



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Wirtschaft, Bildung und Forschung WBF
Agroscope
Forschungsbereich Umweltressourcen und Landwirtschaft

Jens Hürdler, Volker Prasuhn, Ernst Spiess | Juli 2015

Bericht | Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU)

Abschätzung von Schwermetalleinträgen über Gülleabschwemmung in die Oberflächengewässer der Schweiz MODIFFUS 3.0

Auftraggeber:

Bundesamt für Umwelt BAFU, 3003 Bern

Auftragnehmer:

Agroscope

Institut für Nachhaltigkeitswissenschaften (INH), Reckenholzstrasse 191
8046 Zürich

Autoren:

Jens Hürdler

Volker Prasuhn

Ernst Spiess

Diese Studie wurde im Auftrag des BAFU verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

Zusammenfassung

Mit dem Stoffflussmodell MODIFFUS 3.0 wurden ausgewählte Schwermetalleinträge (Cu, Cd, Pb, Zn) über Gülleabschwemmung in die Oberflächengewässer der Schweiz und das Rhein-einzugsgebiet der Schweiz unterhalb der Seen (REZGUS) modelliert. Die Berechnungen erfolgten in Anlehnung an die Berechnungen zur Phosphorabschwemmung. Schwermetallgehalte von Gülle wurden in Phosphoräquivalente umgerechnet und mit den jeweiligen Tierzahlen und Göllemengen zum Schwermetallanfall in der Gülle gemeindeweise verrechnet. Diese wurden mit den im Hektarraster vorliegenden standort- und nutzungsspezifischen Oberflächenabflusswerten im GIS verrechnet. Die berechneten Schwermetalleinträge betragen für die Schweiz 514 kg/Jahr Kupfer, 2 kg/Jahr Cadmium, 42 kg/Jahr Blei und 2'626 kg/Jahr Zink. Damit betragen die jährlichen Schwermetalleinträge über Gülleabschwemmung nur 1 % oder weniger der totalen diffusen und punktuellen Schwermetalleinträge in die Gewässer der Schweiz.

1. Auftrag

Mit dem Stoffflussmodell MODIFFUS 3.0 wurden im Auftrag des BAFU die Phosphor- und Stickstoffeinträge aus diffusen Quellen in die Oberflächengewässer der Schweiz abgeschätzt (HÜRDLER et al. 2015). Mit dem gleichen Modellansatz sollen nun in Anlehnung an die Abschätzungen zum Gewässereintrag von Phosphor über Gülleabschwemmung ausgewählte Schwermetalleinträge über den Eintragspfad „Gülleabschwemmung“ abgeschätzt werden. Die Abschätzungen wurden für die ganze Schweiz sowie das Rheineinzugsgebiet der Schweiz unterhalb der grossen Seen (REZGUS) durchgeführt.

2. Schwermetalleintrag aus Gülleabschwemmung

Unter Schwermetalleintrag aus Gülleabschwemmung wird der „direkte“ Transport von nicht an Bodenpartikel gebundenen Schwermetallen mit dem auf der Bodenoberfläche abfliessenden Wasser verstanden, unabhängig davon, ob Bodenerosion stattfindet oder nicht. Dabei werden Schwermetalle abgeschwemmt, die sich im zeitnahen Anschluss an eine Gülleapplikation auf der Boden- und Pflanzenoberfläche befinden. Eine Berücksichtigung möglicher Schwermetalldepositionen durch Niederschlag und Staubverlagerung erfolgt in dieser Abschätzung nicht. Messwerte zur Schwermetallkonzentration im Oberflächenabfluss von landwirtschaftlich genutzten Flächen lagen nicht vor. Betrachtet werden die Stoffe Kupfer (Cu), Cadmium (Cd), Blei (Pb) und Zink (Zn). Diese sind in relevanter Konzentration in der anfallenden Gülle vorhanden.

