

Schadstoffrückhalt von Substraten für Pflanzgruben, Fugenpflaster und für die Behandlung von Strassenabwasser

Ergebnisse zu Substraten der Stadt Zürich und Basel-Stadt

Schlussbericht



Rapperswil, 17. September 2024

Impressum

Auftraggeber

- Entsorgung und Recycling - Stadt Zürich (ERZ)
- Grün Stadt Zürich (GSZ)
- Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft – Kanton Zürich (AWEL)
- Tiefbauamt – Kanton Zürich (TBA)
- Amt für Umwelt und Energie (AUE) – Kanton Basel-Stadt
- Bau- und Verkehrsdepartement des Kantons Basel-Stadt, Stadtgärtnerei Grünplanung

Auftragnehmer

OST – Ostschweizer Fachhochschule
Institut für Umwelt- und Verfahrenstechnik (UMTEC),
Oberseestrasse 10, 8640 Rapperswil, Schweiz

Autoren

Michael Patrick, Michael Burkhardt

Kontakt: michael.burkhardt@ost.ch

Danksagung

Das Projekt wurde gefördert und unterstützt durch GSZ Grün Stadt Zürich, ERZ Entsorgung + Recycling Zürich, das AWEL Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft (Abteilung Gewässerschutz und Gewässerschutzlabor), das TBA Tiefbauamt des Kantons Zürich, das AUE Amt für Umwelt und Energie Basel-Stadt und die Stadtgärtnerei des Kantons Basel-Stadt. Wir bedanken uns auch für das Co-Referat von WST21.

Zitiervorschlag

Patrick, M., Burkhardt, M. (2024): Schadstoffrückhalt von Substraten für Pflanzgruben, Fugenpflaster und die Behandlung von Strassenabwasser. Schlussbericht im Auftrag von ERZ, GSZ, AWEL, TBA, AUE und Stadtgärtnerei BS, Ostschweizer Fachhochschule, Institut für Umwelt- und Verfahrenstechnik (UMTEC), Rapperswil.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	III
1 Einleitung.....	1
2 Ziele.....	3
3 Substrate	3
3.1 Pflanzsubstrate	3
3.2 Substrate zur Strassenabwasserbehandlung	4
3.3 Fugen und Pflanzsubstrate aus dem Kanton Basel-Stadt.....	6
4 Vorgehen	7
4.1 Probenvorbereitung für Baumsubstrate.....	7
4.2 Elementgehalte	8
4.3 Elutionsverhalten.....	8
4.4 Batchtest.....	9
4.5 Schüttdichte und Wasserhaltekapazität.....	9
4.6 Säulenversuch	10
4.7 Schachtversuch.....	11
4.7.1 Aufbau	11
4.7.2 Durchführung.....	12
4.7.3 Vorkonditionierung und Tastversuch.....	14
5 Ergebnisse und Diskussion	14
5.1 Spezifische Sickerleistung der Substrate	14
5.2 Elementgehalte der Baumsubstrate	15
5.3 Eluierbare Stoffe in Baumsubstraten	15
5.4 Adsorptionsverhalten in Baumsubstraten	16
5.5 Beladungskapazität und Standzeit	17
5.6 VSA-Säulenversuch	19
5.6.1 Baumsubstrate	19
5.6.2 Substrate zur Strassenabwasserbehandlung	21
5.6.3 Basler Pflanz- und Fugensubstrate	23
5.6.4 Vergleich von allen Substraten	25
5.6.5 Adsorbenssubstrate für Regenwasserbehandlungsanlagen	26
5.7 Schachtversuch.....	27
5.7.1 Konzentrationsverlauf und Stoffrückhalt	27
5.7.2 Remobilisierung.....	29

5.7.3	Schachtversuch vs. Adsorberanlagen.....	30
5.7.4	Schacht- vs. Säulenversuch.....	30
6	Schlussfolgerungen.....	31
7	Literatur	34
8	Anhang.....	35

Zusammenfassung

Im städtischen Raum werden zunehmend Schwammstadt-Elemente eingesetzt, um die Folgen von Hitze- und Trockenperioden sowie Starkregen zu minimieren, den Bäumen bessere Aufwuchsbedingungen zu verschaffen und die Aufenthaltsqualität zu erhöhen. Aufgrund begrenzter Flächen und starker Urbanisierung fehlen oft natürliche Böden. Daher werden in Pflanzgruben und wasserdurchlässigen Pflasterbelägen spezielle Substrate eingesetzt. Diese sind vorrangig auf hohe Sickerfähigkeit, Strukturstabilität, Tragfähigkeit und gute Wachstumsbedingungen ausgelegt und berücksichtigen nicht primär den Rückhalt von Schadstoffen, was Bedenken hinsichtlich des Grundwasserschutzes aufwirft. Gemäss dem Gewässerschutzgesetz ist die Einbringung von Stoffen, die Wasser verunreinigen können, in ein Gewässer oder deren Versickerung untersagt.

Für sieben Fugen- und Pflanzsubstrate sowie vier Substrate aus dem Bereich der Strassenabwasserbehandlung aus Zürich und Basel-Stadt wurden mit VSA-Säulenversuchen der Schadstoffrückhalt (Kupfer, Zink, Diuron, Mecoprop) und die Remobilisierung durch Tausalz erfasst und die Eignung zur Versickerung von belastetem Niederschlagswasser grob abgeschätzt. Im Anschluss wurden drei Pflanzsubstrate aus Zürich massstabtreu in einer für Baumrigolen typischen Profilabfolge eingebaut und mit einer Beregnungs- und Stoffmenge (GUS als Quarzmehl, Kupfer, Zink, Diuron, Mecoprop) bezogen auf ein Verhältnis der Entwässerungs-/Versickerungsfläche von 17:1 beaufschlagt. Der Stoffrückhalt sowie die Remobilisierung wurden bilanziert. Die Versuchsdurchführung (Prüfregen, Stoffmengen) erfolgte in Anlehnung an den im VSA-Merkblatt für Adsorberanlagen beschriebenen simulierten Feldtest.

Die Fugen- und Pflanzsubstrate wiesen im Säulenversuch (wassergesättigt) bei drei unterschiedlichen Filtergeschwindigkeiten (ca. 9.0, 2.2, 0.9 m/h) einen relativ hohen Rückhalt für Schwermetalle auf (40 bis 90 % bei 0.9 m/h), der aber tendenziell niedriger lag als für Substrate zur Strassenabwasserbehandlung (SABA; > 70 % bei 0.9 m/h). Alle Substrate ergaben einen geringen Rückhalt für die Mikroverunreinigungen (< 25 %). Die vier gelösten Stoffe wurden generell von allen Substraten stoffspezifisch und in Abhängigkeit zur Kontaktzeit (Fliessgeschwindigkeit) gebunden. Je langsamer das Wasser durch das Substrat strömt, desto besser ist der Rückhalt. In Materialien mit sehr geringer spezifischer Sickerleistung war deshalb der Stoffrückhalt höher. Beim Einsatz im Strassenraum sind für alle Substratarten geringere Filtergeschwindigkeiten zu erwarten als in den Säulenversuchen, sodass unter realen Bedingungen ein höherer Schadstoffrückhalt anzunehmen ist. Die konditionierte Pflanzenkohle und die Land-/Schwarzerden haben positiven Einfluss auf die Stoffbindung. Der Bindungsmechanismus muss jedoch noch weiter erforscht werden. In bewachsenen SABAs mit Sand oder Boden baut sich im Laufe der Zeit eine Deckschicht auf (Schlamm, Pflanzenreste), die die Filterwirkung und die Adsorption der Schadstoffe verbessert. Die Filterschicht der SABA-Bülach war noch relativ dünn (2–3 cm) und damit eher wenig wirksam für die Adsorption. Die Remobilisierung der Stoffe durch Tausalz lag durchwegs unter 1 %.

Die Untersuchung der Zürcher Substrate auf Pilotskala zeigte über den Profilaufbau für alle untersuchten Substanzen (GUS, Schwermetalle, Mikroverunreinigungen) einen hohen Rückhalt (> 85 %), wobei dieser bereits an der Schichtgrenze in 0.9 m Tiefe erreicht wurde. Unter den gewählten Testbedingungen konnte folglich eine Verlagerung der do-

sierten Stoffe in das Substrat B bzw. das Sickerwasser des Gesamtaufbaus nicht beobachtet werden. Auch in der Schachtrigole lag die Remobilisierung der applizierten Stoffe durch Tausalz bei weniger als 1 %. Eine vertiefte Datenanalyse zeigt, dass die Ergebnisse zum Stoffrückhalt und zur Remobilisierung konsistent und vor dem Hintergrund der Ergebnisse aus den Säulenversuchen plausibel sind. Unter Berücksichtigung der Profilmächtigkeit sollte die Beladungskapazität eine lange Standzeit erwarten lassen.

