

ARZNEIMITTEL IN GEWÄSSERN

MASSNAHMEN AN WEITEREN ARA NOTWENDIG

Diclofenac, Azithromycin und Clarithromycin gelangen mit dem gereinigten Abwasser in die Fließgewässer. Vor allem Diclofenac überschreitet dort häufig seinen Gewässergrenzwert. ARA mit einer MV-Stufe reduzieren diese Einträge deutlich. Das laufende ARA-Ausbauprogramm (2016) halbiert die Fließgewässerstrecke mit Grenzwertüberschreitungen. Massnahmen an weiteren ARA sind jedoch notwendig, um auch die verbleibende Fließgewässerstrecke zu entlasten.

Rebekka Gulde, VSA-Plattform «Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen»

Pascal Wunderlin, VSA-Plattform «Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen»

Irene Wittmer; Tobias Doppler, VSA-Plattform «Wasserqualität»

RÉSUMÉ

LES MÉDICAMENTS DÉPASSENT LES VALEURS LIMITES DANS LES EAUX – MESURES NÉCESSAIRES DANS D'AUTRES STEP

Depuis 2016, des STEP sélectionnées ont mis en place une étape de traitement supplémentaire pour l'élimination de micropolluants (MP). Depuis 2020, des valeurs limites dans les eaux sont en vigueur en Suisse pour des MP présents dans les eaux usées et donc aussi pour les médicaments que sont l'azithromycine, la clarithromycine et le diclofénac. Ce dernier en particulier dépasse souvent sa valeur limite dans les cours d'eau (à partir d'une proportion d'eaux usées de 2%). Il n'y a pas ou moins de dépassement avec une étape MP. Lorsque les proportions d'eaux usées sont élevées, il est toutefois nécessaire de recourir à des procédures supplémentaires. L'actuel programme de développement des STEP (2016) divise par deux les sections des cours d'eau qui dépassent les valeurs limites. Pour les sections restantes, des mesures sont nécessaires au niveau d'autres STEP. Sont concernées env. 200 STEP avec > 1000 et env. 90 STEP avec < 1000 personnes raccordées. Pour près de 60 STEP, les mesures à prendre ne peuvent pas être définies. Avec la motion 20.4262, le Conseil fédéral a été chargé d'adapter l'OEaux pour que toutes les STEP dont les évacuations entraînent des dépassements des valeurs limites soient tenues d'éliminer les MP.

EINLEITUNG

ARA-AUSBAU IST IN VOLLEM GANGE

Rund acht Jahre nach Inkrafttreten der gesetzlichen Grundlagen verfügen bereits über 20 Schweizer Abwasserreinigungsanlagen (ARA) über eine Reinigungsstufe zur Elimination von Mikroverunreinigungen (MV-Stufe) [1]. Die MV-Stufen, in denen das Abwasser entweder mit Ozon oder mit Aktivkohle behandelt wird, funktionieren gut und halten in der Regel den gesetzlich geforderten Reinigungseffekt von 80% ein [2]. Dies wird anhand von 12 sogenannten Leitsubstanzen überprüft [3]. Bis 2040 wird in insgesamt rund 120 ARA das Abwasser mit einer solchen MV-Stufe gereinigt. Heute fließen bereits rund 13% des häuslichen Abwassers der Schweiz durch eine MV-Stufe, im Jahre 2040 werden es rund 70% sein. Die MV-Stufen entfernen ein breites Spektrum an Mikroverunreinigungen aus dem Abwasser, entlasten somit die Gewässer und verbessern die Wasserqualität. Der Bund zahlt 75% der Kosten von Massnahmen¹ an jene ARA, welche die folgenden Kriterien erfüllen:

- Zum Schutz der Wasserlebewesen: ARA an Gewässern mit einem Abwasseranteil von mehr als 10%² und mehr als 8000 angeschlossenen Personen. Diese ARA werden durch den Kanton im Rahmen einer Einzugsgebietsplanung verpflichtet.

Kontakt: rebekka.gulde@vsa.ch

- Zur Frachtreduktion: Grosse ARA mit mehr als 80 000 angeschlossenen Personen. Als Oberlieger trägt die Schweiz eine besondere Verantwortung gegenüber flussabwärts liegenden Ländern.
- Zum Schutz der Trinkwasserressourcen: Mittलगrosse ARA mit mehr als 24 000 angeschlossenen Personen im Einzugsgebiet von Seen.

Im Folgenden wird dieses Programm, das seit 2016 gesetzlich verankert ist, als ARA-Ausbauprogramm (2016) bezeichnet.

GEWÄSSERGRENZWERTE FÜR DREI ARZNEIMITTEL

Seit April 2020 sind ökotoxikologisch begründete Grenzwerte für Mikroverunreinigungen in Oberflächengewässern in der Gewässerschutzverordnung festgeschrieben [4]. Die chronischen Grenzwerte für drei Arzneimittel, die aus dem häuslichen Abwasser stammen, sind: 0,019 µg/l für Azithromycin, 0,12 µg/l für Clarithromycin und 0,05 µg/l für Diclofenac. Werden diese Werte überschritten, besteht das Risiko, dass Wasserlebewesen geschädigt werden. Diese Gewässergrenzwerte sind unabhängig von den bisherigen Kriterien des ARA-Ausbauprogramms (2016) einzuhalten, was zusätzliche Anforderungen an die ARA stellt.

Wie es diesbezüglich aktuell und nach Umsetzung des ARA-Ausbauprogramms (2016) aussieht, haben die beiden VSA-Plattformen «Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen» und «Wasserqualität» analysiert. Dazu werteten sie Gewässer- und ARA-Messungen aus und führten eine GIS- und Stoffflussmodellierung durch. Die Ergebnisse dieser Analysen werden im Folgenden präsentiert.

DICLOFENAC VERURSACHT DIE MEISTEN ÜBERSCHREITUNGEN

Bund und Kantone überprüfen, ob die drei Arzneimittel ihre Grenzwerte im Gewässer überschreiten. Im Jahre 2022 wurden hierfür u. a. 431 Zweiwochenmischproben

¹ Massnahmen zur Elimination von Mikroverunreinigungen auf ARA können neben dem Bau einer MV-Stufe auch der Anschluss einer ARA an eine andere ARA sein. Dies ist bis 2040 für rund 15 ARA geplant. Insgesamt treffen also im Rahmen des ARA-Ausbauprogramms (2016) rund 135 ARA Massnahmen.

