



Spurenstoffmanagement im Donaueinzugsgebiet

O. Zoboli · A. Kovacs · S. Kittlaus · A. Clement · M. K. Kardos · Z. Jolánkai · R. Kaps · O. Gabriel · M. Broer · J. van Gils · S. Loos · N. Weber · R. Milacic · G. Dimova · R. Tonev · I. Nedelea · E. Marchidan · M. Zessner

Angenommen: 28. Juni 2023
 © Der/die Autor(en) 2023

Zusammenfassung Spurenstoffe stellen eine der zentralen Herausforderungen für die Wasserwirtschaft im Donaueinzugsgebiet dar. Der vorliegende Artikel präsentiert das Konzept und einen Überblick zu den Ergebnissen des Projekts Danube Hazard m³c, welches im Rahmen des Interreg-Danube-Transnational-Programms der EU in den Jahren 2020 bis 2023 abgewickelt wurde. Im Zuge des Projekts konnten Spurenstoffkonzentrationen in unterschiedlichen Eintragspfaden und Gewässersystem aus verschiedenen nationalen und internationalen Monitoringprogrammen in einer umfassenden

und harmonisierten Datenbank erfasst und diese Datenbasis durch ein gezieltes Monitoring in unterschiedlichen Umweltmedien erweitert werden. Auf diesen Daten aufbauend wurden eine einzugsgebietsweite Emissionsmodellierung umgesetzt und gewonnene Erkenntnisse für abgestimmte Politikempfehlungen genutzt. Trotz zum Teil großer Anstrengungen in Ländern des Donaueinzugsgebiets, den Monitoringanforderungen der EU-WRRL nachzukommen, zeigen sich bei dem Versuch, die Daten unterschiedlicher Länder in harmonisierter Weise zu erfassen, einige Schwierigkeiten, die dieses Vorhaben behindern. Auch zeigt sich, dass es massiver zusätzlicher Anstrengungen der Donauländer bedürfen wird, um den enormen Herausforderungen gewachsen zu sein, die an ein zukünftiges Spurenstoffmanagement im Lichte vielfältiger Anforderungen und Veränderungen zu stellen sein wird. International abgestimmtes Monitoring, harmonisierte Datenerfassung und einzugsgebietsbezogene Emissionsmodellierung sollten grundlegende Elemente für ein wissenschaftsbasiertes Spurenstoffmanagement sein. Maßnahmen zur Verbesserung der Belastungssituation der Gewässer des Donaueinzugsgebiets sollten entsprechend der Hierarchie der Belastungskontrolle konzipiert werden. Dies bedeutet Kontrollen beim Einsatz von Spurenstoffen, um deren Freisetzung zu mindern, Kontrollen der Emissionen über technische Einrichtungen der Wasserwirtschaft und Minderung des Transports durch natürliche Barrieren wie z. B. Pufferstreifen.

Management of trace contaminants in the Danube river basin

Abstract Trace substances represent one of the central challenges for water management in the Danube River Basin. This article presents the concept and an overview of the results of the project Danube Hazard m³c, which was carried out within the framework of the Interreg Danube Transnational Programme of the EU from 2020 to 2023. In the course of the project, trace substance concentrations in different input pathways and water systems from different national and international monitoring programs were recorded in a comprehensive and harmonized database and this database was expanded by targeted monitoring in different environmental media. Based on these data, a catchment-wide emission modeling was implemented and gained knowledge was used for coordinated policy recommendations. Despite great efforts in the countries of the Danube basin to meet the monitoring requirements of the EU WFD, the attempt to collect data from different countries in a harmonized way shows some difficulties that hinder this project. It also shows that massive additional efforts of the Danube countries will be necessary to meet the enormous challenges of a future trace substance management in the light of manifold requirements and changes. Internationally coordinated monitoring, harmonized data collection and catchment-based emission modeling should be basic elements for a knowledge-based trace substance management. Measures to improve the pollution situation of the waters of the Danube River Basin should be conceptualized according to the hierarchy of pollution control. This means controls on the use of trace substances to mitigate their release, controls on emissions via technical water management facilities to reduce emissions to water bodies, and mitigation of transport in

Ass.-Prof. Dr. O. Zoboli, MSc ·
 Dipl.-Geoökol. S. Kittlaus ·
 R. Kaps, MSc PhD ·
 Univ.-Ass. DI N. Weber, BSc ·
 Univ.-Prof. DI Dr. M. Zessner (✉)
 Institut für Wassergüte und
 Ressourcenmanagement, TU Wien,
 Wien, Österreich
 mzessner@iwag.tuwien.ac.at

Dr. A. Kovacs
 Internationale Kommission zum
 Schutz der Donau, Wien, Österreich

Dr. A. Clement · Dr. M. K. Kardos ·
 Z. Jolánkai
 Technische und
 Wirtschaftswissenschaftliche
 Universität, Budapest, Ungarn

Dr. O. Gabriel · M. Broer, MSc
 Umweltbundesamt, Wien, Österreich

J. van Gils · S. Loos
 Deltares, Niederlande

Prof. Dr. R. Milacic
 Jožef Stefan Institute, Ljubljana,
 Slowenien

Associate Prof. G. Dimova · R. Tonev
 Bulgarian Water Association, Sofia,
 Bulgarien

I. Nedelea · E. Marchidan
 National Administration „Romanian
 Waters“, Bucharest, Rumänien

Schlüsselwörter

Emissionsmodellierung ·
 Flussgebietsmanagement ·
 Gewässermonitoring ·
 Gewässerschutz ·
 Wasserrahmenrichtlinie

the environment through natural barriers such as buffer strips.

Keywords Emission modelling · River basin management · Water monitoring · Surface water pollution control · Water framework directive

1 Hintergrund und Herausforderungen

Chemikalien sind ein unverzichtbarer Bestandteil unseres Lebens. Sie sind in Konsumgütern enthalten, werden in Industrieprozessen, in der Landwirtschaft als Pestizide oder in der Human- und Tiermedizin eingesetzt. Einige dieser Verbindungen sind schwer abbaubar, giftig, bioakkumulativ und können, wenn sie in die Umwelt gelangen, das Leben im Wasser und den sicheren Verzehr von Fischen und Trinkwasser gefährden. Solche Chemikalien werden auch Spurenstoffe (SpS) genannt, da sie in „Spuren“ in den Gewässern zu finden sind und selbst in diesen Spuren Anlass für eine nähere Betrachtung geben. Solche Spurenstoffe in der Donau und deren Zubringern standen im Mittelpunkt des Projekts Danube Hazard m³c (DHm³c 2023), welches in diesem Artikel in seiner Vielfältigkeit vorgestellt wird.

Die EU-Wasserrahmenrichtlinie (2000/60/EU-Richtlinie, WRRL) ist das wichtigste Regelungsinstrument für den Gewässerschutz. Aus der großen Gruppe der SpS werden in der WRRL Stoffe ausgewählt, als prioritäre oder prioritär-gefährliche Stoffe bezeichnet und als solche geregelt. Flüsse kennen keine Grenzen. Daher werden persistente Stoffe länderübergreifend transportiert. Der Umgang mit ihnen erfordert internationale Zusammenarbeit, auch über die EU-Grenzen hinaus.

Trotz erheblicher Bemühungen der Länder des Donaueinzugsgebiets (DEG), die sich in einem gemeinsamen Bewirtschaftungsplan für das DEG sowie in nationalen Plänen widerspiegeln, besteht ein erhebliches Risiko, dass die Ziele der WRRL nicht erreicht werden (ICPDR 2021). Dies ist auch auf erhebliche Wissenslücken und mangelnde institutionelle Kapazitäten bei Monitoring und Modellierung von SpS-Emissionen und bei der Auswahl der wirksamsten Maßnahmen zurückzuführen.

2 Gesamtkonzept und Ziele des Projektes

Das Projekt Danube Hazard m³c (DHm³c) hat sich das Ziel gesetzt, Grundlagen für eine dauerhafte und effektive übernationale Begrenzung der Gewässerbelastung mit SpS im DEG zu schaffen. Dabei stützt sich das Projekt auf die drei grundlegenden Elemente der Wasserbewirtschaftung:

- Monitoring und Dateninventarisierung,
- Modellierung und
- Management (Zessner 2021).

Um des Gesamtziel des DHm³c-Projekts zu erreichen, wurden folgende Schritte der Zielerreichung definiert:

- Verbesserung des Grundlagewissens über die Herkunft und den Verbleib von SpS, die für die Gewässerbelastung verantwortlich sind.
- Entwicklung von Empfehlungen für die wasserwirtschaftliche Verwaltung, die auf einem wissenschaftsbasierten Systemverständnis aufbauen.

Die Projektergebnisse fließen direkt in die Arbeit der Internationalen Kommission zum Schutz der Donau (IKSD), die das grenzüberschreitende Wassermanagement im Donauroum koordiniert und internationale Flussbewirtschaftungspläne für das Donaueinzugsgebiet entwickelt (z. B. ICPDR 2021), und der nationalen Verwaltungen im Rahmen der strategischen Partnerschaften des Projekts ein.

3 Monitoring und Modellierung zur Erarbeitung der erforderlichen Wissensbasis

3.1 Konzept

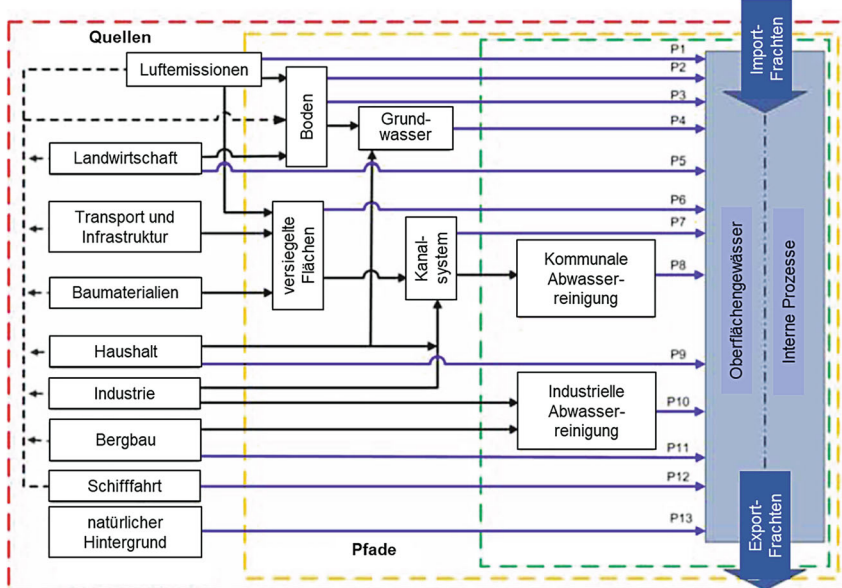
SpS können über unterschiedliche menschliche Tätigkeiten freigesetzt werden und über verschiedene punktuelle und diffuse Wege in Grund- und Oberflächenwasser gelangen (siehe Abb. 1). Ein fundiertes Verständnis von Freisetzung und Transport ist eine unverzichtbare Grundlage für die Entwicklung von Politiken und Strategien zur effizienten Kontrolle von SpS. Um die begrenzten Ressourcen, die den wasserwirtschaftlichen Behörden zur Verfügung stehen, optimal zu nutzen, ist es notwendig, die identifizierten Probleme nach ihrer Relevanz zu priorisieren und die effektivsten Ansatzpunkte auszuwählen.

