

# Aktuelle Ergebnisse aus dem Untersuchungsprogramm 2023

*Michael Fleig und Josef Klinger*

*TZW: DVGW-Technologiezentrum Wasser, Karlsruhe*

## Einleitung

Die AWBR untersucht an den Entnahmestellen des Rohwassers einiger AWBR-Mitgliedswerke die Beschaffenheit von Hoch- und Oberrhein sowie Neckar und Donau in jeweils 13 Proben die in 28-tägigem Abstand entnommen werden. Des Weiteren finden einmal jährlich zum Zeitpunkt der möglicherweise stattfindenden Vollzirkulation die Beprobung in Bodensee, Zürichsee, Bielersee und Vierwaldstättersee statt. Die Probenahme wird dabei von Mitarbeitern der Mitgliedsunternehmen vorgenommen.

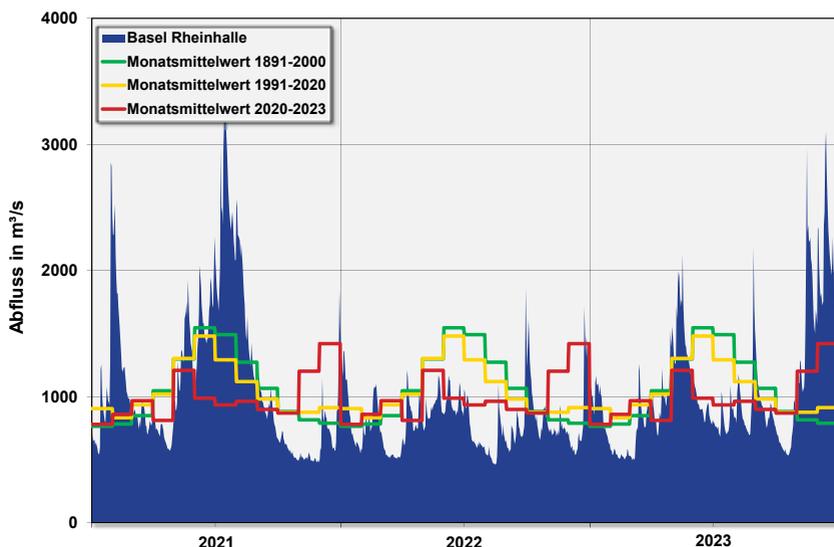
Untersucht wird auf Parameter einer innerhalb der IAWR abgestimmten Liste. Damit wird sichergestellt, dass ein ganzheitliches Bild der Belastungen für das Einzugsgebiet erfasst wird. Diese Liste soll im Jahr 2024 überarbeitet werden und um neue als relevant erkannte Stoffe ergänzt werden. Erfasst werden so Industriechemikalien, Wirkstoffe in Pharmaka und Pestiziden sowie weitere allgemeine und anorganische Parameter. Langfristige Untersuchungen werden zudem auf einige ausgewählte mikrobiologische Kenngrößen durchgeführt. An den Analysen sind die Labore der Mitgliedswerke (Teil A) und das TZW: DVGW-Technologiezentrum Wasser in Karlsruhe (Teile B, C und D) beteiligt.

Die ermittelten Analyseergebnisse liefern Aussagen zur qualitativen Beschaffenheit der Fließgewässer und Alpenseen. Die Einhaltung der Anforderungen, die im Europäischen Fließgewässer-Memorandum (ERM, Fassung 2020) in Form von Zielwerten festgelegt sind, kann so überprüft und gegebenenfalls erforderliche Schritte abgeleitet werden. Zudem sind sie die Grundlage für die wissenschaftliche Tätigkeit des Beirats, für politische Aktivitäten von Vorstand und Präsidium und die Zusammenarbeit mit den Arbeitsgemeinschaften ARW, RIWA und IAWR. Auf diese Weise trägt die AWBR zum Schutz unserer Gewässer und zur langfristigen Sicherstellung der Trinkwasserversorgung für künftige Generationen bei.

Den Mitgliedswerken und ihren Mitarbeitern sowie den Kollegen und Kolleginnen in den AWBR-Gremien, die bei Probenahme, Bestimmung, Dokumentation und Auswertung der Daten beteiligt waren, gilt ein herzlicher Dank für die aktive Unterstützung bei der Durchführung des AWBR-Untersuchungsprogramms.

## Wasserführung und allgemeine physikalisch-chemische Parameter

Im Berichtsjahr 2023 zeigen die **Abflüsse** von Alpen-, Hoch- und Oberrhein deutliche Abweichungen zu den langjährigen Beobachtungsreihen auf. In Bild 1 sind die Abflüsse für den Oberrhein bei Rheinhalle (km 164,30) oberhalb von Basel und unmittelbar unterhalb der AWBR-Messstelle Basel-Birsfelden für die Jahre 2021 - 2023 im Vergleich zu den langfristigen Monatsmittelwerten der Perioden 1991- 2020 bzw. 2020-2023 dargestellt.

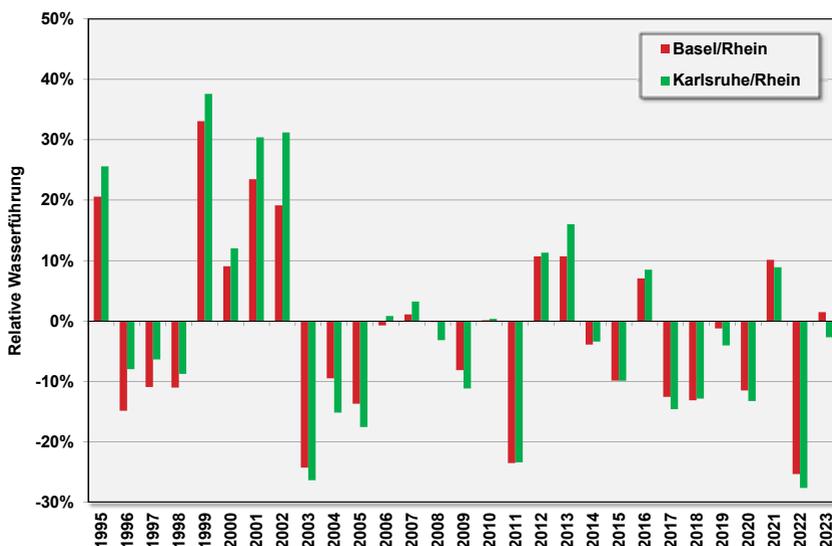


**Bild 1:** Wasserführung im Rhein bei Rheinhalle (2021 – 2023) im Vergleich mit verschiedenen Perioden der Langzeitbeobachtung

Die langjährigen Monatsmittelwerte am Pegel Rheinhalle (früher „Schiffslande“) zeigen den am Rhein typischen Jahresgang mit Niedrigwasser in

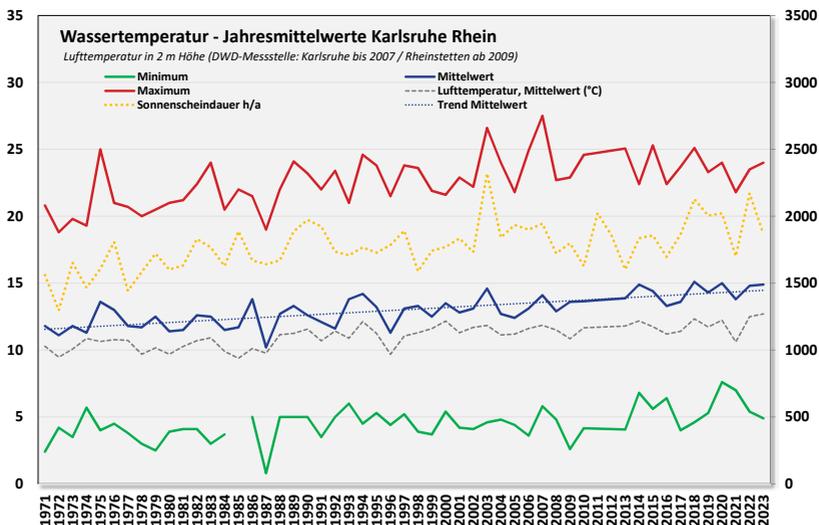
der Winterperiode und Hochwassersituationen gegen Jahresmitte. Dies gilt für die langfristigen Beobachtungszeiträume 1891-2000 und 1991-2020. Die 20-Jahres-Periode 1991-2020 zeigt jedoch bereits eine Abnahme der ab Jahresmitte abfließenden Wassermengen und eine Verlagerung in das hydrologische Winterhalbjahr im Bereich von noch unter 5% der jährlichen Gesamtwassermenge. In der kurzfristige aktuellen Periode 2021 - 2023 weisen die Monatsmittelwerte nicht mehr die bisher typischen Hochwässer im Sommer auf und zeigen dafür in den Wintermonaten deutlich höheren Abflusswerte mit einer Verlagerung von grob 10% der Jahreswassermenge. Allerdings sind für diesen kurzen Zeitraum die recht unterschiedlichen Jahrescharakteristiken zu beachten.

In Bild 2 sind die relativen Abflüsse bezogen auf den langjährigen Mittelwert der Jahre 1990 bis 2023 dargestellt. Sowohl für die Messstelle Basel als auch die Messstelle Karlsruhe sind die seit einigen Jahren überwiegend niedrigeren Abflüsse gut zu erkennen. Insbesondere das Jahr 2022 fällt durch extrem niedrige Werte auf. Das gegen Jahresende als sehr feucht empfundene Jahr 2023 erreicht dagegen in etwa die Werte der langfristigen Beobachtung.



**Bild 2:** Relative Wasserführung im Rhein bezogen auf die langjährige Wasserführung (1990 – 2023)

Der Trend kontinuierlich steigender **Wassertemperaturen** im Rhein spiegelt bereits seit einigen Jahren die Auswirkung des Klimawandels wieder (Bild 3). Der mittlere Anstieg seit 1951 auf Grundlage der gemessenen Daten lässt sich auf ca. 0,05 Kelvin je Kalenderjahr abschätzen. Betrachtet man den Zeitraum ab 2000, so ist die Steigung der Temperaturmittelwerte bei etwa 0,07 Kelvin je Kalenderjahr abschätzbar. Der Verlauf der Wassertemperaturen ist mit den gemessenen Umgebungstemperaturen in guter Übereinstimmung.



**Bild 3:** Langfristige Entwicklung der Wassertemperatur im Rhein bei Karlsruhe-Maxau (1971 - 2023)

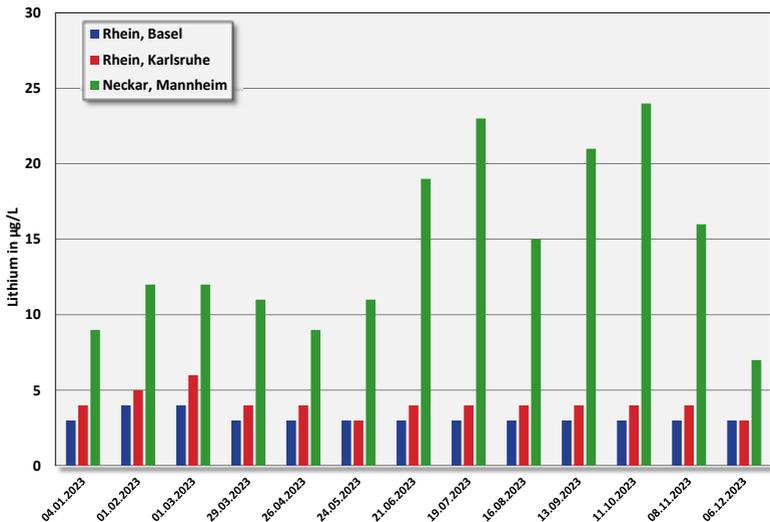
Bei den allgemeinen Qualitätsparametern **elektrische Leitfähigkeit**, **pH-Wert** und den anorganischen Messgrößen **Chlorid**, **Sulfat** und **Ammonium** wurden 2023 an den Messstellen der AWBR keine Überschreitungen der Zielwerte des ERM ermittelt. Für den Qualitätsparameter **Sauerstoff** wurde die minimal ausgewiesene Konzentration von 8 mg/L an den Messstellen Basel, Rhein und Leipheim, Donau nur kurzfristig und geringfügig unterschritten. Die **Nitrat**-Konzentrationen liegen seit langem deutlich auf einem niedrigen Niveau und halten die Anforderungen des ERM-Zielwertes sicher ein.

**Tabelle 1:** Mittel- und Maximalwert im Vergleich zu den geltenden ERM-Zielwerten 2023

Parameter	ERM-Zielwert	Basel Rhein		Karlsruhe Rhein		Mannheim Neckar	
		Mw.	Max.	Mw.	Max.	Mw.	Max.
Wassertemperatur	< 25 °C	14,9	23,9	14,9	24,0	12,4	19,9
Elektrische Leitfähigkeit	< 70 mS/m	36	41	38	47	53	65
Sauerstoffgehalt [mg/L]	> 8 mg/L	10,1	7,6*	10,5	8,4*	10,3	7,9*
pH-Wert [-]	7 – 9	8,06 – 8,45		7,92 – 8,24		8,02 – 8,13	
Chlorid [mg/L]	< 100 mg/L	12,8	19,9	16,5	23,3	28,4	39,1
Sulfat [mg/L]	< 100 mg/L	27	30	26	30	17	22
Ammonium [mg/l]	< 0,03 mg/L	0,02	0,03	0,03	0,05	0,04	0,08
Nitrat [mg/L]	< 25 mg/L	5,6	7,7	5,7	8,2	10	15

\* Minimum des Sauerstoffgehaltes

Im Jahr 2023 wurde einmalig eine Bestandaufnahme der **Lithium**-Konzentrationen in den Hauptmessstellen der AWBR durchgeführt nachdem die Frage der zukünftigen Belastung der Gewässer durch die vermehrte Verwendung von Lithium innerhalb der IAWR intensiv diskutiert wurde (Bild 4). Am Rhein liegt die Grundbelastung bei unter 5 µg/L. Der Neckar zeigt deutlich höhere Werte und einen Anstieg in den Monaten Juni bis November.



**Bild 4:** Konzentrationen von Lithium in Rhein und Neckar (2023)

## Summarische organische Messgrößen

Bei den organischen summarischen Messgrößen **DOC, TOC, SAK (254)** und **AOX** erfüllen die Befunde weiterhin mit wenigen Ausnahmen die Anforderungen aus dem ERM 2020. An der Donau weist lediglich der DOC mit 3,2 mg/L eine leichte kurzzeitige Überschreitung auf. Am Neckar werden die Zielwerte des ERM wegen des hohen Abwasseranteils von TOC und SAK (254) und beim DOC sogar durch den Mittelwert überschritten.

## Organische Spurenstoffe

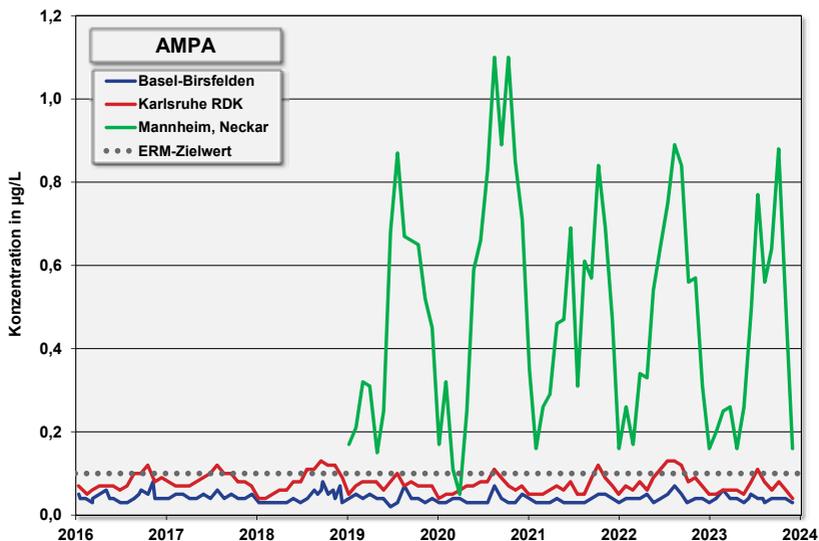
Die organischen Spurenstoffe aus den Bereichen Industrie, Landwirtschaft und Pharmazeutika sind die größte Stoffgruppe, auf die von der AWBR untersucht wird. Seit einigen Jahren werden auch die daraus entstehenden Transformationsprodukte mit untersucht, sofern diese immer vollumfänglich bekannt sind. Die entscheidenden Kriterien sind dabei Persistenz (P), Mobilität (M) und ggf. Toxizität (T). Diese Stoffe können bis ins Rohwasser gelangen und sind bei der Aufbereitung meist schwierig zu entfernen. Aus diesem Grund wird gefordert, den Eintrag solcher Stoffe in die Gewässer oder das Grundwasser ganz zu vermeiden.

## *Pflanzenschutzmittel (PSM) und deren Metaboliten*

Bei den Untersuchungen auf ausgewählte Pflanzenschutzmittel und deren Metaboliten (M) wurde ab 2020 der Parameterumfang in den Fließgewässern bis auf das Herbizid Glyphosat und dessen Metabolit AMPA (M) reduziert. Die anderen PSM der IAWR-Stoffliste waren an den von der AWBR untersuchten Stellen unauffällig und wurden eingestellt.

Die Konzentrationen von Glyphosat erreichten an den Messstellen im Oberrhein und oberhalb der Mündung des Neckars einen maximalen Wert in Höhe der Hälfte des ERM-Zielwertes. Die Werte für dessen Metaboliten AMPA liegen am Rhein jedoch kurzzeitig über dem Zielwert von 0,1 µg/L (Bild 5). Am Oberrhein wird zudem die Zunahme mit der Fließstrecke zwischen den Messstellen Basel und Karlsruhe deutlich. Die ermittelten

Konzentrationen im Neckar liegen erheblich höher und überschritten mit wenigen Ausnahmen den ERM-Zielwert bei einer deutlich erkennbaren Saisonalität.



**Bild 5:** Konzentrationen von AMPA in Rhein und Neckar (2016 – 2023)

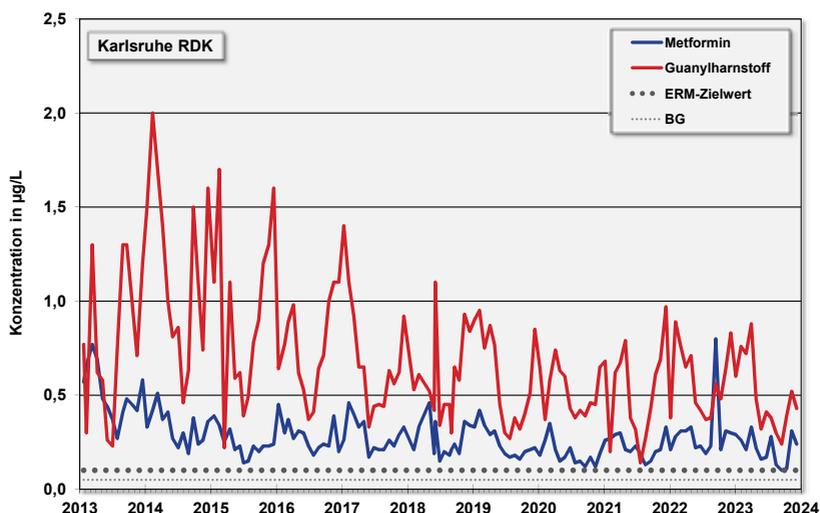
### Arzneimittelwirkstoffe und Metaboliten/Transformationsprodukte

Innerhalb der IAWR und damit zugleich im Untersuchungsprogramm der AWBR nehmen die Wirkstoffe von Arzneimitteln sowie deren Metabolite bzw. Transformationsprodukte (TP) derzeit den größten Raum ein. Die Auswertung der Untersuchungen im Jahr 2023 sind in Tabelle 2 aufgeführt. Kennzeichnend gemacht sind die Überschreitungen der Anforderungen nach dem ERM.

