

BEHANDLUNG VON GLEISABWASSER

BAU UND BETRIEB EINER NEUARTIGEN PILOTANLAGE

Zur Behandlung von verschmutztem Gleisabwasser wurde ein neues Anlagenkonzept entworfen und gebaut sowie dessen Leistungsfähigkeit ermittelt. Das entwickelte Adsorbiermaterial zeichnet sich durch einen hohen Stoffrückhalt aus, der in Labortests sowie im Feld bestätigt wurde.

Michael Burkhardt*, HSR Hochschule für Technik Rapperswil
Alexander Englert, HSR Hochschule für Technik Rapperswil
Gunter Adolph, SBB Schweizerische Bundesbahnen AG

RÉSUMÉ

TRAITEMENT DES EAUX USÉES DES RAILS – CONSTRUCTION ET EXPLOITATION D'UNE INSTALLATION PILOTE

Les Chemins de Fer Fédéraux CFF, de même que tous les autres exploitants d'infrastructures ferroviaires, utilisent l'herbicide glyphosate pour l'entretien des voies. Avec l'écoulement des eaux pluviales, le glyphosate et les autres émissions polluantes de l'exploitation ferroviaire peuvent s'infiltrer dans le sol ou dans les eaux de surface par le drainage des voies. En Suisse, le traitement des eaux usées des rails dépend de la classe de contamination, du secteur de protection des eaux et du taux de dilution. Pour le traitement des eaux usées des rails, les matériaux artificiels adsorbants représentent une alternative intéressante aux filtres de fond occupant de vastes surfaces.

Dans le cadre d'un projet, un concept d'installation avec substrat d'adsorption a été développé et testé dans des conditions réelles de terrain à Gelterkinden. Dans un premier temps, des essais en colonne ont été réalisés, puis une installation pilote a été construite et son efficacité testée en cours d'exploitation. Les colonnes ont été remplies d'une solution de contrôle (cuivre, zinc, mécoprop, diuron, glyphosate) à trois vitesses de filtration. Le concept modulaire d'installation était composé de caissons grillagés équipés de sacs de filtrage et remplis de 40 cm de substrat composite. Des préleveurs-échantillonneurs automatiques étaient installés au niveau de l'alimentation et de l'évacuation. Les concentrations, flux de substances et le rendement ont été

HINTERGRUND

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 [1, 2]. Auch im Ausland wurden mehrere Studien zur generellen Stoffbelastung durch den Eisenbahnbetrieb und -unterhalt publiziert [3-6].

Um die Gleislänge von mehr als 7600 km frei von Pflanzen zu halten, setzen die Schweizerischen Bundesbahnen (SBB) seit 1992 das Pflanzenschutzmittel Glyphosat für den Gleisunterhalt ein. Die Applikation von Glyphosat punktuell auf die Einzelpflanzen (Einzelpflanzenbehandlung) mit einem Maximalaustag von 0,29 g/m² im Schotterbett und Bankett erfolgt ein- bis zweimal im Jahr (Frühling, Spätsommer) mit einer Rückenspritze (Fig. 1). Die Richtlinie des Bundesamts für Verkehr (BAV) zur chemischen Vegetationskontrolle auf und an Gleisanlagen legt die Rahmenbedingungen fest für den Einsatz von Glyphosat und ggf. Triclopyr [7]. Die regelmäßige chemische Vegetationskontrolle der Bahnanlagen gilt aus sicherheitsrelevanten und betriebstechnischen Gründen vorläufig als unverzichtbar. Die Menge bei den SBB umfasst rund 1% (3 t/a) vom gesamtschweizerischen Glyphosat-Verbrauch in Höhe von rund 300 Tonnen pro Jahr. Im internationalen Ver-

* Kontakt: michael.burkhardt@hsr.ch

(Titelbild: ©nitikorn/123rf.com)

gleich ist die SBB Spitzenreiter bei der Minimierung des Herbizidverbrauchs: Pro Gleiskilometer verbraucht die SBB etwa 50% weniger Herbizid als andere Bahnen.

Mit abfließendem Niederschlagswasser kann Glyphosat über die Gleisentwässerung in Boden oder Oberflächengewässer gelangen [2, 8, 9]. Zur Belastung des Gleiswassers durch die chemische Vegetationskontrolle sind auch in Nachbarländern Studien durchgeführt worden [10, 11]. Eine wesentliche Erkenntnis ist, dass bei Regenwetter rund 1 bis 120 µg/l Glyphosat im Gleiswasser zu erwarten sind, vor allem in den ersten Abflussereignissen nach der Applikation.

Daneben liegen Hinweise zur Belastung von Gleiswasser durch Schwermetalle, teils auch Kohlenwasserstoffe, vor [1, 2]. Eine Beeinträchtigung vom Gleisabwasser durch Kupfer, Zink und Chrom wird für kleine Fließgewässer (<10l/s) erwartet. Bisherige Messresultate zeigen nur eine sehr geringe Schwermetallbelastung, deren Herkunft auf Abriebprozesse zurückzuführen ist. Neben dieser partikulären Fraktion sind in der gesamten ungelösten Stofffraktion (GUS) auch geogene Partikel (Schotterabrieb, Feinboden usw.) zu finden.

Punktuell wurde Gleisabwasser untersucht, jedoch ist die Bilanzierung der Stofffrachten immer wieder schwierig, weil entweder keine Abflussmessungen durchgeführt wurden oder trotz Messungen das hydrologische Regime im Gleiskörper unklar blieb. Zudem sind widersprüchliche Angaben zum Abflussbeiwert von Gleisanlagen mit Planumschutzschicht (PSS) zu finden [12, 13].

GLEISWASSERBEHANDLUNG

Der Behandlungsbedarf von Gleiswasser beschreibt die Richtlinie «Entwässerung von Eisenbahnanlagen», in der Belastungsklassen, die Gewässerschutzbereiche und Verdünnungsverhältnisse aufgegriffen sind [14]. Als Mass für die Belastung sind, unter Berücksichtigung der Lage der Gleise (Bahnhof oder offene Strecke), die Gesamtbruttoregistertonnen (BRT) pro Tag und Gleis und bei Pflanzenschutzmitteleinsatz die Höhenlage (Vegetationsdruck) zu verwenden. Abschnitte mit > 100 000 BRT und Pflanzenschutzmittelausbringen führen zu einer mittleren bis hohen Belastung, abhängig von der Höhenlage und dem Vorhandensein von aufwuchshemmenden Banketten.

Weil im Gleisbereich der Platz für flächenintensive Bodenfilter fehlt, sind technische Kompaktanlagen und Rinnensysteme von Bedeutung, in denen das Niederschlagswasser vor der Versickerung oder Einleitung behandelt wird. Solche Adsorberanlagen lassen sich platzsparend betreiben und bestehen in der Regel aus einer Abscheidung für Partikel und einem künstlichen Substrat [15]. Die hydraulische und stoffliche Leistungsfähigkeit muss sicherstellen, dass gelöste und partikuläre, organische sowie anorganische Stoffe zurückgehalten werden. Für die generelle Behandlung von Niederschlagswasser mit Adsorberanlagen ist ein VSA-Prüfverfahren entwickelt worden, um die Leistungsfähigkeit zu ermitteln [16]. In der BAV-Richtlinie wird auf das Prüfverfahren verwiesen [7].

Schweizweit wurden verschiedene Anlagenkonzepte zur Gleisentwässerung realisiert, um Glyphosat oder Schwermetalle zurückzuhalten, jedoch jeweils ohne Erfolg oder mit geringen Wirkungsgraden. Für die Gleiswasserbehandlung ist daher noch immer unklar, welches Adsorbermaterial und Anlagenkonzept unter realen Einbaubedingungen geeignet ist.

GLYPHOSAT

Glyphosat (N-[Phosphonomethyl]-glycin, CAS 1071-83-6) ist ein nicht-selektives Blattherbizid aus der Gruppe der Organophosphorherbizide, das sich durch eine hohe Wasserlöslichkeit (12 g/l bei +25 °C) und einen ionischen Charakter auszeichnet, der mit vier pK_s -Werten beschrieben

wird (<2; 2,6; 5,6; 10,6). Glyphosat liegt zwischen pH 3 und 12 als Anion in ein-, zwei- oder dreiwertiger Form vor. Je kleiner der pK_s , desto stärker ist die Säure, desto mehr Protonen H^+ werden ins Wasser abgegeben. Zurück bleibt ein Anion. Glyphosat ist eine mehrprotonige Säure und im Verhalten vergleichbar mit der dreiprotonigen Phosphorsäure.

