



Alternative Bahnherbizide

Lysimeterstudien und Wirksamkeitsversuche

Autoren

Ignaz Bürge, Pascal Haberey, Roy Kasteel, Martina Keller, Jürgen Krauss, Thomas Poiger

Auftraggeber

Bundesamt für Verkehr, Verband öffentlicher Verkehr
(vertreten durch SBB, BLS, SOB)



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Wirtschaft, Bildung und Forschung WBF
Agroscope

Impressum

| | |
|-------------|---|
| Herausgeber | Agroscope Müller-Thurgau-Strasse 29 8820 Wädenswil www.agroscope.ch |
| Auskünfte | Ignaz Bürge (ignaz.buerge@agroscope.admin.ch) Martina Keller (martina.keller@agroscope.admin.ch) |
| Wädenswil | 22. April 2024 |

Inhalt

| | |
|---|-----------|
| Zusammenfassung | 5 |
| 1 Einleitung | 7 |
| 1.1 Suche nach alternativen Methoden zur Vegetationskontrolle auf Bahnanlagen | 7 |
| 1.2 Vorstudie 2016-2018: Suche nach alternativen Herbiziden | 8 |
| 2 Lysimeterstudien – experimenteller Teil..... | 9 |
| 2.1 Bau der Lysimeteranlage | 9 |
| 2.2 Befüllen der Lysimeter mit Eisenbahn-Untergrundmaterial..... | 9 |
| 2.3 Applikationen des mobilen Tracers Bromid..... | 11 |
| 2.4 Herbizid-Applikationen..... | 12 |
| 2.5 Sickerwasserprobenahmen..... | 13 |
| 2.6 Analysierte Verbindungen und Analysemethoden | 14 |
| 3 Lysimeterstudien – Ergebnisse | 16 |
| 3.1 Bodentemperaturen, Niederschlagsmengen, Sickerwassermengen | 16 |
| 3.2 Bromidkonzentrationen im Sickerwasser | 17 |
| 3.3 Konzentrationen von Herbiziden und Metaboliten im Sickerwasser | 18 |
| 3.3.1 Flazasulfuron: scharfe Konzentrationsspitzen – verzögertes Auftreten von Metaboliten | 18 |
| 3.3.2 2,4-D: scharfe Konzentrationsspitzen in N-Lysimetern – nur sporadischer Nachweis in L und W | 19 |
| 3.3.3 Atrazin: Nachweis auch im Sickerwasser un behandelter Lysimeter..... | 20 |
| 3.3.4 Atrazin: hohe Konzentrationen im Sickerwasser behandelter Lysimeter | 20 |
| 3.3.5 Vergleichbare Sickerwasserkonzentrationen in den Replikaten der L- und W-Lysimeter – grosse Unterschiede bei N-Lysimetern | 21 |
| 3.3.6 Glyphosat und Quizalofop-Säure: tiefe Sickerwasserkonzentrationen der Wirkstoffe und Metaboliten..... | 22 |
| 3.3.7 Pelargonsäure: einmaliger Nachweis in hohen Konzentrationen nach Starkniederschlag | 22 |
| 3.4 Jahresdurchschnittskonzentrationen..... | 25 |
| 3.5 Anteil der applizierten Herbizidmengen im Sickerwasser | 27 |
| 3.6 Schlussfolgerungen bezüglich des Risikos der Verlagerung der Herbizide ins Grundwasser | 28 |
| 3.6.1 Worst-Case Charakter der Lysimeterstudie | 28 |
| 3.6.2 Vergleich der applizierten Herbizide..... | 29 |
| 4 Wirksamkeitsversuche – experimenteller Teil | 30 |
| 4.1 Wirksamkeitsversuche mit verschiedenen Herbiziden und Tankmischungen von Herbiziden | 30 |
| 4.2 Gewächshaus | 31 |
| 4.3 Gleisanlagen – krautige, zweikeimblättrige Unkräuter | 34 |
| 4.4 Gleisanlagen – Schachtelhalm | 37 |
| 5 Wirksamkeitsversuche – Ergebnisse | 39 |
| 5.1 Gewächshausversuche | 39 |

| | | |
|-------|---|-----------|
| 5.1.1 | Wirksamkeit der Solo-Produkte | 39 |
| 5.1.2 | Geringe Minderwirkung bei Quizalofop-P-ethyl in Tankmischung mit 2,4-D..... | 41 |
| 5.1.3 | Synergistische Wirkung der Tankmischung von Flazasulfuron mit Pelargonsäure | 43 |
| 5.1.4 | Vergleich der verschiedenen, getesteten Herbizid-Varianten | 43 |
| 5.2 | Freilandversuche auf Gleisanlagen – krautige, zweikeimblättrige Unkräuter | 46 |
| 5.2.1 | Allgemeine Angaben | 46 |
| 5.2.2 | Standort Bülach | 46 |
| 5.2.3 | Standort Limmattal | 48 |
| 5.3 | Freilandversuche auf Gleisanlagen – Schachtelhalm | 51 |
| 5.3.1 | Allgemeine Angaben | 51 |
| 5.3.2 | Standort Burghalden | 51 |
| 5.3.3 | Standort Döttingen/Liebefeld | 53 |
| 5.4 | Schlussfolgerungen Wirksamkeitsversuche | 54 |
| 6 | Dank | 56 |
| 7 | Autoren | 57 |
| 8 | Literaturverzeichnis | 58 |
| 9 | Anhang | 60 |

Zusammenfassung

Für die chemische Vegetationskontrolle auf und an Gleisanlagen sind in der Schweiz gemäss Richtlinie des Bundesamts für Verkehr (BAV)¹ nur Pflanzenschutzmittel mit dem herbiziden Wirkstoff Glyphosat zugelassen. Um mögliche Auswirkungen auf die Umwelt zu reduzieren, untersuchen die Bahngesellschaften verschiedene nicht-chemische Methoden der Unkrautkontrolle, die nicht Teil dieser Studie sind. Ein kompletter Verzicht auf chemische Vegetationskontrolle dürfte aber schwierig sein. Agroscope erhielt deshalb vom BAV und vom Verband öffentlicher Verkehr den Auftrag, als Alternative zu Glyphosat weitere Herbizidwirkstoffe zu untersuchen. Neue Herbizide müssen für eine vorgesehene Anwendung auf Bahnanlagen hinreichend wirksam sein, dürfen aber auch keine unannehmbaren Nebenwirkungen auf Mensch, Tier und Umwelt haben. Auf den Schutz des Grundwassers wird besonderes Augenmerk gelegt.

Grundwasserschutz

Glyphosat weist ein tiefes Risiko der Verlagerung ins Grundwasser auf, was auch bei alternativen Herbiziden der Fall sein sollte. Im vorliegenden Projekt wurde die Verlagerung von Glyphosat und vier potenziellen alternativen Herbiziden (2,4-D, Quizalofop-P-ethyl, Flazasulfuron und Pelargonsäure) in Lysimetern untersucht, die mit Erdmaterialien von verschiedenen Bahnanlagen befüllt wurden. Die Herbizide wurden in drei aufeinanderfolgenden Jahren (2020-2022) appliziert. Sickerwasser wurde regelmässig entnommen und auf die Herbizide und deren Hauptabbauprodukte untersucht. Ebenfalls appliziert wurde Atrazin (als mobile Referenzverbindung). Atrazin wurde bis Anfang der 1990er Jahre zur Vegetationskontrolle auf Bahnanlagen eingesetzt und der Nachweis im Grundwasser ist teilweise auf solche Anwendungen zurückzuführen.

Die höchsten Jahresdurchschnittskonzentrationen von 23 µg/L wurden erwartungsgemäss für Atrazin gefunden. Die Herbizide 2,4-D und Flazasulfuron und ein Hauptmetabolit von Flazasulfuron (DTPU) erreichten Jahresdurchschnittskonzentrationen von 0.60, 0.43 resp. 0.50 µg/L. Pelargonsäure wurde nur im Sickerwasser von einer einzigen Probenahme nachgewiesen, kurz nach einer Applikation und einem Starkniederschlagsereignis. Quizalofop-Säure, Glyphosat und deren Metaboliten wurden nur sporadisch im Sickerwasser gefunden mit Jahresdurchschnittskonzentrationen <<0.1 µg/L.

Hohe Sickerwasserkonzentrationen wurden typischerweise in Lysimetern mit hohem Sandanteil und tiefem organischen Kohlenstoffgehalt in der Feinerde beobachtet. Die rasch abbaubaren Verbindungen Pelargonsäure und 2,4-D erreichten hingegen die höchsten Konzentrationen in Lysimetern mit hohem Kies- und Steinanteil, der dazu führt, dass das Sickerwasser rascher fliesst und wenig Zeit für Abbau der Substanzen bleibt.

Nach drei Jahren wurden bis zu 30 % der applizierten Menge an Flazasulfuron, 6.5 % Atrazin resp. 0.56 % 2,4-D im Sickerwasser wiedergefunden, in Form der Wirkstoffe und deren Abbauprodukten (ausgedrückt in Wirkstoffäquivalenten). Obwohl die Wiederfindungen von Flazasulfuron deutlich höher waren als jene von Atrazin, waren die Sickerwasserkonzentrationen tiefer, dies aufgrund der 100x tieferen Aufwandmenge.

Von den getesteten Herbiziden ist **Glyphosat** aus Sicht des Grundwasserschutzes immer noch die **beste Option** für eine chemische Vegetationskontrolle auf und an Gleisanlagen. **Quizalofop-Säure** wäre zwar bezüglich Grundwasser auch **unproblematisch**, wirkt aber ausschliesslich gegen Gräser und bräuchte einen Mischungspartner. Die anderen getesteten Alternativen **2,4-D**, **Flazasulfuron** und **Pelargonsäure** weisen alle ein **gewisses Verlagerungspotenzial** auf. Das Risiko einer Grundwasserverschmutzung kann jedoch deutlich reduziert werden durch Teilstückbehandlung (bereits bei Glyphosat gängige Praxis) und nicht-jährliche Anwendung der Herbizide (auch zur Reduzierung des Risikos des Auftretens resistenter Unkräuter).

¹ <https://www.bav.admin.ch/bav/de/home/rechtliches/rechtsgrundlagen-vorschriften/richtlinien/richtlinien-bahn/chemische-vegetationskontrolle-auf-und-an-gleisanlagen.html>

Wirksamkeit

Es wurden Wirksamkeitsversuche im Gewächshaus sowie während zweier Jahre (2021-2022) auf Gleisanlagen durchgeführt. Da es sich bei den geprüften Herbiziden um selektive Produkte und nicht um Totalherbizide wie bei den Glyphosat-haltigen Produkten handelt, wurden auch Tankmischungen geprüft, um bei einem allfälligen, künftigen Einsatz möglichst alle vorkommenden Pflanzen mit einer Behandlung erfassen zu können. Im Gewächshaus wurde primär untersucht, ob es bei den beiden geprüften Tankmischungen (2,4-D und Quizalofop-P-ethyl resp. Flazasulfuron und Pelargonsäure) keine Minderwirkungen im Vergleich zur Anwendung der einzelnen Herbizide (Soloanwendungen) gibt. Auf den Gleisanlagen wurde die Wirksamkeit verschiedener Herbizide und Tankmischungen auf eine für Bahnanlagen typische Mischverunkrautung an zwei Standorten (bei Bülach und im Rangierbahnhof Limmattal) sowie auf Schachtelhalm an drei Standorten (bei Burghalden/Wädenswil, Döttingen und Liebefeld) geprüft. Gegen letzteren kam auch Salzsole (Auftausalz) zur Anwendung.

Das **Glyphosat**-haltige Referenzherbizid **wirkte sehr gut** gegen krautige, zweikeimblättrige Unkräuter. Einzig an einem Standort in einem Bereich mit viel Humus war die Wirkung von Glyphosat nicht nachhaltig, da rasch neue Unkräuter gekeimt sind. Dass Glyphosat **keine Wirkung auf Schachtelhalm** hat, ist bekannt und wurde im Projekt nicht untersucht.

In den Gewächshausversuchen zeigte die Tankmischung mit den Wirkstoffen **2,4-D** und **Quizalofop-P-ethyl** eine mehrheitlich gute Wirkung gegen die getesteten Pflanzen. Es wurden auch keine nennenswerten Minderwirkungen gegenüber den Soloanwendungen beobachtet. Diese hohen Wirkungsgrade konnten in den Gleisversuchen jedoch nicht reproduziert werden – die **Wirkung war ungenügend**. Gegen Schachtelhalm war die Wirkung von 2,4-D kurz nach den Behandlungen gut, nahm dann aber wieder ab.

Mit drei Behandlungen mit **Salzsole** pro Jahr appliziert im Abstand von drei Wochen wurde der **Schachtelhalm** in den Versuchen **am besten bekämpft**. Nach den Behandlungen wurde beim Gleismaterial aber vermehrt Korrosion beobachtet. Eine Salzsole-Applikation müsste so gestaltet werden, dass dies möglichst vermieden werden kann.

In den Gleisversuchen war die Wirkung von Flazasulfuron ausreichend gegen krautige, zweikeimblättrige Unkräuter, nicht jedoch gegen Schachtelhalm. Mit Pelargonsäure wurde in den Gleisversuchen keine ausreichende Wirkung beobachtet.

Bei der **Tankmischung Flazasulfuron und Pelargonsäure** wurden in den Gewächshausversuchen deutliche, synergistische Effekte beobachtet. Diese Tankmischung ist **aus Wirkungssicht die beste Alternative** zu Glyphosat, mit **guter Wirkung** in den Gleisversuchen, sowohl **gegen krautige, zweikeimblättrige Unkräuter** als auch gegen **Schachtelhalm**. Die Wirkung gegen Gräser konnte in den Gleisversuchen aufgrund der geringen Dichten nicht bestimmt werden, war aber zumindest in den Gewächshausversuchen ebenfalls gut.

Fazit

Für die Unkrautkontrolle auf und an Gleisanlagen scheint aus Optik Grundwasserschutz und Wirksamkeit der Einsatz einer Tankmischung Flazasulfuron und Pelargonsäure die beste chemische Alternative zum derzeit verwendeten Glyphosat zu sein. Die Wirkstoffkombination zeigte auch eine gute Wirksamkeit gegen Schachtelhalm, der mit Glyphosat nicht bekämpft werden kann. Das Risiko einer Verlagerung ins Grundwasser ist jedoch bei Glyphosat deutlich geringer als bei Flazasulfuron und Pelargonsäure.

1 Einleitung

1.1 Suche nach alternativen Methoden zur Vegetationskontrolle auf Bahnanlagen

Für die Vegetationskontrolle auf Bahnanlagen wird in der Schweiz derzeit der herbizide Wirkstoff Glyphosat eingesetzt. Die Anwendung erfolgt mit Handspritzgeräten gezielt auf die Unkräuter, es wird also nicht die ganze Gleisfläche behandelt. Grundsätzlich werden sowohl Schotter wie der seitliche Bankettbereich unkrautfrei gehalten. Auf Böschungen und Grünstreifen entlang der Bahnanlagen kann ferner der Wirkstoff Triclopyr eingesetzt werden zur Strunkbehandlung von verholzten Pflanzen.

Glyphosat zeigt eine breite Wirksamkeit gegen ein- und mehrjährige zweikeimblättrige Unkräuter und Gräser. Der Wirkstoff wird über die Blätter aufgenommen und anschliessend in der Pflanze bis in die Wurzeln transloziert, da es sich um einen sogenannten systemischen Wirkstoff handelt. Dadurch werden auch tiefwurzelnde Pflanzen, wie sie im Gleisbereich häufig vorkommen, gut erfasst. Gegen Schachtelhalm,¹ Storcheschnabel² und Hohlzahn (Abbildung 1) zeigt Glyphosat keine resp. nur eine ungenügende Wirkung. Alternative Herbizide, die solche Wirkungslücken schliessen, sind daher erwünscht.

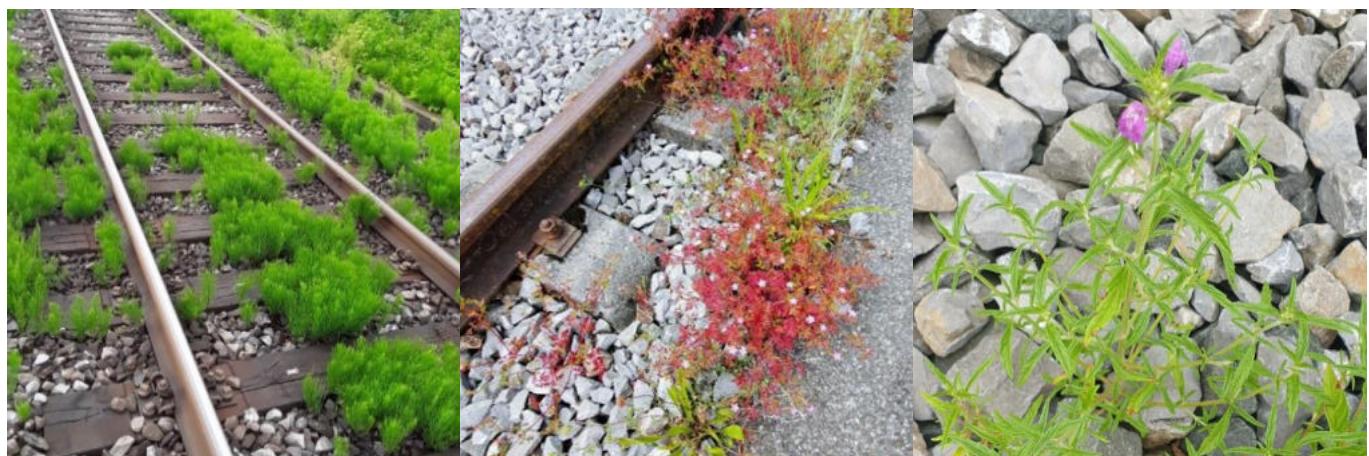


Abbildung 1: Schachtelhalm (*Equisetum arvense*, links), Storcheschnabel (*Geranium robertianum*, Mitte), Hohlzahn (*Galeopsis tetrahit*, rechts)

Wegen Kontroversen bezüglich der toxikologischen Bewertung³ war einige Zeit unsicher, ob Glyphosat weiterhin zugelassen werden würde. Bei der neusten Bewertung der Europäischen Behörde für Lebensmittelsicherheit (EFSA) wurden jedoch keine kritischen Problembereiche bezüglich Gesundheit von Mensch und Tier oder die Umwelt festgestellt.⁴ Basierend auf dieser Einschätzung hat die Europäische Kommission kürzlich die Genehmigung um 10 Jahre verlängert.⁵

Ungeachtet des Entscheids der EU-Kommission suchen die Bahnen in der Schweiz und auch andernorts in Europa nach alternativen Methoden zur Vegetationskontrolle.⁶ Im Rahmen des SBB Aktionsplans «NoHerbie – Alternative Vegetationskontrolle» werden verschiedene nicht-chemische Methoden genauer untersucht, wie der Einsatz von Heisswasser, die Vegetationspflege in Randbereichen mit autonomen, mobilen Mäherobotern, die Installation aufwuchshemmender Materialien (Geotextilien), die gezielte Ansaat von langsam wachsenden Pflanzenmischungen, welche den vielfältigen Anforderungen an Sicherheit, Unterhalt und Umwelt gerecht werden oder auch die Vegetationskontrolle mittels Hochspannung. Ein kompletter Verzicht auf chemische Methoden dürfte aber schwierig sein. Der vorliegende Bericht befasst sich mit alternativen **chemischen Methoden** zur Vegetationskontrolle auf Bahnanlagen.

1.2 Vorstudie 2016-2018: Suche nach alternativen Herbiziden

Alternative Herbizide müssen für eine vorgesehene Anwendung auf Bahnanlagen **hinreichend wirksam** sein (siehe Kapitel 4 und 5), dürfen aber auch keine unannehbaren Nebenwirkungen auf Mensch, Tier und Umwelt haben. Auf den **Schutz des Grundwassers** wird besonderes Augenmerk gelegt, da Bahnanlagen grundsätzlich so gebaut sind, dass Regenwasser rasch versickert, um Stauwasser zu vermeiden. Bis Anfang der 1990er Jahre wurde in der Schweiz der herbizide Wirkstoff Atrazin zur Vegetationskontrolle auf Bahnanlagen eingesetzt. Der Nachweis von Atrazin und gewissen Abbauprodukten (Metaboliten) im Grundwasser ist teilweise auf solche Anwendungen zurückzuführen.⁷

Herbizide, die in Eisenbahn-Untergrundmaterialien gut binden, d.h. eine gute Sorption aufweisen, und/oder rasch abgebaut werden (auch in Böden mit geringer mikrobieller Aktivität), sind aus Sicht des Grundwasserschutzes zu bevorzugen. Ein einfacher, empirischer Parameter zur Abschätzung des Risikos der Verlagerung ins Grundwasser ist der sogenannte «Groundwater Ubiquity Score» (GUS), welcher sich wie folgt berechnet:⁸

$$\text{GUS} = \log \text{DT}_{50} (4 - \log K_{oc})$$

wobei DT_{50} die Halbwertszeit im Boden (in Tagen) und K_{oc} der Sorptionskoeffizient (Verteilungskoeffizient zwischen organischem Kohlenstoff (organic carbon: oc) und Wasser, in mL/g) ist. Verbindungen mit GUS-Werten < 1.8 weisen ein geringes Risiko der Verlagerung ins Grundwasser auf («non-leachers»), Verbindungen mit $\text{GUS} > 1.8$ können grundsätzlich ins Grundwasser gelangen («leachers»).

Im Rahmen einer Vorstudie zu diesem Projekt⁹ wurde nach möglichen Herbiziden gesucht, die das Kriterium eines «non-leachers» erfüllen, und zwar bezüglich Wirkstoff und Metaboliten. Als weiteres Kriterium wurde die Abbaubarkeit im Boden berücksichtigt, wobei Wirkstoffe mit $\text{DT}_{50} > 60$ Tage (auch bezüglich Metaboliten) ausgeschlossen wurden. Von den zu Projektbeginn 2016 in der Schweiz zugelassenen Herbizid-Wirkstoffen (etwa 70-80) erfüllten lediglich fünf diese Kriterien.

Die beiden Wirkstoffe **2,4-D** und **Quizalofop-P-ethyl** wurden schliesslich für erste Untersuchungen im Rahmen der Vorstudie ausgewählt. Abbau und Sorption der Wirkstoffe und fünf ihrer Metaboliten wurden in drei Untergrundmaterialien von Bahnstandorten untersucht, sowie in Brechsand, der beispielsweise beim Bau von Entwässerungsgräben entlang von Bahnanlagen verwendet wird. Es handelte sich um sandige Materialien mit tiefem Gehalt an organischem Kohlenstoff ($\leq 0.3\%$) und hohem pH-Wert (in CaCl_2 7.5-7.7).

Die unter Laborbedingungen durchgeführten Studien¹⁰ zeigten, dass der Abbau der Wirkstoffe und Metaboliten in den Eisenbahn-Untergrundmaterialien etwa eine Grössenordnung langsamer war als in landwirtschaftlichen Böden. Zudem war die Sorption etwa eine Grössenordnung geringer. Daraus lässt sich ableiten, dass das Risiko der Verlagerung ins Grundwasser in diesen Böden zwar immer noch verhältnismässig gering, aber doch deutlich höher ist als in landwirtschaftlichen Böden.

Den Auftraggebern wurde daher empfohlen, die mögliche Verlagerung dieser Verbindungen im Rahmen von Lysimeterstudien genauer zu untersuchen. Als weitere herbizide Wirkstoffe wurden **Flazasulfuron** und **Pelargonsäure** mit einbezogen. Diese Wirkstoff-Kombination wird in Frankreich auf Bahnanlagen eingesetzt und zeigt offenbar eine gute Wirkung. Flazasulfuron und einige seiner Metaboliten erfüllen zwar das Kriterium eines «non-leachers» nicht. Vorteilhaft sind jedoch die vergleichsweise tiefen Aufwandmengen. Pelargonsäure hingegen zeigte in einer separaten Studie einen sehr raschen Abbau, auch in Eisenbahn-Untergrundmaterial.¹¹

2 Lysimeterstudien – experimenteller Teil

2.1 Bau der Lysimeteranlage

Im Juni 2019 wurde am Agroscope-Forschungsstandort Wädenswil eine Anlage mit 10 Lysimetern gebaut. Die Zylinder aus rostfreiem Stahl mit einem Durchmesser von 80 cm (und somit einer Oberfläche von 0.5 m²) und einer Höhe von 145 cm wurden in zwei Reihen auf einem Beton-Fundament aufgestellt (Abbildung 2). Zwischen den Zylindern wurde Kies aufgefüllt, um grössere Temperaturschwankungen möglichst zu vermeiden (Abbildung 5).

Der Boden der Lysimeter-Zylinder ist flach mit einem 3-cm dicken Bohrloch in der Mitte, welches bedeckt wurde mit einem 20 cm × 20 cm grossen Sieb aus rostfreiem Stahl (mit 2 mm Maschenweite und 1 mm Drahtstärke). Sickerwasser gelangt über 2.5-5 m lange Abflussrohre mit 1-2% Gefälle in 20-L Auffangbehälter (beides aus rostfreiem Stahl), welche sich in einer Kühleinheit befinden (betrieben bei 4°C in einem unterirdischen Raum; KC1420, Pircher Partner, Schachen, Schweiz, Abbildung 3). Ein Auffangbehälter wurde auf einer Waage platziert, um den Füllstand online verfolgen zu können (Typ PBD769 mit ICS689 Terminal von Mettler-Toledo, Greifensee, Schweiz).



Abbildung 2: Bau der Lysimeteranlage im Juni 2019



Abbildung 3: Sickerwasser-Auffangbehälter in Kühleinheit mit einem Behälter auf einer Waage

Für optimale Abfluss-Bedingungen wurden die Lysimeter zuunterst mit drei Schichten Quarzsand befüllt (Siligran von Euroquarz, Dorsten/Laussnitz, Deutschland), und zwar mit einer 7 cm mächtigen Schicht feinem Kies (Korngrösse 3-6 mm), gefolgt von 7 cm grobem Sand (0.7-1.2 mm) und 3 cm feinem Sand (0.1-0.5 mm). Danach wurden die Lysimeter mit Erdmaterial befüllt.

2.2 Befüllen der Lysimeter mit Eisenbahn-Untergrundmaterial

Schotter, Unterbau- und Unterbodenmaterial wurde in den Monaten Juli und August 2019 von drei Eisenbahnstrecken in der Schweiz während Gleiserneuerungsarbeiten entnommen. Schotter und Unterbau waren an diesen Standorten letztmals vor 25-33 Jahren erneuert worden. Am Standort **Lanzenhäusern** (Kanton Bern, nachfolgend abgekürzt mit L) wurde Erdmaterial aus 6 Schichten entnommen, relativ sauberer Schotter von den obersten 10 cm (Schicht L1), verschmutzter Schotter mit Feinmaterial aus 10-30 cm Tiefe (L2) und Unterboden bis 140 cm Tiefe (L3-L6, siehe Abbildung 4).

Ein zweiter Standort lag bei **Nottwil** (Kanton Luzern). Hier wurde sauberer Schotter aus 0-15 cm Tiefe entnommen (N1), verschmutzter Schotter aus 15-40 cm (N2), Unterbaumaterial aus 40-60 cm (N3) und Unterbodenmaterial aus 60-80 cm Tiefe (N4). Am dritten Standort **Wabern** (Kanton Bern) wurde Erdmaterial im Bankettbereich entnommen, insgesamt 7 Schichten bis in eine Tiefe von 170 cm (W2-W8). Da die ursprünglich vorhandene Kiesauflage vor der

Beprobung bereits abgeführt worden war, wurde stattdessen frischer Kies, welcher typischerweise für Bankettbereiche eingesetzt wird, als zusätzliche Bodenschicht (W1) verwendet.

Angaben zu den exakten Koordinaten der Probenahmestandorte, zur Korngrößenverteilung der verschiedenen Schichten und zu ausgewählten Eigenschaften der Feinfraktion (<2 mm) finden sich in Tabelle 1. Die Schichten unter dem Schotter (bei L und N) resp. Kies (W) können wie folgt charakterisiert werden: bei L und W ist der Anteil der Feinfraktion (<2 mm) hoch (39-68 %), bei N hingegen ist der Stein- und Kiesanteil (>0.63 cm) bemerkenswert (63-76 %). Die Feinfraktion aller Lysimetertypen weist einen hohen Sandanteil auf (47-84 %).