**Tabelle 2:** Mittel- und Maximalwerte von Pharmaka-Wirkstoffen und Metaboliten/ Transformations-produkten (TP) an den Messstellen Basel und Karlsruhe im Rhein sowie Mannheim im Neckar (2023) - Angaben in µg/L

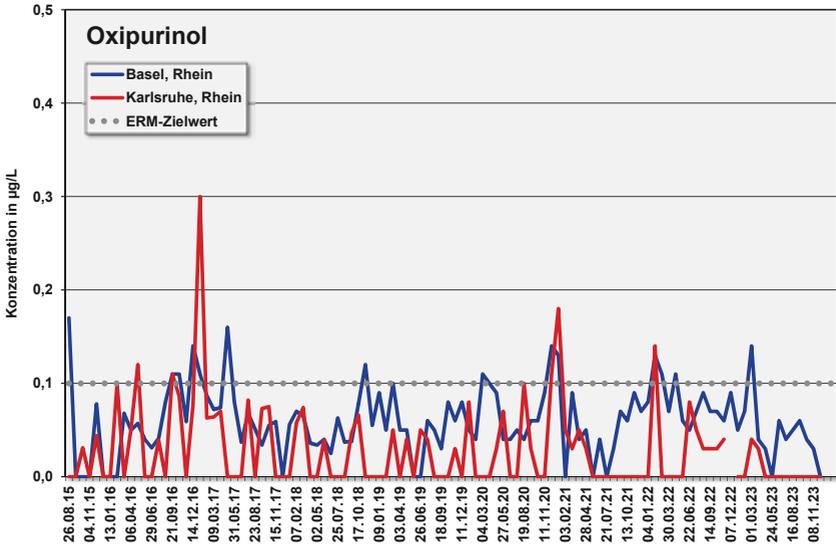
Parameter	Basel		Karlsruhe		Mannheim	
	Mw.	Max.	MW	Max.	Mw.	Max.
Atenolol	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Atenololsäure (M)	0,02	0,03	0,02	0,03	0,11	0,17
Bezafibrat	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Carbamazepin	<0,01	<0,01	<0,01	0,02	0,06	0,09
10,11-Dihydro-10,11-dihydroxycarbamazepin (M)	0,02	0,03	0,03	0,04	0,31	0,21
Cetirizin	<0,01	<0,01	<0,01	0,03	0,02	0,04
Diclofenac	0,02	0,04	0,02	0,04	0,09	0,20
Fexofenadin	0,01	0,06	0,01	0,04	0,03	0,06
Furosemid	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,02
Gabapentin	0,04	0,05	0,04	0,06	0,23	0,33
Hydrochlorothiazid	<0,01	0,02	0,01	0,03	0,07	0,15
Ibuprofen	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,01	0,05
Lamotrigin	0,03	0,04	0,04	0,06	0,15	0,26
Levitiracetam	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,02	0,04
Lidocain	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,02	0,03
Metformin	0,19	0,28	0,22	0,33	0,67	1,3
Guanylharnstoff (M)	0,50	0,98	0,49	0,88	1,7	3,9
Metoprolol	<0,01	<0,01	<0,01	0,02	0,11	0,16
N-Acetyl-4-aminoantipyrin (AAA) (M)	0,05	0,07	0,05	0,07	0,28	0,41
N-Formyl-4-aminoantipyrin (FAA) (M)	0,04	0,08	0,05	0,10	0,44	0,64
Naproxen	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,02	0,04
Oxazepam	<0,01	<0,01	<0,01	0,02	<0,01	<0,01
Oxipirinol (M)	0,05	0,14	<0,03	0,04	1,0	2,0
Phenazon	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,01	0,05
Primidon	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,03	0,04
Sitagliptin	0,02	0,03	0,03	0,05	0,22	0,32
Sotalol	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Sulfamethoxazol	0,01	0,03	0,01	0,02	0,06	0,13
Acetyl-Sulfamethoxazol	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,11	0,20
Tramadol	<0,01	<0,01	<0,01	0,02	0,03	0,05
Venlafaxin	<0,01	0,04	<0,01	0,03	0,04	0,07
Didesmethylvenlafaxin (M)	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,03	0,05
o-Desmethylvenlafaxin (M)	<0,01	0,02	0,02	0,03	0,08	0,14

**Metformin**, ein häufig in Kombination mit anderen Wirkstoffen verabreichtes Medikament bei Diabetes mellitus Typ 2, und dessen Metabolit **Guanylharnstoff** zeigen dabei die höchsten Werte. Seit Frühjahr 2017 liegen die Konzentrationen von Guanylharnstoff mit einer Ausnahme an der Messstelle Karlsruhe unterhalb von 1 µg/L (Bild 6). Metformin ist ein fester Standard in der Therapie bei Diabetes mellitus Typ 2 und wurde lange als Monopräparat mit einem Verbrauchsanteil über 40 % eingesetzt. Das Monopräparat wurde zunehmend durch Kombinationspräparate mit weiteren Wirkstoffen ersetzt, um dadurch die Nebenwirkungen der einzelnen Wirkstoffe zu reduzieren. Dies könnte die leicht rückläufigen Werte erklären. Vermutet wird zudem ein besserer Abbau und Rückhalt in den Kläranlagen. Die im Rhein nachgewiesenen Konzentrationen für Wirkstoff und Transformationsprodukt übersteigen jedoch weiterhin den ERM-Zielwert von jeweils 0,1 µg/L deutlich.



**Bild 6:** Metformin- und Guanylharnstoff-Konzentrationen an der Messstelle Karlsruhe (2013 - 2023)

Die Konzentrationen von Oxipurinol liegen im Neckar weit oberhalb der Anforderungen aus dem ERM, während am Rhein (Bild 7) der ERM-Zielwert weitestgehend eingehalten wird. Oxipurinol ist das im Körper entstehende wirksame Transformationsprodukt des Gichtmittels Allopurinol und wird als solches in die Gewässer eingetragen.



**Bild 7:** Konzentrationen von Oxipurinol im Rhein bei Basel und Karlsruhe (2013 - 2023)

**Tabelle 3:** Mittel- und Maximalwerte der Pharmaka-Wirkstoffe aus der Gruppe der Sartane an den Messstellen Basel und Karlsruhe im Rhein sowie Mannheim im Neckar (2023) - Angaben in µg/L

Parameter	Basel		Karlsruhe		Mannheim	
	Mw.	Max.	MW	Max.	Mw.	Max.
Candesartan	0,02	0,03	0,03	0,04	<b>0,30</b>	<b>0,56</b>
Irbesartan	<0,01	<0,01	0,02	0,04	0,03	<b>0,05</b>
Lorsartan	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Olmesartan	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,03	<b>0,08</b>
Telmisartan	<0,01	0,02	0,02	0,04	0,06	<b>0,10</b>
Valsartan	0,03	0,05	0,04	0,06	<b>0,13</b>	<b>0,22</b>
Valsartansäure (M)	0,07	<b>0,11</b>	0,08	<b>0,12</b>	<b>0,40</b>	<b>0,80</b>

Sartane werden als Blutdrucksenker meist in Kombination mit Herzinsuffizienz eingesetzt und als Wirkstoff oder Abbauprodukt Valsartansäure über den Abwasserpfad in die Gewässer eingetragen. Die Valsartansäure kann dabei auch aus den anderen zugelassenen Sartanen gebildet werden. Mit Ausnahme des Transformationsproduktes Vals-

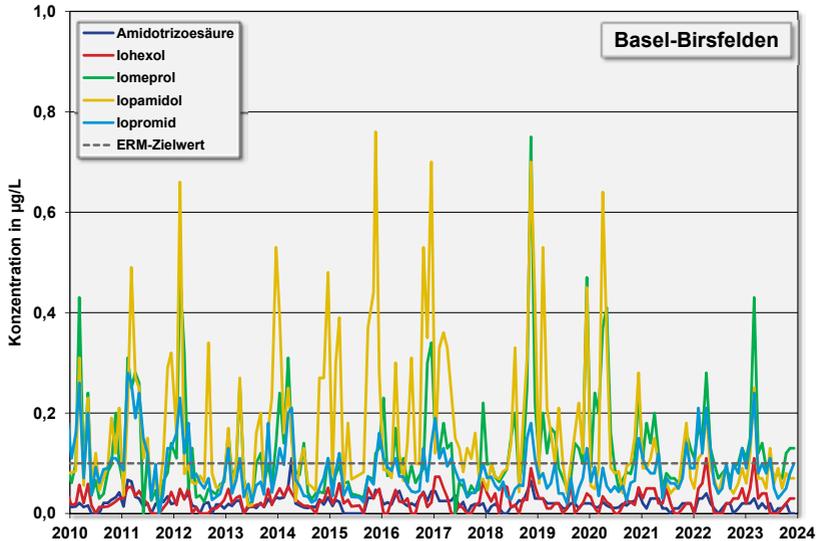
artansäure werden am Oberrhein die ERM-Zielwerte eingehalten. Am Neckar werden diese von Candesartan, Valsartan und Valsartansäure jedoch sogar vom Jahresmittelwert überschritten.

**Tabelle 4:** Mittel- und Maximalwerte von Röntgenkontrastmitteln an den Messstellen Basel und Karlsruhe im Rhein sowie Mannheim im Neckar (2023) - Angaben in µg/L

Parameter	Basel		Karlsruhe		Mannheim	
	Mw.	Max.	MW	Max.	Mw.	Max.
Amidotrizoesäure	0,01	0,03	0,02	0,04	0,26	0,49
Iohexol	0,03	0,11	0,06	0,12	0,58	0,81
Iomeprol	0,13	0,43	0,22	0,44	0,80	1,2
Iopamidol	0,09	0,25	0,11	0,17	0,09	0,38
Iopromid	0,09	0,24	0,12	0,23	0,27	0,36

Von den fünf wichtigsten Röntgenkontrastmitteln (RKM) überschreiten bis auf die Amidotrizoesäure alle die Vorgaben des ERM-Zielwertes von 0,1 µg/L am Oberrhein (Tabelle 4). Am Neckar liegen aufgrund des hohen Abwasseranteils die Werte für die Röntgenkontrastmittel deutlich höher. Insgesamt wurden die höchsten Belastungen für das Röntgenkontrastmittel Iomeprol ermittelt.

Die Befunde im Rhein bei Basel zeigen deutliche Unterschiede in den Konzentrationsniveaus (Bild 8). Die Einzelstoffkonzentrationen variieren dabei relativ stark. In den letzten Jahren zeigt sich ein deutlicher Rückgang der Konzentrationen für Iopamidol während die Konzentrationsniveaus der anderen Röntgenkontrastmittel in etwa unverändert blieben.



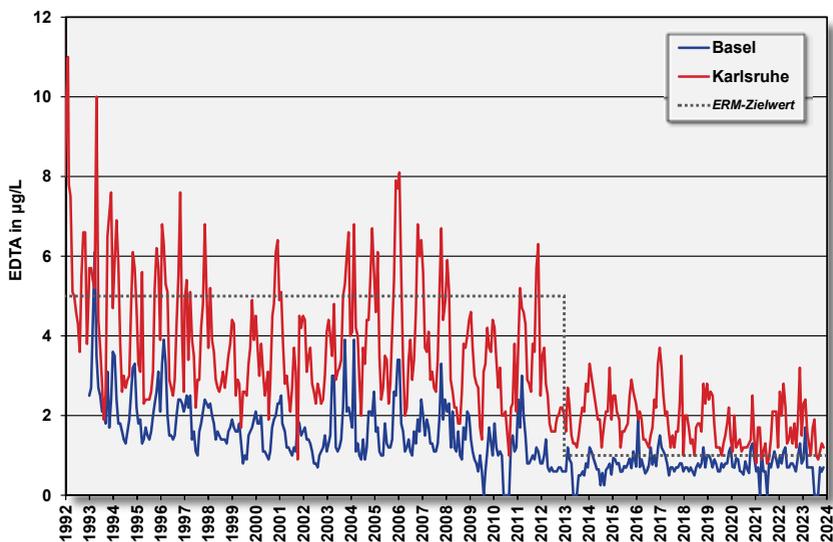
**Bild 8:** Konzentrationen verschiedener Röntgenkontrastmittel im Rhein bei Basel (2010 - 2023)

## Industriechemikalien

Praktisch alle größeren Fließgewässer sind mit verschiedenen Industriechemikalien, die im Einzugsgebiet produziert oder verarbeitet werden, belastet. Der Eintrag erfolgt meist punktuell unterhalb der Produktions- oder Verarbeitungsstätten. Dies gilt insbesondere für Verbindungen mit hohen Produktions- oder Verarbeitungsmengen. Verbindungen, die persistent, mobil und ggf. toxisch sind, haben aus Sicht der Wasserversorgung eine besonders große Bedeutung, da diese Verbindungen häufig nicht oder nur mit hohem Aufwand in der Trinkwasseraufbereitung entfernt werden können.

Seit rund 30 Jahren erfolgen Untersuchungen auf die synthetischen Komplexbildner (EDTA, DTPA, NTA u. a.). Für EDTA und DTPA konnten bereits vor einigen Jahren erhebliche Verbesserungen hinsichtlich der Belastung des Rheins erreicht werden. Der seit 2013 geltende ERM-Zielwert von 1 µg/L wird für **EDTA** am Oberrhein bei Karlsruhe noch im-

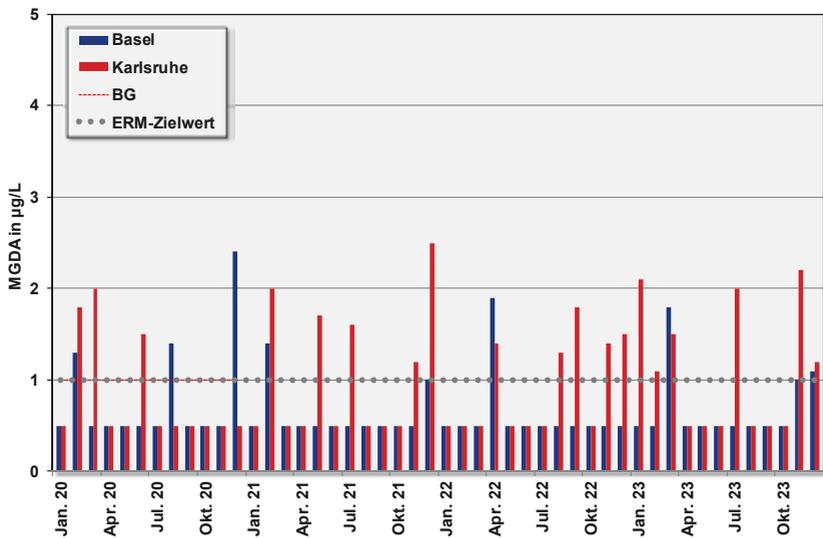
mer regelmäßig um z. T. mehr als das Doppelte und in Basel zumindest kurzzeitig überschritten (Bild 8). Am Neckar liegen die Befunde mit Maximalwerten von 8,1 µg/L (2022) bzw. 6,4 µg/L (2023) deutlich oberhalb der Anforderung aus dem ERM. Eine weitere Reduktion der Befunde ist somit angezeigt.



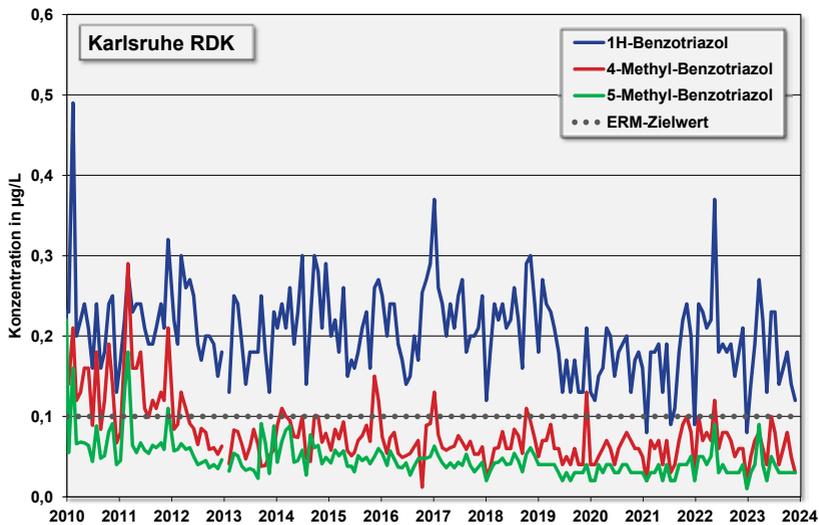
**Bild 9:** EDTA-Konzentrationen im Rhein bei Basel und Karlsruhe (1992 - 2023)

Der leicht abbaubare Komplexbildner **MGDA** (Methylglycindiessigsäure) ist seit 2020 im Untersuchungsumfang der Komplexbildner enthalten. Er wird zur Wasserenthärtung (Wasch-, Reinigungsmittel) verwendet und in den Bereichen Galvanik und Kosmetik sowie bei der Papier- und Textilherstellung eingesetzt. Am Oberrhein zeigen sich nur einzelne Überschreitungen der Anforderungen aus dem ERM 2020 (Bild 10). Nur die letzten beiden Proben im Jahr 2023 zeigen aufeinanderfolgend höhere Werte.

MGDA und die anderen Komplexbildner wurden im Jahr 2023 zusätzlich an der Messstelle Mannheim (Neckar) mituntersucht. Die Maximalwerte lagen bei 1,7 µg/L (2022) bzw. 3,7 µg/L (2023). Die mituntersuchten Komplexbildner NTA und DTPA stellen an Neckar und Rhein derzeit keine Probleme dar.



**Bild 10:** MGDA-Konzentrationen im Rhein bei Basel und Karlsruhe (2020 - 2023)



**Bild 11:** Konzentrationen von 1H-Benzotriazol und seiner Derivate im Rhein bei Karlsruhe (2010 – 2023)

Der Korrosionsinhibitor **1H-Benzotriazol** und dessen zwei Methylderivate **4-Methyl-Benzotriazol** und **5-Methyl-Benzotriazol** gelten als persistent und mobil und sind somit für die Wasserversorgung von Bedeutung. Zudem werden sie bei der Abwasserreinigung nur unzureichend entfernt und somit in die Fließgewässer eingetragen. Diese Verbindungen sind daher seit Jahren fester Bestandteil im Untersuchungsprogramm der AWBR. Der ERM-Zielwert von 0,1 µg/L wird von 1H-Benzotriazol im Rhein bei Karlsruhe dauerhaft überschritten. Für die beiden Derivate 4- und 5-Methylbenzotriazol wird der ERM-Zielwert dagegen meist eingehalten (Bild 11). Im Neckar bei Mannheim überschreiten die Maximalwerte und sogar die Mittelwerte diese Anforderung bei allen drei Verbindungen (Tabelle 5).

In Tabelle 5 sind die Mittel- und Maximalwerte von wichtigen Industriechemikalien an den Messstellen Basel-Birsfelden und Karlsruhe RDK sowie Mannheim im Neckar für das Untersuchungsjahr 2023 aufgeführt. Überschreitungen der ERM-Anforderungen sind hervorgehoben.

Für 1,4-Dioxan, Melamin und 1H-Benzotriazol werden am Rhein deutliche Überschreitungen der Anforderungen nach dem ERM festgestellt, wobei hier auch die Mittelwerte diese Anforderung nicht erfüllen. Am Neckar liegen die Befunde deutlich höher.

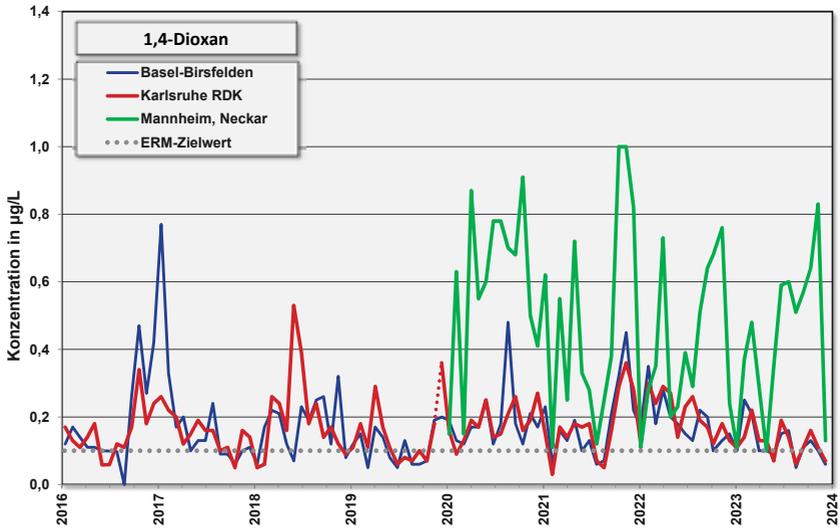
Für den Komplexbildner **EDTA** werden an Oberrhein und Neckar die Anforderungen nach dem ERM von 1 µg/L noch immer überschritten. Dies gilt auch für den 2022 in den Untersuchungsumfang aufgenommenen Komplexbildner **MGDA** wie in Tabelle 5 dokumentiert ist.

