



Gewinnung von Reifenabrieb aus Umweltproben durch Dichteabtrennung mit NaI-Schwerlösung als mögliches Referenzmaterial für umweltrelevante Prozessstudien – Exemplarische Testungen an einer Gewässerprobe

Angus Rocha Vogel^{1,2,*} (angus.rocha.vogel@ufz.de), Maximilian Reisch¹ (maximilian.reisch@st.ovgu.de),
Wolf von Tümpling^{1,2} (wolf.vontuempling@ufz.de)

¹ Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH – UFZ, Zentrale Gewässeranalytik und Chemometrie, Brückstraße 3a, 39114 Magdeburg

² Friedrich-Schiller-Universität Jena, Institut für Anorganische und Analytische Chemie, Humboldtstraße 8, 07743 Jena

Abstract

Reifenabrieb ist eine große Emissionsquelle im Verkehrsbereich. Aktuell geht man für Deutschland von ca. 100.000 t a⁻¹ aus. Dies entspräche 1/3 der jährlichen Mikroplastikemissionen. Bis zu 20 % des Reifenabriebs werden schätzungsweise ins Gewässer eingetragen. Eine bisher nicht gelöste Herausforderung ist, geeignetes Reifenabriebmaterial für Untersuchungen zum Verhalten von Reifenabrieb im Gewässer zu erhalten, das allgemeingültige Aussagen zulässt. Die Abtrennung von Reifenabrieb aus einer Umweltprobe mithilfe einer Schwerlösung ist eine Möglichkeit. Als Umweltprobe dienten Partikel von einer Kartbahn. Reifenabriebpartikel wurden so vollständig wie möglich abgetrennt. Auf die Adsorption von ausgewählten Spurenelementen an den Partikeln hatte diese Abtrennung keinen signifikanten Einfluss.

Einleitung

Seit über 30 Jahren reguliert die Europäische Union die Partikelemissionen von mit Diesel- oder Ottomotor angetriebenen Kraftfahrzeugen. Der Fokus liegt primär auf den Partikeln, die durch die Kraftstoffverbrennung entstehen. In der neuen, aktuell verhandelten Euro-7 Abgasnorm [1] sollen die Emissionen sog. *Nicht-Auspuff-Emissionen* (engl. *non-exhaust emissions*, NEE) erstmals Berücksichtigung finden. Dazu zählen neben Bremsenabrieb und Straßenabrieb auch Reifenabrieb. Laut einer Studie des ADAC erzeugen Pkw im Durchschnitt 118 mg km⁻¹ Reifenabrieb. Dabei reicht die Spanne von 95–136 mg km⁻¹, wobei die meisten Hersteller im Bereich zwischen 114–121 mg km⁻¹ liegen [2]. Summiert auf das ganze Jahr und sämtliche Fahrzeugtypen ergeben sich somit nach Kalkulationen von BAENSCH-BALTRUSCHAT *et al.* ca. 100.000 t Reifenabrieb in Deutschland [3].

Bis zu 20.000 t a⁻¹ Reifenabrieb gelangen in deutsche Gewässer. Haupteintragspfade sind die Autobahnabflüsse sowie innerstädtische Trennkanalisationssysteme, die den Regenbedingten Straßenabfluss nahezu direkt in die nächste Vorflut ableiten [3].

Im Oberflächenwasser sind prinzipiell verschiedene Interaktionen mit der aquatischen Umwelt möglich. Reifenabriebpartikel können von Organismen aufgenommen und verdaut

werden. Außerdem ist ein Auslaugen u. a. organischer Substanzen aus den Partikeln möglich, bspw. das Antioxidans 6-PPD (N-(1,3-Dimethylbutyl)-N'-phenyl-p-phenylendiamin), das im Verdacht steht, ökotoxikologisch relevant zu sein, vgl. [4–6]. Durch verschiedene Mechanismen kann der Reifenabrieb im Gewässer zersetzt werden [7], wobei ein biologischer Abbau innerhalb von drei Monaten kaum stattfindet [8].

