

# Biologisch-toxikologische Echtzeitüberwachung in der Wasserwirtschaft 4.0

Almut Gerhardt, Louisa Rothe, Michael Weyand, Christian K. Feld, Bernd Sures

*Der Multispecies Freshwater Biomonitor® (MFB) ist ein seit dem Jahr 1994 stetig fortentwickeltes Echtzeit-Toximeter zur kontinuierlichen Überwachung der Wasserqualität in Oberflächenwasser, Grundwasser und Abwasser. Nach umfangreicher wissenschaftlicher Erforschung der verschiedenen Anwendungsbereiche wurde der MFB bereits erfolgreich in der Überwachung von Flüssen, Wasserwerken und Klärwerken eingesetzt, z. B. über mehrere Jahre an insgesamt sechs verschiedenen Klärwerken zur kontinuierlichen biologischen Überwachung der Abwasserqualität (Emissionskontrolle), zur Vorfluterüberwachung (Immissionskontrolle) und zur Bewertung einer Pilotanlage zur Reinigung mit Pulveraktivkohle sowie einer Ozonanlage mit Bachflohkrebsen oder Insektenlarven als Bioindikatoren. Je nach Klärwerk und Abwasserzusammensetzung konnten Standzeiten von ein bis zwei Wochen erreicht werden, bei Verdünnung des Abwassers z. B. mit Vorfluterwasser können die Standzeiten verlängert werden. Derartige Verdünnungsszenarien spiegeln realistische Verhältnisse im Vorfluter wider.*

*Der MFB konnte während des Langzeitbetriebes folgendes anzeigen: (1) Prozessstörungen, z. B. bedingt durch Schadstoffeintrag, (2) die Reinigungsleistung einer Kläranlage durch den Vergleich Zulauf/Ablauf, (3) den Reinigungserfolg der Pulveraktivkohlestufe bzw. der Ozonanlage im Pilotmaßstab und (4) die Bedeutung der Vorbelastung des Flusswassers durch Agrochemikalien für die Bewertung der Abwasserreinigung.*

## Biological-toxicological real-time monitoring in water management 4.0

*The Multispecies Freshwater Biomonitor® (MFB) is a unique real-time toximeter, that has been developed in 1994 and since then continuously adapted, for the permanent surveillance of the water quality in surface water, ground water and wastewater. After intensive scientific research in different fields of application, the MFB has already been used successfully in monitoring rivers, waterworks and wastewater treatment plants, e.g. over several years in totally six WWTPs for monitoring the effluent (emissions), the receiving water body (immissions), evaluation of the advanced purification technologies (PAK, ozone) with gammarids or insect larvae as bioindicators. Depending on the local situation, the wastewater has been diluted with river water, representing realistic scenarios in the environment. Stand-alone times of up to two weeks could be achieved.*

*By using the MFB it was possible to indicate: (1) process disturbances caused by chemicals, (2) the treatment success of the plant by comparing inflow/effluent, (3) the purification success of a pilot active coal advanced treatment step and an ozonation step and (4) the importance of the toxin loads (e.g. by agrochemicals) in river water upstream of a WWTP.*

### 1 Einleitung

Abwasser stellt ein tages- und jahreszeitlich variierendes, komplexes Gemisch aus zahlreichen bekannten und unbekanntem Schadstoffen und deren Abbau-/Transformationsprodukten dar. Mehrere Spurenstoffe/Mikroverunreinigungen (z. B. Pestizide, Biozide, Medikamentenrückstände) können derzeit bis ca. 80 % aus dem Abwasser entfernt werden, wobei die Eliminationsraten stoffspezifisch stark schwanken und z. B. gut wasserlösliche, polare Verbindungen oft nicht hinreichend entfernt werden können [1].

