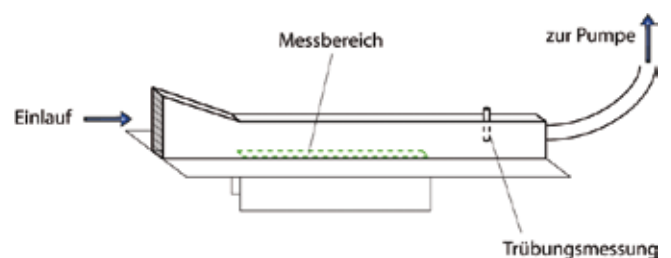


Abbildung 6

Schematische Darstellung eines Längsgerinnes zur in-situ-Messung der Erosionsstabilität (FGG ELBE 2013)

Schematic illustration of a straight flume (sediment surface) for in situ measurements of erosion stability

daher bereits bei mittleren Hochwässern grundsätzlich erosionsgefährdet, im Hochwasserfall ist von einer Sedimentverlagerung im Gewässer auszugehen. Zur groben Abschätzung des unter Hochwasserereignissen erosionsgefährdeten Sedimentanteils wird unter Anwendung des Vorsorgeprinzips zunächst davon ausgegangen, dass max. 75 % des Sedimentbestandes erodieren und im Gewässer verfrachtet werden. Zur Verifizierung dieser Aussage wurden die Sedimentablagerungen entsprechend ihres Tongehaltes in erosionsstabil und erosionsgefährdet klassifiziert (Tab. 3). Bis auf wenige Sedimentbereiche in Altarmen und Mühlgräben sind die meisten der untersuchten Ablagerungen als erosionsgefährdet einzustufen.

3.5 Schadstofffrachten

Zur Ermittlung und Bewertung der schadstoffspezifischen Gesamtwirkung des Gewässersystems Saale auf die Elbe dienen Schadstofffrachtbetrachtungen und -bilanzierungen. Bei der Bilanzierung der Schadstoffströme wurden für die Schwermetalle und Arsen grundsätzlich Gesamtfrachten (gelöst und partikulär an Schwebstoffe gebundene Schadstoffe) verwendet. Dies war notwendig, um die sedimentspezifischen Prozesse wie Sedimentation von belasteten Schwebstoffen bzw. deren Remobilisierung im Bilanzraum Elbe abzubilden. Die im Kontext des Sedimentmanagementkonzepts relevanten organischen Schadstoffe werden vorrangig an Partikel gebunden im Gewässer verfrachtet (FGG ELBE 2009). Eine Bilanzierung erfolgte deshalb für diese Stoffgruppe ausschließlich auf der Basis von partikulär gebundenen Frachtanteilen. Zur Bewertung und Einordnung der schadstoffrelevanten Wirkung von Elbezuflüssen im freifließenden Elbeabschnitt (Decin bis Geesthacht) dient die Bezugsmessstelle Schnackenburg. Die an dieser Messstelle vorgefundenen Schadstofffrachten setzen sich im Wesentlichen aus den Schadstoffeinträgen aus dem staugeregelten Elbeabschnitt (von der Quelle samt Nebenflüssen bis Decin) und den Einträgen über die Mulde, Saale und Havel sowie den im Hauptstrom der Elbe mit ihren Seitenstrukturen vorhandenen und ereignisbezogen stromab verfrachteten Feinsedimentanteilen zusammen. Zur Abschätzung und Wichtung der entsprechenden Schadstoffeinträge werden die an der Messstelle Schnackenburg ermittelten Schadstofffrachten als 100 % definiert und die Schadstoffeinträge aus dem staugeregelten Elbeabschnitt, der Mulde, der Saale und der Havel prozentual darauf bezogen. Die festgestellte Überprägung der ermittelten Schadstofffracht an der Messstelle Schnackenburg durch Sedimentations- und Remobilisationsprozesse im Elbestrom bleibt dabei unberücksichtigt.

