



MIKROVERUNREINIGUNGEN AUS NUTZTIERHALTUNG

Rückstände von Tierarzneimitteln und Bioziden sowie Schwermetalle und natürliche Hormone aus der Nutztierhaltung können über die Ausbringung von Hofdünger und die anschliessende Abschwemmung bei Regen in die Oberflächengewässer gelangen. Die Gesamteinträge von Mikroverunreinigungen aus der Nutztierhaltung sind nach heutigem Wissen tiefer als diejenigen aus der Siedlungsentwässerung. In kleinen Oberflächengewässern in landwirtschaftlichen Gebieten mit hoher Nutztierdichte können aber teilweise ökotoxikologisch wirksame Konzentrationen auftreten.

Christian W. Götz, Envilab AG

MICROPOLLUANTS PROVENANT DE L'ÉLEVAGE ET DE LA GARDE D'ANIMAUX DE RENTE

Les médicaments vétérinaires, biocides, métaux lourds et hormones naturelles utilisés pour la santé et l'hygiène vétérinaire ou introduits dans les fourrages finissent généralement par voie d'excrétion naturelle dans les engrais de ferme, lesquels servent à engraisser nos cultures et nos pâturages, du printemps à l'automne. Par temps de pluie, ces micropolluants contenus dans les engrais et les sols peuvent être libérés, puis emportés par ruissellement superficiel et par drainage, d'où ils gagnent les cours d'eaux. Diverses sources ainsi que des mesures dans les rivières montrent que le taux de transfert du sol aux eaux de surfaces de ces substances d'origine vétérinaires est semblable à celui des produits phytosanitaires comme l'atrazine ou le métolachlor. De simples calculs de modélisation permettent de prédire des concentrations potentiellement néfastes pour les organismes aquatiques, dans le cas de certains biocides, du cuivre, du zinc et des hormones naturelles. En revanche, au-delà d'une dilution de 1:50, les eaux de ruissellement ne risquent vraisemblablement pas de porter atteinte aux organismes aquatiques, même lors d'une exposition à long terme. Il faut une dilution de 1:60 au moins pour que les concentrations estimées en cuivre et en zinc satisfassent aux exigences de l'Ordonnance pour la protection de eaux (OEaux, SR 814.201). Pour les organismes aquatiques, il semble que les hor- ➤

EINLEITUNG

In der Schweiz waren 2011 rund 50 000 Nutztier haltende Betriebe registriert. Der Bestand an Nutztieren teilt sich folgendermassen auf: 1,6 Mio. Rindvieh, davon 700 000 Kühe; 1,5 Mio. Schweine; 9,3 Mio. Hühner, davon 2,4 Mio. Lege- und Zuchthühner; 400 000 Schafe; 86 000 Ziegen und 57 000 Pferde [1]. In der zeitgemässen Nutztierhaltung werden verschiedene Chemikalien zur Sicherstellung der Hygiene und Tiergesundheit eingesetzt. Mengenmässig bedeutend sind Tierarzneimittel (TAM), Biozide und Schwermetalle. TAM dienen der Behandlung kranker Nutz- und Heimtiere und der Vorbeugung von Krankheiten. Biozide werden für die Desinfektion von Ställen und von Gerätschaften wie Melkmaschinen verwendet, und Schwermetalle werden teils als Spurenelemente zugefüttert. Neben den erwünschten Effekten dieser Stoffe können sowohl in den Ausscheidungsprodukten als auch in der Umwelt unerwünschte Wirkungen auftreten. Dazu zählen unter anderen die Beeinflussung der Fermentation von Gülle oder toxische Effekte auf Bodenorganismen [2].

Manche der eingesetzten Stoffe sind schwer abbaubar und wurden in landwirtschaftlichen Böden und in Oberflächengewässern nachgewiesen [3]. Neben den zweckgebunden eingesetzten synthetisch hergestellten Stoffen und Spurenelementen werden durch Nutztiere auch grosse Mengen an natürlichen Hormonen emittiert, welche die Gewässer belasten können [4].

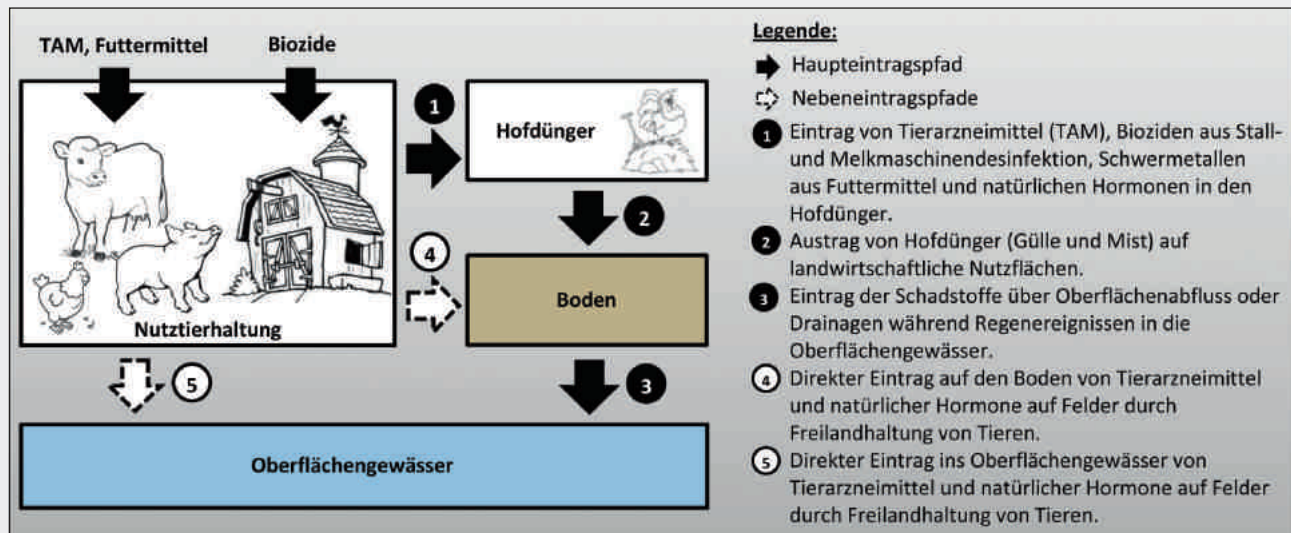


Fig. 1 Eintrag von Mikroverunreinigungen aus der Nutztierhaltung. Beschreibung der Eintragungspfade
Diffusion des micropolluants issus de l'élevage. Description des voies de diffusion

Mikroverunreinigungen aus der Nutztierhaltung gelangen hauptsächlich über den Hofdünger (Gülle, Mist und ähnliche Produkte) auf landwirtschaftliche Nutzflächen und anschliessend während Regenereignissen über Oberflächenabfluss und Drainagen in die Gewässer. Direkte Einträge von TAM und Hormonen auf Grasflächen oder in die Oberflächengewässer treten bei der Weide- und Freilandhaltung von Nutztieren auf, sind aber mengenmässig weniger bedeutsam als die Einträge über den Hofdünger. In *Figur 1* sind die Eintragungspfade in die Oberflächengewässer schematisch abgebildet. Im Weiteren werden nur die Gewässereinträge über den Hofdünger betrachtet.