Bisher wenig untersucht wurde die mögliche Eigenschaft von Reifenabrieb als Trägermaterial u. a. für Spurenelemente im Gewässer. Bekannt ist, dass Cd²⁺ und Pb²⁺ unter Laborbedingungen in künstlichen Salzlösungen an Reifenabrieb adsorbieren [9]. Eigene Untersuchungen in Zusammenarbeit mit der Universität Greifswald konnten dies bei naturnahen Bedingungen mit filtriertem Flusswasser der Freiburger Mulde (bei Rothenfurth, Landkreis Mittelsachsen) u. a. auch für Cr, Ni und As nachweisen [10]. Das Untersuchungsobjekt Reifenabrieb an sich bleibt herausfordernd, da bisher kein qualifiziertes Referenzmaterial zur Verfügung steht.

Gewinnung von geeignetem Reifenabriebmaterial

Reifengummi ist kein definiertes Material, da jeder Hersteller seine eigene Rezeptur besitzt. Hauptbestandteile sind natürlicher und synthetischer Kautschuk (40–50 %) neben Füllstoffen wie Silica und Ruß (30–35 %), Weichmachern (15 %), Vulkanisierungsagenzien (2–5 %) und Additiven (5–10 %), die u. a. vor Oxidation schützen sollen (vgl. 6-PPD) [11].

Für die Bewertung der Umweltauswirkungen von Reifenabrieb ist es deshalb wichtig, eine möglichst repräsentative (Umwelt-) Probe zu nutzen, die die Materialvielfalt abbilden kann. Mit Hinblick auf die Untersuchungen der Adsorption von Spurenelementen auf Reifenabrieb spielt die Oberflächenbeschaffenheit eine entscheidende Rolle. Reifenabriebpartikel, die auf der Straße anfallen, sind längliche „wurstförmige“ Gummipartikel, die eine Verkrustung mineralischer Komponenten von der Straße aufweisen (vgl. Abb. 1 roter Kreis) [12].

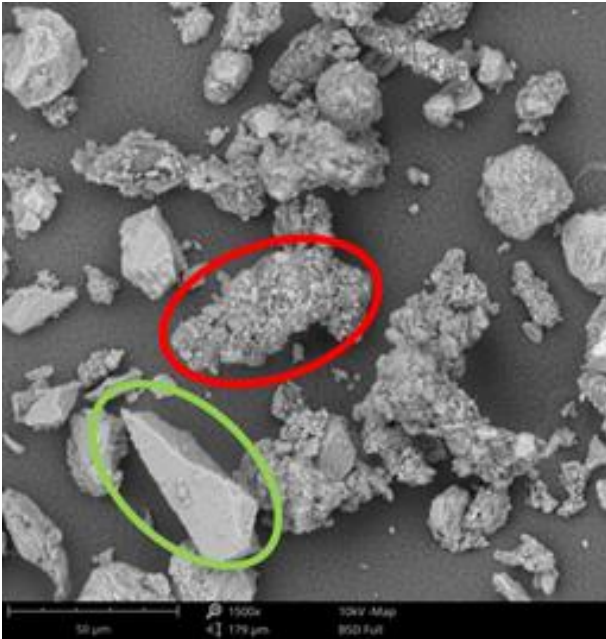


Abb.1: Elektronenmikroskopie-Aufnahmen einer Reifenabriebprobe von der Straße ($< 125 \mu\text{m}$). 1,500fache Vergrößerung, 10 kV. Im roten Kreis ist ein Reifenabriebpartikel mit mineralischer Verkrustung markiert, im grünen Kreis ein möglicher mineralischer Bestandteil von der Straße. Mit Erlaubnis entnommen aus [10] und zugeschnitten

Für die Bewertung der Aussagekraft von Experimenten mit Reifenabrieb ist die Art und Weise, wie dieser Reifenabrieb generiert wurde, entscheidend. Bei umweltrelevante Fragestellungen sollten die Partikel vergleichbar mit dem Reifenabrieb auf der Straße sein, bspw. durch Einsatz eines Straßensimulators (vgl. [13]) oder durch Umweltproben. Als Umweltprobe kann einerseits Straßenkehricht bspw. aus Autobahntunneln oder von Kartbahnen verwendet werden. Andererseits ist es möglich, Reifenabriebmaterial hinter einem fahrenden Auto aufzusaugen. Beide Probenarten enthalten neben Reifenabrieb auch sämtliche Partikelarten, die auf der Straße anfallen (u. a. Straßen und Bremsenabrieb).