Um diesem Vorhaben näher zu kommen, baut die Logik des DHm³c Projekts auf folgende Schritte:

1. Monitoring und Konzentrationsinventar: Monitoring liefert Daten über Vorkommen und Konzentration der berücksichtigten Stoffe in verschiedenen Emissionspfaden und Umweltkompartimenten (z. B. in Böden, Abwasser, atmosphärischer Deposition, Oberflächengewässern). Oberflächen- und Grundwasserdaten werden verwendet, um die Einhaltung der für bestimmte Verbindungen festgelegten Grenzwerte zu überprüfen. Konzentrationen in den unterschiedlichen Eintragspfaden liefern eine wesentliche Grundlage für Frachtberechnungen im Zuge der Emissionsmodellierung.
2. Aufbau von Emissionsinventaren: Neben regionalisierten Konzentrationsdaten zu Emissionspfaden werden sektorübergreifende Informationen zu Infrastruktur (z. B. kommunale und industrielle Wasserwirtschaft und eingeleitete Wassermengen), Hydrologie (z. B. Gewässernetz, Abfluss, Abflusskomponenten), Landnutzung (z. B. Landwirtschaft, Bergbau) und Landschaftsmorphologie und Erosionsberechnungen benötigt, um eine solide Grundlage für eine Emissionsmodellierung zu erhalten.
3. Modellimplementierung und Anwendung: Die gesammelten Daten fließen in Emissionsmodelle, wo Konzentrationsdaten mit Abflüssen und Feststofftransport (beim Emissionsmodell MoRE) oder Aktivitätsraten und Emissionsfaktoren (beim DHSM Modell, siehe auch Abschn. 3.5) zu Emissionsfrachten über unterschiedliche (auch diffuse) Eintragspfade verknüpft werden. Emissionsmodelle können für unterschiedliche Aufgaben genutzt werden. Dazu gehören die Abschätzung der SpS-Konzentration in nicht überwachten Flüssen, die Bewertung der Relevanz verschiedener Quellen und Pfade der Wasserbelastung sowie die Berechnung der Auswirkungen unterschiedlicher zukünftiger Bewirtschaftungsstrategien.

3.2 Erfassung von Spurenstoffkonzentrationen in einer Datenbank

Im Rahmen des Projekts wurden fragmentiert vorhandene Informationen zu



Eintragspfade			
P1	Atmosphärische Deposition auf Oberflächengewässer	P8	Ablauf kommunaler Kläranlagen
P2	Erosion	P9	Direkteinleitungen aus Haushalten mit oder ohne Reinigung
P3	Oberflächenabfluss von versiegelten Flächen	P10	Direkteinleitungen aus industriellen Kläranlagen
P4	Zwischenabfluss, Drainagen und Grundwasser	P11	Direkteinleitungen aus Bergbau
P5	Direkte Einträge und Vertriftung	P12	Schifffahrt und andere gewässerinterne Aktivitäten (z. B. Fischzucht)
P6	Oberflächenabfluss von versiegelten Flächen	P13	Natürlicher Hintergrund
P7	Niederschlagsabfluss aus Regenkanälen, Mischwasserüberlauf und direkte Abwassereinleitungen		

Abb. 1 Quellen und Eintragspfade von SpS in die aquatische Umwelt. (Adaptiert nach Chorus und Zessner (2021) und EK (2012))

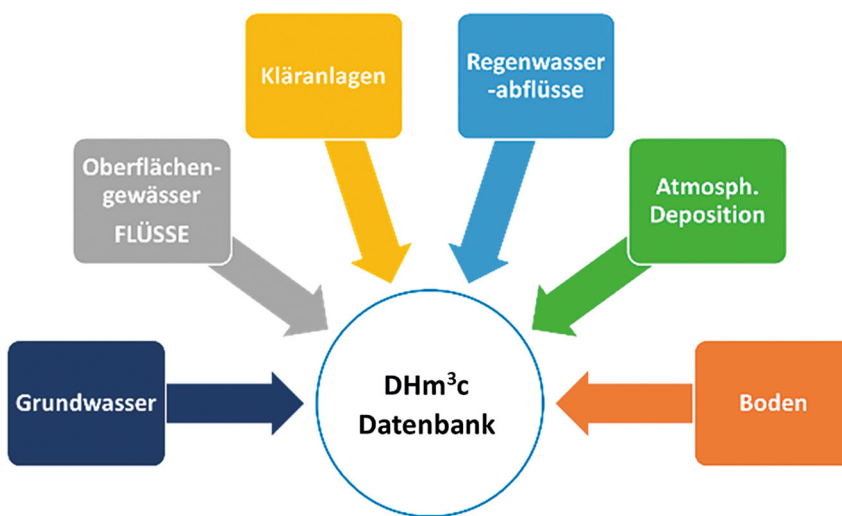
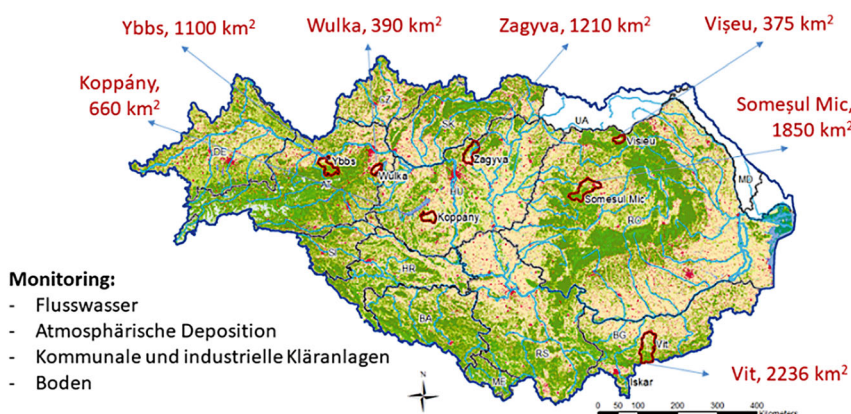


Abb. 2 Umweltkompartimente/Eintragspfade, von welchen Konzentrationsdaten in die Datenbank aufgenommen wurden

SpS-Konzentrationen in Flüssen, Böden, Abwasser, Grundwasser und anderen Umweltmedien aus verschiedenen Ländern des Donauraums gesammelt, in ein einheitliches Format gebracht und gemeinsam mit für die weiteren Zwecke der Datenbanknutzung erforderlichen Metadaten in einer umfassenden Datenbank zusammengeführt (Abb. 2). Zu den Metadaten zählen alle Informationen, die erforderlich sind, den Kontext, in dem eine Messung durchgeführt wurde, zu erfassen (z. B. Ort und Zeitpunkt bei Messungen in Fließgewässern, Kläranlagencharakteristiken wie Ausbau- und Belastungsgröße, Wassermengen, Behandlungsart, Lage). Diese Datenbank enthält neben Daten aus bereits vorhandenen Untersuchungen unterschiedlicher Länder alle Messergebnisse, die im Rahmen des DHm³c-Projekts erhoben wurden (siehe Abschn. 3.3). Die DHm³c-Datenbank bildet nun eine wertvolle Grundlage für die Bewertung des Belastungszustands in verschiedenen Kompartimenten, in Abhängigkeit von unterschiedlichen Rahmenbedingungen, für die Ableitung von Emissionsfaktoren und für die Ermittlung von Trends. Das vorrangige Ziel ist die Erstellung konsistenter Datensätze, die eine unverzichtbare Grundlage für eine Emissionsmodellierung im gesamten Einzugsgebiet darstellen. Natürlich zeigt eine umfassende Datenerhebung auch, welche Daten im DEG verfügbar sind. So konnten auch einige wichtige Datenlücken und kritische Unterschiede zwischen den Donauländern (u. a. fehlende Daten in Eintragspfaden, mangelnde Harmonisierung der Messmethoden und der Datensammlung) aufgezeigt werden. Die DHm³c-Datenbank wurde zur Bestandsaufnahme der SpS-Konzentrationen eingerichtet und mit Ende des Projekts öffentlich zugänglich gemacht (Kittlaus et al. 2023).

3.3 Ergänzendes Monitoring

Um kritische Informationslücken zu schließen und um alternative Monitoringansätze zu demonstrieren, wurden neben der Sammlung bereits vorhandener Daten gezielte Probennahme-Kampagnen in sieben Donau-Pilotregionen in Österreich, Bulgarien, Ungarn und Rumänien durchgeführt (Abb. 3). Die Regionen wurden so ausgewählt, dass sie besondere Merkmale in Bezug auf Klima, Hydrologie, Landnutzung und Gewässerbelastung widerspiegeln.



Monitoring:
 - Flusswasser
 - Atmosphärische Deposition
 - Kommunale und industrielle Kläranlagen
 - Boden

Abb. 3 Pilotregionen im Rahmen des Projekts (Clement et al. 2023). Data sources: background map: Corine land cover, Danube river basin: ICPDR

Unter Berücksichtigung der großen Anzahl von SpS in den Wasserkörpern konzentrierte sich das Projekt auf 35 Indikatorsubstanzen aus fünf verschiedenen Stoffgruppen, die im DEG von großer Bedeutung sind, und die für verschiedene Hauptquellen und Emissionswege repräsentativ sind. Zudem wurden die im Zuge des Projekts gewählten Substanzen so ausgewählt, dass mit der vorhandenen Analytik Werte über der Bestimmungsgrenze erwartet werden konnten. Zu den im Projekt analysierten Stoffen gehören:

- Industriechemikalien: Perfluoroctansulfonsäure (PFOS) und Perfluoroctansäure (PFOA), 4-tert-Octylphenol, Nonylphenol und Bisphenol A.
- Industriechemikalien und Verbrennungsnebenprodukte: 16 EPA Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAKs).
- Metalle: Quecksilber (Hg), Cadmium (Cd), Kupfer (Cu), Nickel (Ni), Blei (Pb), Zink (Zn), Chrom (Cr) und Arsen (As).

- Arzneimittel: Diclofenac und Carbamazepin.
- Pestizide: S-Metolachlor (Herbizid), einschließlich Metolachlor-ESA und Metolachlor-OA (Metaboliten), und Tebuconazol (Fungizid).

Das Monitoringkonzept umfasste die Messung von Konzentrationen und die Berechnung von Frachten (Stofftransport pro Zeit) in verschiedenen Pfaden und bei unterschiedlichen Abflussbedingungen in den Gewässern (Abb. 4). Auf diese Weise konnten wichtige Transportwege identifiziert, die Bedeutung von punktuellen und diffusen Belastungsquellen ermittelt und die Rolle von Hochwasserereignissen für den Schadstofftransport in Flüssen besser verstanden werden. Die bei dem Monitoring erhobenen Daten sind eine wichtige Informationsquelle für Stoffbilanzen und Input für Modellierungsaktivitäten.