Wegen seiner chemischen Ähnlichkeit zum Phosphatanion bindet Glyphosat an den gleichen Bodenmineralen, vor allem Aluminium- und Eisenoxiden [17, 18]. Der Rückhalt nimmt aber mit steigendem pH-Wert ab, weil die dann auftretende zwei- und dreifach negativ geladene Glyphosat-Form schlechter adsorbiert [19]. Im Gleiswasser mit pH-Werten von 7 bis 9 ist deshalb mit schwacher Adsorption an den Oxiden zu rechnen.

Glyphosat ist stabil gegen Photoabbau und Hydrolyse. Die mikrobielle Abbaurate DT_{50} (Halbwertszeit) liegt im Boden bei rund 30 Tagen und im Gewässer bei rund 10 Tagen [17]. Der Hauptmetabolit ist AMPA (Aminomethylphosphonsäure) mit einer Abbaurate DT_{50} von rund 120 Tagen im Boden und 10 Tagen im Wasser. AMPA zeigt vergleichbare Sorptionseigenschaften wie Glyphosat [20].

ZIELE UND VORGEHEN

Um über eine technische Option zur Minimierung des Eintrags von Glyphosat, aber auch von Kupfer, Zink und GUS, an Belastungsschwerpunkten zu verfügen, wurde im Auftrag der SBB ein neues Anlagenkonzept entwickelt und getestet.

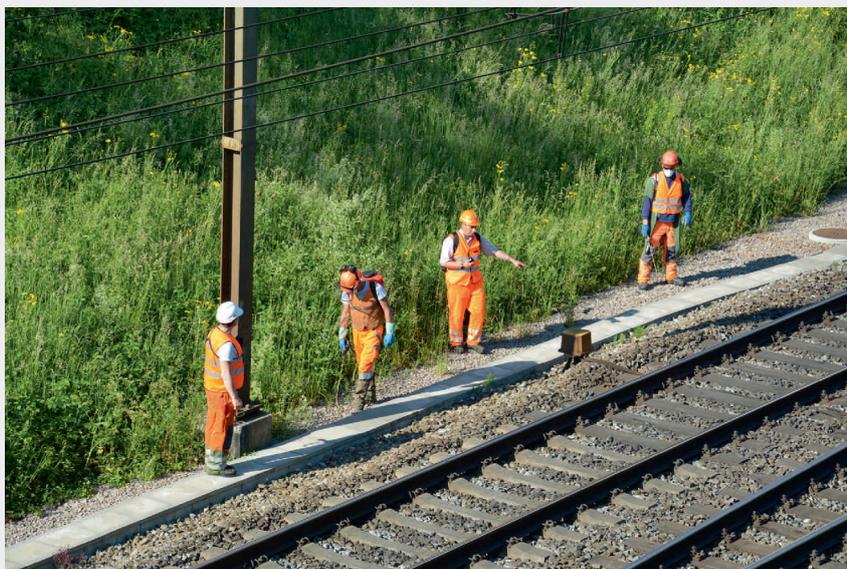


Fig. 1 Applikation von Glyphosat auf Gleisen der SBB bei Gelterkinden.

Application de glyphosate sur les voies des CFF près de Gelterkinden.

Folgende Ziele waren definiert:

- Entwicklung eines Adsorbersubstrats, das >90% Glyphosat-Rückhalt bei hoher hydraulischer Leistung aufweist. Von nachrangiger Bedeutung beim Stoffrückhalt sind AMPA und die Schwermetalle Kupfer und Zink. Das Substrat mit bekannten materialtechnischen Eigenschaften (Körnung, Schüttdichte, Glühverlust usw.) soll von einer Firma angeboten werden können.
- Bau einer Gleiswasserbehandlungsanlage sowie mehrmonatige Überwachung des Betriebs am Standort Gelterkinden im Kanton Basel-Landschaft. Die Konzentrationen, Stofffrachten und der Wirkungsgrad waren für Glyphosat, AMPA, Kupfer, Zink und GUS über mehrere Abflussereignisse zu erfassen.

Zunächst wurden Substratmischungen im Labor getestet und anschliessend die bauliche Umsetzung und Überwachung realisiert. Damit soll der Stand der Technik zur Gleiswasserbehandlung unter der Prämisse, wirksam sowie kostengünstig in Bau und Betrieb zu sein, weiterentwickelt werden.

LABORUNTERSUCHUNG

ADSORBERMATERIALIEN

Aufgrund von Vorversuchen stellte sich ein entwickeltes Mischsubstrat (AD-N) als besonders vielversprechend für den Rückhalt von Glyphosat und Schwermetallen heraus. Die Neuentwicklung ist auf die betriebstechnischen Anforderungen im Gleisbereich ausgerichtet und besteht aus granulierter Aktivkohle (GAK) für den Rückhalt von Pestiziden sowie granuliertem Eisenhydroxid (GEH) und

Zeolith für die Schwermetallelimination. Spezielle Varianten von GAK, GEH und Zeolith sowie die Mischungsverhältnisse sichern die Leistungsmerkmale und Wirtschaftlichkeit. Der Trockensubstanzgehalt liegt bei 80% TS. Die gesättigte Wasserdurchlässigkeit des neuen Substrats ist mit $K_r 2,3 \times 10^{-3}$ m/s als hoch einzustufen. Idealerweise wird das Material nicht im Dauereinstau betrieben. Das zweite Mischsubstrat AD-R (*D Rain-clean* von *Funke Kunststoffe* bzw. *Water-sys*) wurde als Referenzmaterial ausgewählt, weil es bereits in einer Regenwasseranlage erfolgreich im Einsatz ist [21]. Enthalten sind neben GAK und GEH noch weitere Komponenten in anderer Zusammensetzung als bei AD-N.

Beide Materialien wurden in vier Säulenversuchen in Anlehnung an die VSA-Leistungsprüfung charakterisiert (Fig. 2) [16]. Die stoffspezifischen Rückhalteleistungen für Glyphosat und den VSA-Leitsubstanzen Zink, Kupfer, Diuron und Mecoprop (MCP) wurden anhand der jeweiligen Zulauf- und Abblauffrachten ermittelt.

SÄULENVERSUCHE

Die Säulen (15 cm Füllhöhe, 8 cm Durchmesser, 50 cm² Querschnittsfläche) wurden mit rund 750 g Material befüllt und von unten nach oben mit deionisiertem Wasser gesättigt, sodass die Porenluft entweichen konnte (Fig. 2). Anschliessend wurde dreimal hintereinander eine Testlösung mit Filtergeschwindigkeiten von 8,95, 2,15 und 0,895 m/h, korrespondierend mit einer theoretischen mittleren Aufenthaltszeit von rund 1, 4,2 und 10 min, durch die Säule gepumpt. Für die vier Säulenversuche wurden Testlösungen mit Konzentrationen von

je 0,5 mg/l oder 0,05 mg/l je Substanz bei pH 6 und pH 8 eingesetzt. Pro Versuch wurde die jeweilige Testlösung nacheinander über die befüllte Säule geschickt, um in drei Testabschnitten den Stoffrückhalt zu bestimmen. Pro Testabschnitt wurde eine Fracht von 18 mg ($36 \text{ l} \times 0,5 \text{ mg/l}$) oder 1,8 mg ($36 \text{ l} \times 0,05 \text{ mg/l}$) bzw. total 54 mg oder 5,4 mg je Stoff aufgebracht. Die Ausgangskonzentrationen sind so gewählt, dass auch bei hohem Stoffrückhalt die Ablaufkonzentrationen quantifizierbar sind.

In einem vierten Testabschnitt wurde die Remobilisierung der adsorbierten Stoffe durch den Einsatz von Auftausalz im Winter mit 36 l Salzlösung bei 5,0 g/l NaCl simuliert. Dieser Versuch wurde nur beim ersten Material durchgeführt, weil im Gleisabwasser kein Salz vorkommt und daher eine weitere Quantifizierung unnötig erschien.