Wird eine Umweltprobe genutzt, muss der Anteil an reinem Reifenabrieb bestimmt werden. Zwei Methoden haben sich dabei etabliert: Entweder wird der Anteil über den Zn-Gehalt der Probe abgeschätzt (Zn ist als Wirkbeschleuniger im Reifen zu ca. 1 % enthalten [13]) oder über den Styrol-Butadien-Kautschuk, den man mittels TED-GC-MS bestimmen kann [14]. Bei der Zn-Methode kann als Korrekturfaktor 0,78 einbezogen werden, da laut HILLENBRANDT *et al.* 78 % der Zn-Emissionen im Verkehr durch Reifen verursacht werden [15].

Hinter einem fahrenden Auto aufgesaugtes Material enthält etwa 12 % Reifenabrieb, bezogen auf den Zn-Anteil der Probe [10]. Der höchste Zn-Gehalt an Reifenabrieb in einer Umweltprobe konnten in Partikeln von einer Outdoor-Kartbahn mit ca. 56 % nachgewiesen werden. Durch den geringen Umwelteinfluss, dem dieses Material ausgesetzt war, wurde es für die folgenden Untersuchungen genutzt.

Chemisch-analytische Charakterisierung

Zur Bestimmung der Elementgehalte in den Proben wurden diese mit 6 mL HNO_3 und 2 mL HCl in einer Mikrowelle (Discover, CEM GmbH) aufgeschlossen. Die Elementbestimmungen erfolgten mittels ICP-MS/MS (8800 Triple-Q, Agilent Technologies Inc.).

Dichteabtrennung von Reifenabrieb aus Umweltproben mittels NaI-Schwerlösung

Wie erwähnt, enthalten Umweltproben neben Reifenabrieb auch noch andere Partikelarten. Eine Schwierigkeit für Adsorptionsexperimente ist es, den ausschließlichen Einfluss des Reifenabriebs zu untersuchen und die anderen Effekte herauszurechnen. Dementsprechend ist eine Trennmethode notwendig, mit der Reifenabrieb von anderen Komponenten isoliert und für spätere Experimente zur Verfügung gestellt werden kann.

Eine Möglichkeit ist eine Dichtabtrennung mit einer Schwerlösung. Reifenabrieb hat eine Dichte von $1,5\text{--}1,8 \text{ g cm}^{-3}$ [3], [16]. Andere Bestandteile von Umweltproben auf der Straße besitzen eine höhere Dichte, bspw. Asphalt ($2,5\text{--}2,8 \text{ g cm}^{-3}$ [17]), Bremsenabrieb ($2,6 \pm 0,5 \text{ g cm}^{-3}$ [18]) oder Quarz ($2,3\text{--}2,5 \text{ g cm}^{-3}$ [19]). Wird eine Schwerlösung genutzt, die eine Dichte um $1,8 \text{ g cm}^{-3}$ besitzt, schwimmen die Reifenabriebpartikel ggf. mit inkorporierten Straßenpartikeln auf, während die anderen Komponenten sedimentieren oder in Lösung gehen.

Als Schwerlösung wird in der Literatur u. a. eine Polywolframat-Lösung verwendet [20], [21]. Da diese Lösung einen stark sauren pH-Wert besitzt, besteht das Risiko, dass die Integrität der Oberfläche und die Adsorption der Spurenelemente nachhaltig beeinflusst werden. Bei einem analogen Vorgehen mit einer neutralen NaI-Lösung ($\rho = 1,8 \text{ g cm}^{-3}$) sollte dies ausgeschlossen werden können.

Für eine Validierung der adaptierten Methode mit einer NaI-Lösung wurden in einer Doppelbestimmung (indiziert mit #1 und #2) 1,5 g Kartbahnpartikel (KBP) der Größenfraktion $200\text{--}630 \mu\text{m}$ mit 30 mL NaI-Lösung versetzt und 10 min bei 2000 rpm zentrifugiert. Über Nacht sedimentieren die schweren Bestandteile, sodass am Folgetag der aufschwimmende Probenanteil (APA) dekantiert, die Partikel mit 250 mL MQ-Wasser gewaschen und getrocknet werden konnten. Der sedimentierte Probenanteil (SPA) wurde im Anschluss ebenfalls mit 250 mL MQ-Wasser gewaschen und getrocknet.

Der APA enthielt ca. 57 % der ursprünglichen Mischprobe, der SPA ca. 27 %. Die restlichen 16 % sind entweder Transferverluste oder ggf. Material, das sich in der NaI-Lösung löste. In Abb. 2 sind die Ursprungsprobe KBP und die abgetrennten Probenanteile APA und SPA dargestellt.