Mit den vorliegenden Resultaten wurden die relevanten Grundlagen für die Beurteilung der Zulässigkeit des Zürcher Substrataufbaus im Gewässerschutzbereich *Au* gelegt. Der getestete Zürcher Substrataufbau für Baumgruben ist nach heutigem Kenntnisstand voraussichtlich geeignet, eingetragene Schadstoffe, insbesondere GUS und Schwermetalle, aus Platz- und Strassenabwasser der VSA-Belastungsklasse «gering» und «mittel» zurückzuhalten, ohne dass diese ins Grundwasser gelangen. Es wird dabei vorausgesetzt, dass ein ausreichend hoher Grundwasserflurabstand zur Baumgrubensohle bei Hochwasser (> 1 m) gewährleistet ist. Der Einsatz des untersuchten Substrataufbaus bei hoch belastetem Platz- und Strassenabwässern wird vorsorglich nicht empfohlen, da sowohl die Erfahrungen aus Pilotanlagen von Standorten mit geringer und mittlerer Belastung abgewartet (Monitoring) als auch Tests mit kombinierten Adsorbentien oder Oberboden vorgesehen werden müssen.

Die untersuchten Pflasterfugensubstrate eignen sich ebenfalls für eine geringe und mittlere Belastung. Dabei ist zu berücksichtigen, dass das Platzwasser am Ort des Anfalls versickert und somit weder zusätzliches Niederschlagswasser noch zusätzliche Stoffmengen auf die Belagsfläche gelangen.

Der VSA-Säulenversuch stellt einen geeigneten Test dar, um im Labormassstab den Schadstoffrückhalt von Substraten unter reproduzierbaren Bedingungen abzuschätzen. Ein direkter Vergleich mit Substraten in Baumrigolen ist jedoch aufgrund der unterschiedlichen hydraulischen Bedingungen nur eingeschränkt möglich. Die Kombination aus Batch-, Säulen- und Schachtversuch ist ein vielversprechender Ansatz zur Abschätzung des Schadstoffrückhalts von Substraten und geschichteten Aufbauten.

Die Übertragbarkeit der Laborergebnisse auf die reale Situation ist nur begrenzt möglich. Die durchgeführten Versuche fokussieren auf den Rückhalt von gelösten Schadstoffen. Im Strassenraum sind weitere Prozesse wie die Bildung einer Deckschicht oder das Vorhandensein partikulärer Schadstoffe zu berücksichtigen, die den Schadstoffrückhalt erfahrungsgemäss positiv beeinflussen können. Allerdings können partikuläre Belastungen auch zu einem Kolmationsrisiko führen, das die Betriebssicherheit einschränken kann. Dies gilt insbesondere für nicht durchwuzelte Deckschichten.

Unabhängig davon ist zu klären, ob sich Baumrigolen mit derartigen Substraten überhaupt für die Einleitung von höher belastetem Strassenabwasser ohne Vorreinigung eignen. Diese Klärung ist auch vor dem Hintergrund der Standzeit, der Rückhaltekapazität von Pflanzsubstraten über die Zeit sowie der Schadstoffanreicherung über die Profiltiefe der Baumgrube zu treffen. In diesem Zusammenhang sind auch Optimierungen hinsichtlich der Schichtabfolge und der Mächtigkeit der Substrate denkbar.

1 Einleitung

Im städtischen Raum dienen Schwammstadt-Elemente dazu, die Folgen von Hitze- und Trockenperioden sowie Starkregen zu minimieren, die Aufenthaltsqualität zu erhöhen und Niederschlagswasser zu reinigen (Burkhardt et al., 2022). Aufgrund begrenzter Flächen und starker Urbanisierung fehlen oft natürliche Böden. Substrate, Sand oder Böden werden daher in Pflanzgruben, wasserdurchlässigen Pflasterbelägen, Strassenabwasserbehandlungsanlagen (SABA) und dezentralen Adsorberanlagen eingesetzt. Eine wesentliche Kenngrösse aller Materialien stellt die hohe gesättigte Wasserleitfähigkeit dar.

Pflanzsubstrate bestehen in der Regel aus mineralischen Gerüstmaterialien und organischen Komponenten (z.B. Kompost) und sind vorrangig auf Strukturstabilität und Tragfähigkeit ausgelegt. Verbreitet ist auch die Verwendung von rezyklierten Bestandteilen. Diese Substrate bieten den Pflanzen einen Wurzelraum mit ausreichendem Gasaustausch, halten Niederschlagswasser einerseits zurück und leiten es andererseits durch die Grobporen rasch ab. In Pflanzgruben erfolgt der Einbau der grobkörnigen, strukturstabilen Pflanzsubstrate meistens schichtweise und verdichtet (Abbildung 1).

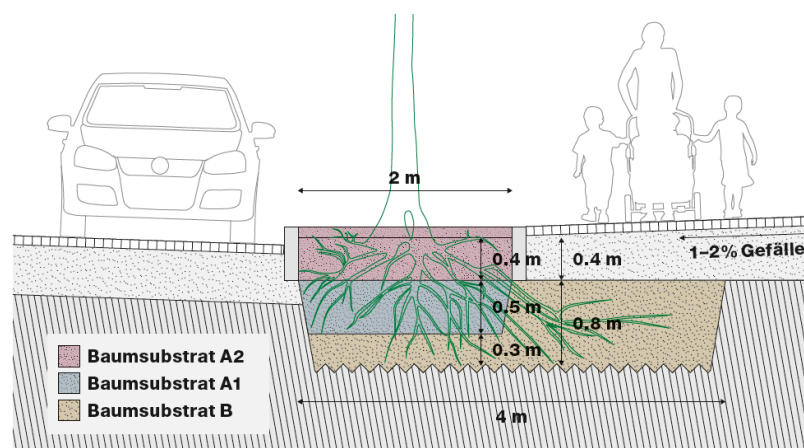


Abbildung 1: Gestaltung einer Baumgrube in der Stadt Zürich (GSZ, 2023).

Fugensubstrate für Pflasterbeläge dienen der Stabilisierung der Belagsfläche sowie der Sicherstellung der Wasserdurchlässigkeit. Gelegentlich werden sie zudem zum Schadstoffrückhalt eingesetzt und dafür auch mit Adsorbermaterialien oder Boden kombiniert. Für Bewuchs sind die Fugensubstrate meistens nicht ausgerichtet, jedoch gibt es Materialmischungen mit Ansaatbegrünung.

Neben den klassischen natürlichen SABAs sind mittlerweile auch schilfbewachsene Sandfilter weit verbreitet (BAFU / ASTRA, 2021). Sand wird als hydraulisch durchlässige Schicht eingesetzt, welche eher wenig Adsorptionsvermögen für Schadstoffe aufweist. Im Laufe der Zeit bildet sich auf dem Sand jedoch eine Deckschicht aus Schlamm und Pflanzenmaterial (z. B. Schilf). Diese Deckschicht entsteht meist innerhalb von Monaten und hat eine hohe adsorptive Wirkung, die zur Sekundärfiltration und zum Schadstoffrückhalt beiträgt. Klassische Bodenfilter werden heute seltener empfohlen.

Adsorbersubstrate für Regenwasserbehandlungsanlagen sind Einzelmaterialien oder Mischungen, die auf den Schadstoffrückhalt ausgerichtet sind. Diese Materialien weisen eine hohe Affinität zu gelösten Schadstoffen auf und dienen nicht als Pflanzenstandort.

Im Platz- und Strassenabwasser kommen gelöste und partikuläre Stoffe vor. Die partikulären Belastungen (gesamte ungelöste Stofffraktion, GUS) umfassen beispielsweise Reifen-, Brems- oder Belagsabrieb sowie Schwermetalle wie Zink und Kupfer. Zu den gelösten Stoffen zählen wiederum Zink und Kupfer, sowie organische Mikroverunreinigungen wie 6PPD-Quinon und Benzothiazol. Die Relevanz von GUS und Schwermetallen im Platz- und Strassenabwasser ist weithin bekannt, jedoch bestehen noch offene Fragen zur Bedeutung von Mikroverunreinigungen.

Aus Untersuchungen von SABAs ist bekannt, dass sich eine Deckschicht auf Substraten aufbaut, die die Partikel und Schwermetalle gut zurückhält. Dies ist darauf zurückzuführen, dass mehr als 50 % der Schwermetalle an Partikeln gebunden vorliegen und daher mechanisch zurückgehalten werden. Der hohe organische Anteil sorgt zudem für eine ausgeprägte adsorptive Wirkung. Ob sich auch in Baumrigolen eine entsprechende Deckschicht aufbaut, ist noch unklar.

Auch sind Kenntnisse zum Schadstoffrückhalt von Pflanz- und Fugensubstraten lückenhaft oder fehlen gänzlich. Zudem sind diese Substrate nicht primär für den Rückhalt von Schadstoffen ausgelegt. Aus diesem Grund dürfen sie nicht für eine Behandlung von Niederschlagswasser verwendet werden.¹

Im vorliegenden Projekt wurde das Konzept der VSA-Leistungsprüfung für Pflanz- und Fugensubstrate genutzt, um den Rückhalt und die Remobilisierung von Schadstoffen zu ermitteln und mit Substraten aus SABAs zu vergleichen. Die Basis waren Säulenversuche, die durch weitere Laborversuche ergänzt wurden (VSA, 2023). Der simulierte Feldtest wurde zudem für eine aufgebaute Schachtrigole eingesetzt². Ermittelt wurden der Rückhalt von zwei Schwermetallen (Kupfer, Zink) und zwei Mikroverunreinigungen (Diuron, Mecoprop) sowie die Remobilisierung durch Tausalz, im Feldtest zusätzlich der Rückhalt von GUS.