Pro Testabschnitt wurde das gesamte Wasser (je 36 l) aufgefangen und in Aliquoten der vier Sammelproben der pH-Wert und die elektrische Leitfähigkeit bestimmt. Glyphosat, AMPA, Diuron und MCPP wurden mit LC-MS/MS bei einer Bestimmungsgrenze von 0,02 µg/l quantifiziert (Labor *Bachema*, Schlieren). Diuron und MCPP wurden direkt injiziert, Glyphosat zuvor mit Fmoc-Cl derivatisiert und mit Methylenchlorid aufgereinigt. Der Gesamtgehalt und die gelöste Fraktion von Kupfer und Zink wurden mit ICP-MS quantifiziert. Um die gelösten Anteile zu bestimmen, wurden die wässrigen Proben filtriert (0,45 µm) und mit HNO₃ (65%ig) angesäuert. Für den Gesamtgehalt wurde ein Aliquot mit Königswasser in der Mikrowelle bei 175 °C aufgeschlossen und nach Filtration (0,45 µm) gemessen.

STOFFRÜCKHALT UNTER LABORBEDINGUNGEN

Das Referenzmaterial AD-R («best-of-class» unter den Marktprodukten) erreichte 50% Glyphosat-, 80% Diuron/MCP- und 70% Kupfer/Zink-Rückhalt (Fig. 3). Damit ist nur die VSA-Anforderung «Standard» erreicht. Von AD-R wurden weniger als 2% der zuvor adsorbierten Stoffe remobilisiert.

Das neue Mischsubstrat AD-N weist eine deutlich höhere Leistungsfähigkeit bezogen auf die Pestizide auf und erfüllt über die drei Testabschnitte mit 93% Diuron/MCP- und 93% Kupfer/Zink-Rückhalt die VSA-Anforderung «erhöht» (grün, >90%). MCP, eine polare Substanz mit schlechtem Bindungs-

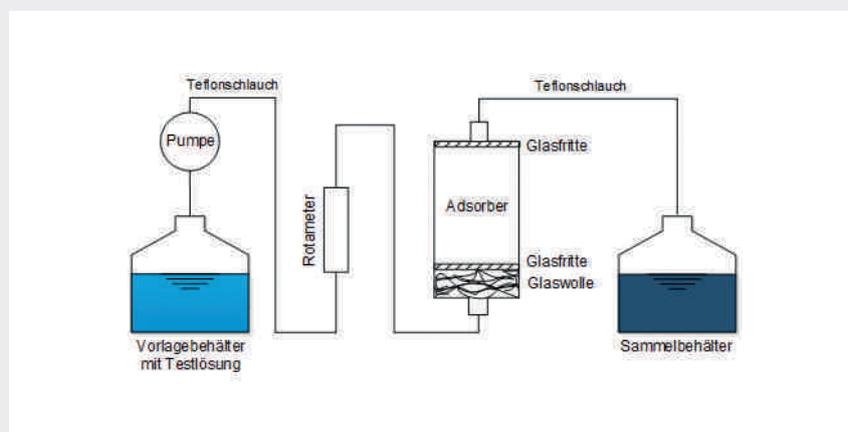


Fig. 2 Versuchsaufbau zur Bestimmung des Stoffrückhalts im Säulenversuch gemäss VSA-Leistungsprüfung [16].

Installation en vue de déterminer la retenue de substances dans l'essai en colonne.

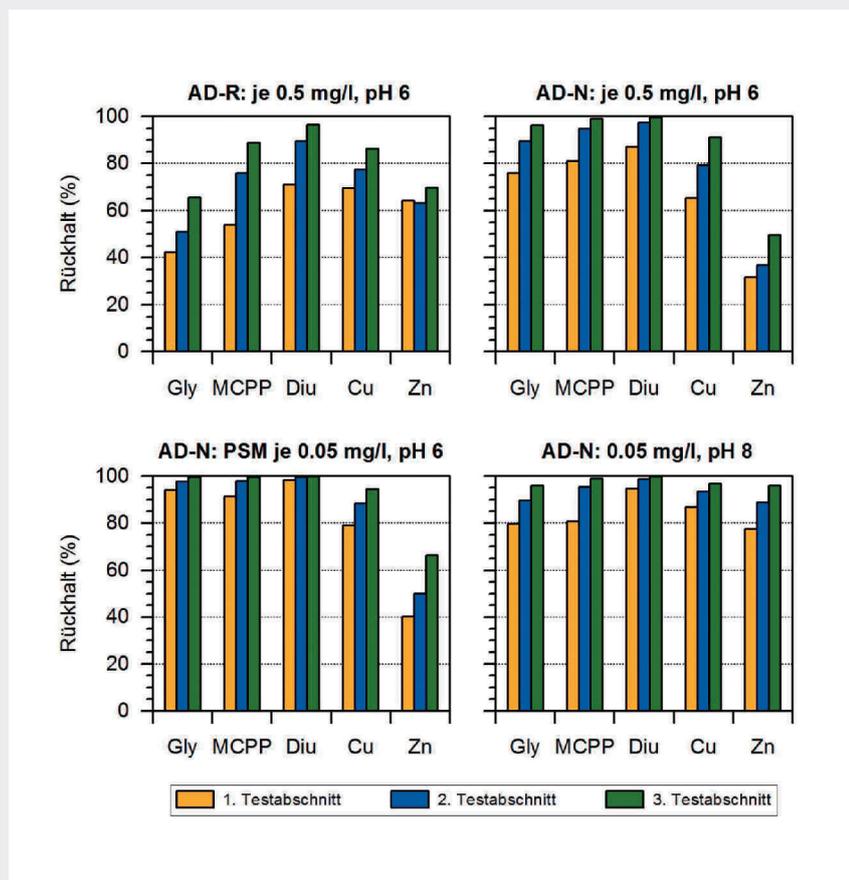


Fig. 3 Rückhalt von Glyphosat (Gly), Mecoprop (MCP), Diuron (Diu), Kupfer (Cu) und Zink (Zn) in den vier Säulenversuchen bei folgenden Filtergeschwindigkeiten: 1. Testabschnitt 8,95 m/h, 2. Testabschnitt 2,15 m/h, 3. Testabschnitt 0,895 m/h. Die oberen Resultate sind gemäss VSA-Labortest, die beiden unteren bezogen auf Stoffkonzentration sowie pH (unten rechts) abweichend. Material AD-R: Referenzmaterial (links oben), AD-N: neues Adsorbersubstrat.

Retenue de glyphosate (Gly), de mécoprop (MCP), de diuron (Diu), de cuivre (Cu) et de zinc (Zn) dans les quatre essais en colonne avec les vitesses de filtration suivantes: 1^{ère} section testée 8,95 m/h, 2^{ème} section testée 2,15 m/h, 3^{ème} section testée 0,895 m/h. Les résultats du haut sont conformes aux tests du VSA en laboratoire, les deux du bas diffèrent en termes de concentration de substances et de pH (en bas à droite). Matériau AD-R: Matériau de référence (en haut à gauche), AD-N: nouveau substrat d'adsorption.

verhalten, stach sogar mit 80 bis 99% Rückhalt besonders hervor (Fig. 3). Bei geringer Konzentration (0,05 mg/l) und pH 6 lässt sich Glyphosat um einen Faktor 100 reduzieren. Bei pH 8 und höherer Stoffkonzentration liegt der Rückhalt noch immer bei einem Faktor 10 (= 90%). Selbst bei der höchsten Filtergeschwindigkeit mit 8,95 m/h auf 15 cm Adsorberstrecke wurden rund 93% Glyphosat zurückgehalten und bei pH 8 immer noch rund 90%. 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. Bei einer angenommenen Beladungskapazität der GAK mit Glyphosat von 5

Massen-Prozent könnten durch 1 kg Substrat theoretisch 15 g Wirkstoff gebunden werden, bevor die Kapazität erschöpft ist. Bei einer Konzentration von 10 µg/l liessen sich rund 1700 m³ Abwasser reinigen. Damit wird deutlich, dass die Beladungskapazität unter Berücksichtigung der Anlagendimensionierung nicht die Standzeit limitieren wird.

Die Bindung von Kupfer war für beide Materialien mit ca. 70 bis 95% gleich gut (Fig. 3). Zink wurde bei pH 6 nur zwischen 32 und 50% zurückgehalten. Hierbei kommt zum Tragen, dass, anders als bei zahlreichen Marktprodukten üblich, 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 zwei Dritteln ausfallen. Dadurch liegen die Metalle ungelöst vor und werden durch das Mischsubstrat herausfiltriert. Dieser Effekt ist auch im realen Einbau zu erwarten, weil das Gleisabwasser typischerweise pH 8 aufweist. Beide Substrate funktionieren demnach nicht nur als Adsorber, sondern gleichfalls als Raumfilter für die partikulären Anteile der Schwermetalle.