In diesem Artikel wird eine Situationsanalyse zur Belastung der Oberflächengewässer mit Mikroverunreinigungen aus der Nutztierhaltung vorgestellt. Zuerst wird ein Überblick über Mikroverunreinigungen im Hofdünger gegeben und die Stoffe werden priorisiert. Anhand der relativ gut untersuchten Substanz Sulfamethazin wird eine auf Messdaten basierte Belastungsanalyse durchgeführt. Anschliessend werden Konzentrationen weiterer Substanzen grob abgeschätzt und ökotoxikologisch beurteilt sowie deren Stofffrachten abgeschätzt.

MIKROVERUNREINIGUNGEN IM HOFDÜNGER

Verbrauchszahlen zu Stoffen und Stoffgruppen, die in der Nutztierhaltung eingesetzt werden, sind nur lückenhaft vorhanden. In *Tabelle 1* werden Schätzungen von Verbrauchszahlen sowie Messungen

im Hofdünger für TAM, Biozide, Schwermetalle und natürliche Hormone zusammengetragen und mit anderen massgeblichen Quellen dieser Stoffgruppen verglichen. Die in *Tabelle 1* zusammengefassten verschiedenen Stoffgruppen werden im Folgenden einzeln diskutiert.

TIERARZNEIMITTEL

In der Schweiz sind 485 Wirkstoffe als TAM zugelassen (Swissmedic Stoffliste, Stand 30.6.2012, www.swissmedic.ch/daten/00080/00256) – fünfmal weniger als für die Humanmedizin. In einer Umwelt-risikoabschätzung für europäische TAM von *Kools et al.* [5] wurden Antibiotika und Antiparasitika als für die Umwelt am kritischsten bewertet. In der Schweiz werden ausschliesslich für Antibiotika Vertriebsstatistiken erhoben. Diese Erhebungen werden seit 2005 von Swissmedic durchgeführt. Allerdings werden keine Statistiken von einzelnen Wirkstoffen veröffentlicht, sondern nur von Wirkstoffklassen. Insgesamt wurden im Jahr 2009 in der Tiermedizin rund 71 t Antibiotika verkauft. Diese Menge ist ca. 30-mal kleiner als die im Jahr 2010 verkaufte Menge an Pflanzenschutzmitteln (Agrarbericht 2011 BLW [6]) und vergleichbar mit den in der Humanmedizin eingesetzten Antibiotikamengen. Der grösste Teil davon wird in der Nutztierhaltung eingesetzt. Etwa zwei Drittel aller TAM-Antibiotika werden als Arzneimittelvormischungen (AMV) verabreicht [7]. Als AMV werden Arzneimittel bezeichnet, die ins Futter oder ins Trinkwasser gemischt werden oder zur direkten Verabreichung an eine Tiergruppe bestimmt sind. AMV kommen

hauptsächlich in der Geflügel-, Kälber- und Schweinemast zum Einsatz. Gemäss einer deutschen Studie [8] werden mengenmässig mehr Antibiotika als Antiparasitika eingesetzt. Dies dürfte auch für die Schweiz zutreffen, da Antibiotika metaphylaktisch als AMV verfüttert werden. Am häufigsten werden Wirkstoffe aus den Wirkstoffklassen der Sulfonamide (29 t), Tetracycline (16 t), Penicilline (14 t), Makrolide und Aminoglykoside (je 4 t) eingesetzt [6]. Die am weitesten verbreiteten Wirkstoffe unter den Sulfonamiden sind Sulfamethazin (=Sulfadimidin) und Sulfathiazol. Die Sulfonamide sind sehr gut wasserlöslich und persistent. Sie stellen daher die ökologisch potenziell bedeutsamste Stoffgruppe der Antibiotika dar und sind gut als Leitsubstanzen für die Abschätzung von Worst-Case-Einträgen in Oberflächengewässer geeignet. Im Weiteren könnten Tetracycline und Makrolide relevant sein. Diese beiden Stoffklassen binden aber generell stärker an Feststoffe und werden somit besser in den Böden zurückgehalten.

BIOZIDE

In der Schweiz regelt die Biozidprodukteverordnung (VBP, SR 813.12) in Anlehnung an die europäische Biozidrichtlinie die Zulassung der Biozidprodukte. Diese unterscheidet verschiedene Produktarten (PA). In der Nutztierhaltung sind die Biozidprodukte für die Hygiene im Veterinärbereich (PA3) und die Desinfektionsmittel für den Lebens- und Futtermittelbereich (PA4) mengenmässig am bedeutsamsten. In der Schweiz sind 85 Wirkstoffe für PA3 und 65 Wirkstoffe für PA4 zugelassen.

	Tierarzneimittel (TAM) [3, 7, 18]	Biozide [9, 25]	Schwermetalle (SM) [11, 12]	Natürliche Hormone [4, 13]
Einsatz von TAM, Bioziden und Schwermetallen sowie Emission von natürlichen Hormonen in der Nutztierhaltung	Antibiotika: 71 t/Jahr (davon rund 50 t/Jahr Arzneimittelvormischungen) Sulfonamide: 24 t/Jahr; Tetracycline: 15 t/Jahr; Penicilline: 5 t/Jahr; Makrolide 4 t/Jahr. Für Antiparasitika, Analgetika und synth. Hormone sind keine Daten vorhanden.	Ca. 1000 t Wirkstoffe für Melkmaschinen- und Stalldesinfektion. Quaternäre Ammoniumverbindungen (QAV): 0,1–3 t/Jahr (Stalldesinfektion, Produkteart (PA) 3) 0,4–10 t/Jahr (Melkmaschinen, PA4)	Kupfer (Cu) 460 t/Jahr (ges. Hofdünger) Zink (Zn): 2800 t/Jahr (ges. Hofdünger) Blei (Pb): 26 t/Jahr (ges. Hofdünger)	Östrogene (als 17β-Estradiol-Eq.): 150–200 kg/Jahr Davon der grösste Teil von Kühen: 80–170 kg/Jahr
Leitsubstanzen	Sulfonamide (Sulfamethazin, Sulfathiazol)	Quaternäre Ammoniumverbindungen, Chlorkresol	Kupfer, Zink	17β-Estradiol-Eq., 17β-Estradiol, 17β-Estradiol, Estron, Estriol
Konzentrationen im Hofdünger	Sulfamethazin 15 000–20 000 µg/l (gemessen in Schweinegülle)	Quaternäre Ammoniumverbindungen (QAV): 50–1300 µg/l (abgeschätzt aus Verbrauch unter der Annahme, dass sich dieser gleichmässig auf den gesamten anfallenden unverdünnten Hofdünger verteilt)	Kupfer (Cu) (gemessen): 3000 µg/l (Rinder-Vollgülle) 6000 µg/l (Schweine-Vollgülle) 28 000 µg/kg (Mastpoulet Mist) Zink (Zn) (gemessen): 15 000 µg/l (Rinder-Vollgülle) 37 000 µg/l (Schweine-Vollgülle) 230 000 µg/kg (Mastpoulet Mist)	17β-Estradiol-Eq.: 5–30 µg/l (gemessen in versch. Schweine- und Rindergüllen)
Vergleich Emission aus anderen Quellen	Der Verbrauch an Antibiotika als TAM entspricht etwa dem Gesamtverbrauch in der Humanmedizin	7400 t/Jahr, davon 75% zur Desinfektion (Spitäler, Haushalte, Schwimmbäder, Landwirtschaft etc.)	Siedlungsflächen (Dach- und Fassadenmaterialien) und Verkehr sind die wichtigsten anthropogenen Quellen für Schwermetalle	Emission Mensch: ca. 33 kg/Jahr, d. h. rund 5–10-mal weniger als in der Nutztierhaltung