Der Klimawandel fordert Anpassungen in der Wasserwirtschaft. Bei Starkregen werden die Regenüberlaufbecken vielerorts überlastet, sodass ungeklärtes Abwasser in den Vorfluter gelangen kann. In Trockenphasen und Dürreperioden kann sich in kleinen Gewässern das Verhältnis Abwasseranteil/Oberflächenwasseranteil deutlich verschlechtern. In Trockenphasen kann es auch zur Aufkonzentrierung von Schadstoffen oder Salzen im Wasser kommen. Dies alles bewirkt eine zusätzliche Belastung aquatischer

Ökosysteme, oft auch in direkter Kombination mit steigenden Wassertemperaturen und deren ökologischen Folgen in Bezug auf Sauerstoffdefizite und Artenverschiebungen zugunsten wärmeliebender Neobiota oder toleranter Arten im Gewässer.

Neben den Belastungen durch extreme Trockenheit kann auch der durch den Klimawandel bedingte, lokal auftretende und schwer vorhersagbare Starkregen zu vermehrten oberflächlichen Auswaschungen und damit zum Eintrag von Schadstoffen in Oberflächengewässer führen. Weiterhin werden klimawandelbedingt vermehrt Hochwässer im Spätwinter und Frühjahr prognostiziert [2, 3].

Die Wasserrahmenrichtlinie (2000/60/EG) fordert seit ihrer Einführung im Jahr 2000 die Wiederherstellung eines guten chemischen und ökologischen Zustandes in den europäischen Oberflächen- und Küstengewässern sowie des mengenmäßigen und chemischen guten Zustandes des Grundwassers. Dies wird durch die oben beschriebenen Ereignisse und ökologischen Folgen zusätzlich erschwert.

Bei der Bewertung der toxischen Wirkung des Abwassers auf Gewässerorganismen stehen nicht einzelne Schadstoffe und deren einzelne Konzentrationen, sondern die integrative Wirkung des gesamten Stoffspektrums auf Gewässerlebewesen im Zentrum. Biologische Verfahren werden deshalb vermehrt im Bereich wasserrechtlicher Regelungen eingesetzt, z. B. für die Risikobewertung oder für die Abwasserüberwachung. Enthält das Abwasser Stoffe/Stoffgruppen, die bereits wegen der (vorsorglichen) Besorgnis/des Verdachts einer Giftigkeit als gefährlich einzustufen sind, so müssen die Anforderungen an die Anlage dem Stand der Technik entsprechen (WHG § 7). In der IVU Richtlinie (2008/1/EG) und in der nachfolgenden Industrieemissionsrichtlinie (2010/75/EG) wird sogar von „bester verfügbarer Technik“ gesprochen, die verwendet werden soll, um Auswirkungen auf die Umwelt zu vermindern. Dies erlaubt es auch bei der Anlagenüberwachung neuere Techniken anzuwenden, sofern sie wirksamer sind als der übliche Technikstandard [1].

Obwohl in der AbwV (2018) meist eine Verfahrensbindung zu den biologischen und chemischen Analyseparametern in den Anhängen genannt wird, ist dennoch die Anwendung gleichwertiger Verfahren, die gleichwertige Aussagen erlauben, ausdrücklich erlaubt. Hier bietet das online Biomonitoring zur biologisch-toxikologischen Überwachung eine gleichwertige Alternative zu den etablierten Laborbiotests.

## 2 Methoden

Ein online Biomonitor besteht aus den folgenden Komponenten [2]:

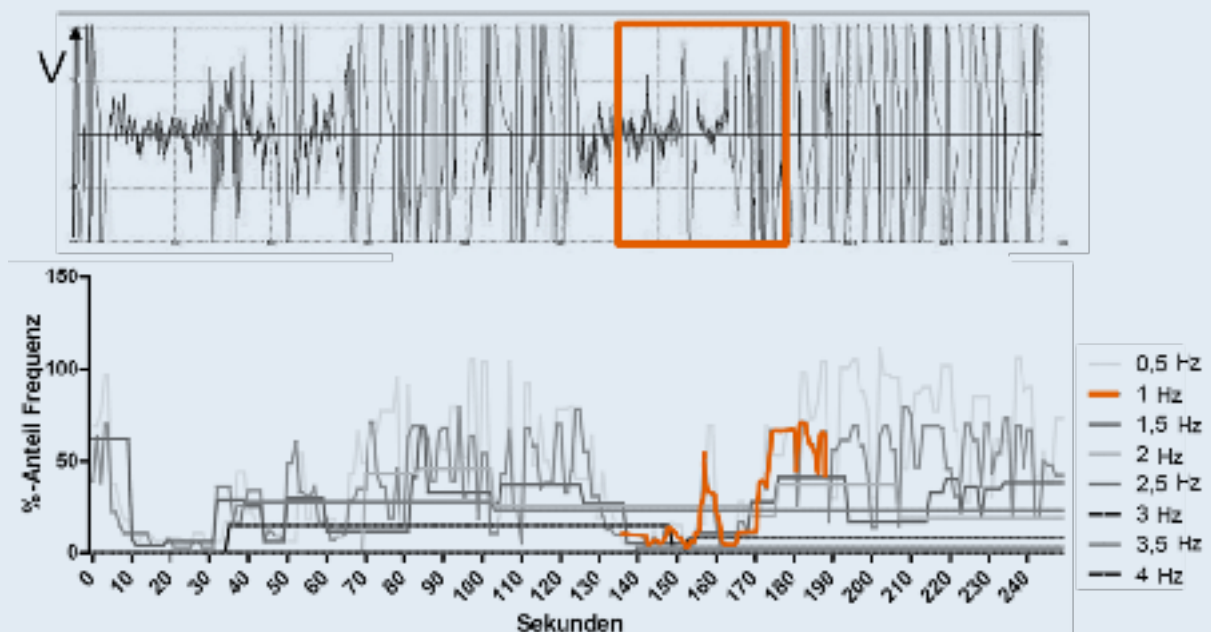
- einem sensitiven und gewässertypischen Zeigerorganismus mit einer empfindlichen Reaktion (z. B. physiologisch, Verhalten) auf sublethale Schadstoffstress,

- einer Messmethode, die diesen Parameter quantitativ und ohne Artefakte misst und
- einer Software, die aus den gemessenen Daten einen verlässlichen und sinnvollen Alarm berechnet.

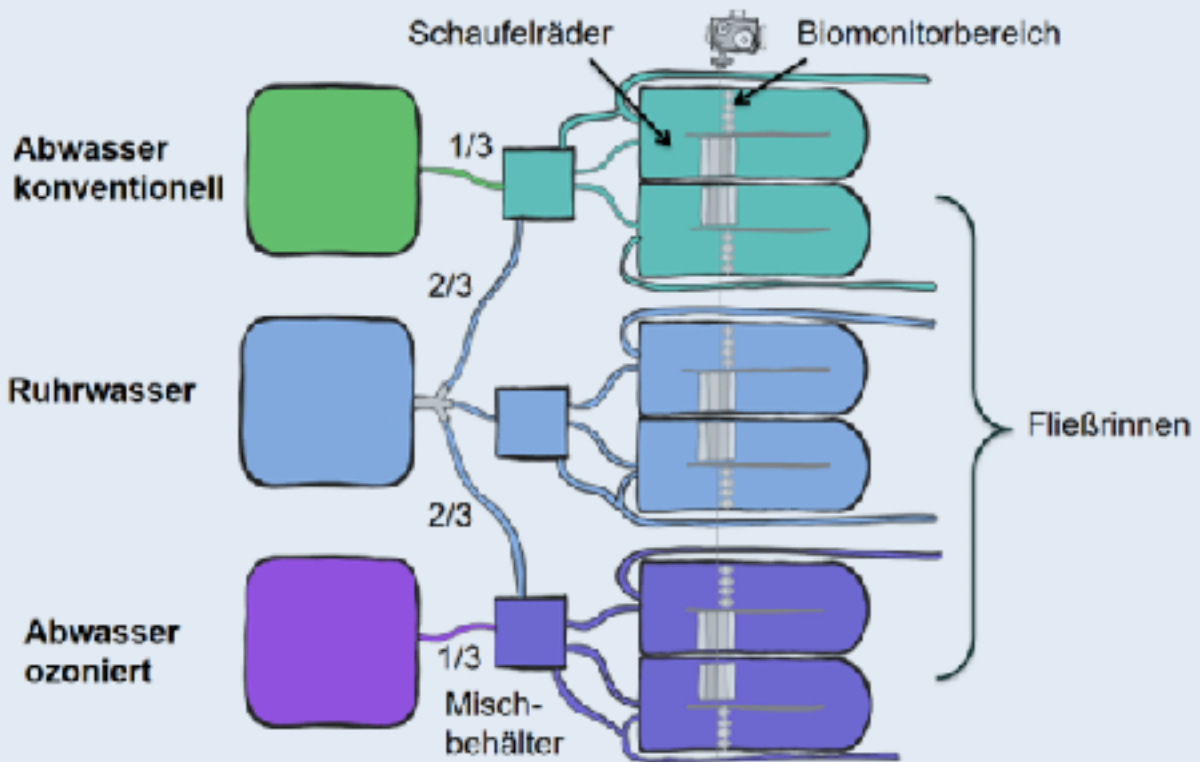
Als sog. „kontinuierlicher Biotest“ wird das Wasser im online Biomonitor ständig erneuert, d.h. dieser misst im Durchfluss [1].