Zusammenfassend ist für den Schadstofftransfer aus dem Gewässersystem Saale in die Elbe festzustellen: Die an der Messstelle Schnackenburg bestimmten Schwermetallgesamtfrachten (gelöst und partikulär gebunden) stammen zu einem unterschiedlichen Anteil aus der Saale. Die höchsten Anteile ergeben sich für Zink mit 57 % und für Blei mit 46 %. Arsen wird mit durchschnittlich 8 % bezogen auf die Messstelle Schnackenburg in deutlich geringerem Anteil aus der Saale in die Elbe eingetragen. Die Datenlage zu den organischen Frachtanteilen ist im Gegensatz zu den Schwermetallfrachtanteilen für eine qualifizierte Abschätzung noch nicht ausreichend.

Zur Differenzierung der Schadstoffanteile im Saaleinzugsgebiet erfolgte eine Bilanzierung des Schadstofftransportes in der Saale und den relevanten Nebengewässern Weiße Elster, Bode und Schlenze. Die Bilanzierung wurde ausschließlich für die

Schwermetalle und Arsen vorgenommen. Bis auf die Einzelstoffe Cadmium und Nickel weisen die stoffspezifischen Bilanzen im Einzugsgebiet Saale im Betrachtungszeitraum 2003 bis 2011 in der Regel Differenzen von > 25 %, teilweise von 50 % und mehr, auf. Die Quellen und die Transportwege dieser nicht zuordbaren Schadstofffrachtanteile sind bisher nicht identifiziert. Prüfpfade für den Schadstoffeintrag können in der Bilanz nicht berücksichtigte Nebengewässer (Wipper, Laucha, Luppe, Fuhne u.a.), Misch- und Regenwassereinleitungen und Abschwemmungen von belasteten Flächen sein. Bei der Ableitung und Zuordnung von Belastungsschwerpunkten bleiben diese Frachtanteile bisher unberücksichtigt.

4 Handlungsempfehlungen

Die abgeschätzten Schadstoffpotenziale der einzelnen untersuchten Standorte und die abgeleiteten erosionsgefährdeten Anteile wurden gewässer- und schadstoffbezogen zusammengefasst und dem jährlichen partikelgebundenen Schadstofftransfer (Schwermetalle und Arsen) aus der Saale in die Elbe, registriert an der Messstelle Groß Rosenburg, gegenübergestellt (Tab. 3).

Aufgrund der vorliegenden hohen Bilanzdefizite sind eine schadstoffspezifische Bilanzraumzuordnung und die damit verbundene Ableitung von Belastungsschwerpunkten nur bedingt möglich. Hier sind weitere Untersuchungen erforderlich. Von den identifizierten Schadstoffquellen stellen der Schlüsselstollen und Altsedimentablagerungen die wichtigsten Belastungsschwerpunkte im Bereich der Saale dar. Über den Schlüsselstollen werden gelöste Schwermetalle (außer Quecksilber und Arsen) in relevanten Mengen in die Saale eingetragen. Verhältnismäßige Maßnahmen, die das Erreichen eines guten Zustandes in Schlenze und Saale ermöglichen, sind derzeit nicht gegeben (PLEJADES 2013b). Es ist auch zukünftig von einem weitgehend gleichbleibenden Schadstoffeintrag aus dem Schlüsselstollen über die Saale in die Elbe auszugehen. Bei den Altsedimentablagerungen handelt es sich um Schadstoffdepots, die vorrangig im Hochwasserfall oder bei Unterhaltungsmaßnahmen als Schadstoffquellen im Gewässer wirken. Bezogen auf die abgeschätzten, in den Sedimenten fixierten Gesamtmengen dominieren die Schwermetalle. Den Schwerpunkt bildet Quecksilber, welches insbesondere in den Seitenstrukturen und einzelnen Staustufen der Saale fixiert ist. Arsen ist im Bereich der sachsen-anhaltinischen Saale im Rahmen der Gewässerüberwachung unauffällig. Die Aufnahme von As in die Tabelle 2 „Relevante Stoffe in Altsedimenten im Einzugsgebiet der Saale“ ist ausschließlich durch Einzelergebnisse im Bereich von Altsedimentdepots begründet. Die Ursachen für die in Altsedimentdepots an Einzelproben festgestellten, erhöhten As-Gehalte sind nicht im Detail bekannt. Historische, bergbaubedingte Einträge aus dem Oberlauf der Saale bzw. dortiger Nebenflüsse (Sachsen, Thüringen) sind denkbar.