² Die 10% beziehen sich auf den Anteil des bezüglich organischer Spurenstoffe ungereinigten Abwassers am Minimalabfluss (Q_{347}) des Gewässers [5].

MESSUNG VON MIKROVERUNREINIGUNGEN IN FLIESSGEWÄSSERN

Bund und Kantone überprüfen regelmässig die Qualität der Schweizer Fließgewässer, u. a. im Rahmen des nationalen Dauermonitorings NAWA TREND [6]. Dieses erfasst neben Nährstoffen und biologischen Parametern seit 2018 auch Mikroverunreinigungen [7]. Die Messdaten von 19 Fließgewässern, die gereinigtes Abwasser enthalten, wurden für den vorliegenden Artikel ausgewertet. An diesen Standorten nehmen die Kantone meist ganzjährig Zweiwochenmischproben. Die Messdaten stammen von NAWA TREND für Aare, Birs, Boiron de Morges, Furtbach, Glatt (Zürich), Landgraben, Mönchaltorfer Aa, Rhein, Rhône, Thur (Andelfingen), Urtenen, Vedeggio, Venoge, vom Kanton St. Gallen für Glatt (Thur), Rheintaler Binnenkanal, Thur (Niederbüren) und vom Kanton Waadt für Aubonne, Broye, Thièle.

Box 1

aus 19 Fließgewässern untersucht, die gereinigtes Abwasser enthalten (siehe Box 1). In 159 Proben traten Überschreitungen von mindestens einem der drei Arzneimittel auf. Während Clarithromycin nur in einer dieser Probe über seinem Grenzwert lag, überschritt Diclofenac in 98% dieser Proben seinen Grenzwert. In den restlichen 2% der Proben verursachte einzig Azithromycin eine Grenzwertüberschreitung. Azithromycin überschritt zudem in weiteren 22% der Proben den Grenzwert, in denen es Diclofenac auch tat. Es ist zu beobachten, dass Azithromycin den Grenzwert meist in den Fließgewässern überschreitet, in denen die Diclofenac-Konzentration dauerhaft über dem Grenzwert liegt. Da also das grösste Risiko für Wasserlebewesen von Diclofenac ausgeht, fokussiert der Artikel auf diesen Stoff.

GEWÄSSERMESSUNGEN – WAS IST ZU BEACHTEN?

Für 19 ausgewählte Schweizer Fließgewässer (siehe Box 1) wurden die zeitlichen Verläufe der Diclofenac-Konzentrationen im Vergleich zu den Abwasseranteilen ausgewertet. Figur 1 zeigt zehn charakteristische Beispiele. Die anderen neun Fließgewässer sind nicht dargestellt, bestätigen aber die folgenden Beobachtungen.

DICLOFENAC-KONZENTRATION

Für die Interpretation der Diclofenac-Konzentrationen müssen folgende Aspekte beachtet werden:

- Die Diclofenac-Konzentrationen im Gewässer schwanken. Das ist hauptsächlich auf den Gewässerabfluss zurückzuführen. Die Diclofenac-Frachten aus ARA sind hingegen relativ konstant. Bei geringem Gewässerabfluss sind die Konzentrationen somit am höchsten (siehe Trockenperiode Ende 2018 in Figur 1).

- Sonnenlicht baut Diclofenac im Gewässer ab. Das ist vor allem in Seen mit langer Aufenthaltszeiten relevant. Im Auslauf solcher Seen ist die Diclofenac-Konzentration daher sehr gering oder gar nicht mehr nachweisbar [8, 9]. Entsprechend wirkt sich die Diclofenac-Fracht von ARA vor Seen kaum auf die Flussabschnitte nach Seen aus. Von den 19 untersuchten Fließgewässern trifft dies auf Rhein, Aare und Glatt (Zürich) zu.

- Auch in Fließgewässern, in denen das Abwasser eine lange Fließstrecke zurücklegt, kann der Photoabbau die Diclofenac-Konzentration im Sommer senken. Das ist beispielsweise im Rhein oder in der Aare gut sichtbar (Fig. 1). Der Photoabbau hängt jedoch von verschiedenen Faktoren ab, wie Beschattung, Tiefe oder Trübung des Flusses sowie von der effektiven Sonneneinstrahlung. In den grösseren Fließgewässern, in denen der Photoabbau entlang der Fließstrecke relevant sein kann, ist das von Diclofenac ausgehende Risiko im Winter am kritischsten einzustufen. Denn in dieser Zeit ist einerseits die Sonneneinstrahlung gering und baut daher Diclofenac kaum ab. Andererseits führen viele grössere Fließgewässer gerade im Winter wenig Wasser.

- Der Gewässergrenzwert muss ganzjährig bei jeder Wasserführung eingehalten werden, also auch in abflussschwachen Zeiten. Ausgenommen sind allerdings seltene Niederwasserereignisse [4]. Die Überwachung der chronischen Grenzwerte erfolgt anhand von Zweiwochenmischproben.

ABWASSERANTEIL

Bei der Interpretation der ermittelten Abwasseranteile müssen die nachfolgenden Punkte beachtet werden:

– Der Abwasseranteil³ wird für den sogenannten Minimalabfluss Q_{347} berechnet [10]. Der Q_{347} spiegelt kritische, abfluss-

schwache Zeiten wider, ohne auf Extremjahre zu fokussieren [11]. Damit erfüllt er die Anforderungen an die minimale

Wasserführung, bei der die Grenzwerte im Gewässer noch eingehalten werden müssen. Der Q_{347} ist definiert als der Gewässerabfluss, der, gemittelt über zehn Jahre, durchschnittlich während 347 Tagen des Jahres erreicht oder überschritten wird. An Flüssen mit Abflussmessungen kann der Q_{347} und damit auch der Anteil des gereinigten Abwassers relativ genau bestimmt werden [12–14]. Für die verbleibenden Fliessgewässer wurde der Q_{347} von den Kantonen oder vom Bund abgeschätzt [15], was die Werte unsicherer macht. In diesen Fällen ist der daraus berechnete Abwasseranteil als Bereich angegeben. Dies betrifft in *Figur 1* – der Abwasseranteil ist darin jeweils unter A aufgeführt – nur die Glatt (Thur).