Tabelle 1: Korngrößenverteilung der verschiedenen Eisenbahn-Untergrundmaterialien und ausgewählte Eigenschaften der Feinfraktion

| Lanzenhäusern L | | | | | | |
|--|-------------------------------|-------|-------|--------|--------|---------|
| Koordinaten / Höhe [m ü M] | 46°50'45"N / 07°20'53"E / 730 | | | | | |
| Bodenschicht | L1 | L2 | L3 | L4 | L5 | L6 |
| Tiefe im Lysimeter [cm] ^a | 0-20 | 20-36 | 36-60 | 60-82 | 82-105 | 105-128 |
| Steine, >6.3 cm [%] | 3.8 | 14 | 4.5 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| grober Kies, 2.0-6.3 cm [%] | 95 | 67 | 16 | 20 | 12 | 21 |
| mittlerer Kies, 6.3-20 mm [%] | 0.10 | 5.6 | 8.6 | 14 | 14 | 9.1 |
| feiner Kies, 2.0-6.3 mm [%] | 0.12 | 4.0 | 8.1 | 7.7 | 6.0 | 6.6 |
| Feinfraktion, <2.0 mm [%] | 0.65 | 8.7 | 63 | 59 | 68 | 63 |
| Sand [%] ^b | | 54.4 | 65.8 | 69.6 | 68.5 | 70.4 |
| Silt [%] ^b | | 32.5 | 23.6 | 21.4 | 23.2 | 20.3 |
| Ton [%] ^b | | 10.8 | 9.7 | 8.4 | 7.6 | 8.5 |
| organischer Kohlenstoff, C _{org} [%] ^b | | 1.32 | 0.54 | 0.32 | 0.44 | 0.44 |
| pH (CaCl ₂) ^c | | 7.5 | 7.5 | 7.5 | 7.5 | 7.5 |
| Wasserhaltekapazität ^d | | 0.46 | 0.39 | 0.34 | 0.36 | 0.35 |
| Kationenaustauschkapazität [meq/100 g] | | 16 | 15 | 13 | 13 | 13 |
| Nottwil N | | | | | | |
| Koordinaten / Höhe [m ü M] | 47°07'37"N / 08°09'33"E / 510 | | | | | |
| Bodenschicht | N1 | N2 | N3 | N4 | | |
| Tiefe im Lysimeter [cm] ^a | 5-30 | 30-46 | 46-89 | 89-128 | | |
| Steine, >6.3 cm [%] | 0.0 | 4.0 | 5.1 | 0.0 | | |
| grober Kies, 2.0-6.3 cm [%] | 100 | 70 | 41 | 30 | | |
| mittlerer Kies, 6.3-20 mm [%] | 0.0 | 22 | 30 | 33 | | |
| feiner Kies, 2.0-6.3 mm [%] | 0.0 | 1.5 | 6.0 | 5.6 | | |
| Feinfraktion, <2.0 mm [%] | 0.0 | 2.3 | 18 | 31 | | |
| Sand [%] ^b | | | 57.9 | 47.4 | | |
| Silt [%] ^b | | | 30.8 | 35.2 | | |
| Ton [%] ^b | | | 10.0 | 13.1 | | |
| organischer Kohlenstoff, C _{org} [%] ^b | | | 0.78 | 2.49 | | |
| pH (CaCl ₂) ^c | | | 7.6 | 7.4 | | |
| Wasserhaltekapazität ^d | | | 0.42 | 0.86 | | |
| Kationenaustauschkapazität [meq/100 g] | | | 17 | 27 | | |
| Wabern W | | | | | | |
| Koordinaten / Höhe [m ü M] | 46°55'33"N / 07°27'16"E / 560 | | | | | |
| Bodenschicht | W1 | W2 | W3 | W4 | W5 | W6 |
| Tiefe im Lysimeter [cm] ^a | 3-8 | 8-30 | 30-45 | 45-78 | 60-78 | 78-92 |
| Steine, >6.3 cm [%] | 0.0 | 6.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 6.5 |
| grober Kies, 2.0-6.3 cm [%] | 0.0 | 22 | 14 | 12 | 20 | 13 |
| mittlerer Kies, 6.3-20 mm [%] | 98 | 18 | 14 | 17 | 19 | 19 |
| feiner Kies, 2.0-6.3 mm [%] | 1.9 | 15 | 17 | 15 | 12 | 16 |
| Feinfraktion, <2.0 mm [%] | 0.55 | 39 | 55 | 56 | 49 | 45 |
| Sand [%] ^b | | 68.6 | 63.3 | 65.9 | 80.3 | 84.3 |
| Silt [%] ^b | | 21.7 | 21.4 | 19.6 | 15.2 | 13.1 |
| Ton [%] ^b | | 9.3 | 14.6 | 13.8 | 4.2 | 2.4 |
| organischer Kohlenstoff, C _{org} [%] ^b | | 0.21 | 0.39 | 0.39 | 0.16 | 0.09 |
| pH (CaCl ₂) ^c | | 7.6 | 7.6 | 7.4 | 7.7 | 7.8 |
| Wasserhaltekapazität ^d | | 0.39 | 0.38 | 0.37 | 0.35 | 0.30 |
| Kationenaustauschkapazität [meq/100 g] | | 15 | 17 | 16 | 13 | 16 |

^aZum Zeitpunkt des Befüllens der Lysimeter. Während der Studie hat sich das Erdmaterial um insgesamt 1-4 cm gesetzt.

^bDie Trockengewichtsfraktionen von Sand, Silt, Ton und Humus (= organischer Kohlenstoff x 1.724) ergeben zusammen 100%.

^cBodensuspension in 0.01 M CaCl₂, 1:3.3 (w/w).

^dIn g Wasser pro g trockenem Boden.



Abbildung 4: Entnahme von Erdmaterial am Standort Lanzenhäusern



Abbildung 5: Eisenbahn-Lysimeter befüllt mit Erdmaterial von den Standorten Wabern (links), Nottwil (Mitte) und Lanzenhäusern (rechts)

Im August 2019 wurden die Lysimeter mit den verschiedenen Bodenschichten befüllt, vier Lysimeter mit Erdmaterial vom Standort Lanzenhäusern (L_a , L_b , L_c , L_d) und je drei mit Erdmaterial von den Standorten Nottwil (N_a , N_b , N_c) und Wabern (W_a , W_b , W_c). Die Erdmaterialien konnten sich während gut 8 Monaten setzen bevor die ersten Applikationen vorgenommen wurden. Im Lysimeter L_d wurden vier Temperatursonden vergraben in 55, 85, 105 und 119 cm Tiefe unter der Schotteroerfläche (Vantage Connect Station von OS Technology, Gümligen, Schweiz; Datenübermittlungseinheit in Abbildung 5 ersichtlich). Die Kabel wurden durch ein Kunststoffrohr entlang der Lysimeterwand nach oben geführt.



Abbildung 6: Lysimeter Lanzenhäusern (links) und Nottwil (Mitte) mit Schotterauflage, Lysimeter Wabern (rechts) mit Kiesauflage

2.3 Applikationen des mobilen Tracers Bromid

Bromid ist ein sogenannter mobiler, konservativer Tracer, d.h. eine Substanz, die nicht abgebaut wird und kaum im Boden bindet und im Wesentlichen mit dem Wasser im Boden verlagert wird. Der Tracer wurde auf ausgewählte Lysimeter appliziert, um den Wassertransport besser zu verstehen. Applikationen erfolgten am 20. April 2020 auf Lysimeter L_d , am 12. März 2021 auf die Lysimeter L_b , L_d , N_b und W_b und am 10. März 2022 auf L_d , N_a , N_b und N_c . Die Aufwandmenge betrug 2.4 g Bromid/m². Details sind in Buerge et al, 2024 beschrieben.¹²

2.4 Herbizid-Applikationen

Die in den Lysimeterstudien verwendeten Herbizid-Produkte wurden bei kommerziellen Verkaufsstellen in der Schweiz bezogen (Aatrex Nine-O aus USA). Nebst Produkten mit den vier Wirkstoffen 2,4-D, Quizalofop-P-ethyl, Pelargonsäure und Flazasulfuron wurden auch Produkte mit dem derzeit zugelassenen Wirkstoff Glyphosat, sowie dem früher verwendeten Wirkstoff Atrazin appliziert. Name, Wirkstoff-Gehalt, Formulierungstyp und Lieferant der verwendeten Herbizid-Produkte sind in Tabelle 2 aufgelistet.

Tabelle 2: In den Lysimeterstudien verwendete, kommerzielle Herbizid-Produkte

| Produktname | Wirkstoff | Konzentr. | Formulierungstyp | Lieferant in der Schweiz |
|----------------------|--------------------|-----------|--------------------------------|------------------------------|
| Aatrex Nine-O | Atrazin | 88.2 % | wasserdispergierbares Granulat | Syngenta, Basel |
| Chikara 25 WG | Flazasulfuron | 25 % | wasserdispergierbares Granulat | Stähler, Zofingen |
| Finalsan Unkrautfrei | Pelargonsäure | 187 g/L | wasserlösliches Konzentrat | GNS Consult, Tägerwilen |
| Natrel | Pelargonsäure | 680 g/L | Emulsionskonzentrat | Stähler, Zofingen |
| Roundup Ultra Pro | Glyphosat | 480 g/L | wasserlösliches Konzentrat | Monsanto/Syngenta, Dielsdorf |
| Targa Super | Quizalofop-P-ethyl | 50 g/L | Emulsionskonzentrat | Bayer, Zollikofen |
| 2,4-D Plus | 2,4-D | 500 g/L | wasserlösliches Konzentrat | Omya, Oftringen |
| Zwei, 4-D Dicopur | 2,4-D | 496 g/L | wasserlösliches Konzentrat | Leu&Gygax, Birmenstorf |

Die Herbizide wurden jeweils Ende April oder Anfang Mai in den Jahren 2020, 2021 und 2022 appliziert. Pelargonsäure wurde im August 2020 noch ein zweites Mal appliziert, in den Jahren 2021 und 2022 wurden je drei Applikationen vorgenommen. Die Applikationsdaten sind in Tabelle 3 angegeben. In der Tabelle ist auch ersichtlich, auf welche der zehn Lysimeter die verschiedenen Wirkstoffe appliziert wurden, die Wirkstoffe 2,4-D und Quizalofop-P-ethyl auf die «a»-Serie (L_a, N_a, W_a), Pelargonsäure und Flazasulfuron auf die «c»-Serie und alle sechs Wirkstoffe auf die «b»-Serie sowie L_d.

Die Herbizid-Produkte wurden so in Leitungswasser verdünnt, dass die gewünschten Aufwandmengen mit einer Brühmenge von 40 mL/m² (entspricht 400 L/ha) ausgebracht werden konnten. Die Aufwandmengen orientierten sich an landwirtschaftlichen Zulassungen. Die Aufwandmenge von Glyphosat entsprach der derzeitigen Praxis der Schweizer Bahnen, jene von Atrazin der Praxis in den 1980er Jahren. Folgende Wirkstoffmengen wurden appliziert (Angaben in g/ha): 2,4-D (1250), Quizalofop-P-ethyl (125), Pelargonsäure (5440; Pelargonsäure wurde in deuterierter Form (Pelargonsäure-D₁₇) appliziert, da normale (nicht deuterierte) Pelargonsäure hohe Blindwerte zeigte; im nachfolgenden Text verwenden wir der Einfachheit halber nur noch den Begriff Pelargonsäure), Flazasulfuron (50), Glyphosat (2900) resp. Atrazin (4500).

Die Produkte wurden nicht auf die ganze Lysimeteroberfläche, sondern auf eine konzentrische Fläche mit 65 cm Durchmesser appliziert, was 0.33 m² oder 2/3 der Lysimeteroberfläche entspricht. Auf die peripheren Flächen wurde bewusst nicht appliziert, um mögliche Artefakte ausschliessen zu können, insbesondere Transport der Verbindungen entlang der Lysimeterwände. Die Applikation der verschiedenen Wirkstoffe resp. Spritzbrühen (je 13.3 mL) erfolgte separat mit einem Sprühfläschchen aus Polyethylen. Weitere Details zur Herstellung der Spritzbrühen, zur Applikation von Pelargonsäure und zur Konzentrationsüberprüfung sind in Buerge et al, 2024¹² aufgeführt.

Tabelle 3: Applikationsdaten und applizierte Wirkstoffe

| Datum | Verbindung | L _a | N _a | W _a | L _b | N _b | W _b | L _c | N _c | W _c | L _d |
|-----------------|-------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 20. April 2020 | Bromid | | | | | | | | | | x |
| 4. Mai 2020 | 2,4-D | x | x | x | x | x | x | | | | x |
| | Quizalofop-P-ethyl | x | x | x | x | x | x | | | | x |
| | Flazasulfuron | | | | x | x | x | x | x | x | x |
| | Pelargonsäure-D ₁₇ | | | | x | x | x | x | x | x | x |
| | Atrazin | | | | x | x | x | | | | x |
| | Glyphosat | | | | x | x | x | | | | x |
| 24. August 2020 | Pelargonsäure-D ₁₇ | | | | x | x | x | x | x | x | x |
| 12. März 2021 | Bromid | | | | x | x | x | | | | x |
| 3. Mai 2021 | 2,4-D | x | x | x | x | x | x | | | | x |
| | Quizalofop-P-ethyl | x | x | x | x | x | x | | | | x |
| | Flazasulfuron | | | | x | x | x | x | x | x | x |
| | Pelargonsäure-D ₁₇ | | | | x | x | x | x | x | x | x |
| | Atrazin | | | | x | x | x | | | | x |
| | Glyphosat | | | | x | x | x | | | | x |
| 30. Juni 2021 | Pelargonsäure-D ₁₇ | | | | x | x | x | x | x | x | x |
| 27. August 2021 | Pelargonsäure-D ₁₇ | | | | x | x | x | x | x | x | x |
| 10. März 2022 | Bromid | | x | | | x | | | x | | x |
| 28. April 2022 | 2,4-D | x | x | x | x | x | x | | | | x |
| | Quizalofop-P-ethyl | x | x | x | x | x | x | | | | x |
| | Flazasulfuron | | | | x | x | x | x | x | x | x |
| | Pelargonsäure-D ₁₇ | | | | x | x | x | x | x | x | x |
| | Atrazin | | | | x | x | x | | | | x |
| | Glyphosat | | | | x | x | x | | | | x |
| 22. Juni 2022 | Pelargonsäure-D ₁₇ | | | | x | x | x | x | x | x | x |
| 26. August 2022 | Pelargonsäure-D ₁₇ | | | | x | x | x | x | x | x | x |

2.5 Sickerwasserprobenahmen

Sickerwasserproben wurden typischerweise bei einem Füllstand von 10-20 L entnommen, ausserdem vor einem Wochenende mit erwarteten Niederschlägen oder spätestens 14 Tage nach der letzten Probenahme. Die Wasserproben wurden in unterschiedliche Flaschen abgefüllt (Abbildung 7) und bis zur Analyse, welche innerhalb von 2 Monaten erfolgte, bei -20 °C gelagert (für Details siehe Buerge et al, 2024).¹² Über die gesamte Studiendauer von drei Jahren gab es rund 140 Probenahmen, im Durchschnitt etwa eine wöchentlich. Bei 10 Lysimetern und 16 analysierten Verbindungen ergab das mehr als 20'000 Analyseergebnisse.



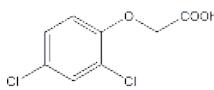
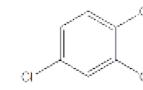
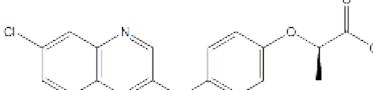
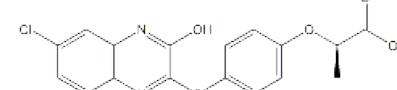
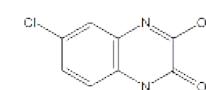
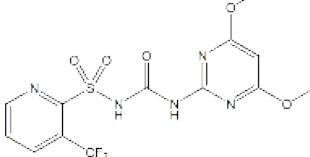
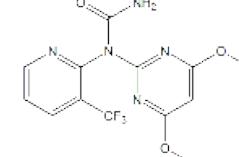
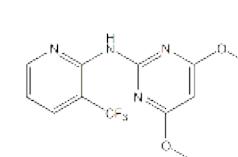
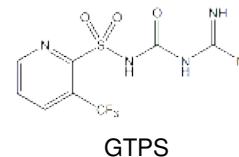
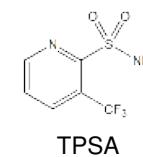
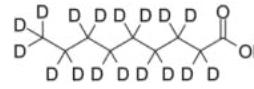
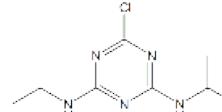
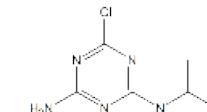
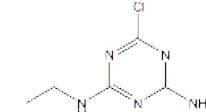
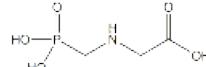
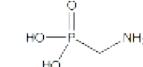
Abbildung 7: Sickerwasserproben wurden in Glasflaschen abgefüllt (links), jene für die Analyse von Glyphosat, AMPA und Bromid in Polyethylen-Flaschen (rechts).

2.6 Analysierte Verbindungen und Analysemethoden

Die chemischen Strukturen der im Analyseprotokoll berücksichtigten Verbindungen (Herbizid-Wirkstoffe und Metaboliten) sind in Tabelle 4 abgebildet. 2,4-D, Flazasulfuron und Atrazin werden im Boden noch zu weiteren Metaboliten abgebaut, die im Sickerwasser aber in tieferen Konzentrationen auftreten dürften (basierend auf Studien mit landwirtschaftlichen Böden) und daher nicht analysiert wurden.

Die Sickerwasserkonzentrationen wurden mit Flüssigchromatographie-Tandem-Massenspektrometrie (LC-MS/MS) bestimmt nach einer online-Anreicherung der Wasserproben. Detaillierte Angaben zu den Analysemethoden, zu verwendeten Referenzchemikalien und internen Standards und zur Haltbarkeit der Wasserproben finden sich in Buerge et al, 2024¹² und Poiger et al, 2017.¹³ Die Bestimmungsgrenzen der verschiedenen Analyten lagen bei 0.001-0.04 µg/L (Abbildung 15). Ein repräsentatives Chromatogramm ist in Abbildung 8 gezeigt.

Tabelle 4: Chemische Strukturen der analysierten Wirkstoffe und Metaboliten

| Wirkstoff | Metaboliten | |
|--|---|---|
|  2,4-D |  2,4-DCP | |
|  Quizalofop-P-Säure |  3-OH-Quizalofop-P-Säure |  3-OH-CQO |
|  Flazasulfuron |  DTPU |  DTPP |
| |  GTPS |  TPSA |
|  Pelargonsäure-D ₁₇ | | |
|  Atrazin |  Desethyl-Atrazin |  Desisopropyl-Atrazin |
|  Glyphosat |  AMPA | |

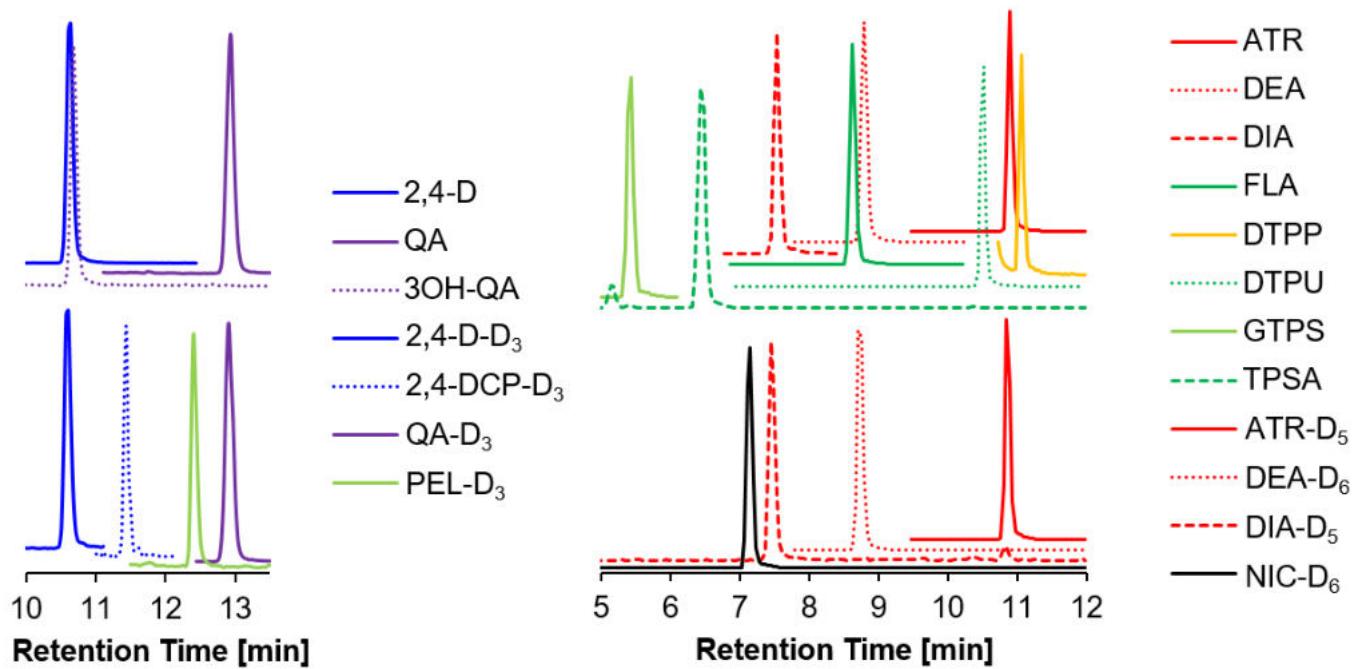


Abbildung 8: LC-MS/MS (MRM) Chromatogramme einer Sickerwasserprobe vom 21. Juni 2021 (Lysimeter N_b). Die Chromatogramme links zeigen die Elution von Verbindungen, die im Negativ-Modus analysiert wurden, rechts Verbindungen im Positiv-Modus. Die oberen Chromatogramme zeigen die Elution der Wirkstoffe und Metaboliten, die unteren jene der zugegebenen, isotopenmarkierten internen Standards.

3 Lysimeterstudien – Ergebnisse

3.1 Bodentemperaturen, Niederschlagsmengen, Sickerwassermengen

Die in 55, 85, 105 und 119 cm Tiefe des Lysimeters L_d gemessenen Bodentemperaturen schwankten während der dreijährigen Studie zwischen 0 und 27 °C, wobei die Amplituden in 55 cm Tiefe erwartungsgemäss am höchsten und jene in 119 cm Tiefe am tiefsten waren (Abbildung 9, links). Die obersten Bodenschichten könnten sporadisch gefroren gewesen sein, allerdings höchstens an vereinzelten Tagen. In der Messstation Wädenswil von MeteoSchweiz, welche sich in einer Distanz von 240 m zur Lysimeteranlage befindet, sank die Bodentemperatur in 5 cm Tiefe nur an zwei Tagen im Januar 2021 unter null, auf -0.1 °C. Die Durchschnittstemperaturen betrugen im ersten Studienjahr 11.8-12.2 °C (Werte für alle vier Tiefen, Tabelle 5). Im zweiten Jahr war es etwas kälter mit 11.2-11.6 °C, im dritten Jahr etwas wärmer mit 12.6-13.1 °C. Der Begriff Studienjahr bezeichnet die jeweilige Zeitperiode zwischen den Herbizid-Applikationen im Frühjahr.

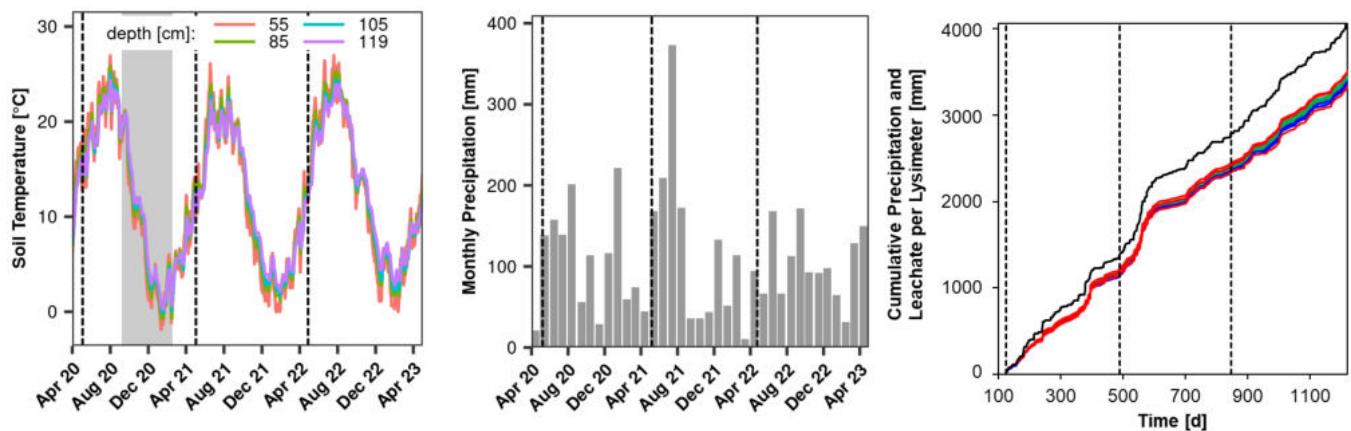


Abbildung 9: Bodentemperaturen in vier Tiefen von Lysimeter L_d (links), monatliche Niederschlagsmengen (Mitte) und kumulative Niederschlags- resp. Sickerwassermengen (rechts) während der dreijährigen Studie. Die gestrichelten Linien markieren die Zeitpunkte der Herbizid-Applikationen (Zeitskala: $t=0$ am 1. Januar 2020). Im grau schattierten Bereich links wurden keine Temperaturen aufgezeichnet. Die gezeigten Kurven wurden aus der Lufttemperatur berechnet.

Tabelle 5: Durchschnittliche Bodentemperaturen in unterschiedlichen Tiefen von Lysimeter L_d und Niederschlags- und Sickerwassermengen in den verschiedenen Lysimetern. Bei einer Lysimeteroberfläche von 0.5 m² entsprechen 2 mm Niederschlag einem Volumen von 1 L. Das Volumen der Lysimeter beträgt \approx 700 L.

| Periode | durchschn. Temp. in 55/85/105/119 cm [°C] | Niederschlag [mm] ^a | Sickerwassermenge [L] (in % des Niederschlags) | | | | | | | | | |
|---------------------|--|-----------------------------------|--|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | | | L_a | L_b | L_c | L_d | N_a | N_b | N_c | W_a | W_b | W_c |
| 4.5.20 - 5.5.21 | 11.8/12.0/12.0/12.2 | 1386 | 585 (84) | 591 (85) | 595 (86) | 589 (85) | 575 (83) | 572 (83) | 578 (83) | 576 (83) | 609 (88) | 595 (86) |
| 6.5.21 - 29.4.22 | 11.2/11.5/11.4/11.6 | 1403 | 609 (87) | 620 (88) | 609 (87) | 615 (88) | 596 (85) | 602 (86) | 609 (87) | 598 (85) | 616 (88) | 617 (88) |
| 30.4.22 - 4.5.23 | 12.7/13.0/12.9/13.1 | 1261 | 511 (81) | 519 (82) | 507 (80) | 514 (81) | 500 (79) | 508 (81) | 513 (81) | 492 (78) | 531 (84) | 539 (86) |

^aDaten der Messstation Wädenswil, MeteoSchweiz

In der Messstation Wädenswil von MeteoSchweiz wurden in den drei Studienjahren 1386, 1403 und 1261 mm Niederschlag verzeichnet (Tabelle 5; zum Vergleich: der durchschnittliche Jahresniederschlag in der Periode 2001-2020 betrug 1338 mm). In den Monaten nach Applikation unterschieden sich die Niederschlagsmengen jedoch stark mit 636 mm (Jahr 1), 925 mm (Jahr 2) und 414 mm (Jahr 3) von Mai bis August (Abbildung 9, Mitte). Die drei Studienjahre werden daher im Folgenden als «normal», «nass» und «trocken» bezeichnet.

Die Sickerwassermengen, die während der drei Studienjahre anfielen, betrugen 572-609 L pro Lysimeter im Jahr 1, 596-620 L im Jahr 2 und 492-539 L im Jahr 3 (Tabelle 5). Die kumulativen Sickerwassermengen machten 78-88 % der kumulativen Niederschlagsmenge aus (Abbildung 9, rechts). Demnach dürften lediglich 12-22 % des Niederschlags verdunstet oder durch Pflanzen aufgenommen worden sein, wobei letzteres vermutlich eher unwichtig war, da der Pflanzenbewuchs in den Lysimetern gering war resp. in den Randbereichen, wo keine Herbizide appliziert wurden, die Unkräuter mechanisch entfernt wurden (zweimal jährlich).

In der Messstation Wädenswil von MeteoSchweiz war die Evapotranspiration in den drei Studienjahren mit 42, 33 und 45 % deutlich höher. Der Boden ist dort mit Rasen bewachsen. Die Schotter- resp. Kiesauflage der Lysimeter wirkt hingegen als Verdunstungsbarriere.

3.2 Bromidkonzentrationen im Sickerwasser

Vor den Herbizid-Applikationen im April/Mai wurde der konservative Tracer Bromid auf ausgewählte Lysimeter appliziert. Die entsprechenden Durchbruchskurven (Verlauf der Bromid-Konzentrationen im Sickerwasser) sind in Abbildung 10 gezeigt. Die Verlagerung von Bromid durch die verschiedenen Bodenmaterialien unterschied sich stark. Der Durchbruch erfolgte in den N-Lysimetern deutlich rascher (erster Nachweis im Sickerwasser nach 3-25 Tagen resp. 39-40 mm Niederschlag) als in den L- und W-Lysimetern (erster Nachweis nach 22-60 Tagen resp. 122-166 mm).

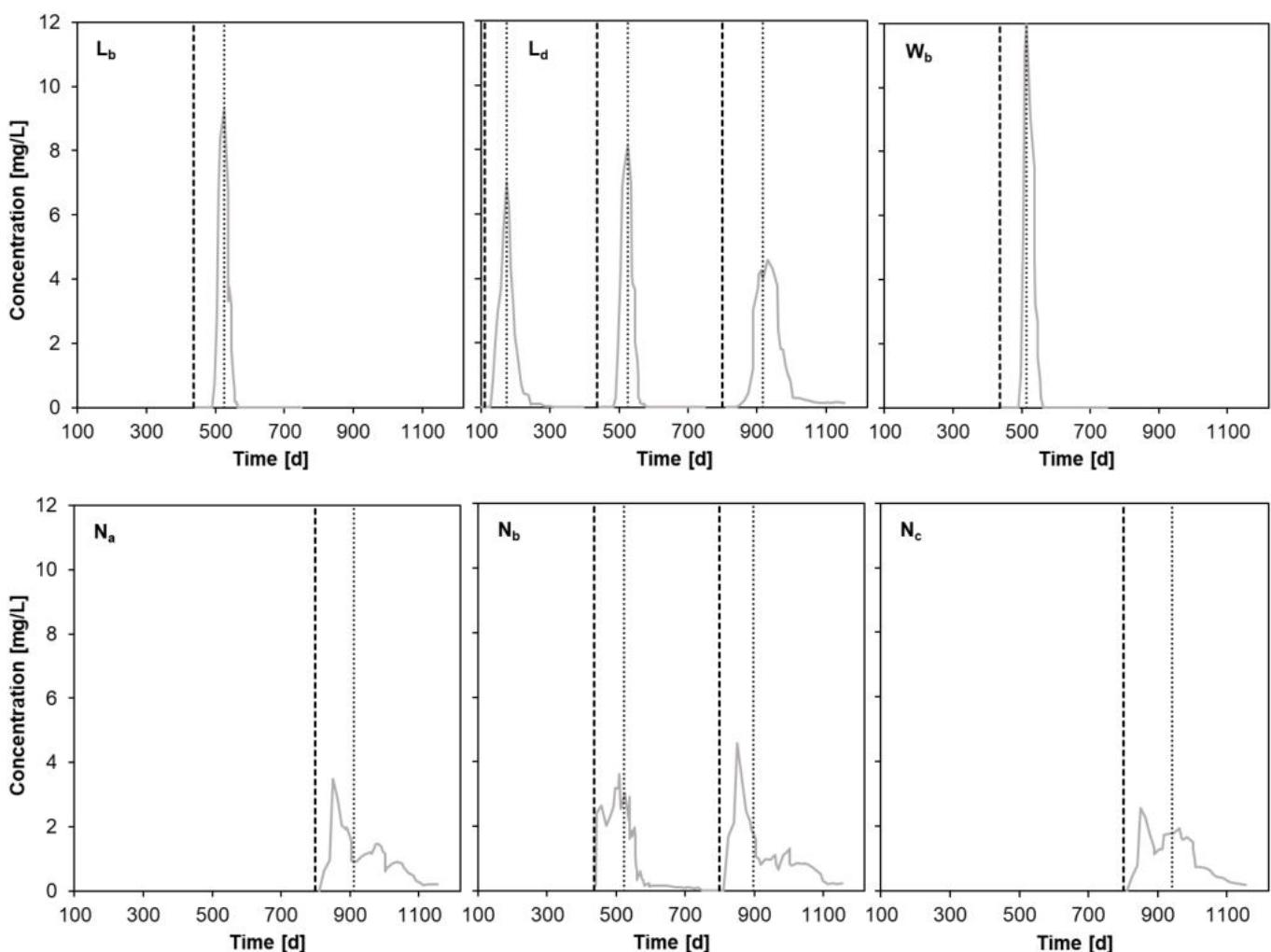


Abbildung 10: Durchbruchskurven des konservativen Tracers Bromid im Sickerwasser ausgewählter Lysimeter. Die gestrichelten Linien markieren die Zeitpunkte der Bromid-Applikationen, gepunktete Linien geben an, wann 50 % des im Sickerwasser nachgewiesenen Bromids erreicht wurde (Zeitskala: t=0 am 1. Januar 2020).