Tab. 1 Emittierte Stoffe aus der Nutztierhaltung und Konzentrationen im Hofdünger. Zusammenstellung von Angaben und Abschätzungen für die Schweiz
Substances émises par l'élevage et concentrations dans le fumier. Compilation des données et estimations pour la Suisse

sen (Öffentliches Produktregister BAG, www.bag.admin.ch). Allerdings ist damit zu rechnen, dass viele dieser Wirkstoffe aufgrund des europäischen Prüfungsverfahrens in den nächsten Jahren wegfallen werden.

Im Projekt BIOMIK wurden die eingesetzten Stoffmengen abgeschätzt [9]. Die sehr unsicheren Schätzungen des Biozidverbrauchs zur Desinfektion von Melkmaschinen und zur Stalldesinfektion bewegen sich im Bereich von 1000 Tonnen Wirkstoffe pro Jahr. Die Verbrauchszahlen konnten aufgrund der dürftigen Datenlage nicht genauer taxiert werden. Aktuell werden die eingesetzten Wirkstoffe und Mengen für die Hygiene im Veterinärbereich von der Berner Fachhochschule im Auftrag des BAFU untersucht. Viele der in den PA3 und PA4 eingesetzten Wirkstoffe sind schnell abbaubar und daher für Oberflächengewässer nicht relevant; dazu gehört beispielsweise Aktivchlor (Natrium- und Calciumhypochlorit-Lösungen zu Desinfektionszwecken). Die wichtigste persistente Stoffgruppe sind die quaternären Ammoniumverbindungen (QAV). In den eingesetzten Produkten könnten jährlich bis zu 10 t QAV enthalten sein (Tab. 1). Im Weiteren ist hier Chlorkresol zu erwähnen, das in Produkten vorkommt, die bei einer Befragung von Tierärzten und Landwirten zur

Stalldesinfektion häufig genannt wurden, z. B. Neopredisan [10].

SCHWERMETALLE

Gewisse Schwermetalle werden als Spurenstoffe in Mineralfutter verfüttert, z. B. Eisen, Kupfer, Mangan und Zink, und kommen auch natürlicherweise in Futtermitteln vor. Mineralfutter wird als Ergänzung zu Grünfütter, Heu, Silage oder Kraftfutter zur Optimierung der Spurenelementzugaben und Vermeidung von Spurenstoffmangel eingesetzt. Kupfer und Zink sind die im Hofdünger in den höchsten Konzentrationen gemessenen Schwermetalle [11, 12]. In Tabelle 1 sind die Konzentrationen von Kupfer und Zink in verschiedenen Hofdüngern aufgeführt [11, 12]. Wenn man die mittleren Konzentrationen in verschiedenen Hofdüngern auf die jährlich mit Hofdünger in die Umwelt ausgebrachten Stofffrachten hochrechnet, kommt man für Kupfer auf rund 460 t/Jahr, für Zink auf 2800 t/Jahr und für Blei auf rund 26 t/Jahr (Tab. 1).

HORMONE

Die Nutztiere in der Schweiz scheiden jährlich rund fünf- bis zehnmal mehr natürliche Hormone aus als die Schweizer Bevölkerung (Tab. 1). Der grösste Teil wird von Milchkühen ausgeschieden, die mehr oder weniger dauerhaft in der

Laktationsphase gehalten werden und daher einen erhöhten Hormonspiegel haben. Die Konzentrationen, angegeben in 17β-Estradiolequivalenten (EEQ), bewegen sich in verschiedenen flüssigen Hofdüngern zwischen 5 und 30 µg EEQ/l [4, 13]. Hochrechnungen für die Schweiz ergeben total eine Emission von 150–200 kg EEQ/Jahr (vgl. Tab. 1). Natürliche Östrogene werden nur in sehr untergeordnetem Masse (ca. 5%) als freie Hormone ausgeschieden [14]. Der überwiegende Anteil wird im Körper zur besseren Wasserlöslichkeit zum Teil an Schwefelsäure, hauptsächlich aber an Glukuronsäure gebunden und als Ester ausgeschieden. Die Messung und Bilanzierung der östrogenen Aktivität ist komplex, weil die unveränderten Stoffe und die Esterverbindungen extrem unterschiedliche östrogene Aktivitäten aufweisen, stark unterschiedlich wasserlöslich sind und sich die gut wasserlösliche, kaum aktive Form nach dem Ausscheiden wieder in die aktive Form umwandelt. Ein grosser Anteil der nicht veresterten Östrogene liegt in Gülle an Feststoffe gebunden vor [15]. Östrogene können schon im pg/l-Bereich bei Langzeitexposition negative Effekte auf Wasserlebewesen haben [4, 13].

ABBAU IM HOFDÜNGER

Über die Stabilität von Tierarzneimitteln und Bioziden im Hofdünger ist relativ

wenig bekannt. Für einzelne TAM gibt es Untersuchungen zum Abbau im Hofdünger. Von den häufig eingesetzten Antibiotikagruppen werden die Sulfonamide, Tetracycline und Makrolide relativ langsam abgebaut, während die Penicilline nicht stabil sind [5]. Bei Antiparasitika, Bioziden und anderen Stoffen, zu denen keine spezifischen Informationen verfügbar sind, muss für erste Relevanzanalysen davon ausgegangen werden, dass sie in der Gülle nicht signifikant abgebaut werden. Auch natürliche Hormone werden unter den anaeroben Lagerungsbedingungen, wie sie bei der Lagerung von Gülle generell vorherrschen, nicht signifikant abgebaut [4].