Die für die meisten organischen Stoffe abgeschätzten Gesamtfrachten in den Sedimenten liegen in der Größenordnung einer Jahresfracht (ermittelt für die Messstelle Groß Rosenburg), die der Dioxine/Furane und TBT deutlich darüber. Das Frachtpotenzial der unteren Bode ist insbesondere wegen der hohen Dioxin- und Furanbelastung relevant.

TBT ist überwiegend an den Sedimenten in den Schleusenhäfen der schiffbaren Saale akkumuliert. Vorliegende Messwerte von

TBT-Konzentrationen in Sedimentablagerungen im sächsischen Teil der Weißen Elster signalisieren aber das Vorhandensein weiterer, bisher nicht berücksichtigter sedimentgebundener Schadstoffpotenziale. Die sedimentspezifische Ermittlung der Schadstoffpotenziale im sächsischen Teil der Weißen Elster stellt deshalb eine vorrangige Aufgabe dar. Eine relevante Rücklösung der Schadstoffe aus den Sedimenten und eine damit verbundene permanente Schadstofffreisetzung in das Gewässer sind nicht anzunehmen.

Die Schadstoffdepots werden unter normalen Abflussbedingungen durch Fixierung von gelösten Schadstoffen an Schwebstoffen und deren Sedimentation fortlaufend erneuert bzw. vergrößert. Die Entnahme von belasteten Sedimenten und die Verbringung außerhalb des Gewässers stellt eine geeignete und wirksame Maßnahme zur Reduzierung dieser Schadstoffquelle dar. In diesem Zusammenhang erscheint es auch sinnvoll zu prüfen, ob die Sedimentationsräume in den Schleusenhäfen des Saaleunterlaufes für ein gezieltes Feinsedimentmanagement zur Reduzierung des Schadstoffeintrags in die Elbe genutzt werden können. Die Ausführung von Baggerungen in den Schleusen ist technisch unkompliziert und eine ungewollte Freisetzung und Verlagerung von Sedimentanteilen in das freifließende Gewässer kann in hohem Maße vermieden werden. Die schadstoffbedingten Sedimententnahmen könnten mit den ohnehin notwendigen Unterhaltungsmaßnahmen kombiniert und somit der technische Aufwand optimiert werden. Allerdings ist bei der Abschätzung der Wirksamkeit eines solchen Vorgehens auch zu berücksichtigen, dass der überwiegende Teil des Stofftransportes (85–90 %) über die Wehre stattfindet. Das erschwert den Sedimentrückhalt in hohem Maße. Technische Lösungen wären nur mit bauwerklichen Änderungen machbar und erscheinen daher zum jetzigen Zeitpunkt als unrealistisch.

Schließlich empfiehlt sich, die Entnahme von belasteten Sedimenten aus den Seitenstrukturen in wasserbauliche Maßnahmen zur Anbindung von Seitenstrukturen im Zuge einer hydromorphologischen/ökologischen Aufwertung von Flussabschnitten (Funktionseinheit von Fluss und Aue, Verbesserung der Lebensraumstruktur am Gewässergrund) bzw. zur Sicherung der Fischdurchgängigkeit einzubinden. Sedimententnahmen aus freien Gewässerbereichen sollten auf Hot Spots beschränkt werden.

Conclusions

Hotspots were identified and potential loads were estimated in relation to the mean annual inputs of particle-bound toxic metals and arsenic via the Saale at Groß Rosenburg into the Elbe (cf. Table 3). Further investigations are necessary to overcome remaining uncertainties in balancing the fine-sediment deposits and fluxes in the whole Saale catchment. Nevertheless, some conclusions can already be drawn today.