- Für Rhein, Aare und Glatt (Zürich) wurde auch der Abwasseranteil berechnet, der nur von Abwässern aus ARA unterhalb von Seen stammt (aufgeführt unter B in *Figur 1*). Dies, weil der Photoabbau von Diclofenac dazu führt, dass die Ablaufkonzentrationen von Seen nur sehr gering sind. Für Clarithromycin und Azithromycin ist dieser nicht relevant.
- Für Fliessgewässer, in deren Einzugsgebiet ARA mit MV-Stufe vorkommen, wurde auch der sogenannte MV-ungereinigte Abwasseranteil berechnet (aufgeführt unter C in *Figur 1*), dies jeweils ab dem Jahr der Inbetriebnahme der MV-Stufe (oranjer Pfeil in *Figur 1*). Mit diesem effektiven Abwasseranteil korreliert die Diclofenac-Konzentration. Bei Rhein, Aare und Glatt (Zürich), in deren Einzugsgebiet Seen liegen, wird zusätzlich nur das Abwasser nach Seen berücksichtigt.

ÜBERSCHREITUNGEN NEHMEN MIT ABWASSERANTEIL ZU

Diclofenac überschreitet seinen Grenzwert in fast allen der 19 untersuchten Fliessgewässer, die häusliches Abwasser enthalten. Dabei nimmt die Anzahl und die Höhe der Überschreitungen mit zunehmendem Abwasseranteil zu (*Fig. 1*):

- In der Rhône mit einem Abwasseranteil von 2% sowie in der Thièle mit einem Abwasseranteil von 1–5% (in *Figur 1* nicht dargestellt) treten keine Über-

³ Das Abwasservolumen wurde über die Anzahl der im Einzugsgebiet an den ARA angeschlossenen Personen und einem spezifischen Abwasservolumen von 375l/Person/Tag berechnet [11].

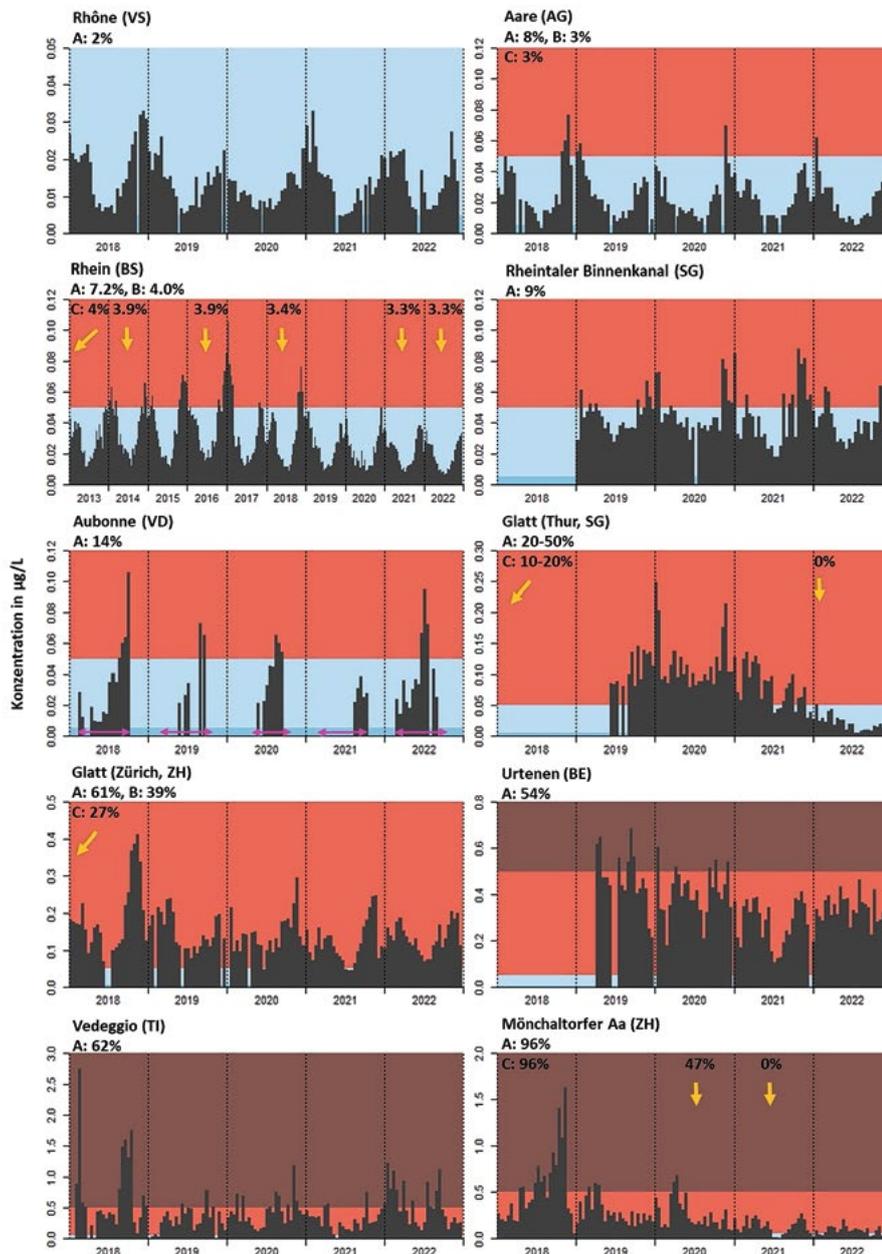


Fig. 1 Gemessene Konzentrationsverläufe von Diclofenac in 10 ausgewählten Fliessgewässern. Die Hintergrundfarben zeigen den Konzentrationsbereich im Vergleich zum Grenzwert auf. Blau bedeutet unter dem Grenzwert und dunkelblau sogar zehnfach darunter. Rot bedeutet über dem Grenzwert und dunkelrot sogar zehnfach darüber. A: Abwasseranteil; B: Abwasseranteil unterhalb von Seen; C: effektiver Abwasseranteil ohne gereinigtes Abwasser, das durch MV-Stufen (und allenfalls zusätzlich durch Seen) fließt. Der orange Pfeil kennzeichnet das Jahr der Inbetriebnahme einer oder mehrerer MV-Stufe(n) im jeweiligen Einzugsgebiet. In den meisten Fliessgewässern wurde ganzjährig (mit einzelnen fehlenden Messungen) seit Anfang 2018 gemessen. Abweichender Messbeginn: Rhein: Anfang 2013; Rheintaler Binnenkanal: Anfang 2019; Glatt (Thur): Mitte 2019; Urtenen: Mitte 2019. Die Aubonne wurde nicht ganzjährig, sondern nur in den Sommermonaten beprobt (siehe horizontale Pfeile in Pink). Lediglich in der Aubonne lag die Diclofenac-Konzentration zeitweise unter der Bestimmungsgrenze von rund 0,02 µg/l; solche Messungen sind nicht dargestellt.

schreitungen auf. Dies zum einen, weil der Abwasseranteil in den Gewässern gering ist, und zum anderen, weil in der Westschweiz tendenziell weniger Diclofenac pro Person konsumiert wird [3, 11].