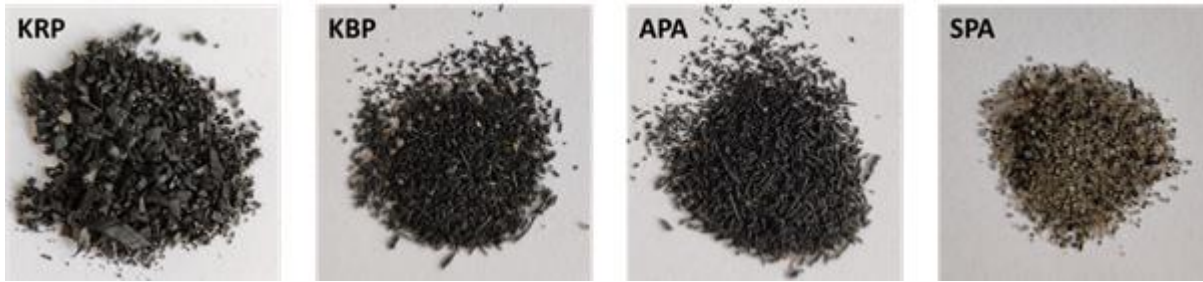


Abb. 2: Photographien von Kartreifenpartikeln (KRP), Kartbahn-partikel (KBP) sowie des aufschwimmenden Probenanteils (APA) und sedimentierten Probenanteils (SPA)

Bestimmung des Reifenanteils im Probenmaterial

Der Reifenanteil in den untersuchten Proben wurde anhand des -gehalts ohne Korrekturfaktor abgeschätzt, da die äußeren Einflüsse auf der Kartbahn als gering eingeschätzt wurden. Als Referenz wurde der Zn-Gehalt von Reifengummipartikeln eines Kartbahnreifens derselben Kartbahn bestimmt. Die Ergebnisse sind in Tab. 1 zusammengefasst. Die KBP enthalten demnach ca. 56 % *reines* Reifenmaterial, der APA enthält ca. 70 % und der SPA ca. 18 %. Analoge Anteile wurden für den Glühverlust nach DIN EN 15935 – 2021-10 ermittelt. Da keine signifikanten Verunreinigungen in der APA-Probe sichtbar sind, werden die verbliebenen 30 % auf mineralische Verkrustungen zurückgeführt, die 25–50 % des Reifenabriebpartikels ausmachen können [3], [12].

Tabelle 1: Gegenüberstellung der Elementgehalte ausgewählter Spurenelemente in Kartreifenpartikeln (KRP), Kartbahnpartikeln (KBP) der Größenfraktion 200–630 µm, sowie des aufschwimmenden Probenanteils (APA) und sedimentierte Probenanteils (SPA).

Probe	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb
KRP / mg kg ⁻¹	2,1 ± 0,07	2,5 ± 0,28	2,2 ± 0,4	6950 ± 0	< 0,6	< 0,1	0,60 ± 0,10
KBP / mg kg ⁻¹	140 ± 20	55 ± 13	92 ± 1,7	3900 ± 230	2,2 ± 0,3	0,27 ± 0,07	42 ± 1,0
APA #1 / mg kg ⁻¹	140	57 ± 11	109 ± 4	4790 ± 40	2,4 ± 0,2	0,25 ± 0,07	61 ± 4
APA #2 / mg kg ⁻¹	165 ± 21	115	112 ± 16	4990 ± 290	2,8 ± 0,4	0,30 ± 0	49 ± 1,4
SPA #1 / mg kg ⁻¹	57 ± 25	23 ± 13	103	1130	3,2 ± 2,0	< 0,1	6,7
SPA #2 / mg kg ⁻¹	62	24	103	1400	2,7 ± 0,8	< 0,1	7,0

Bekannt ist, dass Reifenabrieb ein Konglomerat aus Reifengummi und mineralischen Bestandteilen der Fahrbahn ist [12]. Durch die Akkumulation von Spurenelementen aus dem Straßenstaub sind höhere Elementgehalte in den KBP im Vergleich zum Kartreifen (KRP) zu erwarten. Durch die Dichteabtrennung findet keine analytisch nachweisbare Desorption der gebundenen Spurenelemente vom Reifenabrieb statt. Es ist deshalb davon auszugehen, dass die Elementakkumulation im Wesentlichen am Reifenabrieb erfolgt. Wie in Abb. 2 erkennbar, enthält der SPA überwiegend Sandpartikel, die kein großes Adsorptionspotenzial aufweisen [22]. Die gemessenen Elementgehalte im SPA Probenmaterial sind deshalb signifikant niedriger im Vergleich zum KBP und APA. Bisher ungeklärt ist, warum im SPA keine erniedrigten Werte für Cu und As nachgewiesen werden konnten.

