

# Behandlung von Gleisabwasser unter besonderer Berücksichtigung von Glyphosat

Michael Burkhardt<sup>1</sup>, Alexander Englert<sup>1</sup>, Gunther Adolph<sup>2</sup>

<sup>1</sup> HSR Hochschule für Technik, Institut für Umwelt- und Verfahrenstechnik (UMTEC), Rapperswil, Schweiz

<sup>2</sup> SBB Schweizerische Bundesbahnen AG, Zürich, Schweiz

**Kurzfassung:** Mit abfließendem Niederschlagswasser können Glyphosat sowie Stoffemissionen aus dem Bahnbetrieb in Boden oder Gewässer gelangen. Ein entwickeltes, modulares Anlagenkonzept mit Adsorbersubstrat wurde unter realen Feldbedingungen erprobt. Das neue Mischsubstrat hielt in Laborversuchen > 90 % Glyphosat zurück. In der Anlage erreichte der Glyphosat-Rückhalt wiederum > 90 %. Dabei nahmen die Zulaufkonzentrationen von 2.7 µg/l Glyphosat innerhalb von drei Monaten bis unterhalb der Bestimmungsgrenze ab. Die Konzentrationen von Kupfer und Zink waren im Zulauf so gering, dass die Ablaufkonzentrationen ohne spezifische Verfahrensoptimierung nahe der Anforderungswerte für Gewässer lagen. Hohe Zulaufkonzentrationen von AFS traten bei Regen- und Trockenwetter auf. Die Ablaufkonzentrationen ergaben, dass der Feinanteil aber das Mischsubstrat passierte.

**Key-Words:** Gleisabwasser, Stoffemissionen, Glyphosat, Adsorberanlage

## 1 Einleitung

Im Betrieb und beim Unterhalt von Gleisanlagen können Schadstoffe mit dem Gleisabwasser in Boden und Gewässer gelangen. Im Wesentlichen sind Pflanzenschutzmittel aus dem Gleisunterhalt und partikuläre Stoffemissionen aus dem Betrieb zu erwarten [Osborne 2005, Burkhardt 2008, Myers 2011, Braun 2013].

Um die Gleise frei von Pflanzen zu halten, setzen die Schweizerischen Bundesbahnen (SBB) das Herbizid Glyphosat ein. Die Applikation von Glyphosat punktuell auf die Einzelpflanzen erfolgt im Frühling und Spätsommer mit einer Rückenspritze [BAV 2016]. Die regelmäßige chemische Vegetationskontrolle der Bahnanlagen gilt aus sicherheitsrelevanten und betriebstechnischen Gründen vorläufig als unverzichtbar.

Glyphosat ist ein nicht-selektives Blattherbizid, das sich durch hohe Wasserlöslichkeit (12 g/l bei +25 °C) und ionischen Charakter auszeichnet. Der Wirkstoff liegt zwischen pH 3 und 12 als Anion in ein-, zwei- oder dreiwertiger Form vor und bindet vor allem

an Aluminium- und Eisenoxiden (Vereecken 2005). Der Rückhalt nimmt aber mit steigendem pH-Wert ab.

Bei Regenwetter wurden zwischen 1 bis 120 µg/l Glyphosat im Gleiswasser nachgewiesen [Pfeffer 1996, Ehses 2008]. Eine Beeinträchtigung durch Kupfer, Zink und Chrom ist ebenfalls für kleine Fließgewässer (<10 l/s) zu erwarten.

Den Behandlungsbedarf von Gleiswasser definiert in der Schweiz eine Richtlinie unter Berücksichtigung der Lage der Gleise (Bahnhof oder offene Strecke), den Gesamtbruttoregistertonnen pro Tag und Gleis und bei Höhenlage (Vegetationsdruck) [BAV 2014]. Abschnitte mit > 100'000 BRT und Pflanzenschutzmittelausbringen führen zu einer mittleren bis hohen Belastung. Im Gelbdruck vom Arbeitsblatt DWA-A A102 wird sogar Gleisabwasser per se als stark belastet eingestuft.

Die Gleiswasserbehandlung ist vor allem dort sinnvoll, wo Belastungsschwerpunkte an kleinen Fließgewässern zu erwarten sind. Um über eine technische Option zur Minimierung des Eintrags von Glyphosat, aber auch von Kupfer, Zink und AFS, zu verfügen, wurde für die SBB ein Anlagenkonzept entwickelt und getestet. Für die Behandlung von Niederschlagswasser mit Adsorberanlagen ist in der Schweiz eine neues Prüfverfahren festgelegt worden [Burkhardt 2017b].