**Tabelle 5:** Mittel- und Maximalwerte von Industriechemikalien (2023) - Angaben in µg/L

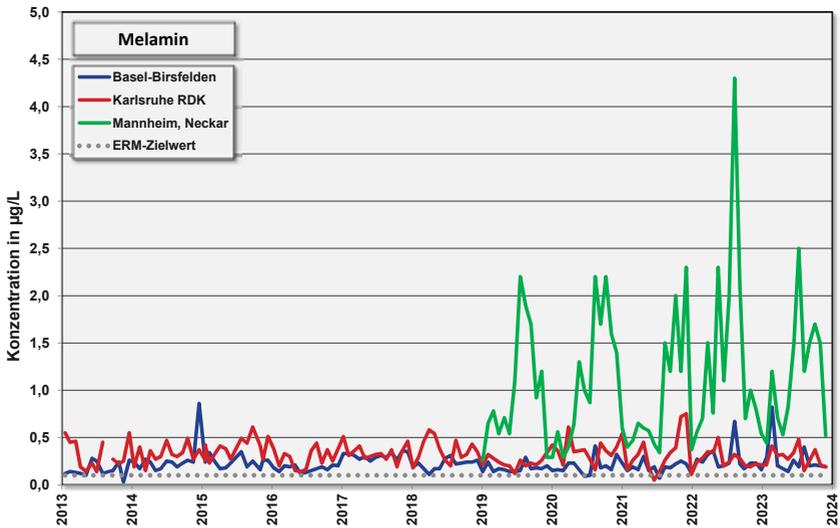
Parameter	ERM-Zielwert	Basel Rhein		Karlsruhe Rhein		Mannheim Neckar	
		Mw.	Max.	Mw.	Max.	Mw.	Max.
NTA	1 µg/L	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	0,8
EDTA	1 µg/L	0,7	<b>1,7</b>	<b>1,5</b>	<b>2,4</b>	<b>4,6</b>	<b>6,4</b>
DTPA	1 µg/L	<1	<1	<1	<1	<1	<1
MGDA	1 µg/L	<1	<b>1,8</b>	1,0	<b>2,2</b>	<b>1,2</b>	<b>3,7</b>
1H-Benzotriazol	0,1 µg/L	<b>0,12</b>	<b>0,25</b>	<b>0,17</b>	<b>0,27</b>	<b>1,2</b>	<b>2,0</b>
4-Methylbenzotriazol	0,1 µg/L	0,03	0,07	0,06	0,10	<b>0,28</b>	<b>0,50</b>
5-Methylbenzotriazol	0,1 µg/L	0,02	0,05	0,04	0,09	<b>0,17</b>	<b>0,28</b>
1,4-Dioxan	0,1 µg/L	<b>0,12</b>	<b>0,25</b>	<b>0,13</b>	<b>0,22</b>	<b>0,43</b>	<b>0,83</b>
Melamin	0,1 µg/L	<b>0,26</b>	<b>0,82</b>	<b>0,29</b>	<b>0,48</b>	<b>1,1</b>	<b>2,5</b>
Trifluoacetat (TFA)	1 µg/L	0,56	0,67	0,61	<b>0,74</b>	<b>3,3</b>	<b>5,7</b>
Amidosulfonat (ASA)	-	24	43	23	31	99	210

Für die anorganische Substanz **Amidosulfonat (ASA)** wurde bisher kein ERM-Zielwert festgelegt. Amidosulfonat wird in großen Mengen als Entkalkungsmittel in Industrie, Gewerbe und vielen Haushaltsprodukten eingesetzt. Zudem ist Amidosulfonat sehr gut in Wasser löslich. Die nachgewiesenen Konzentrationen liegen mit bis zu 210 µg/L im Neckar sowie bis zu 31 µg/L im Oberrhein in einem sehr hohen Bereich.

Das Lösungsmittel **1,4-Dioxan** ist mit Wasser gut mischbar und wird als gesundheitsschädlich eingestuft. Die Befunde am Oberrhein und im Neckar überschreiten den ERM-Zielwert von 0,1 µg/L relativ häufig (Bild 12). Eine Reduzierung des Belastungsniveaus ist am Rhein nicht zu erkennen. Die deutlich höheren 1,4-Dioxan-Gehalte im Neckar sind auf den im Verhältnis zum Abfluss höheren Abwasseranteil zurückzuführen.

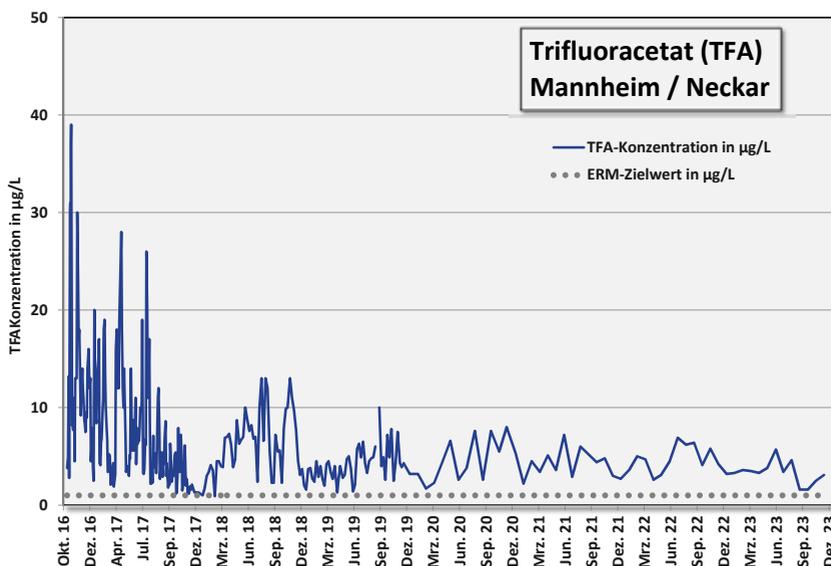


**Bild 12:** 1,4-Dioxan-Konzentrationen im Rhein bei Basel und Karlsruhe (2016 - 2022) und im Neckar bei Mannheim (2020 - 2023)



**Bild 13:** Melamin-Konzentrationen in Rhein (2013 - 2022) und Neckar (2019 - 2023)

**Melamin** (Bild 13) gehört zu den Stoffen mit Produktionsmengen oberhalb von 100.000 t/a und wird über kommunale und industrielle Kläranlagen in die Gewässer eingetragen. Es findet in den verschiedensten Werk- und Gebrauchsstoffen Verwendung, wozu u. a. der Bereich der weitverbreitet eingesetzten Spanplatten zählt. Am Rhein wird der ERM-Zielwert von 0,1 µg/L an den Messstellen Basel und Karlsruhe regelmäßig überschritten. Die Untersuchungen im Neckar zeigten im Jahr 2023 eine Maximalkonzentration von 2,5 µg/L. Die deutlichen Schwankungen im Jahresverlauf mit höheren Werten meist in der zweiten Jahreshälfte sind auffällig.



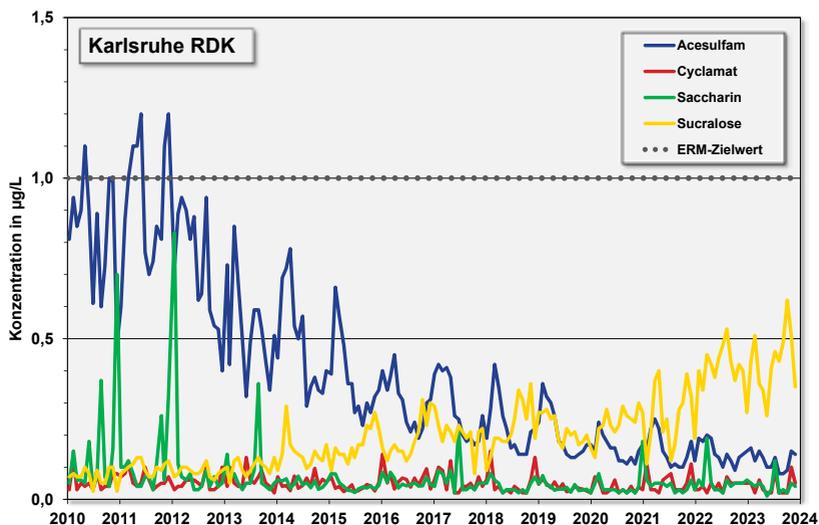
**Bild 14:** TFA-Konzentrationen im Neckar bei Mannheim (10/2016 – 12/2023)

**Trifluoracetat** (TFA) ist mobil und persistent und somit als wasserwerks- und trinkwasserrelevant eingestuft. Diese Verbindung stammt aus verschiedenen Quellen (Kühlmittel, Pflanzenschutzmittel, pharmazeutische Wirkstoffe), wird überwiegend diffus eingetragen und global verbreitet. Eine Entfernung bei der Trinkwasseraufbereitung ist derzeit nur mit Ionentauschern oder Umkehrosmose möglich.

Nach der Aufdeckung einer industriellen Einleitung von TFA am Neckar Mitte 2016 wurden sehr hohe Belastungen nachgewiesen (Bild 14). Mittlerweile wurde die Produktion verlagert, in dessen Folge die Konzentrationen im Neckar deutlich zurückgingen. Noch nimmer wird der ERM-Zielwert von 1 µg/L durchgängig überschritten und somit besteht weiterer Verbesserungsbedarf. Die dadurch bedingten hohen Werte in den Uferfiltraten der Wasserwerke am unteren Neckar werden erst längerfristig zurückgehen.

### Künstliche Süßstoffe

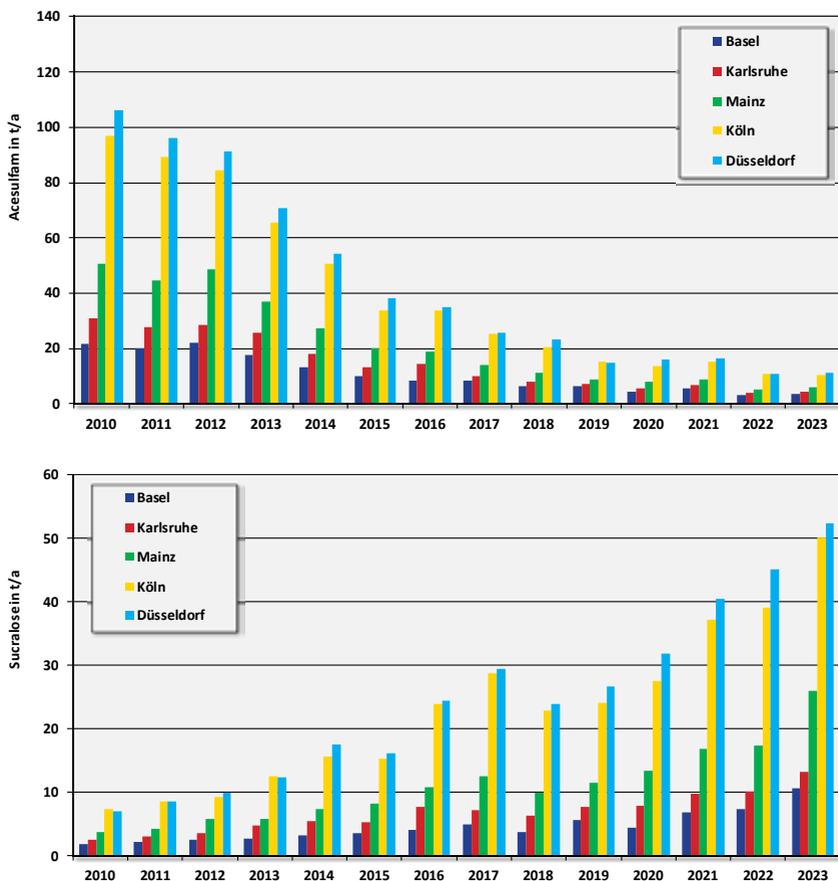
Seit 2010 werden Gewässerproben auf vier der elf in der EU zugelassenen künstlichen Süßstoffe durch die Wasserwerke untersucht. Der Eintrag erfolgt über sämtliche kommunalen Kläranlagen, was vorrangig auf den weitverbreiteten Konsum dieser Stoffe zurückzuführen ist (Bild 15).



**Bild 15:** Süßstoff-Konzentrationen im Rhein bei Karlsruhe (2010 - 2023)

Die Konzentrationen von Acesulfam zeigt weiterhin eine leicht rückläufige Tendenz und unterschreitet die Anforderungen aus dem ERM dauer-

haft. Die Gehalte der beiden Süßstoffe Saccharin und Cyclamat liegen ebenfalls weit unterhalb des ERM-Zielwertes von 1,0 µg/L. Dagegen bleibt Sucralose weiterhin auf dem deutlich angestiegenen Niveau mit zeitweise Überschreitung eines Wertes von 0,5 µg/L, was der Hälfte der ERM-Anforderungen entspricht.



**Bild 16:** Frachten von Acesulfam (oben) und Sucralose (unten) im Rhein (2010 – 2023)

## Organische Spurenstoffe in den Alpenseen

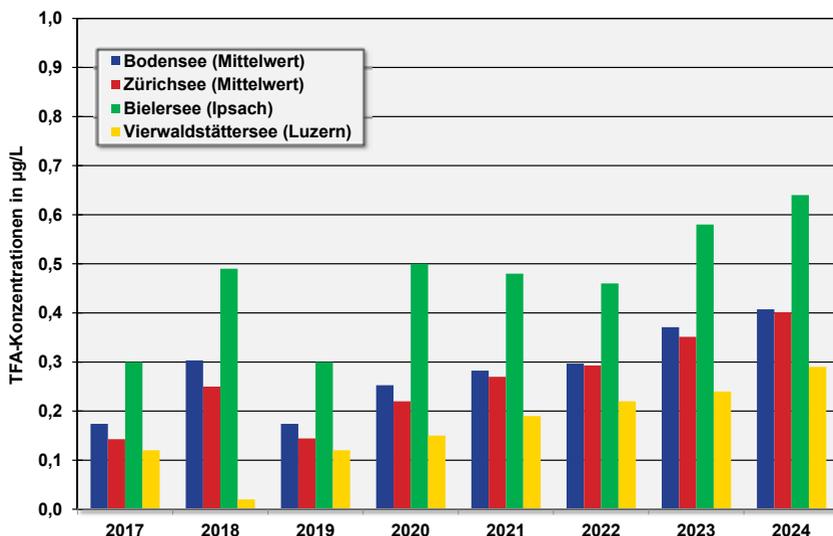
Einmal jährlich zum Zeitpunkt der möglichen Durchmischung finden Untersuchungen in den Alpenseen statt, da zu diesem Zeitpunkt die Konzentrationen in allen Tiefenstufen gleich hoch sind. Die für den März 2024 aus den Messwerten aller Seemessstellen berechneten Mittel- und Maximalkonzentrationen an Bodensee und Zürichsee sind in Tabelle 6 zusammengestellt.

**Tabelle 6:** Mittel- und Maximalwerte von ausgewählten organischen Spurenstoffen im Bodensee und Zürichsee (März 2024)

Parameter in µg/L	Bodensee (N=12)			Zürichsee (N=7)	
	ERM	MW	Max.	MW	Max.
<b>Röntgenkontrastmittel</b>					
Amidotrizoesäure	0,1	0,01	0,02	<0,01	<0,01
Iohexol	0,1	0,02	0,03	<0,01	<0,01
Iomeprol	0,1	0,05	0,06	0,05	0,06
Iopamidol	0,1	0,06	0,07	0,06	0,07
Iopromid	0,1	0,02	0,02	0,03	0,05
<b>Süßstoffe</b>					
Acesulfam	1,0	0,13	0,14	0,09	0,10
Cyclamat	1,0	0,02	0,02	0,02	0,02
Saccharin	1,0	0,01	0,02	<0,01	<0,01
Sucralose	1,0	0,18	0,25	0,17	0,23
<b>Weitere Einzelstoffe</b>					
N,N-Dimethylsulfamid (DMS)	0,1	0,02	0,05	<0,01	<0,01
Trifluoacetat (TFA)	1	0,41	0,44	0,40	0,44
Dicyandiamid (DCD)	0,1	0,08	<b>0,11</b>	0,04	0,05
Amidosulfonat (ASA)	-	13	15	11	12
1,4-Dioxan	0,1	<0,01	<0,01	0,07	0,07
Melamin	0,1*	<b>0,24</b>	<b>0,35</b>	<b>0,11</b>	<b>0,17</b>
Cyanursäure	0,1	0,06	<b>0,13</b>	<b>0,23</b>	<b>0,27</b>
1H-Benzotriazol	0,1	0,09	0,09	0,05	0,06
4-Methylbenzotriazol	0,1	0,03	0,04	0,01	0,02
5-Methylbenzotriazol	0,1	0,01	0,02	0,01	0,02
Metformin	0,1	<b>0,13</b>	<b>0,20</b>	0,10	<b>0,12</b>
Guanylharnstoff	0,1	<0,05	<0,05	0,07	<b>0,11</b>

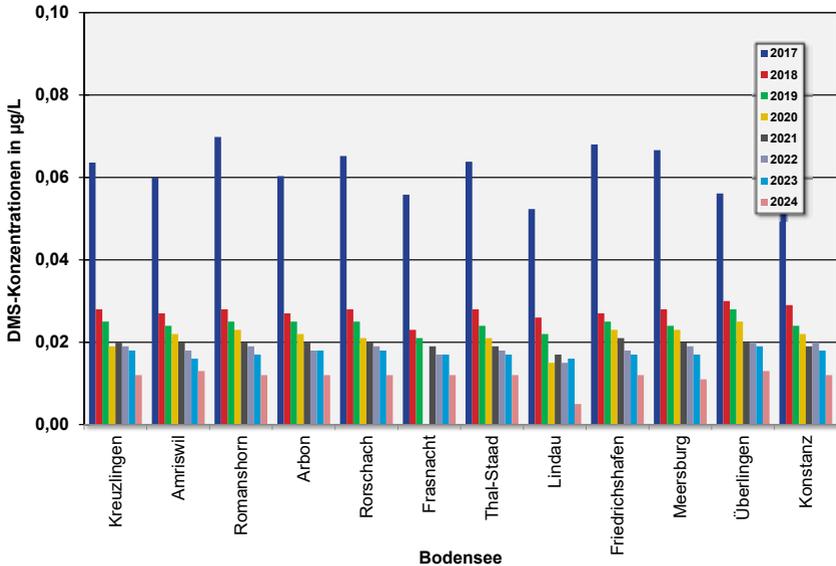
\*Gültig seit 01.01.2021

In den Alpenseen überschreitet derzeit Metformin, Melamin, Dicyandiamid und Guanylharnstoff den für Fließgewässer angewendeten ERM-Zielwert. Neu aufgenommen wurde die Cyanursäure, die an den Alpensee Werte oberhalb der Anforderungen des ERM aufweist und von daher weiter beobachtet werden sollte.



**Bild 17:** TFA-Konzentrationen in den Alpenseen (2017 – 2024)

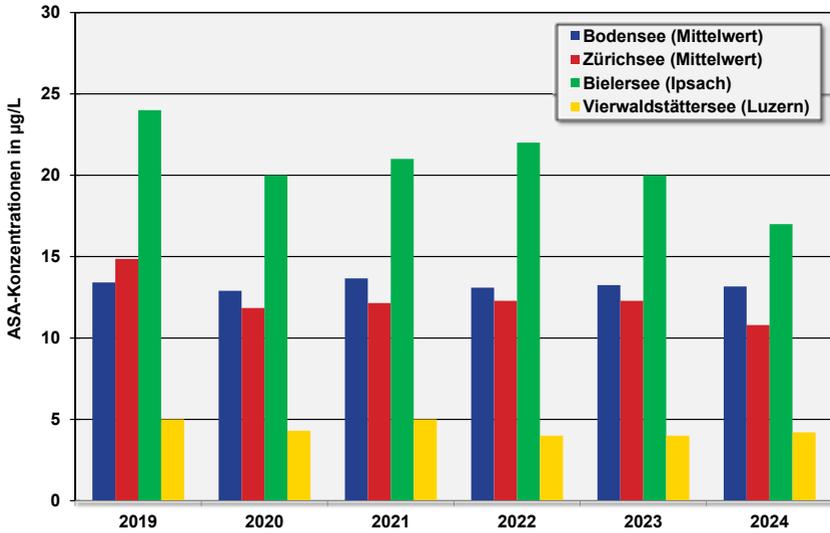
Die Konzentrationen an **Trifluoracetat (TFA)** sind in allen Alpenseen in den letzten Jahren weiter angestiegen (Bild 17) und liegen durchgängig oberhalb des ERM-Zielwertes von 0,1 µg/L für Fließgewässer. Für Bodensee und Zürichsee wurden die Ergebnisse über alle Messstellen gemittelt angegeben; die Messwerte lagen an allen Seemesststellen nahe dieses Wertes. Im Bielersee werden mit Konzentrationen um 0,6 µg/L seit einigen Jahren die höchsten Werte festgestellt. Im Vierwaldstättersee ist der Wert auf knapp 0,3 µg/L angestiegen.