Kupfer und Zink treten in Strassenabwasser regelmässig auf. Gelöstes Kupfer fällt ab ca. pH 8 aus und ist daher weniger mobil als Zink. Mecoprop und Diuron werden als Pflanzenschutzmittel und Biozide (z.B. in Fassadenfarben) eingesetzt, treten häufig in urbanen Regenwasserabflüssen und Oberflächengewässern auf, und sind vergleichsweise stabil und gut analysierbar. Mecopro ist als polare Substanz mobil und bindet schlecht am Boden, während Diuron als unpolare Substanz deutlich besser adsorbiert. Beide Stoffe wurden aufgrund ihrer physikochemischen Eigenschaften als Leitsubstanzen für Mikroverunreinigungen mit vergleichbaren Eigenschaften eingesetzt.

¹ Art. 6 GSchG: Es ist untersagt, Stoffe, die Wasser verunreinigen können, mittelbar oder unmittelbar in ein Gewässer einzubringen oder sie versickern zu lassen (Abs. 1).

² <https://vsa.ch/fachbereiche-cc/siedlungsentwaesserung/regenwetter/adsorber/>

2 Ziele

Die Untersuchungen sollen:

- Erkenntnisse schaffen, um den Rückhalt und die Remobilisierung gelöster Schadstoffe in Pflanz- und Fugensubstraten zu beurteilen.
- Einen Vergleich zwischen Substraten ermöglichen, wie sie in den Kantonen Zürich und Basel verwendet werden.
- Eine Einschätzung geben, wie die Zulässigkeit der Versickerung von belastetem Niederschlagsabwasser über Baumgruben zu beurteilen ist.
- Ein einheitliches, strukturiertes Vorgehen zum Nachweis der Reinigungsleistung von Substraten und Substrataufbauten ermöglichen.

Mit den Untersuchungen werden wesentliche Grundlagen für eine Bewertung von Substraten gelegt, um deren gewässerschutzrechtliche Einordnung fundiert abzustützen.

Die Zielsetzung war nicht darauf ausgerichtet, die Standzeit von Baumgruben in Abhängigkeit von der Beladungskapazität oder dem hydraulischem Langzeitverhalten zu eruiieren. Aus Untersuchungen zu Sand- und Bodenfiltern ist jedoch bereits bekannt, dass die ungelösten Stoffe auf der Oberfläche akkumulieren und eine Deckschicht bilden, welcher die Standzeit für den Stoffrückhalt solcher Anlagen erheblich verlängern kann.

3 Substrate

3.1 Pflanzsubstrate

In der Stadt Zürich werden zwei nichtüberbaubare Baumsubstrate (A1, A2) sowie ein überbaubares (B) eingesetzt (Abbildung 2). Die unterste Schicht (B, 0.3 m Mächtigkeit) dient den Bäumen als potenzieller Wurzelkorridor. Darüber folgen Baumsubstrat A1 (0.5 m) und A2 (0.4 m). Der Aufbau einer typischen Baumgrube ist in Abbildung 1 dargestellt.

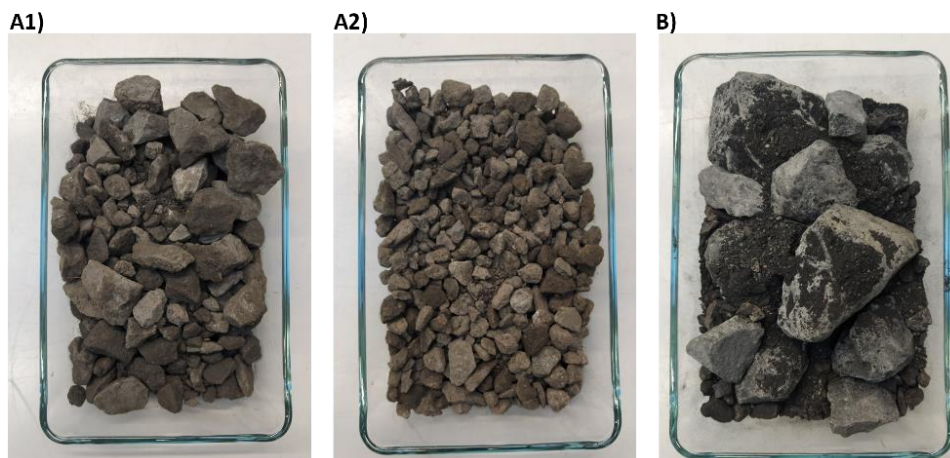


Abbildung 2: Zürcher Baumsubstrate A1, A2 und B für Baumgruben.

Die Substrate wurden entwickelt, um optimale Eigenschaften für das Baumwachstum, die Wasserinfiltration und -retention zu gewährleisten. Sie stellen eine Mischung aus Mischgestein/-schotter, Blähschiefer, Bruchsand, Pflanzenkohle (Qualität EBC-AgroBio,

mit Komposttee aufgeladen) und sogenannte Land- oder Schwarzerde³ dar (Tabelle 1). Für die Untersuchungen wurden die Materialien von Grün Stadt Zürich bereitgestellt.

Eine tragfähige Struktur wird durch die mineralische Sand-, Schotter- und Steinfraktion gewährleistet. Der Blähschiefer und die Pflanzenkohle sollen die Wasserhaltekapazität und Nährstoffzufuhr für die Bäume verbessern. Darüber hinaus sollen die Land- und Schwarzerde, allenfalls die konditionierte Pflanzenkohle, Schadstoffe binden.

Die Substrate A1 und A2 unterscheiden sich in der Grösse des Schotters (Tabelle 1). Das überbaubare Substrat B weist einen hohen Anteil an Steinen (> 32 mm), Schwarzerde sowie Pflanzenkohle auf. Das «Prüfsubstrat B» entspricht dem Substrat B ohne Steinanteil (> 32 mm) (Tabelle 1) (Kap. 4.6).

Tabelle 1: Zusammensetzungen (Masse-%) der drei Baumsubstrate von Zürich (GSZ, 2023). Landerde: A-Horizont (Oberboden) mit Anteil organischer Substanz < 5.0 %; Schwarzerde: Kompostrotte mit EBC-Pflanzenkohle, die mehrere Wochen miteinander gereift ist.

Material	Substrat A1	Substrat A2	Substrat B	Prüfsubstrat B
Mischgestein 64/125	-	-	30 %	-
Mischgestein 32/64	-	-	30 %	-
Mischgesteinsschotter 16/32	40 %	-	-	-
Mischgesteinsschotter 8/16	-	45 %	-	-
Bruchsand 1/4	10 %	5 %	10 %	25 %
Blähschiefer 8/16	25 %	30 %	15 %	38 %
EBC-Pflanzenkohle, Komposttee	5 %	5 %	10 %	25 %
Landerde	10 %	15 %	-	-
Schwarzerde	-	-	5 %	12 %

3.2 Substrate zur Strassenabwasserbehandlung

An vier Standorten im Kanton Zürich wurden Substrate beprobt, an denen Strassenabwässer versickert und behandelt werden. Dabei handelt es sich um Materialien aus zwei SABAs, einem Autobahnbankett und einem Bodenfilter mit Mulden-Rigolen-System (Abbildung 3).

- SABA Bülach West (SABA-Bülach, Koordinaten 2681866 / 1263426): Die SABA (Baujahr 2018) besteht aus zwei Filterbecken (mit Schilf bepflanzte Sandfilter), einem vorgeschalteten Absetzbecken mit Ölabscheider und einer Pumpstation. Die Anlage entwässert eine Strasse mit einem täglichen Verkehrsaufkommen von 34'000 DTV (Belastungsklasse «hoch»). Die Sickerleistung des Sand-/Kiesfilters wird im Betriebshandbuch mit 2 bis 5 L/(min·m²) angegeben. Beprobt wurde die oberste Schicht des Sand-/Kiesfilters einschliesslich der Deckschicht (2 bis 3 cm)
- SABA Forch 5 Egg (SABA-Egg, Koordinaten 2695579 / 1239432): Die SABA (Baujahr 2008) besteht aus einem Absetz- und Havariebecken mit Ölabscheider sowie einem Retentionsfilterbecken mit Ober- und Unterboden. Beim Einlaufbereich im Bodenfilter ist Röhricht gepflanzt. Die Anlage entwässert eine Strasse

³ Landerde: A-Horizont (Oberboden) mit Anteil organischer Substanz < 5.0%.
Schwarzerde: Kompostrotte mit EBC-Pflanzenkohle, die mehrere Wochen miteinander gereift ist.

mit einem durchschnittlichen Verkehrsaufkommen von 18'000 DTV (Belastungskategorie «hoch»). Beprobte wurde der Oberboden.