## **2 Labortests**

### **2.1 Säulenversuche**

Ein bekanntes Substrat AD-R (D-Rainclean CH, Funke Kunststoffe, Hamm-Uentrop) ist bereits erfolgreich in einer Regenwasseranlage im Einsatz und wurde als Referenzmaterial genutzt [Burkhardt 2017a]. Enthalten sind u.a. granulierte Aktivkohle (GAK) und granuliertes Eisenhydroxid (GEH). Das zweite Substrat stellt eine Neuentwicklung für die Gleisentwässerung dar (AD-N), die gezielt auf den Rückhalt von Glyphosat sowie die betriebstechnischen Anforderungen ausgerichtet ist. Spezielle Substratbestandteile sichern die Leistungsmerkmale und Wirtschaftlichkeit. Die gesättigte Wasserdurchlässigkeit ist mit  $K_f 2.3 \times 10^{-3}$  m/s als hoch einzustufen.

In Säulenversuchen wurden in Anlehnung an die neue Leistungsprüfung die Materialien in drei Testabschnitten bei 8.95, 2.15, 0.895 m/h beschickt. Die Testlösung enthielt 0.5 mg/l oder 0.05 mg/l Glyphosat und je VSA-Leitsubstanz (Kupfer, Zink, Diuron, Mecoprop) und war bei pH 6 oder pH 8 gepuffert.

In Aliquoten der Sammelproben wurden pH-Wert und elektrische Leitfähigkeit bestimmt. Glyphosat, AMPA, Diuron und MCPP wurden mit LC-MS/MS bei einer Bestimmungsgrenze von 0.02 µg/l quantifiziert. Der Gesamtgehalt und die gelöste Fraktion von Kupfer und Zink wurden mit ICP-MS bestimmt.

## 2.2 Laborresultate

Das Referenzmaterial AD-R erreichte 50 % Glyphosat-, 80 % Diuron/MCPP- und 70 % Kupfer/Zink-Rückhalt (Fig. 1). Das neue Mischsubstrat AD-N weist eine deutlich höhere Leistungsfähigkeit bezogen auf die Pestizide auf. MCPP, eine polare Substanz mit ungünstigem Bindungsverhalten, stach mit 80 bis 99 % Rückhalt besonders hervor. Generell ließ sich Glyphosat bei der geringen Konzentration (0.05 mg/l) mit pH 6 um einen Faktor 100 (99 %) und pH 8 noch um einen Faktor 10 (90 %) entfernen. Auch bei der höchsten Filtergeschwindigkeit mit 8.95 m/h wurden auf 15 cm Säulenlänge rund 93 % Glyphosat zurückgehalten. Damit ist das neue Substrat beim Glyphosat-Rückhalt, bezogen auf die jeweiligen Testabschnitte und unter gleichen Versuchsbedingungen, rund 50 % leistungsfähiger als das bereits sehr leistungsstarke Adsorbermaterial AD-R.

