



Der Einfluss von extremen Hochflutereignissen auf fluviale Sedimente und ihr Schwermetallinventar

Alexandra Weber (alexandra.weber@geo.rwth-aachen.de), Johannes Keßels (johannes.kessels@geo.rwth-aachen.de), Frank Lehmkuhl (flehmkuhl@geo.rwth-aachen.de)
Geographisches Institut, RWTH Aachen University, Wüllnerstr. 5b, 52062 Aachen

Abstract

Der Abfluss eines Gewässers ist der entscheidende Einflussfaktor für die Dynamik fluvialer Sedimente. Insbesondere Hochwasserereignisse spielen deshalb eine entscheidende Rolle für sedimentgebundene Schadstoffe. Allerdings ist bisher wenig über die Schwermetalldynamik bei Extremereignissen bekannt. Am Beispiel der Inde, NRW, die stark vom Hochwasser im Juli 2021 betroffen war, konnte gezeigt werden, dass extreme Abflussereignisse zu längerfristig anhaltenden erhöhten Schwermetallgehalten in fluvialen Sedimenten führen können. Da feinere Sedimente eine größere spezifische Oberfläche haben, ist der Gehalt in der besonders feinen Suspensionsfracht höher als in den auf Auen und an Ufern abgelagerten Sedimenten.

Einleitung

Trotz ambitionierter Vorgaben des Gesetzgebers, haben nach wie vor alle deutschen Gewässer keinen „guten chemischen Zustand“ [1]. Einer der Gründe hierfür ist die Belastung fluvialer Sedimente mit Schwermetallen (trotz kritischer Diskussion des Begriffs [2, 3] haben wir uns bewusst entschieden ihn Zhang et al. [4] folgend in diesem Kontext zu verwenden). Fluviale Sedimente sind als Träger von Schwermetallen bekannt; ihnen kommt seit Jahrzehnten ein entsprechendes Forschungsinteresse zu. Doch obwohl deren räumliche Dynamik insbesondere durch den Abfluss und die daraus resultierende Fließgeschwindigkeit gesteuert wird [5], ist der bisherige Wissensstand zum Einfluss von extremen Hochwasserereignissen auf die Schadstoffdynamik fluvialer Sedimentsysteme unzureichend. Das liegt nicht zuletzt an der Schwierigkeit, Hochwasserereignisse zu beproben und der immanenten Seltenheit von Extremereignissen.

An der Inde, einem Fluss am Übergang zwischen dem Mittelgebirgsraum der Eifel und der Niederrheinischen Bucht in NRW, wird seit 2018 ein Hochwassersediment-Monitoring betrieben [6, 7]. Aufgrund des über viele Jahrhunderte betriebenen Buntmetallerzbergbaus und den damit verbundenen Industriezweigen, ist das Einzugsgebiet von deutlich erhöhten Schwermetallanreicherungen in Sedimenten betroffen [8]. Insbesondere rund um die beiden größten Städte des Einzugsgebietes, Stolberg und Eschweiler, entwickelten sich industrielle Zentren der Metallverarbeitung [9], deren Erbe sich heute in Form von Altlasten bzw. Altstandorten in großer Zahl entlang der Inde und ihres Tributärs, der Vicht, befindet [10]. Ein Großteil der heutzutage mit Schwermetallen belasteten Einzugsgebiete in Mitteleuropa sowie global wurde durch Buntmetallbergbau geprägt [1, 11].

Im Rahmen des Monitorings werden entlang des gesamten Flussverlaufs unmittelbar nach Hochwasserereignissen frisch auf den Auen abgelagerte Feinsedimente (< 2mm) beprobt. Ebenso nach dem Extremhochwasser im Juli 2021, das in den engen, steil eingeschnittenen Tälern des Ober- und Mittellaufs der Inde sowie ihres wichtigsten Tributärs, der Vicht, die Pegel rasant auf ungekannte Höhen ansteigen ließ [12, 13]. In Ergänzung hierzu wurde während eines Hochwassers im Dezember 2023 die Suspensionsfracht beider Flüsse durch Entnahme von 10-20 L Flusswasser beprobt, das nach dreiwöchiger Stehzeit abdekantiert und anschließend eingedampft wurde.