Beachtenswert ist, dass bei geringerer Konzentration (0,05 mg/l) die Stoffe prozentual betrachtet besser entfernt werden als bei der höheren (0,5 mg/l). Bezogen auf die gebundene Stoffmenge wird bei der 10-mal höheren Konzentration von 0,5 mg/l trotzdem eine vielfach grössere Fracht gebunden.

BEHANDLUNGSANLAGE GELTERKINDEN

STANDORT UND EINZUGSGEBIET

Der Standort für die Pilotinstallation befindet sich beim Bahnhof Gelterkinden im Kanton Basel-Landschaft. Ein Zugverkehrsaufkommen von täglich 102 000 Gesamtbruttotonnen, davon 40% Güterverkehr, und der Einsatz von Pflanzenschutzmitteln zur Vegetationskontrolle führt beim Gleisabwasser zu einer hohen Belastung [22, 23]. Das Gleisabwasser wird via Regenwasserkanal ins Rickenbächli (unweit von der Mündung in die Ergolz), einen kleinen Bach, geleitet.

Die dränierte Gleisfläche mit einem Unterbau aus 20 bis 30 cm Kiessand PSS umfasst gemäss Planungsunterlagen 5280 m² (11 m × 480 m) [23]. Der darin berechnete Abfluss von 461/s ist aus der angeschlossenen Fläche mit einem angenommenen Abflussbeiwert von $\psi = 0,5$ für Niederschlagsereignisse mit 2-Jährlichkeit und 15 min Dauer hergeleitet ($r_{(15),n} = 2$) ($Q = 0,53 \text{ ha} \times 175 \text{ l/s ha} \times 0,5 \approx 46 \text{ l/s}$). Angenommen wurde ein Speichervolumen des Gleisschotters von ca. 2 l/m², womit eine Regendauer von 11,9 min zurückgehalten würde ($2 / (2,8 \times 10^{-3}) = 714 \text{ s}$ bzw. 11,9 min).

Eine Gleiswasserbehandlungsanlage wurde für einen unterirdischen Betonschacht (2 × 2,5 × 3 m, L × B × H) mit Zulauf (DN 400), Ablauf (DN 200), Notüberlauf (DN 300) und Gitterrostboden (0,8 m über dem Boden) projektiert. Die ursprünglich vorgesehene Filterschicht aus kalkhaltigem Sand und GEH (ca.

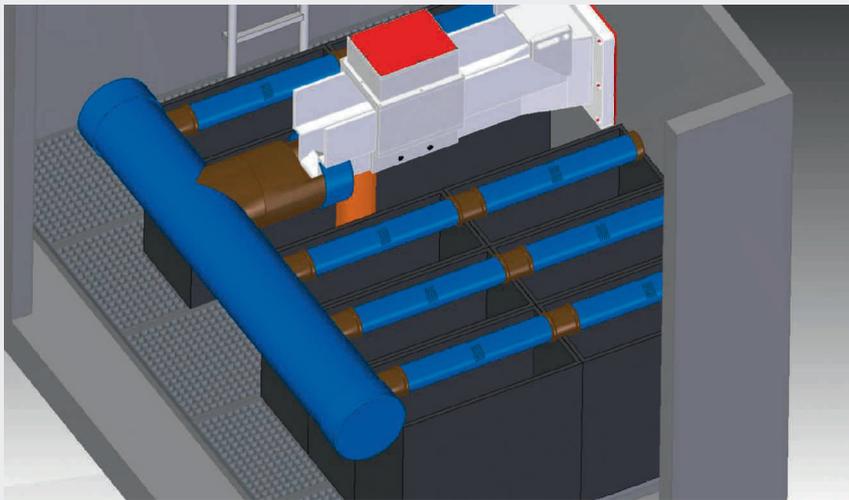


Fig. 4 CAD-Entwurf von Filterboxen mit Zuflussmessung im Gerinne, Wasserverteilungssystem mit geschlitzten Rohren und Beschickung von oben nach unten frei dränend (trockenfallend).
Projet CAO de caissons de filtrage avec mesure du débit dans le canal, système de répartition d'eau avec conduites à fentes et alimentation du haut vers le bas avec drainage libre.

50 cm Höhe) war für einen Bemessungsregen von 28 l/s ha und Spülstoss von 10 min Dauer ausgelegt. Aufgrund der Rückhaltekapazität wurden Konzentrationsspitzen erst erwartet, wenn der Wasserabfluss im Fließgewässer bereits angestiegen ist. Mit dieser Variante sollte zu Beginn eines Regenereignisses das Gewässer nicht belastet werden. Die Adsorberschicht wurde aber nicht realisiert, weil GEH nicht die erforderliche Leistungsfähigkeit aufweist.

PROJEKTIERUNG DER ANLAGE

Die im vorliegenden Projekt neu entwickelte Behandlungsanlage war für den nachträglichen Einbau im bestehenden Betonschacht vorgesehen. Sie umfasste acht Gitterboxen mit neuartigen Filtertaschen (Fig. 4). In die Taschen wurde das neue Adsorbersubstrat AD-N rund 40 cm hoch eingefüllt (je 100 l). Die Substratoberfläche umfasste 0,32 m² pro Box. Das modulare Anlagenkonzept ist so ausgelegt, dass es sich auf andere neue oder bestehende Gleisentwässerungsanlagen anpassen lässt.

Zu den effektiv auftretenden Abflussmengen und der Wassermatrix (GUS, Glyphosat usw.) lagen keine Messdaten vor, nur Informationen aus der Literatur. Um eine «Worst-case»-Situation bezogen auf die hydraulische und stoffliche Belastung zu untersuchen, erfolgte deshalb die Zuführung des Gleiswassers ungedrosselt und ohne Vorabscheidung über ein Gerinne und mehrere Rohrverbindungen. Das Gleiswasser sickerte von oben nach unten frei dränend (trockenfallend) hindurch.

Diese Auslegung war unter den gegebenen baulichen und zeitlichen Vorgaben zudem die kostengünstigste Bauvariante. In Gelterkinden dauerten die Installation der Kunststoffbauteile, der Einbau der Mess- und Probenahmetechnik, das Befüllen der Boxen und die Inbetriebnahme drei Arbeitstage.

ÜBERWACHUNGSKONZEPT DER ANLAGE

Die Glyphosat-Applikation durch ein seitens SBB beauftragtes Unternehmen erfolgte am Montag, 29.5.2017, bei trockener Witterung (Fig. 1). Die applizierte Menge konnte nicht exakt erfasst werden, weil mehrere Mitarbeitende die Applikation auf einem längeren Gleisabschnitt der Praxis entsprechend aufbrachten. Zudem sollte nur der stoffliche Wirkungsgrad der Behandlungsanlage bilanziert werden und nicht der mobilisierte Anteil aus dem Gleiskörper.

Die Zuflussmenge der Anlage (Messintervall 1 s) wurde in einem Doppelrechteckgerinne mit Ultraschall erfasst (Stebatec, Brügg). Die Laufzeitdifferenz von Ultraschallwellen ist direkt proportional zur mittleren Fließgeschwindigkeit. Zwei automatische Probenehmer (Endress+Hauser) waren am Zu- und Abfluss der Filterboxen positioniert. Die volumenproportionale Probenahme löste mit Überschreiten eines Basiszuflusses von 0,1 l/s aus. Je 1 m³ Zufluss wurde eine Teilprobe in eine Sammelflasche (PP, 20 l) überführt. Insgesamt wurden sieben Sammelproben vom Zu- und Ablauf genommen, davon eine Referenzprobe vor der Applikation und sechs Proben danach.

Die Anlage wurde mit dem browserbasierten Prozessleitsystem ARabella (Stebatec, Brügg) kontinuierlich überwacht, die Probenahmen ausgelöst und die Zuflussmengen in Echtzeit dargestellt. Somit waren eine ortsunabhängige und kosteneffiziente Überwachung sichergestellt.

Eine Kamera mit IR-LED-Blitz (bei ca. 940 nm) zeichnete die Wasserstände in den Filterboxen als Bilderserien im Abstand von 10 min auf.