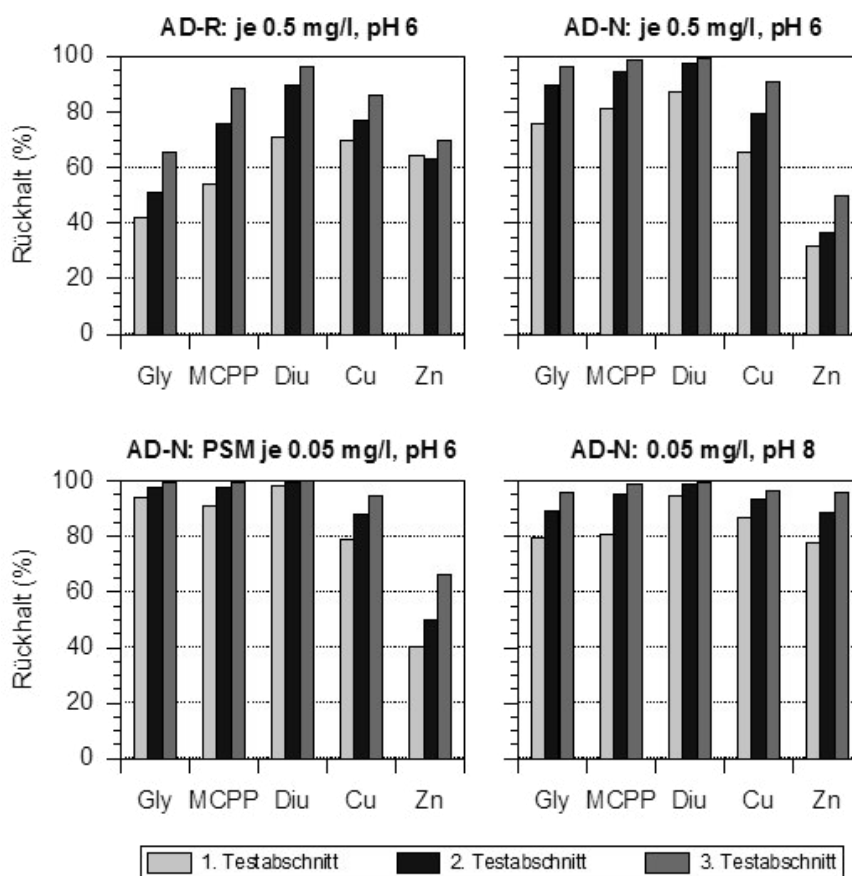


Abbildung 1: Rückhalt von Glyphosat (Gly), Mecoprop (MCPP), Diuron (Diu), Kupfer (Cu) und Zink (Zn) in den vier Säulenversuchen mit folgenden Filtergeschwindigkeiten: 1. Testabschnitt 8.95 m/h, 1. Testabschnitt 2.15 m/h, 3. Testabschnitt 0.895 m/h. Material AD-R: Referenzmaterial (links oben), AD-N: neues Adsorbersubstrat.

Die Bindung von Kupfer war für beide Materialien mit ca. 70 bis 95 % gleich gut. Zink wurde bei pH 6 nur zwischen 32 und 50 % zurückgehalten. Hierbei kommt zum Tragen, dass kein Karbonat zugesetzt ist, welches den pH-Wert anhebt und Zink folglich

ausfällt. Bei pH 8 verbessert sich der Schwermetallrückhalt für AD-N auf > 90 %, weil im leicht alkalischen Milieu das gelöste Kupfer vollständig und Zink zu mehr als Zweidritteln ausfallen. Dadurch liegen die Metalle ungelöst vor und werden vermutlich durch das Mischsubstrat herausgefiltert.

### **3    Behandlungsanlage**

#### **3.1    Standort und Projektierung**

Der Standort für die Pilotinstallation befindet sich beim Bahnhof Gelterkinden im Kanton Basel-Landschaft. Ein Zugverkehrsaufkommen von täglich 102'000 Gesamtbruttotonnen und der Einsatz von Glyphosat lassen eine hohe Belastung im Gleisabwasser erwarten.

Die dränierte Gleisfläche umfasst 5'280 m<sup>2</sup>. Der berechnete Abfluss von 46 l/s ist aus der angeschlossenen Fläche mit einem angenommenen Abflussbeiwert von 0.5 für Niederschlagsereignisse mit 2-Jährlichkeit und 15 min Dauer hergeleitet.

Die entwickelte Behandlungsanlage für einen bestehenden unterirdischen Betonschacht (2 x 2.5 x 3 m, L x B x H) umfasste acht Gitterboxen mit neuartigen Filtertaschen. In die Taschen wurde das neue Adsorbersubstrat AD-N rund 40 cm hoch eingefüllt (je 100 l). Die Substratoberfläche umfasste 0.32 m<sup>2</sup> pro Box. Das modulare Anlagenkonzept ist so ausgelegt, dass es sich auf andere neue oder bestehende Gleisentswässerungsanlagen anpassen lässt.

Um eine „Worst-Case“ Situation bezogen auf die hydraulische und stoffliche Belastung zu untersuchen, erfolgte die Zuführung des Gleiswassers ungedrosselt und ohne Vorabscheidung.

Die Zuflussmenge der Anlage wurde in einem Doppelrechteckgerinne mit Ultraschall erfasst (STEBATEC, Brügg). Zwei automatische Probenehmer waren am Zu- und Abfluss der Filterboxen positioniert. Je 1 m<sup>3</sup> Zufluss wurde eine Teilproben in eine Sammelflasche überführt. Insgesamt wurden sieben Sammelproben vom Zu- und Ablauf genommen. Die Anlage wurde mit dem Prozessleitsystem ARAbella (STEBATEC, Brügg) überwacht, die Probenahmen ausgelöst und der Zufluss in Echtzeit dargestellt.

Der pH-Wert, die elektrische Leitfähigkeit und die Temperatur wurden vor Ort manuell mit Feldmessgeräten gemessen. In Stichproben vom Zufluss sowie sechs Sammelproben des Zu- und Abflusses wurden AFS gravimetrisch und die Stoffe Glyphosat, AMPA, Kupfer und Zink mit den gleichen Methoden wie die Laborproben analysiert.

Vor der Glyphosat-Applikation wurde eine Referenzsammelprobe entnommen, die einen Abfluss von rund 11 m<sup>3</sup> über vier Tage repräsentiert, um eine mögliche Hintergrundbelastung zu erfassen. Diese Referenzmessung ergab Glyphosat- und AMPA-Konzentrationen unterhalb der Bestimmungsgrenze.

### 3.2 Feldresultate

Über 142 Versuchstage (1.5. bis 20.9.2017) wurden rund 1070 m<sup>3</sup> Gleisabwasser behandelt, davon seit der Glyphosat-Anwendung während 115 Tagen rund 550 m<sup>3</sup> Abwasser (Abb. 2). In dieser Zeitspanne fielen 270 mm Niederschlag.