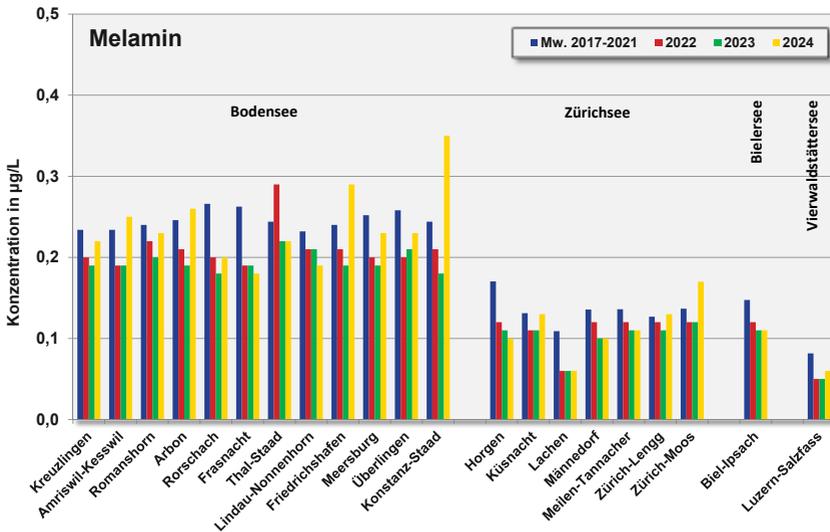
**Bild 18:** *N,N-Dimethylsulfamid-Konzentrationen im Bodensee (2017 - 2024)*

Die Konzentrationen von **DMS (N,N-Dimethylsulfamid)** zeigen weiterhin einen Rückgang der Befunde und dieser fällt über das letzte Jahr deutlicher aus als zuvor. Die Konzentrationen liegen an allen Seemessstellen mittlerweile bei ca. 0,012 µg/L (Bild 18). In den anderen Alpenseen liegen die Befunde unterhalb der Bestimmungsgrenze von 0,01 µg/L.

Die Konzentrationen von **ASA (Amidosulfonat)** liegen für die verschiedenen Seen auf ziemlich einheitlichem Niveau und zeigen in den letzten Jahren wenig Veränderungen (Bild 19). Der Vierwaldstättersee weist dabei die geringsten Konzentrationen auf und am Bielersee werden die höchsten Werte im Bereich von etwa 20 µg/L im langfristigen Mittel nachgewiesen. Die Werte im Bodensee und Zürichsee sind vergleichbaren.

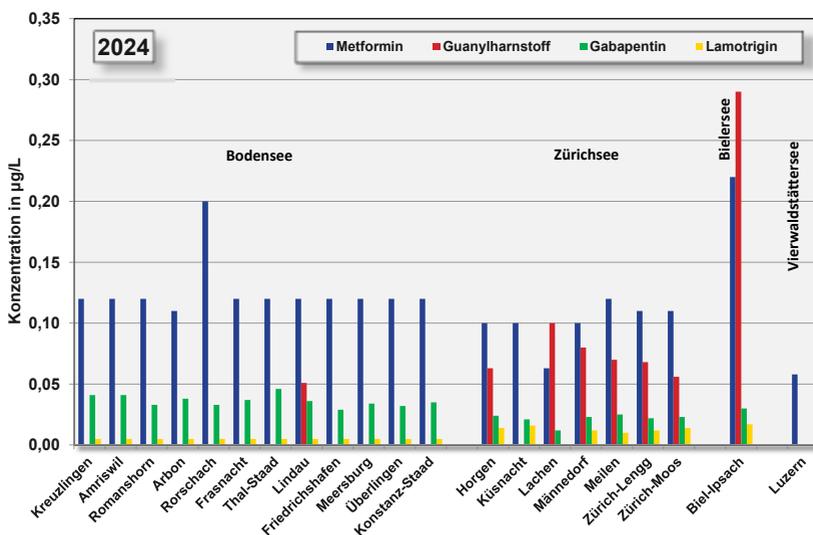


**Bild 19:** Amidosulfonat-Konzentrationen in den Alpenseen (2019 - 2024)



**Bild 20:** Melamin-Konzentrationen in den Alpenseen (2022 – 2023 im Vergleich zum 5-Jahresmittelwert 2017-2021)

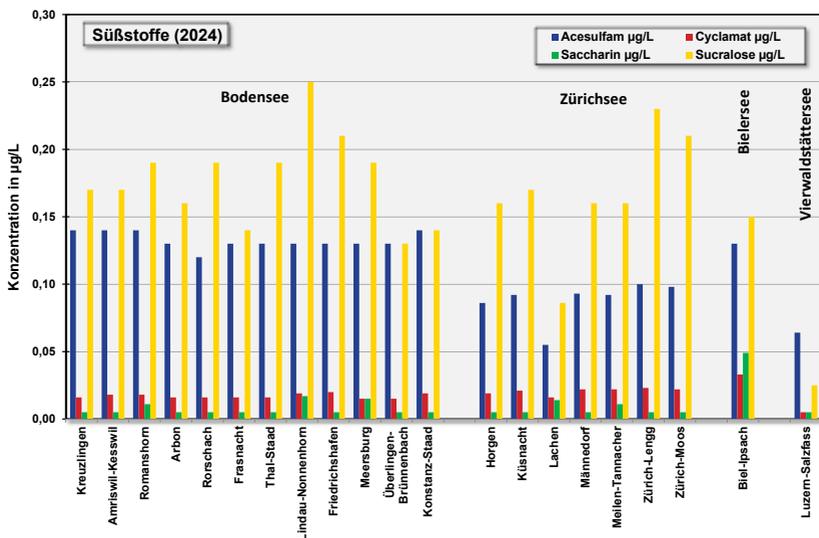
Die Melamin-Konzentrationen im Bodensee haben sich im Bereich von 0,2 µg/L stabilisiert und liegen damit weiterhin oberhalb der Anforderungen des ERM (Bild 20). Auffällig sind die für 2024 höheren Konzentrationen als in den beiden Vorjahren. Diese Werte überschreiten an einigen Stellen sogar die Werte des dargestellten 5-Jahres-Mittelwertes. Inwieweit hier Veränderungen im Zirkulationsverhalten des Bodensee sowie die verhältnismäßig großen Niederschlagsmengen zum Jahresende 2023 eine Rolle spielen kann nicht festgestellt werden. An Zürichsee und Bielersee werden durchweg ca. 0,1 µg/L Melamin nachgewiesen. Die Befunde im Vierwaldstättersee liegen seit einigen Jahren deutlich darunter.



**Bild 21:** Konzentrationen von Metformin, Guanylarnstoff, Gabapentin und Lamotrigin (2024)

**Metformin** kann an fast allen Messstellen in Bodensee und Zürichsee im Bereich des ERM-Zielwertes von 0,1 µg/L nachgewiesen werden; im Bielersee werden die Vorgaben des ERM überschritten und im Vierwaldstättersee sicher eingehalten. **Guanylarnstoff** liegt nur im Bielersee oberhalb des ERM-Zielwertes und schwankt rund um den Zürichsee unterhalb dieses Wertes von 0,1 µg/L. Am Bodensee finden sich wiederum

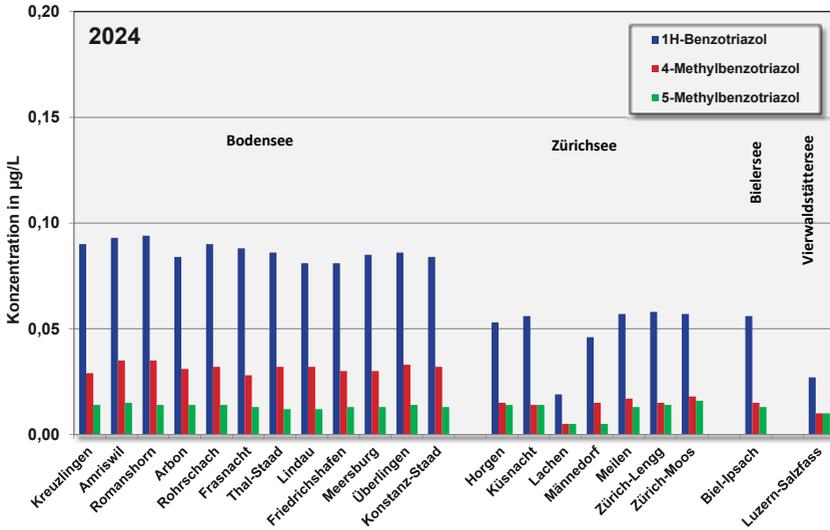
nur in Lindau nachweisbare Konzentrationen von Guanylharnstoff während im Bielersee eine deutliche Überschreitung nachzuweisen ist. Die beiden Verbindungen **Gabapentin** und **Lamotrigin** hingegen liegen an allen Messstellen weiter deutlich unterhalb der Anforderungen.



**Bild 22:** Konzentrationen von künstlichen Süßstoffen in den Alpenseen (2024)

In den Alpenseen weisen weiterhin **Acesulfam** und **Sucralose** die höchsten Konzentrationen auf während **Cyclamat** und **Saccharin** weit unter den im ERM geforderten Wert von 0,1 µg/L liegen (Bild 22). Im Vierwaldstättersee sind mit Ausnahme von Acesulfam die Befunde deutlich geringer.

Mit **1H-Benzotriazol** (Bild 23) wird ein Korrosionsinhibitor und Enteisungsmittel in die Oberflächengewässer eingetragen. Die Konzentrationen von 1H-Benzotriazol liegen im Bodensee weiterhin wenig unterhalb von 0,1 µg/L und haben sich in den vergangenen Jahren nur geringfügig verändert. Im Zürichsee und Bielersee waren die Werte rückläufig und stagnieren seit wenigen Jahren. In diesen Alpenseen wird der ERM-Zielwert von 0,1 µg/L deutlich unterschritten. Die beiden Verbindungen 4-Methyl-Benzotriazol und 5-Methyl-Benzotriazol weisen in allen Fällen ein niedrigeres Konzentrationsniveau auf.



**Bild 23:** Konzentrationen von 1H-Benzotriazol und dessen Derivaten in den Alpenseen (2024)

## Mikrobiologische Untersuchungen

Im Jahr 2023 wurden mikrobiologische Untersuchungen auf die Parameter Koloniezahl (R2A, 20 °C, 7 d); Coliforme Bakterien (Colilert®); E. coli (Colilert®); Enterokokken (DIN EN ISO 7899-2)) an einigen Messstellen der AWBR weitergeführt. Optional konnten die somatischen Coliphagen sowie Clostridium Perfringens im Rahmen der Eigenanalysen nach Teil A des Untersuchungsprogramms mitbestimmt werden. Die Befunde liegen im Bereich der in den Vorjahren festgestellten Werte. Die Auswertung über längere Zeiträume hinweg erfolgt in regelmäßigen Abständen im Auftrag der IAWR für den gesamten Rhein. Auf die entsprechenden Berichte wird hier verwiesen.

## Auswertung nach den Zielwerten des Europäischen Fließgewässermemorandums

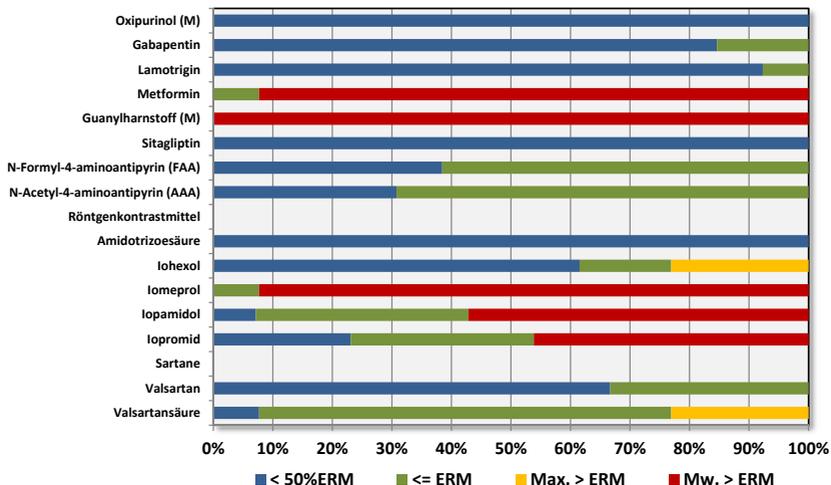
Zentrales Dokument hinsichtlich der Anforderungen der Trinkwasserversorger an Fließgewässer ist das Europäische Fließgewässermemorandum (ERM), das 2020 neu aufgelegt wurde. Überschreitungen der dort festgelegten Zielwerte zeigen Handlungsbedarf an. Unterschieden werden die Befunde dabei in vier Kategorien:

- ERM-Zielwert von Mittelwert und Maximum überschritten
- ERM-Zielwert vom Maximum überschritten
- ERM-Zielwert wird von allen Werten eingehalten
- Alle Befunde liegen unterhalb 50% des ERM-Zielwertes

In den nachfolgenden Abbildungen wird jeweils der prozentuale Anteil der Befunde, der auf diese vier Kategorien entfällt, dargestellt. Dabei erfolgt bei Überschreitung eine Zuordnung nur zu Anzahl Überschreitungen hinsichtlich Maximum (gelb = weiterer Handlungsbedarf) oder Maximum und Mittelwert (rot = dringender Handlungsbedarf). Für Sauerstoff und den pH-Wert ist diese Art der Klassifizierung nicht geeignet.

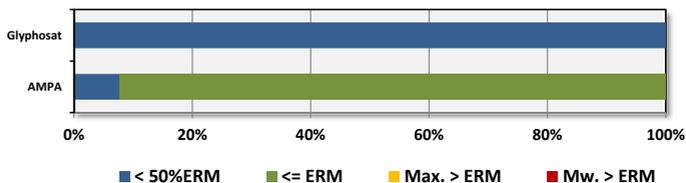
Bei den allgemeinen und summarischen Parametern am Oberrhein werden die Zielwerte des ERM an den Rhein-Messstellen eingehalten. Im Neckar bei Mannheim liegen die DOC-Werte noch häufig deutlich oberhalb des Zielwertes. Auf eine grafische Darstellung hierzu wird verzichtet.

Die umfangreichste Stoffgruppe bei den Untersuchungen der AWBR stellen weiterhin die pharmazeutischen Wirkstoffe dar. In Bild 24 sind der Übersichtlichkeit wegen nur eine Auswahl der bedeutendsten Verbindungen dargestellt. Metformin und dessen Transformationsprodukt Guanylarnstoff sowie einige Röntgenkontrastmittel überschreiten sogar im Mittel den ERM-Zielwert. Bei Iohexol und Valsartansäure liegen nur einige Maximalwerte über dem ERM-Zielwert von 0,1 µg/L.

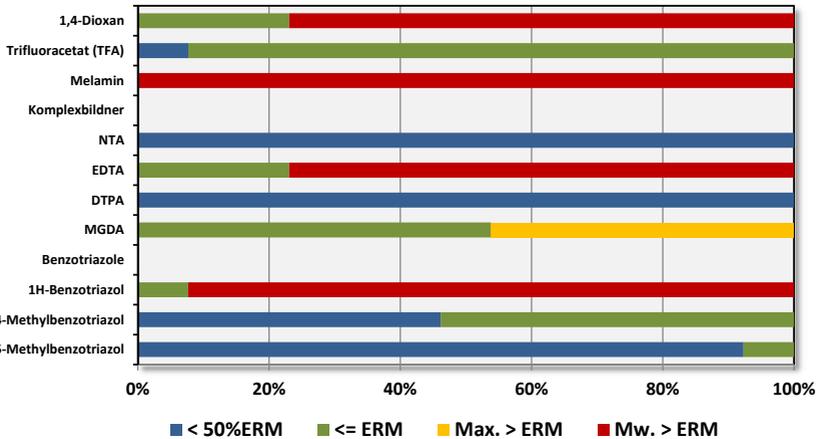


**Bild 24:** Ausgewählte Pharmazeutische Wirkstoffe und Metaboliten/Transformationsprodukte – Auswertung nach den Zielwerten des ERM für die Messstelle Karlsruhe RDK (2024)

In der AWBR werden mit Glyphosat und dessen Metabolit AMPA nur ein deutlich reduzierter Umfang an PSM-Wirkstoffen und deren Metaboliten untersucht. Die Werte sind weitestgehend unauffällig und zeigen 2023 keine Überschreitungen beim Maximalwert (Bild 25). Am Neckar hingegen überschreiten die Werte für AMPA den Zielwert dauerhaft.



**Bild 25:** PSM-Wirkstoff Glyphosat und dessen Metabolit AMPA – Auswertung nach den Zielwerten des ERM für die Messstelle Karlsruhe RDK (2023)



**Bild 26:** Industriechemikalien - Auswertung nach den Zielwerten des ERM für die Messstelle Karlsruhe RDK (2023)

Bei den Industriechemikalien (Bild 26) zeigen 1,4-Dioxan, Melamin, EDTA und 1H-Benzotriazol meistens Konzentrationen oberhalb des ERM-Zielwertes und überschreiten diesen auch im Mittelwert. Relevant sind diese Stoffe insbesondere wegen den ungünstigen Stoffeigenschaften Persistenz (P) und Mobilität (M). Zudem gibt es für den Komplexbildner MGDA an allen drei untersuchten Messstellen Überschreitungen des ERM-Zielwertes. Am Neckar ist zudem EDTA auffällig und hier überschreiten die Benzotriazole durchgängig die Anforderungen nach dem ERM.

## Temperaturen von Trinkwasser im Verteilnetz Ein Praxisbericht aus der Wasserversorgung Zürich

*Caroline Marks, Silvano Murk und Jakob Helbing  
Stadt Zürich Wasserversorgung*

Kontinuierliche Temperaturmessungen im Trinkwasserverteilnetz der Wasserversorgung Zürich haben gezeigt, dass überraschend hohe Temperaturen an unerwarteten Stellen auftreten. In Kombination mit Bodentemperaturmessungen wurden Einflussfaktoren zur Wärmeentwicklung von Trinkwasser in Verteilnetzen bewertet. Ein einfaches Modell hilft, ganzheitliche Ansätze zur Reduktion von hohen Temperaturen im Netz, wie zum Beispiel Leitungstiefe, Leitungsmaterial oder Isolationsmaterial beurteilen zu können.

### Zusammenfassung

Im Rahmen eines Pilotprojektes zum Online-Monitoring im Trinkwasserverteilnetz wurden bei der Wasserversorgung Zürich 13 Qualitätssensoren, 6 hydraulische Messstationen und 2 Bodentemperaturmessketten installiert. Dieser Bericht behandelt die Auswertung der Temperaturmessungen. Die hohe Dichte an Sensoren im Pilotgebiet zeigt die Wärmeentwicklung im Verteilnetz und deckt Hotspots der Trinkwassertemperatur im Sommer auf. Die teils unerwartet hohen Wassertemperaturen korrelieren jedoch nicht in allen Fällen mit der Wärmebelastung im Siedlungsraum. Mithilfe eines einfachen Modells kann der Wärmeübergang aus dem Boden ins Trinkwasser dargestellt werden. Dabei werden die Haupteinflussfaktoren Bodentemperatur, Rohrdurchmesser, Rohrmaterial und Fliessgeschwindigkeit berücksichtigt. Es zeigt sich, dass die Ausgangstemperatur des Wassers weniger Einfluss auf die Entwicklung der Temperaturen im Netz hat als die Bodentemperatur. Zum besseren Verständnis der Temperaturentwicklung über alle Messstationen hinweg werden weitere Bodentemperaturmessungen benötigt. Weiterhin sollte die Wasserversorgung in städtischen Konzepten zur Hitzeminimierung während der Sommermonate mitberücksichtigt werden.

## Einleitung

Seit Beginn der Aufzeichnung von Klimadaten ist eine steigende globale Durchschnittstemperatur zu beobachten, wobei sich insbesondere in den letzten Jahren der Anstieg beschleunigt hat. Auch im Kanton Zürich hat sich die Jahresmitteltemperatur im Vergleich zum Mittel von 1864 um etwa 2°C erhöht [1]. Insbesondere in den Sommermonaten sorgt der Wärmeinseleffekt zusätzlich für erhöhte Temperaturen in den Städten im Vergleich zum Umland. Die hohe Oberflächenversiegelung der Stadtgebiete durch dichte Bebauung, die gleichzeitig mit einer verringerten Durchlüftung einhergeht, sorgt für eine starke Aufwärmung tagsüber und eingeschränkte Abkühlung in der Nacht. Daraus resultieren mehr Hitzetage sowie mehr Tropennächte in städtischen Gebieten während den Sommermonaten [2].

Sowohl in der Schweiz als auch in Deutschland und Österreich gibt es eine Anforderung an die Wasserversorger, dass die Kaltwassertemperatur an der Entnahmestelle maximal 25°C betragen soll [3] [4] [5]. Allgemein beeinflusst die Temperatur des Trinkwassers chemische, physikalische und mikrobiologische Prozesse. Insbesondere die Mikrobiologie ist für kurzfristige gesundheitliche Gefährdungen entscheidend. Allerdings ist an der Wasserversorgung Zürich bisher kein eindeutiger Einfluss von erhöhten Temperaturen im Trinkwasser auf die mikrobiologische Stabilität erkennbar, da nicht nur die Temperatur, sondern auch die Nährstoffverfügbarkeit über mikrobiologisches Wachstum entscheidet. Zudem ist es bisher unklar, welche langfristigen Auswirkungen die erhöhten Temperaturen in den Städten gemeinsam mit dem Wärmeinseleffekt auf die Temperaturen des Trinkwassers in Verteilnetzen haben. Weiterhin können Risiken durch erhöhte Temperaturen auch in Hausinstallationen entstehen und allgemein wird warmes Trinkwasser von den meisten Konsumentinnen und Konsumenten weniger geschätzt.