BELASTUNG VON FLIESSGEWÄSSERN

ZEITLICHE UND RÄUMLICHE VARIATION DES EINTRAGS

Die Emissionsdynamik der Mikroverunreinigungen aus der Nutztierhaltung ist an das periodische Ausbringen von Hofdüngern auf die Felder gekoppelt. Die Hauptemission erfolgt von Frühling bis Spätsommer und ist von den Witterungsverhältnissen abhängig [3]. Hohe Stoffkonzentrationen, die über den Hofdünger während Regenereignissen in Oberflächengewässer gelangen, kommen vor allem in Regionen mit hohen Tierdichten vor. So zum Beispiel in den Oberflächengewässern der Kantone Thurgau und Lu-

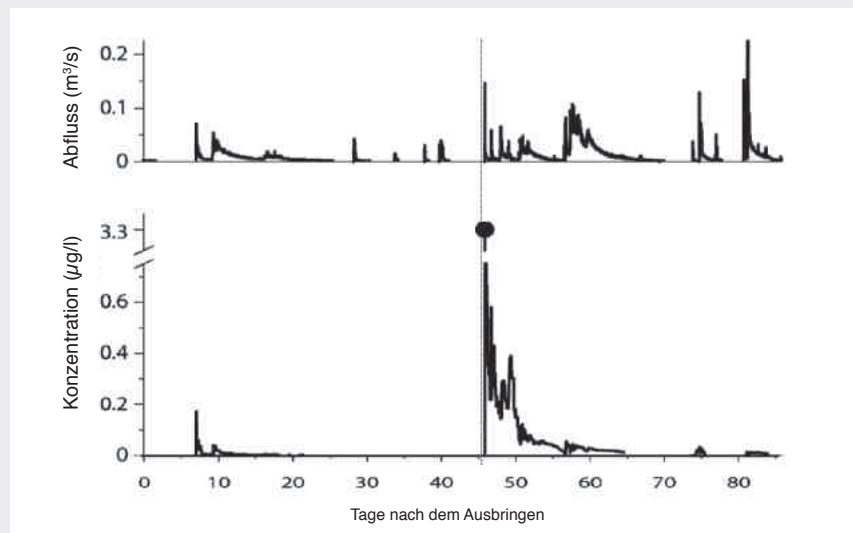


Fig. 3 Abfluss und Konzentrationsverlauf von Sulfamethazin in einem direkt an Grünland angrenzenden kleinen Fliessgewässer während 80 Tagen nach dem zweimaligen Ausbringen (Zeitpunkte 0 und 45 Tage, die zweite Applikation ist mit der gestrichelten Linie gekennzeichnet) von sulfonamidhaltiger Gülle (Fig. [3])

Module et concentration de sulfaméthazine dans un petit cours d'eau directement adjacent à des prairies pendant 80 jours après la période de deux étalements de fumier contenant des sulfonamides (points temporels 0 et 45 jours, la seconde application est indiquée par la ligne pointillée) (Fig. [3])

zern, deren Schweinebestände sehr gross sind. Der Bestand an Grossvieheinheiten (GVE) pro Quadratkilometer über die ganze Schweiz ist in *Figur 2* abgebildet. Pro Hektare wird, abhängig von der Kultur, bis ca. 30 m³ verdünnte Gülle pro Gabe ausgetragen (entspricht bei einer Verdünnung von etwa 1:2 rund 15 m³ Vollgülle). In tierreichen Gebieten wird das mögliche Maximum ausgebracht, entspre-

chend intensiv werden dort auch die Kulturen gefahren: Auf eine Hektare intensiv bewirtschaftete Grasfläche können jährlich bis 180 m³ verdünnte Gülle kommen. Der Hofdünger ist insbesondere mit TAM sehr unterschiedlich belastet. Wenn man beispielsweise die in *Tabelle 1* angegebenen Konzentrationen von Sulfamethazin mit den Wirkstoffeinsatzmengen und den jährlich anfallenden Güllemengen vergleicht, kommt man zum Schluss, dass maximal 5% der Gülle so hoch (15 000–20 000 µg/l) belastet sein können.

BEISPIEL SULFAMETHAZIN

Berücksichtigt man Einsatzmengen, Metabolisierung im Tier, Abbau im Hofdünger und in der Umwelt sowie die Sorptionseigenschaften der TAM, sind in der Schweiz von den Sulfonamiden die höchsten Oberflächengewässereinträge zu erwarten [3, 7, 16]. Der Eintrag der Sulfonamide in Oberflächengewässer ist dementsprechend verglichen mit anderen Mikroverunreinigungen aus der Nutztierhaltung auch gut untersucht. In einer Studie von *Stoob et al. (2007)* wurde antibiotikahaltige Gülle kontrolliert auf eine Grünfläche ausgebracht und das angrenzende Oberflächengewässer beprobt [3]. In *Figur 3* sind die Konzentrationen von Sulfamethazin während 80 Tagen nach dem zweimaligen Ausbringen der Gülle auf die Grünfläche dargestellt.

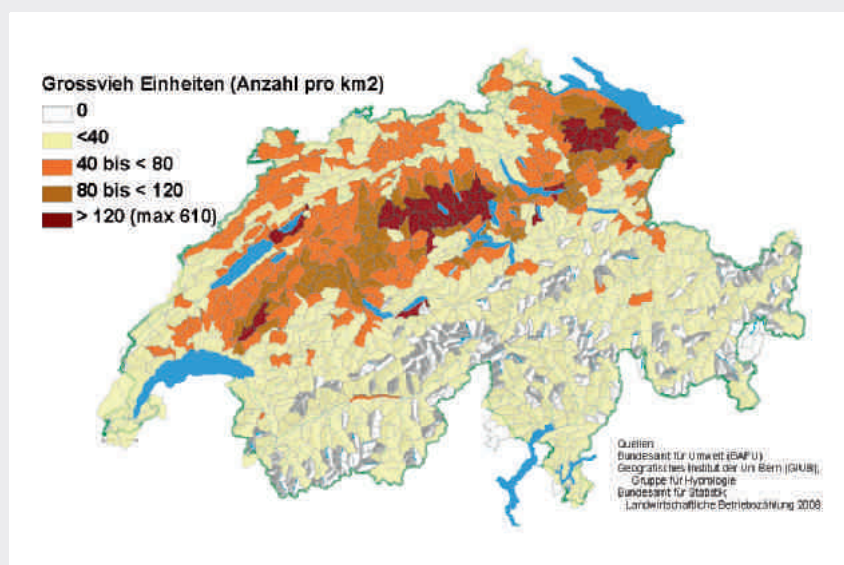


Fig. 2 Grossvieheinheiten (GVE) pro Quadratkilometer in der Schweiz. Erhebungen basieren auf den landwirtschaftlichen Betriebszählungsdaten (Bundesamt für Statistik, Stand 2008) für Basiseinzugsgebiete

Unités de gros bétail (UGB) par km² en Suisse. Les enquêtes sont fondées sur les données du recensement agricole (Office fédéral de la statistique, 2008) par bassin versant

Der gemessene Konzentrationsverlauf ist vergleichbar mit dem von Pflanzenschutzmitteln und die gemessene Maximalkonzentration von 3 µg/l liegt im gleichen Konzentrationsbereich, in dem Pflanzenschutzmittel wie Atrazin oder Metolachlor auftreten. Die Maximalkonzentration überschreitet das provisorisch abgeleitete akute Qualitätskriterium (MAC-EQS, *Maximum Acceptable Concentration*) von 10 µg/l aber nicht [3]. Gesamthaft wurden 0,6% des Sulfamethazins von der zweiten Applikation ins Oberflächen-gewässer eingetragen (Fig. 3).

In weiteren Messungen von *Stoob et al.* im Frühsommer in der Region Sempachersee, einem Gebiet mit viel Schweinehaltung, also hohem Einsatz an Sulfonamiden, wurden während einem Regenereignis über einen Zeitraum von zwei Tagen in der Grossen Aa bei einem Abfluss von rund 1 m³/s Konzentrationen um 0,02 µg/l gefunden [3].