Die N-Lysimeter weisen einen hohen Stein- und Kiesanteil und vergleichsweise wenig Feinmaterial auf (Tabelle 1). Das effektive Transportvolumen (das mit Wasser gefüllte Bodenvolumen, das am Stofftransport beteiligt ist) ist daher deutlich kleiner als in den anderen Lysimetern, was den Unterschied erklären dürfte. Unterschiedliche Durchbruchskurven wurden aber auch für die drei Replikate der N-Lysimeter festgestellt, wobei erhöhte Bromidkonzentrationen im Sickerwasser von N_b früher registriert wurden als in N_a und N_c (Abbildung 10, unten). Dieser Befund ist konsistent mit der Beobachtung, dass nach einem Niederschlagsereignis sich der Behälter von N_b in der Regel rascher mit Sickerwasser füllt als jene aller anderen Lysimeter.

Die Konzentrationsspitzen von Bromid waren in den N-Lysimetern jedoch geringer (2.6-4.6 mg/L) als in den L- und W-Lysimetern (4.6-12 mg/L, Abbildung 10), was auf eine grössere Variabilität der lokalen Wasserfliessgeschwindigkeiten hinweist, also eine höhere Dispersivität in den N-Lysimetern. Erhöhte Bromidkonzentrationen wurden auch während einer längeren Periode beobachtet als in den L- und W-Lysimetern, die deutlich kürzere und fast symmetrische Konzentrationsspitzen zeigten.

3.3 Konzentrationen von Herbiziden und Metaboliten im Sickerwasser

Im Folgenden werden zuerst die Ergebnisse der Sickerwasseranalysen von Lysimetern der «b»-Serie vorgestellt, da immer alle Wirkstoffe auf diese Lysimeter appliziert wurden und sich somit die Wirkstoffe gut vergleichen lassen. Auf Ergebnisse in den anderen Lysimetern wird weiter unten eingegangen (Kapitel 3.3.5).

3.3.1 Flazasulfuron: scharfe Konzentrationsspitzen – verzögertes Auftreten von Metaboliten

Flazasulfuron konnte bereits 3 Tage nach Applikation im Sickerwasser von Lysimeter N_b nachgewiesen werden. Während dieser 3 Tage wurden 32 mm Niederschlag verzeichnet. Nach nur 8 Tagen (resp. 70 mm kumulativem Niederschlag) wurde das Konzentrationsmaximum von 0.41 µg/L erreicht. Danach nahm die Konzentration wieder rasch ab auf Werte <0.02 µg/L (Abbildung 11, Mitte). Im Sickerwasser der Lysimeter L_b und W_b wurde Flazasulfuron jedoch viel später registriert, nach 56 resp. 32 Tagen (264 resp. 121 mm Niederschlag), mit Konzentrationsmaxima von 0.074 resp. 1.2 µg/L (Abbildung 11, links und rechts). Der raschere Nachweis im Sickerwasser von Lysimeter N_b ist konsistent mit dem Verhalten des Tracers Bromid (Abbildung 10).

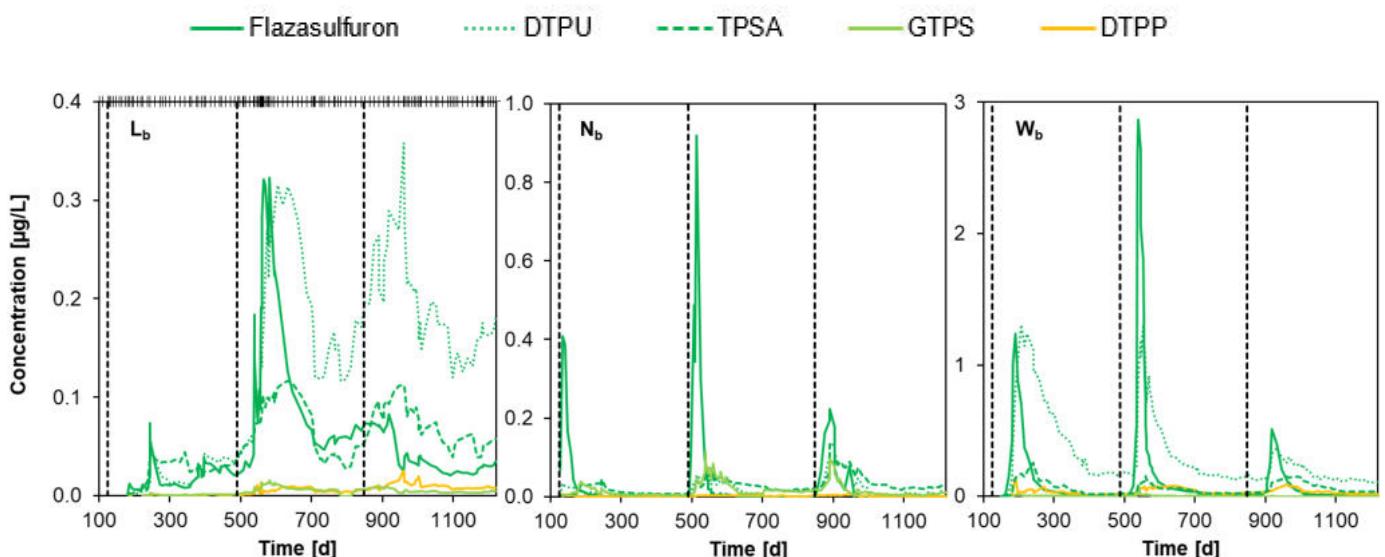


Abbildung 11: Konzentrationen von Flazasulfuron und vier Metaboliten im Sickerwasser der Lysimeter L_b , N_b und W_b . Die gestrichelten Linien markieren die Zeitpunkte der Applikationen (50 g Flazasulfuron/ha auf 2/3 der Oberfläche; Zeitskala: $t=0$ am 1. Januar 2020). Beachte die unterschiedlichen Konzentrationsskalen. In der linken Abbildung sind die Probenahmezeitpunkte in der oberen Achse eingetragen.

Im zweiten Versuchsjahr wurden Konzentrationsspitzen von 0.32, 0.92 und 2.9 µg/L im Sickerwasser der Lysimeter L_b, N_b resp. W_b verzeichnet. Die im Vergleich zum ersten Jahr höheren Konzentrationen könnten auf die höheren Niederschläge in den Wochen nach Applikation, und somit kürzere Verweildauer und Zeit für Abbau im Boden, zurückzuführen sein (Abbildung 9, rechts). Im dritten Jahr hingegen waren die Konzentrationsmaxima mit 0.083, 0.22 resp. 0.51 µg/L tiefer, dies nachdem nur geringe Niederschläge nach Applikation verzeichnet wurden. Die höchsten Konzentrationen wurden im Lysimeter W_b beobachtet, gefolgt von N_b und L_b (Abbildung 11).

Die vier im Analyseprotokoll berücksichtigten Metaboliten von Flazasulfuron waren alle nachweisbar im Sickerwasser. DTPU und TPSA waren die Hauptmetaboliten, im Sickerwasser von Lysimeter N_b wurde zudem GTPS in vergleichbar hohen Konzentrationen gefunden (Abbildung 11). DTPU, TPSA und DTPP sind Hydrolysemetaboliten von Flazasulfuron, die auch abiotisch gebildet werden können. GTPS wurde jedoch in Hydrolysestudien nicht beobachtet.¹⁴ Die Konzentrationsspitzen wurden im Vergleich zum Wirkstoff etwas verzögert erreicht mit Maximalwerten von 1.3 µg/L DTPU und 0.26 µg/L TPSA in W_b und 0.11 µg/L GTPS in N_b. Auch die Konzentrationsabnahme erfolgte langsamer als beim Wirkstoff, d.h. die Durchbruchskurven zeigten ein ausgeprägtes «Tailing» (insbesondere DTPU in W_b, Abbildung 11). Die Maximalkonzentrationen von Flazasulfuron und dessen Metaboliten in den verschiedenen Lysimetern und Versuchsjahren, sowie jene aller anderen Verbindungen, sind in den Tabellen 6-8 zusammengestellt.

3.3.2 2,4-D: scharfe Konzentrationsspitzen in N-Lysimetern – nur sporadischer Nachweis in L und W

Der erste Nachweis von 2,4-D im Sickerwasser von Lysimeter N_b und das Konzentrationsmaximum wurden zu gleichen Zeitpunkten festgestellt wie für Flazasulfuron. Auch die anschliessende Konzentrationsabnahme erfolgte sehr rasch (Abbildung 12, links). In den folgenden beiden Jahren wurden die Konzentrationsspitzen sogar etwas früher registriert als jene von Flazasulfuron. Die Maximalkonzentrationen von 2,4-D (13, 15 und 0.73 µg/L) waren etwa eine Größenordnung höher als jene von Flazasulfuron, was vermutlich in erster Linie auf die 25× höhere Aufwandmenge zurückzuführen ist. Wie bei Flazasulfuron war die Konzentrationsspitze im nassen zweiten Jahr am höchsten und im trockenen dritten Jahr am tiefsten. Der primäre Metabolit 2,4-Dichlorphenol wurde nur an zwei Probenahmezeitpunkten in quantifizierbaren Konzentrationen nachgewiesen mit 0.053 und 0.039 µg/L.

Im Sickerwasser der Lysimeter L_b und W_b war 2,4-D hingegen nur sporadisch nachweisbar mit Maximalkonzentrationen von ≈0.007 resp. 0.015 µg/L und 2,4-Dichlorphenol wurde gar nie detektiert. 2,4-D zeigte demnach ein völlig anderes Verhalten als Flazasulfuron, das im Sickerwasser aller Lysimeter der «b»-Serie gefunden wurde. Beide Verbindungen haben eine ähnlich hohe Mobilität im Boden.^{14, 15} Ausschlaggebend für den beobachteten Unterschied dürfte der im Vergleich zu 2,4-D langsamere Abbau von Flazasulfuron sein (basierend auf Halbwertszeiten für landwirtschaftliche Böden^{14, 15}), d.h. Flazasulfuron dürfte ausreichend stabil sein, um nach Verlagerung durch die Lysimeter noch in messbaren Mengen im Sickerwasser nachweisbar zu sein. Hohe Konzentrationen von 2,4-D in N_b im Vergleich zu nur sporadischem Nachweis in L_b und W_b kann auf den raschen Durchbruch in N_b zurückgeführt werden (siehe Bromid), sodass zu wenig Zeit für Abbau zur Verfügung stand.

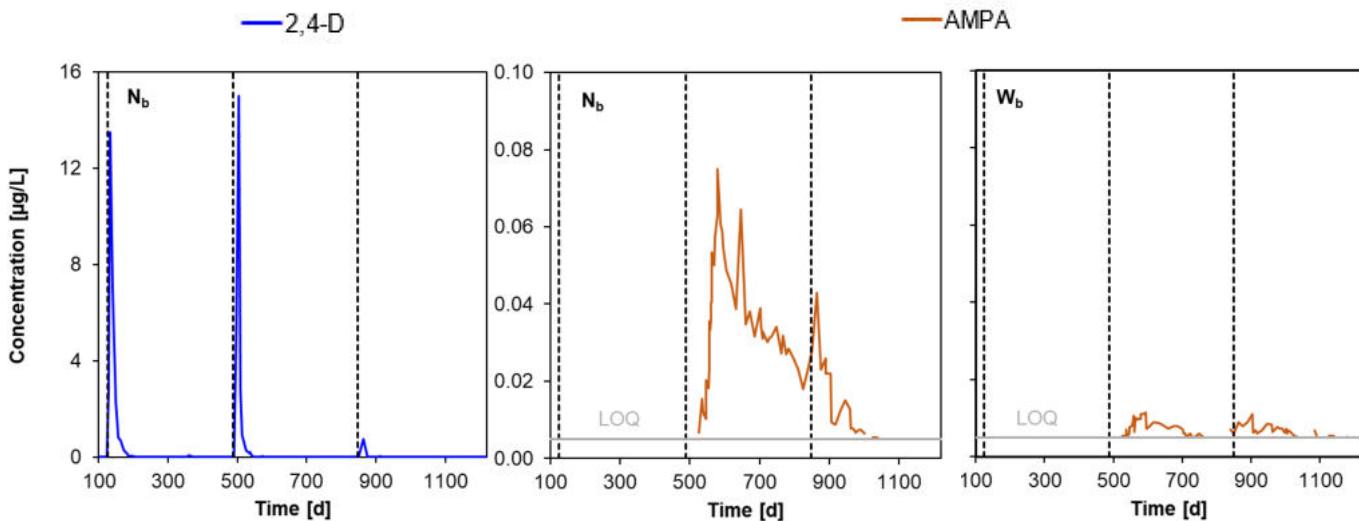


Abbildung 12: Konzentrationen von 2,4-D und dem Glyphosat-Metaboliten AMPA im Sickerwasser der Lysimeter N_b und W_b . Die gestrichelten Linien markieren die Zeitpunkte der Applikationen (1250 g 2,4-D/ha resp. 2900 g Glyphosat/ha auf 2/3 der Oberfläche; Zeitskala: $t=0$ am 1. Januar 2020). Beachte die unterschiedlichen Konzentrationsskalen.

3.3.3 Atrazin: Nachweis auch im Sickerwasser unbehandelter Lysimeter

Atrazin und die Metaboliten Desethyl-Atrazin und Desisopropyl-Atrazin wurden im Sickerwasser aller Lysimeter nachgewiesen, also auch in unbehandelten Lysimetern (Abbildung 13, oben). Atrazin wurde in der Schweiz bis Anfang der 1990er Jahre zur Unkrautkontrolle auf Bahnanlagen eingesetzt. Offenbar sind in den Eisenbahn-Untergrundmaterialien immer noch Rückstände vorhanden, welche mit dem Bodensickerwasser langsam freigesetzt und verlagert werden. Die Konzentrationen zeigten eine ausgeprägte Saisonalität mit Maxima im Sommer und Minima im Winter. Möglicherweise haben die Temperaturen einen Effekt auf die Sorption und/oder Diffusion der Verbindungen.¹⁶

3.3.4 Atrazin: hohe Konzentrationen im Sickerwasser behandelter Lysimeter

Im Sickerwasser des mit Atrazin behandelten Lysimeters N_b wurden deutlich höhere Konzentrationen gefunden als im entsprechenden unbehandelten Lysimeter N_a (Abbildung 13, Mitte). Wie bei 2,4-D und Flazasulfuron wurden scharfe Konzentrationsspitzen beobachtet mit Maximalwerten von 8.7, 8.4 resp. 1.8 µg/L in den drei Studienjahren. Die Konzentrationen waren im dritten Jahr wiederum am tiefsten, jene im zweiten Jahr aber vergleichbar mit dem ersten Jahr (und nicht höher).

Auch die Metaboliten Desethyl-Atrazin und Desisopropyl-Atrazin wurden in erhöhten Konzentrationen im Sickerwasser von N_b nachgewiesen (Abbildung 13, Mitte, unten). Wiederum wurden die Konzentrationsmaxima später erreicht als jene des Wirkstoffs und die Konzentrationsabnahme erfolgte mit einem ausgeprägten Tailing. Die Maximalkonzentrationen nahmen von Jahr zu Jahr zu mit Werten von 3.5, 5.3 und 9.2 µg/L (Desethyl-Atrazin) und 0.29, 1.1 und 2.0 µg/L (Desisopropyl-Atrazin).

Im ebenfalls mit Atrazin behandelten Lysimeter L_b waren die Sickerwasserkonzentrationen von Atrazin und Desisopropyl-Atrazin hingegen nur geringfügig höher als jene im unbehandelten Lysimeter L_a (Abbildung 13, links). Nur bei Desethyl-Atrazin wurden deutlich erhöhte Konzentrationen festgestellt, v.a. im zweiten und dritten Versuchsjahr. Der Konzentrationsverlauf war ähnlich wie jener des Flazasulfuron-Metaboliten DTPU (Abbildung 11, links).

Im Sickerwasser von Lysimeter W_b waren die Konzentrationen von Atrazin, Desethyl-Atrazin (und Desisopropyl-Atrazin) deutlich höher im Vergleich zum unbehandelten W_a (Abbildung 13, rechts). Im ersten Versuchsjahr wurden Konzentrationsspitzen von 132, 33 resp. 1.6 µg/L erreicht. In den darauffolgenden Jahren waren die Maximalkonzentrationen interessanterweise deutlich tiefer (6.5, 7.6 resp. 1.0 µg/L) und unterschieden sich qualitativ

klar von jenen des Wirkstoffs Flazasulfuron (Abbildung 11, rechts). Dieser Befund ist möglicherweise auf rascheren mikrobiellen Abbau¹⁷ zurückzuführen. Nach einer Pause von mehr als 25 Jahren könnte sich die Bodenmikrobiologie nach der erneuten Applikation im ersten Versuchsjahr wieder an den Wirkstoff und dessen Metaboliten angepasst haben und in den Folgejahren diese effizienter abgebaut haben.

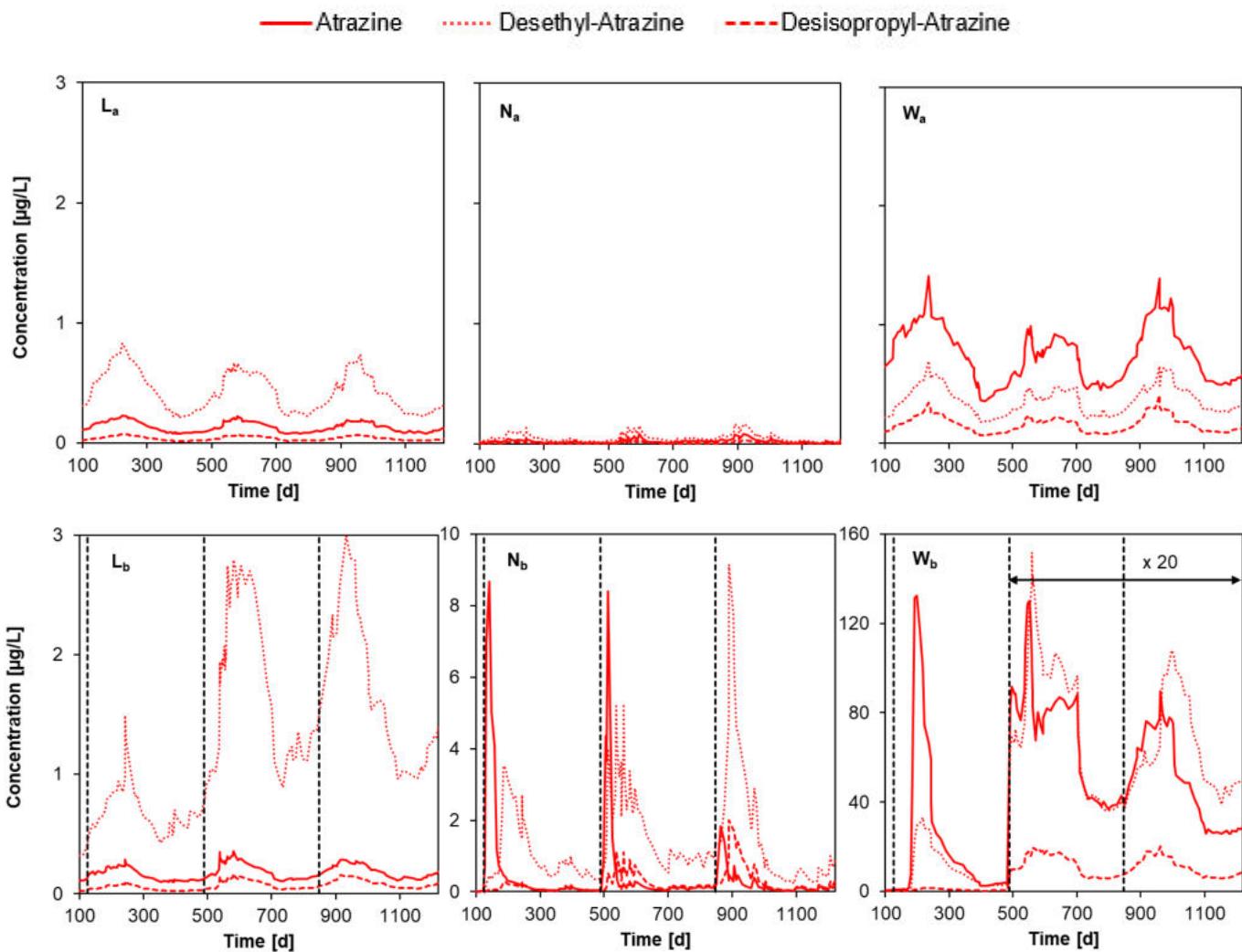


Abbildung 13: Konzentrationen von Atrazine und zwei Metaboliten im Sickerwasser unbehandelter (oben) und behandelter Lysimeter (unten). Die gestrichelten Linien markieren die Zeitpunkte der Applikationen (4500 g Atrazine/ha auf 2/3 der Oberfläche; Zeitskala: t=0 am 1. Januar 2020). Beachte die unterschiedlichen Konzentrationsskalen. Die Konzentrationsskala für W_b in den Jahren 2 und 3 wurde um einen Faktor 20 vergrößert zur besseren Visualisierung des Konzentrationsverlaufs.

3.3.5 Vergleichbare Sickerwasserkonzentrationen in den Replikaten der L- und W-Lysimeter – grosse Unterschiede bei N-Lysimetern

In den obigen Kapiteln wurden die Ergebnisse der Sickerwasseranalysen von Lysimetern der «b»-Serie vorgestellt und diskutiert. Die Herbizide wurden aber auch auf weitere Lysimeter appliziert, die mit Untergrundmaterial vom gleichen Standort gefüllt waren (Tabelle 3). Für Flazasulfuron, Atrazine und deren Metaboliten wurden im Sickerwasser von L- und W-Lysimetern insgesamt vergleichbare Konzentrationen gefunden: für Flazasulfuron und Metaboliten in L_b/L_c/L_d und W_b/W_c (Abbildung 14, oben), für Atrazine und Metaboliten in behandelten Lysimetern L_b/L_d (Mitte, rechts) resp. unbehandelten Lysimetern L_a/L_c, N_a/N_c und W_a/W_c (unten).

Im Sickerwasser der N-Lysimeter wurden jedoch teilweise grosse Unterschiede festgestellt. So betragen die Maximalkonzentrationen von Flazasulfuron in N_b 0.41, 0.92 und 0.22 µg/L, während sie in N_c deutlich tiefer waren mit 0.007, 0.020 und 0.007 µg/L (Abbildung 14, Mitte, links). Bromid wurde im Sickerwasser von Lysimeter N_b früher

detektiert als in N_c (Abbildung 10, unten), d.h. die verfügbare Zeit für Abbau von Flazasulfuron war im Lysimeter N_b geringer als in N_c, was den beobachten Unterschied erklären dürfte.

Grosse Unterschiede gab es auch bei 2,4-D mit Konzentrationsspitzen von 13, 15 und 0.73 µg/L in N_b im Vergleich zu 8.8, 1.1 und 0.011 µg/L in N_a (Abbildung 14, Mitte). Auch dieser Befund kann mit den Bromid-Daten erklärt werden. Der Tracer zeigte in N_b einen rascheren Durchbruch als in N_a (Abbildung 10, unten).

3.3.6 Glyphosat und Quizalofop-Säure: tiefe Sickerwasserkonzentrationen der Wirkstoffe und Metaboliten

Glyphosat wurde nur in Sickerwasser von Lysimeter N_b detektiert mit einer Maximalkonzentration von 0.022 µg/L (Nachweis nur in 5 Proben über der Bestimmungsgrenze). Der Metabolit AMPA wurde häufiger nachgewiesen und erreichte Konzentrationen von 0.075 µg/L in N_b und 0.011 µg/L in W_b (Abbildung 12). Die höchsten Konzentrationen wurden im zweiten Versuchsjahr beobachtet, während AMPA im ersten Jahr nicht nachweisbar war. Aufgrund der starken Sorption und der damit zusammenhängenden langen Verweilzeit im Boden kann nicht ausgeschlossen werden, dass der Nachweis im Sickerwasser im zweiten Jahr noch von der Applikation im ersten Jahr herrührte (und nicht von jener im zweiten Jahr).

Quizalofop-Säure und 3-OH-Quizalofop-Säure wurden nur sporadisch gefunden und nur im Sickerwasser der Lysimeter N_a und N_b mit Maximalkonzentrationen von 0.033 resp. 0.021 µg/L im zweiten Versuchsjahr. Der tertiäre Metabolit 3-OH-CQO wurde nicht in quantifizierbaren Mengen nachgewiesen (<0.005 µg/L).

3.3.7 Pelargonsäure: einmaliger Nachweis in hohen Konzentrationen nach Starkniederschlag

Pelargonsäure wurde nur zu einem einzigen Probenahmezeitpunkt in Sickerwasser der L- und N-Lysimeter nachgewiesen. Allerdings waren die Konzentrationen ausserordentlich hoch, höher als jene aller anderen Verbindungen (7.6-561 µg/L, Tabelle 8). Dieser einmalige Nachweis im Sickerwasser folgte der Applikation am 22. Juni 2023. Zwei Stunden nach Applikation wurde ein Starkniederschlagsereignis verzeichnet (29 mm innerhalb von nur 20 min). Am darauffolgenden Tag mussten die Sickerwasserbehälter bereits geleert werden – diese Probenahme erfolgte 22 Stunden nach Applikation. Die Proben wurden unmittelbar danach tiefgekühlt.

Wir gehen davon aus, dass Pelargonsäure rasch durch die Lysimeter verlagert wurde entlang präferenzieller Fliesswege. In den Sickerwasserproben wurden, je nach Lysimeter, 0.04-4.2 % der am Vortag applizierten Stoffmenge nachgewiesen. Im Sickerwasser der W-Lysimeter wurde Pelargonsäure jedoch nicht detektiert. Die Verweilzeit des Wassers (und somit Zeit für Abbau) ist in den W-Lysimetern im Vergleich zu den anderen länger.

Pelargonsäure wird in Eisenbahn-Untergrundmaterialien rasch abgebaut, nach 4-11 Stunden zu 50 %, nach 12-35 Stunden zu 90 % (Daten aus der Vorstudie).¹¹ Die 22 Stunden zwischen Applikation und Probenahme waren demnach nicht ausreichend für vollständigen Abbau der Verbindung. In den darauffolgenden Sickerwasserproben (Probenahme ≈190 Stunden nach Applikation) war Pelargonsäure bereits nicht mehr nachweisbar (<0.04 µg/L), d.h. die Verbindung dürfte in der Zwischenzeit im Boden (oder in den Sickerwasserbehältern) abgebaut worden sein.

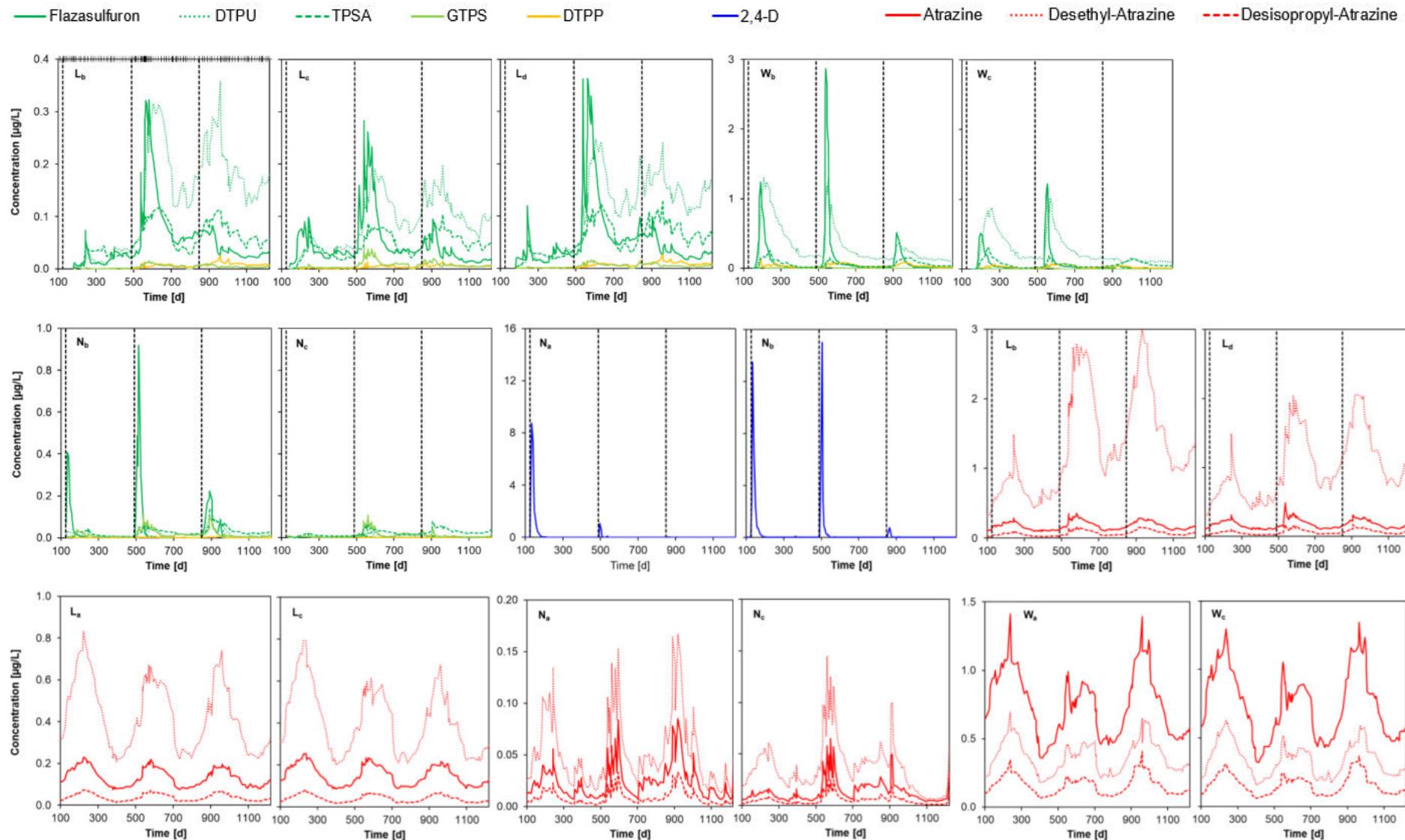


Abbildung 14: Konzentrationen von Flazasulfuron, 2,4-D, Atrazin und Metaboliten im Sickerwasser verschiedener Lysimeter-Replikate. Die gestrichelten Linien markieren die Zeitpunkte der Applikationen (50 g Flazasulfuron/ha, 1250 g 2,4-D/ha resp. 4500 g Atrazin/ha auf 2/3 der Oberfläche; Zeitskala: t=0 am 1. Januar 2020). In der untersten Zeile sind Konzentrationen von Atrazin und Metaboliten in unbehandelten Lysimetern gezeigt. Beachte die unterschiedlichen Konzentrationsskalen.