- Einzelne Überschreitungen pro Jahr treten in Aare und Rhein auf, wo der effektive Abwasseranteil 3–4% beträgt.
- Ab einem Abwasseranteil von 10% kann es jährlich zu mehrfachen und anhaltenden Überschreitungen kommen. Beispiele sind: Rheintaler Binnenkanal, Aubonne und Glatt (Thur) sowie Birs, Thur (Andelfingen), Thur (Niederbüren) und Venoge (in *Figur 1* nicht dargestellt).
- Ab einem Abwasseranteil von 20% treten dauerhafte Überschreitungen auf, beispielsweise in der Glatt (Zürich).
- Ab einem Abwasseranteil von 50% sind die dauerhaften Überschreitungen sehr hoch mit Konzentrationen, die zehnfach über dem Grenzwert liegen. Davon betroffen sind oder waren Urtenen, Vedeggio und Mönchaltorfer Aa sowie Landgraben und Furtbach (in *Figur 1* nicht gezeigt).

WENIGER ÜBERSCHREITUNGEN DANK MV-STUFEN

Die gereinigten Abwässer von ARA mit einer MV-Stufe führen zu deutlich weniger bis keinen Überschreitungen. *Figur 1* zeigt die Verbesserungen in Rhein, Glatt (Thur) und Mönchaltorfer Aa. Die orangenen Pfeile kennzeichnen das Jahr der Inbetriebnahme der MV-Stufe im jeweiligen Einzugsgebiet.

RHEIN BEI BASEL

Der Rhein bei Basel enthält – mit seinem grossen Einzugsgebiet – das gereinigte Abwasser von rund drei Vierteln der Schweizer Bevölkerung. Im Jahr 2023 reinigten 17 Schweizer ARA mit einer MV-Stufe das häusliche Abwasser von 1,1 Millionen Personen im Rheineinzugsgebiet (nach Seen waren es 10 ARA mit MV-Stufe, die das Abwasser von 775 000 Personen behandelten). Seit vier Jahren treten im Rhein bei Basel keine Überschreitungen des Diclofenac-Grenzwertes mehr auf.

BEISPIEL GLATT (THUR)

Von dem häuslichen Abwasser, das in die Glatt (Thur) eingeleitet wird, reinigt die Aktivkohlestufe der ARA Herisau seit 2015 rund ein Drittel. Da zum Zeitpunkt

der Inbetriebnahme noch keine vergleichbaren Gewässermessungen durchgeführt wurden, lässt sich rückblickend die Verbesserung der Gewässerqualität nicht darstellen. Das restliche Abwasser der Glatt (Thur) wird in der Aktivkohlestufe der ARA Oberglatt in Flawil behandelt, die seit Anfang 2022 im optimierten Betrieb läuft. Seither ist die Diclofenac-Konzentration im Gewässer deutlich zurückgegangen. Wo zuvor wegen eines hohen Abwasseranteils von 20–50% der Diclofenac-Grenzwert dauerhaft überschritten wurde, kam es 2022 nur noch zu einer Überschreitung pro Jahr. Überschreitungen sind weiterhin möglich, weil Aktivkohleverfahren Diclofenac nicht vollständig aus dem Abwasser entfernen.⁴

MÖNCHALTORFER AA

Ein ähnliches Bild zeigt sich in der Mönchaltorfer Aa. Seit Sommer 2021 reinigen die Aktivkohlestufen der ARA Egg-Oetwil (2020) und der ARA Gossau (2021) sämtliches Abwasser, das in die Aa eingeleitet wird. Die Diclofenac-Konzentrationen in der Mönchaltorfer Aa gingen deutlich zurück. Trotz des hohen Abwasseranteils von 96% lagen die

⁴ Aktivkohleanlagen entfernen Diclofenac aktuell zu rund 85%, während Ozonanlagen Diclofenac zu 99% eliminieren [3]. Doch nicht jedes Abwasser ist für eine Ozonung geeignet [16, 17].

Diclofenac-Konzentrationen 2021 erstmals für ein Fünftel des Jahres unterhalb des Grenzwerts.

Die letzten beiden Beispiele zeigen: Bei einem hohen Abwasseranteil braucht es Verfahren bzw. Betriebsweisen, die Diclofenac sehr gut entfernen. Ansonsten kann es trotz ARA-Ausbau weiterhin zu Überschreitungen der Grenzwerte im Gewässer kommen.

ÜBERSCHREITUNGEN AB EINEM ABWASSERANTEIL VON 2%

Im Rahmen des ARA-Ausbauprogramms (2016) müssen ARA mit mehr als 8000 angeschlossenen Personen Massnahmen treffen, die im Gewässer zu einem Abwasseranteil von über 10%² führen. Die Situationen von Aare, Rhein und Rheintaler Binnenkanal (*Fig. 1*) zeigen, dass Überschreitungen auch in Fließgewässern mit einem Abwasseranteil von weniger als 10% auftreten. Es stellt sich somit die Frage: Ab welchem Abwasseranteil überschreiten Diclofenac, Clarithromycin und Azithromycin ihre Grenzwerte?