Vergleich der Elementgehalte nach Dichteabtrennung

Neben Zn wurden parallel auch weitere prioritäre Spurenelemente (Cr, Ni, Cu, As, Cd, Pb) untersucht. In Tab. 1 sind die Elementgehalte gegenübergestellt. Vier Punkte lassen sich daraus ableiten: 1. KRP ist gering belastet mit Ausnahme von Zn. 2. Das Material von der Kartbahn (KBP) enthält erheblich mehr prioritäre Spurenelemente als der Kartreifen. 3. Die Elementgehalte zwischen KBP und APA unterscheiden sich nur geringfügig (außer Zn). 4. Die Elementgehalte am SPA sind signifikant niedriger als in APA und KBP mit Ausnahme von Cu und As.

Seminatürliches Experiment zur Adsorption von Spurenelementen

Zum Vergleich des Akkumulationsverhaltens von KBP und APA wurde ein Adsorptionsexperiment unter naturnahen Bedingungen durchgeführt, wie von GLAUBITZ *et al.* [10] beschrieben. Eine Wasserprobe aus der Freiburger Mulde wurde entnommen, diese im Labor auf 0,2 µm filtriert, in Erlenmeyerkolben mit den KBP bzw. APA #1 versetzt und für 24 h bei 150 U min⁻¹ geschüttelt. Die Partikelkonzentration betrug 66,7 mg L⁻¹.

In Tabelle 2 sind die Ergebnisse der Adsorption der untersuchten Elemente für Kartbahnpartikel (KBP) und dem aufschwimmenden Probenanteil (APA #1) nach 24 h gegenübergestellt. Mit Berücksichtigung der Messunsicherheiten kann eine Akkumulation nur für Cadmium nachgewiesen werden. Dazu gibt es offensichtlich keinen messbaren Einfluss der NaI-Schwerlösung auf das Adsorptionsverhalten an KBP bzw. APA.

Tabelle 2: Gegenüberstellung der Elementgehalte ausgewählter Spurenelemente in und an Kartbahnpartikeln (KBP) und aufschwimmendem Probenanteil (APA #1) vor (v. Akk.) und nach Adsorptionsexperimenten (n. Akk.) mit einer filtrierten Gewässerprobe der Freiburger Mulde.

Probe	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb
v. Akk. KBP / mg kg ⁻¹	140 ± 20	55 ± 13	92 ± 1,7	3900 ± 230	2,2 ± 0,3	0,27 ± 0,07	42 ± 1,0
n. Akk. KBP / mg kg ⁻¹	134 ± 6	52 ± 1,5	115 ± 22	4000 ± 500	2,3 ± 0,7	0,6 ± 0,06	41 ± 5
Änderung	n. s. ¹	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	+120 %	n. s.
v. Akk. APA #1 / mg kg ⁻¹	140	57 ± 11	109 ± 4	4790 ± 40	2,4 ± 0,2	0,25 ± 0,07	61 ± 4
n. Akk. APA #1 / mg kg ⁻¹	152 ± 8	54 ± 9	106 ± 7	4900 ± 190	2,5 ± 1,2	0,6 ± 0,06	54 ± 3
Änderung	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	+140 %	n. s.
Freiberger Mulde / µg L ⁻¹	< 0,50	2,9	6,3	243	11	2,8	1,5

¹ n. s.: nicht signifikant

Fazit und Ausblick

Die Experimente hatten primär zum Ziel, Reifenabrieb aus einer Umweltprobe zu isolieren. Der Anteil an *reinem* Reifenabrieb wurde auf ca. 70 % gesteigert, wobei angenommen wird, dass die verbliebenen 30 % auf die Partikelverkrustungen zurückzuführen sind, sodass die Abtrennung nahezu vollständig war. Die genutzte Dichteabtrennung mit NaI-Lösung hatte zudem keine negativen Auswirkungen auf das Adsorptionsverhalten von Spurenelementen an den untersuchten Materialien. Deshalb eignet sich die Methode prinzipiell zur Erzeugung von Reifenabriebreferenzmaterial für umweltrelevante Prozessuntersuchungen.