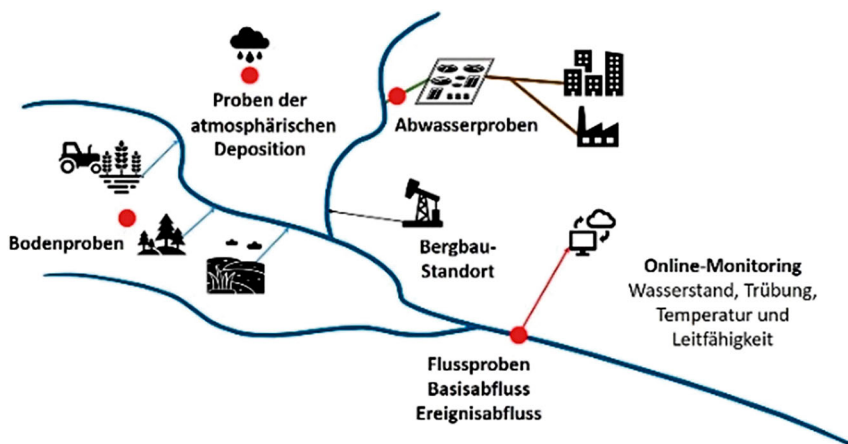


Abb. 4 DHm³c-Monitoringskonzept. (Tuchiu et al. 2023)

3.4 Datenbank Ergebnisse

3.4.1 Datenverfügbarkeit und Darstellung potenzieller Zielverfehlungen

Für die 35 Substanzen, auf welche im Rahmen von DHm³c ein besonderer Fokus gerichtet wurde, konnten im Zuge der Projektarbeiten über 10 Mio. Einzeldaten erhoben und in die Datenbank eingepflegt werden. Dabei sind große Unterschiede in Hinblick auf die Datenverfügbarkeit nach Medien und Ländern des DEGs gegeben (Abb. 5). Vor allem Konzentrationen der ausgewählten Stoffe in Oberflächengewässern konnten in den meisten Donauländern in hoher Anzahl von zumindest einigen Tausend bis zu einigen Millionen Einzeldaten erhoben werden. Darüber hinaus war die Datenverfügbarkeit sehr unterschiedlich. Während für Deutschland (DE), Österreich (AT) und Ungarn (HU) Daten von den meisten betrachteten Umweltmedien in einer Anzahl von mehr als 1000 verfügbar waren, konnten für Bosnien und Herzegowina (BA), Moldawien (MD) und Montenegro (ME) nur Daten aus Fließgewässern zur Verfügung gestellt werden. Hier wird auch deutlich, dass nicht in allen Fällen die national existierenden Daten gleich jenen sind, die auch für den Aufbau der Datenbank zur Verfügung standen. So war aufgrund eines fehlenden Projektpartners aus der Tschechischen Republik der Zugang zu den Datensätzen, die dort vorhanden sind, stark eingeschränkt. Aber auch aus Ländern, die im Projektkonsortium als Partner vertreten waren, konnten teilweise nicht alle existierenden Daten verfügbar gemacht werden, da administrative Hürden und Vorbehalte gegen die Publikation der Daten bestehen. Damit ergeben sich die in der Datenbank verfügbaren Daten aus den national oder in spezifischen Studien erhobenen Daten abzüglich jener, welche dem Projektteam im Zuge der Projektbearbeitung nicht zugänglich waren. Dies zeigt ein wesentliches Verbesserungspotenzial der vorliegenden Version der Datenbank.

Trotz dieser Einschränkung ist die Datenbank schon für eine Reihe von Anwendungen geeignet. In Abb. 6 ist ein Beispiel einer transnationalen Risikoanalyse zur Feststellung einer potenziellen Zielverfehlung für Nickel in Fließgewässern, welche auf Basis der DHm³c-Datenbank durchgeführt wer-

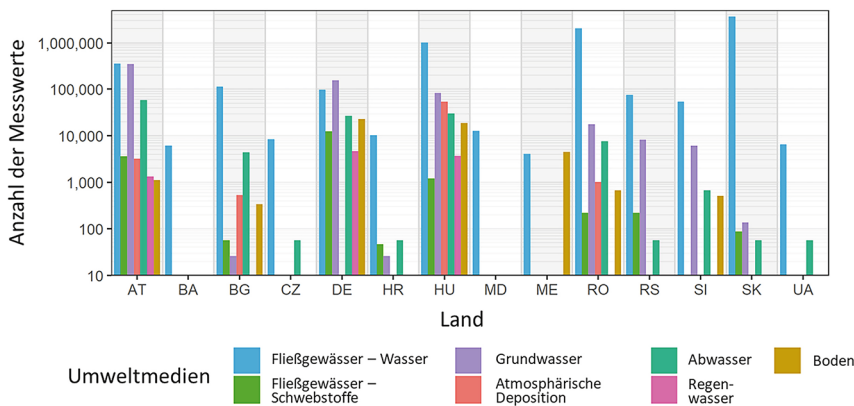


Abb. 5 Anzahl der Messergebnisse der 35DHm³c-Parameter für unterschiedliche Medien und unterschiedliche Länder des DEGs (AT Österreich, BA Bosnien und Herzegowina, BG Bulgarien, CZ Tschechische Republik, DE Deutschland, HR Kroatien, HU Ungarn, MD Moldawien, RO Rumänien, RS Serbien, SI Slowenien, SK Slowakei, UA Ukraine)

den konnte, dargestellt. Für diese Darstellung wurden aus der Datenbank jene Daten zu Fließgewässern verwendet, die zumindest 12 Messwerte an einer Messstelle für gelöstes Nickel in einem Jahr aufwiesen, wo die Bestimmungsgrenze unter der Jahresdurchschnittsumweltqualitätsnorm (JD-UQN) liegt und somit quantitative Aussagen über eine Überschreitung der UQN gemacht werden können. Die Darstellung zeigt

jene Fließgewässermessstellen, bei denen eine Auswertung basierend auf den obengenannten Kriterien gemacht werden konnte, und zeigt an, wo der Mittelwert der Messwerte über der JD-UQN von 4 µg/L für Nickel liegt. Diese Messstellen sind rot eingefärbt. Eine Bewertung unter Berücksichtigung der geogenen Hintergrundbelastung konnte nicht durchgeführt werden. Trotzdem kann ein Überblick über Schwer-

punkregionen der Nickelbelastung im Vergleich der unterschiedlichen Länder gezeigt werden.

3.4.2 Belastung unterschiedlicher Medien im Vergleich

Die Einbindung der Spurenstoffkonzentrationen unterschiedlicher Umweltmedien in einer Datenbank ermöglicht es, für unterschiedliche Stoffe einen Vergleich darzustellen und damit auch erste Hinweise über potenziell relevante Eintragspfade im Vergleich zur Belastung der Flüsse zu erhalten. Deutlich und erwartbar ist das z.B. für Diclofenac zu erkennen (Abb. 7). Die höchsten Konzentrationen dieses Pharmazeutikums (zumeist einige µg/L) treten im Ablauf der Kläranlagen auf. Deutlich geringer sind die Konzentrationen im innerstädtischen Niederschlagsabfluss aus Regenkanalisation und Mischwasserüberläufen, welcher auch einen deutlichen Einfluss aus häuslichem Abwasser aufweist. Oberflächengewässer weisen je nach Verdünnung des eingeleiteten Abwassers Konzentrationen auf, die zumeist unter 0,1 µg/L liegen. Fallweise wird Diclofenac auch in Grundwasser und atmosphärischer Deposition gefunden. Die Konzentrationen hier liegen nochmals

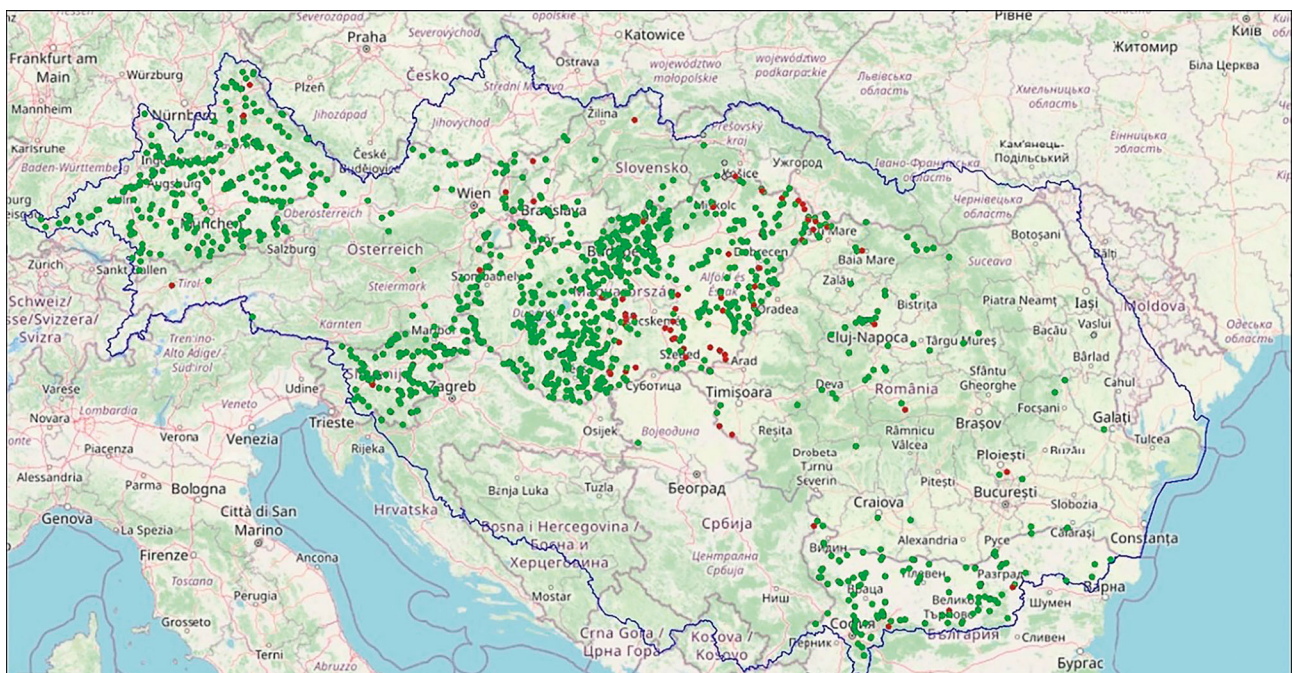


Abb. 6 Darstellung potenzieller Zielverfehlungen der JD-UQN für Nickel im Donaeinzugsgebiet (rote Punkte, Messstellen ohne potenzielle Zielverfehlung; grüne Punkte). (Tuchiu et al. 2023). (Data sources: background map: OpenStreetMap contributors, Danube river basin: ICPDR)

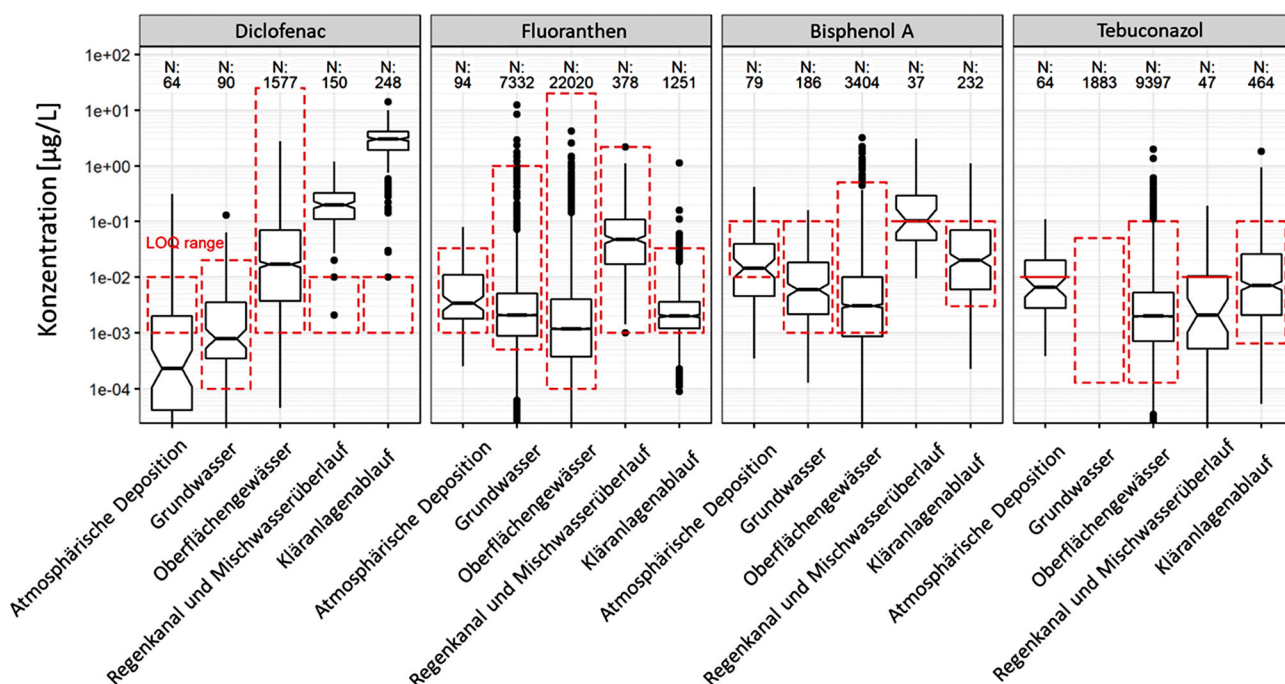


Abb. 7 Konzentrationen von Spurenstoffen in unterschiedlichen Umweltmedien des Donaeinzugsgebiets. Die Verteilungen der Konzentrationen sind als Boxplots dargestellt und für den Umgang mit Werten unter der Bestimmungsgrenze wurde die Methode der „Regression on Order Statistics“ (ROS) nach Helsel (2011) gewählt (siehe auch Liu et al. 2023, in diesem Heft). Zusätzlich zur Darstellung bei Liu et al. (2023) sind in dieser Darstellung Einkerbungen in den Boxen der Boxplots zu erkennen. Bei diesen handelt es sich um das 95-%-Konfidenzintervall des jeweiligen Medians. Wenn sich die Einkerbungen zweier Boxen nicht überlagern, weisen die Datensätze statistisch signifikante Unterschiede auf. Die rot gestrichelte Linie zeigt die Schwankungsbreite der bei unterschiedlichen Monitoringprogrammen verwendeten Bestimmungsgrenze an. Für die y-Achse der Abbildung wurde aufgrund der großen Spannweite der dargestellten Konzentrationen ein logarithmischer Maßstab gewählt