- Autobahnbankett Bülach Süd (Bankett Bülach-Süd, Koordinaten 2681915 / 1263232): Bankett mit Kies-/Sand-Gemisch und erhöhtem Mittelsandanteil (Baujahr 2019). Entwässert nur Spritzwasser, das restliche Strassenabwasser läuft über eine SABA an der Autobahnausfahrt Bülach-Süd. Das durchschnittliche Verkehrsaufkommen beträgt 34'000 Fahrzeuge (Belastungskategorie «hoch»). Beprobte wurde das Kies-/Sand-Gemisch.
- Bodenfilter Mulden-Rigolen-System in Wädenswil (Mulden-Rigolen Wädenswil, Koordinaten 2689791 / 1234097): Die Anlage befindet sich direkt neben der Fahrbahn der Kantonsstrasse in Wädenswil (Baujahr 2015) mit einem Verkehrsaufkommen von 8'000 DTV (Belastungskategorie «mittel»). Die Wasserdurchlässigkeit des Substrats soll zum Einbaupunktzeitpunkt 5 bis 7 L/(min·m²) betragen haben. Beprobte wurde das Oberboden-Sandgemisch aus dem Mulden-Rigolen-System.

Bei den SABAs und dem Bodenfilter wurden ungestörte Proben für den VSA-Säulenversuch entnommen. Die Probenahme erfolgte mit Edelstahlzylinder und integriertem Plexiglasrohr. Durch Dreh- und Schlagbewegungen wurde der Stechzylinder eingedrückt. Im Bankettbereich der Autobahnausfahrt Bülach-Süd konnte nur eine gestörte Probe entnommen werden.

An allen vier Standorten wurden zusätzlich mit einem Pürckhauer-Stechbohrer Materialproben zur Bestimmung der aktuellen Bodenfeuchte und ca. 10 L Material für weitere Untersuchungen und als Rückstellproben entnommen.

Die spezifische Sickerleistung der obersten Schicht wurde mittels Doppelring-Infiltrometer bestimmt. Falls vorhanden, wurde zunächst die Vegetation entfernt.

Die Verkehrsdaten (DTV) stammen vom Tiefbauamt des Kantons Zürich⁴.

SABA Bülach



SABA Egg (Bodenpassage)



Mulden-Rigolen-System



Bankettbereich Autobahn



Abbildung 3: Beprobte Standorte entlang von vier Strassen: SABA Bülach, SABA Egg, Mulden-Rigolen-System Wädenswil und Bankett an der Ausfahrt Bülach-Süd.

⁴ <https://www.zh.ch/de/mobilitaet/gesamtverkehrsplanung/verkehrsgrundlagen/verkehrsdaten.html>

3.3 Fugen und Pflanzsubstrate aus dem Kanton Basel-Stadt

In Zusammenarbeit mit dem Amt für Umwelt und Energie (AUE) und der Stadtgärtnerei des Kantons Basel-Stadt wurden je zwei Pflanz- (Radix plus®) und zwei Fugensubstrate untersucht, die für Pflanzgruben und Parkplatzbeläge eingesetzt werden (Abbildung 4):

- Basler Baumsubstrat «Radix plus ohne»: Überbaubar, 0 bis 32 mm, ohne Pflanzenkohle.
- Basler Baumsubstrat «Radix plus mit»: Überbaubar, 0 bis 32 mm, mit kompostierter Pflanzenkohle.
- Fugensubstrat «Oberboden-Splittmischung»: Mischung aus Oberboden (17 Masse-%), Splitt 4-8 (82 Masse-%) und gesiebter Komposterde 0-8 (1.0 Masse-%)
- Fugensubstrat «Splitt-Sandmischung»: Splitt 4-8 (82 Masse-%) und Sand (18 Masse-%)

Die Pflanzsubstrate wurden entwickelt, um optimale Eigenschaften für das Baumwachstum, die Wasserretention und Tragfähigkeit (überbaubar) zu gewährleisten, und stellen eine Mischung aus Splitt, Sand, Blähton, Oberboden, Komposterde und teils Pflanzenkohle dar. Die Beimischung von Granitsplitt und Sand gewährleistet eine stabile Struktur. Die übrigen Bestandteile optimieren die Wasserhaltekapazität und Nährstoffzufuhr für die Pflanzen, während sie gleichzeitig die Fähigkeit zum Bindungsaufbau fördern. Die beiden Radix-plus-Substrate unterscheiden sich lediglich in der Zugabe von Pflanzenkohle (Komposterde ohne Pflanzenkohle bzw. mit 50 Vol.-% Pflanzenkohle).

Die Oberboden-Splittmischung weist organische Komponenten auf, durch die die Entwicklung der Ansaat in den Fugen begünstigt wird und möglicherweise gelöst eingetragene Schadstoffe besser gebunden werden als im rein mineralischen Skelettgemisch. Die Splitt-Sandmischung ist rein mineralisch, leitet daher Regenwasser rasch ab.

Die Substrate wurden für die Untersuchungen von der Stadtgärtnerei des Kantons Basel-Stadt bereitgestellt (Patrick et al., 2024).

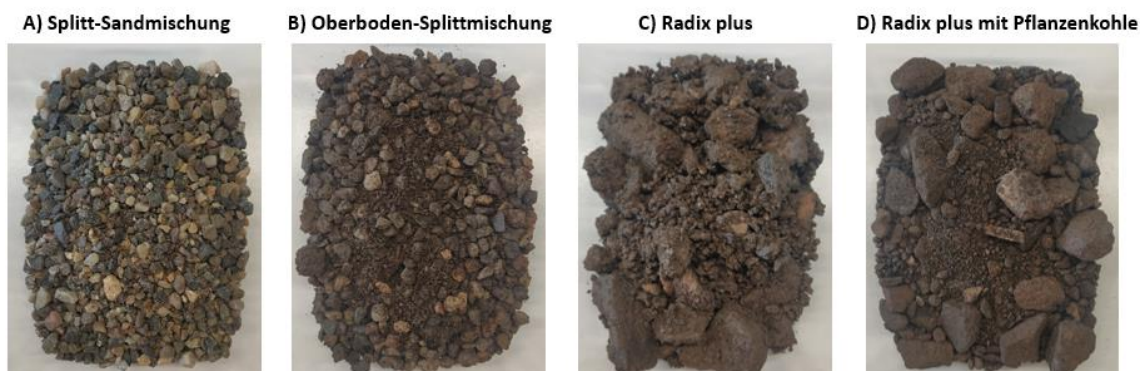


Abbildung 4: Untersuchte Fugen- (Splitt-Sandmischung, Oberboden-Splittmischung) und Pflanzsubstrate (Radix plus mit und ohne Pflanzenkohle).

4 Vorgehen

Folgende Versuche wurden durchgeführt, wobei die Charakterisierung der Baumsubstrate und Batchtests nur für die Zürcher Substrate durchgeführt wurde:

Sickerleistung der Substrate zur Strassenabwasserbehandlung

- Mittels Doppelring-Infiltrometer wurde die spezifische Sickerleistung der obersten Schicht in-situ bestimmt.

Charakterisierung Baumsubstrate

- Elementgehalt: Quantifizierung der möglichen anorganischen Schadstoffe (anthropogen, geogen) durch einen chemischen Aufschluss gefolgt von einer Elementaranalyse.
- Elutionsverhalten: Quantifizierung wasserlöslicher Nährstoffe, Elemente und Pflanzenschutzmittel nach 24-stündiger Elution.
- Schüttdichte und Wasserhaltekapazität: Packungsdichte der Kornfraktionen und der Rückhalt von Wasser gegen die Schwerkraft.

Schadstoffrückhalt

- VSA-Säulenversuch: Bestimmung der Rückhalteleistung von vier gelösten Schadstoffen für 11 Substrate und Beurteilung der Rückhalteleistung. Der Versuch wurde mit allen Substraten durchgeführt.
- Batchtest: Ermittlung des Adsorptionsverhaltens und Beladungskapazität (Adsorptionsisothermen) von drei Zürcher Baumsubstraten.
- Schachtversuch: Bestimmung der Rückhalteleistung von vier gelösten Schadstoffen und GUS (Quarzmehl Millisil W4) sowie deren Remobilisierung durch den realen Substrataufbau einer Baumrigole mit drei Zürcher Substraten.

Die chemischen Analysen wurden vom Gewässerschutzlabor des Amts für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL) oder durch das Labor Bachema durchgeführt.

4.1 Probenvorbereitung für Baumsubstrate

In den Laborversuchen wurden alle Substrate im angelieferten Zustand verwendet (Abbildung 5). Für die drei Zürcher Substrate sind die Substratfraktionen und der Glühverlust (%) in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2: Substratfraktionen in TS (%) und Glühverlust (%), Fraktion < 2 mm) in den untersuchten Substratfraktionen der drei Zürcher Baumsubstrate A1, A2 und B2.

	Substratfraktionen in TS (%)			Glühverlust (%)
	< 2 mm	2 - 32 mm	> 32 mm	< 2 mm
A1	9	71	20	9
A2	12	88	0	11
B	10	9	81	20

Eine Besonderheit verbindet sich mit dem Zürcher Substrat B, dass einen hohen Steinanteil (> 32 mm) aufweist. Für die Bestimmung der Elementgehalte, des Elutionsverhaltens und die Durchführung der Säulenversuche wurden die Steine per Hand aussortiert und der daran haftende Feinanteil mit einer Bürste abgewischt. Diese Fraktion wurde verworfen, weil die Steine sowohl für die Elution bzw. Adsorption gelöster Stoffe irrelevant sind als auch die Durchführung der Laborversuche verunmöglichen. Die Entnahme der Steinfraktion resultierte in einer Reduktion des Substrats B um 60 % des ursprünglichen Gewichts bzw. einer Verdreifachung des Pflanzenkohle- und Schwarzerdeanteils in der Fraktion < 32 mm (Tabelle 1, Tabelle 2). Dies Material entspricht dem Prüfsubstrat B (Tabelle 1).