Methodisch kommen neben optischen Verfahren (Lichtschranken, Videoaufzeichnungen) Drucksensorik, Ultraschall sowie elektronische Verfahren (magnetische Induktion, bioelektrische Impulse, Impedanzmessungen) zum Einsatz. Nicht-optische Verfahren haben generell den Vorteil, dass sie kein transparentes Medium benötigen, d. h. auch trübe, gefärbte Rohwässer sowie Boden und Sediment können direkt und ohne vorherige chemisch/physikalische Aufbereitung verwendet werden. Dies ist sinnvoll, da bei der Aufbereitung, z. B. Filtration, partikelgebundene Schadstoffe bereits entfernt werden und somit die Toxizität des Wassers potenziell unterschätzt wird [1].

Der Multispecies Freshwater Biomonitor (MFB, LimCo International GmbH) beruht auf der nicht-optischen 4-polaren Impedanztechnik [4, 5] und wird in der ökotoxikologischen Forschung und Praxis (Klärwerke, Wasserwerke, Oberflächengewässer) vielfältig erfolgreich eingesetzt. Der MFB ist ein modularer Echtzeit-Biomonitor mit mindestens acht und maximal 96 Messkanälen, an welche jeweils eine Messzelle angeschlossen werden kann, in welche je ein Bioindikatororganismus exponiert wird, welcher sich darin frei bewegen kann. Bisher wurden über 25 verschiedene Arten (Wirbellose und Fische, Süßwasser und Meerwasser, Sediment, Boden) getestet. Die Messzellen werden gemäß den ökologischen Ansprüchen der verwendeten Tierart konstruiert, damit eine Langzeitexposition möglich ist. Ein typisches Beispiel eines Verhaltensignales zeigt **Bild 1**.



**Bild 1:** Verhaltenssignal (V) von *G. fossarum* mit Phasen der Lokomotion (niederfrequente Signale) und Kiemenventilation (hochfrequente Signale, z. B. zwischen 20 und 30 s.), aufgesplittet in verschiedene Signalfrequenzen im unteren Teil der Abbildung. Für die weitere Auswertung wurde 1 Hz als typische Frequenz für die Lokomotion von *G. fossarum* gewählt.



**Bild 2:** Aufbau der Freiland-Versuchsanlage zur Untersuchung der Reinigungsleistung der Ozonanlage einer Kläranlage im Vergleich zu konventionell gereinigtem Abwasser und Flusswasser (Ruhr). Das Abwasser wurde mit Flusswasser verdünnt durch die Durchflussrinnen geleitet, welches ein ökologisch realistisches Szenario darstellt (Zeichnung © L. Rothe).