Der pH-Wert, die elektrische Leitfähigkeit und die Temperatur wurden in jeder Wasserprobe vor Ort manuell mit Feldmessgeräten von WTW (Multi 3430) gemessen. In Stichproben vom Zufluss sowie sechs Sammelproben des Zu- und Abflusses wurden GUS gravimetrisch, die Gesamthärte mittels komplexometrischer Titration und die Karbonathärte durch Säure-Base-Titration (Hydrogenkarbonat mit Neutralisation) bestimmt. Die Stoffe Glyphosat, AMPA, Kupfer und Zink sind mit den gleichen Methoden wie die Laborproben durch das Labor Bachema analysiert worden.

Von der durch MeteoSCHWEIZ (Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie) betriebene Wetterstation Rünenberg (7°53', 47°26', 611 m ü. N.N.), wurden Niederschlag und Temperatur für die Auswertung genutzt. Die Wetterstation liegt 4 km Luftlinie entfernt südöstlich von Gelterkinden.

RESULTATE DER BEHANDLUNGSANLAGE

HYDRAULISCHE LEISTUNG

Über 142 Versuchstage (1.5. bis 20.9.2017) wurden rund 1070 m³ Gleisabwasser auf der Pilotanlage behandelt, davon seit der Glyphosatanwendung während 115 Tagen rund 550 m³ Abwasser (Fig. 5). In dieser Zeitspanne fielen 270 mm Niederschlag.

In der Versuchsdauer wurden zehn eindeutig messbare Abflussereignisse, sechs davon beprobt, mit 0,5 bis 1,0 l/s aufgezeichnet, die jeweils 20 bis 57 m³ und zusammen rund 70% des Gesamtabflusses umfassten (Fig. 5, Tab. 1). Bei sieben Ereignissen traten Spitzen zwischen 5 und 7 l/s auf, die maximal 20 min dauerten. Die zeitliche Verzögerung der Abflussbildung, ca. 1 h nach Regenbeginn, und das lange Nachklingen (Tailing) 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 0,11/s und sank im Juni auf <0,021/s (Fig. 5). Dieser Trockenwetterzufluss war für rund 30% des gemessenen Gesamtzuflusses verantwortlich und dürfte einerseits auf die Retentionswirkung, andererseits 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. Die mittlere Filtergeschwindigkeit, berechnet aus der Zuflussmenge über ein

Abflussereignis und bezogen auf die Filterfläche von allen Boxen, erreichte rund 1,5 m/h (n = 6; Min. 1 m/h, Max. 1,8 m/h). Diese Geschwindigkeit liegt im Bereich vom zweiten Testabschnitt des Säulenversuchs mit 2,15 m/h Filtergeschwindigkeit. Unter der Annahme, dass durch die Wasserverteilung nur rund die Hälfte der Boxen effektiv beschickt worden wären, verdoppelt sich die berechnete Filtergeschwindigkeit auf 3 m/h (max. 4 m/h), womit immer noch eine deutlich geringere Geschwindigkeit im Feld als beim dritten Labortestabschnitt vorgelegen hat (8,95 m/h). Insofern waren

die Feldbedingungen noch weit entfernt von der anspruchsvollsten Labortestbedingung.

Zu erwähnen bleibt die zeitliche Veränderung der Wasserdurchlässigkeit von zwei Substratboxen, die mit oberflächennahen ockerfarbenen Ablagerungen verbunden war. Durch die Kamerabilder liess sich nachweisen, dass während zwei Abflussspitzen zwei Boxen kurzzeitig überliefen (2. und 4. Probenahme). Die Ablagerungen wurden nachfolgend manuell aufgelockert, sodass das Wasser wieder ungehindert versickerte. Der hydraulische Wirkungsgrad der Anlagen betrug trotz der zwei kleineren Überlaufereignisse >90%.

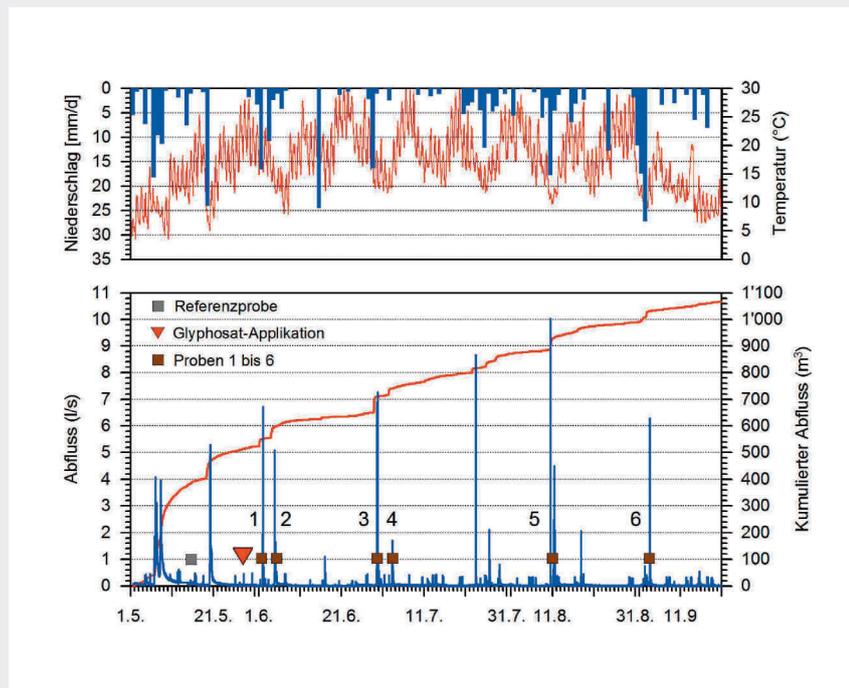


Fig. 5 Niederschlag (mm/d) und Temperatur (°C pro Stunde) (oben), Abfluss (l/s) und kumulierter Abfluss (m³) (unten) über die Versuchsdauer vom 1.5. bis 20.9.2017. Die Referenzprobenahme war am 16.5., die Applikation am 29.5. und anschliessend folgten sechs ereignisbezogene Probenahmen.

Précipitations (mm/d) et température (°C par heure) (en haut), écoulement (l/s) et écoulement cumulé (m³) (en bas) pendant toute la durée de l'essai du 1.5. au 20.9.2017. Le prélèvement d'échantillons de référence a eu lieu le 16.05, l'application le 29.5, puis six prélèvements d'échantillons ont suivi en lien avec des événements.

RÜCKHALT VON GLYPHOSAT

Vor der Applikation wurde am 16. Mai eine Referenzsammelprobe entnommen, die einen Abfluss von rund 11 m³ über vier Tage repräsentiert, um eine mögliche Hintergrundbelastung zu erfassen. Diese Referenzmessung ergab Glyphosat- und AMPA-Konzentrationen unterhalb der Bestimmungsgrenze von 0,02 µg/l.

Mit den analysierten sechs Sammelproben nach der Applikation wurden rund 50% der gesamten und rund 80% der regengetriebenen Abflussmenge erfasst. Ein grösseres Abflussereignis und drei kleinere wurden nicht analysiert (Fig. 5). Die Zulaufkonzentrationen 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) (Fig. 6). Die erste Probe deckte rund 50% der Gesamtfracht von 127 mg Glyphosat ab. Durch die drei letzten Ereignisse kamen weniger als 5% Fracht hinzu.

Anders hingegen verlief der Konzentrations- und Frachtverlauf vom Abbaupro-

Ereignis / Probe		Zufluss	Glyphosat		AMPA		Zink		Kupfer		GUS	
		(m³)	(µg/l)	(mg)	(µg/l)	(mg)	(µg/l)	(g)	(µg/l)	(g)	(mg/l)	(kg)
01.06.2017	1	24	2,75	66	0,18	4	80	1,9	25	0,6	286	7
06.06.2017	2	33	0,85	28	<0,02	<1	50	1,7	12	0,4	120	4
29.06.2017	3	57	0,43	25	0,52	30	170	9,7	51	2,9	436	25
03.07.2017	4	20	0,21	4	0,31	6	60	1,2	17	0,3	276	6
11.08.2017	5	45	0,06	3	0,49	22	100	4,5	31	1,4	388	17
04.09.2017	6	36	0,03	1	0,08	3	120	4	43	2	504	18
Gesamt		215		127		65		23		7,6		77

Tab. 1 Berechnete Fracht für die analysierten sechs Zuflussereignisse. Charge calculée pour les six événements d'écoulement analysés.

dukt 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 (Fig. 6). Alleine die dritte Abfluss-

probe umfasste rund 45% der ausgetragenen Fracht in Höhe von 65 mg AMPA.