Im Rhein bei Basel schliesslich wurden von *Singer et al.* maximale Konzentrationen von 0,003 µg/l nachgewiesen und im Rahmen der periodischen Messungen der Rheinüberwachungsstation Weil am Rhein wurden seit 2011 nie Werte über der Bestimmungsgrenze der dort einge-

setzten Methode von 0,025 µg/l gefunden [17]. Diese Messungen in Fließgewässern unterschiedlicher Grösse bestätigen, dass die Konzentrationen in kleinen Fließgewässern am höchsten sind [3, 17].

GROBE ABSCHÄTZUNG FÜR ANDERE STOFFKLASSEN

Um die Bedeutsamkeit anderer Mikroverunreinigungen aus der Nutztierhaltung mit der von Sulfamethazin zu vergleichen, wurden einfache Abschätzungen mit dem Modell EXPOSIT durchgeführt, das im deutschen Pflanzenschutzmittel-Zulassungsverfahren für Expositionsrechnungen verwendet wird. Die aktuelle Version (EXPOSIT 3.0 beta, www.bvl.bund.de) beinhaltet eine K_{oc} (Verteilung einer Substanz zwischen organischem Kohlenstoff und Wasser) abhängige Bestimmung des Wirkstoffaustrags. Die Wirkstoffe werden in Abhängigkeit ihres K_{oc} kategorisiert und der Oberflächenabfluss (gelöster Anteil) sowie der Erosionsaustrag (partikelgebundener Anteil) werden pro Regenereignis in Prozent der ausgebrachten Menge angegeben. *Burkhardt et al.* [18] haben gezeigt, dass der gelöste Austrag von Stoffen, die zusammen mit

Gülle ausgebracht werden, im Vergleich zu direkt auf das Feld aufgetragenen Substanzen wie Pflanzenschutzmitteln, rund sechsmal grösser sein kann. Aus diesem Grund werden hier die K_{oc} -abhängigen Oberflächenabfluss-Werte, die mit dem Modell EXPOSIT 3.0 beta berechnet werden, für die hier behandelten Stoffe aus dem Hofdünger mit dem Faktor 6 multipliziert. Mit diesen modifizierten Austragsraten und den mit dem Hofdünger applizierten Mengen können die Konzentrationen der Mikroverunreinigungen im Abfluss vom Feld sowie im direkt am Feld anliegenden Fließgewässer berechnet werden. Das kleinste betrachtete Fließgewässer in EXPOSIT wird als «Graben» bezeichnet und weist eine Verdünnung des Abflusses vom Feld von 1:2,6 auf. Die berechneten Austragsraten und die abgeschätzten Konzentrationen im Hofdünger, im Abfluss vom Feld und im Graben sind in der Tabelle 2 für verschiedene Stoffklassen zusammengefasst.

Die berechneten Austragsraten stimmen gut mit Messungen aus den erwähnten Feldstudien von *Stoob et al.* [3] und *Burkhardt et al.* [18] überein. Die für die Östrogene berechneten Austragsraten und Konzentrationen passen ebenfalls

Stoffgruppen		Konzentration in belastetem Hofdünger (Ref. s. Tab. 1) (µg/l resp. µg/kg)	log K_{oc} (MCI Methode EPISuite™)	Austragsrate gelöst nach EXPOSIT 3.0, Runoff-Austrag multipliziert mit Faktor 6 für Gülle [18]	Austragsrate gelöst + partikel- gebunden	Konzentration im Abfluss / Drainagen- wasser vom Feld (bei der Ausbringung von 30 m³ Gülle / ha) *	Konzentration im sehr klei- nem Fließ- gewässer (Graben) **
						(µg/l)	(µg/l)
Tierarzneimittel (TAM)	Sulfonamide Sulfamethazin Sulfathiazol	15 000–20 000	1,4–2,4 2,3 2,2	1,2–1,5% 1,5% 1,5%	1,2–1,5% 1,5% 1,5%	45	17
	Tetracycline	kA	1,6–1,9	0,9–1,2%	0,9–1,2%	kA	kA
	Makrolide	kA	1,6–3,8	0,2–1,5%	0,4–1,5%	kA	kA
	Makrocyclische Laktone	kA	5,7	0,01%	0,5%	kA	kA
Biozide	Quat. Ammon.	100–1300	5,4–5,7	0,01%	0,5%	0,98	0,38
	Chlorkresol	kA	2,7	1,3%	1,3%	kA	kA
Schwermetalle	Kupfer	3000–30 000	-	2–3% _{gelöst} (Daten aus Referenz [26])		135 _{gelöst}	52 _{gelöst}
	Zink	15 000–200 000	-	<1% _{gelöst} (Daten aus Referenz [26])		300 _{gelöst}	115 _{gelöst}
Natürliche Hormone	Estron	kA	4,4	0,08%	0,38%	kA	kA
	Estradiol	kA	4,2	0,19%	0,37%	kA	kA
	EEQ	45	4,3 (Mittelwert)	0,15% (Mittelwert)	0,4% (Mittelwert)	0,027	0,01

* Es wird angenommen, dass pro ha 100 m³ Regenwasser anfallen und pro Gabe 30 m³ 1:2 verdünnte Gülle (15 m³ Vollgülle) ausgebracht werden. Es wurden die maximalen Mengen an Mikroverunreinigungen pro ha Landwirtschaftsland aus den Mengenabschätzungen verwendet (Worst-Case). Für die Berechnung des Austrags in die Oberflächengewässer wurden die Maximalwerte der Austragsraten pro Stoffgruppe inkl. Erosion verwendet.

** Die Verdünnung des abfließenden Wassers im Graben (Abflussgraben direkt neben dem Feld) ist als 1:2,6 angenommen. Definition gemäss EXPOSIT 3.0 beta.

Tab. 2 Abschätzung der Konzentrationen in Hofdünger des Austrags und Abfluss/Drainagenwasser und einem sehr kleinen Fließgewässer (Graben).

kA.: Keine Daten vorhanden

Estimation des concentrations dans le fumier du déversement, dans le ruissellement/drainage de l'eau et dans un petit cours d'eau (fossé).

kA.: aucune donnée disponible

gut mit Messdaten zusammen: In einer aktuellen Feldstudie in der Schweiz [19] wurde im Drainagewasser eine Hormonaktivität von bis zu 0,02 µg EEQ/l gemessen, während die in *Tabelle 3* berechnete Konzentration im unverdünnten Abfluss vom Feld von 0,018 µg EEQ/l beträgt. Die berechneten Austragsraten der Stoffe können also für einzelne Stoffe durch Messwerte aus der Literatur bestätigt werden und stimmen in der Grössenordnung auch gut mit verschiedenen Pflanzenschutzmitteln wie Atrazin und Metolachlor überein [20]. Trotzdem sind die berechneten Austragsraten der betrachteten Stoffe im Vergleich zu den besser untersuchten PSM nur erste Abschätzungen. So wurden in anderen Studien in Laborversuchen unter Worst-Case-Bedingungen für Sulfonamide und auch für östrogene Stoffe höhere Austragsraten gefunden [21, 22]. Wie die Relevanz dieser Resultate einzustufen ist, kann derzeit nicht abschliessend beurteilt werden.