2.1 Berechnung der Schwermetallabschwemmung

Auf Grund der geringen Datenlage zu Schwermetallgehalten in Gülle wurde auf das jeweilige Verhältnis des entsprechenden Schwermetalls zu Phosphor zurückgegriffen (Phosphoräquivalente). Diese Verhältnisse wurden MENZI & KESSLER (1998) entnommen. Dort sind Verhältnisse (mg Schwermetall g⁻¹ P in der Trockensubstanz) für verschiedene Güllearten angegeben (Tab. 1). Für die Gülle von Milchkühen und Aufzuchtrindern wurde auf aktuellere Daten von BOSSHARD (2010) zurückgegriffen (Tab. 1).

Tabelle 1: Verhältnis von Schwermetallgehalten (Cu, Cd, Pb, Zn) in der Gülle zum Phosphorgehalt in der Gülle für verschiedene Tierkategorien nach MENZI & KESSLER (1998) und BOSSHARD (2010).

Sauen mit Ferkeln mg / g P	nicht säugende Sauen mg / g P	Mastschweine mg / g P	Mastrind mg / g P	Milchvieh/ Aufzucht mg / g P
Cu	6.30	3.70	4.60	6.31
Cd	0.01	0.01	0.01	0.02
Pb	0.13	0.11	0.07	0.28
Zn	31.70	22.90	30.40	33.60
* Daten aus Bosshard (2010)				

Zur Berechnung des schweizweiten Schwermetallanfalles in der Gülle wurden die Anteile an verschiedenen Hofdüngersystemen in der landwirtschaftlichen Produktionstechnik aus KUPPER et al. (2013) entnommen. Dabei konnten Vollgülle-, Gülle/Mist- und Vollmist-Systeme unterschieden werden (Tab. 2). Der Hofdüngeranfall wurde in Abhängigkeit des Aufstallsystems (nach Tab. 37 der GRUDAF 2009) und der Phosphorgehalt über der Richtwerte für Nährstoffausscheidungen (nach Tab. 35 der GRUDAF 2009) berechnet. Dadurch ist eine Abschätzung des Phosphoranfalls aus Gülle je Gemeinde über die Tierzahlen pro Gemeinde erfolgt.

Durch Kombination des Phosphoranfalls aus der Gülle mit dem Schwermetall-Phosphor-Verhältnis aus Tab. 1 wurde der Anfall der Schwermetalle aus der Gülle abgeleitet.

Tabelle 2: Anteile Tiere mit den Produktionssystemen Vollgülle, Gülle und Mist sowie Vollmist für das Jahr 2010 (aus KUPPER et al. 2013).

	Vollgülle (%)	Gülle/Mist (%)	Vollmist (%)
Milchkühe	53	46	1
Mütterkühe	27	67	7
Aufzuchtrind >2Jahre	29.1	64.7	6.2
Aufzuchtrind 1-2 Jahre	22.7	67.0	10.3
Aufzuchtrind <1Jahr	13.3	66.1	20.2
Mittelwert	22	66	12
Masttier/Rindviehmast	18.7	68.8	12.6
Mastkälber	1.2	31.5	67.3
Mittelwert	10	50	40

Bei der Berechnung der Schwermetallabschwemmung wurde in Anlehnung an die in MODIF-FUS verwendeten Ausgangskonzentrationen für P-Abschwemmung eine nach Schwermetallen differenzierte Abschwemmungskonzentration pro düngbare Landnutzungskategorie festgelegt (Tab. 3). Hierfür konnte der für die P-Abschwemmung verwendete Konzentrationswert in Relation zum Phosphor- / Schwermetallanfallsverhältnis in der Gülle gesetzt werden (Tab. 1). Es wurde angenommen, dass Schwermetalle nur im Zusammenhang mit direkter Gülleabschwemmung (Oberflächenabfluss nach Gülleapplikation) abgeschwemmt werden. Rücklösung von Schwermetallen aus dem Oberboden bei Oberflächenabfluss ohne vorherige Gülleapplikation - die beim Phosphor eine wichtige Rolle spielt (bodenbürtiger P bzw. angereicherter P) - wurde dagegen ausgeschlossen. Abschwemmungsverluste nach Mistanwendung oder durch Beweidung bzw. Freilandhaltung wurden nicht berücksichtigt, da sie nicht Teil des vorliegenden Auftrags waren. Sie werden aber auch als vergleichsweise gering eingeschätzt.