Eine frühere Untersuchung ergab im Gleisabwasser mittlere Konzentrationen von 9 µg/l Glyphosat im Frühling und 0,5 µg/l Glyphosat im Herbst [9]. Andere Studien lassen bis rund 100 µg/l Glyphosat erwarten [2, 8, 10]. Die höchsten 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 (Fig. 6). Die Konzentrationsverläufe von Glyphosat und AMPA sind daher plausibel und konsistent zu anderen Studien.

Der stoffliche Wirkungsgrad bzw. 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 (Fig. 6). Die geringeren Eliminationen beim dritten und fünften Ereignis hängen mit dem Überlaufen der zwei Filterboxen zusammen, wodurch unbehandeltes Gleisabwasser in den ablaufseitigen Probennehmer gelangte. Nachdem die Ablagerung beseitigt war, verbesserte sich die Sickerrate schlagartig und das Wasser wurde wieder im Vollstrom behandelt. 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 repräsentativ für die Leistungsfähigkeit.

Nach der Vollstrombehandlung lag in Gelterkinden 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. Der Anforderungswert gilt üblicherweise für Fließgewässer nach weitgehender Durchmischung mit dem eingeleiteten Abwasser. 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 GAK-Menge lassen sich bei 5% Bindung theoretisch rund 12 kg Glyphosat zurückhalten. Die Kapazität würde Jahrzehnte ausreichen. Folglich ist eine Standzeit für den Glyphosat-Rückhalt > 10 Jahren möglich, sofern nicht andere Stoffe, wie gelöster organischer Kohlenstoff (DOC), durch übermässige konkurrierende Sorption die Kapazität deutlich herabsetzen. Erfahrungsgemäss begrenzt die abnehmende Durchlässigkeit des Materials durch Kolmation (Deckschichtbildung und Zusetzen des Filters) die potenzielle Standzeit. Um demnach die stoffliche Leistungsfähigkeit der Anlage für lange Zeit sicherzustellen, ist bei hohen GUS-Frachten – die bei Gleisabwasser aber die Ausnahme darstellen – eine gute Vorabscheidung, ggf. verbunden mit einer Drosselung, wichtig.

RÜCKHALT VON METALLEN UND GUS

Die Zulaufkonzentrationen von Kupfer mit 10 bis 50 µg/l und Zink mit 50 bis 170 µg/l Gesamtgehalt waren so gering (Fig. 7), dass die Ablaufkonzentrationen im Bereich der numerischen An-

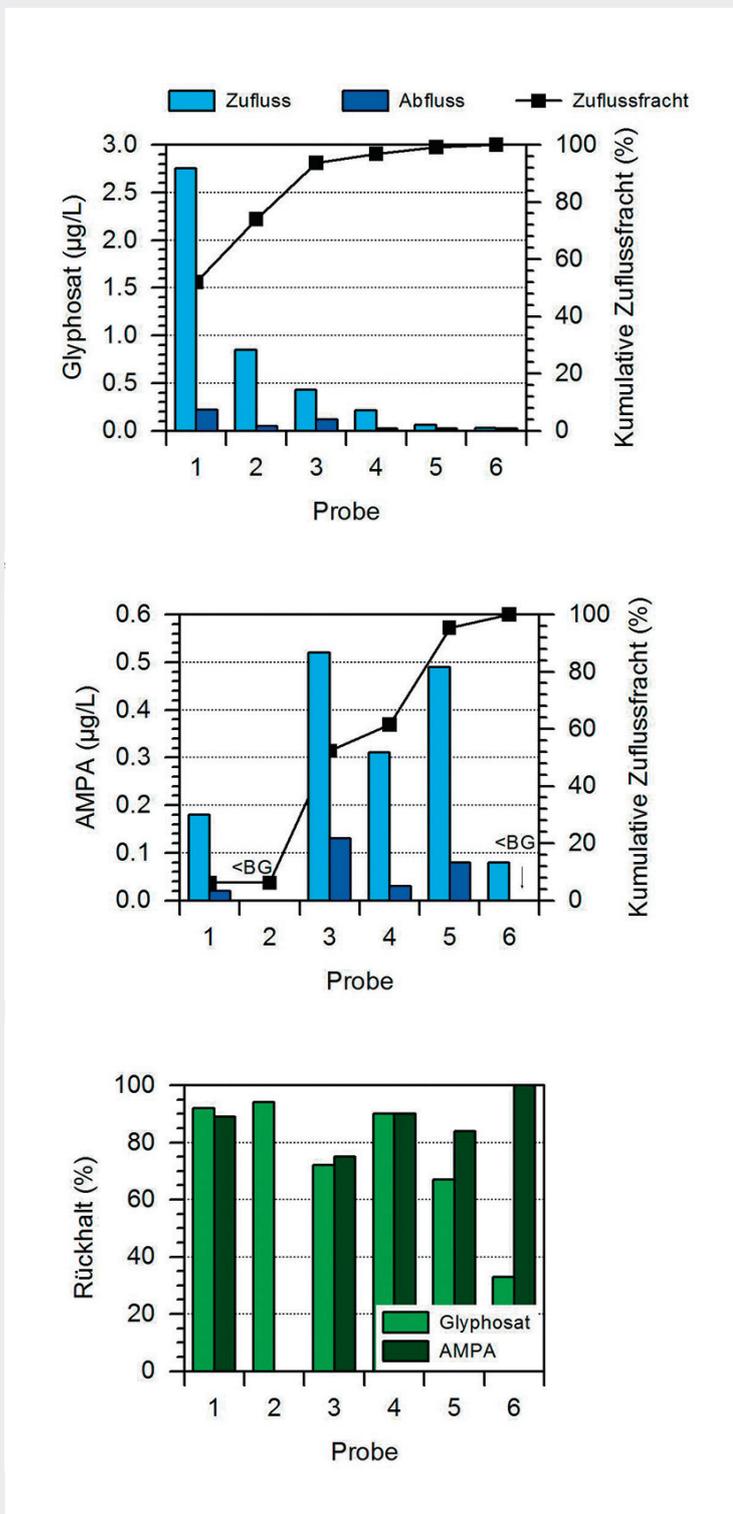


Fig. 6 Konzentrations- und Frachtverlauf von Glyphosat (oben), AMPA (Mitte) und Rückhalt von Glyphosat und AMPA (unten) über sechs analysierte Abflussereignisse.

Évolution de la concentration et de la charge de glyphosate (à gauche), d'AMPA (au milieu) et retenue de glyphosate et d'AMPA (à droite) sur six événements d'écoulement analysés.