Diese Frage kann nicht mit den Messdaten der untersuchten Fließgewässer beantwortet werden, weil es dafür Daten von mehreren Fließgewässern mit geringem Abwasseranteil bräuchte. Stattdessen wurden Konzentrationsmessungen der drei Arzneimittel im Ablauf von ARA

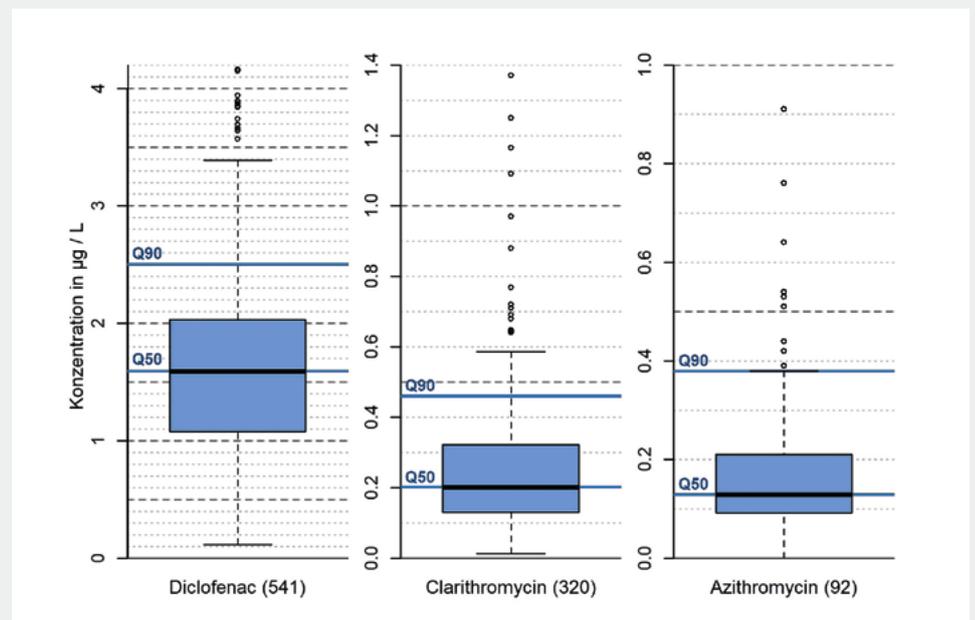


Fig. 2 Konzentrationen im Ablauf von ARA ohne MV-Stufe für Diclofenac, Clarithromycin und Azithromycin (Anzahl Messungen in Klammern). Die Boxplots repräsentieren den Median (schwarze, dicke Linie), das 25%- und 75%-Perzentile (Box), die minimalen und maximalen Werte (Whiskers) sowie die statistischen Ausreisser (Kreise). Die blauen Linien stellen den Median (Q50) und das 90%-Quantil (Q90) dar. Details zur Herkunft der Konzentrationsdaten in [11].

	Diclofenac		Clarithromycin		Azithromycin	
	50%-Quantil	90%-Quantil	50%-Quantil	90%-Quantil	50%-Quantil	90%-Quantil
Konzentration ARA-Ablauf [$\mu\text{g}/\text{l}$]	1,6	2,5	0,20	0,46	0,13	0,38
Grenzwert im Gewässer [$\mu\text{g}/\text{l}$]	0,05		0,12		0,019	
Errechneter Abwasseranteil [%]	3,1	2,0	60	26	15	5,0

Tab. 1 Konzentrationen der drei Arzneimittel Diclofenac, Clarithromycin und Azithromycin im Ablauf von ARA ohne MV-Stufe im Vergleich zu den jeweiligen chronischen Gewässergrenzwerten. Zudem sind die errechneten Abwasseranteile aufgeführt, ab denen Überschreitungen zu erwarten sind. Angegeben ist jeweils die Situation für das 50%-Quantil sowie das 90%-Quantil.

ohne MV-Stufe betrachtet (Fig. 2). Die höchsten Konzentrationen wies Diclofenac auf. Sie lagen rund eine Grössenordnung über denjenigen von Clarithromycin und Azithromycin. Die ARA-Ablaufkonzentrationen aller drei Arzneimittel wiesen eine gewisse Schwankungsbreite auf. Diese kommt beispielsweise durch Verdünnung bei Regenwetter, durch Verdünnung mit Fremdwasser oder durch regionale Unterschiede im Konsumverhalten [3, 11] zustande. Die Variabilität wurde berücksichtigt, indem der mittlere Wert der Daten (Median, 50%-Quantil) und das 90%-Quantil bestimmt wurden (Fig. 2, Tab. 1). Letzteres gibt an, welchen Wert die unteren 90% der Daten nicht überschreiten. Mit der Verwendung des 90%-Quantils werden die meisten Fälle identifiziert, bei denen ein ökotoxikologisches Risiko für Wasserlebewesen besteht, ohne jedoch Extremsituationen einzubeziehen.

Der Abwasseranteil, ab dem im Gewässer Überschreitungen zu erwarten sind, errechnet sich jeweils aus dem Gewässergrenzwert und der Konzentration der betrachteten Mikroverunreinigungen im ARA-Ablauf (Tab. 1). Die Hochrechnungen ergaben, dass Diclofenac seinen Grenzwert bereits ab einem Abwasseranteil von 2% überschreiten kann. Für Azithromycin⁵ gilt das ab einem Abwasseranteil von 5% und für Clarithromycin ab 26% (Tab. 1). Werden diese Hochrechnungen mit den Gewässermessungen (Fig. 1) verglichen, zeigt sich, dass sie

⁵ Die Aussage zu Azithromycin basiert auf einer beschränkten Anzahl verfügbarer Konzentrationsdaten im Abwasser. Die Datengrundlage zur Elimination von Azithromycin in MV-Stufen ist nicht solide, deutet aber daraufhin, dass Azithromycin in Ozonungen [18] mit einer Eliminationsrate von rund 90% besser entfernt wird als in Aktivkohlestufen [19]. Bei hohem Abwasseranteil könnte es trotz MV-Stufe noch zu Überschreitungen kommen.

für Diclofenac gut passen. Denn die ersten Überschreitungen sind in Aare und Rhein ab einem effektiven Abwasseranteil von 3–4% zu sehen. Für Azithromycin und Clarithromycin scheinen die Hochrechnungen zu pessimistisch zu sein, denn für Azithromycin sind Überschreitungen erst in Fließgewässern mit einem Abwasseranteil von > 10% zu beobachten. Für Clarithromycin wurde nur eine Überschreitung im Landgraben mit einem Abwasseranteil von > 50% gemessen.