Die verwendete Konzentration von 66,7 mg L⁻¹ ist als nicht naturnah einzustufen. In einem weiteren Schritt sind naturnahe Konzentrationen im Bereich von 10 bis 20 mg L⁻¹ Reifenabrieb (vgl. [23]) zur Validierung zu nutzen.

Danksagung

Wir danken der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU), die diese Arbeiten im Rahmen des Promotionsstipendiums AZ 20022/052 von Angus Rocha Vogel unterstützt. Bei den Analysen waren Andrea Hoff und Nils Ribbe maßgeblich beteiligt.

Literatur

- [1] EUROPÄISCHE KOMMISSION: Kommission schlägt neue Euro-7-Normen zur Verringerung der Schadstoffemissionen von Fahrzeugen und zur Verbesserung der Luftqualität vor (Pressemitteilung). Brüssel: Europäische Kommission, 2022.
- [2] ADAC E. V.: Dem Mikroplastik auf der Spur: Weniger Reifenabrieb ist möglich. URL: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/ausstattung-technik-zubehoer/reifen/reifenkauf/reifenabrieb-mikroplastik/#wie-hoch-ist-der-durchschnittliche-reifenabrieb>. abgerufen am 2024-02-12.
- [3] BAENSCH-BALTRUSCHAT, BEATE; KOCHER, BIRGIT; KOCHLEUS, CHRISTIAN; STOCK, FRIEDERIKE; REIFFERSCHIED, GEORG: Tyre and road wear particles - A calculation of generation, transport and release to water and soil with special regard to German roads. *Sci. Total Environ.* **2021**, 757, 141939.
- [4] KLÖCKNER, PHILIPP; SEIWERT, BETTINA; WAGNER, STEPHAN; REEMTSMA, THORSTEN: Organic markers of tire and road wear particles in sediments and soils: Transformation products of major antiozonants as promising candidates. *Environ. Sci. Technol.* **2021**, 55 (17), 11723.
- [5] PROSSER, R.S.; SALOLE, J.; HANG, S.: Toxicity of 6PPD-quinone to four freshwater invertebrate species. *Environ. Pollut.* **2023**, 337, 122512.
- [6] TIAN, ZHENYU; ZHAO, HAOQI; PETER, KATHERINE T.; GONZALEZ, MELISSA; WETZEL, JILL; WU, CHRISTOPHER; HU, XIMIN; PRAT, JASMINE; U. A.: A ubiquitous tire rubber-derived chemical induces acute mortality in coho salmon. *Science* **2021**, 371 (6525), 185.
- [7] WAGNER, STEPHAN; KLÖCKNER, PHILIPP; REEMTSMA, THORSTEN: Aging of tire and road wear particles in terrestrial and freshwater environments – A review on processes, testing, analysis and impact. *Chemosphere* **2022**, 288, 132467.
- [8] KLUN, BARBARA; ROZMAN, ULA; KALČÍKOVÁ, GABRIELA: Environmental aging and biodegradation of tire wear microplastics in the aquatic environment. *J. Environ. Chem. Eng.* **2023**, 11 (5), 110604.
- [9] FAN, XIULEI; MA, ZIXUAN; ZOU, YEFENG; LIU, JIAQIANG; HOU, JUN: Investigation on the adsorption and desorption behaviors of heavy metals by tire wear particles with or without UV ageing processes. *Environ. Res.* **2021**, 195, 110858.
- [10] GLAUBITZ, FRANZ; ROCHA VOGEL, ANGUS; KOLBERG, YANNIK; VON TÜMPLING, WOLF; KAHLERT, HEIKE: Detailed insights in adsorption process of heavy metals on tire wear particles. *Environ. Pollut.* **2023**, 335, 122293.
- [11] SOMMER, FRANK; DIETZE, VOLKER; BAUM, ANJA; SAUER, JAN; GILGE, STEFAN; MASCHOWSKI, CHRISTOPH; GIERÉ, RETO: Tire abrasion as a major source of microplastics in the environment. *Aerosol. Air Qual. Res.* **2018**, 18 (8), 2014.