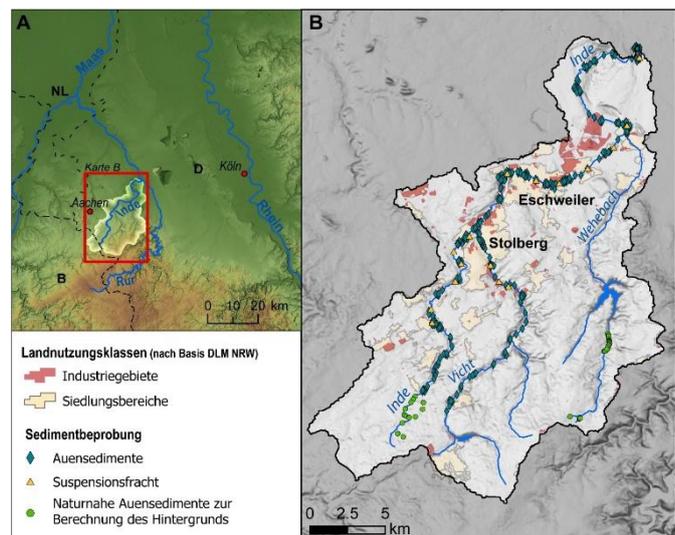


Abb. 1: Übersichtskarte des Inde-Einzugsgebietes. In Karte B sind alle im Rahmen der hier vorgestellten Arbeiten beprobten Standorte verzeichnet. Eine differenziertere Darstellung aller Probenpunkte findet sich in Weber & Lehmkuhl [14].

Alle Probenotypen wurden getrocknet und auf 2 mm abgesiebt, anschließend fein gemahlen und mit Hoechst-Wachs zu Tabletten gepresst, die mittels energiedispersiver polarisierter Röntgenfluoreszenz (Spectro Xepos) auf ihre elementare Zusammensetzung hin untersucht wurden. Um die natürlicherweise in Gebieten mit Buntmetallvorkommen auftretenden erhöhten Schwermetallkonzentrationen und weitere, die Stoffkonzentration beeinflussende Sedimentcharakteristika zu berücksichtigen, werden im Rahmen dieser Arbeit anstelle von Konzentrationen Anreicherungen gezeigt. Sie basieren auf einer Doppelnormalisierung an einem lokalen geochemischen Hintergrund (ermittelt aus naturnahen Auensedimenten, siehe Abb. 1) und Aluminium als Referenzelement. Der so entstandene Datensatz eröffnet die seltene Möglichkeit eines Vergleichs der Schwermetallkonzentrationen vor, während und

nach einem Extremhochwasser. Eine detaillierte Darstellung der Methoden und Ergebnisse findet sich in Weber & Lehmkuhl [14].

Transport von Sediment und assoziierten Schwermetallen in Abhängigkeit vom Abfluss

Bei der Untersuchung fluvialer sedimentärer Systeme im Kontext von Schadstofftransport ist eine grundsätzliche Unterscheidung dreier verschiedener Typen von Feinsediment notwendig: (a) die Suspensionsfracht, die vom fließenden Wasser mitgeführt wird, (b) die Flussbettsedimente, die vorwiegend durch Kriechen und Saltation nah an der Gewässersohle transportiert werden und die nur dann in Bewegung geraten, wenn eine Korngrößenabhängige kritische Schubscherspannung überschritten wird, und (c) die Auensedimente, die bei Hochwasser durch den Fluss auf den ihn umgebenden Flächen, den Auen, abgelagert werden und dort einen allmählich aufwachsenden Auenkörper bilden. Für den Transport sedimentär gebundener Schadstoffe durch ein Einzugsgebiet ist das von der Fließgeschwindigkeit abhängige Wechselspiel aus Erosion und Deposition von Sedimenten entscheidend (vgl. Abb. 2). Hochwasserereignisse sind durch ihre erhöhte Transportkapazität die wichtigste fluvialmorphologische Prozessphase für fluviale Sedimente [15].