Der MFB wurde in verschiedenen Klärwerken mit gereinigtem Abwasser, kurz vor Ablauf in den Vorfluter, kurz mit verschiedenen Gammaridenarten (z. B. *G. pulex*, *G. fossarum*), die entweder aus unbelasteten Bächen der näheren Umgebung oder aus der Laborzucht entnommen wurden, über mehrere Wochen bis zu drei Jahren betrieben. Außerdem wurde die Wirkung einer PAK sowie einer Ozon Pilotanlage zur Entfernung von Spurenstoffen getestet. Der Aufbau des MFB an einer Kläranlage in NRW mit Ozonstufe ist schematisch in **Bild 2** dargestellt. Hier wurde gemeinsam mit der Universität Duisburg-Essen und dem Ruhrverband ein mehrjähriges Projekt zur Erforschung der Auswirkungen der Ozonierung auf die Abwasserreinigung und die Gewässerlebewelt (z. B. Gammariden, EPT-Taxa) untersucht [6].

### 3 Ergebnisse

#### 3.1 Automatisierter Betrieb des MFB

Die Versuche an den verschiedenen Klärwerken zeigten, dass das Abwasser vor Einstrom in die mit den MFB-Sensoren ausgestattete Fließrinne mit Sauerstoff angereichert werden sollte, um eine stabile Sauerstoffsättigung von > 60 % zu erreichen. Das einströmende Wasser sollte die Rinne von unten nach oben ruhig und ohne Verwirbelungen durchfließen, dies kann z. B. mit einem Lochblech über den gesamten Rinnenquerschnitt leicht erreicht werden. Da das gereinigte Abwasser ungefiltert verwendet wird, enthält es genügend organische Bestandteile, Algen, Pilze und Bakterien, die als Biofilm eine Nahrungsgrundlage für die in den

Messkammern eingesetzten Zeigertiere darstellen. Zusätzlich kann auch ein vorgeweichtes Blattstück (Erle) zugegeben werden [1].

Einmal wöchentlich ist eine Wartung der Anlage zu empfehlen. Hierbei werden die Messkammern geöffnet, mit Wasserstrahl gereinigt und ggf. neue Tiere und Blattstücke eingesetzt. Auch die Durchflussrinne wird mit Wasserstrahl rasch und effizient gereinigt. Die neuen Tiere stammen aus der Vorratshaltung im Klärwerkseigenen Kühlschrank. Die Alarmdaten können entweder jederzeit direkt auf dem Bildschirm angesehen werden oder über eine WLAN-Verbindung mit Fernzugriff weitergeleitet werden. Der Zeitaufwand beträgt für alle Arbeiten wöchentlich ca. 1 Stunde [1].

Die Standzeiten mit Gammariden variierten in den Beispielklärwerken stark, je nach Abwasserzusammensetzung mit Spurenstoffen und sonstigen Belastungen, z. B. Salzen, Stärke oder Industriechemikalien. *Gammarus fossarum* aus der Laborzucht erreichte eine maximale Standzeit von bis zu 14 Tagen in drei Klärwerken. Feldpopulationen von Gammariden erreichten eine Standzeit von einer Woche in zwei Klärwerken, bei Verdünnung des Abwassers mit Vorfluterwasser (50:50 %) konnte die Standzeit in einer Kläranlage auf zwei Wochen verlängert werden [1]. Außerdem konnte ein Interface entwickelt werden, welches im Alarmfall (z. B. bei 50 % Mortalität) automatisch einen Wasserprobennehmer triggert, um eine ereignisgesteuerte Wasserprobe für die nachgängige chemische Spurenstoffanalytik zu ziehen. Dies erlaubt es Verursacher von Verschmutzungspulsen direkt ausfindig zu machen.

### 3.2 Bewertung der Reinigungsleistung von erweiterten Aufbereitungsschritten

In einer Kläranlage wurde der Einfluss einer Pilotanlage zur Nachklärung mit Pulveraktivkohle in zwei Messperioden von je 14 Tagen getestet, d. h. ein Vergleich des Abwassers vor und nach dem PAK-Schritt mit *G. fossarum* aus der Laborzucht. Es zeigte sich, dass das Abwasser vor der PAK Stufe eine deutlich höhere Mortalität hervorrief (1. Versuch: 25 %, 2. Versuch: 40 %) als nach der PAK Stufe (1. Versuch: 12,5 %, 2. Versuch: 0 %). Auch das Verhalten der Tiere unterschied sich dahingehend, dass vor der PAK Stufe die Gammariden generell weniger aktiv waren und mehr Stressatmung zeigten (1. Versuch: 12,5 %, 2. Versuch: 87,5 %) als nach der PAK Stufe (1. Versuch: 0 %, 2. Versuch: 25 %). Dies deutet auf eine bessere Fitness der Gammariden nach einer Reinigung mit Pulveraktivkohle hin.