Tabelle 3: Nutzungsspezifischer Ausgangswert für die Berechnung der Schwermetallabschwemmung über Gülle ($\mu\text{g/l}$)

Landnutzungskategorie	Mittelwert $\mu\text{g Cu/l}$	Mittelwert $\mu\text{g Cd/l}$	Mittelwert $\mu\text{g Pb/l}$	Mittelwert $\mu\text{g Zn/l}$
vegetationslose Flächen	0	0	0	0
Wald	0	0	0	0
unproduktive Vegetation	0	0	0	0
Strassen und Wege ausserorts	0	0	0	0
alpwirtschaftliche Nutzflächen	0	0	0	0
extensive Wiesen und Weiden	0	0	0	0
wenig intensive Wiesen	0.9	0.003	0.08	4.5
Dauerwiesen und Heimweiden	1.8	0.006	0.15	9.0
Obstbau	1.8	0.006	0.15	9.0
Kunstwiesen	1.8	0.006	0.15	9.0
offenes Ackerland	1.2	0.004	0.1	6.0
Rebbau	1.2	0.004	0.1	6.0
Gartenbau	1.2	0.004	0.1	6.0

Die aufgeführten Mittelwerte wurden als Ausgangswerte flächendeckend für das ganze Untersuchungsgebiet verwendet und mit folgenden Korrekturfaktoren regional angepasst:

$$\begin{aligned}
 & \text{Schwermetallausgangswert (\mu g P/l)} \times \text{Hofdüngerfaktor} \\
 & \times \text{Graslandintensitätsfaktor} \\
 & \times \text{Ackerlandintensitätsfaktor} \\
 & = \text{Schwermetallkonzentration (\mu g P/l)}
 \end{aligned}$$

Die berechneten Konzentrationen wurden mit der jeweiligen berechneten Oberflächenabflussmenge für jede Hektare aus HÜRDLER et al. (2015) verrechnet. Gewässeranschluss und Bodeneigenschaften wurden bereits bei der Berechnung der Oberflächenabflussbildung berücksichtigt.

Hofdüngerfaktor:

Es wird davon ausgegangen, dass mit zunehmendem Hofdüngeranfall das Schwermetallabschwemmungsrisiko steigt. Diese vereinfachte Annahme wurde gemacht, da keine flächenhaften Angaben zu Ausbringungsart, -menge, -zeitpunkt, Gülleverdünnung und Standortgegebenheiten vorlagen. Der Hofdüngerfaktor wird nur auf Dauerwiesen, Heimweiden, Obstbau und Kunstwiesen angewendet und bezieht sich auf den gemeindespezifischen Hofdüngeranfall in kg Schwermetall / ha, der anhand der Tierzahlen der Betriebszählungsdaten (BFS 2010) für die düngbare Fläche berechnet wurde. Die berechneten Faktoren schwanken zwischen 1 und 1.2, da eine Düngung mit Hofdüngern immer ein Mehr an Schwermetallinput darstellt.

Graslandintensitätsfaktor:

Auf extensiv und wenig intensiv genutztem Grasland wird mit keiner bzw. verminderter Schwermetallabschwemmung gerechnet. Daher wurde der prozentuale Anteil an extensiven Wiesen und Weiden sowie wenig intensiven Wiesen an den Dauerwiesen aus den Betriebszählungsdaten (BFS 2010) für jede Gemeinde berechnet und mit den entsprechenden Konzentrationswerten aus obiger Tabelle verrechnet. Da die Lage der extensiven und wenig intensiven Flächen nicht bekannt ist, wird die berechnete mittlere Schwermetallkonzentration auf die gesamte Dauerwiesenfläche jeder Gemeinde umgelegt (Beispiel: Gemeinde x = 500 ha Dauergrasland, davon 390 ha intensive Dauerwiese, 100 ha wenig intensive Wiese und 10 ha extensive Wiese: Zinkkonzentration: $(390 \times 9 \mu\text{g Zn/l}) + (100 \times 4.5 \mu\text{g Zn/l}) + (10 \times 0 \mu\text{g Zn/l}) / 500 = 7.9 \mu\text{g Zn/l mg}$).