Um nachhaltige Massnahmen zur Bereitstellung von kühlem Trinkwasser entwickeln zu können, müssen Wärmeeffekte im Trinkwassernetz verstanden werden. Dies setzt voraus, dass die Temperaturentwicklungen im Trinkwasser gemessen werden. Aus diesem Grund hat die Wasser-

versorgung Zürich im Rahmen eines Pilotprojektes mehrere Messstellen direkt im Trinkwassernetz installiert, an denen kontinuierlich Qualitäts- sowie Hydraulikparameter gemessen werden. Der Hauptfokus des Pilotprojektes ist es, die verschiedenen Zusammenhänge und Einflüsse auf die Trinkwassertemperatur besser verstehen und bewerten zu können. In diesem Bericht werden Messergebnisse und erste Schlussfolgerungen aus einhalb Jahren Aufzeichnung von Messdaten vorgestellt und diskutiert.

## Methoden

Die Pilotzone zur Messung von Qualitäts- und Hydraulikparametern im Trinkwassernetz befindet sich im Zürcher Quartier Höngg. Dort wurden Ende 2021 zusätzlich zu drei bereits bestehenden Messstellen elf neue Sensoren mit Qualitätsmessungen installiert, sowie fünf weitere Messstellen mit Hydraulikwerten und zwei Bodentemperaturmessungen. In diesem Abschnitt werden zunächst die verschiedenen Sensortypen vorgestellt und anschliessend die Grundlagen für die theoretische Diskussion von Wärmeübergangseffekten im Trinkwassernetz gegeben.

## Messschächte im Pilotgebiet

Eine Übersicht über alle Messstellen im Pilotgebiet Höngg ist in Bild 1 gegeben. Man erkennt das dichte Messnetz mit insgesamt 13 Qualitätsmessstellen, 6 hydraulischen Messstellen und 2 Bodentemperaturmessstellen. Die hydraulischen Messstellen werden in diesem Bericht nicht weiter betrachtet und sind nur der Vollständigkeit halber eingezeichnet. An den Qualitätsmessstellen werden zusätzlich zur Temperatur Leitfähigkeit, pH, Redox Potential, Trübung und gelöster Sauerstoff sowie Durchfluss und Druck gemessen. Die Daten werden ungefähr im 2-Minutentakt aufgezeichnet und alle 10 Minuten per GSM in eine Datencloud des Herstellers übertragen. Insgesamt kommen drei verschiedene Sensortypen der Firma Intellitect für die Qualitätsmessungen zum Einsatz. Zwei Sensortypen erlauben eine direkte Inline-Messung im Trinkwasserrohr und ein Sensortyp wird im Bypass betrieben. Bild 2 zeigt Beispiele der drei Sensortypen. Die sogenannte Direct Insertion Sonde (DI) eignet sich für

die Installation in grossen, begehbaren Schächten. Sie kommt innerhalb des Pilotgebietes nur an der Zuflussleitung Einspeisung Höngg zum Einsatz. Die im Bypass betriebenen Flow Cells (FC) sind in Brunnen-schächten von zwei Trinkwasserbrunnen an der Gsteigstrasse und der Limmattalstrasse 111 installiert. An allen übrigen Qualitätsmessstellen sind Sonden vom Typ Direct Bayonet (DB) in Minischächten direkt in den jeweiligen Leitungen im Strassenraum eingebaut. Die beiden FCs sind bereits seit einigen Jahren in Betrieb, alle anderen Sensoren wurden Ende 2021 installiert.



**Bild 1:** Übersichtskarte der Sensorstandorte im Pilotgebiet Höngg. Der rote Stern zeigt das Grundwasserwerk Hardhof. Die grünen Punkte verweisen auf Messstellen für Qualitätsmessungen, die blauen Punkte auf Messstellen für Hydraulikmessungen und die gelben Punkte auf die zwei Bodentemperaturmessungen. Die Abkürzungen in den grünen Punkten bezeichnen den Sensortyp der Qualitätsmessungen. Der Hauptzufluss in das Pilotgebiet ist „Einspeisung Höngg“ über die grosse Versorgungsleitung vom Pumpwerk am Hardhof kommend.

Zusätzlich zu den Qualitätsmessstellen zur Überwachung der Trinkwasserqualität im Verteilnetz wurden im Rahmen des Pilotprojektes an der Limmattalstrasse 159 unter Asphalt und auf der gegenüberliegenden

Strassenseite unter Wiese zwei Messketten zur Aufzeichnung der Bodentemperatur eingebaut. Diese Bodentemperatursonden messen in 0.2 m, 0.5 m, 0.9 m, 1.6 m und 2 m Tiefe alle 10 Minuten die Bodentemperatur und speichern die gemessenen Werte in einem angeschlossenen Datenlogger. Die Auslesung der Daten erfolgt manuell vor Ort über einen Funkdongle.



**Bild 2:** Fotos der drei installierten Sensortypen zur Messung der Wasserqualität. Direct Insertion (DI) zur Installation in begehbaren Schächten, Direct Bayonet (DB) zur direkten Installation in der Trinkwasserleitung in Minischächten im Strassenraum und Flow Cell (FC) zur Bypass-Messung in Anschlusschächten von Trinkwasserbrunnen.

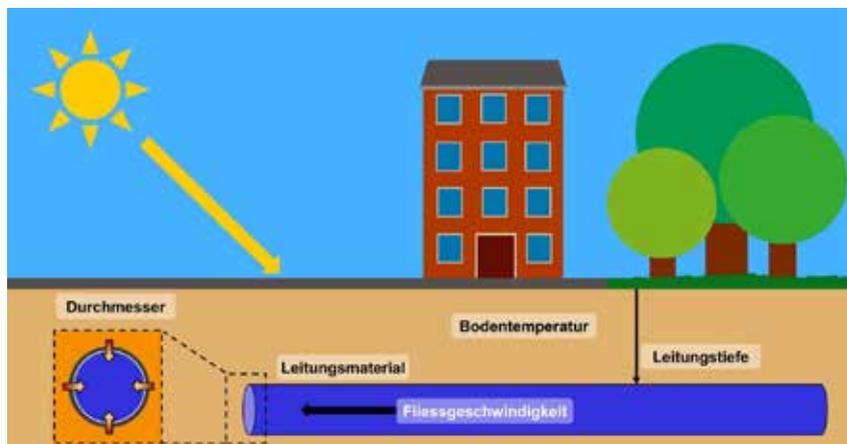
## Modellierung Wärmeübergang

Die Haupteinflussfaktoren auf die Entwicklung der Trinkwassertemperatur im Verteilnetz sind schematisch dargestellt in Bild 3. Durch Einstrahlung der Sonne wärmt sich der Boden insbesondere im Sommer auf. Der Wärmeübergang aus der Atmosphäre in den Boden, sowie der Einfluss verschiedener Oberflächen wie zum Beispiel Asphalt und Wiese wird in diesem Bericht nicht näher betrachtet. Der Fokus liegt auf den unterirdischen Einflussfaktoren Bodentemperatur, Leitungstiefe, Leitungsmaterial und -durchmesser sowie Fließgeschwindigkeit.

Solange die umgebende Bodentemperatur höher ist als die des Wassers in der Leitung, findet ein Wärmeübergang aus dem Boden in das Wasser statt. Die zeitliche Entwicklung der Wassertemperatur  $T_{\text{Wasser}}$  in Abhängigkeit des Wärmedurchgangskoeffizienten  $k$ , Dichte  $\rho_{\text{Wasser}}$  und Wärmekapazität  $c_{p,\text{Wasser}}$  von Wasser, sowie Rohrradius  $r$  und Temperatur

an der Rohraussenwand  $T_{\text{ausßen}}$  kann durch eine Exponentialgleichung beschrieben werden [6]:

$$\frac{dT_{\text{Wasser}}}{dt} = \frac{2k}{\rho_{\text{Wasser}} r c_{p,\text{Wasser}}} (T_{\text{ausßen}} - T_{\text{Wasser}}).$$



**Bild 3:** Schematische Darstellung von Faktoren, die die Temperaturentwicklung von Trinkwasser im Leitungsnetz beeinflussen. Der Fokus liegt auf unterirdischen Faktoren. Der Wärmeübergang aus der Atmosphäre in den Boden wird in diesem Bericht nicht näher betrachtet.

Der Wärmedurchgangskoeffizient  $k$  wird beeinflusst von der Wärmeleitung durch die Rohrwand in Abhängigkeit von Wandstärke  $d_{\text{Rohrwand}}$  und Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_{\text{Rohr}}$  sowie von konvektiven Prozessen im Wasser in Abhängigkeit vom Leitungsdurchmesser  $d_{\text{Rohr}}$ , Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_{\text{Wasser}}$  und Nusselt-Zahl  $Nu$ :

$$k = \frac{1}{\frac{d_{\text{Rohrwand}}}{\lambda_{\text{Rohrwand}}} + \frac{d_{\text{Rohr}}}{\lambda_{\text{Wasser}} Nu}}.$$

Für die Nusselt-Zahl gibt es je nach Strömungsbedingungen unterschiedliche Näherungen. Da in den Leitungen innerhalb des Pilotgebietes überwiegend turbulente Strömungsbedingungen herrschen, werden

die Analysen in diesem Bericht auf Näherungen für voll ausgebildete turbulente Strömungen gestützt [7]

$$Nu = \frac{(\xi/8) Re Pr}{1 + 12.7 (\xi/8)^{1/2} (Pr^{2/3} - 1)} \left[ 1 + \left( \frac{d_{Rohr}}{l} \right)^{2/3} \right].$$

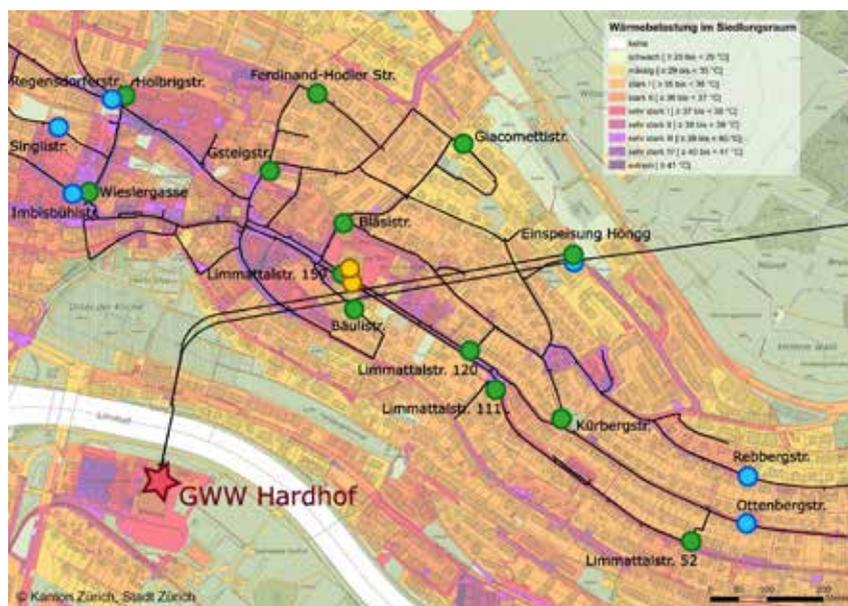
Mit dem Druckverlustbeiwert  $\xi = (0.79 \ln(Re) - 1.5)^{-2}$  und Rohrlänge  $l$ . Die Reynolds-Zahl  $Re = v d_{Rohr} / \nu_{Wasser}$  berücksichtigt zusätzlich die Fließgeschwindigkeit  $v$  und kinematische Viskosität  $\nu_{Wasser}$ , die Prandtl-Zahl  $Pr = \frac{c_{p,Wasser} \mu_{Wasser}}{\lambda_{Wasser}}$  bezieht sich auf die dynamische Viskosität  $\mu_{Wasser}$ .

### Ergebnisse und Diskussion

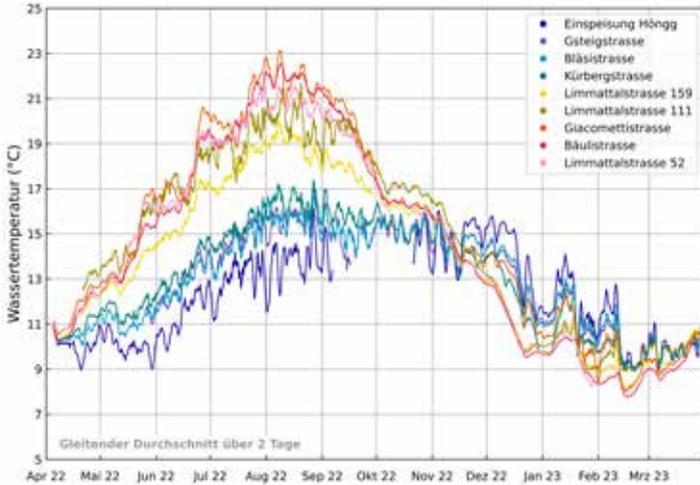
Bild 4 zeigt eine Karte der Wärmebelastung im Siedlungsraum überlagert mit den Trinkwasserleitungen und den Messstellen im Pilotgebiet. Die Farbskala der Hintergrundkarte gibt die physiologisch äquivalente Temperatur an einem Sommertag um 14 Uhr an. Die physiologisch äquivalente Temperatur beschreibt das mittlere thermische Empfinden einer Standardperson und wird hauptsächlich durch Lufttemperatur und -feuchtigkeit, Windgeschwindigkeit sowie direkte Sonneneinstrahlung beeinflusst [8]. Es ist deutlich erkennbar, dass es im Pilotgebiet mehrere Hotspots mit einer extremen Überwärmung gibt. Ob diese Hotspots der Wärmebelastung im Siedlungsraum mit einer Erwärmung des Trinkwassers korrelieren, war bisher unklar.

Um den Zusammenhang zwischen Wärmebelastung im Siedlungsraum und Temperaturentwicklung im Trinkwassernetz zu bewerten, wurden in einem ersten Schritt die gemessenen Temperaturen an den Messstellen qualitativ ausgewertet. Bild 5 zeigt die Entwicklung der Wassertemperaturen an ausgewählten Standorten aus dem Pilotgebiet, die die Varianz der Temperaturentwicklung im Netz repräsentieren. Dargestellt ist das gleitende Mittel über zwei Tage für den Zeitraum April 2022 bis März 2023. Wie oben erwähnt, ist die Messstelle Einspeisung Höngg an der Hauptzuflussleitung für das Pilotgebiet und stellt somit die Ausgangstemperatur dar. Im Verlauf des Sommers sieht man in allen Stationen eine Erwärmung gegenüber der Temperatur der Einspeisung Höngg. Die drei Stationen Gsteigt-

rasse, Bläsistrasse und Kürbergstrasse zeigen dabei die geringste Erwärmung gegenüber der Ausgangstemperatur. Diese drei Stationen sind unter den dargestellten am nächsten zum Zufluss. In etwas weiterer Entfernung zeigt sich an der Limmattalstrasse 159 noch etwas mehr Erwärmung. Die Hotspots bezogen auf Trinkwassertemperatur im Pilotgebiet sind Limmattalstrasse 52, Limmattalstrasse 111, Bäulistrasse und Giacomettistrasse mit mittleren Temperaturen zwischen 21 und 23°C im Hochsommer. Diese vier Messstellen liegen in Strassen mit wenigen Verbrauchern und zeigen dementsprechend geringe Durchflüsse. Die im dargestellten Zeitraum gemessene Maximaltemperatur waren 24°C (07.08.2022 um 04:43 an der Limmattalstrasse 52). Interessant zu beobachten ist, dass sich der Zusammenhang ab Mitte November ändert, und die Messungen im Verteilnetz tiefere Temperaturen anzeigen als im Hauptzufluss Einspeisung Höngg.

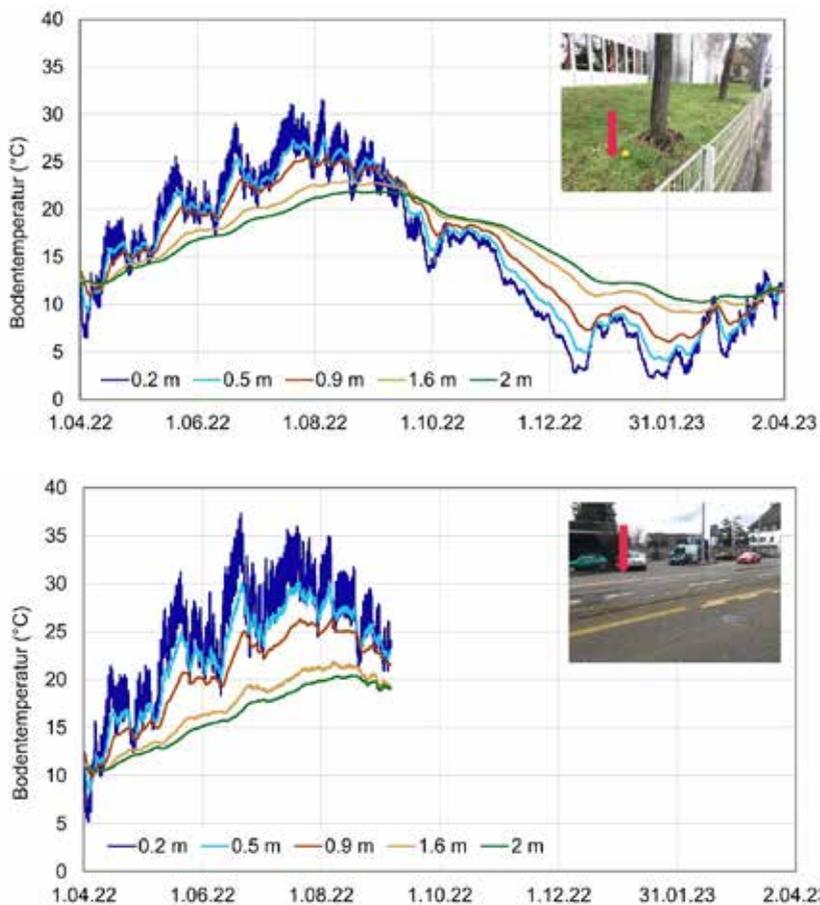


**Bild 4:** Karte der Wärmebelastung im Siedlungsraum überlagert mit den Trinkwasserleitungen und Messstellen im Pilotgebiet Zürich Höngg. Die Farbskala der Hintergrundkarte gibt die Wärmebelastung im Siedlungsraum in Form der physiologisch äquivalenten Temperatur an einem Sommertag um 14 Uhr an. Die Aufenthaltsqualität von Grünflächen wird in diesem Bericht nicht weiter betrachtet und erscheint deshalb nicht in der Legende. Die farbliche Zuordnung der verschiedenen Messstandorte ist in der Abbildungsunterschrift zu Bild 1 erklärt.



**Bild 5:** Trinkwassertemperatur an ausgewählten Messstellen im Zeitraum April 2022 bis März 2023. Dargestellt ist der gleitende Durchschnitt über 2 Tage. Die Datenlücken in einzelnen Zeitreihen sind durch Ausfälle der jeweiligen Sensoren entstanden.

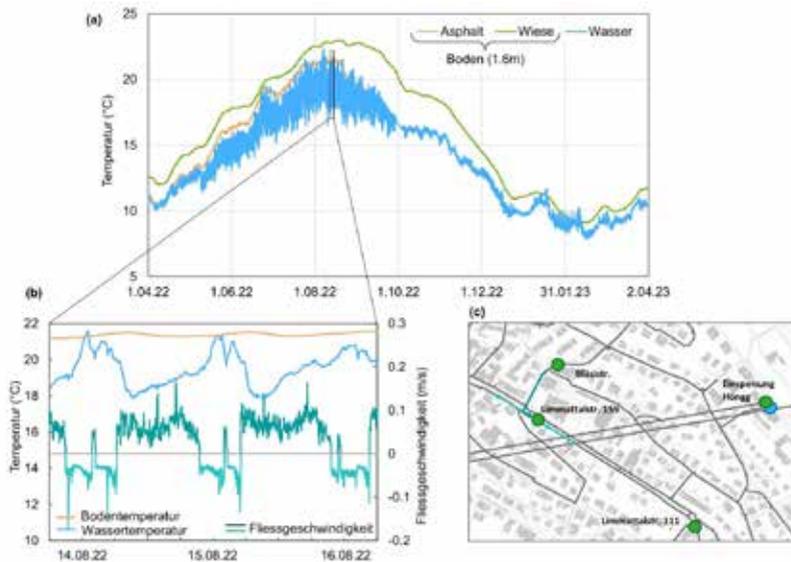
Im Vergleich zwischen der Klimakarte (Bild 4) und den gemessenen Trinkwassertemperaturen (Bild 5) zeigt sich, dass an einigen Messstellen die Wärmebelastung im Strassenraum mit der Temperaturentwicklung im Trinkwassernetz übereinstimmt. Die Messstellen Limmattalstrasse 52 und 111 liegen beide in Zonen mit sehr starker Wärmebelastung und gehören zu den beobachteten Hotspots in Bezug auf Trinkwassertemperatur. Dieser Zusammenhang gilt jedoch nicht für alle Messstellen. Beispielsweise wurden an der Giacomettistrasse hohe Trinkwassertemperaturen gemessen, wobei sich die Messstelle in einem Gebiet mit mässiger Wärmebelastung befindet. Andersherum ist die Wärmebelastung an den Messstellen Gsteigstrasse und Bläsistrasse sehr stark, während die Erwärmung des Wassers gegenüber der Ausgangstemperatur eher gering ist. Insgesamt lässt sich also sagen, dass es keine direkte Korrelation zwischen der Überwärmung im Siedlungsraum und Trinkwassertemperaturen im Verteilnetz gibt. Es müssen also weitere Einflussfaktoren berücksichtigt werden.