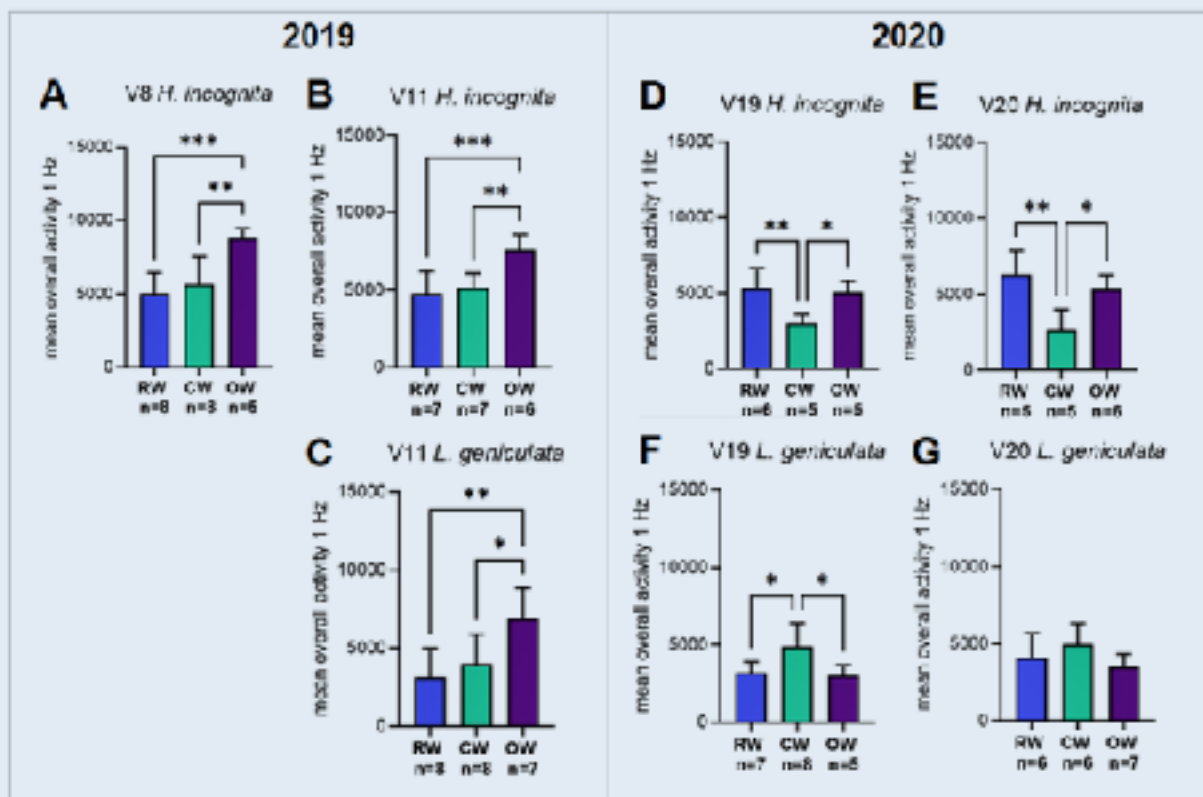
In Zusammenarbeit mit der Universität Duisburg-Essen und dem Ruhrverband zeigte ein mehrjähriger Großversuch mit verschiedenen Zeigerarten des Makrozoobenthos (*G. fossarum*, *Leuctra geniculata*, *Hydropysche incognita*) an einer Kläranlage mit Ozonstufe in NRW folgendes: Die lokomotorischen Aktivitäten von *H. incognita* (Trichoptera) und *L. geniculata* (Plecoptera) unterschieden sich deutlich zwischen den einzelnen Wasserqualitäten (Bild 3). Diese Unterschiede in den Verhaltensmustern deuten auf weitere Einflussfaktoren, z. B. Saisonalität, wetterbedingte