ARA-AUSBAU HALBIERT FLIESSSTRECKE MIT ÜBERSCHREITUNGEN

Die Schweizer Fließgewässer enthalten auf einer Fließstrecke von rund 5000 km

gereinigtes Abwasser (Fig. 3). Im Rahmen einer GIS-Analyse wurde der Abwasseranteil dieser Fließstrecke bei Q_{347} berechnet. Ein Abwasseranteil von > 2% wird für rund 3000 km vorausgesagt. Das heisst, dass auf diesen 3000 km Grenzwertüberschreitungen zu erwarten sind, wenn keine ARA Mikroverunreinigungen aus dem Abwasser entfernen würden. Laut GIS-Analyse wird das laufende ARA-Ausbauprogramm (2016) diese Situation deutlich verbessern, indem es die Fließgewässerstrecke mit Überschreitungen halbiert. Genauer gesagt, senkt der ARA-Ausbau (2016) auf 1300 km den Abwasseranteil auf < 2% (gelb in Figur 3). Weitere Massnahmen an ARA sind notwendig, um auch die verbleibenden 1700 km, für die noch Überschreitungen erwartet werden, zu entlasten (violett in Figur 3).

MASSNAHMEN AN WEITEREN ARA NOTWENDIG

Um abzuschätzen, wie viele weitere ARA ergänzend zum ARA-Ausbauprogramm (2016) Massnahmen treffen müssten, wurde eine schweizweite Stoffflussmodellierung durchgeführt (siehe Box 2). Diese berechnet u. a., welche ARA im Gewässer zu einem Abwasseran-

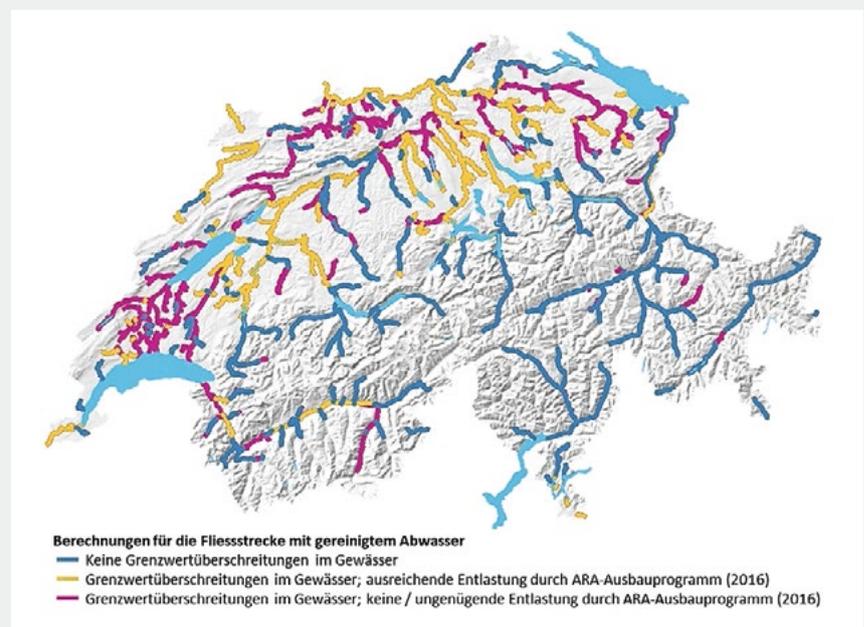


Fig. 3 Fließstrecke mit gereinigtem Abwasser (Quelle: Bundesamt für Landestopografie). Die zugrunde liegende GIS-Analyse stützt sich auf folgende Berechnungen: Das Abwasser von allen ARA wurde den flussabwärts folgenden Gewässerabschnitten zugewiesen. Der Abwasseranteil wurde berechnet anhand der Anzahl angeschlossener Personen, einer durchschnittlichen Abwassermenge von 375 l/Person/Tag und anhand des Minimalabflusses Q_{347} der jeweiligen Gewässerabschnitte. Gezählt wurde die Fließstrecke mit einem Abwasseranteil > 2% [11].

DETAILLIERTE INFORMATIONEN ZUR STOFFFLUSSMODELLIERUNG

Die im Kapitel «Massnahmen an weiteren ARA notwendig» erwähnte Stoffflussmodellierung wird in dieser Box detailliert beschrieben. Ziel der Modellierung war, schweizweit die Anzahl an ARA abzuschätzen, die auch nach dem ARA-Ausbauprogramm (2016) noch zu Überschreitungen des Gewässergrenzwertes führen. Welche ARA im Einzelnen Massnahmen treffen müssen, legen die kantonalen Behörden im Rahmen einer detaillierten Betrachtung fest.

Verwendetes Modell

Das verwendete Stoffflussmodell berechnet im Gewässer nach jeder Schweizer ARA den Abwasseranteil sowie die erwarteten Frachten und Konzentrationen ausgewählter Mikroverunreinigungen bei Minimalabfluss Q_{347} [15, 20]. Es basiert auf dem von Ort *et al.* entwickelten Modell [20-23], wurde für diese Arbeiten weiterentwickelt, ist frei verfügbar [11, 24] und kann beispielsweise von den kantonalen Behörden für ihre Planung verfeinert werden. Es berücksichtigt sämtliche 649 Schweizer ARA mit mehr als 200 angeschlossenen Personen und beachtet die Topologie der ARA entlang der Gewässer. Es berücksichtigt die derzeitigen Bedingungen in Bezug auf den Diclofenac-Konsum und den Minimalabfluss (Q_{347}).

Berechnung des Abwasseranteils

Der Abwasseranteil berechnet sich aus der Anzahl angeschlossener Personen pro ARA und einer typischen Abwassermenge von 375 l/Person/Tag [11, 25]. Lediglich das Abwasser von ARA ohne MV-Stufe floss in die Berechnung des Abwasseranteils ein. Das Abwasser von rund 120 ARA mit MV-Stufe, die im Rahmen des ARA-Ausbauprogramms (2016) verpflichtet wurden, Massnahmen zu ergreifen, wurde entsprechend nicht miteinbezogen.