**Bild 6:** Bodentemperatur in 0.2 m, 0.5 m, 0.9 m, 1.6 m und 2 m unter der Erdoberfläche an der Limmattalstrasse 159 (unter Asphalt, Bild unten) sowie an der gegenüberliegenden Strassenseite (unter Wiese, Bild oben) für den Zeitraum April 2022 bis März 2023. Die roten Pfeile in den Fotos zeigen den ungefähren Standort der Messketten an. Aufgrund eines Defektes am Datenlogger ist die Messreihe unter Asphalt unvollständig.

Ein Faktor, der die Trinkwassertemperatur im Verteilnetz beeinflusst, ist die Bodentemperatur. Bild 6 zeigt die gemessenen Bodentemperaturen an den zwei Standorten nahe der Limmattalstrasse 159 unter Asphalt und unter Wiese für den gleichen Zeitraum, wie die Wassertemperaturen

in Bild 5. Aufgrund eines Defektes sind die Daten für den Logger unter Asphalt (welcher sich in unmittelbarer Nähe zur Qualitätsmessstelle Limmattalstrasse 159 befindet) unvollständig. Der Plot macht deutlich, dass tägliche Schwankungen der Bodentemperatur mit zunehmender Tiefe gedämpft werden. Insbesondere in 1.6 m und 2 m Tiefe lassen sich nur noch die Verläufe einzelner Wärme- und Kälteperioden erkennen. Weiterhin sind die Maxima sowohl von einzelnen Warm- und Kaltphasen als auch die der gesamten Jahresganglinie mit zunehmender Tiefe zeitverzögert. Das heisst, ein Wärmeeintrag von oben macht sich in der Ebene der Leitungstiefe (ca. 1.6 m) erst nach einigen Tagen bemerkbar.



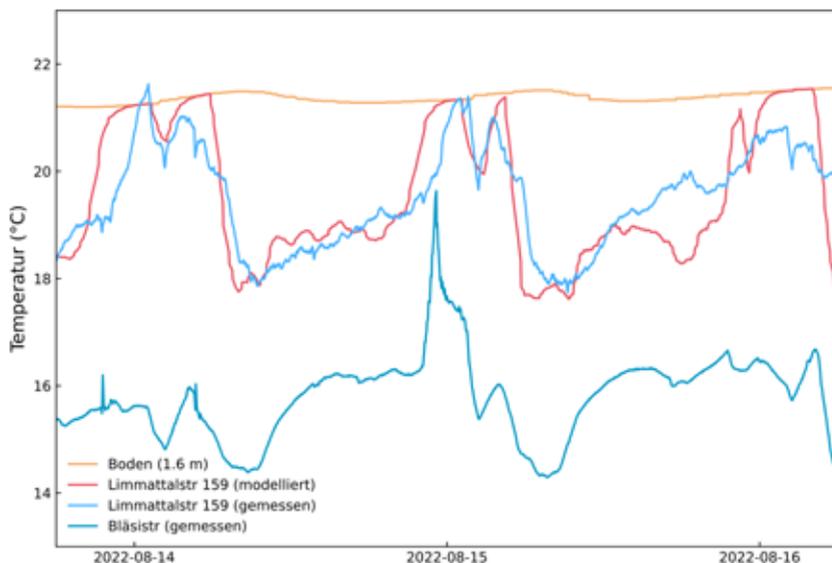
**Bild 7:** (a) Boden- und Wassertemperatur in 1.6 m Tiefe gemessen an der Limmattalstrasse 159 im Zeitraum April 2022 bis März 2023. (b) Boden- und Wassertemperatur, sowie Fließgeschwindigkeit und -richtung an der Limmattalstrasse 159 für zwei Tage im August 2022. (c) Kartenausschnitt mit Anzeige der Fliessrichtungen an der Limmattalstrasse 159.

Durch die Nähe der Qualitätsmessstelle und der Bodentemperaturmesskette an der Limmattalstrasse 159 kann hier ein direkter Vergleich zwischen der Bodentemperatur in 1.6 m Tiefe sowie der Temperatur in der daneben verlaufenden Trinkwasserleitung gemacht werden. Dies ist in Bild 7 (a) dargestellt.

Da die Bodentemperatur an der Messstelle nicht über das gesamte Jahr aufgezeichnet werden konnte, ist als Ergänzung die Bodentemperatur in 1.6 m Tiefe gemessen auf der anderen Strassenseite unter Wiese geplottet. Es wird erkennbar, dass die Bodentemperatur im Verlauf von Frühjahr und Sommer eine Art obere Grenze für die Trinkwassertemperatur darstellt. Der Ausschnitt in Bild 7 (b) zeigt den detaillierten Temperaturverlauf von Wasser und Boden an zwei einzelnen Tagen im August 2022. Weiterhin ist die Fliessgeschwindigkeit und -richtung des Trinkwassers geplottet. Bild 7 (c) zeigt schematisch die Fliessverhältnisse. Tagsüber fliesst Wasser von der Bläsistrasse über die Limmattalstrasse 159 weiter in Richtung Limmattalstrasse 111 (dunkelgrüne Kurve in Bild 7 (b) sowie dunkelgrüner Pfeil in Bild 7 (c)). Nachts kehrt sich die Fliessrichtung um (hellgrüne Kurve und entsprechender Pfeil), sodass Wasser wieder aus Richtung Limmattalstrasse 111 zurückfliesst. Dabei fliesst es allerdings nicht zurück in die Bläsistrasse (dort wurden keine Richtungswechsel beobachtet), sondern weiter entlang der Limmattalstrasse (angedeutet durch den hellgrünen gestrichelten Pfeil). Der zeitliche Verlauf von Wassertemperatur und Fliessgeschwindigkeit zeigt, dass mit dem nächtlichen Richtungswechsel und leicht niedrigeren Fliessgeschwindigkeiten die Wassertemperatur bis auf das Niveau der Bodentemperatur ansteigt. Morgens, einhergehend mit Richtungswechsel und steigendem Wasserverbrauch (dementsprechend höhere Durchflüsse), nimmt die Wassertemperatur innerhalb von weniger als drei Stunden um mehrere °C ab. Es ist also bereits qualitativ erkennbar, dass Bodentemperatur, Fliessgeschwindigkeit und Aufenthaltszeit im Netz einen gewichtigen Einfluss auf die Entwicklung der Wassertemperatur haben.

Für eine erste quantitative Analyse wurde die Wassertemperatur an der Limmattalstrasse basierend auf den oben angegebenen Formeln geschätzt. Für die Fliessrichtung tagsüber wurde die Wassertemperatur an der Bläsistrasse als Ausgangstemperatur betrachtet. Für den Wechsel der Fliessrichtung nachts wurde eine zusätzliche Aufenthaltszeit in der Leitung der Limmattalstrasse berücksichtigt. Der direkte Fliessweg zwischen den beiden Messstellen sowie die jeweiligen Durchmesser und Materialien der Rohrleitungen geben weitere Randbedingungen vor. Weiterhin wird aufgrund der Nähe zwischen Bodentemperaturmessung und Rohrleitung angenommen, dass die Rohrausentemperatur der gemessenen Bodentemperatur entspricht. Die Wärmeleitung innerhalb des Bodens zwischen Bodenmess-

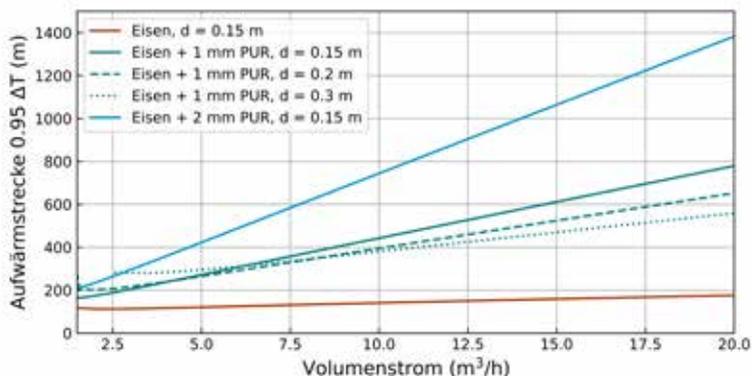
stelle und Leitung wurde in erster Näherung vernachlässigt. Bild 8 zeigt die gemessene, sowie die modellierte Wassertemperatur und zusätzlich die Ausgangstemperatur gemessen an der Bläsistrasse und die Bodentemperatur. Es ist eine gute Übereinstimmung zwischen Modell und Messung erkennbar, da die an der Limmattalstrasse 159 gemessenen Tagesprofile mit geringen Abweichungen durch das Modell vorhergesagt werden. An anderen Messstellen ist die Übereinstimmung zwischen vorhergesagten und gemessenen Temperaturen weniger gut (nicht gezeigt). Das heisst, dort gibt es noch zu viele Unbekannte, um eine realistische Übereinstimmung zu erzielen. Insbesondere bei der Bodentemperatur ist noch unklar wie stark sich diese über das Pilotgebiet verändert und inwiefern die Wärmeleitung innerhalb des Bodens eine Rolle spielt. Weiterhin sind aufgrund der vielen Verzweigungen im Netz die Durchflüsse trotz der hohen Sensordichte nicht für alle Leitungen bestimmbar. Um eine Vorhersage von Hotspots in den Trinkwasserleitungen zu ermöglichen, bräuchte man zum einen weitere Erkenntnisse über die Variabilität der Bodentemperatur über das Leitungsnetz und zum anderen genauere Daten über die jeweiligen Durchflüsse.



**Bild 8:** Vergleich zwischen gemessener und modellierter Wassertemperatur an der Limmattalstrasse 159. Die Wassertemperatur an der Bläsistrasse wurde als Ausgangstemperatur genutzt und die Rohraussentemperatur als Annahme der Bodentemperatur gleichgesetzt.

## Ansatzmöglichkeiten zur Reduktion der Trinkwassertemperatur

Mit den aus den Formeln bekannten Einflussfaktoren lassen sich verschiedene Ansatzmöglichkeiten zur Reduktion der Temperatur von Trinkwasser im Verteilnetz bewerten. Unabhängig von der tatsächlichen Ausgangstemperatur des Trinkwassers sowie der Temperatur des die Leitung umgebenden Bodens lässt sich berechnen, wie lange es dauert, bis sich das Trinkwasser um 95% der Differenz zwischen Wasser- und Bodentemperatur erwärmt hat (Aufheizzeit  $t_{0,95}$ ). Für eine bestimmte Fließgeschwindigkeit  $v$  im Rohr lässt sich die Aufheizzeit  $t_{0,95}$  umrechnen in eine Aufheizstrecke  $x_{0,95}$ :  $x_{0,95} = v \cdot t_{0,95}$ . Diese Aufheizstrecke ist in Bild 9 in Abhängigkeit des Volumenstroms durch ein Rohr für verschiedene Materialien und Durchmesser gezeigt. Der Bereich des Volumenstromes, sowie die ausgewählten Durchmesser und Rohrmaterialien repräsentieren die im Pilotgebiet herrschenden Bedingungen. Die Stoffwerte für Wasser wurden für eine mittlere Wassertemperatur von 15°C berücksichtigt. In den folgenden Abschnitten werden die einzelnen Einflussfaktoren zur Temperaturreduktion näher diskutiert.



**Bild 9:** Strecke, die das Trinkwasser im Verteilnetz zurücklegen müsste, um sich um 95% der Temperaturdifferenz zwischen Wasser und Boden zu erwärmen, in Abhängigkeit des jeweiligen Volumenstroms durch ein Rohr mit festem Durchmesser. Die durchgezogenen Linien zeigen den Einfluss verschiedener Rohrmaterialien (PUR: Polyurethan), die petrolfarbenen Linien zeigen den Einfluss verschiedener Durchmesser.

## Senkung der Ausgangstemperatur

In Zürich wird zum grossen Teil aufbereitetes Seewasser als Trinkwasser zur Verfügung gestellt, welches rund ums Jahr eine Temperatur zwischen 6 und 12°C (Mittel 7 – 8°C) am Werksausgang aufweist. Zusätzlich wird Grundwasser gefördert, das in den Sommermonaten bis 18°C warm werden kann (Mittel 15°C). Eine naheliegende Idee zur Senkung der Temperaturen im Verteilnetz ist die Senkung der Ausgangstemperatur, was bedeuten würde im Sommer eher Trinkwasser aus den Seewasserwerken zu verteilen. Aus Bild 9 ist jedoch ersichtlich, dass sich das Trinkwasser je nach Rohrmaterial, Durchmesser und Volumenstrom bereits nach sehr kurzen Strecken von überwiegend weniger als 800 m um 95% der Temperaturdifferenz zwischen Wasser und Boden erwärmt hat. Für den Vergleich zwischen See- und Grundwasser würde das bei einer angenommenen Bodentemperatur von 23°C bedeuten, dass sich das ursprünglich kühle Seewasser von 8°C auf 22.25°C erwärmt und das deutlich wärmere Grundwasser sich von 18°C auf 22.75°C erwärmt. Die ursprünglich grosse Temperaturdifferenz zwischen den beiden Trinkwässern wäre also innerhalb kurzer Zeit (bzw. kleiner Strecke) kaum noch vorhanden. Eine Senkung der Ausgangstemperatur würde also nur sehr lokal um die jeweiligen Werke den gewünschten Effekt erzielen.

## Bodentemperatur

Aus Bild 6 ist ersichtlich, dass mit zunehmender Tiefe die Bodentemperatur und damit die obere Grenze für die Trinkwassertemperatur während der Sommermonate sinkt. Eine weitere Möglichkeit zur Reduzierung der Trinkwassertemperatur im Verteilnetz wäre also die Rohrleitungen in grösserer Tiefe zu verlegen, um die Maximaltemperatur zu begrenzen. Dies wäre jedoch eine sehr langfristige und mit hohen Kosten verbundene Massnahme.

In Bezug auf Überwärmung in den Städten gibt es verschiedene Ansätze zur Abkühlung von Hitzeinseln im Stadtgebiet (z.B. verstärkte Begrünung, verschiedene Bodenbeläge) [2]. Diese Massnahmen wurden nach unserem Wissen bisher allerdings nur oberirdisch bewertet. In Be-

zug auf steigende Temperaturen im Trinkwasser sollten hitzemindernde Massnahmen künftig nicht nur oberirdisch bewertet werden, sondern ein möglicher den Boden kühlender Effekt sollte mitberücksichtigt und ausgewertet werden.

## Leitungsmaterial

Das Leitungsmaterial beeinflusst direkt den Wärmeübergang zwischen Boden und Trinkwasser. Gusseisen ist ein beliebter Werkstoff, allerdings auch ein guter Wärmeleiter. Bild 9 zeigt, dass bereits einige Millimeter zusätzliche PUR-Beschichtung einen stark isolierenden Effekt haben. An kritischen Stellen wie zum Beispiel Rohrleitungen mit geringem Durchmesser und/oder geringem Durchfluss könnte eine zusätzliche Isolierung dazu beitragen das Trinkwasser länger kühl zu halten.

## Leitungsdurchmesser

Mit geringerem Durchmesser sinkt die Fläche, über die ein Wärmeübergang aus dem Boden stattfinden kann. Weiterhin wird, unter der Annahme eines gleichbleibenden Verbrauches (also keine starken Veränderungen in den beobachteten Durchflüssen an einzelnen Standorten), über den Leitungsdurchmesser die Fliessgeschwindigkeit beeinflusst. Genauer gesagt bedeutet eine Halbierung des Durchmessers eine Vervierfachung der Fliessgeschwindigkeit. Die Fliessgeschwindigkeit wiederum beeinflusst die Aufenthaltszeit des Wassers im Rohr und definiert damit den Zeitraum, in dem sich das Wasser erwärmen kann. Gleichzeitig bedeutet eine höhere Fliessgeschwindigkeit höhere Turbulenz und damit einhergehend ein besserer Wärmeübergang. In Bild 9 ist ersichtlich, dass der Einfluss von grösseren Rohrdurchmessern begrenzt ist und je nach Volumenstrom zu grösseren aber auch zu geringeren Aufwärmstrecken führen kann. Es kann also keine pauschale Empfehlung abgegeben werden, ob eine Verkleinerung oder Vergrösserung des Leitungsdurchmessers sinnvoll ist.

## Fazit/Ausblick

Die ersten Auswertungen der Sensoren der Wasserversorgung Zürich im Pilotgebiet Höngg zeigen, wie sich die Temperatur von Trinkwasser im Verteilnetz im Laufe eines Jahres entwickelt. Dabei konnte in den Sommermonaten teilweise eine starke Erwärmung gegenüber der Ausgangstemperatur beobachtet werden. Der Vergleich mit Klimakarten zur Wärmebelastung im Siedlungsraum zeigt, dass es keinen pauschalen Zusammenhang zwischen oberirdischen Hitzeinseln und der in den Rohrleitungen gemessenen Trinkwassertemperatur gibt. Diese Ergebnisse können in Kombination mit Modellierungsansätzen dabei helfen, Einflussfaktoren auf die Trinkwassertemperatur zu bewerten. Insgesamt zeigt sich, dass in der wärmeren Jahreshälfte die Bodentemperatur als obere Begrenzung für die Trinkwassertemperatur ein entscheidender Faktor ist. Deshalb sollten Massnahmen zur Hitzeminderung im städtischen Siedlungsraum die Bodentemperatur explizit miteinbeziehen. Weiterhin sollten Trinkwasserverteilnetze in Massnahmeplänen gegen Hitze berücksichtigt werden. Zum weiteren Verständnis der Entwicklung der Bodentemperatur im städtischen Raum werden mehr Bodentemperaturmessungen gebraucht. Dies sollte es ermöglichen ein räumlich aufgelöstes Bodentemperaturmodell zur Vorhersage der Wassertemperatur zu entwickeln. Als weitere Massnahme bietet es sich an, Leitungen an kritischen Stellen zusätzlich zu isolieren. Der Effekt einer geringeren Ausgangstemperatur ist stark lokal begrenzt. Ebenso sorgt eine Reduktion des Leitungsdurchmessers nicht in allen Fällen für kühleres Trinkwasser. Insgesamt erscheint es sinnvoll, die Entwicklung der Trinkwassertemperatur in der langfristige Netzplanung explizit zu berücksichtigen, um frühestmöglich passende Massnahmen ergreifen zu können.

## Bibliographie

- [1] Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz (2021): Klimawandel im Kanton Zürich. National Centre for Climate Services.
- [2] Stadt Zürich (2020): Fachplanung Hitzeminderung. Zürich.
- [3] SVGW-Arbeitsgruppe Richtlinie W3/E3 (2020). Richtlinie für Hygiene in Trinkwasserinstallationen.
- [4] DIN 2000:2017-02 (2017): Zentrale Trinkwasserversorgung - Leitsätze für Anforderungen an Trinkwasser, Planung, Bau, Betrieb und Instandhaltung der Versorgungsanlagen.
- [5] ÖNORM B2531 (2019): Technische Regeln für Trinkwasserinstallationen.
- [6] Pieterse-Quirijns, E. J.; Blokker, E. J. M. (2019): Modeling temperature in the drinking water distribution system. J AWWA. 105(1): E19-E28.
- [7] VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (2013). VDI-Wärmeatlas. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- [8] Kanton Zürich. Amt für Raumentwicklung - Abteilung Geoinformation (2021): Klimaerwärmung im Strassenraum. <https://www.zh.ch/de/news-uebersicht/mitteilungen/2021/planen-bauen/geoinformation/klimaerwaermung-im-strassenraum.html>. [Zugriff am 06 06 2023].

„Originalpublikation: AQUA & GAS No 7+8 | 2023 - Seiten 42 - 49“

## QUOVADIS-LAB: Trinkwasseranalytik in der Zukunft – wo geht die Reise hin?

*Nadine Löffler, TZW: DVGW-Technologiezentrum Wasser, Karlsruhe*

*Dr. Ulrich Borchers, IWW Zentrum Wasser, Mülheim*

*Dr. Frank Sacher, TZW: DVGW-Technologiezentrum Wasser, Karlsruhe*

Bei den stetig steigenden Anforderungen an die Qualität unseres Trinkwassers stellt sich die Frage, mit welchen Entwicklungen im Bereich der Analytik zur Qualitätsüberwachung und der Prozesskontrolle zukünftig zu rechnen ist. Diese Fragestellung wurde im Rahmen des DVGW-Zukunftsprogramms Wasser im Projekt QVOVADIS-LAB behandelt, indem Hersteller von Analysegeräten und Wasserversorger befragt wurden. Eine wichtige Rolle werden demnach zukünftig die „Grüne Analytische Chemie“, der vermehrte Einsatz von Screening-Verfahren und das Vorbringen der molekularbiologischen Analytik spielen.