Ackerlandintensitätsfaktor:

Es wird davon ausgegangen, dass auf offenem Ackerland im Mittel weniger Gülle ausgebracht wird als auf Kunstwiesen, und dass es auf offenem Ackerland eher zu Bodenerosion kommt als auf Kunstwiesen. So wird ein Teil des abgeschwemmten Schwermetalls an Bodenpartikel gebunden und mit dem Erosionsmaterial ausgetragen. Daher wurde der Anteil an Kunstwiesen am gesamten Ackerland aus Betriebszählungsdaten (BFS 2010) für jede Gemeinde berechnet und mit dem entsprechenden Konzentrationswert aus obiger Tabelle verrechnet. Da die Lage der Kunstwiesen nicht bekannt ist bzw. von Jahr zu Jahr wechselt, wird die berechnete mittlere Schwermetallkonzentration auf die gesamte Ackerfläche jeder Gemeinde umgelegt (Beispiel: Gemeinde x = 500 ha Ackerland, davon 100 ha Kunstwiese und 400 ha offenes Ackerland: Zinkkonzentration: $(100 \times 9 \mu\text{g Zn/l}) + (400 \times 6 \mu\text{g Zn/l}) / 500 = 6.6 \mu\text{g Zn/l mg}$).

2.2 Ergebnisse

In der Schweiz beträgt der berechnete Schwermetallanfall in der Gülle pro Jahr rund 61 t Cu, 0.2 t Cd, 5 t Pb und 309 t Zn (Tab. 4). Über Ausscheidungen beim Rindvieh fallen die grössten Mengen an Schwermetallen in der Gülle an (im Mittel Cu = 76 %; Cd = 87 %; Pb = 95 %; Zn = 69 % in der Gülle aller Tierkategorien). Cd, Zn und Cu fallen infolge der hohen Zufuhr über Kraftfutter in der Schweinegülle in höheren Konzentrationen an, während Pb vom Rindvieh vor allem über das Raufutter aufgenommen wird. Die Werte sind verglichen mit den Berechnungen von CANDINAS et al. (1999) für 1995 bei Cu (95 t), Pb (8 t) und Zn (461 t) geringer, bei Cadmium dagegen höher (0.1 t). Unterschiede bei den Tierzahlen (verschiedene Erhebungsjahre) und Abnahme der Schwermetallgehalte im Tierfutter dürften für die Unterschiede verantwortlich sein. GÖTZ (2012) gibt dagegen massiv höhere Frachten – allerdings für den gesamten Hofdünger aller Tierkategorien inklusive Mist – an (460 t Cu; 26 t Pb; 2'800 t Zn).

Im REZGUS fallen zwischen 46 % (Pb) und 51 % (Zn) der gesamtschweizerischen Schwermetallfrachten aus Gülle an (Tab. 5). Zum Vergleich: beim Phosphor beträgt der Anteil 51 %.

Tabelle 4: Berechneter Schwermetallanfall über Rinder- und Schweinegülle in der Schweiz (kg pro Jahr)

in kg	Cu	Cd	Pb	Zn
Rindergülle	46'274 (76%)	191 (87%)	4'965 (95)	214'056 (69%)
Schweinegülle	14'970 (24%)	29 (13%)	288 (5%)	94'982 (31%)
Gesamt	61'244 (100%)	220 (100%)	5'253 (100%)	309'038 (100%)

Tabelle 5: Schwermetall- und Phosphorfrachten über Gülleanfall im REZGUS

und in der Schweiz (kg pro Jahr)

Stoff in kg	REZGUS	CH	% REZGUS
Cu	30'680	61'244	50
Cd	105	220	48
Pb	2'414	5'253	46
Zn	158'858	309'038	51
P	6'937'331	13'712'427	51

Die berechneten Ergebnisse für die Gülleabschwemmung stellen eine vereinfachte Abschätzung der Schwermetallmengen dar, welche von düngbaren Flächen (offenes Ackerland, Kunstwiese, Grasland, Obst- und Rebbau) abgeschwemmt werden, da eine Gülleapplikation nur auf solchen Flächen erfolgt. Die berechneten Verluste für die gesamte Schweiz sind für Zink mit rund 2.6 t am höchsten, während sie für die anderen Schwermetalle nur im Bereich zwischen 2.1 kg und 514 kg liegen (Tab. 6).