Mit diesem Ansatz wurden folgende Resultate erhalten: 246 bis 291 weitere ARA führen im Einleitgewässer zu einem Abwasseranteil von > 3% (50%-Quantil) respektive > 2% (90%-Quantil). Bei weiteren 59 ARA war kein Wert für den Minimalabfluss Q_{347} verfügbar. Szenarien mit verschiedenen Quantilen wurden berechnet, da die zugrunde liegenden Konzentrationsmessungen variieren (siehe Kapitel «Überschreitungen ab einem Abwasseranteil von 2%»). Das 90%-Quantil identifiziert die meisten Fälle, bei denen ein ökotoxikologisches Risiko für Wasserlebewesen besteht, ohne jedoch Extremsituationen einzubeziehen. Deshalb werden im Haupttext die Ergebnisse dieses Szenarios verwendet.

Berechnung der Diclofenac-Konzentration und Unterschiede zum Abwasseranteil-Ansatz

Die Diclofenac-Konzentration im Gewässer wurde analog zum Abwasseranteil aus einer schweizweiten Diclofenac-Fracht im

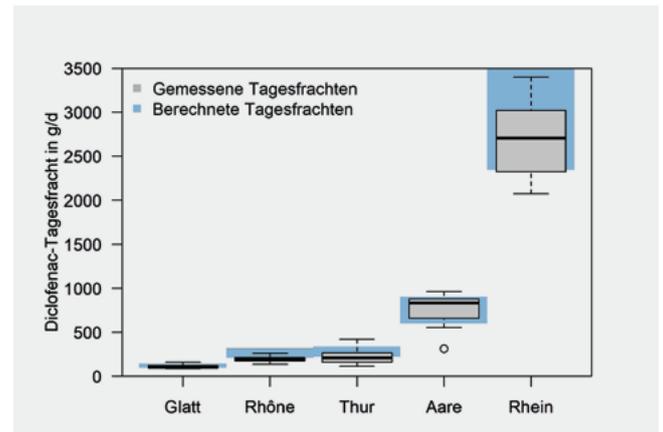


Fig. 4 Diclofenac-Tagesfrachten in den Wintermonaten des Jahres 2019. Messdaten (graue Boxplots) im Vergleich zu den Modellvorhersagen (blau). Der untere blaue Rand ist die vorhergesagte Fracht des 50%-Quantils. Der obere blaue Rand ergibt sich aus der Verwendung des 90%-Quantils. Die grauen Boxplots repräsentieren den Median (schwarze, dicke Linie), das 25%- und 75%-Perzentile (Box), die minimalen und maximalen Werte (Whiskers) sowie die statistischen Ausreisser (Kreise). [11]

ARA-Auslauf von 600 $\mu\text{g}/\text{Person}/\text{Tag}$ (50%-Quantil) beziehungsweise von 900 $\mu\text{g}/\text{Person}/\text{Tag}$ (90%-Quantil) berechnet.

Die nachfolgenden Punkte unterscheiden sich vom Ansatz der Berechnung des Abwasseranteils:

- MV-Stufen entfernen Diclofenac nicht vollständig. Das Modell rechnet mit einer Elimination von 85% durch Aktivkohleanlagen und 99% durch Ozonungen. Bei ARA, die ihr Verfahren noch nicht gewählt haben, rechnet das Modell mit einer Ozonung⁴.
- Das Modell berücksichtigt den Photoabbau von Diclofenac in Fliessgewässern nicht, aber in Seen. Dies, indem der modellierte Auslauf von Seen kein Diclofenac mehr enthält.

So ergab sich Folgendes: Die modellierten Diclofenac-Konzentrationen zeigten, dass 238 (50%-Quantil) bis 274 (90%-Quantil) ARA zu Überschreitungen des Gewässergrenzwertes führen. Auch hier konnten für 59 ARA ohne Q_{347} -Werte keine Berechnungen gemacht werden. Der im Vergleich zur Berechnung über den Abwasseranteil resultierende Unterschied ist gering und begründet sich hauptsächlich durch den Photoabbau von Diclofenac in Seen.

Modellvorhersage und Messungen stimmen überein

Die Modellvorhersage stimmt gut überein mit den gemessenen Diclofenac-Tagesfrachten in den Wintermonaten 2019 an den Flüssen Glatt (Zürich), Rhône, Thur (Andelfingen), Aare und Rhein (Fig. 4).

Box 2

teil von > 2% bei Q_{347} führen. Betroffen sind rund 200 ARA mit mehr als 1000 angeschlossenen Personen und rund 90 ARA, an denen jeweils weniger als 1000 Personen angeschlossen sind. Bei rund 60 ARA kann aufgrund fehlender

Q_{347} -Werte der Handlungsbedarf nicht bestimmt werden. Insgesamt und im Gegensatz zum ARA-Ausbauprogramm (2016) sind über drei Viertel der betroffenen ARA klein, d. h., sie haben weniger als 8000 angeschlossene Personen.

Mehr als die Hälfte der betroffenen ARA weisen an ihrer Einleitstelle im Gewässer einen Abwasseranteil von > 10% auf. Sie wurden bisher nicht verpflichtet, da das > 10%-Abwasseranteil-Kriterium erst ab 8000 angeschlossenen Personen

DANKSAGUNG

Ein grosses Dankeschön geht an die kantonalen Fachstellen, das BAFU und an die Eawag für das Zurverfügungstellen ihrer Messdaten. Dies sind: Messdaten von Mikroverunreinigungen im Gewässer und im Abfluss von ARA sowie Abflussdaten der Fließgewässer. Für die wertvollen Diskussionen und Rückmeldungen zu diesem Artikel bedanken wir uns herzlichst bei *D. Dominguez, S. Zimmermann-Stefens, F. Soltermann, A. Hofacker, U. Schönenberger* (alle BAFU), *R. Manser* (AWA Bern), *A. Joss* (Eawag), *E. Durisch, C. Götz* (beide Awel Zürich) und *C.-A. Jaquerod* (DGE Vaud). Das Projekt wurde vom BAFU finanziell unterstützt.

gilt. Diese ARA verursachen vermutlich mehrfache bis dauerhafte Überschreitungen der Gewässergrenzwerte.

BUND PASST GESETZLICHE GRUNDLAGEN AN

Der Bundesrat wurde mit der Motion 20.4262 vom Parlament beauftragt, die Vorschriften in der Gewässerschutzverordnung so anzupassen, dass alle ARA, deren Ausleitungen Grenzwertüberschreitungen zur Folge haben, Massnahmen zur Elimination von Mikroverunreinigungen umsetzen müssen.