ÖKOTOXIKOLOGISCHE BEURTEILUNG

Ob die teilweise hohen Konzentrationen von Mikroverunreinigungen während Regenereignissen in Fliessgewässern negative Auswirkungen haben, hängt neben der Expositionsdauer stark von der Toxizität der entsprechenden Stoffe ab. *Ashauer et al.* setzen sich mit diesem Thema vertieft auseinander und haben am

Beispiel Diazinon (Pflanzenschutzmittel und Biozid) einen möglichen Ansatz vorgestellt, der auf toxikokinetischen-toxikodynamischen Modellen basiert [23]. Die zeitlich stark variierenden Konzentrationen sind ökotoxikologisch sehr schwierig zu beurteilen und erfordern viele Daten, die zurzeit für die meisten Stoffe fehlen. Für eine erste Beurteilung des Risikos für Wasserlebewesen wurden hier deshalb die abgeschätzten Maximalkonzentrationen bei verschiedenen Verdünnungen im Oberflächengewässer mit ökotoxikologischen Qualitätskriterien (Langzeitqualitätskriterium AA-EQS, falls vorhanden zusätzlich akutes Qualitätskriterium MAC-EQS) sowie bei den Schwermetallen mit den Anforderungen der GSchV verglichen. Die resultierenden Risikoquotienten (= abgeschätzte Konzentration im Gewässer/Qualitätskriterium) sind in *Tabelle 3* dargestellt.

Die Risikoquotienten zeigen, dass bei geringer Verdünnung die Konzentrationen kurzzeitig deutlich über den Langzeitqualitätskriterien liegen können. Die höchsten Risikoquotienten stellen die natürlichen Hormone dar. Eine Überschreitung der Langzeitqualitätskriterien bedeutet, dass negative Auswirkungen auf die betroffenen Oberflächengewässer nicht mehr ausgeschlossen werden können. Wie sich diese kurzzeitigen Spitzenkonzentrationen auf die Flora und Fauna der Kleinstgewässer im Einzelfall auswirken, ist jedoch nicht bekannt.

SENSITIVITÄTSANALYSE

Die Unterschiede zwischen den berechneten Austragsraten der betrachteten Stoffe sind viel kleiner (bis Faktor 3, *Tab. 2*) als die Unterschiede zwischen deren Qualitätskriterien (bis 5 Grössenordnungen, *Tab. 3*) und deren Verbrauchszahlen (bis 5 Grössenordnungen, *Tab. 1*). Die Parameter, die den Risikoquotienten in erster Linie beeinflussen, sind daher die eingesetzten Stoffmengen und die Toxizität der entsprechenden Substanzen. Um die Abschätzungen des Risikos zu verbessern, muss also hauptsächlich bei der Erhebung von Verbrauchszahlen und bei der Herleitung von wirkungsbasierten Qualitätskriterien, auch für die temporäre Belastung von Fliessgewässern, angesetzt werden.

STARK TOXISCHE STOFFE

In dieser Arbeit wurde auf Stoffe fokussiert, die in messbaren Konzentrationen in Oberflächengewässern erwartet werden. Für Stoffe mit sehr hoher Toxizität, für die keine Einsatzmengen bekannt sind, beispielsweise das Antiparasitikum Ivermectin (*Predicted No Effect Concentration*, PNEC 0,0057 ng/l [24]), können keine schlüssigen Beurteilungen gemacht werden. Stoffe mit so tiefen PNEC, die weit unter den analytisch messbaren Konzentrationen liegen, sind aber immer ein potenzielles Problem. Ivermectin bindet zwar sehr stark an Feststoffe, die Wahrscheinlichkeit, dass es über Hofdü-

Stoffgruppen		Langzeitqualitätskriterium (AA-EQS) bzw. numerische Anforderung (µg/l)	Akutes Qualitätskriterium (MAC-EQS) bzw. numerische Anforderung (µg/l)	Risikoquotient im Graben	Risikoquotient bei Verdünnung 1:10	Risikoquotient bei Verdünnung 1:100	Notwendige Verdünnung zur Einhaltung des Qualitätskriteriums / der numerischen Anforderung
Tierarzneimittel	Sulfamethazin	1*	10*	17 (1,7)	4,5 (0,45)	0,45 (0,045)	1:50 (1:5)
	Sulfathiazol	0,6*	2,7*	29 (6)	7,5 (1,7)	0,75 (0,17)	1:80 (1:8)
Biozide	Quat. Ammon.	0,04–0,4**	-	28	7,3	0,73	1:80
Schwermetalle	Kupfer	2 gelöst ***	2 gelöst ***	-	-	-	1:30
	Zink	5 gelöst ***	5 gelöst ***	-	-	-	1:100
Natürliche Hormone	EEQ [17-beta-Estradiol]	0,0004*	-	97	25	2,5	1:250

* Ad hoc hergeleitete Vorschläge des Ökotoxizitätszentrums. Aktuelle geprüfte Werte sind unter <http://www.oekotoxizitaetszentrum.ch/expertenservice/qualitaetskriterien/vorschlaege> zu finden.

** Bericht BIOMIK [25] und Umweltbundesamt Deutschland, Dr. Oliver Gans, Bericht BE-271

*** Numerische Anforderungen der Gewässerschutzverordnung GSchV (SR 814.201). Werte angegeben für gelöste Stoffe.

Tab. 3 Abschätzung des Risikos von Stoffen aus der Nutztierhaltung für die Wasserorganismen in kleinen Fliessgewässern während Regenereignissen. Angabe von Risikoquotienten beim Vergleich mit Langzeitqualitätskriterien und numerischen Anforderungswerten der GSchV. Die Werte in Klammern sind für die TAM mit den akuten Qualitätskriterien gerechnet. Bei einem Risikoquotienten grösser als 1 können negative Effekte auf Wasserlebewesen nicht mehr sicher ausgeschlossen werden. Die Verwendung von Langzeitqualitätskriterien bei mangelnder Datenlage ist im Sinne des Vorsorgeprinzips

Évaluation du risque des substances issues de l'élevage pour la vie aquatique dans de petits cours d'eau, lors d'événements pluvieux. Indications des taux de risque par comparaison avec des critères de qualité à long terme et les exigences numériques de l'ordonnance sur la protection de l'eau. Les valeurs entre parenthèses sont calculées pour la TAM avec des critères de qualité aigus. Dans le cas de taux de risque supérieurs à 1, les effets négatifs sur les organismes aquatiques ne peuvent pas être exclus avec certitude. L'utilisation de critères de qualité à long terme, faute de données disponibles, est effectuée au nom du principe de précaution

ger in die Oberflächengewässer gelangt, ist daher klein; falls es aber durch einen Unfall oder direkt vom Tier ins Gewässer gelangt, ist das auch in kleinsten Mengen für die Wasserorganismen höchst problematisch.