ein bis zwei Zehnerpotenzen unter jenen in den Oberflächengewässern und werden damit in der Regel für die Belastung der Fließgewässer keine relevante Rolle spielen. Deutlich anders ist die Situation beim PAK Fluoranthen, wo in der Regel die höchsten Konzentrationen im Niederschlagswasser aus Siedlungsgebieten, gefolgt von der atmosphärischen Deposition, gefunden werden und Grundwasser sowie Oberflächengewässer vielfach geringere Konzentrationen als die atmosphärische Deposition aufweisen. Ähnlich wie bei Fluoranthen sind die Konzentrationsverhältnisse auch bei der Industriechemikalie Bisphenol A, nur dass hier Kläranlagenabläufe im Verhältnis zu den anderen Medien an zweiter Stelle der Reihung liegen. Für das Fungizid Tebuconazol sinken die Konzentrationen tendenziell in folgender Reihenfolge: Kläranlagenablauf ~ atmosphärische Deposition > Oberflächengewässer ~ Niederschlagswasser. Im Grundwasser wurden fast keine Konzentrationen über den jeweils verwendeten Bestimmungsgrenzen gefunden, womit dieses

als Eintragspfad in die Fließgewässer keine Rolle spielen dürfte.

3.4.3 Regionalisierte Emissionsfaktoren zur verbesserten Emissionsmodellierung

Eine wesentliche Grundlage für eine Emissionsmodellierung auf Ebene von Einzugsgebieten sind valide Emissionsfaktoren bzw. Konzentrationen für unterschiedliche Eintragspfade. Eine verbesserte und regional abgestimmte Datenlage ist für die Regionalisierung der Emissionsmodellierung von entscheidendem Vorteil, da sie hilft, Emissionen regionsspezifischer abbilden zu können. Speziell bei der Anwendung auf einer großskaligen Ebene wie dem DEG ist eine Abbildung von regionalen Unterschieden auch über Länder hinweg von großer Bedeutung. Hier werden zwei Beispiele dargestellt, wie dies unter Nutzung der im Zuge von DHm³c entwickelten Konzentrationsdatenbank möglich ist.

Abb. 8 zeigt in Form von Boxplots einen Vergleich der Konzentrationen

unterschiedlicher SpS in den Abläufen kommunaler Kläranlagen nach Ländern geordnet. Während die Anzahl der vorhandenen Daten in Rumänien (RO) und Bulgarien (BG) zumeist zu gering ist, um statistisch valide Aussagen machen zu können, zeigen sich zwischen Deutschland (DE), Österreich (AT) und Ungarn (HU) zum Teil statistisch signifikante Unterschiede. Für Diclofenac und Carbamazepin weisen die vorhandenen Daten auf signifikant höhere Konzentrationen in Ungarn im Vergleich zu Österreich hin. Für PFOS und PFOA ist es umgekehrt. Die Konzentrationen in Abläufen der österreichischen Kläranlagen sind statistisch signifikant höher als jene in Ungarn. Deutschland liegt bei PFOA in derselben Größenordnung wie Österreich, bei PFOS zwischen diesen Österreich und Ungarn. Auffällig sind die Ergebnisse von Quecksilber, wo eine deutliche Zunahme der Konzentrationen im Kläranlagenablauf von Deutschland über Österreich nach Ungarn zu erkennen ist. Auch wenn dafür bisher keine Erklärung gefunden werden konnte, ist

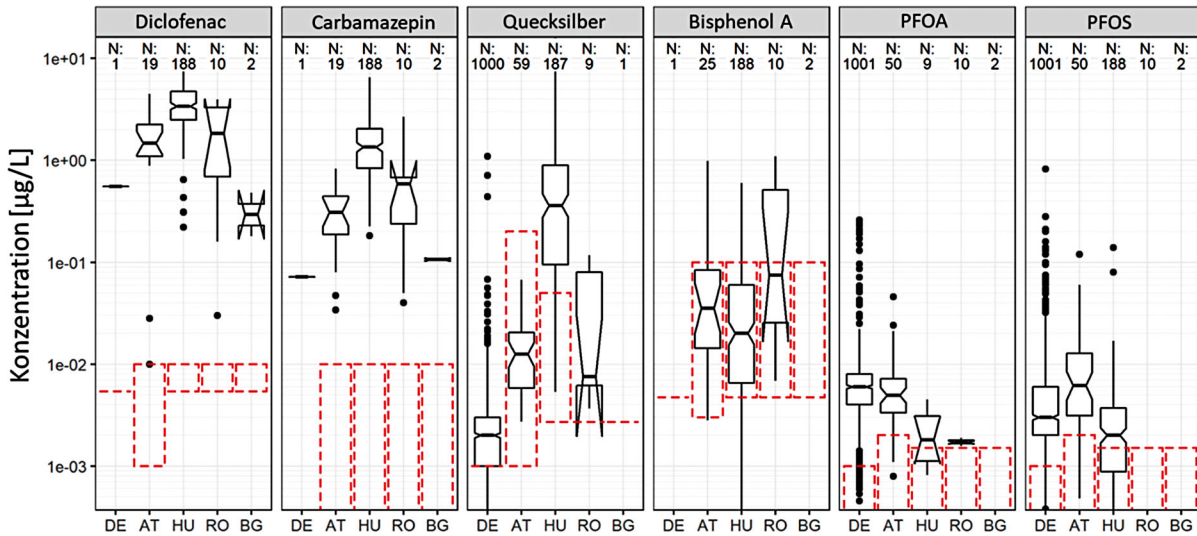


Abb. 8 Konzentrationen (Boxplots) unterschiedlicher Spurenstoffe in den Abläufen kommunaler Kläranlagen nach Ländern geordnet. Die rot gestrichelte Linie zeigt die Schwankungsbreite der bei unterschiedlichen Monitoringprogrammen verwendeten Bestimmungsgrenze an. Für die y-Achse der Abbildung wurde aufgrund der großen Spannweite der dargestellten Konzentrationen ein logarithmischer Maßstab gewählt

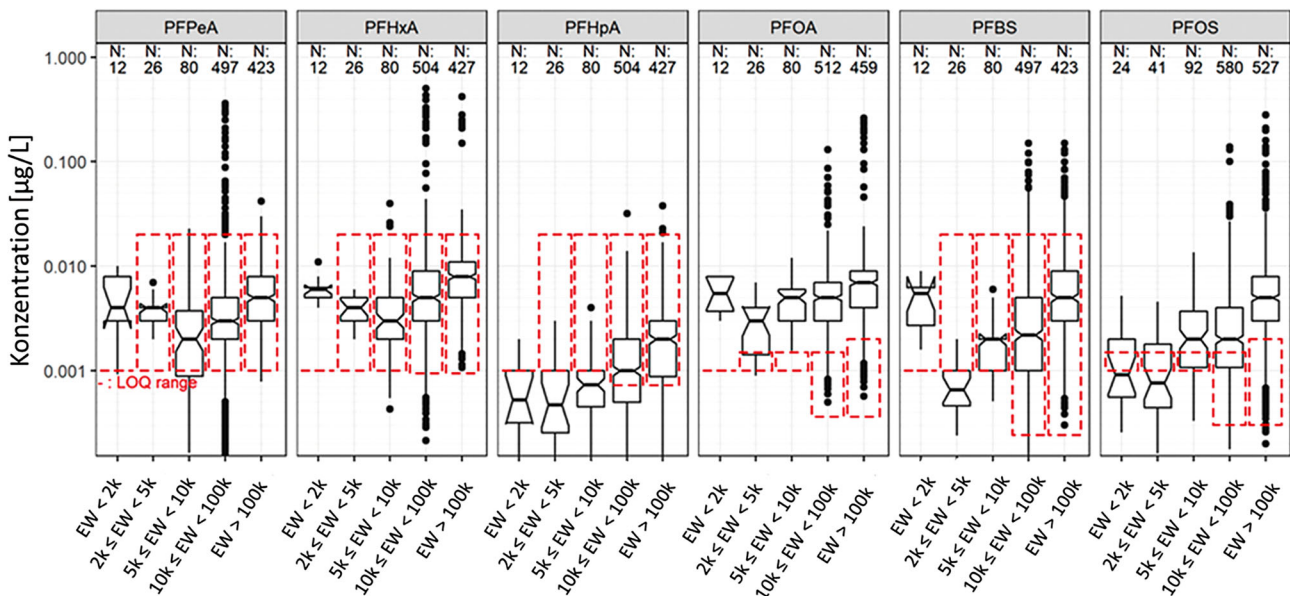


Abb. 9 Konzentrationen (Boxplots) unterschiedlicher PFAS in den Abläufen kommunaler Kläranlagen geordnet nach Ausbaugröße der Kläranlagen. Die rot gestrichelte Linie zeigt die Schwankungsbreite der bei unterschiedlichen Monitoringprogrammen verwendeten Bestimmungsgrenze an. Für die y-Achse der Abbildung wurde aufgrund der großen Spannweite der dargestellten Konzentrationen ein logarithmischer Maßstab gewählt

diese Erkenntnis durch die Datenbasis gut abgesichert.

Neben Unterschieden zwischen Ländern können über die erhobene Datenbasis auch Unterschiede zwischen anderen Einflussgrößen (Metadaten) gefunden werden, wenn diese im Inventar enthalten sind. Ein Beispiel dafür zeigt Abb. 9. Hier sind die Ergebnisse für Konzentrationen unter-

schiedlicher Per- und polyfluorierter Alkylsubstanzen (PFAS) im Ablauf kommunaler Kläranlagen in Abhängigkeit von der Ausbaugröße der Kläranlagen darstellt. Für Perfluorheptansäure (PFHpA), PFOA, Perfluorbutansulfonsäure (PFBS) und PFOS ist ein Trend zur Zunahme der Konzentrationen mit zunehmender Kläranlagengröße zu erkennen. Lediglich die kleinsten Kläranlagen

mit weniger als 2000 Einwohnerwerten (EW) Ausbaugröße fallen hier deutlich heraus. Allerdings ist der Datenumfang mit 12 Messungen bei den kleinsten Kläranlagen sehr gering.