- [12] KREIDER, MARISA L.; PANKO, JULIE M.; MCATEE, BRITT L.; SWEET, LEONARD I.; FINLEY, BRENT L.: Physical and chemical characterization of tire-related particles: Comparison of particles generated using different methodologies. *Sci. Total Environ.* **2010**, 408 (3), 652.
- [13] KOCHER, BIRGIT; BROSE, SUSANNE; FEIX, JOHANNES; GÖRG, CLAUDIA; PETERS, ANGELA; SCHENKER, KLAUS: *Stoffeinträge in den Straßenseitenraum - Reifenabrieb*, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Verkehrstechnik. Bremerhaven: Bundesanstalt für Straßenwesen, **2010** – ISBN 978-3-86509-976-1.
- [14] EISENTRAUT, PAUL; DÜMICHEN, ERIK; RUHL, AKI SEBASTIAN; JEKEL, MARTIN; ALBRECHT, MIRKO; GEHDE, MICHAEL; BRAUN, ULRIKE: Two birds with one stone – fast and simultaneous analysis of microplastics: Microparticles derived from thermoplastics and tire wear. *Environ. Sci. Techn. Lett.* **2018**, 5 (10), 608.
- [15] HILLENBRAND, THOMAS; TOUSSAINT, DOMINIK; BÖHM, EBERHARD; FUCHS, STEPHAN; SCHERER, ULRIKE; RUDOLPHI, ALEXANDER; HOFFMANN, MARTIN; UMWELTBUNDESAMT (Hrsg.): *Einträge von Kupfer, Zink und Blei in Gewässer und Böden – Analyse der Emissionspfade und möglicher Emissionsminderungsmaßnahmen*, *TEXTE 19/05*. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt, **2005**.
- [16] KLÖCKNER, PHILIPP; SEIWERT, BETTINA; EISENTRAUT, PAUL; BRAUN, ULRIKE; REEMTSMA, THORSTEN; WAGNER, STEPHAN: Characterization of tire and road wear particles from road runoff indicates highly dynamic particle properties. *Water Res.* **2020**, 185, 116262.
- [17] RENKEN, PETER; WISTUBA, MICHAEL P.: *Untersuchung der Dauerhaftigkeit unterschiedlicher Asphaltbinderkonzepte*, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. Bremen: Fachverlag NW in der Carl Schünemann Verlag GmbH, **2018** – ISBN 978-3-95606-372-5.
- [18] NOSKO, OLEKSII; OLOFSSON, ULF: Effective density of airborne wear particles from car brake materials. *J. Aerosol Sci.* **2017**, 107, 94.
- [19] HAYNES, WILLIAM M.: *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 95th Edition. Hoboken: CRC Press, **2014** – ISBN 978-1-4822-0868-9.
- [20] WEYRAUCH, STEFFEN; SEIWERT, BETTINA; VOLL, MILENA; WAGNER, STEPHAN; REEMTSMA, THORSTEN: Accelerated aging of tire and road wear particles by elevated temperature, artificial sunlight and mechanical stress – A laboratory study on particle properties, extractables and leachables. *Sci Total Environ.* **2023**, 904, 166679.
- [21] KLÖCKNER, PHILIPP; REEMTSMA, THORSTEN; EISENTRAUT, PAUL; BRAUN, ULRIKE; RUHL, AKI SEBASTIAN; WAGNER, STEPHAN: Tire and road wear particles in road environment – Quantification and assessment of particle dynamics by Zn determination after density separation. *Chemosphere* **2019**, 222, 714.
- [22] WANG, TING; CAO, WEIYUAN; WANG, YINGQI; QU, CHAO; XU, YUFENG; LI, HAIXIANG: Surface modification of quartz sand: A review of its progress and its effect on heavy metal adsorption. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* **2023**, 262, 115179.
- [23] WIK, ANNA; DAVE, GÖRAN: Occurrence and effects of tire wear particles in the environment – A critical review and an initial risk assessment. *Environ. Pollut.* **2009**, 157 (1), 1.

Korrespondenzadresse

Angus Rocha Vogel
Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH – UFZ
Zentrale Gewässeranalytik und Chemometrie
Brückstraße 3a
39114 Magdeburg
E-Mail: angus.rocha.vogel@ufz.de