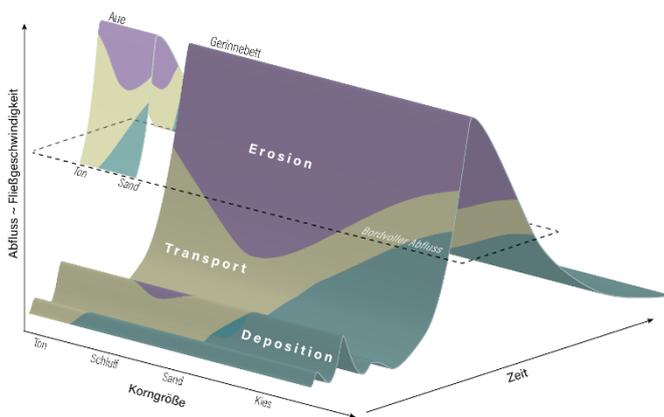


Abb. 2: Schematische Darstellung der Sedimentdynamik in Abhängigkeit vom Abfluss. Die Dynamik fluvialer Sedimente kann in die drei Teilprozesse Erosion, Transport und Deposition gegliedert werden, die direkt von der Fließgeschwindigkeit abhängen – ein Zusammenhang, der im „Hjulström-Diagramm“ wiedergegeben wird. Da die Fließgeschwindigkeit direkt proportional zum Abfluss ist, sind die Prozessbereiche des Hjulström-Diagramms hier auf eine Abflussganglinie aufgetragen. Durch die deutlich verschiedenen Fließgeschwindigkeiten im Gerinne im Vergleich zur Aue unterscheiden sich bei gegebenem Abfluss die dominanten Prozesse.

Während Phasen niedriger bis mittlerer Abflüsse, sammelt sich Feinmaterial zwischen den größeren Partikeln wie Kies und Steinen des Flussbettes, da deren Zwischenräume gut vor Strömung und damit vor Erosion geschützt sind. Aufgrund der großen spezifischen Oberfläche des Feinmaterials besteht hier ein besonders großes Potential zur Zwischenspeicherung von Schwermetallen [15]. Die Fließgeschwindigkeit ist der entscheidende Steuerungsfaktor für die Sortierungsprozesse im

Gewässerbett. Bei erhöhten Abflüssen nimmt durch die höhere Fließgeschwindigkeit auch die Erosivität des Gewässers zu und die im Gewässerbett zwischengespeicherte Feinfraktion wird remobilisiert (siehe Abb. 2) [16]. Bei einer nur leichten Erhöhung der Abflüsse erhöht sich die Transportkapazität des Gewässers derart, dass nur sehr feine Partikel in Suspension gehen und bis in den Vorfluter transportiert werden können, während etwas größere Partikel allenfalls über kürzere Distanzen transportiert werden.

Erst wenn der sogenannte bordvolle Abfluss überschritten wird, kommt es zur Überschwemmung der Auen, auf denen durch die dort verlangsamte Fließgeschwindigkeit vom Fluss mitgeführtes Material abgelagert wird (siehe Abb. 2). Bewachsene Auen sind vor flächenhafter Erosion geschützt und fangen durch ihre hohe Oberflächenrauigkeit Material auf. Sie werden an Prallhängen durch Uferabbrüche erodiert. Damit unterscheiden sich Auensedimente und Flussbettsedimente im Kontext von Schadstoffdynamiken ganz grundlegend: Während das Flussbett als Zwischenspeicher fungiert, in dem eher die rezente Belastung des Einzugsgebietes gespeichert wird, bieten Auen das Potential für langfristige Speicherung und dokumentieren so ein älteres Belastungsprofil ihrer Einzugsgebiete, das durch Ufererosion reaktiviert werden kann.

Aus den dargelegten Überlegungen lassen sich die folgenden zwei Thesen ableiten, die am Beispiel des Indeeinzugsgebietes, untersucht wurden.

These 1: Bei Extremereignissen, die durch ihre große erosive Kraft auch die Auen stark erodieren, ändert sich die geochemische Signatur der rezenten Flutsedimente entsprechend der früheren Landnutzung im Einzugsgebiet.

Die berechnete Schwermetallanreicherung zeigte bei kleineren Hochwasserereignissen (Beprobungen A-D) ein stabiles Signal, während das Extremereignis im Juli 2021 (Beprobung E) zu einem sprunghaften Anstieg führte (siehe Abb. 3). Bemerkenswert ist nicht nur die Zunahme einzelner Spitzenwerte, sondern auch die Verdopplung des Medians der Schwermetallkonzentrationen. Das liegt zum einen an der Erosion der Ufer, in denen sich eine Vielzahl von auf die Bergbauhistorie zurückgehende Altlasten befinden. Darüber hinaus werden bei extremen Hochwassern unerwartet große Flächen überflutet; darunter auch Industriestandorte, die aufgrund ihrer Lage außerhalb regulärer Hochwasserszenarien über keinerlei Hochwasserschutz verfügen.