DAS WICHTIGSTE IN KÜRZE

- Das seit 2016 laufende ARA-Ausbauprogramm ist in vollem Gange. Bis 2040 werden rund 120 ARA ihr Abwasser mit einer MV-Stufe behandeln.
- Seit 2020 gelten für drei aus dem häuslichen Abwasser stammende Arzneimittel, Azithromycin, Clarithromycin und Diclofenac, Grenzwerte für Oberflächengewässer.
- Messungen zeigen, dass Fließgewässer, die gereinigtes Abwasser enthalten, diese Grenzwerte häufig überschreiten. Diclofenac verursacht die meisten Überschreitungen und stellt damit das grösste ökotoxikologische Risiko für Wasserlebewesen dar. Anzahl und Höhe der Überschreitungen nehmen mit dem Abwasseranteil zu.

Ab einem Abwasseranteil von 2% sind Überschreitungen zu erwarten.

- Die gereinigten Abwässer von ARA mit einer MV-Stufe führen zu deutlich weniger bis keinen Überschreitungen im Gewässer. Allerdings braucht es bei hohen Abwasseranteilen Verfahren bzw. Betriebsweisen mit einer sehr guten Elimination von Diclofenac.
- Das laufende ARA-Ausbauprogramm (2016) halbiert die Fließgewässerstrecke, die ursprünglich Überschreitungen aufwies.
- Um die restliche Fließstrecke zu entlasten, sind Massnahmen an weiteren ARA notwendig. Betroffen sind rund 200 ARA mit mehr als 1000 angeschlossenen Personen und rund 90 ARA, an denen jeweils weniger als 1000 Personen angeschlossen sind. Bei rund 60 ARA kann aufgrund fehlender $Q_{3,47}$ -Werte der Handlungsbedarf nicht bestimmt werden.
- Der Bundesrat wurde mit der Motion 20.4262 beauftragt, die Gewässerschutzverordnung so anzupassen, dass alle ARA, deren Ausleitungen Grenzwertüberschreitungen zur Folge haben, Massnahmen zur Elimination von Mikroverunreinigungen umsetzen müssen.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] <https://micropoll.ch/ara-ausbau/>
- [2] Brander, A. et al. (2024): *MV-Stufen stabil betreiben – hilfreiche Betriebsparameter*. *Aqua & Gas* 1/2024: 54–61
- [3] Wunderlin, P. et al. (2024): *MV aus dem häuslichen Abwasser entfernen – Erkenntnisse aus sieben Jahren Überprüfung des Reinigungseffekts*. *Aqua & Gas* 1/2024: 46–53
- [4] GSchV vom 28. Oktober 1998, Anhang 2 Ziffer 11 Absatz 3
- [5] GSchV vom 28. Oktober 1998, Anhang 3.1 Ziffer 2
- [6] *Nationale Beobachtung Oberflächengewässerqualität (NAWA)*: <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/wasser/zustand/wasser--messnetze/nationale-beobachtung-oberflaechengewaesserqualitaet--nawa-.html>
- [7] Doppler, T. et al. (2020): *Mikroverunreinigungen im Gewässermonitoring*. *Aqua & Gas* 7/8-2020: 44–53
- [8] Buser, H.-R. et al. (1998): *Occurrence and Fate of the Pharmaceutical Drug Diclofenac in Surface Waters: Rapid Photodegradation in a Lake*. *Environ. Sci. Technol.* 32(22): 3449–3456
- [9] Tixier, C. et al. (2003): *Occurrence and fate of carbamazepine, clofibric acid, diclofenac,*

ibuprofen, ketoprofen, and naproxen in surface waters. *Environ. Sci. Technol.* 37(6): 1061–1068

- [10] Dominguez, D. (2016): *Elimination von organischen Spurenstoffen bei Abwasseranlagen. Finanzierung von Massnahmen*. Bundesamt für Umwelt, Bern, S. 34
- [11] Gulde, R.; Wunderlin, P. (2024): *Grenzwertüberschreitungen im Gewässer mit ARA-Ausbau beiseitigen – Stoffflussanalyse identifiziert betroffene ARA*. VSA, Glattbrugg
- [12] BAFU: <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/wasser/zustand/daten/messwerte-zum-thema-wasser-beziehen/datenservice-hydrologie-fuer-fluessgewaesser-und-seen.html>
- [13] AWA Bern: https://www.bvd.be.ch/de/start/themen/wasser/hydrologische-daten/daten-bezug.html#textimage_1677724525
- [14] AWEL Zürich: <https://www.zh.ch/de/umwelttiere/wasser-gewaesser/messdaten/abfluss-wasserstand.html>
- [15] Staub, E. et al. (2003): *Fischnetz-Publikation: Angelfang, Forellenbestand und Einflussgrößen: Regionalisierte Auswertung mittels GIS*. Buwal/Eawag
- [16] Wunderlin, P. et al. (2015): *Behandelbarkeit von Abwasser mit Ozon: Testverfahren zur Beurteilung*. *Aqua & Gas* 7/8-2015: 28–38
- [17] VSA-Plattform «Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen» (2021): *Betrieb von Ozonanlagen auf ARA: Erkennen von kritischen Entwicklungen im Einzugsgebiet (Empfehlung)*
- [18] Bourgin, M. et al. (2018): *Evaluation of a full-scale wastewater treatment plant upgraded with ozonation and biological post-treatments: Abatement of micropollutants, formation of transformation products and oxidation by-products*. *Water Research* 129: 486–498
- [19] Margot, J. et al. (2013): *Treatment of micropollutants in municipal wastewater: Ozone or powdered activated carbon? Science of the Total Environment* 461: 480–498
- [20] Ort, C. (2007): *Stoffflussmodell «Strategie MicroPoll» Dokumentation*. Eawag.
- [21] Schär, P. (2007): *Projektdokumentation Modellstudie Schweiz (GIS-Teil)*
- [22] Ort, C. (2007): *Mikroverunreinigungen – Nationales Stoffflussmodell*. *gwa* 11/2007: 853–859
- [23] Ort, C. et al. (2009): *Model-based evaluation of reduction strategies for micropollutants from wastewater treatment plants in complex river networks*. *Environ. Sci. Technol.* 43(9): 3214–3220
- [24] <https://github.com/blosloos/SSM/wiki>
- [25] Binggeli, S. (2023): *Kosten und Leistungen der Abwasserentsorgung*. VSA und SVKI, Glattbrugg und Bern