In der Versuchsdauer wurden 10 eindeutig messbare Abflussereignisse mit 0.5 bis 1.0 l/s aufgezeichnet, die je 20 bis 57 m<sup>3</sup> und zusammen rund 70 % des Gesamtabflusses umfassten (Abb. 2, Tab. 1). Bei sieben Ereignissen lagen Spitzenabflüssen von 5 bis 7 l/s vor. Die zeitliche Verzögerung der Abflussbildung, ca. 1 h nach Regenbeginn, und das lange Nachklingen unterstreichen die Retentionswirkung des Gleiskörpers und die langen Fließwege mit geringem Gefälle bis zur Behandlungsanlage.

Der Zufluss zur Anlage lag im Mai stets zwischen 0.06 und 0.1 l/s und sank im Juni auf <0.02 l/s (Fig. 5). Dieser Zufluss war für rund 30 % des gemessenen Gesamtzuflusses verantwortlich und dürfte einerseits auf die Retentionswirkung, andererseits auch auf Hangwasser von Böschungen entlang der Gleise zurückzuführen sein. Erst ab Juli war aufgrund der geringen Niederschlagsmengen und höheren Lufttemperaturen (= höhere Verdunstung) kein Trockenwetterzufluss messbar.

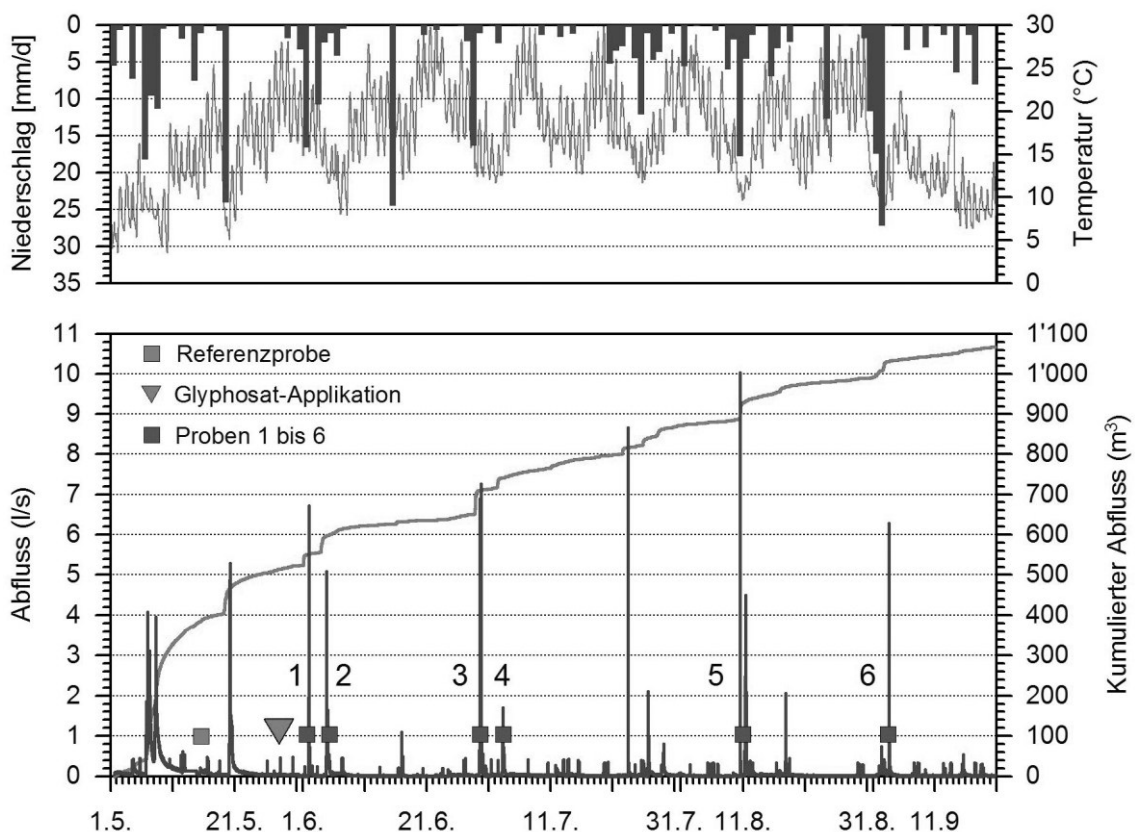


Abbildung 2: Niederschlag (mm/d) und Temperatur (°C/h) (oben), Abfluss (l/s) und kumulierter Abfluss (m<sup>3</sup>) (unten) über die Versuchsdauer.

Die mittlere Filtergeschwindigkeit, berechnet aus dem Zufluss der Abflussereignisse auf der Filterfläche von allen Boxen, lag bei rund 1.5 m/h. Diese Geschwindigkeit liegt im Bereich vom zweiten Testabschnitt des Säulenversuchs mit 2.15 m/h.