Tabelle 6: Maximalkonzentrationen im Sickerwasser der verschiedenen Lysimeter im Versuchsjahr 1 [$\mu\text{g}/\text{L}$]

| | L _a | L _b | L _c | L _d | N _a | N _b | N _c | W _a | W _b | W _c |
|-------------------------------|--------------------|----------------|--------------------|----------------|--------------------|----------------|--------------------|-------------------|----------------|-------------------|
| 2,4-D | <0.01 | <0.01 | - | <0.01 | 8.8 | 13 | - | <0.01 | 0.015 | - |
| 2,4-DCP | <0.03 | <0.03 | - | <0.03 | 0.051 | 0.053 | - | <0.03 | <0.03 | - |
| Quizalofop-Säure | <0.002 | <0.002 | - | <0.002 | <0.002 | <0.002 | - | <0.002 | <0.002 | - |
| 3-OH-Quizalofop-Säure | <0.003 | <0.003 | - | <0.003 | <0.003 | <0.003 | - | <0.003 | <0.003 | - |
| 3-OH-CQO | <0.005 | <0.005 | - | <0.005 | <0.005 | <0.005 | - | <0.005 | <0.005 | - |
| Flazasulfuron | - | 0.074 | 0.099 | 0.12 | - | 0.41 | 0.007 | - | 1.2 | 0.51 |
| DTPP | - | 0.002 | 0.003 | 0.002 | - | 0.007 | <0.001 | - | 0.14 | 0.070 |
| DTPU | - | 0.045 | 0.061 | 0.059 | - | 0.034 | 0.004 | - | 1.3 | 0.88 |
| GTPS | - | 0.003 | 0.008 | 0.003 | - | 0.037 | 0.012 | - | 0.008 | 0.009 |
| TPSA | - | 0.050 | 0.082 | 0.052 | - | 0.044 | 0.024 | - | 0.26 | 0.31 |
| Pelargonsäure-D ₁₇ | - | <0.04 | <0.04 | <0.04 | - | <0.04 | <0.04 | - | <0.04 | <0.04 |
| Atrazin | 0.23 ^a | 0.29 | 0.26 ^a | 0.31 | 0.056 ^a | 8.7 | 0.016 ^a | 1.4 ^a | 132 | 1.3 ^a |
| Desethyl-Atrazin | 0.83 ^a | 1.5 | 0.79 ^a | 1.5 | 0.13 ^a | 3.5 | 0.061 ^a | 0.69 ^a | 33 | 0.63 ^a |
| Desisopropyl-Atrazin | 0.073 ^a | 0.11 | 0.082 ^a | 0.10 | 0.023 ^a | 0.29 | 0.008 ^a | 0.35 ^a | 1.6 | 0.31 ^a |
| Glyphosat | - | <0.005 | - | <0.005 | - | <0.005 | - | - | <0.005 | - |
| AMPA | - | <0.005 | - | <0.005 | - | <0.005 | - | - | 0.005 | - |

^aEs wurde kein Atrazin appliziert. Hintergrundkonzentrationen von früheren Applikationen.

Tabelle 7: Maximalkonzentrationen im Sickerwasser der verschiedenen Lysimeter im Versuchsjahr 2 [$\mu\text{g}/\text{L}$]

| | L _a | L _b | L _c | L _d | N _a | N _b | N _c | W _a | W _b | W _c |
|-------------------------------|--------------------|----------------|--------------------|----------------|--------------------|----------------|--------------------|-------------------|----------------|-------------------|
| 2,4-D | <0.01 | <0.01 | - | 0.026 | 1.1 | 15 | - | <0.01 | <0.01 | - |
| 2,4-DCP | <0.03 | <0.03 | - | <0.03 | <0.03 | <0.03 | - | <0.03 | <0.03 | - |
| Quizalofop-Säure | <0.002 | <0.002 | - | <0.002 | 0.006 | 0.033 | - | <0.002 | <0.002 | - |
| 3-OH-Quizalofop-Säure | <0.003 | <0.003 | - | <0.003 | 0.004 | 0.021 | - | <0.003 | <0.003 | - |
| 3-OH-CQO | <0.005 | <0.005 | - | <0.005 | <0.005 | <0.005 | - | <0.005 | <0.005 | - |
| Flazasulfuron | - | 0.32 | 0.28 | 0.36 | - | 0.92 | 0.020 | - | 2.9 | 1.2 |
| DTPP | - | 0.014 | 0.013 | 0.012 | - | 0.004 | <0.001 | - | 0.078 | 0.082 |
| DTPU | - | 0.32 | 0.20 | 0.25 | - | 0.087 | 0.033 | - | 1.3 | 1.2 |
| GTPS | - | 0.016 | 0.046 | 0.016 | - | 0.11 | 0.11 | - | 0.088 | 0.029 |
| TPSA | - | 0.12 | 0.087 | 0.12 | - | 0.062 | 0.061 | - | 0.15 | 0.20 |
| Pelargonsäure-D ₁₇ | - | <0.04 | <0.04 | <0.04 | - | <0.04 | <0.04 | - | <0.04 | <0.04 |
| Atrazin | 0.22 ^a | 0.35 | 0.23 ^a | 0.49 | 0.084 ^a | 8.4 | 0.065 ^a | 0.99 ^a | 6.5 | 1.1 ^a |
| Desethyl-Atrazin | 0.67 ^a | 2.8 | 0.62 ^a | 2.0 | 0.15 ^a | 5.3 | 0.15 ^a | 0.48 ^a | 7.6 | 0.52 ^a |
| Desisopropyl-Atrazin | 0.070 ^a | 0.17 | 0.064 ^a | 0.17 | 0.033 ^a | 1.1 | 0.025 ^a | 0.22 ^a | 0.97 | 0.25 ^a |
| Glyphosat | - | <0.005 | - | <0.005 | - | 0.022 | - | - | <0.005 | - |
| AMPA | - | 0.008 | - | 0.006 | - | 0.075 | - | - | 0.011 | - |

^aEs wurde kein Atrazin appliziert. Hintergrundkonzentrationen von früheren Applikationen.

Tabelle 8: Maximalkonzentrationen im Sickerwasser der verschiedenen Lysimeter im Versuchsjahr 3 [$\mu\text{g}/\text{L}$]

| | L _a | L _b | L _c | L _d | N _a | N _b | N _c | W _a | W _b | W _c |
|-------------------------------|--------------------|----------------|--------------------|----------------|--------------------|----------------|--------------------|-------------------|----------------|-------------------|
| 2,4-D | 0.018 | <0.01 | - | 0.016 | 0.011 | 0.73 | - | <0.01 | <0.01 | - |
| 2,4-DCP | <0.03 | <0.03 | - | <0.03 | <0.03 | <0.03 | - | <0.03 | <0.03 | - |
| Quizalofop-Säure | <0.002 | <0.002 | - | <0.002 | <0.002 | 0.009 | - | <0.002 | <0.002 | - |
| 3-OH-Quizalofop-Säure | <0.003 | <0.003 | - | <0.003 | <0.003 | 0.015 | - | <0.003 | <0.003 | - |
| 3-OH-CQO | <0.005 | <0.005 | - | <0.005 | <0.005 | <0.005 | - | <0.005 | <0.005 | - |
| Flazasulfuron | - | 0.083 | 0.096 | 0.10 | - | 0.22 | 0.007 | - | 0.51 | 0.053 |
| DTPP | - | 0.025 | 0.015 | 0.027 | - | 0.006 | 0.001 | - | 0.091 | 0.047 |
| DTPU | - | 0.36 | 0.20 | 0.24 | - | 0.14 | 0.028 | - | 0.37 | 0.17 |
| GTPS | - | 0.010 | 0.020 | 0.011 | - | 0.096 | 0.038 | - | 0.003 | 0.002 |
| TPSA | - | 0.11 | 0.10 | 0.13 | - | 0.14 | 0.075 | - | 0.15 | 0.15 |
| Pelargonsäure-D ₁₇ | - | 7.6 | 392 | 126 | - | 561 | 42 | - | <0.04 | <0.04 |
| Atrazin | 0.20 ^a | 0.29 | 0.21 ^a | 0.31 | 0.085 ^a | 1.8 | 0.050 ^a | 1.4 ^a | 4.5 | 1.3 ^a |
| Desethyl-Atrazin | 0.74 ^a | 3.0 | 0.68 ^a | 2.1 | 0.17 ^a | 9.2 | 0.10 ^a | 0.65 ^a | 5.4 | 0.59 ^a |
| Desisopropyl-Atrazin | 0.068 ^a | 0.15 | 0.068 ^a | 0.17 | 0.033 ^a | 2.0 | 0.020 ^a | 0.41 ^a | 1.0 | 0.37 ^a |
| Glyphosat | - | <0.005 | - | <0.005 | - | <0.005 | - | - | <0.005 | - |
| AMPA | - | 0.005 | - | 0.005 | - | 0.043 | - | - | 0.011 | - |

^aEs wurde kein Atrazin appliziert. Hintergrundkonzentrationen von früheren Applikationen.

3.4 Jahresdurchschnittskonzentrationen

Jahresdurchschnittskonzentrationen wurden aus dem Verhältnis der insgesamt im Sickerwasser gefundenen Stoffmenge (Konzentration \times Sickerwasservolumen, aufsummiert für alle Probenahmezeitpunkte) und der kumulativen Sickerwassermenge berechnet. Die resultierenden Werte für die sechzehn analysierten Verbindungen und die drei Studienjahre sind in den Tabellen 9-11 aufgelistet. Die höchsten Jahresdurchschnittskonzentrationen wurden für Atrazin (23 µg/L im Lysimeter W_b im ersten Jahr), Pelargonsäure (15 µg/L in N_b, Jahr 3, aus dem einmaligen Nachweis, siehe Kapitel 3.3.7) und Desethyl-Atrazin (9.0 µg/L in W_b, Jahr 1) gefunden. Weitere Verbindungen mit Jahresdurchschnittskonzentrationen >0.1 µg/L waren 2,4-D (0.60 µg/L in N_b, Jahr 1), Desisopropyl-Atrazin (0.51 µg/L in W_b, Jahr 2), Flazasulfuron (0.43 µg/L in W_b, Jahr 2) und DTPU (0.50 µg/L in W_b, Jahr 2). Verbindungen mit Jahresdurchschnittskonzentrationen über der Bestimmungsgrenze, aber <0.1 µg/L waren DTPP (0.045 µg/L in W_b, Jahr 2), GTPS (0.038 µg/L in N_b, Jahr 2), TPSA (0.079 µg/L in W_c, Jahr 3) und AMPA (0.032 µg/L in N_b, Jahr 2), unter der Bestimmungsgrenze waren 2,4-Dichlorphenol (<0.03 µg/L), Quizalofop-Säure (<0.002 µg/L), 3-OH-Quizalofop-Säure (<0.003 µg/L), 3-OH-CQO und Glyphosat (<0.005 µg/L).

Die vielen in den Tabellen 9-11 aufgelisteten Jahresdurchschnittskonzentrationen sind in Abbildung 15 in Form eines Box-Whisker-Plots zusammengefasst. Diese geben für die einzelnen untersuchten Verbindungen die 10, 25, 50 (Median), 75 und 90 % Quantilen der Jahresdurchschnittskonzentrationen an. Im Falle von Atrazin und Glyphosat sind die Jahresdurchschnittskonzentrationen von vier behandelten Lysimetern aus drei Jahren, also 12 Datenpunkte, für alle anderen Verbindungen Werte für sieben Lysimeter aus drei Jahren, also 21 Datenpunkte.

Bei vielen Verbindungen unterscheiden sich die Median- und maximalen Jahresdurchschnittskonzentration beträchtlich, da die Konzentrationen in einem Lysimetertyp deutlich höher waren als in den anderen zwei. So waren die Jahresdurchschnittskonzentrationen von 2,4-D nur in den N-Lysimetern über der Bestimmungsgrenze (maximal 0.60 µg/L), während der Median unter der Bestimmungsgrenze lag (<0.01 µg/L). Hohe Atrazinkonzentrationen wurden in den W-Lysimetern gemessen (Jahresdurchschnittskonzentrationen bis 23 µg/L). In den anderen Lysimetern waren sie jedoch deutlich tiefer, was einen Median von nur 0.14 µg/L ergab. Grosse Konzentrationsunterschiede bei Pelargonsäure mit Jahresdurchschnittskonzentrationen bis 15 µg/L im dritten Versuchsjahr im Vergleich zu den ersten zwei Jahren ohne Nachweis ergaben dennoch einen Median unter der Bestimmungsgrenze (<0.04 µg/L). Die Jahresdurchschnittskonzentrationen von Flazasulfuron und dessen Metaboliten unterschieden sich hingegen deutlich weniger zwischen den verschiedenen Lysimetertypen und Jahren (Abbildung 15).

Tabelle 9: Jahresdurchschnittskonzentrationen im Sickerwasser der verschiedenen Lysimeter im Versuchsjahr 1 [µg/L]

| | L _a | L _b | L _c | L _d | N _a | N _b | N _c | W _a | W _b | W _c |
|-------------------------------|--------------------|----------------|--------------------|----------------|--------------------|----------------|--------------------|-------------------|----------------|-------------------|
| 2,4-D | <0.01 | <0.01 | - | <0.01 | 0.47 | 0.60 | - | <0.01 | <0.01 | - |
| 2,4-DCP | <0.03 | <0.03 | - | <0.03 | <0.03 | <0.03 | - | <0.03 | <0.03 | - |
| Quizalofop-Säure | <0.002 | <0.002 | - | <0.002 | <0.002 | <0.002 | - | <0.002 | <0.002 | - |
| 3-OH-Quizalofop-Säure | <0.003 | <0.003 | - | <0.003 | <0.003 | <0.003 | - | <0.003 | <0.003 | - |
| 3-OH-CQO | <0.005 | <0.005 | - | <0.005 | <0.005 | <0.005 | - | <0.005 | <0.005 | - |
| Flazasulfuron | - | 0.017 | 0.037 | 0.025 | - | 0.025 | <0.001 | - | 0.15 | 0.067 |
| DTPP | - | <0.001 | <0.001 | <0.001 | - | <0.001 | <0.001 | - | 0.025 | 0.018 |
| DTPU | - | 0.018 | 0.031 | 0.021 | - | 0.009 | <0.001 | - | 0.44 | 0.30 |
| GTPS | - | <0.001 | 0.003 | <0.001 | - | 0.010 | 0.003 | - | 0.002 | 0.002 |
| TPSA | - | 0.021 | 0.024 | 0.019 | - | 0.013 | 0.008 | - | 0.067 | 0.066 |
| Pelargonsäure-D ₁₇ | - | <0.04 | <0.04 | <0.04 | - | <0.04 | <0.04 | - | <0.04 | <0.04 |
| Atrazin | 0.14 ^a | 0.16 | 0.15 ^a | 0.16 | 0.022 ^a | 0.62 | 0.009 ^a | 0.77 ^a | 24 | 0.77 ^a |
| Desethyl-Atrazin | 0.46 ^a | 0.69 | 0.45 ^a | 0.64 | 0.054 ^a | 1.2 | 0.034 ^a | 0.36 ^a | 9.4 | 0.36 ^a |
| Desisopropyl-Atrazin | 0.038 ^a | 0.045 | 0.041 ^a | 0.045 | 0.008 ^a | 0.10 | 0.004 ^a | 0.16 ^a | 0.64 | 0.16 ^a |
| Glyphosat | - | <0.005 | - | <0.005 | - | <0.005 | - | - | <0.005 | - |
| AMPA | - | <0.005 | - | <0.005 | - | <0.005 | - | - | <0.005 | - |

^aEs wurde kein Atrazin appliziert. Hintergrundkonzentrationen von früheren Applikationen.

Tabelle 10: Jahresdurchschnittskonzentrationen im Sickerwasser der verschiedenen Lysimeter im Versuchsjahr 2 [µg/L]

| | L _a | L _b | L _c | L _d | N _a | N _b | N _c | W _a | W _b | W _c |
|-------------------------------|--------------------|----------------|--------------------|----------------|--------------------|----------------|--------------------|-------------------|----------------|-------------------|
| 2,4-D | <0.01 | <0.01 | - | <0.01 | 0.043 | 0.58 | - | <0.01 | <0.01 | - |
| 2,4-DCP | <0.03 | <0.03 | - | <0.03 | <0.03 | <0.03 | - | <0.03 | <0.03 | - |
| Quizalofop-Säure | <0.002 | <0.002 | - | <0.002 | <0.002 | <0.002 | - | <0.002 | <0.002 | - |
| 3-OH-Quizalofop-Säure | <0.003 | <0.003 | - | <0.003 | <0.003 | <0.003 | - | <0.003 | <0.003 | - |
| 3-OH-CQO | <0.005 | <0.005 | - | <0.005 | <0.005 | <0.005 | - | <0.005 | <0.005 | - |
| Flazasulfuron | - | 0.13 | 0.12 | 0.15 | - | 0.054 | 0.003 | - | 0.43 | 0.24 |
| DTPP | - | 0.005 | 0.004 | 0.005 | - | 0.002 | <0.001 | - | 0.045 | 0.038 |
| DTPU | - | 0.16 | 0.12 | 0.13 | - | 0.032 | 0.014 | - | 0.50 | 0.45 |
| GTPS | - | 0.007 | 0.018 | 0.008 | - | 0.038 | 0.038 | - | 0.005 | 0.008 |
| TPSA | - | 0.070 | 0.055 | 0.068 | - | 0.035 | 0.031 | - | 0.063 | 0.073 |
| Pelargonsäure-D ₁₇ | - | <0.04 | <0.04 | <0.04 | - | <0.04 | <0.04 | - | <0.04 | <0.04 |
| Atrazin | 0.15 ^a | 0.22 | 0.17 ^a | 0.23 | 0.032 ^a | 0.54 | 0.027 ^a | 0.70 ^a | 3.8 | 0.72 ^a |
| Desethyl-Atrazin | 0.47 ^a | 1.8 | 0.43 ^a | 1.3 | 0.071 ^a | 2.2 | 0.069 ^a | 0.35 ^a | 4.4 | 0.34 ^a |
| Desisopropyl-Atrazin | 0.045 ^a | 0.086 | 0.044 ^a | 0.087 | 0.013 ^a | 0.41 | 0.011 ^a | 0.16 ^a | 0.67 | 0.16 ^a |
| Glyphosat | - | <0.005 | - | <0.005 | - | <0.005 | - | - | <0.005 | - |
| AMPA | - | <0.005 | - | <0.005 | - | 0.032 | - | - | 0.006 | - |

^aEs wurde kein Atrazin appliziert. Hintergrundkonzentrationen von früheren Applikationen.

Tabelle 11: Jahresdurchschnittskonzentrationen im Sickerwasser der verschiedenen Lysimeter im Versuchsjahr 3 [µg/L]

| | L _a | L _b | L _c | L _d | N _a | N _b | N _c | W _a | W _b | W _c |
|-------------------------------|--------------------|----------------|--------------------|----------------|--------------------|----------------|--------------------|-------------------|----------------|-------------------|
| 2,4-D | <0.01 | <0.01 | - | <0.01 | <0.01 | 0.017 | - | <0.01 | <0.01 | - |
| 2,4-DCP | <0.03 | <0.03 | - | <0.03 | <0.03 | <0.03 | - | <0.03 | <0.03 | - |
| Quizalofop-Säure | <0.002 | <0.002 | - | <0.002 | <0.002 | <0.002 | - | <0.002 | <0.002 | - |
| 3-OH-Quizalofop-Säure | <0.003 | <0.003 | - | <0.003 | <0.003 | <0.003 | - | <0.003 | <0.003 | - |
| 3-OH-CQO | <0.005 | <0.005 | - | <0.005 | <0.005 | <0.005 | - | <0.005 | <0.005 | - |
| Flazasulfuron | - | 0.039 | 0.031 | 0.037 | - | 0.024 | <0.001 | - | 0.054 | 0.009 |
| DTPP | - | 0.010 | 0.006 | 0.011 | - | 0.001 | <0.001 | - | 0.035 | 0.022 |
| DTPU | - | 0.19 | 0.11 | 0.15 | - | 0.028 | 0.004 | - | 0.17 | 0.12 |
| GTPS | - | 0.005 | 0.008 | 0.005 | - | 0.016 | 0.008 | - | <0.001 | <0.001 |
| TPSA | - | 0.069 | 0.059 | 0.072 | - | 0.041 | 0.033 | - | 0.073 | 0.079 |
| Pelargonsäure-D ₁₇ | - | 0.14 | 8.3 | 2.5 | - | 15 | 0.87 | - | <0.04 | <0.04 |
| Atrazin | 0.13 ^a | 0.19 | 0.15 ^a | 0.19 | 0.028 ^a | 0.22 | 0.012 ^a | 0.78 ^a | 2.5 | 0.80 ^a |
| Desethyl-Atrazin | 0.40 ^a | 1.7 | 0.38 ^a | 1.3 | 0.057 ^a | 1.6 | 0.026 ^a | 0.40 ^a | 3.3 | 0.36 ^a |
| Desisopropyl-Atrazin | 0.039 ^a | 0.090 | 0.039 ^a | 0.083 | 0.010 ^a | 0.40 | 0.004 ^a | 0.17 ^a | 0.55 | 0.18 ^a |
| Glyphosat | - | <0.005 | - | <0.005 | - | <0.005 | - | - | <0.005 | - |
| AMPA | - | <0.005 | - | <0.005 | - | 0.006 | - | - | 0.005 | - |

^aEs wurde kein Atrazin appliziert. Hintergrundkonzentrationen von früheren Applikationen.

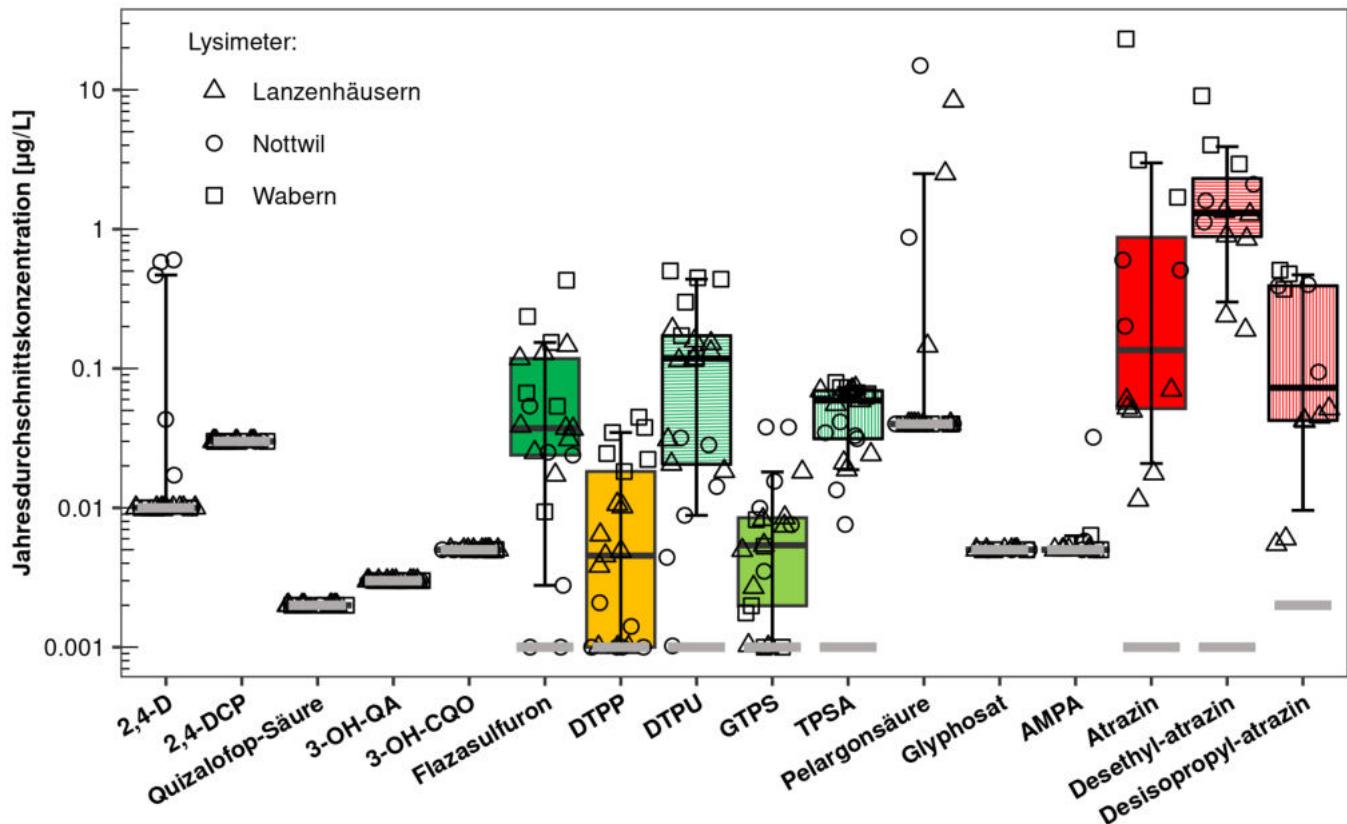


Abbildung 15: Jahresdurchschnittskonzentrationen der sechs Wirkstoffe und deren Metaboliten im Sickerwasser verschiedener Lysimeter (vier behandelte Lysimeter im Falle von Atrazin und Glyphosat, sieben behandelte Lysimeter für alle anderen Verbindungen) während der drei Studienjahre. Die Box-Whisker-Plots geben 10, 25, 50 (Median), 75 und 90 % Quantilen an. Die in den unbehandelten Lysimetern gefundenen Konzentrationen von Atrazin und dessen Metaboliten wurden abgezogen. Die grauen Linien markieren die Bestimmungsgrenzen. Beachte die logarithmische Skala.

3.5 Anteil der applizierten Herbizidmengen im Sickerwasser

Nach drei Jahren Studiendauer wurde bestimmt, welcher prozentuale Anteil der applizierten Herbizidmengen durch die Böden verlagert und im Sickerwasser gefunden wurde. Die Stoffmengen im Sickerwasser wurden aus den Konzentrationen und den Sickerwassermengen berechnet, aufaddiert und in Relation zur gesamthaft ausgebrachten Herbizidmenge pro Lysimeter gesetzt (in %, wird nachfolgend als Wiederfindung bezeichnet). Metaboliten wurden ebenfalls berücksichtigt, wobei deren Anteil umgerechnet wurde in Wirkstoffäquivalente (Korrektur nach Molekulargewicht).

Die Wiederfindungen der sechs applizierten Herbizide im Sickerwasser der Lysimeter der «b»-Serie sind in Abbildung 16 dargestellt. Die höchsten Wiederfindungen wurden für Flazasulfuron und dessen Metaboliten festgestellt. 11 %, 4.9 % und 30 % der applizierten Menge wurden nach drei Jahren im Sickerwasser der Lysimeter L_b, N_b resp. W_b gefunden. Flazasulfuron machte 20-26 % der Rückstände im Sickerwasser aus, DTPU (19-53 %) und TPSA (14-36 %) waren die Hauptmetaboliten (in N_b auch GTPS mit 19 %).

Hohe Wiederfindungen gab es auch bei Atrazin und Metaboliten mit 0.45 % in L_b, 0.96 % in N_b und 6.5 % in W_b (Abbildung 16). Desethyl-Atrazin war die Hauptkomponente und machte 38-92 % der Rückstände im Sickerwasser aus. Es muss hier angemerkt werden, dass im Analyseprotokoll nur die wichtigsten, mobilen Metaboliten berücksichtigt wurden und dass andere Metaboliten wie Flazasulfuron-HMTU,¹⁴ Hydroxy-Atrazin oder Desethyl-Desisopropyl-Atrazin¹⁸ zu einem gewissen Grad zu den Wiederfindungen beitragen dürften.

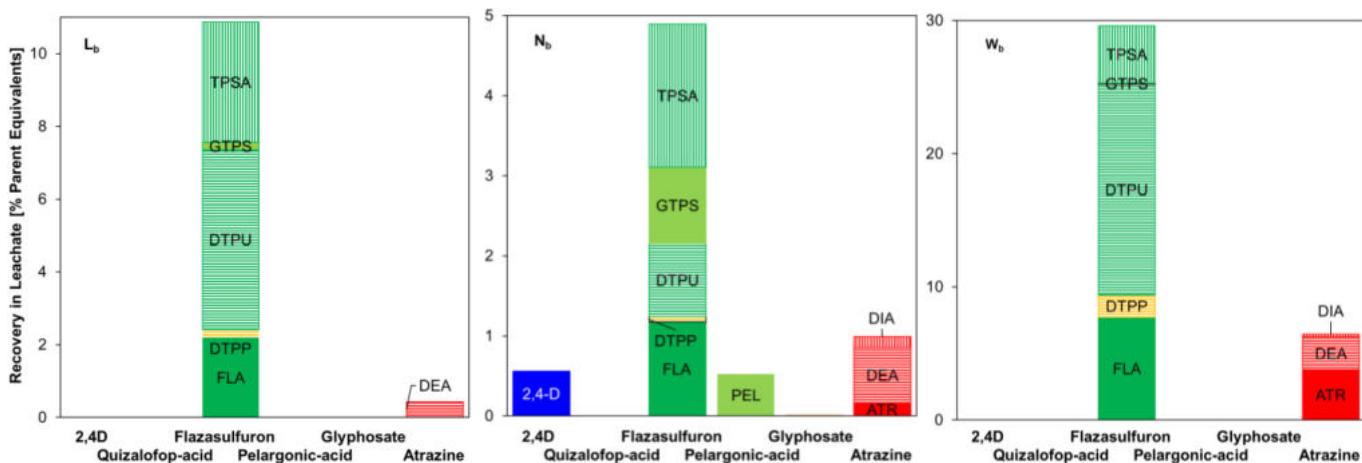


Abbildung 16: Prozentualer Anteil der applizierten Menge der sechs Herbizide, welcher nach drei Jahren im Sickerwasser der Lysimeter L_b , N_b und W_b gefunden wurde. Der Anteil der Metaboliten wurde in Wirkstoffäquivalente umgerechnet. Beachte die unterschiedlichen Skalen.