Um das Adsorptionsverhalten zu bestimmen (Kap. 4.4), wurde von allen luftgetrockneten Substraten der Feinanteil < 2 mm abgesiebt. Der Feinanteil ist massgeblich für die Schadstoffbindung.

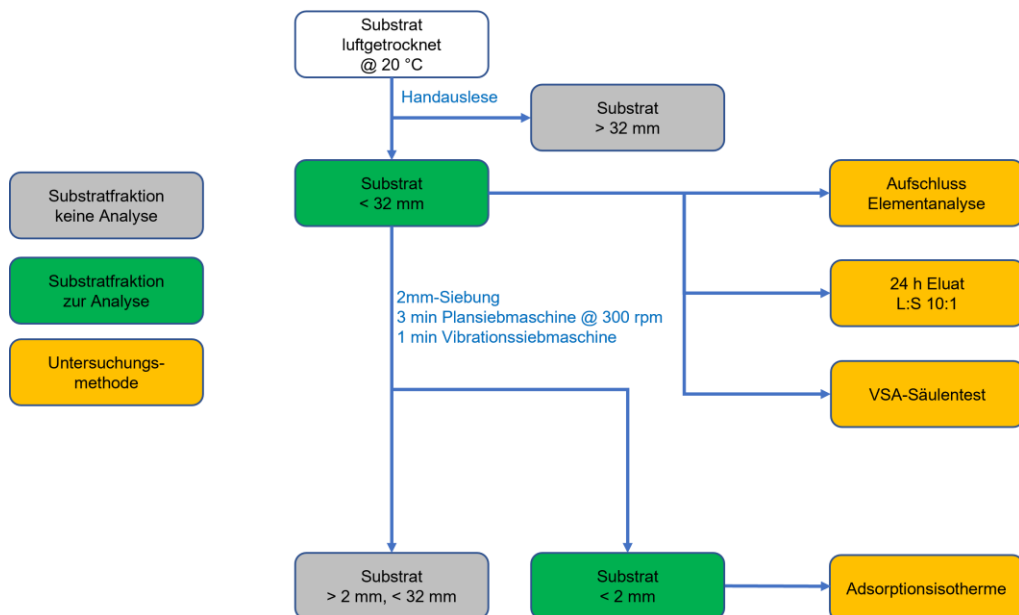


Abbildung 5: Schema zur Fraktionierung der Pflanzsubstrate für die Laborversuche (Elementgehalt, Elutionen und Batchtest).

4.2 Elementgehalte

Für die Bestimmung der Elementgehalte in den drei Pflanzsubstraten aus Zürich wurden je 200 g Material gemahlen ($< 200 \mu\text{m}$) und mit Säure aufgeschlossen (Königswasser, 30 min bei $180 \text{ }^\circ\text{C}$).

4.3 Elutionsverhalten

Pro Baumsubstrat aus Zürich wurden 1 kg Material (< 32 mm) in einem Kunststoffeimer (30 L) eingewogen, mit deionisiertem Wasser aufgefüllt (10 L, Fest-/Flüssigverhältnis 1:10), und auf einem Horizontalschüttler eluiert (24 h, Raumtemperatur). Nach weiteren 2 h ohne Schütteln (Sedimentation) wurde der Überstand filtriert ($0.45 \mu\text{m}$ Filter).

Die Filtrate wurde auf pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit, Stickstoffverbindungen (NO₂, NO₃, NH₄; Analyse innerhalb 4 h nach Probenahme), 16 polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (16 EPA-PAK), 65 Pflanzenschutzmittel (Screening) und 27 Elemente (Screening) analysiert.

4.4 Batchtest

Für den Feinanteil (< 2 mm) wurde für die drei Zürcher Baumsubstrate die Beladungskapazität von Kupfer, Zink, Diuron und Mecoprop über sechs Konzentrationen bei aktuellem pH-Wert gemäss OECD 106 (2000) bestimmt.

Je Substrat wurden sechsmal je 1 g Feinfraktion (TS; < 2 mm) in eine Glasflasche (1 L) eingewogen, eine CaCl₂-Lösung (500 ml, 0.01 M) dazugegeben und die Ansätze über 12 h auf einem Überkopfschüttler (5 rpm) konditioniert. Anschliessend wurde die Stamm-lösung beigefügt und mit deionisiertem Wasser auf 1 L aufgefüllt (Fest-/Flüssigverhältnis 1:1000). Nach 24 h überkopfschütteln (5 rpm) wurden die Ansätze 1 h stehen gelassen und der filtrierte Überstand (0.45 µm) für die Analysen entnommen. Die Beladung wurde mit der Langmuir-Adsorptionsisotherme beschrieben. Die sechs Zielkonzentrationen von Kupfer, Zink, Diuron und Mecoprop sind im Anhang zu finden (Tabelle 16).

Der Feinanteil < 2 mm umfasst bei den Substraten A1, A2 und B jeweils nur ca. 10 %. Auf diesen beziehen sich die Ergebnisse.

4.5 Schüttdichte und Wasserhaltekapazität

Die Schüttdichte und die Wasserhaltekapazität wurden für die drei Zürcher Baumsubstrate mithilfe des in Abbildung 6 dargestellten Versuchsaufbaus bestimmt. Dafür wurden die Materialien im Anlieferungszustand in je einem Behälter (120 L, 0.12 m²) entsprechend der realen Schichtdicke eingebaut (A1 = 0.4 m, A2 = 0.5 m, B = 0.3 m). Die Schüttdichte wurde beim Einbau der Substrate nach der Verdichtung gravimetrisch bestimmt. Nach einer Beregnung bis zur Sättigung konnte anschliessend jeder Behälter über 24 h abtropfen (Abbildung 6). Die Gewichtszunahme entspricht der Wasserhaltekapazität.

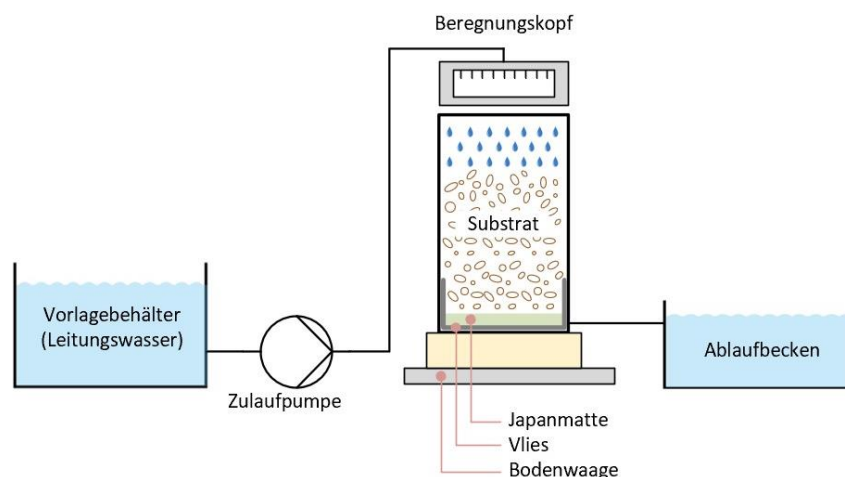


Abbildung 6: Versuchsaufbau zur Bestimmung der Schüttdichte und Wasserhaltekapazität.

4.6 Säulenversuch

Im VSA-Säulenversuch wird eine befüllte Säule über drei Testabschnitte mit einer Stofflösung beaufschlagt, um aus den Zu- und Ablaufkonzentrationen den Stoffrückhalt sowie die Stoffremobilisierung zu ermitteln (Abbildung 7) (VSA, 2023).

Die Säulen (150 mm Höhe, 80 mm Innendurchmesser) wurden mit den Substraten (je 0.75 L) befüllt. Eine Ausnahme bildeten die Materialien der zwei SABA und Mulde-Rigole, die als ungestörte Proben bereitstanden (Abbildung 21, Anhang).

Zu Versuchsbeginn wurden die Säulen von unten nach oben mit gepuffertem Wasser gesättigt (Reinstwasser, Kaliumhydrogenkarbonat, 0.075 l/min), bis eine konstante elektrische Leitfähigkeit erreicht war.

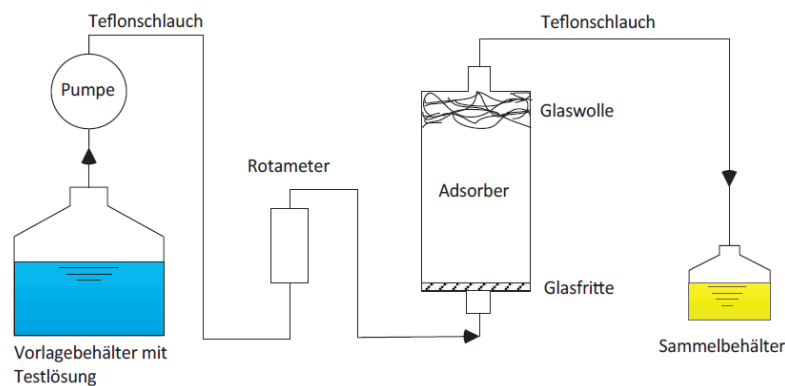


Abbildung 7: Schematischer Aufbau des Säulentests (VSA, 2023).