Tabelle 6: Schwermetall- und Phosphorverluste aus Gülleabschwemmung (in kg pro Jahr)

Stoff in kg	REZGUS	CH
Cu	243	514
Cd	0.98	2.1
Pb	20	42
Zn	1'233	2'626
P	192'842	412'861

Die über den Pfad Gülleabschwemmung direkt in Gewässer transportierte Schwermetallfracht beträgt weniger als 1 % der in der Gülle angefallenen Schwermetallmenge (Tab. 7). Der Verlustanteil ist deutlich geringer als beim Phosphor (rund 3 %), da beim Phosphor neben der direkten Gülleabschwemmung auch sogenannter bodenbürtiger Phosphor mit dem Oberflächenabfluss aus der mit Phosphor angereicherten obersten Bodenschicht verloren geht. In IKSR (2003) wurde für die Schweiz der prozentuale Oberflächenabflussanteil an der ausgebrachten Düngemittelmenge mit 1 % angenommen, für Deutschland und Frankreich mit 0.3 %. GÄCHTER et al. (1996) fanden für die Kleine Aa, dass rund 3 % des über Hofdünger ausgebrachten Phosphors ins Gewässer gelangte.

Tabelle 7: Anteil des Schwermetall- und Phosphoraustrags über Gülleabschwemmung am Anfall in der Gülle (in %)

	REZGUS	CH
Cu	0.8	0.8
Cd	0.9	0.9
Pb	0.8	0.8
Zn	0.8	0.8
P	2.8	3.0

Die räumliche Verteilung der berechneten Schwermetallabschwemmung über Gülle in die Gewässer der Schweiz zeigt Abbildung 1. Die Karte zeigt exemplarisch die Zn-Einträge. Das Verteilungsmuster der anderen Schwermetalle ist sehr ähnlich und auch die gelösten Phosphoreinträge über Abschwemmung (Abb. 26 in Hürdler et al. 2015) weisen eine ähnliche räumliche Verteilung auf. Schwerpunkte der Schwermetalleinträge über Gülle befinden sich in intensiv genutzten Graslandgebieten am Alpenrand, wo gleichzeitig hohe Hangneigungen und hohe Niederschläge vorhanden sind. Im östlichen Alpenvorland sind aufgrund der höheren Niederschläge die höchsten Werte zu finden.