2,4-D wurde primär im Sickerwasser der N-Lysimeter detektiert mit einer Wiederfindung von 0.56 % in N_b nach drei Studienjahren. Eine ähnlich hohe Wiederfindung resultierte auch für Pelargonsäure mit 0.52 % nach acht Applikationen während drei Jahren, bei nur einem Nachweis mit der hohen Konzentration von 561 µg/L. Im Sickerwasser der Lysimeter L_b und W_b waren die Wiederfindungen von 2,4-D und Pelargonsäure hingegen <0.01 %. Die Wiederfindungen von Quizalofop-Säure, Glyphosat und deren Metaboliten waren ebenfalls <0.01 %, dies in allen Lysimetern, mit Ausnahme des Glyphosat-Metaboliten AMPA, der in (geringen) Anteilen von 0.012 % im Sickerwasser von Lysimeter N_b nachgewiesen wurde.

Die Wiederfindungen in dieser Studie sind vergleichbar mit Ergebnissen aus anderen Studien. In grösseren Lysimetern (> 1 m Tiefe) wurden bis zu 1.8-9.6 % Atrazin,^{19, 20} 3 % 2,4-D²⁰ und <0.02-0.06 % Glyphosat²¹ im Sickerwasser wiedergefunden.

3.6 Schlussfolgerungen bezüglich des Risikos der Verlagerung der Herbizide ins Grundwasser

3.6.1 Worst-Case Charakter der Lysimeterstudie

Ob Herbizidwirkstoffe oder deren Metaboliten ins Grundwasser verlagert werden, hängt einerseits von deren Stoffeigenschaften ab, aber auch beispielsweise vom Bodentyp und den Wetterbedingungen. Für die vorliegende Studie wurden Eisenbahn-Untergrundmaterialien mit einem **hohen Sandgehalt** ausgewählt (in der Feinfraktion 47-84 %, Tabelle 1). Dies führt dazu, dass Regenwasser rasch versickern kann. Das Material aus Nottwil weist zudem einen **hohen Kies- und Steinanteil** auf (>63%), weshalb das Transportvolumen in diesen Lysimetern gering und somit der Wassertransport (sowie der Transport gelöster Substanzen) rasch sind.

Organischer Kohlenstoff in Form von Humus ist eine wichtige Komponente für die Sorption vieler organischer Verbindungen im Boden. Je humushaltiger der Boden, desto weniger mobil sind die Verbindungen. Der **organische Kohlenstoffgehalt** ist **tief** im Material aus Wabern (in der Feinfraktion 0.08-0.39 %), etwas höher bei Lanzenhäusern (0.32-1.3 %) und am höchsten bei Nottwil (0.78-2.5 %). Die Sorption schwach saurer, ionisierbarer Verbindungen hängt zudem vom Boden-pH-Wert ab. Die verwendeten Eisenbahn-Untergrundmaterialien zeichnen sich durch **hohe pH-Werte** von 7.4-7.8 aus. Bei diesen pH-Werten liegen schwach saure Verbindungen in deprotonierter Form vor, welche deutlich mobiler ist als die protonierte Form.¹¹ 2,4-D, Quizalofop-Säure, Flazasulfuron, Pelargonsäure und die Metaboliten 2,4-Dichlorphenol, 3-OH-Quizalofop-Säure, 3-OH-CQO, GTPS und TPSA dürften alle eine hohe Mobilität zeigen in alkalischen Böden.

Die in Wädenswil gemessenen **Niederschlagsmengen** von 1261-1403 mm sind **relativ hoch**, aber durchaus repräsentativ für viele Regionen im Schweizer Mittelland. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Lysimeterstudie eine **realistische Worst-Case Situation** abgedeckt, und zwar bezüglich Niederschlägen, Textur, pH und organischem Kohlenstoffgehalt (letzteres mit Ausnahme des Unterbodenmaterials aus Nottwil).

3.6.2 Vergleich der applizierten Herbizide

Das früher eingesetzte **Atrazin** wurde als Referenzverbindung ausgewählt, für welche hohe Sickerwasser-konzentrationen erwartet wurden. Die gefundenen Jahresdurchschnittskonzentrationen von bis zu 23 µg/L Atrazin und 9.0 µg/L Desethyl-Atrazin bestätigen, dass eine Anwendung von Atrazin auf Gleisanlagen immer noch problematisch wäre bezüglich Verlagerung ins Grundwasser. Nach drei Jahren Studiendauer wurden bis zu 6.5 % der applizierten Stoffmenge an Atrazin und Metaboliten im Sickerwasser wiedergefunden. Die Funktionalität der Lysimeter hinsichtlich Verlagerung mobiler Verbindungen ist somit grundsätzlich belegt. Der Nachweis erhöhter Werte von Atrazin-Metaboliten zeigt ferner, dass die Eisenbahn-Untergrundmaterialien biologisch aktiv sind.

Die Wiederfindungen von **Flazasulfuron** im Lysimeter-Sickerwasser waren mit bis zu 30 % noch höher als jene von Atrazin. Dennoch waren die Jahresdurchschnittskonzentrationen von maximal 0.43 µg/L Flazasulfuron und 0.50 µg/L des Hauptmetaboliten DTPU deutlich tiefer als jene von Atrazin und Metaboliten, da die Aufwandmengen um zwei Größenordnungen tiefer sind.

Flazasulfuron könnte möglicherweise in Mischung mit **Pelargonsäure** eingesetzt werden (Kapitel 4.1), welche nur zu einem Probenahmezeitpunkt nach einem Starkniederschlagsereignis kurz nach Applikation in Lysimeter-Sickerwasser nachgewiesen wurde (Kapitel 3.3.7). Dies ergab Jahresdurchschnittskonzentrationen von bis zu 15 µg/L im Jahr 3, während in den anderen Jahren der Wirkstoff nie nachweisbar war (<0.04 µg/L). Pelargonsäure könnte daher sporadisch und lokal oberflächennahes Grundwasser erreichen, aber es kann davon ausgegangen werden, dass ein grösserer Grundwasserleiter wohl nicht verunreinigt würde. Pelargonsäure wird rasch abgebaut, selbst in Unterböden,¹¹ und ein weiterer Abbau im Grundwasser kann erwartet werden.

2,4-D erreichte ähnlich hohe Jahresdurchschnittskonzentrationen wie Flazasulfuron, aber nur in Sickerwasser der N-Lysimeter in den ersten beiden Jahren. Ein möglicher Mischungspartner von 2,4-D wäre **Quizalofop-P-ethyl** (Kapitel 4.1). Dessen herbizid-aktives Hydrolyseprodukt Quizalofop-Säure wurde nur sporadisch im Sickerwasser nachgewiesen (Jahresdurchschnittskonzentration <0.002 µg/L). Das trifft auch zu für das derzeit zur Unkrautkontrolle auf Bahnanlagen eingesetzte **Glyphosat**. Die Jahresdurchschnittskonzentrationen betrugen <0.005 µg/L resp. bis 0.032 µg/L für den Metaboliten AMPA.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass **aus Perspektive des Grundwasserschutzes Glyphosat** immer noch klar die **beste chemische Option** für die Unkrautkontrolle auf Bahnanlagen darstellt. Drei der vier getesteten, möglichen Glyphosat-Alternativen, Flazasulfuron (und dessen Metabolit DTPU), Pelargonsäure und 2,4-D, wurden in Jahresdurchschnittskonzentrationen >0.1 µg/L im Lysimeter-Sickerwasser gefunden. Nur bei Quizalofop-Säure lagen sie unter 0.002 µg/L, aber der Wirkstoff kann ausschliesslich gegen Gräser eingesetzt werden (Kapitel 4.1).

Natürlich wären die Konzentrationen von Flazasulfuron, Pelargonsäure und 2,4-D im Grundwasser tiefer, abhängig von der Verdünnung des Bodensickerwassers,²² der behandelten Fläche im Einzugsgebiet eines Grundwasserleiters und der Häufigkeit der Anwendung. In dieser Studie wurden zwei Drittel der Lysimeteroberfläche mit Herbiziden behandelt. Bahnanlagen machen hingegen normalerweise nur einen kleinen Prozentsatz der Bodennutzung in einem Grundwasser-Einzugsgebiet aus, abgesehen von grösseren Bahnhöfen oder Rangierbahnhöfen. In der Schweiz werden derzeit zudem nur einzelne Pflanzen/Pflanzengruppen behandelt, nicht die ganze Gleisfläche. Bei Flazasulfuron (und Quizalofop-P-ethyl) wären zudem Massnahmen erforderlich, die die Selektion von resistenten Unkräutern bremsen sollten, beispielsweise ein alternierender Einsatz unterschiedlicher Wirkstoffe und die Beschränkung von Anwendungen auf nur alle 2 oder 3 Jahre. Solche Antiresistenz-Massnahmen würden ebenfalls zu tieferen Konzentrationen im Grundwasser führen. Das Risiko einer Verschmutzung von Grundwasser über dem Anforderungswert von 0.1 µg/L aus einer Anwendung von Flazasulfuron, Pelargonsäure oder 2,4-D auf Bahnanlagen wäre aus diesen Gründen vermutlich gering, hinge aber sowohl von den lokalen Gegebenheiten ab, als auch von Management-Strategien zu deren Einsatz.

4 Wirksamkeitsversuche – experimenteller Teil

4.1 Wirksamkeitsversuche mit verschiedenen Herbiziden und Tankmischungen von Herbiziden

Das derzeit zur Unkrautkontrolle auf Bahnanlagen eingesetzte **Glyphosat** ist ein **Totalherbizid** mit breiter Wirksamkeit und nur wenigen Wirkungslücken (Kapitel 1.1).²³ Der Wirkstoff hemmt das Enzym Enolpyruylshikimat-3-phosphat-Synthase (EPSPS), das an der Biosynthese aromatischer Aminosäuren beteiligt ist.

Bei den in den Lysimeterstudien untersuchten, möglichen Glyphosat-Alternativen 2,4-D und Quizalofop-P-ethyl handelt es sich hingegen um selektive Wirkstoffe, mit denen nur gewisse Pflanzen bekämpft werden können. **2,4-D** wirkt auf ein- und mehrjährige **zweikeimblättrige Unkräuter**.¹⁵ Es gehört zu den Wuchsstoffherbiziden, welche natürliche Pflanzenhormone, die sogenannten Auxine, imitieren. Wie Glyphosat ist auch 2,4-D ein systemischer Wirkstoff und wird nach Aufnahme in der Pflanze transloziert. Das Wirkungsspektrum von **Quizalofop-P-ethyl** beinhaltet ausschliesslich ein- und mehrjährige **Gräser** der Familie der *Poaceae*.²⁴ Der ebenfalls systemische Wirkstoff wirkt auf die Fettsäurebiosynthese der Gräser durch Hemmung des Enzyms Acetyl-CoA-Carboxylase (ACCase). Zusammen dürften 2,4-D und Quizalofop-P-ethyl jedoch ein breites Wirkungsspektrum aufweisen.

Der dritte in den Lysimeterstudien untersuchte Wirkstoff **Flazasulfuron** zeigt eine recht breite Wirkung gegen **ein- und zweikeimblättrige Unkräuter**¹⁴ und hat insbesondere auch eine Wirkung gegen **Schachtelhalm**, der mit Glyphosat nicht bekämpft werden kann. Auch Flazasulfuron ist ein systemischer Wirkstoff. Die Wirkung beruht auf einer Hemmung des Enzyms Acetolactat-Synthase (ALS), das an der Biosynthese verzweigkettiger Aminosäuren beteiligt ist. Der vierte Wirkstoff, **Pelargonsäure**, wirkt primär gegen **einjährige zweikeimblättrige Unkräuter**. Pelargonsäure ist im Gegensatz zu den anderen drei Wirkstoffen nicht-systemisch. Es werden nur oberflächliche Pflanzenteile geschädigt, welche in direktem Kontakt mit dem Wirkstoff waren. Dieser schädigt die Zellmembranen, was zu einem raschen Austrocknen und Absterben der Blätter führt.²⁵ Daher werden in der Regel mehrere Applikationen pro Jahr für eine ausreichende Unkrautkontrolle benötigt.

Mit **Tankmischungen** von Herbiziden kann eine additive oder gar synergistische Wirkung erzielt werden.²⁶ So scheint Pelargonsäure die Wirkung von Flazasulfuron zu erhöhen.²⁷ Es können aber auch Minderwirkungen, sogenannte antagonistische Wirkungen, auftreten.²⁶ Wuchsstoffherbizide können beispielsweise die Wirkung von ACCase-Herbiziden reduzieren, was grundsätzlich bei einer Tankmischung von 2,4-D mit Quizalofop-P-ethyl der Fall sein kann.²⁸ Die Bahnen möchten selektiv wirkende Herbizide nicht getrennt ausbringen müssen, um den Arbeitsaufwand möglichst gering zu halten. Tankmischungen sind aus Praxissicht also grundsätzlich erwünscht. Allfällige **synergistische Wirkungen** resp. **Minderwirkungen** bei Anwendung von Tankmischungen wurden daher zuerst unter **kontrollierten Gewächshausbedingungen** untersucht (Kapitel 4.2 und 5.1).

In einem zweiten Schritt wurde dann die Wirksamkeit verschiedener Herbizide resp. Tankmischungen im **Freiland auf Gleisanlagen** getestet (Kapitel 4.3 und 5.2). Separate Wirksamkeitsversuche wurden auf Gleisanlagen mit starkem **Schachtelhalm**-Bewuchs durchgeführt (Kapitel 4.4 und 5.3). Die verwendeten Herbizid-Produkte sowie Additive, welche in gewissen Freilandversuchen eingesetzt wurden, sind in Tabelle 12 aufgeführt. Ferner wurde auch die Wirkung von Kochsalzsole (nachfolgend als «Sole» bezeichnet) auf Schachtelhalm untersucht.

Tabelle 12: In den Wirksamkeitsversuchen verwendete Produkte

| Produktnname | Wirkstoff | Konz. | Formulierungstyp | Lieferant in der Schweiz |
|------------------|--------------------|---------|--------------------------------|-----------------------------|
| <i>Herbizide</i> | | | | |
| Chikara 25 WG | Flazasulfuron | 25% | wasserdispergierbares Granulat | Stähler, Zofingen |
| Natrel | Pelargonsäure | 680 g/L | Emulsionskonzentrat | Stähler, Zofingen |
| Glyphosat 360 TF | Glyphosat | 360 g/L | wasserlösliches Konzentrat | Schneiter, Seon |
| Targa Super | Quizalofop-P-ethyl | 50 g/L | Emulsionskonzentrat | Bayer, Zollikofen |
| 2,4-D Plus | 2,4-D | 500 g/L | wasserlösliches Konzentrat | Omya, Oftringen |
| Auftausalz 1,5 | Kochsalz (NaCl) | 99.5% | wasserlösliches Salz | Schweizer Salinen, Pratteln |
| <i>Additive</i> | | | | |
| Break-Thru | (Netzmittel) | | | Omya, Oftringen |
| Checkpoint | (pH-Absenkung) | | | Omya, Oftringen |

4.2 Gewächshaus

Wirksamkeitsversuche im Gewächshaus wurden in den Jahren 2021 und 2022 durchgeführt. Für die Versuche wurden **sechs zweikeimblättrige Unkräuter und fünf Gräser** ausgewählt (Abbildung 19). Sechs dieser Arten wurden auf den Gleisanlagen, die für die Freilandversuche ausgewählt wurden, effektiv beobachtet (Kapitel 5.2). Auch die anderen Arten könnten durchaus auf Gleisanlagen, insbesondere im seitlichen Bankettbereich, vorkommen. Kanadische Goldrute, Spitz-Wegerich, Schmetterlingsflieder und die Gräser (Graugrüne Borstenhirse ausgenommen) sind mehrjährige Pflanzen. Der Schmetterlingsflieder ist eine verholzende Pflanze. Die Kanadische Goldrute und der Schmetterlingsflieder sind invasive Neophyten, die sich oft entlang von Bahngleisen verbreiten.

Das Gräsersaatgut stammte aus der Futterpflanzenzüchtung von Agroscope. Die Samen der zweikeimblättrigen Unkräuter wurden eigens für den Versuch gesammelt und gedroschen. Für den Schmetterlingsflieder wurden selber Stecklinge angezogen. Die Samen wurden in Aussaatschalen gesät und die Keimlinge anschliessend in rund 100 Töpfen von 12 cm Durchmesser pikiert: eine Pflanze pro Topf bei zweikeimblättrigen Unkräutern, drei Pflanzen pro Topf bei Gräsern. Als Substrat wurde Floradur A Block verwendet, resp. Floradur B Cutting für den Schmetterlingsflieder und eine 1:1-Mischung Floradur A Block und Floradur B Cutting für die Kanadische Goldrute. Die Substrate stammten von Floragard. Danach erfolgte die Anzucht bei 14°C/12°C (Tag/Nacht) für die Versuchsreihe 2021 und bei 16°C/12°C (Tag/Nacht) für die Versuchsreihe 2022. Die Gewächshauseinstellungen waren wie folgt: Künstliches Licht von 6:00 bis 19:00 Uhr, d.h. 13h/9h (Tag/Nacht). Während des Tages waren die Gewächshauslampen an, ausser wenn das natürliche Tageslicht ausreichend hoch war (Schwellenwert 15 kLux). Der Schwellenwert für das Einsetzen der Lüftung lag bei 18°C.

Es wurden sieben Varianten getestet – die Wirksamkeit von Flazasulfuron alleine (im Folgenden als «solo» bezeichnet), Pelargonsäure solo, eine Tankmischung Flazasulfuron und Pelargonsäure, 2,4-D solo, Quizalofop-P-ethyl solo, Tankmischung 2,4-D und Quizalofop-P-ethyl und eine unbehandelte Kontrolle. Die verwendeten Aufwandmengen orientierten sich an landwirtschaftlichen Zulassungen (Tabelle 13). Um allfällige Minderwirkungen bei Quizalofop-P-ethyl auf Gräser in Tankmischung mit 2,4-D gut erkennen zu können, wurde in diesen Versuchen eine halb so hohe Aufwandmenge an Quizalofop-P-ethyl verwendet wie in Versuchen mit zweikeimblättrigen Unkräutern.

Tabelle 13: In den Gewächshausversuchen verwendete Aufwandmengen

| Variante | Wirkstoff-Aufwandmenge [g/ha] |
|-------------------------------|---------------------------------|
| Flazasulfuron solo | 50 |
| Pelargonsäure solo | 10880 |
| Flazasulfuron + Pelargonsäure | 50 + 10880 |
| 2,4-D solo | 750 |
| Quizalofop-P-ethyl solo | 125 (63 für Gräser) |
| 2,4-D + Quizalofop-P-ethyl | 750 + 125 (750 + 63 für Gräser) |
| unbehandelte Kontrolle | - |

Die Herbizid-Produkte wurden so in CIPAC-D Wasser²⁹ verdünnt, dass die gewünschten Aufwandmengen mit einer Brühmenge von 40 mL/m² (entspricht 400 L/ha) ausgebracht werden konnten. Die Applikationen erfolgten auf 12 Töpfe pro Variante in einer Spritzkabine (Laboratory Chamber Sprayer PK 5, AVIKO PRAHA, Tschechien) unter Verwendung einer Flachstrahl-Banddüse (E8001, Lechler, Deutschland, Druck am Manometer 1.1-1.9 bar), welche etwa 30 cm über der mittleren Pflanzenhöhe positioniert wurde (Abbildung 17). Bei den getesteten zweikeimblättrigen Unkräutern erfolgten die Applikationen im BBCH-Wachstumsstadium 14-19, beim Schmetterlingsflieder im BBCH 32 und bei Gräsern im BBCH 13-23 (Wuchshöhe 15-30 cm).

Die behandelten Pflanzen wurden anschliessend im Gewächshaus auf Ebbe-Flut-Tischen kultiviert (Abbildung 18). Die Bewässerung erfolgte durch Anstauen und nicht über Kopf. Die Temperatur- und Gewächshauseinstellungen waren die gleichen, wie bei der Anzucht.

Die Wirksamkeit der verschiedenen Herbizide und Tankmischungen wurde 7, 14, 21, 28 und 35 Tage nach der Behandlung erhoben. Dazu wurde die Schädigung der Pflanzen jedes einzelnen Topfs auf einer Skala von 0 bis 100 % geschätzt. 0 % bedeutet keine Schädigung, die Pflanze(n) sehen gleich aus wie die unbehandelten Kontrollpflanzen, 100 % bedeutet, dass die Pflanze oder die Pflanzen komplett abgestorben sind.



Abbildung 17: Applikationen auf jeweils 6 Töpfe in der Spritzkabine (links) erfolgten mit Schutzanzug und Atemschutz (rechts)



Abbildung 18: verschiedene getestete Pflanzen nach der Herbizid-Applikation



Abbildung 19: Wirksamkeitsversuche im Gewächshaus mit sechs zweikeimblättrigen Unkräutern und fünf Gräsern

4.3 Gleisanlagen – krautige, zweikeimblättrige Unkräuter

Wirksamkeitsversuche wurden in den Jahren 2021 und 2022 auf zwei Gleisanlagen durchgeführt: einem Abstellgleis in der Nähe von **Bülach** ($47^{\circ}31'48.8''\text{N}$ / $8^{\circ}31'41.5''\text{E}$) und einer Versuchsfläche auf dem Rangierbahnhof **Limmat** ($47^{\circ}25'26.3''\text{N}$ / $8^{\circ}22'42.0''\text{E}$) (beide im Kanton Zürich, Abbildung 20). Diese Versuchsstandorte waren von der SBB vorgeschlagen worden, da diese eine für Gleise repräsentative Verunkrautung aufwiesen und eine Versuchsdurchführung an diesen Standorten möglich war.

Die Versuche wurden nach den Richtlinien EPPO n°PP1/117(3), «Weeds on hard and semipermeable surfaces»³⁰ und PP1/152(4), «Design and analysis of efficacy evaluation trials»³¹ durchgeführt. Jeder Versuch beinhaltete sieben Varianten: Glyphosat solo (Referenzverfahren), 2,4-D solo, Quizalofop-P-ethyl solo (im zweiten Jahr in Tankmischung mit 2,4-D wegen der geringen Verunkrautung mit Gräsern), Flazasulfuron solo, Pelargonsäure solo, Tankmischung Flazasulfuron und Pelargonsäure und die unbehandelte Kontrolle. Bei der Festlegung der Aufwandmengen orientierte man sich für Glyphosat an der im Bahnbereich üblichen Aufwandmenge, bei den anderen Varianten an landwirtschaftlichen Zulassungen (Tabelle 14). Beim Versuchsdesign handelte es sich um eine randomisierte vollständige Blockanlage mit vier Blöcken d.h. Wiederholungen pro Standort. Pro Block gab es sieben Parzellen entsprechend der Anzahl Varianten. Dies bedeutet, dass pro Variante jeweils vier Parzellen behandelt wurden und diese auf die vier Blöcke verteilt waren. Dieses Versuchsdesign wird häufig bei Feldversuchen verwendet. Randomisiert bedeutet, dass die Varianten innerhalb der Blöcke zufällig den Parzellen zugeteilt werden; als vollständig wird das Design bezeichnet, da pro Block alle Varianten geprüft werden.

Im ersten Versuchsjahr 2021 wurde wegen der nassen Witterung und des entsprechend hohen Unkrautdrucks zweimal appliziert (Anfang Mai und Anfang August), im zweiten Jahr jedoch nur einmal (im Frühling, Applikationsdaten in Tabelle 14). Die Wasseraufwandmenge betrug 400 L/ha. 2021 erfolgten die Applikationen mit einer Parzellenspritze (Eigenbau System Agrotop, Düsenabstand 25 cm, 3 m Gestängebreite) unter Verwendung von Flachstrahldüsen (IDK 120 02, Lechler, Deutschland, 1.7 bar), welche etwa 25 cm über den Pflanzen positioniert wurden (Abbildung 21). 2022 erfolgten die Behandlungen mit einer getragenen Parzellenspritze (RTS-Rückentragespritze, Düsenabstand 25 cm, 3 m Gestängebreite) unter Verwendung der gleichen Fachstrahldüsen, welche etwa 25 cm über den Pflanzen positioniert wurden.



Abbildung 20: Standorte der Wirksamkeitsversuche gegen zweikeimblättrige Unkräuter in Bülach (links) und auf dem Rangierbahnhof Limmat (rechts). Die behandelten Gleisabschnitte sind gelb markiert. Standortbilder Google Maps

Tabelle 14: Wirksamkeitsversuche gegen zweikeimblättrige Unkräuter auf Gleisanlagen – Applikationsdaten und Aufwandmengen

| Variante | Wirkstoff- Aufwandmenge [g/ha] | Applikationsdaten (alle Varianten) B = Bülach, L = Limmattal |
|--|-----------------------------------|--|
| unbehandelte Kontrolle | - | - |
| Glyphosat solo | 2880 | |
| 2,4-D solo ^a | 1250 | |
| (2,4-D +) Quizalofop-P-ethyl ^b | (1250 +) 125 | 03.05.2021 ^{BL} , 06.08.2021 ^{BL} , 10.05.2022 ^{L viel Humus} , |
| Flazasulfuron solo | 50 | 19.05.2022 ^{L wenig Humus} , 21.06.2022 ^B |
| Pelargonsäure solo | 10880 | |
| Flazasulfuron + Pelargonsäure | 50 + 10880 | |

^aim zweiten Versuchsjahr wurde das Netzmittel Break-Thru zugegeben (0.2 L/ha) und der pH mit Checkpoint auf pH 4 eingestellt

^bim ersten Versuchsjahr ohne 2,4-D, im zweiten Versuchsjahr mit 2,4-D, Break-Thru (0.2 L/ha) und Checkpoint (pH 4)



Abbildung 21: 2021 verwendete Parzellenspritze (links) und Herbizidapplikation am Standort Bülach (rechts)

Die Versuchsfläche am Standort Bülach umfasste ca. 460 m² (Abschnitte auf einem Abstellgleis von insgesamt etwa 150 m Länge), im Limmattal 550 m² (zwei Abstellgleise von 90 m Länge). Die Länge der Parzellen wurde durch die ausreichend verunkrautete Fläche zu Beginn des Versuchs definiert. Die Breite der Parzelle entsprach der Gestängebreite des Spritzbalkens. Wie oben beschrieben wurden vier Parzellen pro Variante behandelt (Parzellengröße, 3.0 m × 5.5 m in Bülach, 3.0 m × 6.5 m im Limmattal, Abbildung 22 und 23). Die Versuchsfläche auf dem Rangierbahnhof Limmattal kann bezüglich Verunkrautung unterteilt werden in einen Bereich mit wenig Humus (und «normaler» Verunkrautung) und einen Bereich mit viel Humus (selten vorkommende Situation auf Bahnanlagen, Abbildung 22, Ergebnisse Kapitel 5.2).

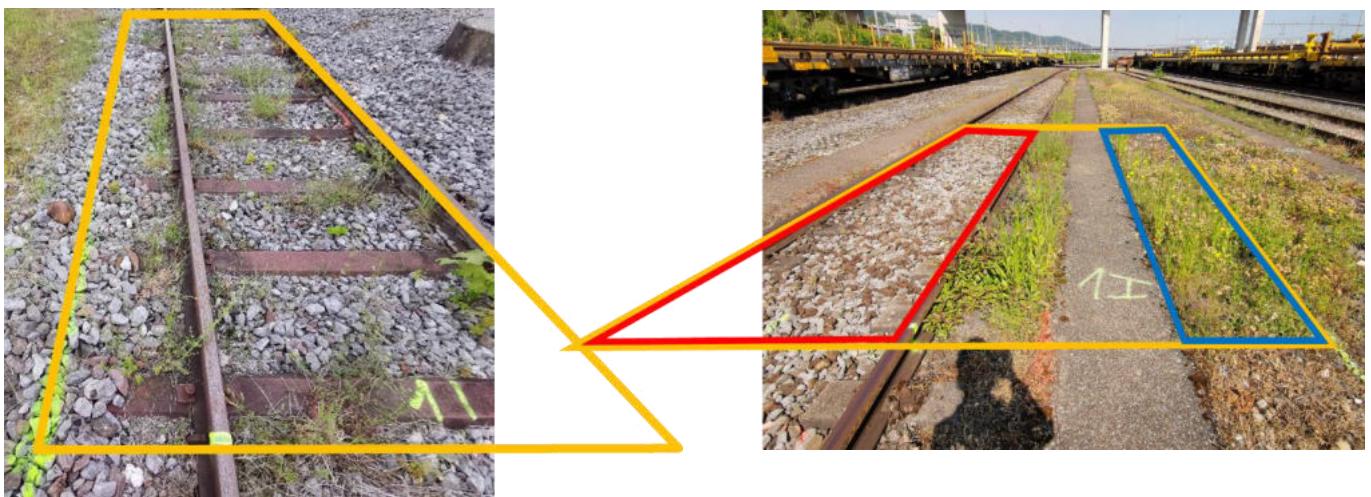


Abbildung 22: Darstellung der Parzellengrößen (orange) am Standort Bülach (links) und im Limmattal (rechts). Im Limmattal wurde unterschieden zwischen Bereichen mit wenig (rot) resp. viel (blau) Humus.