Die Wasserdurchlässigkeit von zwei Substratboxen ging durch oberflächennahe, ockerfarbene Ablagerungen zurück. Durch Kamerabilder liess sich nachweisen, dass bei zwei Abflussspitzen zwei Boxen kurzzeitig überliefen (2./4. Probenahme). Deshalb wurden die Ablagerungen manuell aufgelockert, sodass das Wasser wieder ungehindert versickerte. Der hydraulische Wirkungsgrad der Anlagen betrug trotz der zwei Überlaufereignisse > 90 %.

Mit den analysierten sechs Sammelproben nach der Applikation wurden rund 50 % der gesamten und rund 80 % der regengetriebenen Abflussmenge erfasst. Ein größeres und drei kleinere Abflussereignisse wurden nicht analysiert (Abb. 3).

Die Zulaufkonzentrationen in den Sammelproben starteten mit 2.7 µg/l Glyphosat im ersten Abflussereignis drei Tage nach der Applikation und nehmen über die weiteren fünf analysierten Ereignisse bis in den Bereich der Bestimmungsgrenze ab (6. Probe 0.03 µg/l) (Abb. 3). Die erste Probe deckte rund 50 % der Gesamtfracht von 127 mg Glyphosat ab. Durch die drei letzten Ereignisse kamen weniger als 5 % Fracht hinzu.

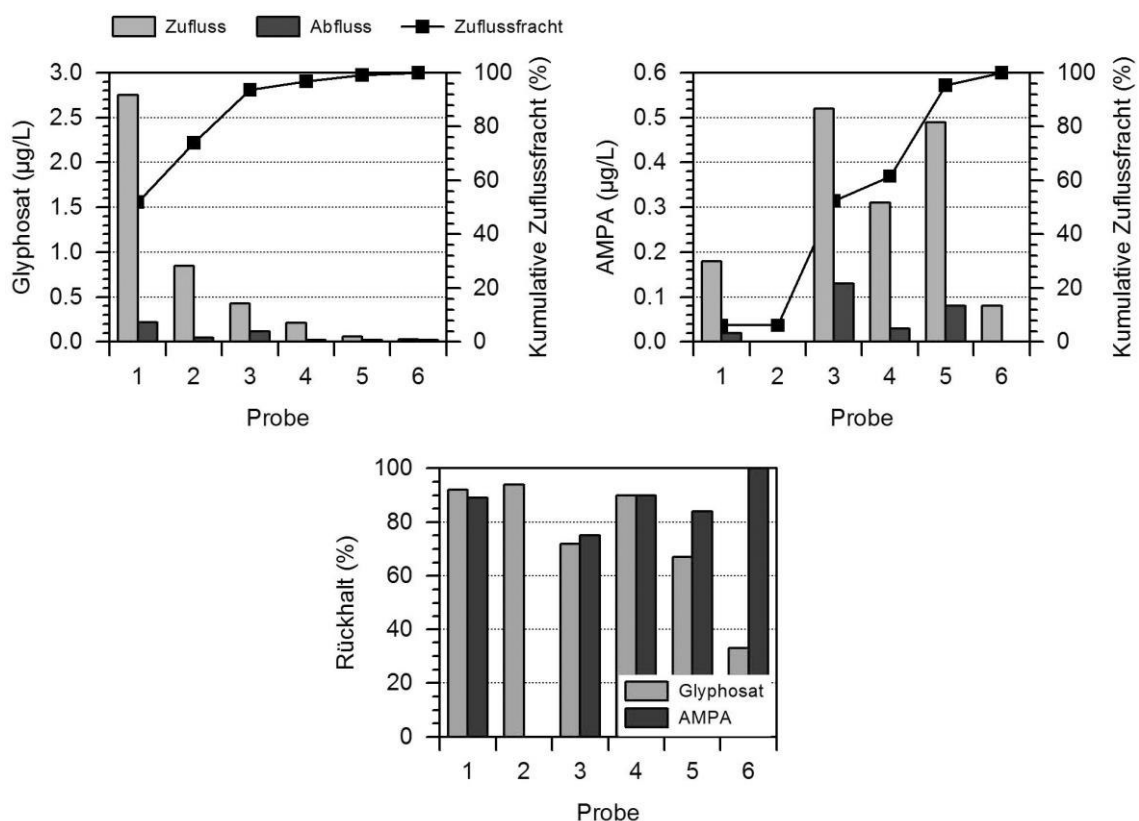


Abbildung 3: Konzentrations- und Frachtverlauf (oben) und Rückhalt von Glyphosat und AMPA (unten) über sechs analysierte Abflussereignisse.

Anders hingegen verlief der Konzentrations- und Frachtverlauf vom Abbauprodukt AMPA. Der mikrobielle Abbau von Glyphosat im Gleisbett ließ die Konzentrationen vom ersten Ereignis zum zweiten zunächst steigen und diese gingen erst mit dem letzten Ereignis, rund drei Monate nach der Applikation, in den Bereich der Bestimmungsgrenze zurück (Abb. 3). Alleine die dritte Abflussprobe umfasste rund 45 % der ausgetragenen Fracht in Höhe von 65 mg AMPA.