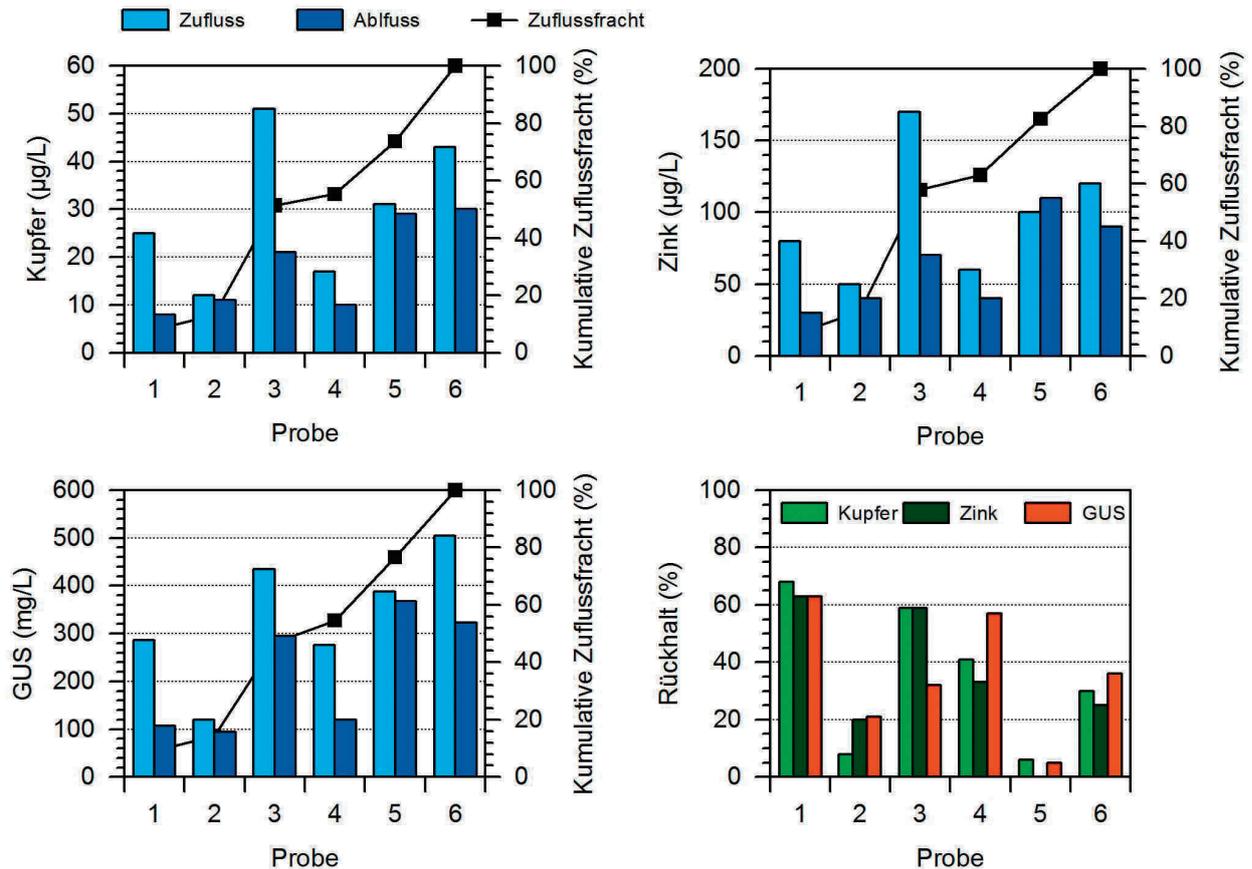


Fig. 7 Konzentrations- und Frachtverlauf von Kupfer (links), Zink (Mitte) und GUS (rechts) über sechs analysierte Abflussereignisse.

Évolution de la concentration et de la charge de cuivre (à gauche), de zinc (au milieu) et de MES (à droite) sur six événements d'écoulement analysés.

forderungen für Oberflächengewässer von 5 µg/l Kupfer (gesamt) und 20 µg/l Zink (gesamt) lagen.

Der pH 8 im Gleisabwasser weist darauf hin, dass der wesentliche Anteil vom Kupfer, teilweise auch vom Zink, in ausgefällter Form auftrat. Ausserdem ist bekannt, dass Zink und Kupfer als Abrieb des rollenden Bahnverkehrs emittieren. Aus diesem Grund wirkt das grobkörnige Mischsubstrat AD-N weniger als Adsorber, sondern eher als Filter zum Rückhalt solcher Partikel. Aufgrund dieser Mechanismen schwankte der Schwermetallrückhalt deutlich und erreichte maximal rund 70% (Fig. 7).

Im Gleisabwasser ist in der Regel mit einem sehr geringen GUS-Gehalt zu rechnen (<20 mg/l) [2]. Die in Gelterkinden gemessenen Zulaufkonzentrationen von ca. 100 bis 500 mg/l GUS sind deshalb für Gleiswasser unerwartet hoch (Fig. 7). Selbst bei Trockenwetterzufluss lagen die Konzentrationen in der gleichen Größenordnung. Anzunehmen ist, dass die

grosse Partikelmenge einerseits durch Hangwasser herangeführt, andererseits durch Stoparbeiten im Gleis (Abrieb vom Schotter) erzeugt wurde. Die Partikelgrößenverteilung zwischen 1 und 100 µm Grösse (D50 10 µm), bestimmt an zwei Proben, unterstreichen den hohen Feinanteil.

Bei einer mittleren Konzentration von 240 mg/l GUS in rund 1070 m³ Zulaufwasser und durchschnittlich 36% Rückhalt wurden rund 95 kg GUS im Substrat, bei Einzelereignissen bis 25 kg GUS, zurückgehalten (Tab. 1, Fig. 7). Im Ablaufwasser waren dennoch so lange hohe GUS-Konzentrationen nachweisbar, wie der Feinanteil vom GUS durch die grobkörnige Struktur des Filtermaterials hindurch transportiert werden konnte. Gleichartig verlagert wurden die partikulär vorliegenden Schwermetalle. Die Zulaufkonzentrationen von GUS korrelierten mit den Schwermetallkonzentrationen.

Anders verhielt es sich bei der hydraulisch limitierenden Deckschicht, die den GUS-

Rückhalt erhöhte. Nachdem diese zweimal entfernt bzw. die oberen Zentimeter aufgelockert wurden, nahm die Durchlässigkeit wieder zu und der GUS-Rückhalt sank auf niedrige 21 bzw. 5%.

Die Filterfunktion kann zur Kolmatierung des Mischsubstrats führen, sodass die erwartete hydraulische und stoffliche Standzeit nicht erreicht wird. Gegen die Kolmatation ist deshalb bei GUS-reichem Gleisabwasser eine Vorabscheidung erforderlich.

SCHLUSSFOLGERUNGEN

Mit dem modularen Anlagenkonzept (Boxen, Filtertaschen) und neuem Adsorbentmaterial AD-N lässt sich Gleisabwasser erfolgreich behandeln. Der Glyphosat-Rückhalt von >90% im Labortest bedeutet, dass die VSA-Anforderung «erhöht» (grün) erfüllt ist. Im Feldtest wurde auf Grundlage des frachtgemittelten Wirkungsgrads der hohe Rückhalt >90% für Glyphosat und AMPA selbst ohne Vorab-

Das Projekt wurde gefördert durch die SBB Schweizerischen Bundesbahnen.

scheidung und bei ungedrosselter Beschickung der Anlage bestätigt.

Der Rückhalt von gelöstem 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 teilweise zurückgehalten.

Die Resultate der Säulenversuche zeigen, dass der Stoffrückhalt selektiv und in Abhängigkeit von der Wasserkontaktzeit wirkt. Alle Stoffe wurden bei geringer Geschwindigkeit besser zurückgehalten als bei hoher, weil die höhere Wasserkontaktzeit (8,95 m/h) den Stoffrückhalt erhöht. Diuron und MCPP werden stets besser als Glyphosat adsorbiert.

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 1001 Mischadsorber – entspricht einer Boxfüllung mit 40 cm Schichthöhe, liegen zusammen mit der Box und Filtertasche bei rund 1000 Franken. Das neue Modul mit Substrat kann von der *Funke Kunststoffe GmbH* (Hamm-Uentrop, D), vertreten durch *Watersys*, Lyss, geliefert werden. Die neue Technologie ist nicht nur für die SBB eine attraktive Technologie, sondern dürfte auch bei den benachbarten Eisenbahngesellschaften, die sich mit den gleichen Problemen bei der Gleisentwässerung beschäftigen, auf Interesse stossen. Der Schwerpunkt liegt dabei auf Stoffemissionen, die zu einer hohen Belastung des Gleiswassers führen.

Sehr erfreulich ist die gute Vergleichbarkeit des Glyphosat-Rückhalts von Labor- mit Feldresultaten. Der VSA-Labortest war gut geeignet, die richtige Adsorbiermischung zu identifizieren sowie durch Variation der Randbedingungen die Übertragbarkeit auf die Praxis zu verbessern (pH, Konzentration, Stoffauswahl). Insofern hat das Testverfahren dazu beigetragen, den Stand der Technik beim Stoffrückhalt durch Adsorbieranlagen weiterzuentwickeln.

EMPFEHLUNGEN

Der Zufluss von Fremdwasser, z.B. Hang- oder Grundwasser, in eine Behandlungsanlage ist planerisch und baulich generell zu verhindern, weil es den Betrieb von Behandlungsanlagen stört oder verunmöglicht [7]. Dadurch wird nicht verschmutztes Wasser selbst bei Trockenwetter in die Behandlungsanlage geführt und die Anlage durch unerwünschte Stoffeinträge, z.B. GUS oder Nährstoffe, konstant belastet und die Standzeit des Adsorbiermaterials verkürzt. Liegt der Fremdwasseranteil über 30% des zu behandelnden Gleisabwassers pro Jahr, sind gemäss BAV-Richtlinie geeignete Massnahmen zur Reduktion des Fremdwassers erforderlich [7].