Zwischen Januar 2022 und Juli 2023 (Beprobungen F-H) nahm die Anreicherung allmählich ab und näherte sich wieder dem Niveau vor dem Extremhochwasser an. Das zeigt, dass die während des Extremevents in das System gespülten stärker belasteten Sedimente zunächst teilweise im Flussbett zwischengespeichert werden und dann allmählich aus dem Einzugsgebiet heraustransportiert werden, sodass sich der Zustand wieder dem modernen Belastungsprofil annähert.

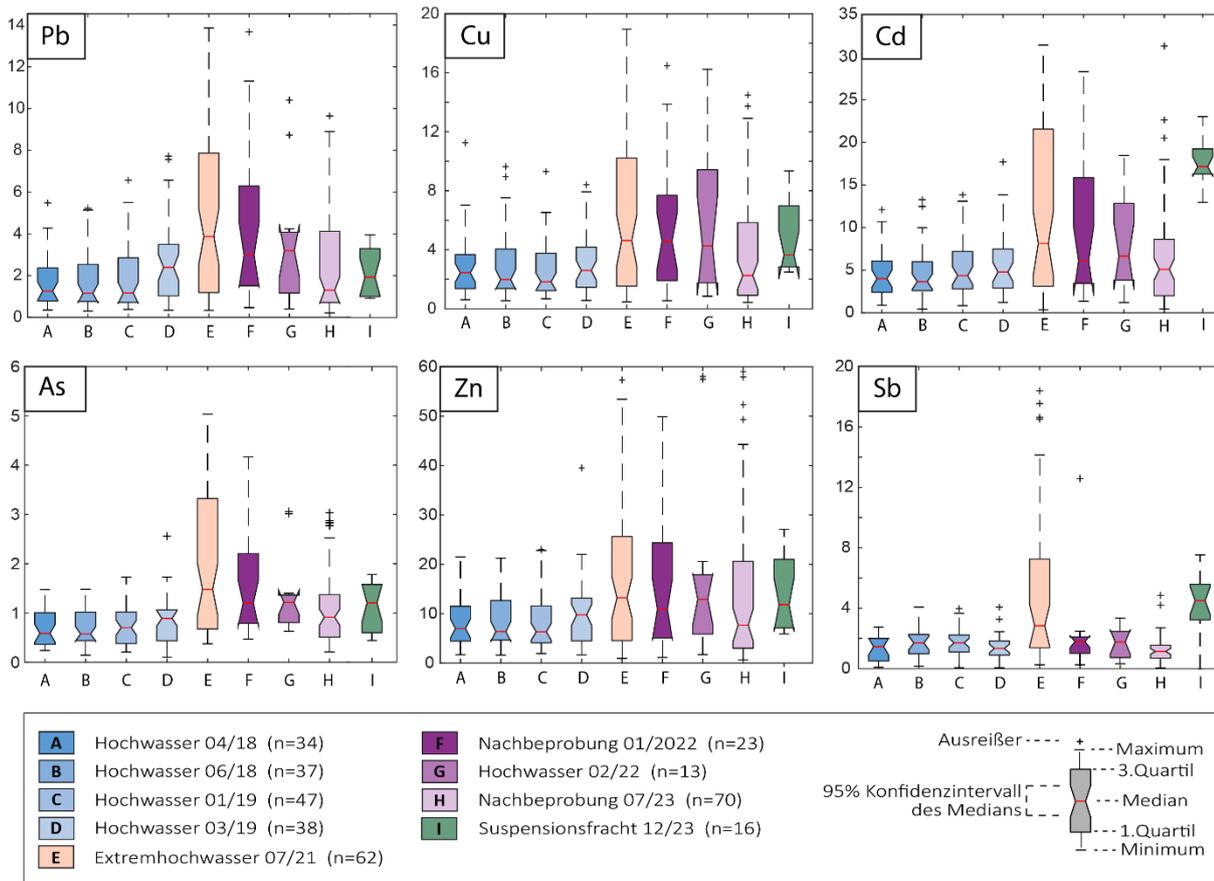


Abb. 3: Anreicherung der sechs ausgewählten Schwermetalle über verschiedene Beprobungskampagnen hinweg