Abwasserzusammensetzung, schwankende Zusammensetzung des Flusswassers, verwendete Tierart als Indikator hin. Eine weiterführende detaillierte Datenauswertung, die das Verhalten aller durchgeführten Versuche in den Jahren 2019 und 2020 mit einem Schadstoffgruppen-spezifischen Ansatz basierend auf Regressionsmodellen ausgewertet, ist in Bearbeitung.

### 4 Diskussion

Das online Biomonitoring mit dem Multispecies Freshwater Biomonitor wurde zur Abwasserüberwachung und Toxizitätsermittlung erstmals im Jahr 2000 durchgeführt [7] sowie in neueren [1, 8] und aktuellen Studien fortgesetzt.

Die vorliegenden Beispiele zeigen, dass online Biomonitoring in verschiedenen Kläranlagen mit unterschiedlicher Abwasserzusammensetzung und Schadstoffproblematik mit Gammariden erfolgreich eingesetzt werden kann. Das online Biomonitoring kann hier als gleichwertige Methode im Vergleich zu effektbasierten Laborbiotests eingesetzt werden, liefert darüber hinaus sogar kontinuierliche Ergebnisse und erlaubt eine chronische Langzeitexposition (je nach Abwassertoxizität und Verdünnungsgrad). Damit zählt das online Biomonitoring für die Abwasserbewertung/-überwachung zu den „best-verfügbaren“ Techniken, die hervorragend zum Gewässerschutz beitragen, da mit



**Bild 3:** Lokomotorische Aktivität der beiden Zeigerarten *H. incognita* (Trichoptera) (oben) und *L. geniculata* (Plecoptera) (unten) in den beiden Abwassertypen (jeweils verdünnt mit Ruhwasser: Verhältnis 1:2), exemplarisch für die Versuche 8, 11, 19 und 20 (jeweils 14 Tage Exposition). Dargestellt sind die Mittelwerte ( $\pm$  SD) der Gesamtaktivität der überlebenden Tiere über den gesamten Versuchszeitraum. RW = Ruhwasser, CW = konventionell behandeltes Abwasser, OW = zusätzlich ozoniertes Abwasser. Signifikante Unterschiede sind auf Basis einer One-way ANOVA mit Tukey's post hoc-Test mit \*:  $p \leq 0,05$ , \*\*:  $p \leq 0,01$  bzw. \*\*\*:  $p \leq 0,001$  gekennzeichnet.

Hilfe von biologischen Verfahren eine integrative Bewertung der Toxizität des Abwassers möglich ist, und mit online Biomonitoring im Besonderen auch eine ereignisgesteuerte automatische Wasserprobenahme im Fall der schlechten Fitness der Zeigertiere und damit eine gezielte Aufklärung des dafür verantwortlichen Stoffspektrums erlaubt [1].

Die umfangreiche Studie an einer Ozonanlage zur Überwachung von mit Flusswasser verdünntem Abwasser zeigte, dass durch Ozonung Veränderungen im Verhalten der Tiere festgestellt werden konnten, jedoch auch die Stoffbelastung des zur Verdünnung benutzten Flusswassers eine wichtige Rolle für die Verhaltensreaktion der Zeigertiere spielen kann. In den seltensten Fällen fließt das gereinigte Abwasser in einen chemisch unbelasteten Fluss, sodass die Vorbelastungen, z. B. durch diffuse Einträge, weitere Klärwerke im Oberlauf, etc. in die Bewertung der Biomonitoringergebnisse einfließen müssen. Deshalb ist immer standortspezifisch zu entscheiden, welchen Sinn eine weitere Abwasserreinigungsstufe im Vergleich zur Vorbelastung, der zu erwartenden spezifischen Reinigungsleistung und der möglichen Bildung von toxischen Transformationsprodukten bringt.