3.5 Emissionsmodellierung

Während der Vergleich von Stoffkonzentrationen in unterschiedlichen Me-

dien bzw. Emissionspfaden lediglich eine erste Einschätzung über eine potenzielle Relevanz der Eintragspfade ermöglicht, kann über eine Emissionsmodellierung durch Verknüpfung der Konzentrationen mit Wasser- und Feststoffflüssen (Emissionsmodell MoRE) bzw. durch die Verwendung von Aktivitätsraten und Emissionsfaktoren (Emissionsmodell DHSM) eine regionale Abschätzung und Gegenüberstellung von Emissionsfrachten über unterschiedliche Pfade erreicht werden. Unter Berücksichtigung allfälliger Abbau- oder Speichervorgänge können im Weiteren über die Emissionsfrachten auch Immissionsfrachten bzw. Immissionskonzentrationen errechnet und diese gemessenen Konzentrationen gegenübergestellt werden. Um die Ursachen der SpS-Kontamination im DEG besser abzuschätzen zu können, kamen im Rahmen von DHm³c zwei Emissionsmodelle mit ergänzenden Ansätzen zum Einsatz:

- Das Tool zur Modellierung regionalisierter Emissionen (MoRE) wurde auf die sieben Pilotregionen angewandt, um die Emissionsfrachten in Oberflächengewässer über Punkt- und diffuse Emissionspfade zu quantifizieren und das Systemverständnis zu verbessern (siehe auch Broer et al. 2023, in diesem Heft).
- Aufbauend auf dem verbesserten Systemverständnis wurde das Danube Hazard Substances Model (DHSM) weiterentwickelt und eingesetzt, um Emissionen von SpS für das gesamte

Donaeinzugsgebiet zu quantifizieren (Details siehe Kovacs et al. 2023a, b).

Die Ergebnisse der MoRE-Modellierung werden in diesem Schwerpunktbeitrag in einem eigenen Artikel dargestellt, daher beschränkt sich die Darstellung hier auf eine Kurzvorstellung wichtiger Ergebnisse des DHSM. Eine umfassende Dokumentation kann auf der Homepage des Projekts (DHm3c 2023) gefunden werden.

3.5.1 Modellunsicherheit und Validierung

Eine wesentliche Frage bei der Anwendung von Emissionsmodellen ist die Genauigkeit, mit der Gewässerkonzentrationen abgebildet werden können. Abb. 10 zeigt die Carbamazepin-Konzentrationen entlang der Donau. Die Punkte zeigen die bei unterschiedlichen Messkampagnen gemessenen Konzentrationen und die durchgezogenen Linien den mithilfe des DHSM aus Emissionsabschätzungen berechneten Verlauf der mittleren Jahreskonzentrationen. Dabei zeigt die untere Linie aus einer Modellierung von 10 unterschiedlichen hydrologischen Jahren die Ergebnisse einer minimalen Modellvariante und die obere Linie jene einer maximalen Modellvariante. Sowohl die Messergebnisse untereinander als auch die Modellergebnisse von den Messergebnissen zeigen zum Teil deutliche Abweichungen voneinander. Trotzdem

kann die Modellierung den mittleren Bereich der Konzentrationen sowohl in Hinblick auf die Größenordnung als auch auf den Verlauf der Donau ganz gut abbilden, und kann daher als plausibel angesehen werden.

3.5.2 Pfadanalyse

Abb. 11 zeigt die mit DHSM berechneten relativen Anteile verschiedener Eintragspfade für die Projektparameter des DHm³c-Projekts. Dargestellt wird von den PAKs lediglich Benzo(a)pyren und von den Pestiziden Metolachlor ohne Metabolite und Tebuconazol. Die Abbildung verdeutlicht die große Variabilität des Vorkommens von unterschiedlichen Emissionsmustern. Während die Emissionen von Metallen in die Fließgewässer bei Betrachtung des gesamten Einzugsgebiets stark von erosiven Einträgen landwirtschaftlicher Böden geprägt werden, ist diese bei den Pharmazeutika durch den Eintrag über Kläranlagenabläufe bzw. den Eintrag ungereinigten Abwassers der Fall. PFOS und PFOA haben einen hohen Anteil von Einträgen über den Grundwasserpfad, und Kläranlagenabläufe spielen ebenfalls eine relevante Rolle. Bei lokalerer bzw. regionaler Betrachtung sieht man auch, dass gerade dieser Emissionspfad von prägenden werden kann und für lokal erhöhte Konzentrationen sorgt (Kittlaus et al. 2022). Eine Vielzahl von unterschiedlichen Eintragspfaden, die alle mit einer ähnlichen Größenordnung zur Gewässerbelastung beitragen, wurden das PAK Benzo(a)pyren und die Industriechemikalie Nonylphenol errechnet. Auffällig für die Pestizide ist der hohe Anteil an direktem Eintrag aus Aufbringung in der Landwirtschaft. Daneben wurde noch ein bedeutsamer Eintrag aus dem Oberflächenabfluss landwirtschaftlicher Flächen errechnet.

3.5.3 Szenarienanalyse

Emissionsmodelle bieten die Möglichkeit, die Wirksamkeit von Maßnahmen nicht nur emissionsseitig, sondern auch immissionsseitig (also in Hinblick auf die Veränderung von Gewässerkonzentrationen und -frachten) abzubilden. Beispielhaft wird das in Abb. 12 für Carbamazepin illustriert. Der graue Bereich und die grün strichlierte Linie zeigen die Schwankungsbreite und den Mittelwert der Modellergebnisse des „Ist-Zustandes“. In Szenario 1 (S01) wird

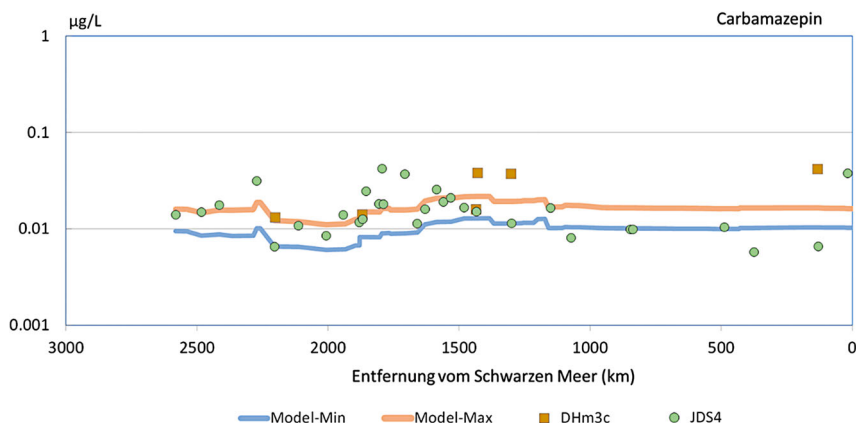


Abb. 10 Gemessener und modellierter Konzentrationsverlauf von Carbamazepin entlang der Donau aufgetragen nach Flusskilometern (Kovacs et al. 2023a). Model-Min und Model-Max stellen die minimale und maximale Modellvariante dar. Die Messdaten stammen aus DHm³c: Danube Hazard m³c-Projekt (DHm3c 2023) und JDS4: Joint Danube Survey Nr. 4 (Alygizakis et al. 2021). Für die y-Achse der Abbildung wurde aufgrund der großen Spannweite der dargestellten Konzentrationen ein logarithmischer Maßstab gewählt

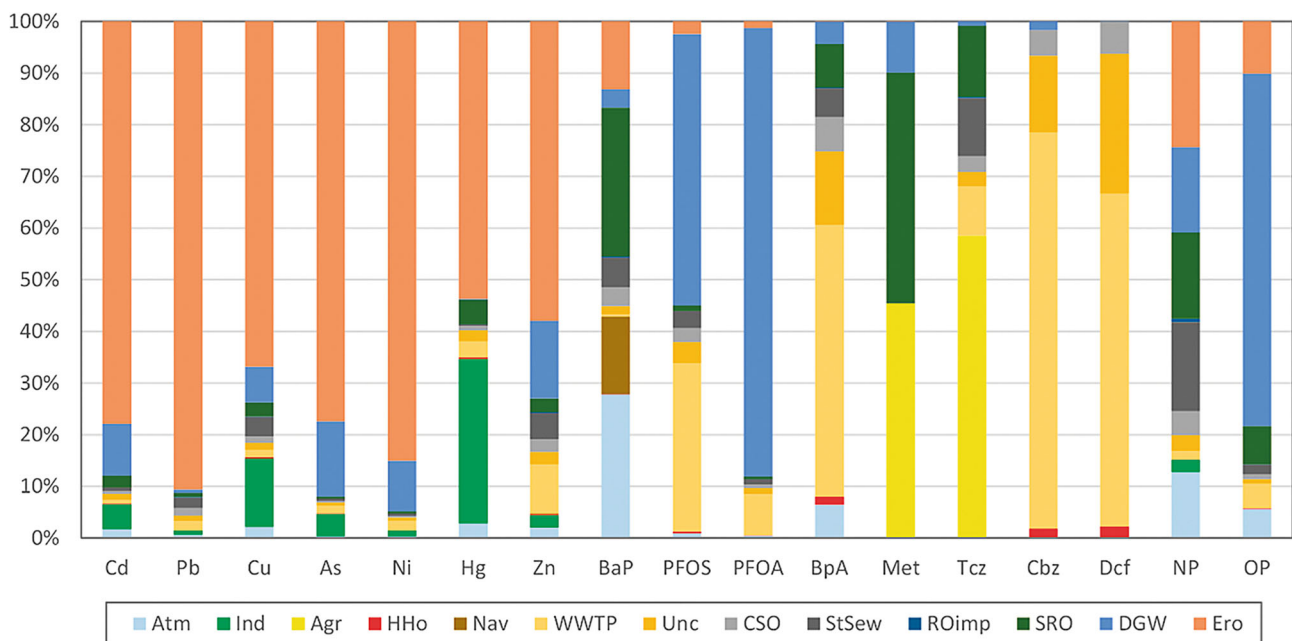


Abb. 11 Relativer Anteil an den Gesamtemissionen von mit DHSM modellierten Emissionspfaden. (Kovacs et al. 2023a) (*Atm* Atmosphärische Deposition auf Oberflächengewässer; *Ind* Direkteinleitungen aus industriellen Kläranlagen; *Agr* Direkte Einträge aus der Landwirtschaft und Abdrift; *HHo* Direkteinleitungen aus nicht an die Kanalisation angeschlossenen Haushalten; *Nav* Einträge aus Schifffahrt; *WWTP* Ablauf kommunaler Kläranlagen; *Unc* Direkteinleitungen aus an die Kanalisation angeschlossenen Haushalten jedoch ohne Anschluss an eine Kläranlage; *CSO* Mischwasserüberlauf; *StSew* Oberflächenabfluss von Straßen außerhalb des urbanen Raums; *ROimp* Niederschlagsabfluss aus Niederschlagskanälen im Trennsystem; *SRO* Oberflächenabfluss von unversiegelten Flächen; *DGW* Zwischenabfluss, Drainagen und Grundwasser; *Ero* Erosion)