Abbildung 23: Dronenaufnahme vom Standort Limmattal mit vier Parzellen einer Variante (grün)

In den beiden Behandlungsjahren 2021 und 2022 wurde die Verunkrautung vor der Behandlung sowie etwa ein, drei, fünf und sechs Monate danach auf Stufe Parzelle bestimmt. Diese Art der Erhebungen wird als Bonitur bezeichnet. Im Folgejahr 2023 wurde nur in Bülach eine Abschlussbonitur durchgeführt. Im Limmattal war diese sowie eine abschliessende Bonitur im Herbst 2022 nicht möglich, da die Gleise erneuert worden waren. Die Bonituren konnten nur durchgeführt werden, wenn die Bahnen das notwendige Sicherheitspersonal stellen konnten, dementsprechend gab es geringfügige Abweichungen bei den Erhebungsterminen.

Zur Bestimmung der Verunkrautung wurde der Deckungsgrad, d.h. der Prozentsatz der Parzelle, der durch eine Unkrautart bedeckt wird, geschätzt. Da die Deckungsgrade der einzelnen Arten zu gering waren, um Aussagen zur Wirkung auf einzelne Arten zu treffen, wurden die Werte zu einem Unkrautdeckungsgrad pro Parzelle für breitblättrige Unkräuter summiert. Verholzende Arten wie der Feldahorn wurden nicht berücksichtigt, da es sich bei diesen um andere Pflanzengruppen mit einer höchstwahrscheinlich abweichenden Reaktion auf die Herbizidvarianten handelt als bei den krautigen, breitblättrigen Unkräutern. Die Dichten der verholzenden Pflanzenarten waren zu gering, um Aussagen zur Wirksamkeit der Varianten auf diese Gruppe machen zu können. Gleichermaßen gilt für die Gräser, die ebenfalls in zu geringen Dichten auftraten.

Die Wirksamkeit wurde nach Henderson-Tilton³² anhand der Variantenmittelwerte (Mittelwert der vier Parzellen pro Variante) für den Deckungsgrad berechnet. Dementsprechend gibt es kein Streumass, da für die Kombination Versuch (Bülach, Limmattal wenig Humus, Limmattal viel Humus), Variante und Boniturzeitpunkt jeweils nur ein Wert vorliegt. Die Wirksamkeit nach Henderson-Tilton bietet sich an, wenn die Ausgangsverunkrautung heterogen ist, was bei den Versuchsflächen der Fall war. Für die Berechnung werden die Beobachtungen nach der Behandlung normiert auf die Beobachtung vor der Behandlung (d.h. die erste Beobachtung vor der Behandlung 2021). Dieser Quotient wird normiert mit der Veränderung der Verunkrautung in der unbehandelten Kontrolle. Werte nahe 100 % bedeuten, dass die Unkräuter sehr gut bekämpft wurden. Werte nahe und unter 0 % bedeuten, dass die Unkräuter schlecht bekämpft wurden.

4.4 Gleisanlagen – Schachtelhalm

Die Wirksamkeitsversuche gegen Ackerschachtelhalm (*Equisetum arvense*, nachfolgend als Schachtelhalm bezeichnet) wurden in den Jahren 2021 und 2022 an drei Standorten, einem einspurigen Gleisabschnitt in der Nähe des Bahnhofs **Burghalden** in Richterswil (47°12'46.0"N / 8°41'45.3"E), im Bahnhof **Döttingen** (47°34'25.5"N / 8°15'25.7"E) und beim Bahnhof **Liebefeld** in Könitz (46°55'51.2"N / 7°25'09.0"E) (Kantone Zürich, Aargau resp. Bern, Abbildung 24) durchgeführt. Die Standorte waren von den Bahngesellschaften vorgeschlagen worden und zeichneten sich durch hohe Schachtelhaldmdichten aus.



Abbildung 24: Standorte für Wirksamkeitsversuche gegen Schachtelhalm in Burghalden (links), Döttingen (Mitte) und Liebefeld (rechts). Die behandelten Gleisabschnitte sind gelb markiert. Standortbilder Google Maps

Es wurde die Wirksamkeit von sechs Varianten getestet: 2,4-D solo, Flazasulfuron solo, Pelargonsäure solo, eine Tankmischung Flazasulfuron und Pelargonsäure, eine konzentrierte Kochsalzsole (nachfolgend als Sole bezeichnet) und die unbehandelte Kontrolle. Bei der Festlegung der Aufwandmengen orientierte man sich an landwirtschaftlichen Zulassungen (Tabelle 15).

Tabelle 15: Wirksamkeitsversuche gegen Schachtelhalm auf Gleisanlagen – Applikationsdaten und Aufwandmengen

| Variante | Wirkstoff-Aufwandmenge [g/ha] | Applikationsdaten B = Burghalden, D = Döttingen, L = Liebefeld |
|-------------------------------|-------------------------------|---|
| unbehandelte Kontrolle | - | - |
| 2,4-D solo ^a | 1250 | |
| Flazasulfuron solo | 50 | 01.06.21 ^D , 10.06.21 ^B , 02.07.21 ^L , 10.06.22 ^B , 17.06.22 ^D , |
| Pelargonsäure solo | 10880 | 29.06.22 ^L |
| Flazasulfuron + Pelargonsäure | 50 + 10880 | |
| Kochsalz | 320 g/m ² | B: 10.06.21, 29.06.21, 20.07.21, 10.06.22, 29.06.22, 20.07.22 D: 01.06.21, 23.06.21, 19.07.21, 17.06.22, 07.07.22, 27.07.22 L: 02.07.21, 23.07.21, 13.08.21, 29.06.22, 21.07.22, 11.08.22 |

^aim zweiten Versuchsjahr wurde das Netzmittel Break-Thru zugegeben (0.2 L/ha) und der pH mit Checkpoint auf pH 4 eingestellt

Die Herbizide wurden einmal pro Jahr appliziert im Juni oder Juli 2021 und 2022, die Sole (Kochsalz) wurde dreimal jährlich appliziert im Abstand von drei bis vier Wochen (Tabelle 15). Die Brühmenge bei den Herbizidvarianten betrug 400 L/ha, bei der Sole-Variante 10'000 L/ha. Bei erstenen erfolgten die Behandlungen mit der RTS-Rückentragesspritze (vgl. Kapitel 4.3). Die Sole-Behandlungen erfolgten mit einer Giesskanne, da der Zeitaufwand für das Ausbringen dieses grossen Volumens mit der Standardtechnik zu gross und nicht zweckdienlich gewesen wäre.

Die Versuchsfläche am Standort Burghalden umfasste ca. 170 m² (mehrere Gleisabschnitte mit insgesamt etwa 100 m Länge), in Döttingen und Liebefeld je 110 m² (60 m Gleislänge). In Burghalden wurden vier Parzellen pro Variante behandelt (Parzellengrösse, 1.75 m × 4.0 m), in Döttingen und Liebefeld je zwei Parzellen pro Variante (1.75 m × 5.0 m). Diese zwei Standorte wurden als ein Versuch mit vier Wiederholungen ausgewertet. Beim Versuchsdesign handelte es sich um eine randomisierte vollständige Blockanlage.

In den Behandlungsjahren 2021 und 2022 wurde der Schachtelhalmdeckungsgrad für jede Parzelle am Tag der Behandlung, nach 3, 6 und 9 Wochen sowie gegen Ende der Vegetationszeit erhoben. Im Folgejahr 2023 erfolgte eine Bonitur im Frühjahr/Frühsommer. Die Wirksamkeit wurde nach Henderson-Tilton anhand der Variantenmittelwerte (Mittelwert der vier Parzellen pro Variante) für den Schachtelhalmdeckungsgrad berechnet (vgl. Kapitel 4.3).

5 Wirksamkeitsversuche – Ergebnisse

5.1 Gewächshausversuche

Die Analyse der Spritzbrühen ergab Wirkstoffgehalte von 78-116 % der Zielkonzentrationen. Die Beimischung von formuliertem 2,4-D zu formuliertem Quizalofop-P-ethyl führte zu einer pH-Erhöhung: der pH einer Tankmischung mit je 1.25 % betrug 7.3 im Vergleich zum Solo-Produkt von Quizalofop-P-ethyl mit pH 5.9. Daher wurde untersucht, ob der Ester Quizalofop-P-ethyl ggf. bei diesem pH-Wert teilweise hydrolytisch zur Quizalofop-Säure gespalten wird (Anmerkung: die Esterform wird besser in die Blätter der Gräser aufgenommen als die Säure). Innerhalb von acht Stunden wurde bei Raumtemperatur jedoch keine messbare Konzentrationsabnahme des Esters festgestellt. Eine allfällige Minderwirkung von Quizalofop-P-ethyl auf Gräser in Gegenwart von 2,4-D wäre demnach nicht auf die Hydrolyse des Esters in der Spritzbrühe zurückzuführen.

Die Ergebnisse der Wirksamkeitsversuche mit den vier Solo-Produkten resp. den zwei Tankmischungen (siehe Kapitel 5.1.2 und 5.1.3) und den elf getesteten Pflanzen sind in Abbildung 30 für die Versuchsdauer von fünf Wochen zusammengestellt.

5.1.1 Wirksamkeit der Solo-Produkte

2,4-D zeigte erwartungsgemäss nur eine Wirkung auf zweikeimblättrige Unkräuter, nicht aber auf Gräser. Die Wirksamkeit nach 5 Wochen war hoch und betrug 89-97 %, nur beim Schmetterlingsflieder war sie etwas tiefer mit 69 % (Abbildung 30). Behandelte Pflanzen zeigten die für Wuchsstoffherbizide typischen Wuchsdeformationen (Abbildung 25).



Abbildung 25: Wuchsdeformationen bei Spitz-Wegerich nach Behandlung mit 2,4-D (links vor Behandlung, Mitte Tag 7, rechts Tag 35)

Beim ebenfalls selektiven Herbizid **Quizalofop-P-ethyl** war die Wirksamkeit umgekehrt zu 2,4-D, also hoch auf Gräser mit 96-100 % und ohne Wirkung auf Zweikeimblättrige (Abbildung 30). Die Gräser starben eher langsam ab (Abbildung 26). Nur der Rot-Schwingel konnte nicht bekämpft werden (11 % Wirkung nach 5 Wochen). Dieser tiefe Wirkungsgrad ist plausibel, da in Kanada der Einsatz von Quizalop-P-ethyl in Rot-Schwingel-Beständen zur Saatgutproduktion bewilligt ist (48-72 g/ha).³³



Abbildung 26: Wirkung von Quizalofop-P-ethyl auf Wiesenfuchsschwanz (links vor Behandlung, Mitte Tag 10, rechts Tag 36)

Die Wirkung von **Flazasulfuron** auf die getesteten zweikeimblättrigen Unkräuter und Gräser war sehr unterschiedlich. Eine gute Wirkung wurde auf Jakobs-Greiskraut, Italienisches Raygras und Wilde Möhre beobachtet (84-87 % nach fünf Wochen), eine mäßige Wirkung auf Wiesen-Fuchsschwanz, Kanadisches Berufkraut, Graugrüne Borstenhirse, Kanadische Goldrute, Wiesen-Rispengras und Rot-Schwingel (27-57 %) und eine schlechte bis keine Wirkung auf Spitz-Wegerich und Schmetterlingsflieder (2-7 %; Abbildung 30). Es ist allerdings bekannt, dass die Wirkung von Flazasulfuron nur langsam eintritt (Abbildung 27).³⁴ Bei den meisten Pflanzen mit mäßiger Wirkung nahmen die Effekte zwischen der vorletzten und letzten Bonitur zu, so dass bei längerer Boniturdauer vermutlich noch eine bessere Wirksamkeit hätte beobachtet werden können.



Abbildung 27: langsame Schädigung von Italienischem Raygras nach Behandlung mit Flazasulfuron (links vor Behandlung, Mitte Tag 17, rechts Tag 36)

Nach der Applikation von **Pelargonsäure** wurden meist rasche, aber nicht nachhaltige Effekte beobachtet (Abbildung 28). Der Wirkstoff schädigt die Zellmembranen, was zu einem raschen Austrocknen und Absterben der Blätter führt, die in Kontakt mit dem Wirkstoff waren. Nachwachsende Blätter zeigten jedoch keine Herbizidschäden. Der höchste Wirkungsgrad wurde beim Jakobs Greiskraut eine Woche nach der Behandlung beobachtet (78 %). Durch den Wiederaustrieb wurde nach fünf Wochen nur noch eine Wirksamkeit von 3-41 % nachgewiesen. Bei Wiesen-Rispengras, Italienischem Raygras und Rot-Schwingel war die Wirkung über die ganze Versuchsdauer unbefriedigend ($\leq 8\%$).



Abbildung 28: rasche, aber nicht nachhaltige Wirkung von Pelargonsäure auf Kanadische Goldrute (links vor Behandlung, Mitte Tag 2, rechts Tag 48)

5.1.2 Geringe Minderwirkung bei Quizalofop-P-ethyl in Tankmischung mit 2,4-D

Wie oben bereits erwähnt, zeigte Quizalofop-P-ethyl eine exzellente Wirkung gegen Wiesen-Rispengras, Wiesen-Fuchsschwanz, Italienisches Raygras und Graugrüne Borstenhirse (96-100 % nach 5 Wochen). In Tankmischung mit 2,4-D wurde jedoch eine geringe Minderwirkung beobachtet (94-85 %; Abbildung 30), welche bei Italienischem Raygras und Wiesen-Rispengras (Abbildung 29) am deutlichsten war.



Abbildung 29: geringe Minderwirkung bei Quizalofop-P-ethyl auf Wiesen-Rispengras in Tankmischung mit 2,4-D im Vergleich zum Solo-Produkt (Tag 35, links 2,4-D solo, Mitte Quizalofop-P-ethyl solo, rechts Tankmischung)

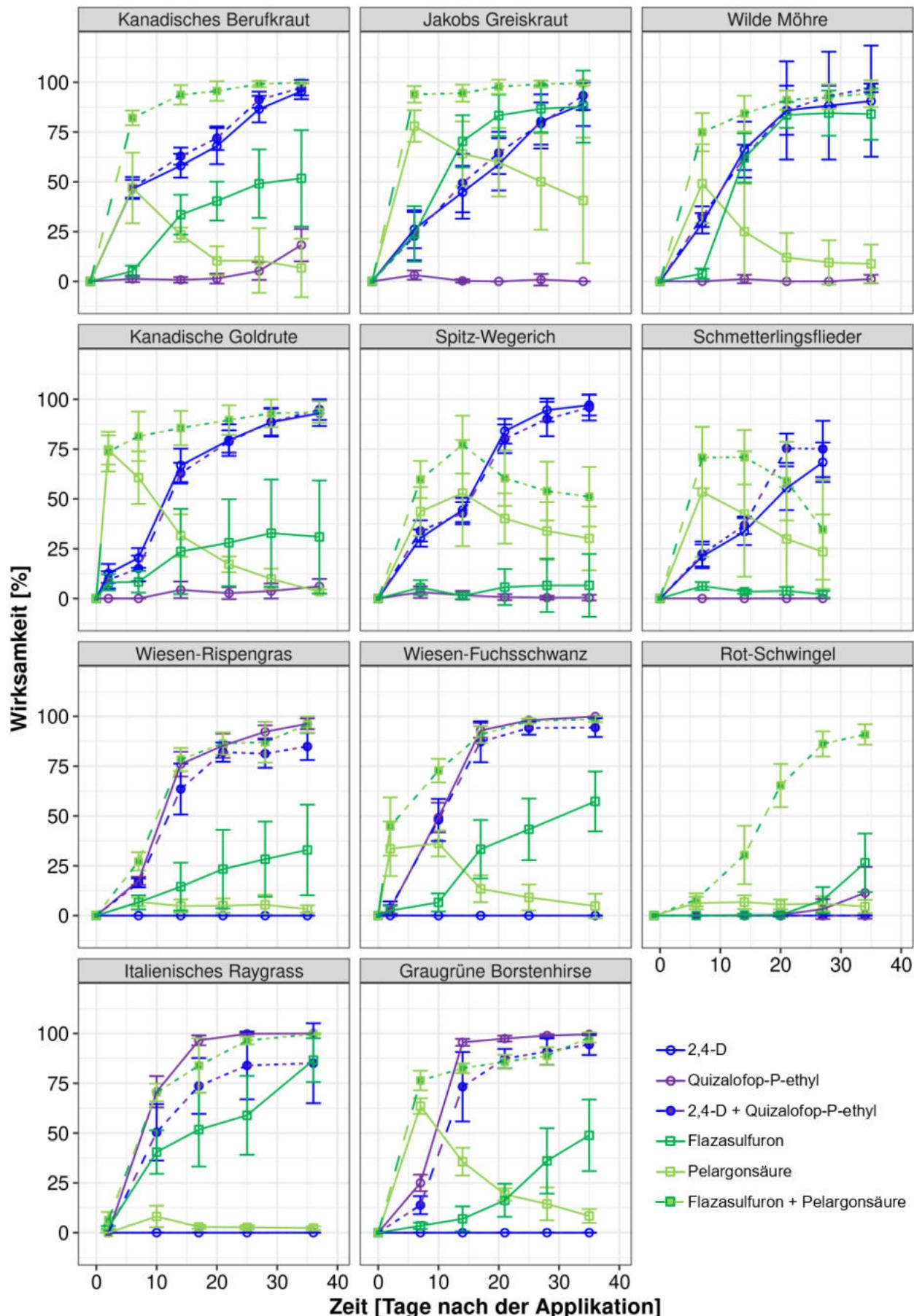


Abbildung 30: Wirksamkeit der 4 Solo-Formulierungen von 2,4-D, Quizalofop-P-ethyl, Flazasulfuron und Pelargonsäure resp. 2 Tankmischungen 2,4-D + Quizalofop-P-ethyl und Flazasulfuron + Pelargonsäure auf 11 getestete Pflanzen. Fehlerbalken zeigen Standardabweichungen.

5.1.3 Synergistische Wirkung der Tankmischung von Flazasulfuron mit Pelargonsäure

Wie in Kapitel 5.1.1 beschrieben, zeigte Flazasulfuron eine mässige, mit der Zeit zwar etwas zunehmende Wirkung auf die getesteten Pflanzen, wobei gegen Spitz-Wegerich und Schmetterlingsflieder kaum eine Wirkung beobachtet wurde. Pelargonsäure zeigte keine nachhaltige Wirkung. In Tankmischung wurde jedoch bei den meisten Pflanzen eine synergistische Wirkung beobachtet, mit meist exzellenter Wirkung (94-100 % nach 5 Wochen, Abbildung 31) und einer guten Wirkung bei Rot-Schwingel (86 %). Ausnahmen waren der Spitz-Wegerich (51 %) und der Schmetterlingsflieder (35 %; Abbildung 30).



Abbildung 31: synergistische Wirkung einer Tankmischung von Flazasulfuron und Pelargonsäure im Vergleich zu den Solo-Produkten auf Kanadisches Berufkraut (Tag 34, links Flazasulfuron solo, Mitte Pelargonsäure solo, rechts Tankmischung)

5.1.4 Vergleich der verschiedenen, getesteten Herbizid-Varianten

Abbildung 32 zeigt die Wirksamkeit der verschiedenen getesteten Solo-Produkte im Vergleich zu den zwei Tankmischungen auf je ein repräsentatives zweikeimblättriges Unkraut (Jakobs-Greiskraut) resp. Gras (Wiesen-Fuchsschwanz). Gut ersichtlich ist die selektive Wirkung von 2,4-D auf das zweikeimblättrige Unkraut und von Quizalofop-P-ethyl auf das Gras. Die Wirksamkeit von Pelargonsäure war hingegen nicht ausreichend, auch Flazasulfuron zeigte eine eher mässige Wirksamkeit. Die entsprechende Tankmischung war jedoch sehr effektiv. Auch die Tankmischung 2,4-D mit Quizalofop-P-ethyl war trotz einer geringen Minderwirkung bei Gräsern gut bis sehr gut.

Die Wirksamkeit sämtlicher Herbizid-Varianten auf die getesteten Unkräuter kann in Abbildung 33 direkt verglichen werden. Während die Soloprodukte erwartungsgemäss nur einen Teil der getesteten Pflanzen schädigen, decken die beiden Tankmischungen insgesamt ein breites Unkrautspektrum ab. In Abbildung 34 werden die zwei Tankmischungen direkt verglichen. Beide zeigen gegen die meisten Pflanzen eine gute Wirksamkeit. Die Tankmischung 2,4-D und Quizalofop-P-ethyl hat eine Wirkungslücke beim Rot-Schwingel, die Tankmischung Flazasulfuron und Pelargonsäure hingegen beim Spitz-Wegerich.

Eine gute Wirksamkeit unter Gewächshausbedingungen muss aber nicht unbedingt bedeuten, dass ein Herbizid auch im Freiland gut wirkt. Die Wachstumsbedingungen für Pflanzen auf Gleisanlagen unterscheiden sich stark von jenen im Gewächshaus und auch von Bedingungen auf landwirtschaftlichen Böden. Pflanzen auf Gleisanlagen müssen mit hohen Temperaturschwankungen zureckkommen und dürften häufiger unter Wassermangel leiden. Mögliche morphologische Anpassungen sind geringere Blattfläche, dickere Wachsschicht, stärkere Behaarung oder Bildung tiefer Wurzeln. Die Aufnahme von herbiziden Wirkstoffen über Blätter oder Wurzeln kann daher anders sein als im Gewächshaus. Daher wurden Wirksamkeitsstudien auf Gleisanlagen durchgeführt. Wirksamkeitsstudien wären auch bei einem allfälligen Gesuch für eine Bewilligungserweiterung erforderlich und müssten bei der Zulassungsstelle für die Beurteilung eingereicht werden.³⁵

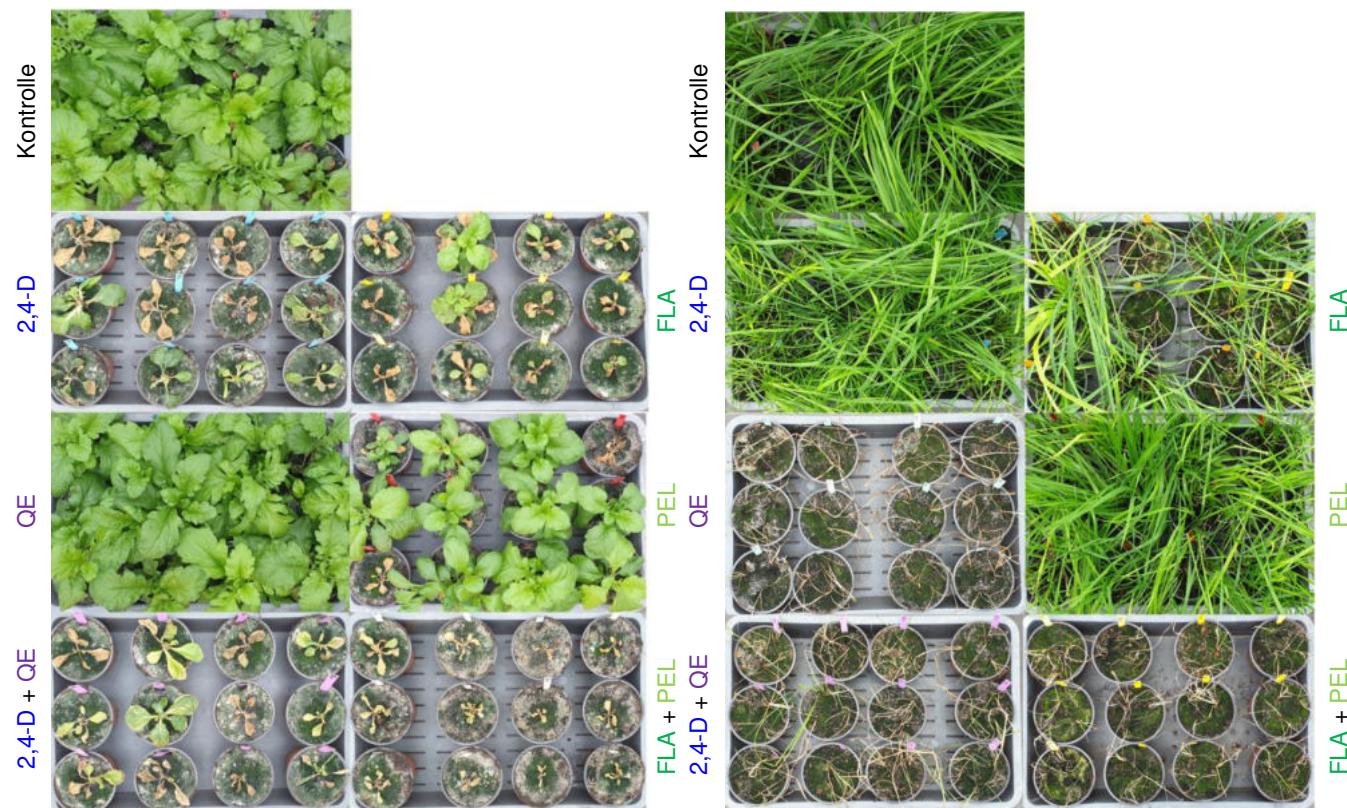
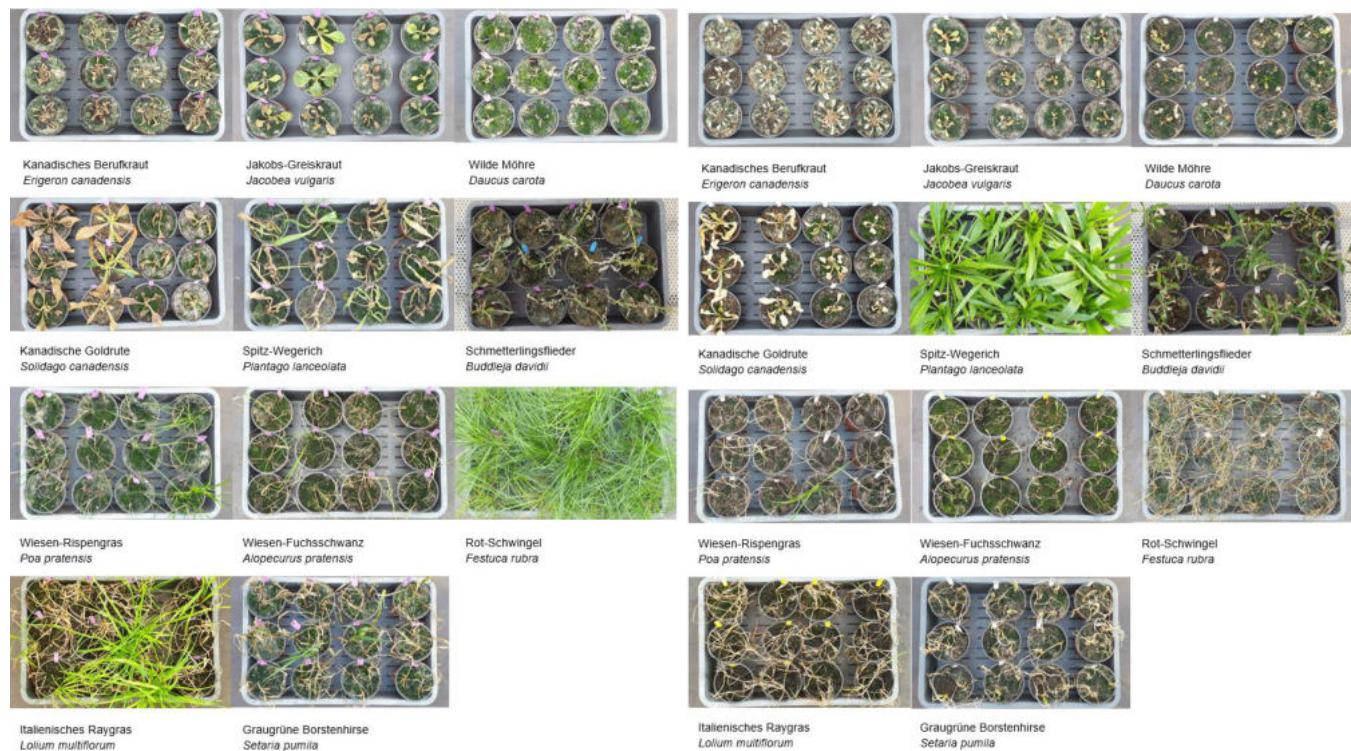


Abbildung 32: Wirksamkeit verschiedener Herbizide resp. Tankmischungen auf Jakobs-Greiskraut (Tag 34, links) und Wiesen-Fuchsschwanz (Tag 36, rechts; Anmerkung: es wurden nicht immer genau die gleichen Etikettenfarben verwendet für die verschiedenen Varianten)



Abbildung 33: Wirksamkeit verschiedener Herbizide resp. Tankmischungen auf die getesteten zweikeimblättrigen Unkräuter und Gräser 21-29 Tage nach Applikation



5.2 Freilandversuche auf Gleisanlagen – krautige, zweikeimblättrige Unkräuter

5.2.1 Allgemeine Angaben

Beim Ansetzen und Ausbringen der Spritzbrühen wurde nichts Aussergewöhnliches beobachtet. Die Tankmischungen konnten ohne Probleme hergestellt und ausgebracht werden. Gleiches gilt für die Soloprodukte. Die Analyse der Spritzbrühen ergab Wirkstoffgehalte von 86-127 % der Zielkonzentrationen. Die Benetzung der Unkräuter bei der Applikation war gut.

Die Wetterbedingungen vor, während und nach den Applikationen waren nicht aussergewöhnlich und entsprechen den Bedingungen, bei denen auch die Bahnen Behandlungen durchführen (lassen). Es fiel während mindestens 24 Stunden nach den Behandlungen kein Regen mit Ausnahme der Behandlung in Bülach 2022 (Dauer bis zum nächsten Niederschlag jedoch mindestens 8 Stunden). Die Vegetationsperiode 2021 war insgesamt eher kühl und nass, so dass wegen hohen Unkrautdrucks zweimal behandelt wurde. Die Vegetationsperiode 2022 war hingegen eher heiss und trocken, so dass eine einzige Behandlung genügte.

Am Standort Bülach wurden über die Versuchsdauer 27 Pflanzenarten beobachtet, am Standort Limmattal 47 Arten (Tabelle 16). Dabei handelte es sich fast ausschliesslich um krautige, zweikeimblättrige Unkräuter. Es wurden lediglich zwei Gräserarten und diese in geringen Dichten beobachtet (Wiesen-Rispengras und Quirlige Borstenhirse). Daher konnte an diesen Standorten nur die Wirksamkeit auf krautige, zweikeimblättrige Unkräuter bestimmt werden. Einzelne verholzende Arten kamen auch vor, wie Roter Hartriegel, Feldahorn, Gewöhnliche Waldrebe, Schmetterlingsflieder, Kirschlorbeer, jedoch auch in zu geringen Dichten, um Aussagen über die Wirksamkeit machen zu können.