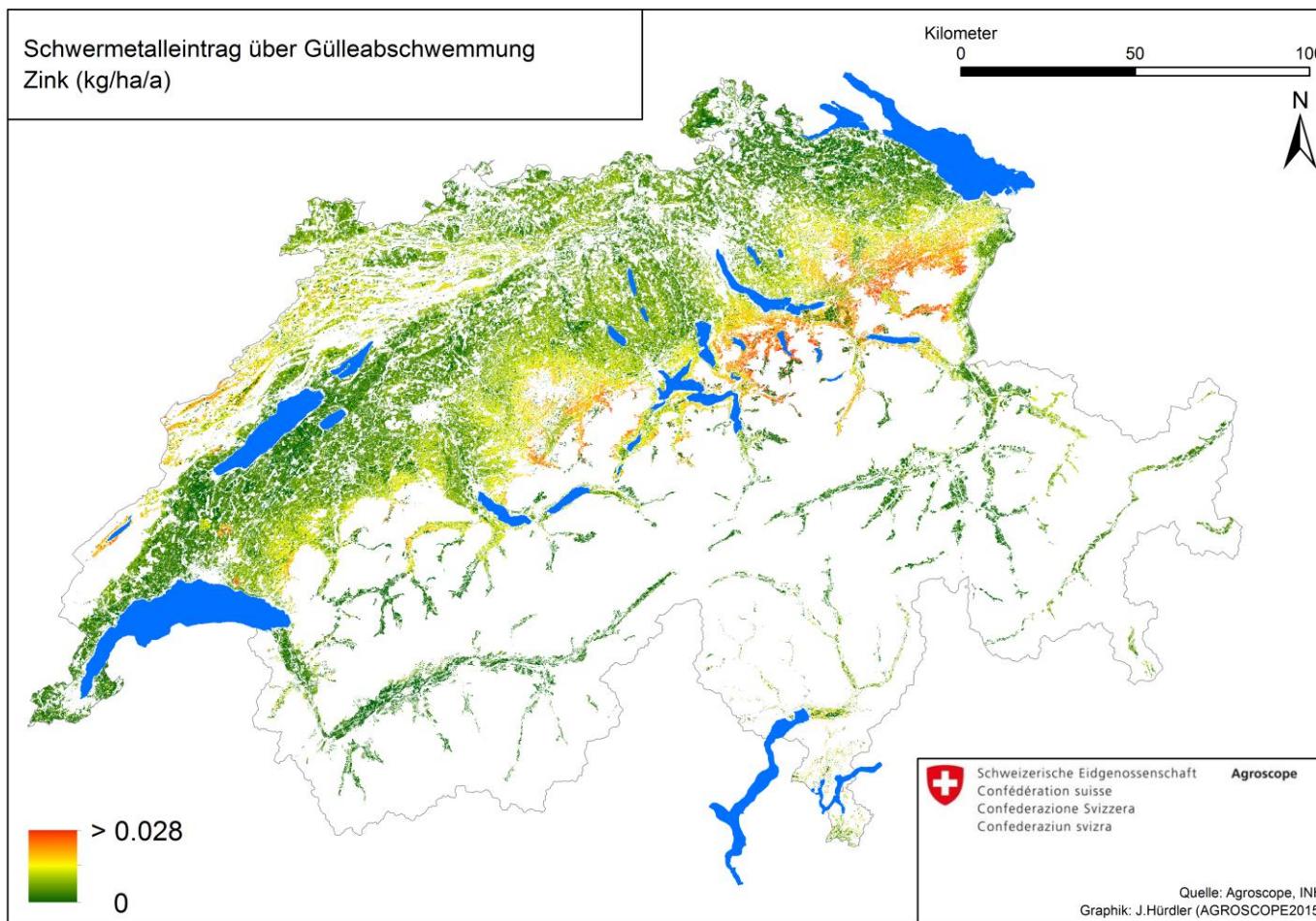


Abbildung 1: Zinkeintrag (kg/ha/a) in die Gewässer über Gülleabschwemmung von der düngbaren Fläche der Schweiz.

Tabelle 8: Mit MODIFFUS berechnete Schwermetallasträge über Gülleabschwemmung für das REZGUS und mittlere gemessene Schwermetall-Jahresfrachten im Rhein am Pegel Weil am Rhein
(* Pegel-Werte für Cadmium sind nur bis 2006 verfügbar)

MODIFFUS Schwermetallastrag aus Gülleabschwemmung		Pegel Weil am Rhein Mittlere Messwerte	% Anteil Gülle- abschwemmung an Gesamtfracht Pegel Weil am Rhein
Stoff in kg	REZGUS	Mittelwert 2005-2010	% Anteil 2005-2010
Cu	243	52'358	0.46
Cd	0.98	435	0.22
Pb	20	19'715	0.10
Zn	1233	81'720	1.51

Der Anteil an Schwermetallen, der über Gülleabschwemmung in die Oberflächengewässer des REZGUS gelangt, wurde mit den gemessenen Schwermetallfrachten in Weil am Rhein (NADUF 2012) verglichen (Tab. 8). Bei Pb ist der Anteil aus Gülleabschwemmung mit 0.1 %, bei Cd mit 0.2 % und bei Cu mit <0.5 % der Gesamtfracht vernachlässigbar. Bei Zn ist der Anteil aus der Gülleabschwemmung an der totalen Fracht mit 1.5 % sehr gering.