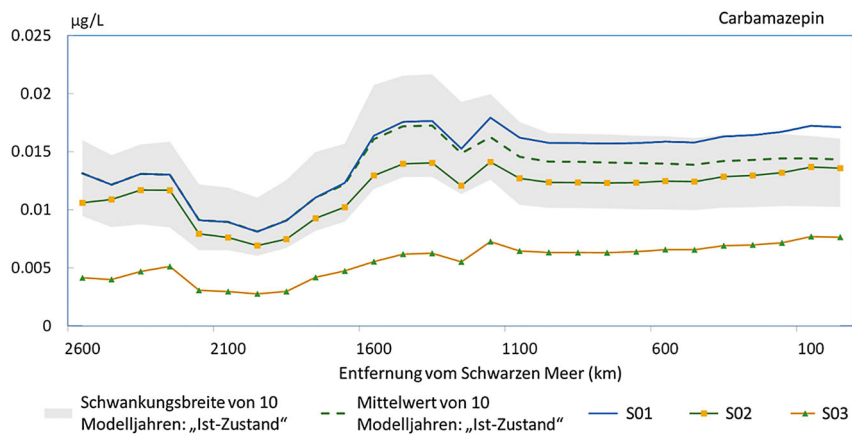


Abb. 12 Konzentrationsverlauf von Carbamazepin entlang der Donau aufgetragen nach Flusskilometern. Der graue Bereich und die grün strichlierte Linie zeigen die Schwankungsbreite und den Mittelwert der Modellergebnisse des „Ist-Zustandes“, die anderen Linien zeigen die Modellergebnisse für unterschiedliche Szenarien. S01: Anschluss aller Siedlungen mit >2000 E an die Kanalisation; S02: Ausrüstung aller Kläranlagen einer Ausbaugröße von > 100.000 EW mit einer 4. Reinigungsstufe; S03: Ausrüstung aller Kläranlagen mit einer Ausbaugröße > 10.000 EW. (Kovacs et al. 2023a)

angenommen, dass entsprechend den Vorgaben der EU (1991) alle Siedlungen mit mehr als 2000 Einwohner:innen (E) an eine kommunale Abwasserreinigung mit – je nach Größenklasse – Kohlenstoffentfernung bzw. Kohlenstoff- und Nährstoffentfernung angeschlos-

sen worden sind. Da die Pufferwirkung des Bodens wegfällt und die Carbamazepin-Reduktion bei der konventionellen Abwasserreinigung unbedeutend ist, wird in diesem Fall ein Anstieg der Carbamazepin-Konzentrationen im Unterlauf der Donau errechnet, da die

Zunahme der an Kanalisation angeschlossenen Bevölkerung wesentlich stärker ausfällt als im Oberlauf, wo diese Entwicklung das Kanalausbaus bereits weitgehend abgeschlossen ist. In Szenario 2 (S02) wird angenommen, dass alle Kläranlagen mit einer Auslegung von mehr als 100.000 EW mit einer 4. Reinigungsstufe ausgerüstet werden, mit der eine Carbamazepin-Entfernung von mehr als 80% erreicht werden kann. Mit dieser Maßnahme würde sich der Anstieg der Carbamazepin-Konzentration durch den Kanalananschluss aller Siedlungen >2000 E zwar überkompensieren lassen, eine deutliche Reduktion der aktuellen Donaabelastung wäre allerdings nicht zu erwarten. Um diese zu erreichen, wäre eine Errichtung einer 4. Reinigungsstufe zur Entfernung von Carbamazepin auf allen Kläranlagen mit >10.000 EW erforderlich (Szenario 3 – S03).

3.6 Stoffspezifische Schlussfolgerungen

Carbamazepin und Diclofenac sind Arzneimittel. Diese beiden Chemikalien werden überwiegend in der Humanmedizin verwendet und gelangen

daher hauptsächlich über kommunale Abwässer in Flüsse. Da sie schlecht adsorbierbar und abbaubar sind, werden sie durch die biologische Abwasserreinigung kaum entfernt, und der Hauptemissionspfad sind direkte Emissionen aus Kanalisationssystemen ohne Abwasserbehandlung oder aus Kläranlagenabläufen. Derzeit sind diese Stoffe auf EU-Ebene nicht geregelt. Im Entwurf zur neuen Umweltqualitätsnormen-Richtlinie (UQNR) der Europäischen Kommission (EK 2022, siehe auch Clara und Müller-Rechberger 2023, in diesem Heft) werden für beide Stoffe UQN vorgeschlagen. Während es beim derzeitigen Vorschlag für Carbamazepin voraussichtlich im DEG zumeist zu keinen Überschreitungen kommen würde, ist bei der vorgeschlagenen UQN von 40 ng/L für Diclofenac in Bereichen einer geringen Verdünnung von kommunalem Abwasser in den empfangenden Gewässern vielfach mit Überschreitungen zu rechnen. Neben Beschränkungen einer Anwendung, die für wichtige Humanmedikamente begrenztes Potenzial haben dürfte, kann vor allem eine 4. Reinigungsstufe bei der kommunalen Abwasserreinigung zu einer Reduktion von Gewässerbelastungen führen.

PFOS und PFOA, 4-tert-Octylphenol, Nonylphenol und Bisphenol A sind Industriechemikalien. Sie unterscheiden sich stark in ihrer Anwendung und in ihren chemisch-physikalischen Eigenschaften. Sie gelangen über mehrere Wege in die Wassersysteme. Aufgrund ihrer Mobilität und hohen Persistenz sind PFOS und PFOA und andere „neue“ Stoffe aus der großen PFAS-Gruppe von großer Bedeutung für Umwelt und Gewässer. Derzeit ist wasserseitig von den PFAS nur für PFOS eine Umweltqualitätsnorm EU-weit festgelegt (EU 2013). Es besteht ein Risiko, dass die wasserbezogene Jahresdurchschnitts-Umweltqualitätsnorm (JD-UQN) von 0,65 ng/L in einer Reihe von Gewässern des Donaueinzugsgebiets überschritten wird. Der Vorschlag zur Überarbeitung der UQNR sieht hier eine weitere Verschärfung vor (siehe auch Clara und Müller-Rechberger 2023; Obeid et al. 2023; Liu et al. 2023, alle in diesem Heft), indem eine JD-UQN und eine Biota-UQN für PFOA-Toxizitätsäquivalente aus der Summe von 24 PFAS festgelegt werden soll. Für Nonylphenol ist im Vorschlag der EK eine Verschärfung der UQN enthalten, welche ebenfalls vermehrt zu Über-

schreitungen führen könnte. Zudem wird für Bisphenol A eine neue, sehr niedrig angesetzte UQN überlegt. Wenn es um eine Reduktion der Emissionen in die Gewässer geht, liegt das Problem der PFAS bei ihrer hohen Mobilität und Persistenz, wodurch konventionelle Kläranlagen nur eine ungenügende Barriere darstellen. Auch durch oxidative Verfahren (z. B. Ozonbehandlung) können PFAS nur ungenügend aus dem Abwasser entfernt werden (Schaar et al. 2023, in diesem Heft). Adsorptive Verfahren (Aktivkohle) dürften hier besser geeignet sein (Vu und Wu 2022), allerdings sind weitere Fragen der Regenerierung und Entsorgung des Adsorbens zu klären, da PFAS auch bei der Verbrennung sehr persistent sind und für eine vollständige Zerstörung hohe Temperaturen vonnöten sind (Sonmez Baghizade et al. 2021). Insgesamt dürfte für die PFAS kein Weg an einer starken Einschränkung der Anwendung der gesamten Gruppe vorbeiführen. Ein entsprechender Antrag wurde bereits von 5 Mitgliedsstaaten auf EU-Ebene eingebracht (ECHA 2013). Neben Neuanwendungen ist jedoch auch die Bedeutung von Bodenbelastung und Altlasten zu berücksichtigen, welche noch längerfristig zur Belastung von Grundwasser beitragen können (siehe auch Briemann et al. 2023, in diesem Heft). Damit kommt auch einer Sanierung entsprechender Standorte eine relevante Bedeutung für das Spurenstoffmanagement im Donaueinzugsgebiet zu.

Metolachlor und Tebuconazol sind in der Landwirtschaft verwendete Pestizide (Herbizid bzw. Fungizid). Emissionen in Fließgewässer erfolgen überwiegend über direkten Eintrag aus Abdrift bei deren Anwendung oder Oberflächenabfluss. Darüber hinaus können für Tebuconazol städtische Gebiete aufgrund der Anwendung in Siedlungen (Fassaden oder Dächer) lokal ebenfalls zur Belastung von Oberflächengewässern beitragen. Derzeit sind auf EU-Ebene für diese Stoffe keine UQN vorgesehen. Mögliche Maßnahmen für eine Emissionsreduktion liegen im Bereich der Aufbringungsbeschränkungen oder im Bereich der Ausbringungsmethoden, um Abdrift zu verringern.

Benzo(a)pyren (BaP) ist eine PAK-Verbindung. PAK wie BaP oder auch Fluoranthen entstehen als Nebenprodukte von Verbrennungsprozessen, sind aber auch in einigen Produkten (z. B. Reifen) enthalten. Der Transport

dieser Stoffe über die Luft und die anschließende Deposition auf Böden führt dort zu einer Anreicherung. Die Eintragspfade für BaP in die Oberflächengewässer sind vielfältig: Atmosphärische Deposition direkt auf Gewässerflächen, Niederschlagswasserabfluss aus städtischen Bereichen und von außerstädtischen Straßen sowie Bodenerosion. Aber auch Einträge aus der Schifffahrt können für die Donau eine Rolle spielen. Aufgrund möglicher weiterer Verschärfungen der geltenden UQN im Bereich der PAK sind Überschreitungen auch weiterhin anzunehmen. Maßnahmen müssen einerseits bei den Emissionen im Bereich des Verkehrs und anderer Verbrennungsprozesse ansetzen. Daneben können Maßnahmen wirksam werden, die den Transport aus der Fläche in die Gewässer reduzieren (Erosionsschutz, Behandlung von Straßenabläufen und Mischwasserüberläufen).

Cd, Pb, Cu, Ni, Hg und Zn sind Metalle und As ist ein Metalloid. Sie kommen natürlich in der Umwelt vor und einige davon (Cu, Zn) sind essenzielle Nährstoffe. Wenn jedoch ihre Unbedenklichkeits-Schwellenwerte in der Umwelt überschritten werden, können sie sich nachteilig auf das Leben im Wasser und auf den Menschen auswirken. Verschiedene Aktivitäten (u. a. Verkehr, Verunreinigungen in Düngemitteln, Luftemissionen aus Heizungen, Korrosion) führen zu einer verstärkten Verteilung dieser Stoffe in der Umwelt und zu einer Anreicherung in den Böden. Somit ist die Bodenerosion der wichtigste direkte Eintragspfad in die Gewässer. Für eine wirksame Politik muss man wissen, dass (1) der Boden in vielen Fällen historisch verschmutzt ist und (2) der atmosphärische Transport erheblich sein kann, d. h., die Metalle werden auch über große Entfernungen transportiert (z. B. Hg). Darüber hinaus können Hotspots in bestimmten Industriegebieten (z. B. Metallurgie oder Verbrennungsanlagen) und im Bergbau zu hohen lokal bis regional relevanten Belastungen führen. Während bei Hg eine durchgehende Überschreitung der UQN gegeben ist, sind es bei den anderen Metallen Einzelfälle aufgrund spezifischer lokaler Bedingungen oder lokale Hotspots, die zu Zielverfehlungen führen. Neben Anwendungsbeschränkungen und Begrenzungen der Luftemissionen spielt für die Reduktion eines Eintrags in Oberflächengewässer jedenfalls der Erosionsschutz

eine wichtige Rolle. Daneben müssen Maßnahmenprogramme größere Emittenten wie Bergbau oder spezifische Industriebetriebe berücksichtigen.

4 Politikempfehlungen

4.1 Allgemeines

Das wichtigste EU-Regelungsinstrument für den Bereich Wasser, die Wasserrahmenrichtlinie (WRRRL 2000/60/EG), und die dazugehörigen Rechtsakte befassen sich unter anderem mit der Bewirtschaftung der SpS-Belastung in Gewässern und bilden das Rückgrat der einschlägigen (inter-)nationalen Wasserpolitik. Sie legen die Rahmenbedingungen für die Umsetzung verschiedener Maßnahmen fest. So sind die Liste der prioritären Stoffe, die kontrolliert oder schrittweise aus dem Verkehr gezogen werden sollen, Vorschriften zur Begrenzung bestimmter Industrieemissionen oder Regeln für die Anwendung von Pestiziden hier festgelegt.