These 2: *Bedingt durch den Korngrößeneffekt, d.h. großes Speicherpotential für Schwermetalle durch große spezifische Oberfläche, ist die besonders feine Suspensionsfracht des Gewässers stärker mit Schwermetallen angereichert als die in noch bewegtem Wasser abgelagerten Auensedimente.*

Neben den Schwermetallanreicherungen der Auensedimente, ist in Abb. 3 auch die Anreicherung in den Suspensionsedimenten (Dezember 2023) in grüner Farbe dargestellt. Für Pb, As, Cu und Zn wurden leicht höhere Anreicherungen in der Suspensionsfracht im Vergleich zu den zuvor beprobten Auensedimenten gefunden. Sie liegen jedoch deutlich unterhalb des Niveaus der Sedimente von Juli 2021 und bestätigen damit den Trend leicht rückläufiger Schwermetallanreicherungen. Auch räumlich zeigen Cu, Pb, Zn und As ein vergleichbares Muster mit deutlicher Anreicherung ab der Mündung der Vicht in die Inde (vgl. Abb. 4). Hier befindet sich der industrielle Schwerpunkt der Region. Das räumliche Muster der Anreicherung wird als Hinweis auf industrielle Aktivitäten als Quelle für Schwermetalle in fluvialen Sedimenten gewertet.

Für Cd und Sb zeigt sich dieses räumliche Muster nicht (vgl. Abb. 4) und die Anreicherung in der Suspensionsfracht ist um ein Vielfaches höher als in den Auensedimenten (vgl. Abb. 3). Das deutet darauf hin, dass diese beiden Elemente stärker als die anderen untersuchten Schwermetalle präferentiell an die besonders feine Sedimentfraktion binden. So kommt es auch zu den stark erhöhten Anreicherungen im Probensatz des Extremhochwassers: Bei den weitflächigen Überflutungen wurden insbesondere im städtischen Bereich viele kleinere Hohlformen überspült, in denen sich schließlich das im Wasser enthaltene Sediment inklusive der Feinstfraktion absetzte [17]. Dieser Zusammenhang ist besonders deutlich zu erkennen für Sb, dessen Anreicherung sich für alle regulären Hochwasserereignisse auf einem konstant moderaten Niveau bewegt. Für das Hochwasser im Juli 2021 wurde ein sprunghafter Anstieg gefunden. Bereits ein halbes Jahr später waren die Anreicherung in den Auensedimenten wieder auf dem ursprünglichen Niveau. Im Fall von Cd vermischt sich das Signal dieses Effektes mit den Auswirkungen verstärkter Emissionen während des Extremhochwassers.