### Einleitung

Die Trinkwasserqualität in Deutschland ist heute, auch dank modernster und empfindlicher Analysen- und Labortechnik, auf einem sehr hohen Stand, nicht nur national im Hinblick auf die Entwicklung der letzten 25 Jahre, sondern auch im weltweiten Vergleich. Die Zahl der routinemäßig gemessenen Stoffe sowie die Gesamtzahl an messbaren Stoffen haben sich dank neuer Methoden und einer deutlich verbesserten Empfindlichkeit der Geräte in den letzten 25 Jahren drastisch erhöht. Die Zahl der amtlich überwachten Parameter ist allein in den letzten Jahren um mehr als 50% gestiegen, bezogen auf organischen Spurenstoffe beträgt die Steigerung sogar 190% [1]. Die hohe Sensitivität der Analysengeräte ermöglicht Messungen im Konzentrationsbereich von wenigen Nanogramm pro Litern und teilweise darunter. Damit kann eine sichere Aussage über die gesundheitliche Besorgnis von Belastungen für nahezu alle relevanten Stoffe getroffen werden.

Aufgrund neuer Anforderungen aus den gesetzlichen Regelungen wie der neuen Trinkwasserverordnung oder der EU-Wasserrahmenrichtlinie

sowie aufgrund von allgemeinen Besorgnissen der Verbraucher um eine hohe Wasserqualität ergeben sich stetige und dynamische Entwicklungen in der Analysetechnik. Die Anforderungen an die Messungen in Hinblick auf die Anzahl der zu untersuchenden Inhaltsstoffe und die Effizienz der Verfahren werden in den nächsten Jahren noch weiter ansteigen. Gleichzeitig müssen die Entwicklungen im analytischen Bereich aber auch kritisch hinsichtlich ihres Einsatzes zur Trinkwasserüberwachung evaluiert werden, denn nicht für alle Parameter ist die Anwendung hochspezialisierter Analysensysteme angemessen und sinnvoll.

Um diese Anforderungen und Entwicklungen proaktiv zusammen mit analytischen Forschungsgruppen, Geräteherstellern und Wasserversorgern weiterzuentwickeln und um Trends und neue Bedarfe frühzeitig aufgreifen zu können, wurde in dem Projekt QUOVADIS-LAB eine Roadmap der Analysetechnik erarbeitet.

### Zielsetzung und Arbeitsprogramm

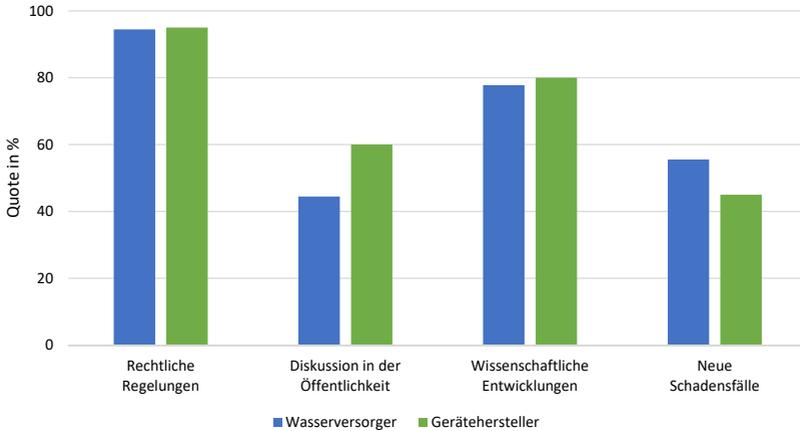
Übergeordnetes Ziel des Vorhabens war es, die zukünftigen Entwicklungen im Bereich der analytischen Trinkwasserüberwachung zu prognostizieren und damit die Wasserversorger und den DVGW in die Lage zu versetzen, sich frühzeitig auf diese Entwicklungen vorzubereiten und notwendige Maßnahmen ergreifen zu können. Gleichzeitig stellt die entwickelte Roadmap eine gute Grundlage für Gerätehersteller und Firmen im analytischen Bereich dar, um zukünftige Trends zu erkennen und entsprechende Entwicklungen vorantreiben zu können.

Die erstellte Roadmap basiert auf den relevanten Rahmenbedingungen im Umfeld der Analytik sowie den wichtigsten Treibern für zukünftige Anforderungen. Zu Beginn des Projektes wurde eine Literaturanalyse über die relevante analytische Forschung durchgeführt. Dabei erfolgte eine Zusammenstellung und systematische Auswertung von wichtigen Entwicklungen in den Bereichen chemische Analytik, mikrobiologische Analytik, wirkungsbezogene Analytik und online-Analytik. Ein zentraler Baustein des Projektes stellten zwei parallel durchgeführte Umfragen bei Geräteherstellern und Wasserversorgern dar. Die Umfragen dienten

der Ermittlung von zukünftigen Trends und Entwicklungen in der Trinkwasseranalytik aus den jeweiligen Sichtweisen der Gerätehersteller und der Wasserversorger. Des Weiteren wurden in dem Projekt die Anforderungen an die Analytik durch Gesetzgebung, Toxikologie und die Verbraucher zusammengestellt und abgeschätzt. Die sich anschließende Gap-Analyse führte die Ergebnisse von Literaturrecherche, Umfragen und Anforderungsanalyse zusammen und identifizierte mögliche Diskrepanzen und Synergien zwischen den unterschiedlichen Anforderungen und Erwartungen. Dies wurde anschließend auch in einem Workshop mit den beteiligten Kreisen bestehend aus Vertretern der analytischen Forschung und Behörden sowie Geräteherstellern und Wasserversorgern kritisch beleuchtet und diskutiert. Die abschließenden Ergebnisse wurden in einer Roadmap zusammengetragen und als strategische Empfehlung dargestellt.

## Ergebnisse der Umfragen

Ein wichtiger Bestandteil der Fragebögen war die Frage nach den Ursachen bzw. Treibern für neue analytische Entwicklungen. Die Rückmeldungen auf diese Frage sind in Abbildung 1 dargestellt. Die vier vorgegebenen Antworten sind an der x-Achse aufgelistet und die Quote, d. h. die positive Rückmeldung zu den jeweiligen vorgegebenen Antworten, ist an der y-Achse aufgetragen. Zunächst ist die allgemein hohe Übereinstimmung zwischen Wasserversorgern und Geräteherstellern zu vermerken. Mit über 90 % gaben beide Teilnehmergruppen die rechtlichen Regelungen als Treiber für neue Analysemöglichkeiten an, weshalb sich rechtliche Vorgaben als Hauptursache für zukünftige Entwicklungen identifizieren lassen. Ebenfalls in hoher Übereinstimmung und hoher Relevanz sind wissenschaftliche Entwicklungen zu verzeichnen. Diskussionen in der Öffentlichkeit stellen eher für die Gerätehersteller einen treibenden Faktor für neue Analysemöglichkeiten dar, wohingegen neue Schadensfälle tendenziell eine Ursache für die Nutzung neuer Analysetechniken bei den Wasserversorgern sind.



**Abb. 1:** Ergebnisse der Frage nach den Ursachen für die Entwicklung und Nutzung neuer Analysemöglichkeiten.

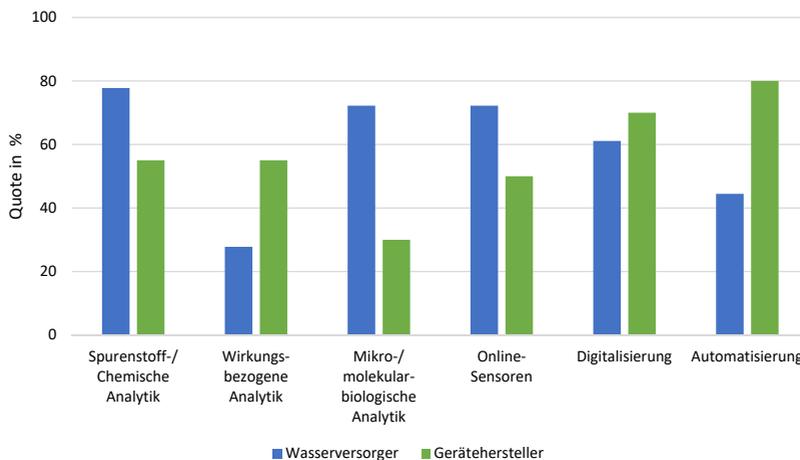
Da sich rechtliche Vorgaben als Hauptursache für neue analytische Verfahren herauskristallisiert haben, stellt sich die Frage, ob rechtliche Vorgaben eher als Potenzial oder als Hemmnis gesehen werden. Hierbei weichen die Einschätzungen der Wasserversorger deutlich von den Geräteherstellern ab. Bei den Wasserversorgern schätzen nur gut 60% die aktuellen Regelungen als Potenzial für zukünftige Entwicklungen ein, wohingegen es bei den Geräteherstellern über 90% sind.

Konkrete Potenziale durch die Gesetzgebung wurden deshalb vorwiegend von den Geräteherstellern benannt. Ein wichtiges Potenzial ist die Erfassung von neuen Parametern, weil zusätzliche Stoffe regulatorisch überwachungspflichtig werden. Daraus öffnet sich die Möglichkeit für neuen Verfahren wie beispielsweise die quantitative Echtzeit-PCR. Ein ebenso häufig genanntes Stichwort waren die Grenzwertsenkungen, da eine immer höhere Reinheit des Wassers gefordert wird. Dies verlangt nach sensitiveren Messgeräten mit niedrigeren Bestimmungsgrenzen.

Hemmnisse in den aktuellen Regelungen werden von knapp 40% der Wasserversorger gesehen. Hier sind vor allem zwei große Hemmnisse zu nennen: Zum einen fehlen bei Analysemethoden häufig einheitliche

Vorgaben. Beispiele hierfür sind fehlende analytische Vorgaben zur Bestimmung von Mikroplastik oder zur Durchführung der Durchflusszytometrie. Das zweite Hemmnis besteht in der Tatsache, dass die methodischen Vorgaben veraltet sind. Häufig hinken regulatorische Vorgaben den technischen Entwicklungen hinterher und entsprechen nicht den aktuellen technischen Möglichkeiten. Besonders deutlich wird dies am Beispiel der biologischen Verfahren, bei denen moderne molekularbiologische Methoden das Potenzial haben die gegenwärtig verwendeten mikrobiologischen Verfahren abzulösen oder zumindest zu ergänzen.

Die Themenfelder, in denen die zukünftig wichtigsten Entwicklungen zu erwarten sind, ließen sich anhand der Umfrage nur schwer identifizieren (Abbildung 2). Die wichtigsten Bereiche für die Wasserversorger sind die Spurenstoff- bzw. chemische Analytik, biologische Analytik und Online-Sensoren. Die Gerätehersteller sehen eher in der Digitalisierung und Automatisierung zukünftige Entwicklungen.



**Abb. 2:** Zukünftig wichtige Entwicklungsbereiche für die Trinkwasseranalytik.

Konkret sind bei der biologischen Analytik auch zukünftig Viren und Bakterien im Fokus der Entwicklungen und Untersuchungen, wohingegen multiresistente Keime und Protozoen in der Trinkwasseranalytik als weniger relevant eingeordnet werden. Hinsichtlich der zukünftigen Techno-

logien sehen alle Gerätehersteller PCR-Techniken als sehr erfolgsversprechend an, wohingegen die Zustimmung für diese Technologie bei den Wasserversorgern nur bei ca. 35 % lag.

In der chemischen Analytik stehen vor allem Spurenstoffe allgemein und PFAS zunehmend im Fokus der Entwicklungen und Untersuchungen. Laut der Umfrage werden Hormone und Pharmazeutika auch zukünftig analytisch verfolgt, wohingegen Mikroplastik und Schwermetalle als vergleichsweise unbedeutend einzuordnen sind.

Die Steigerung der Geräteempfindlichkeit, um niedrigere Nachweisgrenzen zu erreichen, ist ein zentraler Fokuspunkt der aktuellen Entwicklungen, insbesondere auf Seiten der Gerätehersteller. Dieser Punkt war ein zentraler Gegenstand der Diskussion des Projektworkshops und wird deshalb im nachfolgenden Kapitel näher diskutiert.

Insgesamt lässt sich anhand der Umfrage bestätigen, dass die aktuellen gesetzlichen Regelungen als wesentlicher Treiber für neue Entwicklungen in der Trinkwasseranalytik agieren. Dabei bietet die Gesetzgebung verschiedene Potenziale, beispielsweise durch Vorgaben zu neuen Parametern und Verfahren. Gleichzeitig bestehen in der Gesetzeslage auch klare Hemmnisse, die durch veraltete Vorgaben neue Entwicklungen verhindern. Wichtige spezifische Entwicklungsfelder sind die Erweiterung messbarer Parameter, die Empfindlichkeitsverbesserung von Geräten sowie die Verbesserung der Automatisierung und Digitalisierung. Bei der biologischen Analytik sind auch in Zukunft Viren und Bakterien von zentraler Bedeutung, wobei ihre Analyse mittels PCR-Techniken oder der Durchflusszytometrie erfolgen kann. Die chemische Analytik wird weiterhin dominiert von der Analyse von PFAS und Spurenstoffen.

## Ergebnisse aus dem Workshop und Schlussfolgerungen

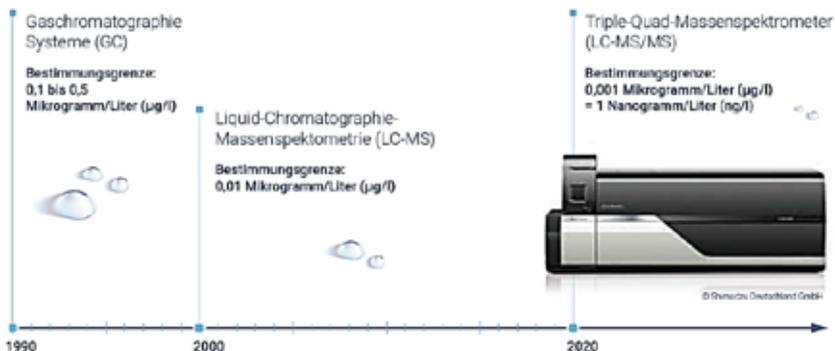
Zukünftig wichtige Analyseverfahren und Strategien im Trinkwasserbereich wurden in dem Projektworkshop vorgestellt, kritisch diskutiert und anschließend zusammengestellt (Abbildung 4). Das wichtigste Stichwort bei der Betrachtung der zukünftigen Entwicklungen im Trinkwassersektor ist die grüne analytische Chemie (engl. green analytical chemistry).

Sämtliche analytische Verfahren im Umweltbereich sollten zukünftig möglichst umwelt- und ressourcenschonend sein und nicht selbst zu Umweltproblemen beitragen. Dies ist schon seit Jahren in Skandinavien geübte Praxis, denn dort wird in der Normung grundsätzlich keinem Verfahren zugestimmt, welches mit sehr toxischen Reagenzien arbeitet. Auch vor dem Hintergrund der aktuellen Energiekrise und der zunehmenden Ressourcenknappheit sind die Ansätze der grünen analytischen Chemie zu begrüßen.



**Abb. 4:** Wichtige Trends zur Sicherung der Trinkwasserqualität.

Die Bestimmungsgrenze hat sich in der Trinkwasseranalytik in den letzten beiden Jahrzehnten drastisch nach unten verschoben (Abbildung 5). Dies wurde durch immer striktere gesetzliche Vorgaben vorangetrieben und durch neue Analysemethoden und Analysegeräte ermöglicht. Gegenwärtig liegen die erreichbaren Bestimmungsgrenzen im Bereich von 1 bis 10 ng/L und erscheinen als weitestgehend ausreichend. Eine weitere Absenkung um Zehnerpotenzen ist dagegen weder notwendig (ggf. gibt es Ausnahmefälle) noch sinnvoll bzw. in der Praxis umsetzbar. Blindwerte aus der unvermeidlichen ubiquitären Hintergrundbelastung spielen dabei heute zunehmend eine begrenzende Rolle. Deshalb ist zu erwarten, dass zukünftig vermehrt Analyseverfahren benötigt werden, die mit Screening-Ansätzen zusätzliche Stoffe in sehr niedrigen Konzentrationen erfassen können. Die verfügbaren Budgets und Ressourcen sollten folglich besser in eine „breitere“ statt eine „tiefere“ Analytik investiert werden.



**Abb. 5:** Steigerung der Empfindlichkeit der Analytik – Geht es noch weiter?

Die Target-Analytik behält aller Voraussicht nach weiterhin einen sehr hohen Stellenwert, da bei allen Szenarien am Ende die Frage zu beantworten ist, welcher Stoff in welcher Konzentration Anlass zur Besorgnis gibt. Das sehr bewährte und beizubehaltende Prinzip der gesundheitlichen Orientierungswerte und Leitwerte setzt auf der Kenntnis des Stoffes und seiner Konzentration im Trinkwasser auf. Parallel dazu scheint es sinnvoll zu sein, dass aufgrund der unüberschaubar großen Stoffvielfalt Screening-Verfahren (mit halbquantitativen Ergebnissen) weiter vorangebracht werden, so dass die Vorteile beider Ansätze sinnvoll miteinander vereint werden.

Die Mikroplastik-Analytik im Trinkwasser ist vermutlich in der Routineüberwachung nicht erforderlich. Bisherige Ergebnisse deuten an, dass keine oder nur sehr minimale Gehalte an Mikroplastik im Trinkwasser gefunden werden. Im Moment sind keine Regelungswerte bekannt oder in Aussicht gestellt worden. Zudem besteht bei den vorliegenden Konzentrationen nach dem aktuellen Kenntnisstand keine Besorgnis einer schädlichen Wirkung auf den Menschen.

Eine ganzheitliche Betrachtungsweise der Wirkung des Trinkwassers auf den Menschen stellt eine wünschenswerte Ergänzung zur Sicherung der Wasserqualität dar. Dafür ist die wirkungsbezogene Analytik gut geeignet. Eine Trinkwasserprobe, die nach einer Anreicherung in einer anerkannten Testbatterie an Endpunkten keine „schädliche Wirkung“ zeigt,

enthält auch keine Schadstoffe. Mit einer breiteren Anwendung der wirkungsbezogenen Analytik wäre ein Schritt in Richtung größerer Verbrauchersicherheit getan, da eine Bestimmung aller im Wasser enthaltener Spurenstoffe unmöglich ist. Deshalb sollte die Akzeptanz der wirkungsbezogenen Analytik in den rechtlichen Vorgaben weiter gestärkt werden.

In der biologischen Analytik dominieren derzeit die klassischen und etablierten mikrobiologischen Kulturverfahren. Jedoch sollten die molekularbiologischen Verfahren, die eine schnelle und effektive Erfassung der bakteriellen Kontaminationen sowie eine weitergehende Identifizierung der Mikroorganismen ermöglichen, gefördert werden. Grundsätzlich sollte deshalb auf die sinnvolle und sich ergänzende Co-Existenz beider Verfahren hingewiesen werden. Mittelfristig ist ein Einzug der molekularbiologischen Verfahren in die gesetzlichen Vorgaben anzustreben, um die wichtige Rolle der Verfahren dort zu verankern.

Eine ganz wesentliche Entwicklung wird die Veränderung des Einsatzes von Analytik im Umfeld des verpflichtenden Risikomanagements nach Trinkwasserverordnung darstellen. Mit dem Risikomanagement werden flexible neue oder veränderte Ansätze gebraucht werden. Hierbei sind Kreativität und Innovationen gefragt, die eine weitere, anwendungsorientierte analytische Forschung notwendig macht. Darüber hinaus wird mit der neuen Trinkwasserverordnung der Weg für eine amtliche betriebliche online-Überwachung bestimmter Parameter freigemacht. Die sich daraus ergebenden Chancen sollten aktiv genutzt werden, indem Hersteller und Anwender gemeinsam sinnvolle Anwendungsszenarien erarbeiten.

Im Projekt zeigte sich auch deutlich, dass alle Bereiche der Analytik von einer weiteren Digitalisierung und Automatisierung profitieren würden. Zudem muss die Flut an Daten und Ergebnissen unbedingt durch eine angemessene und zielgruppenorientierte Risikokommunikation begleitet werden. Diesen Aspekt gilt es zu intensivieren, da neben der Erfüllung von Überwachungspflichten die Ergebnisse und deren Bedeutung transparent erläutert und verständlich dargestellt werden müssen. Bei den heutigen Fähigkeiten der Analytik ist die Detektierbarkeit von Spurenstoffen insbesondere im Nanogramm pro Liter-Bereich erklärungsbedürftig. Mit Hilfe von Aufklärung und intensiver Vermittlung der Bedeutung der

Trinkwasseranalytik kann eine weitere Stärkung des Verbrauchervertrauens und eine Förderung des Trinkwasser-Images erreicht werden.