In Bezug auf die Ozonung ist zu erwähnen, dass alle Tierarten in den anfänglichen Versuchen mit unverdünntem Abwasser in dem Ozon-behandelten Abwasser höhere Mortalitäten zeigten als in den anderen Wassertypen. Dies wird auf die starke Sauerstoffzehrung durch die Abbauvorgänge in der Ozonanlage und/oder unbekannte Transformationsprodukte zurückgeführt. Dieser Effekt war jedoch bei verdünntem Abwasser nicht mehr messbar. Dies zeigt, dass man vor Einleitung von ozoniertem Abwasser in ein kleines Gewässer, besonders bei Niedrigwasser, darauf achten muss, dass die Sauerstoffsättigung des eingeleiteten Abwassers hoch ist.

## 5. Fazit

Die kontinuierliche biologisch-toxikologische Emissionsüberwachung von ausgewählten Punkteinleitern ist eine geeignete Maßnahme zur Überwachung der Reinigungsleistung in Klärwerken und des ökologischen Zustandes der Gewässer, besonders wenn sie als biologisches Frühwarnsystem kombiniert mit automatischer Wasserprobenahme zur nachfolgenden chemischen Spurenstoffdiagnostik betrieben wird. Weiterhin muss die Vorbelastung des Vorfluters berücksichtigt werden und es bedarf Maßnahmen, diffuse Einträge über die gesamte Lauflänge des Gewässers zu verringern, um die Ziele der Wasserrahmenrichtlinie langfristig erreichen zu können.

## Literatur

- [1] Gerhardt, A. (2019): Online Biomonitoring zur Qualitätskontrolle in Kläranlagen: Erfahrungsbericht. gwf Wasser + Abwasser, Nov. 2019.
- [2] Garack, S. et al. (2022): Entwicklung der ökologischen Beschaffenheit von Oberflächengewässern im Klimawandel. KW 15, Nr. 2, 98-107
- [3] Grünebaum, T. et al. (2021): Folgewirkungen des Klimawandels für den Zustand der Fließgewässer. Bedeutung für Bewertung und Management vor dem Hintergrund der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie. KW 14, Nr. 10. 611-615
- [4] Gerhardt, A., Carlsson, A., Ressemann, C. & K. P. Stich (1998): A new on-line biomonitoring system for *Gammarus pulex* (L.) (Crustacea): in situ test below a copper effluent in South Sweden. Environmental Science & Technology 32 (1), 150-156.
- [5] Gerhardt, A., Clostermann, M., Fridlund, B. & E. Svensson (1994): Monitoring of behavioral patterns of aquatic organisms with an impedance conversion technique. Environment International 20 (2), 209-219.
- [6] Rothe, L.E.; Feld, K.; Sures, B.; Weyand, M.; Gerhardt, A. (2020): Einfluss von Mikroschadstoffen auf Makrozoobenthosorganismen (MZB). In: Gewässerschutz – Wasser – Abwasser, Schriftenreihe des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen, Band 252, S. 9/1-9/8.
- [7] Gerhardt, A. & K. Quindt (2000): Abwassertoxizität und -überwachung mit den Bachflohkrebsen *Gammarus pulex* (L.) und *Gammarus tigrinus* (Sexton) (Crustacea). Wasser und Boden, 52/10, 19-26.
- [8] Bühler, C., Hofer, M., Gerhardt, A. (2014): Online Biomonitoring in der Abwasserreinigung. DWA, KA.

### Autor:innen:

#### **Dr. Almut Gerhardt**

LimCo International GmbH, Konstanz  
www.limco-int.com

#### **Dr.-Ing. Michael Weyand**

Ruhrverband  
Kronprinzenstraße 37, 45128 Essen  
mwy@ruhrverband.de

#### **Prof. Dr. Bernd Sures**

Bernd.sures@uni-due.de

#### **PD Dr. Christian K. Feld**

#### **Louisa Rothe**

Universität Duisburg-Essen  
Fakultät für Biologie  
Aquatische Ökologie  
Universitätsstr. 5, D-45141 Essen  
www.uni-due.de/aquatische\_oekologie/