In anderen Untersuchungen wurde bis 120 µg/l Glyphosat nachgewiesen. Diese Konzentrationen wurden stets im ersten Abflussereignis gefunden, insbesondere nach Starkregen. Auch wenn derart hohe Konzentrationen in Gelterkinden nicht nachweisbar waren, trat die höchste Konzentration bzw. Fracht ebenfalls in der ersten Abflussprobe auf.

Der Stoffrückhalt (in Prozent) der Anlage ergibt sich aus der Differenz von Zu- und Ablaufkonzentration. Der Glyphosat-Rückhalt erreichte beim ersten, zweiten und vierten Abflussereignis > 90 % und bei AMPA vergleichbar hohe Rückhalte (Abb. 3). Die geringeren Eliminationen beim dritten und fünften Ereignis hängen mit dem Überlaufen der zwei Filterboxen zusammen (s.o.), wodurch unbehandeltes Gleisabwasser in den ablaufseitigen Probennehmer gelangte. Beim sechsten und letzten analysierten Ereignis liegen die Glyphosat-Konzentrationen im Zu- wie auch Ablaufwasser im Bereich der Bestimmungsgrenze, sodass der analytische Fehler eine verlässliche Bilanzierung nicht mehr zulässt. Die berechneten 33 % Rückhalt sind folglich nicht aussagekräftig für die Leistungsfähigkeit.

Nach der Vollstrombehandlung lag die Ablaufkonzentration des ersten Ereignisses mit 0.22 µg/l Glyphosat bereits vor der Einleitung ins Gewässer im Bereich des Anforderungswerts der Schweizer Gewässerschutzverordnung von 0.1 µg/l pro Pestizid. In allen weiteren Proben wurde ablaufseitig diese Anforderung unterschritten. Auch für AMPA, dem Abbauprodukt des Glyphosats, wurde dieser Anforderungswert stets erreicht.

Die mit sechs Abflussereignissen auf die Anlage transportierte Fracht von 127 mg Glyphosat übersteigt die AMPA-Fracht (65 mg) um das Doppelte (Tab. 1). Unter Berücksichtigung der Adsorptionskapazität von der eingebauten adsorptionsrelevanten Substratmenge lassen sich bei 5 % Bindung theoretisch rund 12 kg Glyphosat zurückhalten. Die Kapazität würde Jahrzehnte ausreichen. Folglich ist eine lange Standzeit möglich, sofern nicht andere Stoffe, wie gelöster organischer Kohlenstoff (DOC), durch übermäßige konkurrierende Sorption die Kapazität deutlich herabsetzen. Um demnach die stoffliche Leistungsfähigkeit für lange Zeit sicherzustellen, ist bei hohen AFS-Frachten – die bei Gleisabwasser die Ausnahme darstellen – eine gute Vorabscheidung wichtig.

Die Zulaufkonzentrationen von Kupfer mit 10 bis 50 µg/l und Zink mit 50 bis 170 µg/l Gesamtgehalt waren gering (Abb. 4), sodass die Ablaufkonzentrationen im Bereich der numerischen Anforderungen für Oberflächengewässer von 5 µg/l Kupfer (gesamt) und 20 µg/l Zink (gesamt) lagen.

Der pH 8 im Gleisabwasser unterstreicht, dass der wesentliche Anteil vom Kupfer, teilweise auch vom Zink, ungelöst vorlag. Außerdem ist bekannt, dass Zink und Kupfer als Abrieb des rollenden Bahnverkehrs emittieren. Aus diesem Grund wirkt das grobkörnige Mischsubstrat AD-N nicht nur als Adsorber, sondern auch als Filter zum Rückhalt solcher Partikel. Aufgrund dessen schwankte der Schwermetallrückhalt deutlich und erreichte maximal rund 70 % (Abb. 4).