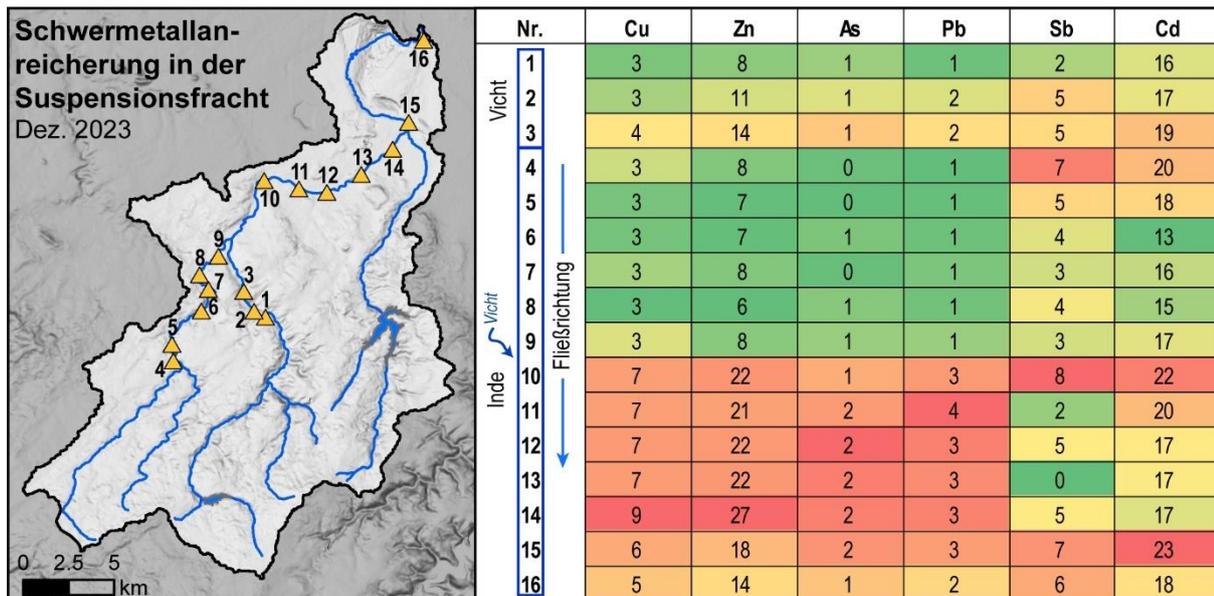


Abb. 4: Anreicherung der ausgewählten Schwermetalle/-metalloide in der während des Hochwassers im Dezember 2023 beprobten Suspensionsfracht.

Implikationen

Die Schwermetallanreicherungen in fluvialen Sedimenten hängen direkt von den Abflüssen des Gewässers ab: Wird eine untere Schwelle unterschritten, kommt es zur (Zwischen-)Speicherung feinkörniger Sedimente im Flussbett mit späterer Remobilisierung bei entsprechender Änderung des Abflusses und damit der Fließgeschwindigkeit. Wird eine obere Schwelle überschritten, kommt es durch Ufererosion und etwaiger Überspülung von anthropogen genutzten Flächen zu erhöhten Einträgen schwermetallhaltiger Sedimente.

Nur während besonders hoher Abflüsse ist die Transportkapazität des Gewässers hoch genug, um das gesamte im Flussbett zwischengespeicherte Feinmaterial aus dem Einzugsgebiet heraus zu transportieren. Sind die Fließgeschwindigkeiten hingegen geringer, wie bei regulären erhöhten Abflüssen, so geht nur der feinste Teil des zwischengespeicherten Sediments in Suspension und gelangt auf diesem Weg in den Vorfluter. Aufgrund dieses Sortierungseffektes, der besonders feine Sedimente bevorzugt in den Vorfluter spült, können bei Hochwasserereignissen mit nur leicht erhöhten Abflüssen die Schwermetallanreicherungen im transportierten Sediment besonders hoch sein. Allerdings unterscheiden sich Schwermetalle danach, an welche Korngrößenfraktion sie präferiert binden. Für das Inde-Einzugsgebiet konnte gezeigt werden, dass Cd und Sb präferiert mit der sehr feinen Fraktion assoziiert vorliegen.

Die Ergebnisse zeigen eindrücklich, welche Bedeutung einer durchdachten Auswahl von Probennahmestellen zukommt. Fluviale Systeme stellen durch kleinräumig sowie zeitlich differenzierte geomorphologische Prozesse eine besondere Herausforderung für eine repräsentative Probennahme dar. So muss beispielsweise präzise differenziert werden, zu welchem Zeitpunkt der Hochwasserwelle ein Sediment dem fluvialen Transport entzogen wird (sei es durch Deposition oder durch

Beprobung der Suspensionsfracht), als auch, welche Prozesse im Nachgang noch auf das Material einwirken (wie beispielsweise Sortierungsprozesse oder vollständige Deposition aller Partikel in abflusslosen Senken). Eine Beprobung muss unmittelbar während oder nach dem Hochwasserereignis durchgeführt werden, da sonst in den Auensedimenten eine schnelle Durchmischung durch Bioturbation stattfindet. Derartige Informationen müssen bei der Bewertung von Schwermetallinventaren in fluvialen Sedimenten Berücksichtigung finden.

Danksagung

Die Autor*innen danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die finanzielle Unterstützung unserer Arbeiten im Rahmen des Projekts „Machbarkeitsstudie zur Beurteilung der Schadstoffbelastung von Sedimenten infolge des Juli-Hochwassers 2021 im Übergang vom Mittelgebirge zum Tiefland“ (Projektnummer 496274914).