STOFFFRACHT IM RHEIN

Um die Abschätzungen der gesamten in die Oberflächengewässer eingetragenen Frachten an Mikroverunreinigungen aus der Nutztierhaltung zu plausibilisieren und deren Relevanz zu beurteilen, wurden die Abschätzungen mit Messungen ausgewählter Stoffe im Rhein bei Basel verglichen. Via den Rhein werden rund zwei Drittel der Fläche der Schweiz entwässert. Für die Berechnung des Stoffflusses aus der Nutztierhaltung wurde Folgendes angenommen:

- Alle eingesetzten Stoffe gelangen auf landwirtschaftliche Flächen.
- Jährlich treten vier längere Regenereignisse auf, bei denen die Stoffe mit den in *Tabelle 2* angegebenen Austragsraten in die Oberflächengewässer ausgetragen werden.
- Zwei Drittel der Stofffracht, welche in die Oberflächengewässer gelangt, werden flussabwärts in den Rhein transportiert.

Die so berechneten jährlichen Austragsraten bewegen sich zwischen 1,6% der auf die Felder ausgebrachten Menge für die Hormonaktivität und 6% für die Sulfonamide.

Mit der derzeitigen Datenlage ist anzunehmen, dass von allen eingesetzten TAM die Sulfonamide die grösste Stofffracht und die höchsten Konzentrationen beim Rhein in Basel aufweisen. Mit einer Austragsrate von 6% der auf die Felder ausgebrachten Menge kommt man für Sulfonamide aus der Nutztierhaltung auf eine Fracht von rund 500 kg/Jahr. Diese besteht hauptsächlich aus Sulfamethazin und Sulfathiazol. Diese Abschätzung wird durch Messdaten im Rhein, die sich zwischen 2 und 10 ng/l für diese Stoffe bewegen, was über den Abfluss auf eine jährliche Fracht von 100 bis 400 kg hochgerechnet werden kann, in der Grössenordnung bestätigt [17]. Stofffrachten und Konzentrationen im Rhein von Humanpharmaka, die vergleichbare Einsatzmengen und Stoffeigenschaften haben, sind teilweise eine bis zwei Grössenordnun-

gen höher [17]. Dies ist insbesondere auf den viel direkteren Eintragspfad der Humanpharmaka via gereinigtes Abwasser zurückzuführen.

Die Auswertung von Messdaten an der internationalen Rheinüberwachungsstation in Weil am Rhein zeigt auch, dass TAM im Mittel weniger häufig und in weniger hohen Konzentrationen gefunden werden als gewisse Pflanzenschutzmittel. An der Rheinstation wurden im Jahr 2010 36 Pflanzenschutzmittel in Konzentrationen über 3 ng/l detektiert, wovon elf sogar Konzentrationen über 25 ng/l aufwiesen. Im Gegensatz dazu wurden von den TAM nur Sulfamethazin und Sulfathiazol in Konzentrationen um die 2 resp. 10 ng/l gefunden, sonst wurden keine TAM im Rhein nachgewiesen [17].

Zum Stofffluss der Biozide lassen sich aufgrund der lückenhaften Datenlage keine aufschlussreichen Abschätzungen machen. Messungen von Wirkstoffen aus PA3 und PA4 im Rhein bei Basel sind zurzeit keine vorhanden.

Für Kupfer und Zink wurden zwischen 2001 und 2010 mittlere Jahresfrachten von 55 bzw. 95 t berechnet [11, 12]. Aus den in die Umwelt ausgebrachten Mengen (*Tab. 1*) und den Austragsraten in *Tabelle 2* lässt sich abschätzen, dass ca. 20% (Kupfer) und 30% (Zink) dieser Frachten aus der Nutztierhaltung stammen. Diese Grössenordnungen entsprechen den Abschätzungen der Internationalen Kommission zum Schutz des Rheins, IKSR, (Rhein Bestandsaufnahme der Emissionen prioritärer Stoffe, 2000, www.iksr.org). Als weitere wichtige Quellen dieser Schwermetalle werden von der IKSR die Einträge aus den Kläranlagen und von versiegelten Flächen via Regenwasserkanal und Mischwasserüberlauf aufgeführt. Für die natürlichen Hormone kann aufgrund der sehr tiefen Konzentrationen (im Rhein generell unterhalb der analytischen Bestimmungsgrenzen) keine Stoffflussbilanzierung auf der Basis von Messwertvergleichen aufgestellt werden. *Johnson et al.* haben für Grossbritannien abgeschätzt, dass natürliche Östrogene aus der Nutztierhaltung 15% zur gesamten östrogenen Fracht beitragen [4].

SCHLUSSFOLGERUNGEN

Aufgrund der verfügbaren, mehrheitlich sehr wenig umfangreichen Daten zu Verbrauch, Umweltverhalten und Toxizität wurde eine Relevanzbeurteilung zu Mikro-

verunreinigungen aus der Nutztierhaltung in Oberflächengewässern durchgeführt. Diese Analyse kann aufgrund der ungenügenden Datenlage nicht abschliessend sein. Dennoch können einige wichtige Schlussfolgerungen gemacht werden. TAM-Rückstände haben höchstwahrscheinlich eine geringere Relevanz für die Oberflächengewässerqualität als die grösstenteils ebenfalls aus der Landwirtschaft stammenden Pflanzenschutzmittel und auch als Arzneimittel aus humanmedizinischen Anwendungen. Schweizweit gelangt von den ca. 70 t jährlich in der Nutztierhaltung eingesetzten Antibiotika nur ein kleiner Teil in die Oberflächengewässer. Dies wird sowohl durch Modellabschätzungen als auch durch die vorhandenen Messdaten bestätigt. Die Sulfonamide stellen unter Berücksichtigung aller vorhandenen Informationen (Verbrauch, Persistenz, Mobilität und Toxizität) wahrscheinlich die für die Gewässerbelastung potenziell kritischsten TAM-Antibiotika dar. Die in der Tiermedizin sehr häufig eingesetzten Sulfonamide Sulfamethazin und Sulfathiazol kommen aber in der aquatischen Umwelt in tieferen Konzentrationen vor als Sulfamethoxazol, das in kleineren Mengen in erster Linie in der Humanmedizin eingesetzt wird. Aus den vorliegenden Untersuchungen und Messdaten kann geschlossen werden, dass Sulfonamide und somit vergleichbare TAM-Rückstände für grössere Fließgewässer und Seen im Allgemeinen nicht kritisch sind. An landwirtschaftliche Flächen angrenzende Kleinstgewässer in Regionen mit hohem TAM-Einsatz können hingegen temporär Konzentrationen im ökotoxikologisch relevanten Bereich aufweisen. Ein weiteres potenzielles Risiko, selbst beim Eintrag von kleinsten Mengen, sind hochtoxische TAM wie das Antiparasitikum Ivermectin.