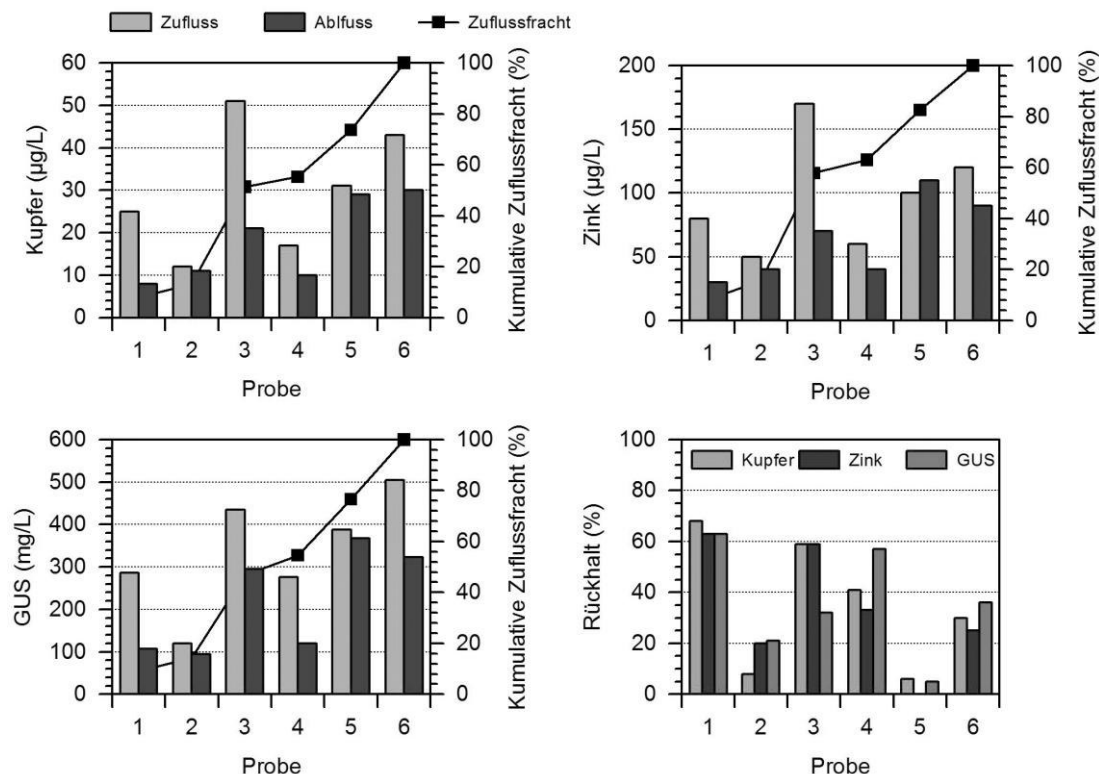


Abbildung 4: Konzentrations- und Frachtverlauf von Kupfer (links oben), Zink (rechts oben) und AFS (rechts) über sechs analysierte Abflussereignisse.

Im Gleisabwasser ist in der Regel mit einem sehr geringen AFS-Gehalt zu rechnen (<20 mg/l) [Burkhardt 2008]. Die Zulaufkonzentrationen von ca. 100 bis 500 mg/l AFS sind deshalb für Gleiswasser unerwartet hoch (Abb. 4). Anzunehmen ist, dass die Partikelmenge einerseits durch Hangwasser herangeführt, andererseits durch Stopfarbeiten im Gleis (Abrieb vom Schotter) erzeugt wurde. Die Partikelgrößenverteilung zwischen 1 bis 100 µm ( $D_{50}$  10 µm) unterstreicht den hohen Feinanteil.

Bei einer mittleren Konzentration von 240 mg/l AFS in rund 1070 m<sup>3</sup> Zulaufwasser und durchschnittlich 36 % Rückhalt wurden rund 95 kg AFS, bei Einzelereignissen bis 25 kg AFS, zurückgehalten (Tab. 1). Im Ablaufwasser waren dennoch hohe AFS-Konzentrationen nachweisbar, weil der Feinanteil vom AFS durch die grobkörnige Struktur des Filtermaterials hindurch transportiert wurde. Die Zulaufkonzentrationen von AFS korrelierten dabei mit den Schwermetallkonzentrationen.



Tabelle 1: Berechnete Fracht für die analysierten sechs Zuflussereignisse.

Probe	Zufluss (m <sup>3</sup> )	Glyphosat		AMPA		Zink		Kupfer		AFS	
		(µg/l)	(mg)	(µg/l)	(mg)	(µg/l)	(g)	(µg/l)	(g)	(mg/l)	(kg)
1	24	2.75	66	0.18	4	80	1.9	25	0.6	286	7
2	33	0.85	28	<0.02	<1	50	1.7	12	0.4	120	4
3	57	0.43	25	0.52	30	170	9.7	51	2.9	436	25
4	20	0.21	4	0.31	6	60	1.2	17	0.3	276	6
5	45	0.06	3	0.49	22	100	4.5	31	1.4	388	17
6	36	0.03	1	0.08	3	120	4	43	2	504	18
<b>Gesamt</b>	<b>215</b>		<b>127</b>		<b>65</b>		<b>23</b>		<b>7.6</b>		<b>77</b>

Anders verhielt es sich bei der hydraulisch limitierenden Ablagerung auf den zwei Filterboxen, die den AFS-Rückhalt erhöhte. Nachdem diese zweimal entfernt wurden, nahm die Durchlässigkeit wieder zu und der AFS-Rückhalt sank auf 21 % bzw. 5 %.