Ausserdem sollte der durch das Einbringen von neuem Schotter und durch das Stopfen überdurchschnittlich anfallende Feinanteil abgetrennt werden [7]. Diese mineralischen Partikel können sich auf die Funktionalität einer Behandlungsanlage negativ auswirken.

Das Mischsubstrat ist gemäss Angaben des Herstellers geeignet, Gleisabwasser bis 100 mg/l GUS ohne Vorabscheidung durch das Mischsubstrat zu behandeln. Gleisabwasser > 100 mg/l GUS ist dagegen vorzubehandeln, um die Kolmation zu reduzieren und die hydraulische Leistungsfähigkeit zu erhalten (Reduktion

der Kosten für Austausch). Als Verfahren bietet sich bei solchen Ausnahmefällen – wie in Gelterkinden – die Sedimentation an, z.B. in Kombination mit einer hydrodynamischen Abscheidung (Zyklon), weil diese Anlagen vergleichsweise störungs- und unterhaltsarm betrieben werden können. Die Filtration weist zwar einen höheren Wirkungsgrad auf, insbesondere bei hohen Feinanteilen, ist aber unterhalts- bzw. kostenintensiv.

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

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Burkhardt, M.; Rossi, L.; Boller, M. (2008): Diffuse release of environmental hazards by railways. *Desalination*, 226: 106–113
- [2] Braun, C.; Gälli, R.; Kammer, C. (2013): Belastung durch Gleisabwasser. *Aqua & Gas*, 7/8: 40–49.
- [3] Chatfield, P. (2005): *Railway Runoff Management – Stage 1. RP641 Final Report*, GB, London, S. 70
- [4] Osborne, M.; Montague, M. (2005): *The potential for water pollution from railways. Report CIRIA C643*, CIRIA, London/UK, S. 20
- [5] Myers, B.; Pezzaniti, D. (2011): *The nature and Significance of Runoff Pollution in Railway Corridors – Literature Review*. UniSA, S. 48

> SUITE DU RÉSUMÉ

enregistrés pour le glyphosate, l'AMPA, le cuivre, le zinc et les SNDT. Dans les tests de laboratoire, le nouveau substrat composite a retenu > 90% du glyphosate, satisfaisant ainsi à l'exigence du niveau «élevé» définie par la VSA pour de tels matériaux adsorbants. Il convient de souligner que la retenue de glyphosate atteint près de 93%, même avec la vitesse de filtration la plus élevée, et est encore > 90% avec une faible concentration à l'entrée (0,05 mg/l) et un pH de 8.

Dans l'installation pilote, les concentrations à l'entrée (2,7 µg/l de glyphosate) ont diminué en l'espace de trois mois dans le premier événement d'écoulement. Les concentrations du produit de dégradation AMPA, en revanche, ont commencé par augmenter puis n'étaient plus décelables dans le dernier échantillon. La retenue de glyphosate a atteint > 90% et la retenue d'AMPA des valeurs comparables.

Les concentrations de cuivre et de zinc étaient si faibles à l'entrée que les concentrations d'écoulement étaient proches des valeurs limites définies pour les cours d'eau sans optimisation du processus. Cela est dû au fait que le cuivre et le zinc étaient présents sous forme de particules d'usure ou se trouvaient en suspens à pH 8 et ont été éliminés du substrat avec les SNDT.

Les concentrations d'entrée élevées de 100 à 500 mg/l de SNDT sont apparues par temps de pluie et par temps sec. Les concentrations d'écoulement semblent indiquer que si le substrat a retenu des SNDT, les fractions fines ont traversé le substrat composite grossier. Le nouveau concept d'installation avec une retenue de glyphosate > 90% et une retenue élevée des métaux lourds montre qu'il est très bien applicable à d'autres sites de drainage des voies nécessitant un traitement. Pour accroître la durée de service, une pré-séparation comme celle de Gelterkin

- [6] Vo, P.T. et al. (2015): Stormwater quality management in rail transportation – Past, present and future. *Science of the Total Environment*, 512–513 (2015) 353–363
- [7] BAV (2016): Richtlinie – Chemische Vegetationskontrolle auf und an Gleisanlagen. Bundesamt für Verkehr, Bern, S. 19
- [8] Brauchli-Theotokis, J. (2004): Bestimmung von Glyphosat und AMPA auf Bahnanlagen. *Umwelt-Materialien Nr. 170*, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL)
- [9] Hanke, I. et al. (2009): Pflanzenschutzmittel im Gleisabwasser. *Gas, Wasser, Abwasser GWA*, 7: 1–8
- [10] Pfeffer, M. (1996): Prüfung der Umweltbelastung durch den Herbizideinsatz auf Gleisanlagen der ÖBB. Bericht, 5/673, Institut für Bodenforschung und Baugeologie, Wien, S. 76
- [11] Ehses, H. et al. (2008): Langzeitstudie: Auswirkungen des Herbizideinsatzes im Gleisbereich der DB AG unter besonderer Berücksichtigung des Grundwasserschutzes (1993–1998). Institut Fresenius, Taunusstein, S. 170
- [12] Keusen, H.R. (2002): Entwässerungsverhalten und Schadstoffaustrag von Gleiskörpern – Untersuchung über das Entwässerungsverhalten und den Schadstoffaustrag von Gleiskörpern verschiedener Bauart. *Umwelt-Materialien*, 149, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern, S. 48
- [13] Höntsch, J. et al. (2003): Untersuchungsergebnisse zur Bahngleisentwässerung. *Eisenbahningenieur*, 54: 48–53
- [14] BAV (2014): Richtlinie – Entwässerung von Eisenbahnanlagen. Bundesamt für Verkehr, Bern
- [15] Huber, M.; Welker, A.; Helmreich, B. (2015): «Einführung in die dezentrale Niederschlagswasserbehandlung für Verkehrsflächen- und Metalldachabflüsse: Schacht-/Kompaktsysteme, Rinnensysteme, Straßeneinläufe und Flächenbeläge», *Berichte aus der Siedlungswasserwirtschaft, Technische Universität München, Band 213, ISSN 0942-914X, 98 Seiten*
- [16] Burkhardt, M.; Schmidt, S.; Bigler, R. (2017): VSA-Leistungsprüfung – Leistungsermittlung im Labor- und Feldtests für Anlagen zur Niederschlagswasserbehandlung. *Aqua & Gas*, 11: 33–41
- [17] Gimsing, A.L.; Borggaard, O.K.; Bang, M. (2004): Influence of soil composition on adsorption of glyphosate and phosphate by contrasting Danish surface soils. *European Journal of Soil Science*, 55: 183–191
- [18] Vereecken, H. (2005): Mobility and leaching of glyphosate: a review. *Pest Management Science* 61(12): 1139–1151
- [19] de Jonge, H. et al. (2001): Glyphosate sorption in soils of different pH and phosphorus content. *Soil Science*, 166: 230–238
- [20] EU (2002): Review report for the active substance glyphosate. Bericht, 6511/VI/99-final, European Commission, Brüssel, S. 56
- [21] Burkhardt, M. et al. (2017): Behandlung von Regenwasser – Grosstechnische Erfahrung mit unterirdischer Retention und nachgeschaltetem Adsorberfilter. *Aqua & Gas*, 4: 78–85
- [22] SBB (2010): Linie 500/Gelterkinden-Tecknau km 24.325-25.222, Auflageprojekt Umweltbericht. SBB, Olten
- [23] SBB (2011): Linie 500/Gelterkinden-Tecknau km 24.325-25.222, Auflageprojekt Technischer Bericht und Sicherheitsbericht. SBB, Olten

IS-e CRM und Billing für Energieversorger

smart energy



Diese Lösung von innosolv setzt neue Massstäbe für Billing und CRM. Mehr als 480 Energieversorger vertrauen auf **is-e**.

Die Software

- ◆ automatisiert den «Meter-to-Cash»-Prozess
- ◆ bietet im CRM auch Leads und Angebote
- ◆ läuft auf mobilen Geräten
- ◆ hilft, Geschäftsfälle via Portal zu erledigen (etwa Wohnungswechsel)
- ◆ enthält ein komfortables Dokumentenmanagement inkl. Vertragsmanagement

innosolv
Your Software. Our Passion.

www.innosolv.ch