Bei Cu stammen nach Abschätzungen der IKS (2003) nur 33 % der totalen Einträge im REZGUS aus diffusen Quellen (= Landwirtschaft und natürliche Hintergrundlast, ohne kommunal diffuse Einträge). Drainage (46 %) und Bodenerosion (41 %) sind die wichtigsten diffusen Quellen. Oberflächenabfluss (Abschwemmung von Mineral- und Hofdüngern inklusive Konzentration im Oberflächenabflusswasser aus atmosphärischer Deposition) macht mit 10 % nur einen geringen Anteil aus. Bei Cd stammen 53 % der Einträge aus diffusen Quellen. Bei den diffusen Eintragsquellen sind die Einträge über Drainage mit 87 % die bedeutendste diffuse Eintragsquelle. Oberflächenabfluss trägt nur zu 2 % zu den gesamten diffusen Einträgen bei. Bei Pb stammen 52 % der Einträge aus diffusen Quellen. Wichtigste diffuse Eintragspfade sind Erosion (52 %) und Drainage (43 %). Die Einträge durch Oberflächenabfluss machen nur 2 % der diffusen Einträge aus. Bei Zn sind nur 42 % aus diffusen Quellen. Wichtigster Eintragspfad ist dabei die Drainage mit 77 %. Einträge über Oberflächenabfluss betragen nur 4 %.

Für Deutschland wurden mit dem Modell MONERIS die Verluste durch Gülleabschwemmung über den Pfad Oberflächenabfluss berechnet, der die Verluste über die Schwermetallkonzentrationen im Oberflächenabfluss sowie die Verluste durch Abschwemmung von Mineraldüngern, Hofdüngern und Klärschlamm umfasst (FUCHS et al. 2010). Dazu wurden zunächst die Aufwandmengen von Mineraldüngern und Hofdüngern sowie Klärschlamm auf Bundeslandebene erhoben. Anhand der Schwermetallgehalte in den Düngemitteln und im Klärschlamm wurden anschließend die auf die landwirtschaftlichen Nutzflächen aufgebrachten Schwermetallfrachten auf Bundeslandebene berechnet. Die Vorgehensweise sowie die zugrunde liegenden Schwermetallgehalte basieren auf FUCHS et al. (2002) und BÖHM et al. (2001). Der Anteil

der mit dem Oberflächenabfluss abgeschwemmten Düngemittel wurde nach Angaben der IKSR (2003) auf 0.3 % geschätzt. Exakte Zahlenangaben zu den Schwermetallverlusten über Abschwemmung sind Fuchs et al. (2002) zu entnehmen. Die gesamten Verluste über den Pfad Oberflächenabfluss liegen für Cd bei 7 %, für Cu bei 6 %, für Pb bei 5 % und für Zn bei 1 % der totalen punktuellen und diffusen Einträge. Der aus der Abschwemmung von Düngemitteln resultierende Frachtanteil an der Emission durch Oberflächenabfluss wird für Cd und Pb mit unter 15 % angegeben. Für Zn wurde ein Anteil von 22 % und für Cu von 29 % ermittelt. Daraus geschätzte Abschwemmungsverluste von Düngemitteln (Mineraldünger, Hofdünger und Klärschlamm) betragen ca. 1.1 % für Cd, 1.9 % für Cu, 0.8 % für Pb und 0.2 % für Zn an den totalen diffusen und punktuellen Schwermetallverlusten Deutschlands.

2.3 Schlussfolgerungen

Die abgeschätzten Frachten der Schwermetalle Cu, Cd, Pb und Zn die über Gülleabschwemmung in die Gewässer der Schweiz gelangen, sind insgesamt sehr gering. Sie machen für das REZGUS nur 1 % oder weniger der jeweiligen totalen gemessenen Frachten (punktuell und diffus) im Pegel bei Weil am Rhein aus. Damit liegen sie in der gleichen Größenordnung wie Abschätzungen aus Deutschland, die mit einem anderen Stoffflussmodell durchgeführt wurden, ergeben haben. Unsere Abschätzungen sind allerdings mit grossen Unsicherheiten behaftet, da keine Messdaten zur Gülleabschwemmung von Schwermetallen existieren. Weiterhin muss berücksichtigt werden, dass ausser bei Pb (48 %) und Cd (47 %) der grösste Teil der Emissionen an Schwermetallen aus punktuellen Quellen (Kläranlagen und Regenentlastungen) stammt.