The small creek Schlüsselstollen and contaminated old sediments are the most relevant recent sources for sediment pollution in the Saale. They also pose a supra-regional risk downstream of the Saale inflow into the Elbe. The Schlüsselstollen has proven to be a major source of heavy metals such as Zn, Cd, Cu, Pb and Ni, but not of Hg and As. The dewatering of the whole historic Mansfeld mining region via Schlüsselstollen will continue over the next decades, and based on today's knowledge, there are no adequate measures for reaching a good status both

in the Schlüsselstollen and in the receiving small river Schlenze. Furthermore, pollutant emissions into the Saale river will remain at the same levels in the long term (PLEJADES 2013b).

The contaminated old sediment deposits are subject to remobilisation mainly during floods and also due to human activities such as dredging. Heavy metals, arsenic and a number of organic contaminants dominate the contamination pattern, with mercury playing a central role. Prominent deposition zones for old potentially mobile contaminated sediments are located in several side structures of the middle and lower reaches as well as the large sluice canals of the barrages in the navigable part of the Saale. In addition, the lower part of the tributary Bode has proven to be a risk area. Total potential load estimations for most of the relevant contaminants are as high as their mean annual loads into the Elbe at Groß Rosenburg. They are even higher in some cases, for example for dioxins and TBT.

TBT gives an example for the existing uncertainties. On the one hand, TBT can be found mainly in the sediments of barrages of the navigable Saale, which suggests a link to the former use in ship paintings. On the other hand, relevant TBT concentrations can be measured in sediments of the Saxon, non-navigable part of the Weiße Elster which in turn is a major tributary to the Saale. Thus, the fluxes of the Weiße Elster have to be included in the balance, in order to draw effective management conclusions.

Removal and land deposition of contaminated sediments is an efficient measure that could be applied to several of the identified hot spots in order to reduce particular contaminant inputs into the Elbe. For a wide acceptance and best economic efficiency such sanitation measures should be taken in combination with other goals such as the improvement of the hydromorphological conditions or the river continuity for fishes.

The sediment deposits in the lower part of the Saale and the potential contaminant loads therein are being continuously renewed due to upstream transport. In this context, it should be considered if the sedimentation function of the sluice canals could be used for a targeted fine-sediment management. On the one hand, the major part (85–90 %) of the material transport in the lower Saale takes place via the weirs. On the other hand, periodic dredging for navigation is required in the sluice canals anyway to remove the residues. Presupposing unchanged navigation structures, it should be examined whether the management regime of two or more sluices could be adapted to reach higher fine-sediment yields in one of them, that could be dredged and deposited on land.

Danksagung

Die Autoren danken den zahlreichen fleißigen Helfern der BfG im Labor und bei den Probenahmen. Ganz besonderer Dank gilt den Kollegen des Wasser- und Schifffahrtsamtes Magdeburg mit den Außenbezirken Bernburg und Merseburg für die Unterstützung durch Schiffeinsätze bei Sedimententnahmen und Peilungen sowie für die Bereitstellung von Daten.

Anschriften der Verfasser:

Dipl.-Chem. E. Claus
Dipl.-Ing. C. Möhlenkamp
Dr.-Ing. G. Hillebrand
M. Eng. B. Becker
Dr. P. Heining
Bundesanstalt für Gewässerkunde
Am Mainzer Tor 1, 56068 Koblenz
claus@bafg.de

Dipl.-Ing. P. Kasimir
Dipl.-Chem. H.-J. John
Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft
Sachsen-Anhalt
Willi-Brundert-Str. 14, 06132 Halle