Letztlich ist der weitere Ausbau der Robustheit der online- und Laboanalytik gegenüber Cyberkriminalität wichtig. Gerade vor dem Hintergrund der aktuellen Bedrohungslage des Ukraine-Konflikts zeigt sich, dass Angriffe auf kritische Infrastrukturen wahrscheinlicher werden. Da in dem Kontext auch die Trinkwasseranalytik mittelbar zur kritischen Infrastruktur der Wasserversorgung zählt, kann die Schaffung von Notfall-Lösungen zur Analytik eine sinnvolle Maßnahme sein. Ähnliches gilt im Grundsatz auch für Black-Out-Szenarien im Strombereich. Hier könnten Notstromversorgungen für Kernbereiche der Analytik eine Überlegung wert sein.

## Fazit

Grundsätzlich befindet sich die Trinkwasseranalytik in Deutschland auf einem sehr hohen Niveau und wird flexibel und dynamisch weiterentwickelt. Die rechtlichen Regelungen agieren hierbei als Haupttreiber zur Förderung analytischer Messgeräte. Die Hersteller der Analysengeräte greifen mit ihrem Unternehmergeist dynamisch Tendenzen und Bedarfe am Markt auf und setzen diese in Kooperation mit Ihren Kunden in effektive Lösungen um. Die Wasserversorger und Laboratorien haben eine hohe Bereitschaft, neue Ideen und Produkte aufzugreifen, was insgesamt wirtschaftlich rentabel ist und zudem den Verbraucherschutz in Deutschland weiter garantiert und ausgebaut. Somit erscheint die Symbiose aus von Herstellern getriebenen Innovationen und der Offenheit der Wasserversorger für Neues optimal und lässt auch für die Zukunft eine optimistische Prognose zu.

## Danksagung

Das Projekt QUOVADIS-LAB wurde im Rahmen des DVGW-Zukunftsprogramms Wasser durchgeführt. Die Autoren danken dem DVGW sowie der Bundesvereinigung der Firmen im Gas- und Wasserfach e.V. - figawa und der Firma Gerstel GmbH & Co KG für die finanzielle För-

derung. Großer Dank geht auch an alle Vertreter von Herstellerfirmen und Wasserversorgungsunternehmen, die das Projekt durch die aktive Teilnahme an den Umfragen und dem Workshop maßgeblich unterstützt haben.

## Literatur

- [1] Spectaris – Deutscher Industrieverband für Optik, Photonik, Analysen- und Medizintechnik e.V.: *Analysen- und Labortechnik: Schlüssel zur Sicherheit von Trinkwasser und anderen Lebensmitteln*. 2020. <https://www.spectaris.de/fileadmin/Infothek/Verband/ePaper-Trinkwasserstudie/epaper/ausgabe.pdf>, abgerufen am 22.08.2023.



## Spurenstoff-Tracking mit KI

*Tobias Bader u. Rudi Winzenbacher, Landeswasserversorgung, Langenau  
Viktoria Pauw u. Mohamad Hayek, Leibniz-Rechenzentrum der Bayerischen  
Akademie der Wissenschaften, Garching  
Uwe Müller, TZW: DVGW-Technologiezentrum Wasser, Karlsruhe*

Kollektive und Künstliche Intelligenz hilft beim Aufspüren von Antibiotika und anderen Spurenstoffen in Gewässern. Das hat das Verbundprojekt K2I am Beispiel von Proben aus der Donau und ihren Zuflüssen in der Region Ulm gezeigt.



**Foto 1:** *Die Belastung mit Arzneirückständen und anderen Schadstoffen in geringen Konzentrationen ist Flüssen nicht anzusehen. Künstliche Intelligenz hilft bei der Suche nach Verschmutzungsquellen.  
(Foto: © Landeswasserversorgung Stuttgart)*

Oberflächengewässer sind eine wichtige Ressource für unser Trinkwasser. Sie enthalten aber zahlreiche Spurenstoffe, also organische anthropogene Substanzen in einer Konzentration von typischerweise unter einem Mikrogramm pro Liter. Das Spektrum ist riesig. Allein in der Europäischen Chemikalienverordnung sind mehr als 26 000 überwiegend organische Chemikalien registriert, die industriell verwendet werden und in Flüsse, Seen und Meere gelangen können.

Die Oberflächengewässer- und Trinkwasserverordnung sowie andere etablierte Überwachungskonzepte berücksichtigen zwar gängige Pestizide, ebenso einige Substanzen aus der Gruppe der per- und polyfluorierten Alkylsubstanzen (PFAS) sowie viele weitere Schadstoffe, aber sie decken dennoch nur die Spitze des Eisbergs ab. Ein Großteil der künstlich hergestellten chemischen Verbindungen wird aktuell gar nicht überwacht. Daher bleiben die Verursacher und örtlichen Quellen vieler Emissionen unentdeckt. Die unzureichende Erkenntnislage behindert schnelle zielgerichtete Maßnahmen des Umweltschutzes.

Wasserversorger betrifft die Problematik unmittelbar. Sie setzen neben dem Nachweis bekannter Schadstoffe vermehrt auf das Non-Target-Screening (NTS), um eine möglichst weite Palette an organischen Spurenstoffen zu erfassen und auch unbekannt oder nicht erwartete Substanzen im Wasser zu identifizieren. Die Herausforderung liegt dabei in der Auswertung der umfangreichen NTS-Daten. Schon für eine Wasserprobe fallen etwa ein Gigabyte Daten an.

Einige hoch spezialisierte Labore der Wasseranalytik betreiben bereits NTS. Wenn sie ihre Daten im Kollektiv vernetzen, können sie über die zeitlichen sowie räumlichen Informationen und mit Hilfe Künstlicher Intelligenz (KI) den Eintrag und die Verbreitung von Spurenstoffen in Gewässern besser verfolgen. So lassen sich Emissionsquellen bekannter sowie unbekannter Stoffe rasch eingrenzen. Mit diesem Konzept beschäftigte sich das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderte Verbundprojekt K2I ([www.k2i-tracker.de](http://www.k2i-tracker.de), Förderkennzeichen 02WVG1593A-D).

### **Proof-of-Concept mit Donauwasser**

Für den Proof-of-Concept wurden in der Modellregion Ulm die Donau und ihre Zuflüsse ein Jahr lang im 15-Tages-Rhythmus an acht Stellen beprobt. Sechs teilnehmende Labore erhielten die Proben zur Analyse. Das NTS erfolgte mit der Kopplung aus Flüssigchromatographie und hochauflösender Massenspektrometrie.

Für die gemeinsame Auswertung der Daten aus den verschiedenen Laboren wurde eine Cloudlösung entwickelt. Die unterschiedlichen NTS-Dateiformate wurden in ein offenes Format konvertiert, über ein vom Münchner Unternehmen Fluxtype entwickeltes Webinterface hochgeladen und mit Metadaten wie den Ortskoordinaten und den Zeitpunkten der Probennahme versehen. Für das Preprocessing wurden das Peakfinding und andere fundamentale Schritte des NTS-Workflows in einer Pipeline zusammengefasst. Die Integration der Preprocessing-Software übernahm der IT-Dienstleister EnviBee aus Zürich.

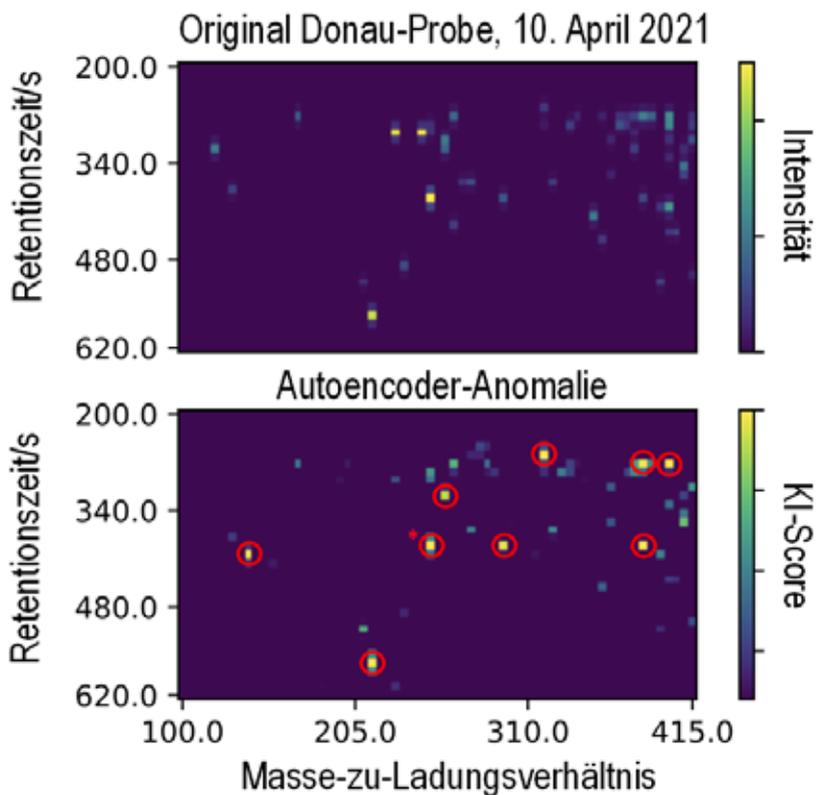
Das Postprocessing harmonisierte die Ergebnisse anhand isotoopenmarkierter Standards und führte sie laborübergreifend zusammen. Zur Visualisierung der zeitlichen und räumlichen Spurenstoffverläufe wurden Dashboard-Abfragen für die hinterlegte Datenbank generiert.

## Neuronales Netz erkennt Anomalien

Zur Bestimmung von Anomalien eignen sich spezielle künstliche neuronale Netze, Autoencoder genannt. Ein Encoder-Decoder-Paar lernt hierbei, Muster in einem reduzierten Darstellungsraum zu verdichten und wesentliche Merkmale zu extrahieren. Aus der komprimierten Darstellung lässt sich ein Bild rekonstruieren, das sich nur über bereits erlernte Muster aufbaut. Beim Abgleich können Differenzen als Anomalien interpretiert werden.

In den NTS-Daten wurden tausende Substanzen gefunden. Aufgrund der demgegenüber relativ geringen Probenzahl konnten viele KI-Methoden allerdings nicht direkt zum Einsatz kommen. Um die Probenzahl zu erhöhen, wurde ein größerer NTS-Datensatz zur Verfügung gestellt, der die Untersuchung von Donau-Proben im Zeitraum 2017 bis 2022 umfasst. Außerdem wurden die Auflösung und damit die Anzahl der detektierten Stoffe durch einen Binning-Ansatz reduziert, der durch spezielle Rechenoperationen eine Aufsummierung der detektierten Stoffe in größeren Massen- und Retentionszeitfenstern vornahm. Erst so konnte das neuronale Netz effektiv trainiert werden, um Anomalien zu finden.

Das Vorgehen war erfolgreich. Bei einer im April 2021 entnommenen Probe zeigte sich zum Beispiel in einem der markierten Bins eine erhöhte Intensität des Antibiotikums Sulfamethoxazol. Der zeitliche Verlauf mit hohen und kurzzeitigen Spitzen deutete auf eine industrielle Emission hin. Unter Einbezug der Daten aus anderen Laboren konnte die örtliche Verteilung sichtbar gemacht und die Quelle auf einen Donauzufluss eingegrenzt werden. Dies führte schließlich zu einem Emittenten. Auf die Kontamination hingewiesen, stoppte er die Einleitung stark belasteter Prozessabwässer.



**Abb. 1:** Der Abgleich des Original-Musters der Massen- und Retentionszeit-Bins einer Donau-Probe (oben) mit dem via Autoencoder generierten Bild erzeugt einen Anomalie-Score (unten) und markiert Bereiche mit auffälligen Befunden (eingekreist). In einem markierten Bin (roter Stern) wurde das Antibiotikum Sulfamethoxazol entdeckt. (Bild: K2I)

## Deutschlandweites Anschlussprojekt

Im Rahmen des Verbundprojektes K2I haben IT-Experten und Chemiker gemeinsam einen Demonstrator entwickelt, der NTS-Daten in der Cloud herstellerunabhängig über örtlich verteilte Labore auswertet. Die Wasserversorger Bodenseewasserversorgung, Hamburg Wasser und Hessenwasser sowie die Westfälische Wasser- und Umweltanalytik haben das Projekt mit NTS-Analysen unterstützt. Schon mit den in K2I erhobenen Daten wurden, wie oben am Beispiel der Sulfamethoxazol-Einleitung beschrieben, industrielle Emissionen aufgedeckt und konkrete Maßnahmen für den Gewässerschutz eingeleitet.

Ein ebenfalls deutschlandweites Anschlussprojekt soll die Cloud-Lösung nun weiter forcieren. Unter der Beteiligung von noch mehr Laboren und mit zusätzlichen Analysedaten lassen sich robustere KI-Modelle entwickeln, die weitergehende Aussagen erlauben. Außerdem soll die Standardisierung in der NTS-Analytik vorangetrieben werden, um das Zusammenführen der Daten aus den verschiedenen Laboren und somit die Datenqualität zu verbessern.



## Funkauslesbare Wasserzähler – eine Technologie mit viel Potenzial

*Simon Herrmann, badenovaNETZE GmbH, Freiburg*

Über viele Jahre hinweg haben mechanische Wasserzähler die Trinkwasserverbräuche in den Haushalten in Deutschland erfasst. Dabei wurden entweder Mehrstrahlflügelradzähler oder Patronenwasserzähler (auch als Kartuschenwasserzähler bezeichnet) eingesetzt. Beide Lösungen arbeiten mit mechanischen Teilen welche ein Zählerwerk bewegen. Dadurch entstehen für Wasserversorgungsunternehmen abrechnungsrelevante Verluste durch die sogenannten Schleichmengen, also den Mengen welche bis zur Bewegung der mechanischen Teile nicht erfasst werden. Bei Patronenzählern gibt es darüber hinaus eine tendenziell erhöhte Befundlage bei Beprobungen. Diese verbreitet eingesetzten Zähler haben eine rein auf Verbrauchsmengenerfassung reduzierte Funktion. Diese Typen von Wasserzählern müssen manuell vor Ort abgelesen werden.

Seit einigen Jahren gibt es am Markt einige Hersteller von Haushaltswasserzählern, die mit dem Prinzip der Ultraschallmessung funktionieren. Durch diese Technologie entfallen die mechanischen Bauteile, wodurch die neuen Zähler einen deutlich geringeren Verschleiß und eine reduzierte Stör- und Reparaturanfälligkeit aufweisen. Gleichzeitig gibt es durch das sehr zuverlässige und exaktere Messverfahren keine Schleichmengenverluste mehr. Die Verbrauchsmengenmessung wird über ein Display in digitaler Form angezeigt.



### **Technisch funktioniert das Verfahren wie folgt:**

Der digitale Funkwasserzähler basiert auf dem Verfahren der Laufzeitdifferenz. Im Zähler befindet sich ein Ultraschallwandler, der ein Ultraschallsignal in und entgegen der Durchflussrichtung sendet. Dieses Ultraschallsignal wird an einem Reflektor reflektiert. Dann passiert es das Messrohr und kommt am zweiten Reflektor an. Das ankommende Ultraschallsignal wird an den zweiten Ultraschallwandler gesendet. Hierbei ist die Zeit des Signals in Durchflussrichtung kürzer, als die Zeit gegen die Durchflussrichtung. Diese Laufzeitdifferenz ist proportional zur Fließgeschwindigkeit und gibt damit das genaue Durchflussvolumen an. Kombiniert mit den Angaben des Messrohrquerschnitts lässt sich das Durchflussvolumen berechnen.

Seit dem Jahr 2020 testet die badenovaNETZE in Freiburg im Breisgau den Einsatz von fernauslesbaren Ultraschallwasserzählern in Haushalten. Der Austausch der bisher eingesetzten Zähler erfolgt aus Wirtschaftlichkeits- und Kapazitätsgründen im Rahmen des normalen Turnuszählerwechsels nach Ablauf der gesetzlichen Eichfrist von sechs Jahren. Dabei setzt der Wasserversorger in Freiburg gleich mehrere Vorteile mit dem Einsatz der modernen Zählertechnologie um. Die Funkfunktion der Zähler ermöglicht eine datenschutzkonforme Fernauslesung, so dass die aufwendige manuelle Ablesung in den Haushalten nicht mehr benötigt wird. Das Datenpaket wird gemäß den BSI-Vorgaben verschlüsselt übertragen, wodurch Übertragungsfehler der Verbrauchswerte ausgeschlossen sind. Sowohl auf Seiten der Wasserversorger als auch bei den Eigentümern und Bewohnern wird Aufwand in hohem Maße eingespart. So entfallen beispielsweise aufwendige Terminvereinbarungen zur Ablesung, der manuelle Ablesevorgang vor Ort sowie bei fehlerhaften Meldungen auch aufwendige Nacharbeiten. Der Ultraschallzähler sendet mit einer Leistung von weniger als 25 mW, zum Vergleich sendet ein Mobiltelefon mit 2.000 mW und ein Fernsehsender mit 500.000 mW. Aus wirtschaftlichen Gründen lohnt sich der Einbau ebenfalls, obwohl die Funkwasserzähler deutlich teurer in der Anschaffung sind. Durch die Herstellergarantieren ist es möglich den Zähler im Stichprobenverfahren über die gesetzliche Eichfrist von sechs Jahren hinaus zu verlängern

und somit insgesamt 12 Jahre verbaut zu lassen. Die Batterien erreichen nach Herstellerangaben ebenfalls diese Laufzeiten.

Eine Auslesung der Funkwasserzähler kann über mehrere Wege erfolgen. Die badenovaNETZE testet dabei aktuell zwei verschiedene Lösungen. Ein Lösungsansatz verfolgt die Auslesung der Funkwasserzähler über ein 0G-Netz, im Fall der Stadt Freiburg über ein sogenanntes LoRaWAN-Netz. Hierbei wird die bestehende Infrastruktur dazu genutzt, die Wasserzähler mit den Messwerten Verbrauch (Vorwärts- und Rückwärtsmessung) und Temperatur sowie mit den Störmeldungen Leckagedetektion und Rückflussmeldung an eine DSGVO-konforme Plattform zu übermitteln. Ein zweiter Lösungsansatz verfolgt die Auslesung der Zähler über ein Drive-By-Verfahren, wobei geeignete Gateways auf den städtischen Fahrzeugen der Abfallwirtschaft installiert werden. Die Erfolgsquote im Drive-By-Verfahren liegt trotz möglicher Verschattungseffekte bei über 98%, wobei Ablesefehler und Nachbearbeitung der Ablesewerte ausgeschlossen sind. Gleichzeitig können mit den eingehenden Fehlermeldungen unmittelbar betriebliche Handlungen eingeleitet werden. Die Erfolgsquote im LoRaWAN-Netz liegt nur geringfügig unter dem Drive-By-Verfahren.

Aus Qualitätsgesichtspunkten verbessern Funkwasserzähler das betriebliche Wissen in vielfältiger Form. Mit der Übermittlung eines Temperaturwerts in den Hausinstallationen können Rückschlüsse auf erhöhte Temperaturen in bestimmten Netzbereichen getroffen werden. Insbesondere durch den fortschreitenden Fernwärmeausbau, geringeren Überdeckungen durch Koordinationskonflikte im begrenzten Straßenraum und veränderten Abnahme- und Durchflussbedingungen durch städtebaulichen Fortschritt sind diese Informationen für eine Optimierung des Netzbetriebs von wichtiger Bedeutung. Des Weiteren lassen sich mit der Leckageortungsfunktion der Hauswasserzähler die betroffenen Bereiche sehr schnell eingrenzen und Wasserverluste frühzeitig beheben, was sowohl aus wirtschaftlichen als auch ökologisch-nachhaltigen Aspekten sehr wertvoll ist.

Die Rückflussmeldung ist zur Vermeidung von hygienisch bedenklichen Rückflusssituationen von Hausanschlussleitungen in das öffentliche

Trinkwassernetz von besonderer Relevanz. Bei der Überprüfung konnten zahlreiche Verstöße gegen die allgemeinen Anschlussbedingungen aufgedeckt und zur Behebung aufgefordert werden.

Insgesamt vereinen Funkwasserzähler zahlreiche Vorteile gegenüber herkömmlichen Wasserzählern. Die gesammelten Erfahrungen der badenovaNETZE und weiterer Wasserversorgungsunternehmen zeigen vielfältige Potenziale, welche in technischer, wirtschaftlicher und ökologischer Hinsicht positiv wirken und gleichzeitig auch die Erfüllung der hygienischen Anforderungen an eine öffentliche Trinkwasserversorgung unterstützen.