Die Testabschnitte 1. bis 3. folgten gemäss Abbildung 8. Für die Bestimmung des Stoffrückhalts wurden 3 x 36 L Testlösung mit drei verschiedenen Geschwindigkeiten (=Kontaktzeiten) durch die Säule gepumpt (Tabelle 14, Anhang). Die Konzentration in der Testlösung betrug je 0.5 mg/L Kupfer, Zink, Diuron und MCP, sodass über jeden Testabschnitt 18 mg pro Stoff eingesetzt wurden. Nach dem 3. Testabschnitt wurde die Säule mit 8 Bettvolumina gepufferten Wassers von unten nach oben gespült, bis die elektrische Leitfähigkeit wieder konstant war.

Zur Bestimmung der Remobilisierung wurde mit Natriumchlorid (NaCl) der Einsatz von Auftausalz im Winter simuliert. Der Versuchsablauf und die Probenahme erfolgten analog zum Vorgehen in den Testabschnitten 1 bis 3.

Gesammelt wurden je eine Probe der Ausgangslösung (Zulaufkonzentration) und vom Ablaufwasser der Testabschnitte und der Remobilisierung. Darüber hinaus wurde ein Verfahrensblindwert erstellt. Die relativen Wiederfindungen der Ausgangslösungen sowie die Konzentrationen in der Referenzprobe finden sich im Anhang (Tabelle 15).

Die Stoffrückhaltung wurde gemäss VSA-Merkblatt ausgewertet (VSA, 2023):

- «erhöht» (grün): Rückhalt ≥ 90 %
- «standard» (gelb): Rückhalt ≥ 70 bis 90 %
- «nicht erfüllt» (rot): Rückhalt < 70 %



Abbildung 8: Schrittweises Vorgehen zur Bestimmung des Stoffrückhalts und der Remobilisierung im VSA-Säulenversuch (VSA, 2023).

4.7 Schachtversuch

4.7.1 Aufbau

In einem Betonschacht (Polymerbeton, 1.2 m Durchmesser) wurden die angelieferten Baumsubstrate A1, A2 und B mit praxisüblichen Schichthöhen eingebaut und verdichtet (Abbildung 9, Anhang Abbildung 27). Insgesamt wurden ca. 2.5 Tonnen Baumsubstrat mit einer durchschnittlichen Schüttdichte von ca. 1.9 g/cm³ eingebracht. Die Schüttdichte, Wasserhaltekapazität und die abgeschätzte Masse der Baumsubstrate sind in Tabelle 3 aufgeführt.

Tabelle 3: Einbaubedingungen, Schüttdichte und Wasserhaltekapazität der eingebauten Baumsubstrate.

Parameter	Substrat A2	Substrat A1	Substrat B
Schichtdicke im Schacht (m)	0.4	0.5	0.3
Gewicht im Schacht (kg)	830	1080	640
Schüttdichte (g/cm ³)	1.8	1.9	1.9
Wasserhaltekapazität (L/m ³)	104	42	139

Das unterste Substrat befand sich auf einem GFK-Gitter mit Vliesabdeckung und Japanmatte (3.5 cm), damit das Sickerwasser frei abfließen konnte. Die Vliesabdeckung war mit einem Klemmring (Edelstahl) angebracht. Probenahmestellen waren zwischen den Schichtgrenzen von A2 und A1, A1 und B sowie an der Sohle des Schachts installiert.

Die Zuführung des Wassers (Leitungswasser) erfolgte über einen Vorlagebehälter und die Zugabe aller Leitsubstanzen über automatische Dosiereinrichtungen (Schwermetalle und Mikroverunreinigungen: Schlauchpumpen, GUS und Salz: Schneckendosierer).

Die Wasser- und Stoffmengen im Schachtversuch beziehen sich auf das maximale Verhältnis von Entwässerungs-/Versickerungsfläche A_E/A_V von 17:1, für die die Baumgruben in Zürich angedacht sind (real 100 m² bei 6 m²). Die Prüfreagenspenden (Stark-, Land- und Kleinregen) orientieren sich an der VSA-Leistungsprüfung (Tabelle 4) (VSA, 2023). Die Versickerung führt zu ungesättigten oder teilgesättigten Bedingungen im Profilaufbau.

Um eine homogene Verteilung der Stoffe zu erreichen, wurde das Wasser durch einen statischen Mischer geleitet und über einen Tüllenverteiler (mit individuell justierbarer Tülle) auf der Substratoberfläche verteilt.

Im Zulauf und Ablauf waren Sonden zur kontinuierlichen Messung des pH-Werts, der elektrischen Leitfähigkeit und der Temperatur installiert.

4.7.2 Durchführung

Der zugrunde gelegte simulierte Feldtest der VSA-Leistungsprüfung ist ein Testverfahren zur Bewertung der Leistungsfähigkeit von Adsorberanlagen für den Liegenschaftsbereich und für alle Strassen mit Ausnahme der Nationalstrassen (VSA, 2023). Die Prüfung stellt sicher, dass die Adsorberanlagen die Anforderungen des VSA für die Behandlung von Strassenabwasser erfüllen. Dabei werden mögliche Betriebsbedingungen wie Schmutzfracht, Filtergeschwindigkeit und Wasserzustand (gesättigt, ungesättigt) simuliert und der Wirkungsgrad beurteilt. Der Säulenversuch ist dagegen in erster Linie ein Materialtest für Adsorbersubstrate zur Bestimmung des Stoffrückhalts unter Sättigungsbedingungen und bei hohen Filtrationsgeschwindigkeiten.

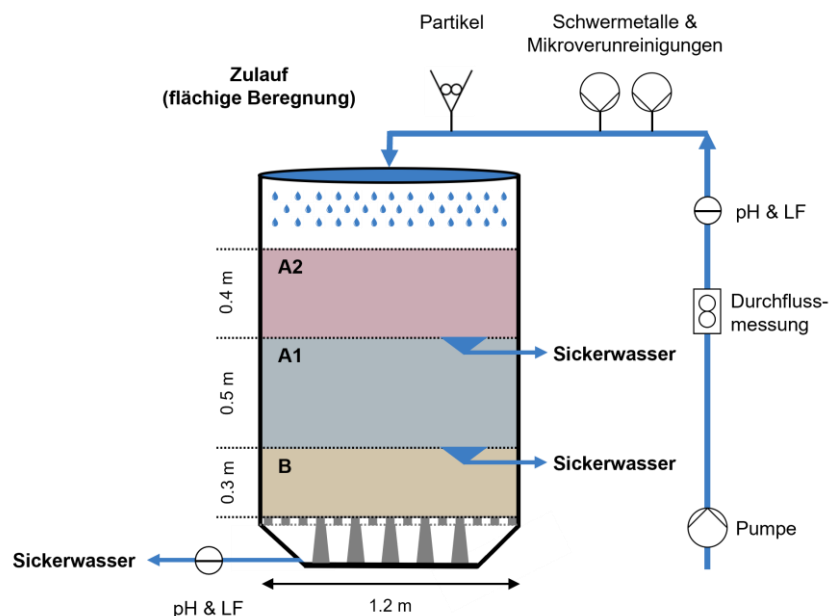


Abbildung 9: Schematische Aufbau der Schachtrigole und Versuchsanordnung.

Der Schachtversuch gliederte sich in vier Schritte:

- **Vorkonditionierung:** Die Schachtrigole wurde etwa 55 h mit konstantem Durchfluss (0.1 L/s) konditioniert, bis die Baumsubstrate Feldkapazität erreichten und der Ablauf eine konstante elektrische Leitfähigkeit aufwies. Zur Qualitätssicherung wurden sowohl im Ablauf als auch über die seitlichen Ableitungen (Porenwasser) Proben entnommen.
- **Tastversuch:** Der Tastversuch diente der Überprüfung des Aufbaus. Dafür wurde eine Regenspende simuliert (Kleinregen, Tabelle 4) und die Testlösung mit Diuron, MCP, Kupfer und Zink (je 0.2 mg/L) sowie synthetischen GUS (150 mg/L, Quarzmehl Millisil W4, d90 = 0.2 mm, d50 = 0.065 mm) dosiert. Zulauf und Ablauf der Anlage sowie das Porenwasser wurden beprobt.
- **Prüfregen:** Beregnet wurden 9 Prüfregenspenden (je 3-mal Stark-, Land- und Kleinregen) mit kontinuierlicher Dosierung von Kupfer, Zink, MCP, Diuron (Zulaufkonzentration 0.2 mg/L) und synthetischem GUS (Zulaufkonzentration 150 mg/L, Quarzmehl Millisil W4, d90 = 0.2 mm, d50 = 0.065 mm). Die Reihenfolge der Regenspenden erfolgte in Anlehnung an die VSA-Leistungsprüfung (VSA, 2023). Pro Tag wurden maximal zwei Beregnungen durchgeführt, zwischen denen jeweils so lange gewartet wurde, bis kein Abfluss mehr feststellbar war, mindestens jedoch zwei Stunden. Von jeder Regenspende wurde das gesamte Sickerwasser pro Schichtauslauf gesammelt und eine Mischprobe entnommen (n=27). Für jede Regenspendenintensität wurde der Zulauf beprobt (n=3). Weiteres ist Abbildung 1 im Anhang zu entnehmen.
- **Remobilisierung:** Um den Einfluss von Tausalz auf die Remobilisierung der zurückgehaltenen Schadstoffe abzuschätzen, wurde eine Regenspende (Starkregen, 0.21 L/s, 251 L) mit Tausalz (5 g/L NaCl) zugegeben und beprobt.