Literaturverzeichnis

- ABERLE, J., V. NIKORA, S. MCLEAN, C. DOSCHER, I. MCEWAN, M. GREEN, D. GORING & J. WALSH (2003): Straight benthic flow-through flume for in situ measurement of cohesive sediment dynamics. – *Journal of Hydraulic Engineering* 129, 63–67
- BABOROWSKI, M. & P. HEININGER (2013): Sedimente und Gewässergüte der Elbe. – *Vom Wasser* 111 (4), 143–147
- BABOROWSKI, M. & W. v. TÜMPLING (2012): Umsetzung Sedimentmanagementkonzept – Schwermetalleinträge Schlüsselstellen in die Saale. – Abschlussbericht. Auftraggeber: LHW; <http://elsa-elbe.de/literatur.html>
- BALE, A.J., J.A. STEPHENS & C.B. HARRIS (2007): Critical erosion profiles in macro-tidal estuary sediments: Implications for the stability of intertidal mud and the slope of mud banks. – *Continental Shelf Research* 27, 2303–2312; DOI: 10.1016/j.csr.2007.05.015
- BUCHINGER, S., P. HEININGER, M. SCHLUESENER, G. REIFFERSCHIED & E. CLAUS (2013): Estrogenic effects along the river Saale. – *Environmental Toxicology and Chemistry* 32 (3), 526–534
- CLAUS, E., G. HILLEBRAND, B. BECKER, C. MÖHLENKAMP & P. HEININGER (2014): Die Staustufen der Bundeswasserstraße Saale. Fachbeiträge zum Sedimentmanagementkonzept Elbe. – Hrsg. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz. Mitteilungen Nr. 30; DOI: 10.5675/BfG_Mitteilungen_30.2014
- FGG ELBE (2009): Hintergrundpapier zur Ableitung der überregionalen Bewirtschaftungsziele für die Oberflächengewässer im deutschen Teil der Flussgebietseinheit Elbe für den Belastungsschwerpunkt Schadstoffe. – Hrsg. Flussgebietsgemeinschaft Elbe
- FGG ELBE (2013): Sedimentmanagementkonzept der FGG Elbe. Vorschläge für eine gute Sedimentmanagementpraxis im deutschen Elbegebiet zur Erreichung überregionaler Handlungsziele. – Hrsg. Flussgebietsgemeinschaft Elbe. Bearb. von Ad hoc-Arbeitsgruppe Schadstoffe/Sedimentmanagement der FGG Elbe
- FRANKE, S., S. HILDEBRANDT, J. SCHWARZBAUER, M. LINK & W. FRANCKE (1995): Organic compounds as contaminants of the Elbe river and its tributaries. – Part II: GC/MS screening for contaminants of the Elbe water. – *Fresenius' Journal of Analytical Chemistry* 353, 39–49
- G.E.O.S. (2012): Bestandsaufnahme belasteter Altsedimente in relevanten Gewässern Sachsen-Anhalts, 09.01.2012, Im Auftrag LHW Sachsen-Anhalt. www.lhw.sachsen-anhalt.de/untersuchen-bewerten/schadstoffkonzept/bestandsaufnahme-altsedimente
- GERBERSDORF, S.U., T. JANCKE & B. WESTRICH (2005): Physico-chemical and biological sediment properties determining erosion resistance of contaminated riverine sediments – Temporal and vertical pattern at the Lauffen reservoir/River Neckar, Germany. – *Limnologica – Ecology and Management of Inland Waters* 35, 132–144; DOI: 10.1016/j.limno.2005.05.001
- GERBERSDORF, S.U. & S. WIEPRECHT (2015): Biostabilization of cohesive sediments: revisiting the role of abiotic conditions, physiology and diversity of microbes, polymeric secretion, and biofilm architecture. – *Geobiology* 13, 68–97; DOI: 10.1111/gbi.12115
- GUHR, H., M. BABOROWSKI, K.-E. LINDENSCHMIDT & C. HOFFMEISTER (2003): Dynamik von partikulär gebundenen Stoffen im Freiwasser der Unteren Saale. – UFZ, Magdeburg
- HANISCH, C., L. ZERLING, F.W. JUNGE & W. CZEGKA (2005): Verlagerung, Verdünnung und Austrag von schwermetallbelasteten Flusssedimenten im Einzugsgebiet der Saale. – Hrsg. Sächsische Akademie der Wissenschaften Leipzig, 135 S.
- HEININGER, P., J. PELZER, E. CLAUS & S. PFITZNER (2003): Results of long-term sediment quality studies on the river Elbe. – *Acta hydrochimica et hydrobiologica* 31 (4–5), 356–367
- HEININGER, P., J. PELZER, E. CLAUS & P. TIPPMMANN (1998): Contamination and toxicity trends for Sediments – Case of the Elbe River. – *Water Science and Technology* 37 (6–7), 95–107
- HEISE, S., E. CLAUS, P. HEININGER, T. KRÄMER, F. KRÜGER, R. SCHWARTZ & U. FÖRSTNER (2005): Studie zur Schadstoffbelastung der Sedimente im Elbeinzugsgebiet – Ursachen und Trends. – Im Auftrag der Hamburg Port Authority, erstellt vom Beratungszentrum für integriertes Sedimentmanagement (BIS/TuTech) an der TU Hamburg-Harburg, 217 S.
- IWS (2013): Remobilisierungspotenzial belasteter Altsedimente in relevanten Gewässern Sachsen-Anhalts. Im Auftrag LHW Sachsen-Anhalt; www.lhw.sachsen-anhalt.de/untersuchen-bewerten/schadstoffkonzept/remobilisierungspotenzial
- IKSE (2014): Sedimentmanagementkonzept der IKSE. Vorschläge für eine gute Sedimentmanagementpraxis im Elbegebiet zur Erreichung überregionaler Handlungsziele. – Hrsg. Internationale Kommission zum Schutz der Elbe. Ad hoc-Expertengruppe Sedimentmanagement der IKSE
- KERN, U., I. HAAG, V. SCHÜRLEIN, M. HOLZWARTH & B. WESTRICH (1999): Ein Strömungskanal zur Ermittlung der tiefenabhängigen Erosionsstabilität von Gewässersedimente: das SETEG-System. – *Wasserwirtschaft* 89, 72–77