Die nationalen Gesetzgebungen stehen vor Herausforderungen, da viele der wasserwirtschaftsbezogenen EU-Gesetzgebungen im Einklang mit dem Green Deal der EU (EK 2019) und den damit verbundenen Strategien wie der Farm-to-Fork-Strategie (EK 2020a), der Biodiversitätsstrategie (EK 2020b) und dem Zero Pollution Action Plan (EK 2021) überarbeitet werden müssen. Aufgrund von sehr ambitionierten Zielen für die Umwelt und das Klima wird der Revisionsprozess wahrscheinlich Herausforderungen für die Wasserwirtschaft mit sich bringen, indem er die Anforderungen verschärft und/oder den Anwendungsbereich zahlreicher wasserbezogener Vorschriften für die Behandlung von kommunalem Abwasser, die Umsetzung von Industrie-technologien, den integrierten Pflanzenschutz, andere landwirtschaftliche Maßnahmen sowie das Monitoring und die Anforderungen für das Erreichen eines guten chemischen Zustands der Gewässer erweitert (siehe auch Clara und Müller-Rechberger 2023, in diesem Heft).

Darüber hinaus behindern in einigen Donauländern ein erheblicher Mangel an institutionellen Kapazitäten, unklare Zuständigkeiten, ein unzureichender intersektoraler Dialog und Wissenslücken in Bezug auf Emissionen den Aufbau eines effizienten Managements. Hinzu kommt, dass der

Klimawandel die Auswirkungen der SpS-Belastung verschärfen könnte, insbesondere die starken Regenfälle, die einen Eintrag verstärken, sowie langanhaltende Dürreperioden mit geringem Abfluss, die zu erhöhten Konzentrationen von SpS in Flüssen führen können.

Im Rahmen des Projekts DHm³c wurde neben der in Kap. 3 vorgestellten Verbesserung der Wissensbasis über Vorhandensein und Emissionen von SpS im Einzugsgebiet der Donau ein umfangreicher Vergleich der Umsetzung des Spurenstoffmanagements in den unterschiedlichen Ländern des Donaeinzugsgebiets durchgeführt (Dimova et al. 2023). Basierend auf diesen Grundlagen wurde ein Leitfaden mit Empfehlungen für solide politische Instrumente und wirksame Maßnahmen zur Bewältigung der SpS-Belastung entwickelt, der im Folgenden kurz vorgestellt werden soll und auf der Homepage von DHm³c (Kovacs et al. 2023c) nachgelesen werden kann.

4.2 Monitoring

Trotz zum Teil großer Anstrengungen in Ländern des Donaeinzugsgebiets, den Monitoringanforderungen der EU-WRRRL nachzukommen, zeigen sich bei dem Versuch, die Daten unterschiedlicher Länder in harmonisierter Weise zu erfassen, einige Schwierigkeiten, die dieses Vorhaben erschweren. Daher ist es in einem ersten Schritt erforderlich, die Monitoringansätze der Donauländer und die Auswertung der Messungen besser zu harmonisieren, um die Grundlagen zur Erarbeitung einer geeigneten Wissensbasis zu verbessern.

- Die Donauländer sollten gemeinsam eine aktualisierte Liste von flussgebietspezifischen Spurenstoffen für den Donauraum erstellen, die problematisch für die Gewässer im Einzugsgebiet sind. Diese Liste sollte durch die Harmonisierung der bestehenden Listen potenzieller spezifischer SpS für die Donau, der nationalen spezifischen Listen und der Stoffauswahl für die Joint Danube Surveys entlang der Donau entstehen. Die Liste soll regelmäßig basierend auf den aktuellen wissenschaftlichen Stand aktualisiert werden.
- Die Donauländer sollten eine Harmonisierung der Immissions- und emissionsbezogenen Überwachungsprogramme vorantreiben. In einem ersten Schritt sind detaillierte Beschreibungen für jede Art von Über-

wachungsprogrammen erforderlich, in denen das Ziel der Programme und die Anzahl der SpS angegeben werden, warum bestimmte prioritäre Stoffe fehlen, warum andere nationale Stoffe ergänzt wurden, wo die Probenahmestellen liegen, wie häufig das Monitoring stattfindet usw. Diese Informationen sollten dann mit den anderen Donauländern ausgetauscht werden.

- Den Donauländern wird empfohlen, die Probenahme- und Analysemethoden zu harmonisieren, um standardisierte Methoden für die gemeinsamen Parameter zu verwenden und eine breitere Anwendung von Methoden zur Bewertung der Auswirkungen von SpS auf Gewässer und Ökosysteme zu ermöglichen.
- Es wird empfohlen, die jeweiligen Emissionsverordnungen für kommunale und industrielle Abwassereinleitungen zu harmonisieren und die Bewertung und Kontrolle von Einleitungen aus Mischwasserüberläufen in die Vorschriften aufzunehmen.

4.3 Emissionsinventar und -modellierung

Im Zuge des Projektes DHm³c konnten wesentliche Schritte zum Aufbau einer länderübergreifenden Datenbasis und Emissionsmodellierung gesetzt werden. Trotz der ersten Erfolge sind weitere Schritte erforderlich, um diese Instrumente auch in der Umsetzung der nationalen Administration und des donauweiten Spurenstoffmanagements voll inhaltlich wirksam werden zu lassen.

- Inventare potenzieller Emittenten sind weiterzuentwickeln und sollten insbesondere auf die großen Emittenten wie Industrieanlagen und kommunale Kläranlagen, aber auch auf diffuse Quellen ausgerichtet sein. Dabei sind neben Emissionen aus Landwirtschaft, Verkehr und Siedlungen (Regenkanalisation und Mischwasserentlastungen) auch Bergbaubetriebe oder Altlasten zu beachten und erforderliche Basisdaten zu sammeln.
- Es wird empfohlen, die harmonisierte, umfassende grenzüberschreitende Datenbank des DHm³c-Projektes weiterzuentwickeln und zu nutzen, die SpS-Konzentrationen in relevanten Umweltmedien und Emissionspfaden enthält. Darüber hinaus sollte die Datenbank bestimmte räumli-

che, statistische und umweltbezogene Daten enthalten, die für die Erstellung und Auswertung des Inventars von großer Bedeutung sind (z. B. Landnutzung, Bevölkerung, Gewässerabfluss). Diese Daten würden eine gute empirische Grundlage und ein gutes Systemverständnis für die Modellierung, die Identifizierung der Emissionsquellen, aber auch für die Auswahl der wirksamsten Maßnahmenkombinationen schaffen.

- Die Inventare diffuser Emissionen sollten auf Modellen auf Einzugsgebietsebene mit geeigneten Emissionsfaktoren beruhen, die alle relevanten Pfade abbilden und gleichzeitig die Verbindung zu den Quellen aufrechterhalten. Diese Modelle sind in der Lage, die Wasseremissionen bis zu den Pfaden und Quellen zurückzuverfolgen und können die Auswirkungen von Maßnahmen auf den Zustand der Gewässer und ihre Wirksamkeit zur Verringerung der Emissionen bewerten.
- Indikatorsubstanzen für transnationale Emissionsinventare sollten sorgfältig ausgewählt und auf der Ebene des gesamten Einzugsgebiets basierend auf einem internationalen Konsens festgelegt werden. Alle relevanten Spurenstoffgruppen sollten in der Bestandsaufnahme der Donauländer vertreten sein.
- Darüber hinaus besteht ein großer Bedarf an gut konzipierten und gezielten Überwachungsmaßnahmen im gesamten Donaauraum über längere Zeiträume, die sich auf eine begrenzte Anzahl von Stoffen konzentrieren, aber über die derzeitigen Aktivitäten des Transnational Monitoring Networks (TNMN 2023) hinausgehen und auch organische Spurenstoffe sowie ausgewählte Emissionspfade enthalten. Gut durchdachte Überwachungsprogramme, um Emissionsinventare mit transnationalen Datensätzen speisen zu können, sollten gestartet werden.
- Die Anwendung einer modellgestützten Risikobewertung auf der Ebene des Einzugsgebiets kann dazu beitragen, den gesamten Prozess der Überwachung von Oberflächengewässern zu optimieren. Emissionsseitiges Monitoring, Modellierung und Bestandsaufnahme können die Kosten für die Immissionsüberwachung senken, indem das Monitoring der Oberflächengewässer auf diejenigen Wasserkörper ausgerichtet

wird, in denen der Belastungsdruck erheblich ist. Sie können auch dazu beitragen, die Überwachungsbemühungen auf neue und problematische Verbindungen zu konzentrieren, über die nur wenig Wissen vorhanden ist.

- Darüber hinaus wichtig ist, dass ein besserer, kostenloser Zugang zu den Monitoring- und Inventardaten sowie zu den registrierten Emittenten gewährt wird.

4.4 Aktionsplan

Maßnahmen zur Verbesserung der Belastungssituation der Gewässer des Donaeinzugsgebiets sollten entsprechend der Hierarchie der Belastungskontrolle konzeptioniert werden (Abb. 13).

- Vorrang sollte die Vermeidung an der Quelle haben, um schon die Freisetzung schädlicher Chemikalien möglichst gering zu halten. Dies kann durch das Verbot oder die Beschränkung der Produktion und des Inverkehrbringens bestimmter gefährlicher Chemikalien gewährleistet werden, aber auch eine verbesserte Abfallwirtschaft und ein verbesserter Pflanzenschutz können eine wichtige Rolle bei der Verringerung der Freisetzung dieser Stoffe spielen. Darüber hinaus sind Verhaltensänderungen der Menschen, Aufklärung und Bewusstseinsbildung in der Gesellschaft ebenfalls von entscheidender Bedeutung, um einen vernünftigen und verantwortungsvollen Umgang mit Chemikalien im täglichen Leben zu gewährleisten.
- Da viele der Chemikalien weit verbreitet sind und ihre Nutzung nicht gänzlich verhindert werden kann, sich einer Regelung aus wasserwirtschaftlichen Aspekten heraus ent-

ziehen oder sich bereits Stoffdepots in Siedlungen oder Umwelt gebildet haben, sind Maßnahmen zur Kontrolle der Emissionspfade und der Mobilisierung von SpS für die Wasserwirtschaft von größter Bedeutung. Eine angemessene Behandlung kommunaler und industrieller Abwässer, die besten verfügbaren Techniken an Industriestandorten, die Kontrolle von Mischwasserüberläufen und Abläufen aus der Niederschlagskanalisation, der Wasserrückhalt in urbanen Gebieten, die Verringerung des Abflusses und des Bodenverlusts von Ackerflächen durch Methoden der guten landwirtschaftlichen Praxis sind die wichtigsten Maßnahmen. Die Maßnahmen auf dieser Stufe der Hierarchie der Belastungskontrolle sollten an dem Konzept der „prioritären Pfade“ orientiert sein, welches dann anstelle des Konzepts der prioritären Stoffe treten könnte. Eine Kontrolle der Maßnahmenwirksamkeit könnte über gezielt gewählte Indikatorsubstanzen (siehe oben), als Repräsentanten für den jeweiligen Emissionspfad, erfolgen.

- Für Stoffe, die sich bereits in der Umwelt befinden, können Rückhaltmaßnahmen sowohl im Einzugsgebiet als auch in den Gewässern eine Rolle spielen. Pufferzonen, grüne Infrastruktur, Feuchtgebiete und Überschwemmungsgebiete sind gute Beispiele für diese Maßnahmen, die weitere positive Auswirkungen auf den Wasserhaushalt haben, wie z. B. Wasserrückhalt, Hochwasserschutz, Anpassung an den Klimawandel und Erhaltung der biologischen Vielfalt. Dennoch sollten sie nicht als naturbasierte Behandlungseinrichtungen betrachtet werden, die Maßnahmen zur Reduktion von Emissionen aus Quellen oder Pfaden ersetzen.