Die berechneten Frachten stellen Durchschnittswerte (zeitlich und räumlich) für die Schweiz bzw. das REZGUS dar. Die räumliche Verteilung ist sehr heterogen. In kleinen Einzugsgebieten mit intensiver Graslandnutzung und hohem Tierbesatz ist bei grösseren Niederschlagsergebnissen durchaus mit höheren Schwermetalleinträgen über Gülleabschwemmung und entsprechenden Belastungen kleiner Fliessgewässer zu rechnen. Um diese detailliert zu berechnen sind aber andere Modelle als MODIFFUS zu verwenden. Dies war auch nicht Ziel der vorliegenden Studie.

3. Literatur

- BFS (2010): Landwirtschaftliche Betriebszählung 2010. Bundesamt für Statistik BFS, Neuenburg.
- Bosshard, C. (unveröffentlicht): Hofdüngerbeprobung (2010), Agroscope INH, Zürich.
- Böhm, E.; Hillenbrand, T.; Marscheider-Weidemann, F.; Schempp, C.; Fuchs, S. (2001): Bilanzierung des Eintrags prioritärer Schwermetalle in Gewässer. UBA-Texte 29/01, Umweltbundesamt Berlin, 130 S.
- Candinas, T., Chassot, G., Kupper, T., Menzi, H. Spiess, E. und J.-M. Besson (1999). Bodenbelastung durch Klärschlamm und andere Dünger. Agrarforschung 6 (8): 309-312.
- Fuchs, S., Scherer, U., Wander, R., Behrendt, H., Venohr, M., Opitz, D., Hillenbrand, T., Marscheider-Weidemann, F. & Götz, T. (2010): Berechnung von Stoffeinträgen in die Fliess-

gewässer Deutschlands mit dem Modell MONERIS. Nährstoffe, Schwermetalle und Polzykatische aromatische Kohlenwasserstoffe. UBA-Texte 45/2010, Umweltbundesamt, Berlin, 177 S.

Fuchs, S.; Scherer, U.; Hillenbrand, T.; Marscheider-Weidemann, F.; Behrendt, H.; Opitz, D. (2002): Schwermetalleinträge in die Oberflächengewässer Deutschlands. UBA-Texte 54/02, Umweltbundesamt, Berlin.

Gächter, R., Mares, A., Stamm, C., Kunze, U., Blum, J. (1996): Dünger düngt Sempachersee. Agrarforschung 3 (7), 329-332.

Götz, C.W. (2012): Mikroverunreinigungen aus Nutztierhaltung. Aqua & Gas 11, 52-59.

GRUDAF (2009): Grundlagen für die Düngung im Acker- und Futterbau. Agrarforschung 16 (2).

Hürdler, J., Prasuhn, V., Spiess, E. (2015): Abschätzung diffuser Stickstoff- und Phosphoreinträge in die Oberflächengewässer der Schweiz. MODIFFUS 3.0. Bericht zu Handen des BAFU. Agroscope, Zürich.

IKSR (2003). Rhein. Bestandsaufnahme der Emissionen prioritärer Stoffe 2000. Internationale Kommission zum Schutz des Rheins. 77 S.

Kupper, T., Bonjour, C., Achermann, B., Rihm, B., Zaucker, F., Menzi, H. (2013): Ammoniakemissionen in der Schweiz 1990-2010 und Prognose bis 2020. Bericht im Auftrag des BAFU, 110 S.

Menzi, H., Kessler, J. (1998): Heavy metal content of manures in Switzerland. In Martinez J. and Maudet M.N. (1998): Proc. of the FAO-Network on Recycling Agriculture, Municipal and Industrial Residues in Agriculture (RAMIRAN) conference, Rennes (F). Mai 1998. S. 495-506.

NADUF (2012): <http://www.eawag.ch/forschung/wut/schwerpunkte/chemieonwasserresourcen/naduf/datendownload> (Zugriff 28.11.2012)