Alle Proben wurden auf Mikroverunreinigungen (Diuron, Mecoprop) sowie den Gesamtgehalt der Schwermetalle (Kupfer, Zink) analysiert. Insgesamt wurden 30 Proben untersucht. Die Konzentrationen aller Analyten im Zulauf des Schachtversuchs wichen weniger als 15 % von der Zielkonzentration von 0.2 mg/L ab. Die relativen Wiederfindungen der Zulaufproben sowie die Konzentrationen der Verfahrensblindproben finden sich im Anhang (Tabelle 18).

Tabelle 4: Übersicht zu den Prüfregenspenden und der stofflichen Beschickung mit neun Prüfregenspenden.

	Starkregen	Landregen	Kleinregen	Total
Durchführungen	3	3	3	9
Regenintensität (mm/h)	40	20	5	-
Zeitdauer (min)	20	60	120	-
Volumenstrom (L/s)	0.21	0.1	0.03	-
Beschickungsvolumen (L)	251	376	188	2445
Fracht je Einzelstoff (Cu, Zn, MCP, Diuron) (mg)	50	75	38	489
Spez. Fracht (Cu, Zn, MCP, Diuron) (mg/m ²)	44	66	34	432

4.7.3 Vorkonditionierung und Tastversuch

Die Schachtrigole wurde mit 2 m³ Wasser bei konstantem Zufluss (0.1 L/s) konditioniert, bis sich eine stabile elektrische Leitfähigkeit und pH-Wert einstellte (Abbildung 10).

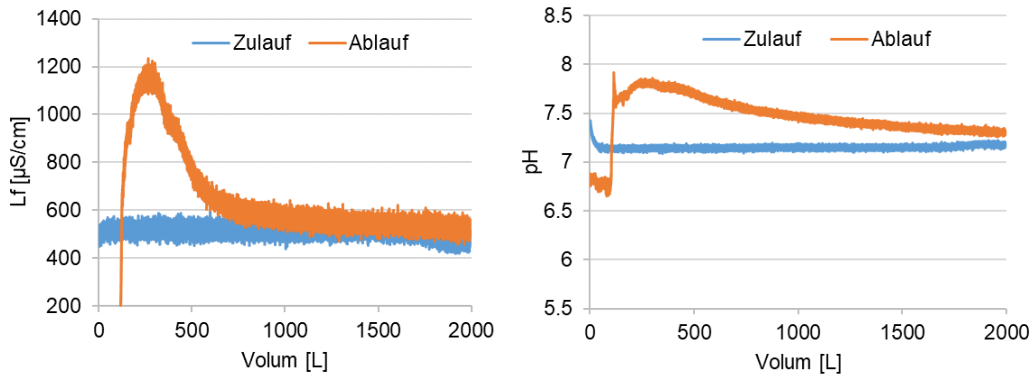


Abbildung 10: Elektrische Leitfähigkeit (links) und pH (rechts) im Zulauf und Ablauf der Schachtrigole während der Vorkonditionierung.

Die umgesetzte Prüffregenspende entspricht einem Landregen (VSA, 2023). Bezogen auf die Entwässerungsfläche korreliert diese mit einer Niederschlagsmenge von rund 100 mm bzw. 20 mm/h.

Der Rückhalt der Schwermetalle und Mikroverunreinigungen lag im Ablauf der Schachtrigole (1.2 m) bei > 90 % (Tabelle 5). In keiner Probe des Ablaufwassers konnten relevante Konzentrationen von Kupfer oder Zink nachgewiesen werden.

Tabelle 5: Konzentrationen und Rückhalt von Diuron, Mecoprop, Kupfer und Zink an der Schichtgrenze zwischen Baumsubstrat A2 und A1 (0.4 m), A1 und B (0.9 m) und im Ablauf der Schachtrigole beim Tastversuch.

Probe	Diuron		MCP		Kupfer		Zink	
	Konz. (µg/L)	Rückhalt (%)	Konz. (µg/L)	Rückhalt (%)	Konz. (µg/L)	Rückhalt (%)	Konz. (µg/L)	Rückhalt (%)
A2/A1 (0.4 m)	0.32	99.8	0.82	99.5	18	89.3	<20	> 90
A1/B (0.9 m)	<0.02	> 99.9	0.07	99.9	3	98.2	<20	> 90
Ablauf (1.2 m)	0.02	99.9	0.03	99.9	2	98.8	<20	> 90

5 Ergebnisse und Diskussion

5.1 Spezifische Sickerleistung der Substrate

Am Standort der SABA-Bülach wurde eine spezifische Sickerleistung von ca. 6.5 L/(min·m²) bestimmt, die leicht oberhalb der Dimensionierung liegt (2 bis 5 L/(min·m²)) (Tabelle 6). Die Sickerleistung in der Mulde-Rigole Wädenswil lag mit 22 L/(min·m²) sogar viermal höher als die angestrebte maximale Sickerleistung (5 bis 7 L/(min·m²)). Die hohen Sickerleistungen dürften auf präferentielle Fließwege durch Gefügebildung oder biogene Makroporen zurückzuführen sein. Wie repräsentativ diese Einzelmessungen für die Gesamtfläche sind, lässt sich jedoch nicht beurteilen.

Aufgrund der geringen Sickerleistung an der SABA-Egg (stark bindiges Material) und den Randbedingungen im Bankettbereich der Autobahnausfahrt Bülach-Süd liessen sich die spezifischen Sickerleistungen dort nicht bestimmen (Tabelle 6).

Tabelle 6: Spezifische Sickerleistungen (S_{Spez}) im Feld ermittelt und nach Dimensionierung für SABA-Bülach und -Egg, Bankett Bülach-Süd und Mulde-Rigole Wädenswil.

	SABA-Bülach	SABA-Egg	Bankett Bülach-Süd	Mulde-Rigole Wädenswil
Material	Sand mit Deckschicht (2-3 cm)	Oberboden	Gemisch mit Mittelsand	Boden mit Sand
S_{Spez} (gemessen)	6.5 L/(min·m ²)	n.b.	n.b.	22 L/(min·m ²)
S_{Spez} (dimensioniert)	2-5 L/(min·m ²)	n.b.	n.b.	5-7 L/(min·m ²)
Alter (Jahre)	5	15	4	8

Fazit: Sollte die hohe Sickerleistungen der Mulde-Rigole Wädenswil auf präferentiellen Fließwegen beruhen, kann dies dazu führen, dass Schadstoffe mit dem Sickerwasser unter Umgehung der Bodenmatrix in die Tiefe transportiert werden. Damit würde die Filterwirkung und Adsorptionsleistung unterlaufen. Das Ergebnis für die SABA-Egg wiederum kann bedeuten, dass die Anlage hydraulisch limitiert ist und ein Überlaufen häufiger auftreten könnte. Eine 2018/2019 durchgeführte Erfolgskontrolle mit Messungen des Zu- und Ablaufs der SABA-Egg ergab hingegen einen spezifischen Durchfluss von 1.5-1.8 L/(min·m²), was als typisch für Bodenfilter gilt. Möglicherweise wurde der Doppelringversuch an einer unterdurchschnittlich durchlässigen Stelle durchgeführt.

5.2 Elementgehalte der Baumsubstrate

Die Ergebnisse spiegeln die jeweiligen anorganischen Elementgehalte in den Baumsubstraten wider (Tabelle 12, Anhang). Erfreulicherweise weist kein einziger Messparameter auf problematische Konzentrationen hin und die Richtwerte für anorganische Schadstoffe im Boden der Bodenschutzverordnung werden eingehalten.

Fazit: Die drei Zürcher Substratmaterialien sind nicht belastet und enthalten keine umweltkritischen Schwermetalle.

5.3 Eluierbare Stoffe in Baumsubstraten

In allen drei Eluaten lag der pH-Wert zwischen 8.4 und 9.4 (Tabelle 7). Eine Beeinflussung des pH-Wertes durch die Pflanzenkohle ist anzunehmen. Die alkalischen Mineralien in der Pflanzenkohle sind für die Erhöhung des pH-Wertes verantwortlich. Unter Einbaubedingungen mit regelmässigem Sickerwassereinfluss nimmt dieser Einfluss mit der Zeit ab.