Literatur

- Völker J, Arle J, Baumgarten C, Blondzik K, Frauenstein J, Hilliges F, et al. (2022) Die Wasserrahmenrichtlinie - Gewässer in Deutschland: Fortschritte und Herausforderungen.
- Duffus JH (2002) „Heavy metals“ a meaningless term? (IUPAC Technical Report). Pure Appl Chem 74:793–807. doi:10.1351/pac200274050793.
- Gustin MS, Hou D, Tack FMG (2021) The term “heavy metal(s)”: History, current debate, and future use. Sci Total Environ 789:147951. doi:10.1016/j.scitotenv.2021.147951.
- Zhang X, Barceló D, Clougherty RJ, Gao B, Harms H, Tefsen B, et al. (2022) Potentially toxic element“-something that means everything means nothing. Environ Sci Technol 56:11922–11925. doi:10.1021/acs.est.2c03056.

5. Strahler AH, Strahler AN (2009) *Physische Geographie*. 4. Aufl., Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart.
6. Esser V (2020) *Investigations on fluvial morphodynamics and recent pollutant dispersion in river systems – examples from the border region of Belgium, the Netherlands and Germany*. Dissertation, Aachen: RWTH Aachen University.
7. Esser V, Buchty-Lemke M, Schulte P, Podzun LS, Lehmkuhl F (2020) Signatures of recent pollution profiles in comparable central European rivers – Examples from the international River Basin District Meuse. *CATENA* 193:104646. doi:10.1016/j.catena.2020.104646.
8. Schmidt-Wygasch C (2011) *Neue Untersuchungen zur holozänen Genese des Unterlaufs der Inde: chronostratigraphische Differenzierung der Auelehme unter besonderer Berücksichtigung der Montangeschichte der Voreifel*. Dissertation, Aachen: RWTH Aachen University.
9. Offermanns H (2019) Messing – Konfliktstoff im Aachener Raum. *Chem Unserer Zeit* 53:263–265. doi:10.1002/ciuz.201900871.
10. Sindern S, Görtz A, Gronen L (2016) Historic and recent anthropogenic emissions of heavy metals in the town of Stolberg (Rhine area, Germany). *Jber_oberrh* 98:15–31. doi:10.1127/jmogv/98/0003.
11. Macklin MG, Thomas CJ, Mudbhathkal A, Brewer PA, Hudson-Edwards KA, Lewin J, et al. (2023) Impacts of metal mining on river systems: a global assessment. *Science* 381:1345–1350. doi:10.1126/science.adg6704.
12. Lehmkuhl F, Weber A, Esser V, Schulte P, Wolf S, Schrupf H (2022) Fluviale Morphodynamik und Sedimentkontamination bei Extremereignissen: Das Juli-Hochwasser 2021 im Inde-Einzugsgebiet (Nordrhein-Westfalen). *Korrespondenz Wasserwirtschaft*:422–427.
13. Weber A, Wolf S, Becker N, Märker-Neuhaus L, Bellanova P, Brüll C, et al. (2023) The risk may not be limited to flooding: polluted flood sediments pose a human health threat to the unaware public. *Environ Sci Eur* 35: 58. doi:10.1186/s12302-023-00765-w.
14. Weber A, Lehmkuhl F (2024) Mixed response of trace element concentrations in fluvial sediments to a flash flood in a former mining area. *Environ Sci Eur* 36:109. doi:10.1186/s12302-024-00926-5.
15. Kurtenbach A, Bierl R, Schorer M, Eisold B, Symader W, Gallé T (2010) Kohäsive Feinpartikel in fluvialen Systemen: einige Gedanken zu Erkenntnissen und Forschungsdefiziten. *UWSF - Z Umweltchem Ökotox* 22:631–644. doi:10.1007/s12302-010-0168-8.
16. Ciszewski D, Grygar TM (2016) A review of flood-related storage and remobilization of heavy metal pollutants in river systems. *Water Air Soil Pollut* 227:239. doi:10.1007/s11270-016-2934-8.
17. Bellanova P, Schwarzbauer J, Reicherter K (2024) Inventory of aqueous and sediment-associated organic pollutants released by the 2021 flood in the Vicht–Inde catchment, Germany. *Environ Sci Eur* 36:110. doi:10.1186/s12302-024-00925-6.

Korrespondenzadresse:

Alexandra Weber
Lehrstuhl für Physische Geographie und Geoökologie
RWTH Aachen University
Wüllnerstraße 5b
52062 Aachen
Mail: alexandra.weber@geo.rwth-aachen.de
Tel.: +49 241 80 96040