#### 4 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Mit dem modularen Anlagenkonzept (Boxen, Filtertaschen) und neuen Adsorbermaterial AD-N lässt sich Gleisabwasser erfolgreich behandeln. Der Glyphosat-Rückhalt von > 90 % im Labortest bedeutet, dass die Schweizer VSA-Anforderung „Erhöht“ (grün) erfüllt ist. Im Feldtest wurde auf Grundlage des frachtgemittelten Wirkungsgrads der hohe Rückhalt > 90 % für Glyphosat und AMPA selbst ohne Vorabscheidung und bei ungedrosselter Beschickung der Anlage bestätigt.

Der Rückhalt vom gelösten Kupfer (80 %) und Zink (40 %) im Labortest ist mit dem eingesetzten Substrat befriedigend, weil die Metalle im Gleisabwasser überwiegend aus Abrieb in partikulärer Form und geringen Konzentrationen auftreten. Durch pH 8 im Gleisabwasser wird zudem ein Teil der gelösten Metallfraktion in die ungelöste Form überführt und wie Abriebpartikel im Mischsubstrat teils zurückgehalten.

Damit ist die neue Technologie nicht nur für die SBB eine attraktive Technologie, sondern auch für andere Eisenbahngesellschaften. Bei der Prüfung der Verhältnismäßigkeit einer solchen technischen Maßnahme ist zu berücksichtigen, dass sich diese Anlage mit geringem Aufwand erstellen und betreiben lässt. Die reinen Materialkosten für 100 L Mischadsorber, entsprechend einer Boxfüllung mit 40 cm Schichthöhe, liegen zusammen mit der Box und Filtertasche bei rund 1000.- Euro (Funke Kunststoffe GmbH, Hamm-Uentrop).

Um Unterhalt und Betriebskosten bei Anlagen zum ausschließlichen Glyphosat-Rückhalt weiter zu minimieren sowie die Standzeit zu verlängern, kann eine temporäre Beschickung, beispielsweise nur für vier Monate nach Applikation (die Termine sind bekannt), vorgesehen werden.

Das Mischsubstrat ist gemäß Hersteller geeignet, Gleisabwasser bis rund 100 mg/l AFS ohne Vorabscheidung zu behandeln. Höher belastetes Gleisabwasser ist dagegen vorzubehandeln, um die Kolmation zu reduzieren und die hydraulische Leistungsfähigkeit zu erhalten.

## 5 Literatur

- BAV (2014): Richtlinie Entwässerung von Eisenbahnanlagen. Schweizer Bundesamt für Verkehr, Bern.
- BAV (2016): Richtlinie - Chemische Vegetationskontrolle auf und an Gleisanlagen. Schweizer Bundesamt für Verkehr, Bern, 19 Seiten.
- Braun C., Gälli R. und Kammer C. (2013): Belastung durch Gleisabwasser. Aqua und Gas, 7/8:40-49.
- Burkhardt M., Rossi L. und Boller M. (2008): Diffuse release of environmental hazards by railways. Desalination, 226:106-113.
- Burkhardt M., Schmidt S., Gohl M., Zenker A., Schmocker M., Zbinden D., Loretz A., Bigler R. und Boller M. (2017a): Behandlung von Regenwasser - Grosstechnische Erfahrung mit unterirdischer Retention und nachgeschaltetem Adsorberfilter. Aqua und Gas, 4:78-85.
- Burkhardt M., Schmidt S. und Bigler R. (2017b): VSA-Leistungsprüfung – Leistungsermittlung im Labor- und Feldtests für Anlagen zur Niederschlagswasserbehandlung . Aqua & Gas, 11:33-41.
- Ehse H., Schmidt B., Urban P. und Zietz E. (2008): Langzeitstudie: Auswirkungen des Herbizideinsatzes im Gleisbereich der DB AG unter besonderer Berücksichtigung des Grundwasserschutzes (1993 - 1998). Institut Fresenius, Taunusstein, 170 Seiten.
- Hanke I., Bohnenblust S., Singer H., Stamm C. und Müller A. (2009): Pflanzenschutzmittel im Gleisabwasser. Gas, Wasser, Abwasser GWA, 7:1-8.
- Myers B. und Pezzaniti D. (2011): The Nature and Significance of Runoff Pollution in Railway Corridors – Literature Review. University of South Australia, 48 Seiten.
- Osborne M. und Montague M. (2005): The potential for water pollution from railways. Report CIRIA C643, CIRIA, London/UK, 20 Seiten.

Pfeffer M. (1996): Prüfung der Umweltbelastung durch den Herbizideinsatz auf Gleisanlagen der ÖBB. Bericht, 5/673, Institut für Bodenforschung und Baugeologie, Wien, 76 Seiten.

Vereecken H. (2005): Mobility and leaching of glyphosate: A review. Pest Management Science 61(12):1139-1151.

### **Korrespondenz an:**

Michael Burkhardt, Prof. Dr.  
Oberseestrasse 10  
Tel.: +41 55 222 4870  
E-Mail: michael.burkhardt@hsr.ch