- KRONE, R.B. (1999): Effects of Bed Structure on Erosion of Cohesive Sediments. – *Journal of Hydraulic Engineering* 125, 1297–1301
- LAU, Y.L. & I.G. DROPPA (2000): Influence of antecedent conditions on critical shear stress of bed sediments. – *Water Research* 34, 663–667; DOI: 10.1016/S0043-1354(99)00164-5
- MOSTAFA, T.S., J. IMRAN, M.H. CHAUDHRY & I.B. KAHN (2008): Erosion resistance of cohesive soils. – *Journal of Hydraulic Research* 46, 777–787; DOI: 10.1080/00221686.2008.9521922
- NOACK, M., S. GERBERSDORF, S. WIEPRECHT, G. HILLEBRAND & P. KASIMIR (2014): How to determine the erosion risk of contaminated cohesive sediments best? Putting in situ and laboratory practices to the test. – In: *River Flow 2014*. CRC Press, 2235–2242
- PLEJADES (2013a): Bericht zum Arbeitspaket A: Ermittlung der Auswirkungen des Schlüsselstollens auf den partikelgebundenen Schadstofftransport in der Saale/Elbe. – Im Auftrag der Landesanstalt für Altlastenfreistellung des Landes Sachsen-Anhalt (LAF); www.laf-lsa.de/sonstiges/wasserrahmenrichtlinie
- PLEJADES (2013b): Bericht zum Arbeitspaket B: Bewertung von technisch realisierbaren und verhältnismäßigen Maßnahmen: – Im Auftrag der Landesanstalt für Altlastenfreistellung des Landes Sachsen-Anhalt (LAF); www.laf-lsa.de/sonstiges/wasserrahmenrichtlinie
- WEISE, J. (2011): Baggergutverbringung Elbe – Saale. – Informationsveranstaltung im MLU Sachsen-Anhalt, Magdeburg 5.5.2011
- WIDDOWS, J., M.D. BRINSLEY, N.D. POPE, F.J. STAFF, S.G. BOLAM & P.J. SOMERFIELD (2006): Changes in biota and sediment erodability following the placement of fine dredged material on upper intertidal shores of estuaries. – *Marine Ecology Progress Series* 319, 27–41
- WITT, O. & B. WESTRICH (2003): Quantification of erosion rates for undisturbed contaminated cohesive sediment cores by image analysis. – *Hydrobiologia* 494, 271–276