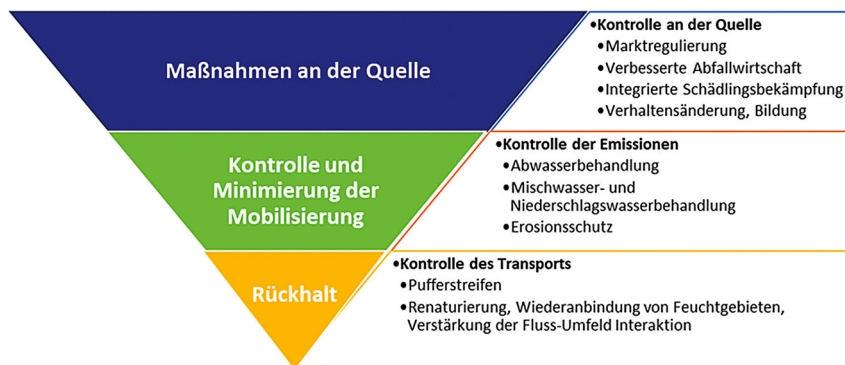


Abb. 13 Hierarchie der Belastungskontrolle

Danksagung Die den hier dargestellten Ergebnissen zugrunde liegende Forschung wurde von Seiten des Interreg-Danube-Transnational-Programms der Europäischen Union im Rahmen des Projekts Danube Hazard m³c (DTP3-299-2.1) gefördert. Eine Kofinanzierung erfolgte durch das Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Regionen und Wasserwirtschaft (vormals Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus) sowie einer Reihe weiterer nationaler Behörden im Donaueinzugsgebiet. Wir danken allen Fördergebern. Ebenso bedanken wir uns bei den wasserwirtschaftlichen Abteilungen des Burgenlands und von Niederösterreich für die tatkräftige Unterstützung beim Gewässermonitoring sowie bei Privatpersonen, die uns als

„citizen scientists“ bei der Probenahme von atmosphärischer Deposition unterstützt haben.

Funding Open access funding provided by TU Wien (TUW).

Open Access Dieser Artikel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Artikel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.

Weitere Details zur Lizenz entnehmen Sie bitte der Lizenzinformation auf <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>.

Literatur

- Alygizakis, N., et al. (2021):** Chapter 29. Wide-scope target screening of industrial chemicals and plant protection products in wastewater, groundwater, river water, sediments and biota by liquid and gas chromatography coupled with high-resolution mass spectrometry. In Joint Danube Survey: a comprehensive analysis of Danube water quality. ISBN: 978-3-200-07450-7. 2021: Vienna, Austria.
- Brielmann, H., Döberl, G., Weiß, St., Grath, J. (2023):** PFAS in Österreichs Grundwasser: Verbreitung, Bewertung und Rolle von Altstandorten als potenzielle Quellen, Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 75 (9–10) (in diesem Heft)
- Broer, M., Rossman, T., Gabriel, O. (2023):** Emissionsmodellierung von Spurenstoffen am Beispiel von sieben Pilotregionen im Donaueinzugsgebiet. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 75 (9–10) (in diesem Heft)
- Chorus, I., Zessner, M. (2021):** Assessing and controlling the risk of cyanobacterial blooms: Nutrient loads from the catchment. In: Chorus I, Welker M (eds), Toxic Cyanobacteria in Water, 2nd edition. CRC Press, Boca Raton (FL), on behalf of the World Health Organization, Geneva, CH. <https://www.who.int/publications/m/item/toxic-cyanobacteria-in-water---second-edition>
- Clara, M. und Müller-Rechberger, H. (2023):** Spurenstoffe in Gewässern und bei der Abwasserreinigung: Vorschläge der Europäischen Kommission zur Aktualisierung der Umweltqualitätsnormenrichtlinie und der kommunalen Abwasserrichtlinie, Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 75 (9–10) (in diesem Heft)
- Clement, A., Kardos, M. K., Jolánkai, Z.,... and Bordos, G. (2023):** Output O.T1.2, Demonstration of a harmonized and cost-effective measurement concept for the monitoring of HS river pollution and of HS emission pathways in 7 pilot regions, DHm³c, <https://www.interreg-danube.eu/approved-projects/danube-hazard-m3c/outputs>. Zugegriffen: 20.04.2023
- DHm³c (2023):** Danube Hazard m³c—Tackling hazardous substances pollution in the Danube River Basin by Measuring, Modelling-based Management and Capacity building. Interreg Danube Transnational Programme. <https://www.interreg-danube.eu/approved-projects/danube-hazard-m3c>. Zugegriffen: 20.04.2023
- Dimova, G., Steidl, C., Kaps, R., ..., Ullrich, A. (2023):** Critical review of current national policies regarding hazardous substances water pollution in the Danube River Basin. DHm³c reports, <https://www.interreg-danube.eu/approved-projects/danube-hazard-m3c/outputs>. Zugegriffen: 20.04.2023
- ECHA (2013):** PFAS restriction proposal. <https://echa.europa.eu/de/-/echa-publishes-pfas-restriction-proposal>. Zugegriffen: 01.06.2023
- EK (2019):** Der europäische Grüne Deal. Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Europäischen Rat, den Rat, den Europäischen Wirtschaftsausschuss und den Ausschuss der Regionen. COM(2019) 640 final. 11.12.2019, Brüssel, Belgien. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?qid=1576150542719&uri=COM%3A2019%3A640%3AFIN>. Zugegriffen: 01.06.2023
- EK (2020a):** EU „Vom Hof auf den Tisch“ Strategie. <https://www.consilium.europa.eu/de/policies/from-farm-to-fork/>. Zugegriffen: 01.06.2023
- EK (2020b):** EU-Biodiversitätsstrategie für 2030. <https://www.consilium.europa.eu/de/policies/biodiversity/#2030>. Zugegriffen: 01.06.2023
- EK (2022):** Vorschlag für eine Richtlinie des Europäischen Parlamentes und des Rates zur Änderung der Richtlinie 2000/60/EG zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik, der Richtlinie 2006/118/EG zum Schutz des Grundwassers vor Verschmutzung und Verschlechterung und der Richtlinie 2008/105/EG über Umweltqualitätsnormen im Bereich der Wasserpolitik. COM(2022) 540 final. 26.10.2022, Brüssel, Belgien. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52022PC0540&qid=1678104696984>.
- EK (2012):** Europäische Kommission, Technical guidance on the preparation of an inventory of emissions, discharges and losses of priority and priority hazardous substances. Guidance document No 28—, European Commission, Directorate-General for Environment, <https://doi.org/10.2779/2764>
- EK (2021):** Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen: Auf den Weg zu einem gesunden Planeten für alle. EU-Aktionsplan: „Schadstofffreiheit von Luft, Wasser und Boden“
- EU (1991):** Richtlinie 91/271/EWG des Rates vom 21. Mai 1991 über die Behandlung von kommunalem Abwasser
- EU (2013):** Richtlinie zur Änderung der Richtlinien 2000/60/EG und 2008/105/EG in Bezug auf prioritäre Stoffe im Bereich der Wasserpolitik. Amtsblatt der Europäischen Union Nr. L 226/1 vom 24.08.2013.
- Helsel, D.R. (2011):** Statistics for censored environmental data using Minitab and R, 77. John Wiley & Sons.
- ICPDR (2021):** Danube River Basin Management Plan (DRBMP) Update 2021. International Commission for the Protection of the Danube River (Internationale Kommission zum Schutz der Donau)
- Kittlaus, S., Clara, M., van Gils, J., Gabriel, O., Broer, M. B., Hochedlinger, G., Trautvetter, H., Hepp, G., Krampe, J., Zessner, M., Zoboli, O. (2022):** “Coupling a pathway-oriented approach with tailor-made monitoring as key to well-performing regionalized modelling of PFAS emissions and river concentrations”. Science of The Total Environment, 849 2022, 157764
- Kittlaus, S., Clement, A., Kardos, M. K., Dudás, K. M., Weber, N., Zoboli, O., & Zessner, M. (2023):** Inventory of hazardous substance concentrations in different environmental compartments in the Danube river basin (1.0.0) [Data set]. TU Wien. <https://doi.org/10.48436/xwv4-h7v43>
- Kovacs, A., van Gils, J., Sibren, L. (2023a):** Upgraded version of the Solutions model adapted to territorial needs for transnational modelling of HS emissions in the DRB (Danube Hazardous Substances Model). DHm³c report. <https://www.interreg-danube.eu/approved-projects/danube-hazard-m3c/outputs>. Zugegriffen: 20.04.2023
- Kovacs, A., van Gils, J., Sibren, L. (2023b):** Danube Hazardous Substances Model (DHSM) (1.0.0). DHm³c output. TU Wien. <https://doi.org/10.48436/1yam1-e0y86>

Kovacs, A., van Gils, J., Sibren, L., ... Kučić Grgić, D. (2023c): Policy guidance document for improved representation of hazardous substances pollution in the Danube and national river basin management plans. DHm³c output. <https://www.interreg-danube.eu/approved-projects/danube-hazard-m3c/outputs>. Zugegriffen: 20.04.2023

Liu, M., Saracevic, E., Kittlaus, S., Oudega, T., Obeid, A., Nagy-Kovács, Z., László, B., Krlovic, N., Saracevic, Z., Lindner, G., Rab, G., Derx, J., Zoboli, O., Zessner, M. (2023): PFAS-Belastungen im Einzugsgebiet der oberen Donau. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 75 (9–10) (in diesem Heft)

Obeid, A.A., Oudega, T.J., Zoboli, O., Gundacker, C., Blaschke, A.P., Zessner, M., Saracevic, E., Devau, N., Stevenson, M.E., Krlovic, N., Liu, M., Nagy-Kovács, Z., László, B., Sommer, R., Lindner, G., Derx, J. (2023): The Occurrence and Persistence of PFAS at Riverbank Filtration

Sites in the Upper Danube Basin. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 75 (9–10) (in diesem Heft)

Schaar, H., Krampe, J., Kreuzinger, N. (2023): Einsatzbereiche und Grundlagen für die 4. Reinigungsstufe in Österreich. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 75 (9–10) (in diesem Heft)

Sonmez Baghirzade, B., Zhang, Y., Reuther, J. E., Saleh, N. B., Venkatesan, A. K., & Apul, O. G. (2021): Thermal regeneration of spent granular activated carbon presents an opportunity to break the forever PFAS cycle. Environmental Science & Technology, 55(9), 5608–5619.

TNMN (2023): TNMN—TransNational Monitoring Network. (Zugriff: 7.6.2023) <https://www.icpdr.org/main/activities-projects/tmnn-transnational-monitoring-network>. Zugegriffen: 07.06.2023

Tuchiu, E., Marchida, E. Boscornea, C. ... & Zoboli, O. (2023): Output T4.5, Technical Gui-

dance Manual of the best practices on hazardous substances pollution management in water for stakeholders, DHm³c. <https://www.interreg-danube.eu/approved-projects/danube-hazard-m3c/outputs>. Zugegriffen: 20.04.2023

Vu, C. T., & Wu, T. (2022): Recent progress in adsorptive removal of per- and poly-fluoroalkyl substances (PFAS) from water/wastewater. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 52(1), 90–129.

Zessner, M. (2021): Monitoring, Modeling and Management of Water Quality. Water, 13, 1523. <https://doi.org/10.3390/w13111523>

Hinweis des Verlags Der Verlag bleibt in Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutsadressen neutral.