Die Entwicklungsstadien der Arten zum Zeitpunkt der Behandlungen waren sehr variabel und lagen zwischen BBCH 12 und 89 (Limmattal 2021, erste Behandlung), 19 und 75 (Limmattal 2021, zweite Behandlung), 12 und 97 (Limmattal 2022); 12 und 89 (Bülach 2021, erste Behandlung), 19 und 73 (Bülach 2021, zweite Behandlung), 14 und 63 (Bülach 2022). Gemäss SBB, BLS und SOB können die Artspektren und Pflanzendichten an den beiden Standorten als repräsentativ für Gleisanlagen betrachtet werden. Auf dem humosen Teilbereich im Limmattal würde die Vegetationskontrolle eher mechanisch als chemisch erfolgen (Angaben der SBB).

Während der Versuchsdauer kam es zu folgenden, unbeabsichtigten Abweichungen vom Studienplan seitens der Bahnen:

- Bülach: 25 % der Fläche wurde circa zwei Monate nach der ersten Behandlung im Jahr 2021 gemäht, nach der Bonitur am 14.9.21 erfolgte eine Glyphosatbehandlung auf der ganzen Fläche.
- Limmattal: nach der zweiten Behandlung im Jahr 2021 wurde ein Teil der Versuchsfläche gemäht, 2022 wurde das Gleis nach der Bonitur am 21.9.22 erneuert, so dass keine Abschlussbonitur 2023 möglich war.

Da Mähen resp. Glyphosatbehandlungen ebenfalls eine Wirkung auf die vorkommenden Unkräuter haben, werden Aussagen zur Wirkung der geprüften Varianten erschwert.

5.2.2 Standort Bülach

In der Abbildung 35 ist die Wirksamkeit nach Henderson-Tilton für das Merkmal Unkrautdeckungsgrad von krautigen, zweikeimblättrigen Unkräutern für die Jahre 2021 und 2022 für die verschiedenen Herbizidvarianten am Standort Bülach dargestellt. Im Anhang sind Fotos von jeder Parzelle, die am 19.7.22 und am 29.9.22 gemacht wurden, abgelegt. Gleiches gilt für den Standort Limmattal sowie für die Standorte Burghalden, Döttingen und Liebefeld (Schachtelhalmversuche). Das Referenzverfahren Glyphosat zeigte die beste Wirkung. Die Wirkungsgrade lagen einen Monat nach den Behandlungen zwischen 83 und 100 %. Flazasulfuron in Tankmischung mit Pelargonsäure schnitt als mögliche Alternative am besten ab mit 76 bis 95 %, gefolgt von Flazasulfuron solo (48 bis 89 %) und Pelargonsäure solo (46 bis 62 %).

Der Wirkungsgrad von Glyphosat war über die Versuchsdauer insgesamt hoch, die Wirkungsgrade für Flazasulfuron in Tankmischung mit Pelargonsäure sowie für Flazasulfuron solo lagen im zweiten Versuchsjahr in einem ähnlichen Bereich wie der von Glyphosat. Im ersten Versuchsjahr war der Wirkungsgrad beider Varianten tiefer, obwohl im ersten Jahr zweimal und im zweiten Jahr nur einmal behandelt worden war. Flazasulfuron hat eine lang anhaltende Wirkung.³⁴ Pelargonsäure solo hatte über die zwei Jahre eine mittlere Wirkung.

Erwartungsgemäss wirkte Quizalofop-P-ethyl (appliziert als Solo-Formulierung im Jahr 2021) nicht gegen zweikeimblättrige Unkräuter. Da nur wenig Gräser auf der Versuchsfläche vorhanden waren, wurde die Variante im Jahr 2022 angepasst und Quizalofop-P-ethyl in Tankmischung mit 2,4-D appliziert. Aufgrund der schlechten Wirkung von 2,4-D solo im ersten Versuchsjahr (Abbildung 35) wurde zudem im zweiten Versuchsjahr bei beiden Varianten (2,4-D solo und Tankmischung) ein Netzmittel (Break-Thru) und ein Produkt zur pH-Absenkung (Checkpoint) zur Spritzbrühe gegeben. Die Wirkung der beiden Varianten war 2022 vergleichbar, jedoch nicht ausreichend. Einen Monat nach der Behandlung betrug der Wirkungsgrad 49 % für 2,4-D appliziert solo und 62 % für die Tankmischung 2,4-D und Quizalofop-P-ethyl. Der Wirkungsgrad von 2,4-D war im Jahr 2022 mit Zugabe dieser zwei Additive zwar erhöht, aber nicht im erhofften Ausmass (Abbildung 35).

Am 10.5.23 erfolgte eine Abschlussbonitur am Standort Bülach, über zehn Monate nach der Behandlung im Vorjahr (21.6.22). Der Wirkungsgrad in der Variante Glyphosat betrug 58 %. Vergleichbar war die Wirkung in den Varianten Flazasulfuron solo (55 %) und Tankmischung Flazasulfuron und Pelargonsäure (53 %). Bei den anderen Varianten war der Wirkungsgrad deutlich tiefer: Pelargonsäure solo 34 %, Tankmischung 2,4-D und Quizalofop-P-ethyl 23 % und 2,4-D solo -64 %. Eine negative Wirksamkeit bedeutet, dass bei dieser Variante mehr Unkräuter vorhanden waren als in der unbehandelten Kontrolle.

Standort Bülach

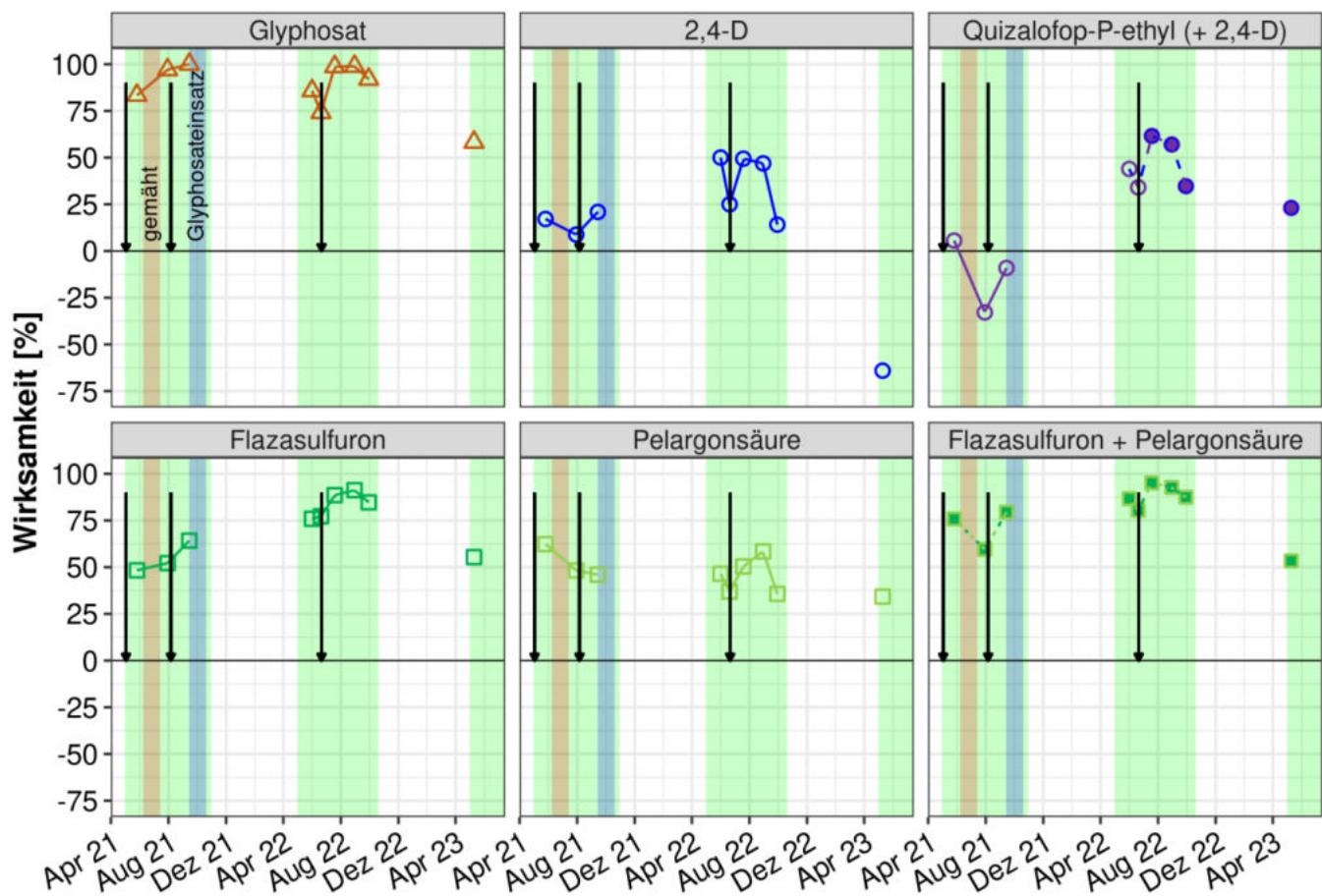


Abbildung 35: Wirksamkeit der Herbizidbehandlungen (Pfeile) am Standort Bülach nach Henderson-Tilton [in %] berechnet anhand des Merkmals Deckungsgrad durch krautige, zweikeimblättrige Unkräuter für die verschiedenen Herbizidvarianten. Grün hinterlegt ist der Beobachtungszeitraum während der Vegetationszeit. Farblich hinterlegt sind auch die beobachteten Abweichungen vom Studienplan: Mähen (braun) und Glyphosatbehandlung (blau).

5.2.3 Standort Limmattal

In der Abbildung 36 (oben) sind die Ergebnisse für den Standort Limmattal (Bereich mit wenig Humus) dargestellt. Beim Referenzverfahren Glyphosat lagen die Wirkungsgrade bei der ersten Bonitur etwa einen Monat nach den Behandlungen bei 91 bis 100 %. Flazasulfuron in Tankmischung mit Pelargonsäure schnitt als mögliche Alternative gleich gut ab mit 95 bis 100 %, gefolgt von Flazasulfuron solo (75-87 %) und Pelargonsäure solo (28-63 %). Bei der Variante Pelargonsäure solo wurde 2021 insgesamt eine höhere Wirksamkeit beobachtet als 2022.

Wie erwartet wirkte Quizalofop-P-ethyl (appliziert als Solo-Formulierung im Jahr 2021) nicht gegen zweikeimblättrige Unkräuter. Wie in den Versuchen am Standort Bülach wurden auch hier die Varianten im Jahr 2022 angepasst durch Zugabe von 2,4-D zu Quizalofop-P-ethyl resp. Netzmittelzugabe und pH-Absenkung in den Varianten 2,4-D solo und für die Tankmischung. Dies brachte ebenfalls nicht die erhoffte Wirkungssteigerung.

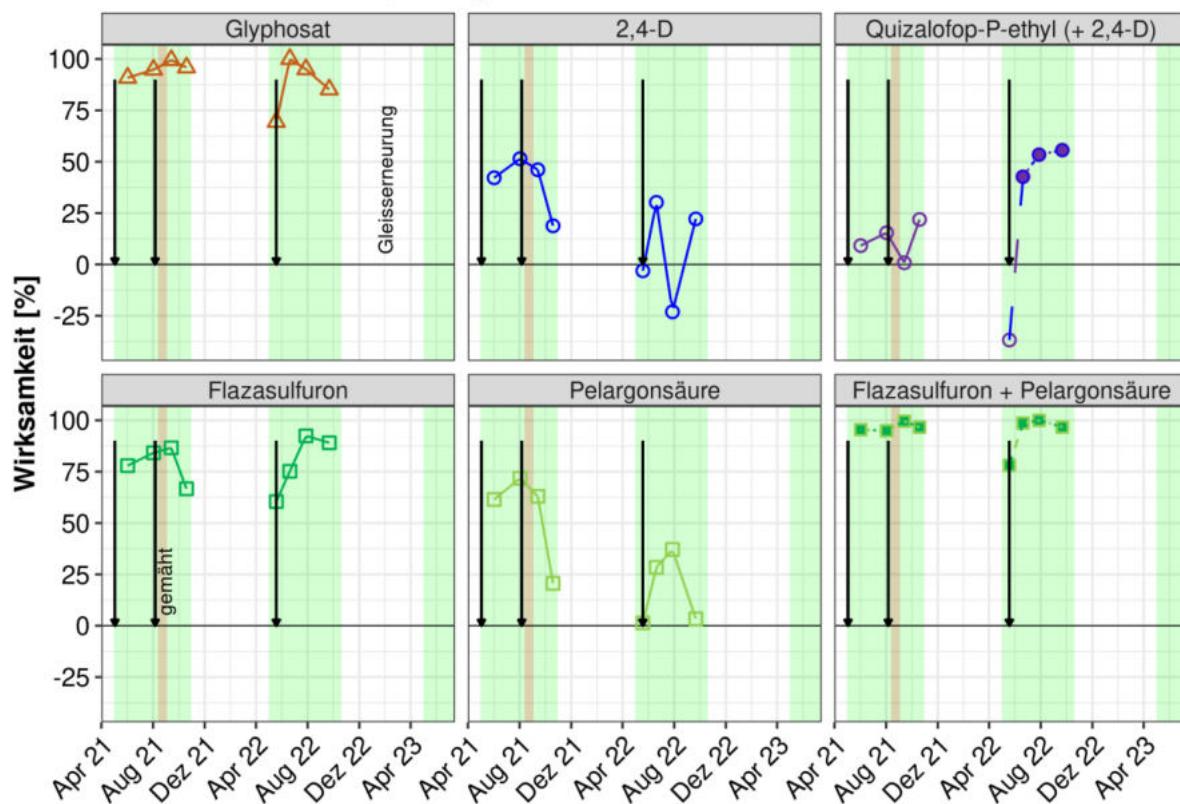
Am Standort Limmattal im Bereich mit viel Humus liess die anfänglich gute Wirkung von Glyphosat (96 % bei den ersten Bonituren nach den Behandlungen) rasch nach (Abbildung 36, unten). Glyphosat wird nur über die Blätter aufgenommen und das Samenpotential im Boden war im Bereich mit viel Humus offenbar so hoch, dass rasch wieder Pflanzen keimten und sich etablierten. Die zeitliche Entwicklung der Wirkung der Tankmischung Flazasulfuron und Pelargonsäure war ähnlich, aber weniger extrem. Abgesehen von der ersten Bonitur nach der ersten Behandlung 2021 war die Wirkung von Flazasulfuron solo in etwa vergleichbar mit der Tankmischung. Der mittlere Wirkungsgrad über alle Bonituren war für die drei Varianten Glyphosat, Flazasulfuron in Kombination mit Pelargonsäure und Flazasulfuron solo nahezu identisch (~70 %). Die Unkrautwirkung der drei anderen Varianten 2,4-D solo, Quizalop-P-ethyl (+2,4-D) und Pelargonsäure solo war nicht ausreichend (< 55 %).

Auch im Bereich mit viel Humus brachte die Zugabe der oben beschriebenen Additive zu den Varianten mit 2,4-D nicht die erhoffte Wirkungssteigerung. Zwar war die Wirksamkeit in beiden Varianten (2,4-D solo sowie Quizalofop-P-ethyl + 2,4-D) 40 Tage nach der Behandlung relativ hoch (75 resp. 73 %), nahm dann aber rasch ab und lag Ende Juli 2022 bei 31 resp. 44 %.

Tabelle 16: Arten, die während der gesamten Versuchsdauer an den Standorten Bülach (2021-2023) und Limmattal (2021-2022) beobachtet wurden

| Lateinischer Name | Deutscher Name | Bülach | Limmattal |
|---|---|--------|-----------|
| <i>Acer campestre</i> | Feldahorn | X | X |
| <i>Anthyllis vulneraria</i> | Gewöhnlicher Wundklee | | X |
| <i>Buddleja davidii</i> | Schmetterlingsflieder | | X |
| <i>Cerastium fontanum</i> | Quellen-Hornkraut | X | X |
| <i>Chaenorhinum minus</i> | Kleines Leinkraut | X | X |
| <i>Clematis vitalba</i> | Gewöhnliche Waldrebe | | X |
| <i>Convolvulus arvensis</i> | Acker-Winde | X | X |
| <i>Cornus sanguinea</i> | Roter Hartriegel | X | X |
| <i>Cymbalaria muralis</i> | Zimbekraut | | X |
| <i>Daucus carota</i> | Wilde Möhre | X | X |
| <i>Echium vulgare</i> | Gemeiner Natternkopf | X | |
| <i>Erigeron annuus</i> | Einjähriges Berufkraut | | X |
| <i>Erigeron canadensis</i> | Kanadisches Berufkraut | X | X |
| <i>Euphorbia maculata / Prostata aiton</i> | Gefleckte / Liegende Wolfsmilch | | X |
| <i>Galeopsis tetrahit</i> | Stechender Hohlzahn | X | X |
| <i>Galium mollugo</i> | Wiesenlabkraut | X | X |
| <i>Geranium purpureum / robertianum</i> | Purpur / Stinkender Storzschnabel | X | X |
| <i>Geranium rotundifolium</i> | Rundblättriger Storzschnabel | X | X |
| <i>Hieracium albiflorum</i> | Habichtskräuter | | X |
| <i>Hieracium pilosella</i> | Kleines Habichtskraut | X | X |
| <i>Hypericum perforatum</i> | Echtes Johanniskraut | X | X |
| <i>Hypochaeris radicata / glabra</i> | Gewöhnliches / Kahles Ferkelkraut | | X |
| <i>Jacobaea vulgaris</i> | Jakobs-Greiskraut | | X |
| <i>Lactuca serriola</i> | Stachel-Lattich | X | X |
| <i>Lepidium nitidum</i> | Kressen | X | X |
| <i>Linaria vulgaris</i> | Echtes Leinkraut | X | X |
| <i>Medicago lupulina</i> | Hopfenklee | X | X |
| <i>Plantago lanceolata</i> | Spitz-Wegerich | X | X |
| <i>Plantago major</i> | Breitwegerich | | X |
| <i>Poa pratensis / Setaria verticillata</i> | Wiesen-Rispengras / Quirlige Borstenhirse | X | X |
| <i>Prunus laurocerasus</i> | Kirschchlorbeer | | X |
| <i>Sanguisorba minor</i> | Kleiner Wiesenknopf | X | X |
| <i>Senecio inaequidens</i> | Schmalblättriges Greiskraut | | X |
| <i>Senecio vulgaris</i> | Gewöhnliches Greiskraut | | X |
| <i>Sonchus maritimus</i> | Strand-Gänsedistel | | X |
| <i>Sonchus oleraceus</i> | Gemüse-Gänsedistel | | X |
| <i>Thymus serpyllum</i> | Feld-Thymian | X | X |
| <i>Tragopogon pratensis</i> | Wiesen-Bocksbart | | X |
| <i>Trifolium</i> | Kleearten der Gattung Trifolium | | X |
| <i>Trigonella esculenta</i> | Blauer Bockshornklee | | X |
| <i>Verbascum thapsus</i> | Kleinblütige Königskerze | X | X |
| <i>Veronica arvensis / hederifolia</i> | Feld-Ehrenpreis / Efeu-Ehrenpreis | X | X |
| <i>Vicia sativa</i> | Futterwicke | X | X |

Standort Limmattal, wenig Humus



Standort Limmattal, viel Humus

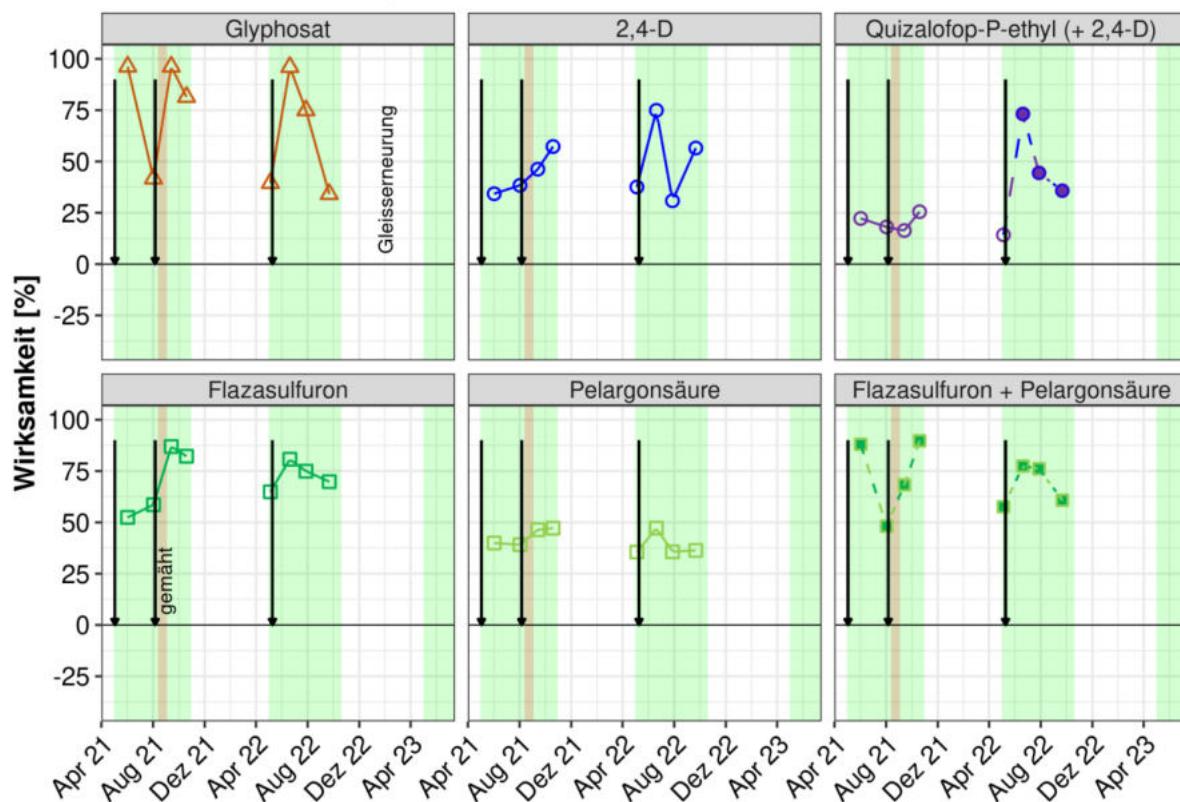


Abbildung 36: Wirksamkeit der Herbizidbehandlungen (Pfeile) am Standort Limmattal [in %] nach Henderson-Tilton berechnet anhand des Merkmals Deckungsgrad durch krautige, zweikeimblättrige Unkräuter für die verschiedenen Herbizidvarianten im Bereich mit wenig Humus (oben) und mit viel Humus (unten). Grün hinterlegt ist der Beobachtungszeitraum während der Vegetationsperiode, braun die beobachtete Abweichung vom Studienplan (Mähen).

5.3 Freilandversuche auf Gleisanlagen – Schachtelhalm

5.3.1 Allgemeine Angaben

Die Analyse der Spritzbrühen ergab Wirkstoffgehalte von 78-115 % der Zielkonzentrationen. Die Höhe des Schachtelhals bei der ersten Behandlung 2021 betrug etwa 16 cm in Burghalden, 23 cm in Döttingen und 31 cm in Liebefeld. Im Folgejahr 2022 waren es jeweils 15 cm, 23 cm resp. 24 cm. Bei der Applikation wurde eine gute Benetzung der Schachtelhalmtriebe beobachtet. Die Sole-Behandlungen erfolgten flächig mit einer Giesskanne. An allen Standorten wurde in den Sole-Parzellen starke Korrosion an Klammern und Schrauben beobachtet, mit denen die Gleise an den Schwellen fixiert sind (Abbildung 37).

Die Wetterbedingungen vor, während und nach den Applikationen waren nicht aussergewöhnlich und entsprachen den Bedingungen, bei denen auch die Bahnen Behandlungen durchführen (lassen). Unmittelbar nach den Behandlungen erfolgten keine Niederschläge, die Herbizidminderwirkungen hätten verursachen können. Es fiel während mindestens 24 Stunden nach den Behandlungen kein Regen mit Ausnahme der Behandlung im Liebefeld (Dauer bis zum nächsten Niederschlag jedoch mindestens 10 Stunden). Bei den Sole-Behandlungen war die Dauer bis zum nächsten Regen zum Teil kürzer: Dauer bis zum nächsten Niederschlag mindestens 2 Stunden (zweite Sole-Behandlung in Burghalden 2021), 6 Stunden bzw. 8 Stunden (zweite bzw. dritte Sole-Behandlung in Burghalden 2022), resp. 10 Stunden (zweite Sole-Behandlung in Döttingen 2021). Die Vegetationsperiode 2021 war insgesamt eher kühl und nass, die Vegetationsperiode 2022 eher heiss und trocken.

Am Standort Burghalden wurden im Oktober 2021 Arbeiten am Schotter durchgeführt, so dass die Oktoberbonitur bei drei Blöcken nicht durchgeführt werden konnte.

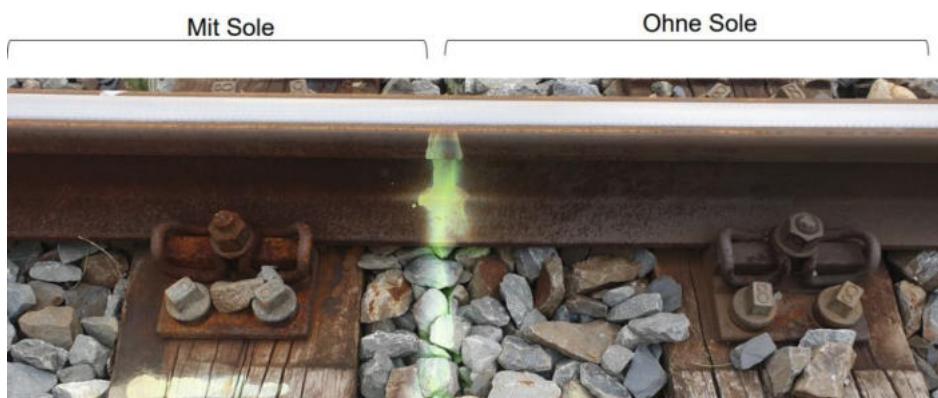
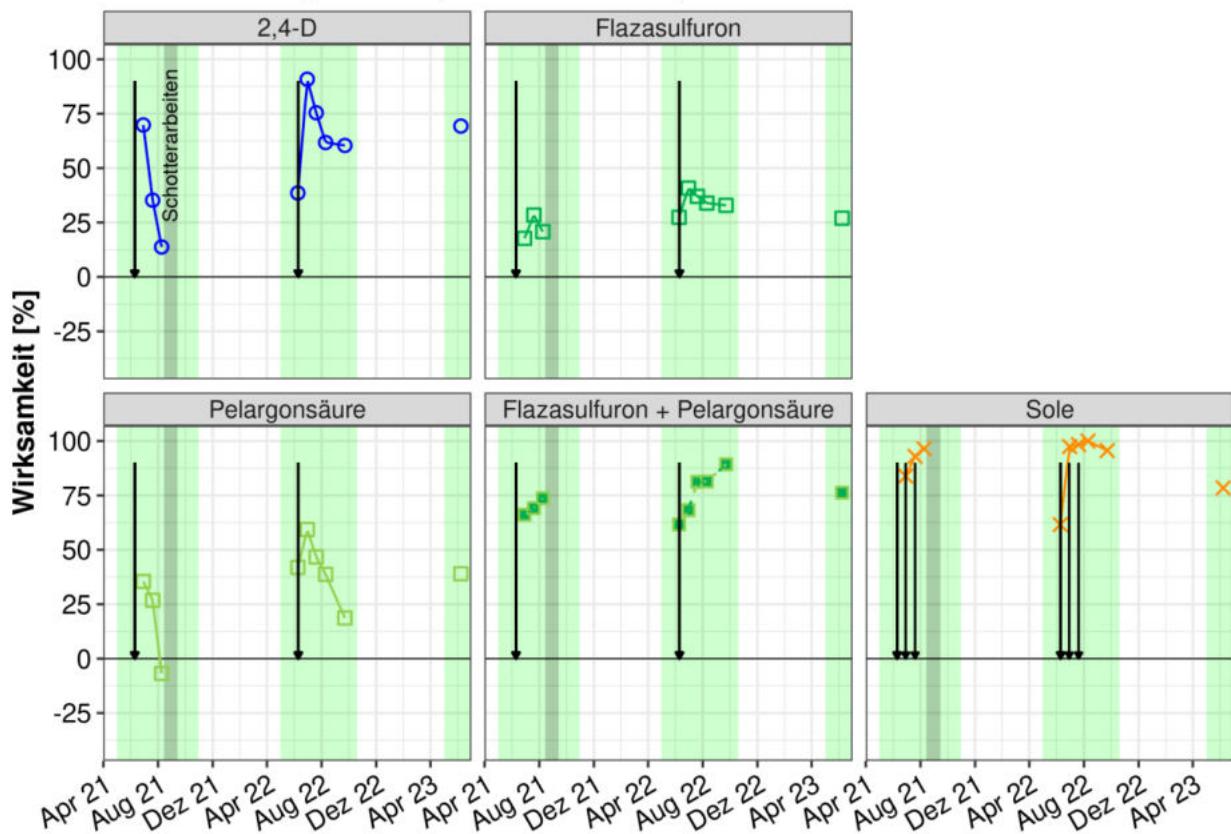


Abbildung 37: Aufgrund der Sole-Behandlungen kam es zu erheblicher Korrosion (Foto aufgenommen am Standort Burghalden im Juli 2022).

5.3.2 Standort Burghalden

In Abbildung 38 (oben) ist die Wirksamkeit nach Henderson-Tilton für das Merkmal Schachtelhalmdeckungsgrad für die Jahre 2021 und 2022 für die verschiedenen Herbizidvarianten sowie die Sole am Standort Burghalden dargestellt. Kurz nach der Behandlung wies 2,4-D einen hohen Wirkungsgrad gegen Schachtelhalm auf (70 und 91 % drei Wochen nach den Behandlungen). Die Herbizidwirkung nahm dann aber rasch ab (Abbildung 38, oben). Der Wirkungsgrad von Pelargonsäure solo lag drei Wochen nach der Behandlung bei 35 und 59 %. Aufgrund von Wiederaustrieb und einer unzureichenden Wirkung auf einzelne, getroffene Triebe nahm der Schachtelhalmdeckungsgrad in dieser Variante rasch wieder zu, und der Wirkungsgrad nahm entsprechend ab. Bei Flazasulfuron solo lag der Wirkungsgrad über den gesamten Beobachtungszeitraum deutlich unter 50 %. Bei Flazasulfuron appliziert in Tankmischung mit Pelargonsäure nahm der Wirkungsgrad über die Vegetationszeit jeweils zu und betrug im Durchschnitt 74 %. Nach der dritten Behandlung mit Sole waren nahezu keine Schachtelhalmtriebe mehr sichtbar in den behandelten Parzellen (Wirkungsgrad 96 und 100 %). Der durchschnittliche Wirkungsgrad der Sole-Variante über alle Boniturtermine war 89 %.