Eine weitere Wirkstoffgruppe, die gemäss einfachen Abschätzungen in Kleinstgewässern Konzentrationsbereiche erreicht, für die Beeinträchtigungen der aquatischen Umwelt nicht ausgeschlossen werden können, sind die quaternären Ammoniumverbindungen. Der Eintrag und der Stofffluss dieser Verbindungen sind allerdings nur lückenhaft untersucht und deren Relevanz kann daher nicht beurteilt werden. Um das von den im Stall eingesetzten Bioziden ausgehende Risiko besser beurteilen zu können, sind Verbrauchserhebungen dringend notwendig. Schwermetalle können während Regen-

ereignissen in kleinen Oberflächengewässern Konzentrationen erreichen, die über den Anforderungen der GSchV liegen. Vergleichsweise am kritischsten zu beurteilen sind derzeit die natürlichen Hormone aus der Nutztierhaltung, für die bei langzeitiger Exposition schon in pg/l-Bereich schädliche Einwirkungen auf Wasserlebewesen nicht ausgeschlossen werden können. Die kurzzeitig auftretenden Konzentrationen von mehr als 10 ng/l EEQ sind teilweise höher als diejenigen in Kläranlagenabläufen und deutlich höher als diejenigen in den stark abwasserbelasteten Fliessgewässern. Wie diese kurzzeitigen Konzentrationen über den Qualitätskriterien zu beurteilen sind, kann nicht abschliessend beantwortet werden.

DANK AN

Das Bundesamt für Umwelt (BAFU) für die Finanzierung der interessanten Studie. *Christian Leu* (BAFU) und *René Gälli* (BMG) für die fachliche Begleitung und Unterstützung. *Christian Stamm* (Eawag), *Thomas Kupper* (HAFL), *Bettina Hitzfeld*, *Sybill Kilchmann*, *Ueli Sieber*, *Ivo Strahm*, *Reto Mural*, *Georges Chassot*, *Daniel Hartmann* (alle BAFU) für das Gegenlesen und die hilfreichen Kommentare.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Bundesamt für Statistik (2011): *Landwirtschaftliche Betriebszählungen*. www.bfs.admin.ch/bfs/portal/de/index/themen/07/03/blank/data/01/03.html. [Online]
- [2] Thomas, R. L.; Warman P.R. (1981): *Chlortetracycline in soil amended with poultry manure*. *Canadian J. Soil Science*. 61, 161–163
- [3] Stoob, K. et al. (2007): *Dissipation and transport of veterinary sulfonamide antibiotics after manure application to grassland in a small catchment*. *Environ. Sci. Technol.* 41 (21): 7349–7355
- [4] Johnson, A. C. et al. (2006): *The potential steroid hormone contribution of farm animals to freshwater, the United Kingdom as a case study*. *Science of the Total Environment*. 362, Bde. 166–178
- [5] Kools, S. A. E. et al. (2008): *A Ranking of European Veterinary Medicines Based on Environmental*

- Risks. Integrated Environmental Assessment and Management*. 4, Bde. 4, 399–408
- [6] Bundesamt für Landwirtschaft BLW (2001): *Agarbericht 2011*
- [7] Swissmedic (2009): *Bericht über den Vertrieb von Antibiotika in der Veterinärmedizin und das Antibiotikaresistenzmonitoring in der Schweiz*. Bern
- [8] Rupalla, R. (1998): *Tiergesundheitsmittel – unterschätzte Branche*. s.l.: DLG-Mitteilungen, 10/1998: 58–59
- [9] Bürgi, D. et al. (2007): *Biozide als Mikroverunreinigungen in Abwasser und Gewässern, Projekt BIO-MIK. Im Auftrag des BAFU*
- [10] Althaus, F.R. (2012): *Institut für Veterinärpharmakologie und -toxikologie, VetPharm. [Online] Universität Zürich. www-vetpharm.uzh.ch*
- [11] Menzi, H.; Kessler, J. (1998): *Heavy metal content of manures in Switzerland. Proceedings of the FAO-Network on Recycling Agricultural, Municipal and Industrial Residues in Agriculture (RAMIRAN) Conference, Rennes, France. May 28–29, FAO, Rome, pp: 495–5*
- [12] Desaulles, A.; Studer, K. (1993): *Nationales Bodenbeobachtungsnetz (NABO) Messresultate 1985–91, Schriftenreihe für Umwelt, 200. Bern: BUWAL*
- [13] Lange, I. G. et al. (2002): *Sex hormones originating from different livestock production systems: fate and potential disrupting activity in the environment*. *Analytica Chimica Acta*. 473, Bde. 27–37
- [14] Fahlenkamp, H. et al. (2008): *Untersuchungen zum Eintrag und zur Elimination von gefährlichen Stoffen in Kläranlagen, Teil 3. s.l.: Technische Universität Dortmund – im Auftrag vom MUNLV Nordrhein-Westfalen*
- [15] Combalbert, S. et al. (2012): *Fate of steroid hormones and endocrine activities in swine manure disposal and treatment facilities*. *Water Research*. 46, Bde. 895–906
- [16] Menet, A.; Chèvre, N. (2010): *Évaluation du risque pour les eaux de surface des produits vétérinaires utilisés en agriculture*. Lausanne: UNIL
- [17] Singer, H. et al. (2008): *Multikomponenten-Screening für den Rhein bei Basel. Eawag im Auftrag des BAFU*
- [18] Burkhardt, M. et al. (2005): *Surface Runoff and Transport of Sulfonamide Antibiotics and Tracers on Manured Grassland*. *Journal of Environmental Quality*. 34: 1363–1371
- [19] Schönborn, A. et al. (2012): *Estrogenic activity in drainage water: A field study on an intensively managed Swiss cattle pasture. to be submitted*

- [20] Leu, C. et al. (2004): *Simultaneous assessment of sources, processes, and factors influencing herbicide losses to surface waters in a small agricultural catchment*. *Environ. Sci. Technol.*, Bde. 38 (14): 3827–3834
- [21] Yang, Yun-Ya et al. (2012): *Steroid Hormone Runoff from Agricultural Test Plots Applied with Municipal Biosolids*. *Environmental Science and Technology*. 46 (5), Bde. 2746–2754
- [22] Umweltbundesamt (2007): *Untersuchungen zum Abflussverhalten von Veterinärpharmaka bei Ausbringung von Gülle auf Ackerland und Weide*
- [23] Ashauer, R. et al. (2011): *Environmental risk assessment of fluctuating Diazinon concentrations in an urban and agricultural catchment using toxicokinetic – toxicodynamic modeling*. *Environmental Science and Technology*. 45, Bde. 9783–9792
- [24] Liebig, M. et al. (2010): *Environmental Risk Assessment of Ivermectin: A Case Study. Integrated Environmental Assessment and Management*. 6, Bde. 567–587
- [25] Morf, L. et al. (2007): *Projekt BIOMIK, Teilprojekt 2: Soffflussanalyse für die Schweiz: Quaternäre Ammoniumverbindungen*. GEO Partner AG
- [26] Aldrich, A.P. et al. (2002): *Specification of Cu and Zn in Drainage Water from Agricultural soils*. *Environmental Science and Technology*. 36, 2002, Bde. 4824–4830
- [27] Kümmerer, K. (2008): *Pharmaceuticals in the Environment*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg

> SUITE DU RÉSUMÉ

mones naturelles soient le plus problématiques. Toutefois il est difficile, voire impossible d'apprécier l'effet de concentrations élevées à court terme vu l'état des connaissances actuelles. En regard de l'apport total des micropolluants organiques dans les cours d'eaux, les émissions de source vétérinaire ne jouent vraisemblablement qu'un rôle mineur. Même s'ils représentent des quantités importantes, ces substances sont en parties retenues et dégradées lors de leur passage dans les engrais de ferme et les sols.