Standort Burghalden (Schachtelhalm)



Standort Döttingen-Liebefeld (Schachtelhalm)

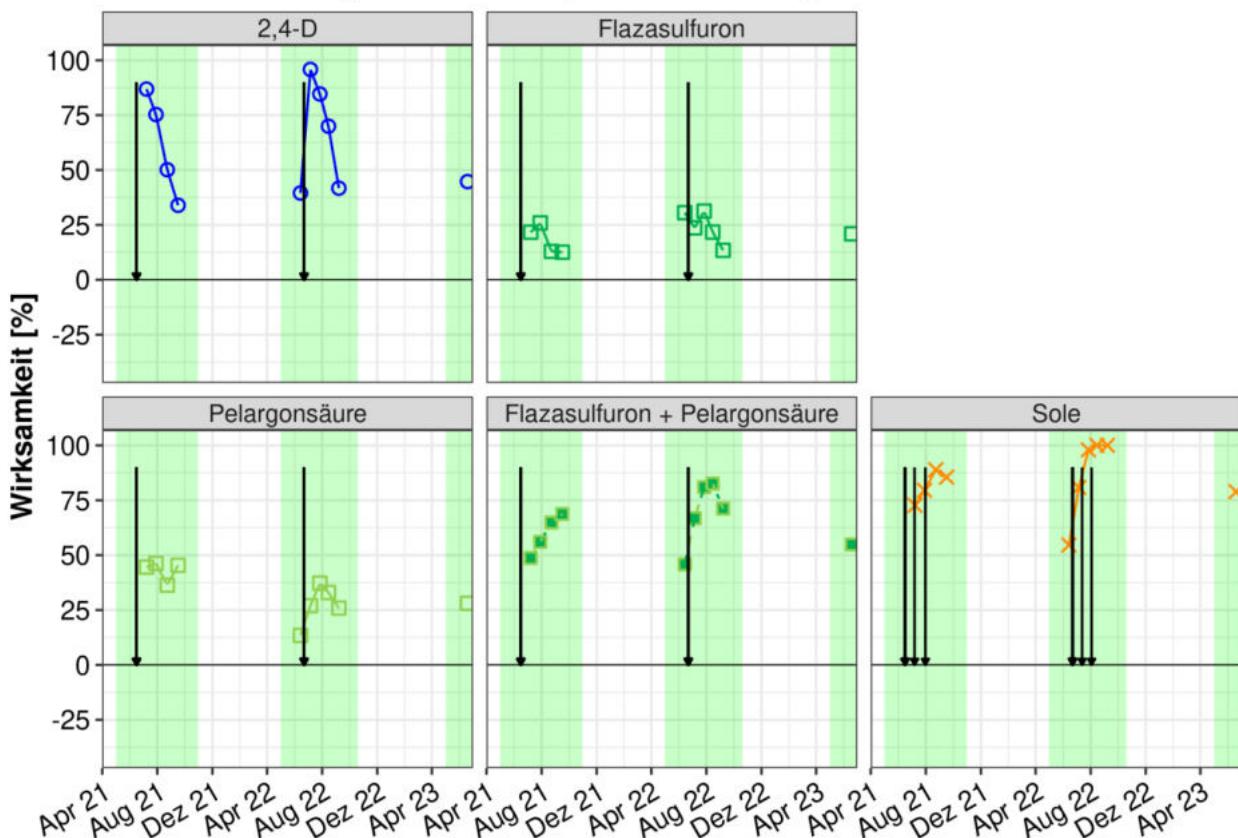


Abbildung 38: Wirksamkeit der Herbizid- resp. Sole-Behandlungen (Pfeile) [in %] nach Henderson-Tilton berechnet anhand des Merkmals Schachtelhalmdeckungsgrad am Standort Burghalden (oben) und Liebefeld/Döttingen (unten). Grün hinterlegt ist der Beobachtungszeitraum während der Vegetationsperiode, grau die beobachtete Abweichung vom Studienplan am Standort Burghalden (Schotterarbeiten).

Am 9.6.23 erfolgte eine Abschlussbonitur. Die Variante Sole und die Tankmischung Flazasulfuron und Pelargonsäure wiesen mit 78% und 76% die höchsten Wirkungsgrade auf, gefolgt von der Variante 2,4-D mit 69 %. Die Wirkungsgrade von Flazasulfuron und Pelargonsäure appliziert solo lagen unter 40%.

5.3.3 Standort Döttingen/Liebefeld

Für den zweiten Schachtelhalmversuch, der auf zwei Standorte verteilt war, wurde ein mittlerer, zeitlicher Startpunkt bestimmt (erste Behandlung 2021), die Standorttermine wurden auf diesen Zeitstrahl abgebildet und korrespondierende Termine gemittelt, damit eine Darstellung analog zu den anderen Versuchen möglich war.

Wie am Standort Burghalden trat bei 2,4-D rasch nach der Behandlung eine Wirkung ein (87 und 96 % drei Wochen nach den Behandlungen). Danach nahm die Herbizidwirkung rasch ab (Abbildung 38, unten). Die Wirkungsgrade der beiden Varianten Pelargonsäure solo und Flazasulfuron solo waren über alle Boniturtermine tief (< 50 %). Der Wirkungsgrad der Tankmischung nahm über die Zeit in beiden Jahren jeweils zu und lag im Durchschnitt bei 64 %. Der Wirkungsgrad von Sole war im ersten Jahr schlechter als im zweiten Versuchsjahr. Insgesamt lag er bei 84 %, womit Sole in diesem Versuch über die zwei Jahre am besten gewirkt hat.

Im Folgejahr erfolgte eine Abschlussbonitur am 5.6.23 in Döttingen bzw. am 4.7.23 am Standort Liebefeld. Der Wirkungsgrad von der Variante Sole war mit 79 % am höchsten, gefolgt von der Tankmischung mit 55 % und der Variante 2,4-D mit 45 %. Die Wirkungsgrade von Flazasulfuron und Pelargonsäure appliziert solo lagen unter 30%. Die Wirkungsgrade waren tiefer als am Standort Burghalden. Die Schachtelhalmtriebe waren in Döttingen und Liebefeld zum Zeitpunkt der Behandlungen weiterentwickelt als in Burghalden. Ob die tieferen Wirkungsgrade darauf zurückzuführen sind, kann jedoch nicht mit Sicherheit gesagt werden.

5.4 Schlussfolgerungen Wirksamkeitsversuche

Die beiden Versuchsstandorte Bülach und Limmattal wiesen ein breites Spektrum an zweikeimblättrigen Unkräutern auf. Die Dichten der einzelnen Arten waren jedoch zu tief, um Aussagen zur Wirksamkeit der Herbizide und Tankmischungen gegen einzelne Arten machen zu können. Gleiches gilt für die Gruppe der Gräser und die Gruppe der verholzenden Arten. Die Wirksamkeit konnte deshalb nur gesamthaft und nur für die vorhandenen krautigen, zweikeimblättrigen Arten ausgewertet werden.

Gemäss den Angaben der involvierten Bahngesellschaften war das Unkrautspektrum an den beiden Standorten repräsentativ für die Schweizer Gleisanlagen, so dass die Ergebnisse, die auf Stufe des Gesamtdeckungsgrads bestimmt wurden, repräsentativ sein sollten. Das Referenzherbizid Glyphosat hat gegen zweikeimblättrige Unkräuter an beiden Standorten während der beiden Versuchsjahre sehr gut gewirkt. Einzig am Standort Limmattal im Bereich mit viel Humus war die Wirkung von Glyphosat nicht nachhaltig, da rasch neue Unkräuter gekeimt sind. Gemäss den Angaben der SBB würde in so einem Bereich die Vegetationskontrolle nicht chemisch, sondern mechanisch durch Mähen erfolgen. Der Bereich mit viel Humus wurde auch nur ins Versuchsdesign aufgenommen, weil zu Beginn des Versuchs unklar war, ob im anderen Bereich die Verunkrautung ausreichend sein würde für die Beurteilung der Wirksamkeit der geprüften Varianten.

In den Gewächshausversuchen konnten bei der Tankmischung Flazasulfuron und Pelargonsäure synergistische Effekte beobachtet werden. Bei der Tankmischung 2,4-D und Quizalofop-P-ethyl traten keine nennenswerten Minderwirkungen auf. Beide Tankmischungen zeigten in den Gewächshausversuchen eine mehrheitlich gute Wirkung auf die geprüften Unkräuter. Die hohen, im Gewächshaus erzielten Wirkungsgrade mit der Tankmischung 2,4-D und Quizalofop-P-ethyl konnten im Gleisbereich jedoch nicht reproduziert werden. Auch die im zweiten Versuchsjahr getroffenen Massnahmen, um die Wirkung zu verbessern, Zugabe von Additiven zur Verbesserung der Benetzung und pH-Absenkung der Spritzbrühe, führten zu keiner markanten Wirkungssteigerung. In den Gleisversuchen waren die Unkrautspektren und die Wachstumsstadien zum Zeitpunkt der Behandlungen diverser, und die Pflanzen weisen auf Gleisanlagen auch einen anderen, auf die Bedingungen im Gleis angepassten Wuchs auf. Diese Faktoren können in Gewächshausversuchen nicht abgebildet werden.

Von den geprüften, möglichen Alternativen zu Glyphosat war die Variante Flazasulfuron plus Pelargonsäure die wirksamste gegen zweikeimblättrige Unkräuter. Mit Flazasulfuron solo konnten auch relativ hohe Wirkungsgrade erzielt werden. Dieser Wirkstoff hat eine langanhaltende Bodenwirkung. Pelargonsäure hingegen hat eine rein abbrennende Kontaktwirkung. Kleine zweikeimblättrige Unkräuter sterben nach der Behandlung ab. Bei etwas grösseren Unkräutern sterben nur die getroffenen Blätter ab, die Pflanzen überleben und wachsen weiter. Ein Gleisabschnitt müsste daher regelmässig abgelaufen und neu aufgelaufene Unkräuter mit Pelargonsäure bekämpft werden, was wohl kaum umsetzbar wäre.

In den Versuchen zur Bekämpfung von Ackerschachtelhalm (*Equisetum arvense*) wurde Glyphosat nicht geprüft, da bekannt ist, dass dieses gegen Schachtelhalm nicht wirkt. Die Wirkung von 2,4-D war kurz nach den Behandlungen gut, nahm dann aber relativ rasch wieder ab. Mit drei Behandlungen mit Salzsole pro Jahr im Abstand von 3 Wochen wurde der Schachtelhalm in den Versuchen am besten bekämpft. Die flächige Anwendung mit einer Giesskanne, auch über die Schwellen, führte beim Gleismaterial zu erheblicher Korrosion, deutlich mehr als bei den anderen Varianten beobachtet worden war. Bei regelmässiger Behandlung mit Sole müsste die Applikation so gestaltet werden, dass Korrosion möglichst vermieden werden kann. Weder mit Flazasulfuron solo noch mit Pelargonsäure solo konnten hohe Wirkungsgrade gegen den Schachtelhalm erzielt werden. Die Wirkung der Tankmischung Flazasulfuron und Pelargonsäure war hingegen deutlich besser. In den Versuchen schienen 2,4-D, die Sole sowie die Tankmischung Flazasulfuron und Pelargonsäure eine nachhaltige Wirkung auf den Schachtelhalm über die Jahre zu zeigen. Die Beurteilung des Wirkungsgrads von Herbiziden auf ausdauernde Unkräuter wie Schachtelhalm über mehrere Versuchsjahre ist jedoch schwierig, da es sehr viele Einflussfaktoren gibt wie den Behandlungszeitpunkt, die Schachtelhalmgrösse zum Zeitpunkt der Behandlung, die Grösse des unterirdischen Rhizomnetzwerks, den Zeitraum der Verlagerung von Reservestoffen etc.

Die Tankmischung Flazasulfuron und Pelargonsäure ist aus Wirkungssicht somit die beste Alternative zu Glyphosat, mit guter Wirkung in den Gleisversuchen sowohl gegen zweikeimblättrige Unkräuter als auch gegen Schachtelhalm. Die Wirkung gegen Gräser konnte in den Gleisversuchen nicht geprüft werden, war aber zumindest

in den Gewächshausversuchen ebenfalls gut. Für die Umsetzbarkeit und Handhabbarkeit wäre es vorteilhaft, wenn für einen Gleisabschnitt nicht mehrere Spritzbrühen angesetzt werden müssen, sondern mit einem Produkt bzw. mit einer Tankmischung die unerwünschte Vegetation bekämpft werden kann. Dies erhöht insgesamt die Sicherheit bei Gleisarbeiten und bei Kontrollgängen sowie für den Bahnverkehr. Nachteilig bei dieser Tankmischung ist, dass das pelargonsäurehaltige Produkt als ätzend eingestuft ist und unangenehm riecht (Anwenderschutz). Ebenfalls nachteilig sind die hohen Aufwandmengen, die bei Pelargonsäure nötig sind.

Flazasulfuron solo ist aus Wirkungssicht zumindest gegen zweikeimblättrige Unkräuter auch interessant. Das Ausbringen von Flazasulfuron solo würde sich einfacher gestalten, und es wird insgesamt sehr wenig Wirkstoff pro Fläche ausgebracht. Nachteilig wäre, dass zeitgleich der Schachtelhalm nicht bekämpft werden kann. Wirkstoffe der Gruppe der Sulfonylharnstoffe sind sehr resistenzanfällig,³⁶ dementsprechend müsste ein Solo Einsatz von Flazasulfuron mit anderen Bekämpfungsmassnahmen alterniert/kombiniert werden. Dies empfiehlt sich aber auch bei einem möglichen Einsatz der Tankmischung.

6 Dank

Wir bedanken uns bei den Gleisequipen der SBB und BLS für die Aushubarbeiten an den Standorten Nottwil, resp. Lanzenhäusern und Wabern, bei G. Reiss (Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, Birmensdorf) für die Lysimeterzylinder, R. Total für Transport von Bodenmaterial, D. Feusi für Bauarbeiten und Befüllen der Lysimeter, V. Prasuhn für allgemeine Ratschläge zum Bau der Lysimeter, U. Gander für technischen Support, D. Bürge und A. Bonvicini für die Bestimmung von Bodenparametern, J. Blom, S. Cueff, D. Janser, M. Lehto, F. Maire und J. Witsoe für Sickerwasserprobenahmen, J. Müller für Unterstützung im Labor, M. Louw-Prevost für die Zusammenstellung der Fotodokumentation (alle vorgängig erwähnten Personen von Agroscope), W. Räss (SBB), O. Gempeler (BLS), T. Nauer (SOB) für Unterstützung und Sicherheit in den Wirksamkeitsversuchen im Gleisbereich, S. Aebischer (SBB) für Drohnenaufnahmen im Rangierbahnhof Limmattal, M. Edelmann (Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften, Wädenswil) für Unterstützung bei Bromidanalysen. Nissan Chemical Industries (Tokyo, Japan) und ISK Biosciences Europe (Diegem, Belgien) danken wir für diverse Referenzchemikalien.

Das Projekt wurde finanziert vom **Bundesamt für Verkehr (BAV)** und vom **Verband öffentlicher Verkehr**, vertreten durch **SBB**, **BLS** und **SOB**. Wir bedanken uns insbesondere bei S. Bellotto (BAV), G. Adolph, L. Tanner (SBB), P. Sydler (BLS), J. Henke und P. Anderegg (SOB).

7 Autoren



Ignaz Bürge

Projektverantwortung
Lysimeterstudien,
Sickerwasseranalysen,
Auswertungen Lysimeterstudien

Roy Kasteel

hydrologische Modellierung der
Lysimeter
Visualisierung der Daten

Thomas Poiger

wissenschaftliche Begleitung
Lysimeterstudien



Martina Keller

Projektverantwortung
Wirksamkeitsversuche,
Auswertungen
Wirksamkeitsversuche

Pascal Haberey

Bonitur Gewächshausversuche,
Wirksamkeitsversuche auf
Gleisanlagen

Jürgen Krauss

Gewächshausversuche

8 Literaturverzeichnis

- (1) Torstensson, L.; Börjesson, E. Use of imazapyr against *Equisetum arvense* on Swedish railway tracks. *Pest. Manag. Sci.* **2004**, *60*, 565-569.
- (2) Bemowska-Kalabun, O.; Bogucka, A.; Wilkomirski, B.; Wierzbicka, M. Survival on railway tracks of *Geranium robertianum* - a glyphosate-tolerant plant. *Ecotoxicology* **2021**, *30*, 1186-1202.
- (3) IARC. *Some Organophosphate Insecticides and Herbicides*; International Agency for Research on Cancer, 2017. ECHA. Glyphosate not classified as a carcinogen by ECHA. European Chemicals Agency: Helsinki, 2017.
- (4) European Food Safety Authority. Glyphosate: no critical areas of concern; data gaps identified. 2023.
- (5) European Commission. Renewal of the approval of glyphosate: Questions and Answers. 2023.
- (6) Nolte, R.; Behrendt, S.; Magro, M.; Pietras-Couffignal, K. *Guidelines, state of the art and integrated assessment of weed control and management for railways "HERBIE"*; Institute for Futures Studies and Technology Assessment, International Union of Railways, 2018.
- (7) Schweinsberg, F.; Abke, W.; Rieth, K.; Rohmann, U.; Zullei-Seibert, N. Herbicide use on railway tracks for safety reasons in Germany? *Toxicology Letters* **1999**, *107*, 201-205.
- (8) Gustafson, D. I. Groundwater ubiquity score: A simple method for assessing pesticide leachability. *Environ. Toxicol. Chem.* **1989**, *8* (4), 339-357.
- (9) Bürge, I.; Hanke, I.; Pavlova, P.; Bächli, A.; Keller, M.; Poiger, T. *Evaluation von Herbiziden für den Gleisbereich bezüglich Grundwassergefährdung*; Agroscope, 2018.
- (10) Buerge, I. J.; Pavlova, P.; Hanke, I.; Bächli, A.; Poiger, T. Degradation and sorption of the herbicides 2,4-D and quizalofop-P-ethyl and their metabolites in soils from railway tracks. *Environ Sci Eur* **2020**, *32*, 15.
- (11) Poiger, T.; Müller, J.; Kasteel, R.; Buerge, I. J. Degradation and sorption of the herbicide pelargonic acid in subsoils below railway tracks compared to a range of topsoils. *Environ Sci Eur* **2024**.
- (12) Buerge, I. J.; Kasteel, R.; Poiger, T. Leaching of herbicides and their metabolites in lysimeters filled with soils from railway tracks. *Sci. Total Environ.* **2024**, *909*.
- (13) Poiger, T.; Buerge, I. J.; Bächli, A.; Müller, M. D.; Balmer, M. E. Occurrence of the herbicide glyphosate and its metabolite AMPA in surface waters in Switzerland determined with on-line solid phase extraction LC-MS/MS. *Environ. Sci. Pollut. Res.* **2017**, *24*, 1588-1596.
- (14) European Food Safety Authority. Peer review of the pesticide risk assessment of the active substance flazasulfuron. *EFSA Journal* **2016**, *14* (8).
- (15) European Food Safety Authority. Conclusion on the peer review of the pesticide risk assessment of the active substance 2,4-D. *EFSA Journal* **2014**, *12* (9).
- (16) Costa Paraiba, L.; Pulino, P. Pesticide dispersion-advection equation with soil temperature effect. *Environmetrics* **2003**, *14*, 323-337. ten Hulscher, T. E. M.; Cornelissen, G. Effect of temperature on sorption equilibrium and sorption kinetics of organic micropollutants - a review. *Chemosphere* **1996**, *32* (4), 609-626. Shariff, R. M.; Shareef, K. M. Thermodynamic adsorption of herbicides on eight agricultural soils. *IJSER* **2011**, *2* (6), 8.
- (17) Cheyns, K.; Martin-Laurent, F.; Bru, D.; Aamand, J.; Vanhaecke, L.; Diels, J.; Merckx, R.; Smolders, E.; Springael, D. Long-term dynamics of the atrazine mineralization potential in surface and subsurface soil in an agricultural field as a response to atrazine applications. *Chemosphere* **2012**, *86*, 1028-1034. Krutz, L. J.; Shaner, D. L.; Weaver, M. A.; Webb, R. M. T.; Zablotowicz, R. M.; Reddy, K. N.; Huang, Y.; Thomson, S. J. Agronomic and environmental implications of enhanced s-triazine degradation. *Pest. Manag. Sci.* **2010**, *66*, 461-481. Vanderheyden, V.; Debongnie, P.; Pussemier, L. Accelerated degradation and mineralization of atrazine in surface and subsurface soil materials. *Pest. Sci.* **1997**, *49*, 237-242.
- (18) Guillou, A.; Videloup, C.; Leroux, C.; Bertin, H.; Philibert, M.; Baudin, I.; Bruchet, A.; Esperanza, M. Occurrence and fate of 27 triazines and metabolites within French drinking water treatment plants. *Water Supply* **2019**, *19* (2), 463-471.
- (19) Hall, J. K.; Murray, M. R.; Hartwig, N. L. Herbicide leaching and distribution in tilled and untilled soil. *J. Environ. Qual.* **1989**, *18*, 439-445. Torrentó, C.; Prasuhn, V.; Spiess, E.; Ponsin, V.; Melsbach, A.; Lihl, C.; Glauser, G.; Hofstetter, T. B.; Elsner, M.; Hunkeler, D. Adsorbing vs. nonadsorbing tracers for assessing pesticide transport in arable soils. *Vadose Zone J* **2017**, *17*.
- (20) Tindall, J. A.; Vencill, W. K. Transport of atrazine, 2,4-D, and dicamba through preferential flowpaths in an unsaturated claypan soil near Centralia, Missouri. *Journal of Hydrology* **1995**, *166*, 37-59.
- (21) Bergström, L.; Börjesson, E.; Stenström, J. Laboratory and lysimeter studies of glyphosate and aminomethylphosphonic acid in a sand and a clay soil. *J. Environ. Qual.* **2011**, *40*, 98-108. Fomsgaard, I. S.; Spliid, N. H.; Felding, G. Leaching of pesticides through normal-tillage and low-tillage soil - a lysimeter study. II: Glyphosate. *Journal of Environmental Science and Health* **2003**, *B38* (1), 19-35.
- (22) Aller, L.; Bennett, T.; Lehr, J. H.; Petty, R. DRASTIC: a system to evaluate the pollution potential of hydrogeologic settings by pesticides. *ACS Symposium Series* **1986**, *315*, 141-158.

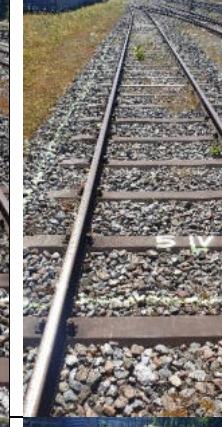
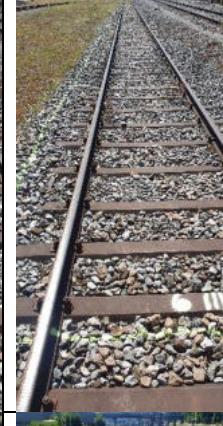
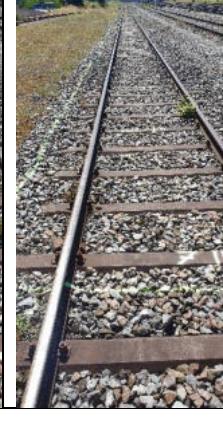
- (23) Duke, S. O. The history and current status of glyphosate. *Pest. Manag. Sci.* **2018**, *74*, 1027-1034.
- (24) European Food Safety Authority. Conclusion regarding the peer review of the pesticide risk assessment of the active substance quizalofop-P. *EFSA Journal* **2009**, *7* (7), 1-216.
- (25) European Food Safety Authority. Peer review of the pesticide risk assessment of the active substance pelargonic acid (nonanoic acid). *EFSA Journal* **2021**, *19* (8).
- (26) Damalas, C. A. Review: Herbicide Tank Mixtures: Common Interactions. *Int. J. Agri. Biol.* **2004**, *6* (1), 209-212.
- (27) Kilian, M.; Marienhagen, C. Herbicide combination with pelargonic acid and flazasulfuron. Denmark DK/EP 3245873, 2019.
- (28) Barnwell, P.; Cobb, A. H. Graminicide Antagonism by Broadleaf Weed Herbicides. *Pestic. Sci.* **1994**, *41*, 77-85. Webster, E. P.; Rustom, S. Y. J.; McKnight, B. M.; Blouin, D. C.; Teló, G. M. Quizalofop-p-ethyl mixed with synthetic auxin and ACCase-inhibiting herbicides for weed management in rice production. *International Journal of Agronomy* **2019**.
- (29) Dobrat, W.; Martijn, A. CIPAC Handbook - Physico-chemical Methods for Technical and Formulated Pesticides. Collaborative International Pesticides Analytical Council (CIPAC): 1995; Vol. F, p 472.
- (30) European and Mediterranean Plant Protection Organization. Efficacy evaluation of herbicides - weeds on hard and semi-permeable surfaces. 2009; Vol. PP 1/117 (3).
- (31) European and Mediterranean Plant Protection Organization. Efficacy evaluation of plant protection products - design and analysis of efficacy evaluation trials. *EPPO Bulletin* **2012**, *42* (3), 367-381.
- (32) Henderson, C. F.; Tilton, W. Tests with acaricides against the brown wheat mite. *Journal of Economic Entomology* **1955**, *48* (2), 157-161.
- (33) Pest Management Regulatory Agency Health Canada. Quizalofop-P-ethyl and its associated end-use products. 2022; p 129.
- (34) Stähler Suisse SA. *Chikara 25 WG - Technisches Merkblatt*; 2023.
- (35) Bundesamt für Lebensmittelsicherheit und Veterinärwesen BLV. Weisung für das Einreichen von Gesuchen für das Inverkehrbringen von Pflanzenschutzmitteln in der Schweiz. Zulassungsstelle Pflanzenschutzmittel; Bern, 2023; p 18.
- (36) Moss, S. Herbicide Resistance in Weeds. In *Weed Research Expanding Horizons*, Hatcher, P. E., Froud-Williams, R. J. Eds.; John Wiley & Sons, 2017; pp 181-214.

9 Anhang

Nachfolgend sind Fotos von den Parzellen der Versuche an den verschiedenen Standorten aufgeführt. Die Varianten sind in Zeilen angeordnet. Die Wiederholungen (Whg) in den Spalten. Beachte, dass die Ausgangsverunkrautung in den verschiedenen Parzellen sehr unterschiedlich war.

Bülach – 19.7.22 (28 Tage nach der Behandlung)

| Variante / Whg | I | II | III | IV |
|----------------|---|----|-----|----|
| Kontrolle | | | | |
| Glyphosat | | | | |
| 2,4-D | | | | |

| Variante / Whg | I | II | III | IV |
|-----------------------------------|---|---|--|---|
| 2,4-D + Quizalofop-P- ethyl |  |  |  |  |
| Flazasulfuron |  |  |  |  |
| Pelargonsäure |  |  |  |  |
| Flazasulfuron + Pelargonsäure |  |  |  |  |

Bülach – 29.9.22 (100 Tage nach der Behandlung)

| Variante / Whg | I | II | III | IV |
|----------------|---|---|--|---|
| Kontrolle |  |  |  |  |
| Glyphosat |  |  |  |  |
| 2,4-D |  |  |  |  |

| Variante / Whg | I | II | III | IV |
|-------------------------------|---|----|-----|----|
| 2,4-D + Quizalofop-P-ethyl | | | | |
| Flazasulfuron | | | | |
| Pelargonsäure | | | | |
| Flazasulfuron + Pelargonsäure | | | | |

Limmat – 20.6.22 (32 Tage nach der Behandlung im Bereich mit wenig Humus und 41 Tage nach der Behandlung im Bereich mit viel Humus)

| Variante / Whg | I | II | III | IV |
|----------------|--|---|--|--|
| Kontrolle |  |  |  |  |
| Glyphosat |  |  |  |  |
| 2,4-D |  |  |  |  |

| Variante / Whg | I | II | III | IV |
|-------------------------------|---|----|-----|----|
| 2,4-D + Quizalofop-P-ethyl | | | | |
| Flazasulfuron | | | | |
| Pelargonsäure | | | | |
| Flazasulfuron + Pelargonsäure | | | | |

Limmattal – 21.9.22 (125 Tage nach der Behandlung im Bereich mit wenig Humus und 134 Tage nach der Behandlung im Bereich mit viel Humus)

| Variante / Whg | I | II | III | IV |
|----------------|---|----|-----|----|
| Kontrolle | | | | |
| Glyphosat | | | | |
| 2,4-D | | | | |

| Variante / Whg | I | II | III | IV |
|-----------------------------------|---|----|-----|----|
| 2,4-D + Quizalofop-P- ethyl | | | | |
| Flazasulfuron | | | | |
| Pelargonsäure | | | | |
| Flazasulfuron + Pelargonsäure | | | | |

Burghalden – 10.8.22 (61 Tage nach der ersten Behandlung im Frühjahr, bzw. 21 Tage nach der dritten Behandlung in der Variante Sole)

| Variante / Whg | I | II | III | IV |
|----------------|---|----|-----|----|
| Kontrolle | | | | |
| 2,4-D | | | | |
| Flazasulfuron | | | | |

| Variante / Whg | I | II | III | IV |
|-------------------------------|---|---|--|---|
| Pelargonsäure |  |  |  |  |
| Flazasulfuron + Pelargonsäure |  |  |  |  |
| Sole |  |  |  |  |

Döttingen – 19.8.22 (63 Tage nach der ersten Behandlung im Frühjahr; 23 Tage nach der dritten Behandlung in der Variante Sole) (I, II)

Liebefeld – 30.8.22 (62 Tage nach der ersten Behandlung im Frühjahr; 19 Tage nach der dritten Behandlung in der Variante Sole) (III, IV)

| Variante / Whg | I | II | III | IV |
|----------------|---|----|-----|----|
| Kontrolle | | | | |
| 2,4-D | | | | |
| Flazasulfuron | | | | |

| Variante / Whg | I | II | III | IV |
|-------------------------------|---|---|--|---|
| Pelargonsäure |  |  |  |  |
| Flazasulfuron + Pelargonsäure |  |  |  |  |
| Sole |  |  |  |  |

(6/II: andere Richtung)