Durch den pH-Wert kann der wasserlösliche Anteil einiger Elemente beeinflusst werden. So fallen die Schwermetalle Kupfer und Zink ab pH 8 bzw. 9 aus. Da die Schwermetalle aber bereits in den Gesamtgehalten nicht mehr nachweisbar waren, ist dieser Einfluss für das Gesamtergebnis in Bezug auf die Belastung mit Schadstoffen nicht relevant. Generell ist jedoch zu beachten, dass der pH-Wert einen grossen Einfluss auf die Mobilität von Schwermetallen hat.

Die Leitfähigkeit war im Vergleich zum eingesetzten deionisierten Wasser (1 $\mu\text{S}/\text{cm}$) kaum erhöht (Tabelle 7). Dies bedeutet, dass nur wenige Ionen aus dem Substrat gelöst wurden.

Die geringe Erhöhung stimmt mit den geringen Gehalten der gemessenen Elemente überein. Mit Ausnahme von Aluminium, Kalium, Calcium und Strontium lagen die meisten Elemente in den Wasserproben unterhalb der Bestimmungsgrenze (Tabelle 13, Anhang).

Die Stickstoffverbindungen Nitrat, Nitrit und Ammonium wurden nur in geringen Konzentrationen nachgewiesen (Tabelle 7).

Die Analysen der 15 EPA-PAK und das umfassende PSM-Screening auf über 65 Einzelsubstanzen blieben ohne Nachweis. Die einzige Ausnahme unter allen organischen Schadstoffe verbindet sich mit dem niedrigen Befund bei Naphtalin (0.18 $\mu\text{g}/\text{L}$) in der Teilfraktion von Substrat B.

Tabelle 7: pH-Werte, Leitfähigkeiten und Stickstoffverbindungen in den Eluaten der Substrate A1, A2 und B. Von Substrat B wurde nur der Anteil < 32 mm eluiert.

Parameter	A1	A2	B
pH (-)	8.4	9.0	9.4
Leitfähigkeit ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	96	55	133
NO_2 (mg/L)	0.01	0.01	0.03
NO_3 (mg/L)	< 1	< 1	< 1
NH_4 (mg/L)	0.48	0.06	1.55

Fazit: Die Substrate A1, A2 und das Prüfsubstrat B (< 32 mm) eluieren unter den Versuchsbedingungen keine umweltproblematischen anorganischen oder organischen Schadstoffe und sind stickstoffarm. Aus den eingesetzten Boden- und Schwarzerden, der konditionierten Pflanzenkohle sowie dem Schotter und den Steinen werden keine Schadstoffe gelöst. Die drei Substrate sind daher in ihrer vorliegenden Zusammensetzung für den Einbau in grundwassernahen Pflanzgruben unproblematisch (Gewässerschutzbereich A_U).

5.4 Adsorptionsverhalten in Baumsubstraten

Von Diuron werden zwischen 1.0 und 2.5 mg/g Feinfraktion (TS, < 2 mm) gebunden (Abbildung 11). Bei den Substraten A1 und A2 erreichte die Adsorption bei 6 mg/L das Beladungsmaximum, so dass die höheren Konzentrationen zu keiner weiteren Veränderung führten. Substrat B weist das höchste Bindungspotential auf. Die Ergebnisse deuten ausserdem darauf hin, dass das Belastungsmaximum noch nicht erreicht wurde und sogar etwa dreimal so hoch liegen könnte wie bei den Substraten A1 und A2.

Das Bindungsverhalten von Kupfer zeigt ein entgegengesetztes Bild (Abbildung 11). Die Feinfraktionen der Substrate A1 und A2 weisen ein hohes Adsorptionspotential auf (ca. 7 und 9 mg/g TS), die von Substrat B dagegen das geringste (3 mg/g TS). Die geringe Beladungskapazität im Substrat B ist trotzdem noch höher im Vergleich mit Diuron. Die Konzentrationen änderten sich ab rund 20 mg/L Kupfer nicht mehr, da bei allen Substraten das effektive Beladungsmaximum erreicht war.

Die pH-Werte streuten in den Batchversuchen nur wenig (pH 6.1 bis 7.9) (Tabelle 16, Anhang), noch weniger als in den Elutionsversuchen (5.3), da das Fest/Flüssig-Verhältnis weiter auseinander lag (1:1000 vs. 1:10). Die geringen Schwankungen wurden wahrscheinlich durch das Substratmaterial beeinflusst. Die Löslichkeit von Diuron und Kupfer wird in diesem pH-Bereich nicht beeinflusst. Beide Stoffe zeigen daher einen konsistenten und plausiblen Konzentrationsverlauf.

Die Konzentrationen von Zink und Mecoprop folgen keinem plausiblen Verlauf. Insbesondere die höheren Konzentrationen unterliegen starken Schwankungen. Hierfür könnten der pH-Wert oder eine konkurrierende Adsorption der Substanzen verantwortlich sein. Zur genaueren Klärung müssten weitere Versuche z.B. mit gepufferten Lösungen und den Einzelsubstanzen durchgeführt werden. Die Adsorption konnte daher nicht durch Isothermen beschrieben werden (Abbildung 20, Anhang).

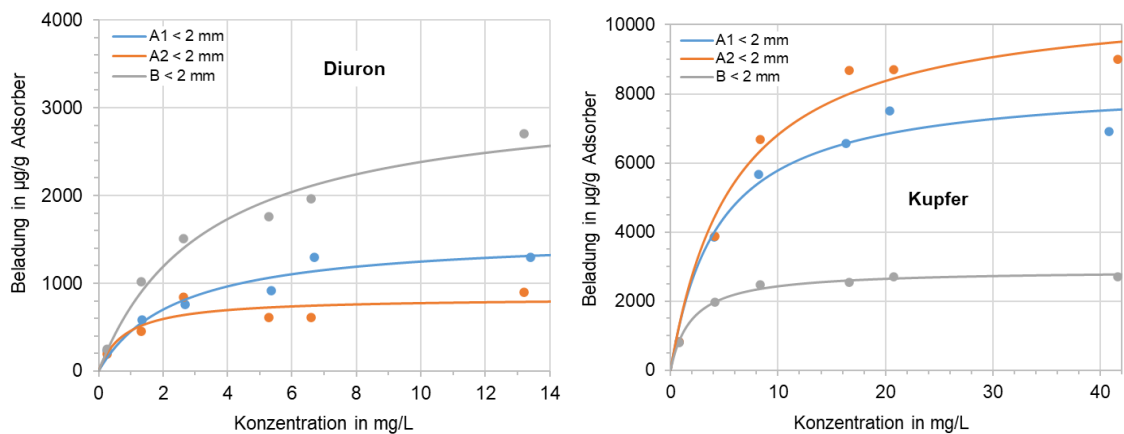


Abbildung 11: Langmuir-Adsorptionsisothermen von Diuron (links) und Kupfer (rechts) für die Feinfraktion (< 2 mm) der drei Zürcher Baumsubstrate A1, A2 und B.

Fazit: Kupfer wird von der Feinfraktion (< 2 mm) der drei Zürcher Substrate deutlich besser gebunden als Diuron, wobei im Batchversuch die Beladungskapazitäten für Kupfer in den Feinfraktionen der Substrate A1 und A2 höher sind als bei B. Dagegen ist die Kapazität für Diuron in der von Pflanzenkohle und Schwarzerde dominierten Feinfraktion des Substrats B höher als bei A1 und A2.

5.5 Beladungskapazität und Standzeit

Die Beladungskapazitäten auf Basis der Batchversuche sind von den Feinfraktionen (< 2 mm) der Substrate A1, A2 und B (Kap. 5.4) rechnerisch auf das Gesamtsubstrat (inkl. Schotter, Steinen) extrapoliert und für Kupfer und Diuron in Tabelle 8 dargestellt worden. Sie betragen beispielweise für Diuron bei den Substraten A1, A2 und B rund 120 mg/kg TS, 90 mg/kg TS bzw. 250 mg/kg TS. Diese Herleitung dient als grobe Orientierung für das Bindungspotenzial.

Die effektive Beladungskapazität von Diuron liegt bei Substrat B etwa doppelt so hoch wie bei den Substraten A1 und A2. Die Ergebnisse korrelieren mit dem höheren organischen Gehalt (Glühverlust, Tabelle 2) und dem höheren Anteil an Pflanzenkohle (Tabelle 1). Diverse Studien bestätigen den positiven Effekt von Pflanzenkohle auf den Diuronrückhalt und die Beladungskapazität, der mit den organischen Gehalten im Boden

vergleichbar sei (Petter et al., 2019, Liu et al., 2010). Yu et al. (2006) untersuchten Diuron in Böden mit verschiedenen Pflanzenkohlezusätzen. So führten 2.5 % Pflanzenkohle zu rund 200 mg/kg Beladung. Dieser Wert liegt in der gleichen Grössenordnung wie die hier abgeschätzten Beladungskapazitäten.

Die Ermittlung der Adsorptionsisothermen erfolgte mit höheren Schadstoffkonzentrationen, als sie im Strassenabwasser zu erwarten sind. Dies war aus Gründen der repräsentativen Einwaage erforderlich. Da die Beladungskapazität nicht bei realen Gleichgewichtskonzentrationen bestimmt werden konnte, ist mit einer gewissen Überschätzung der tatsächlichen Bindungskapazität zu rechnen.

Tabelle 8: Abgeschätzte Beladungskapazitäten für die Zürcher Baumsubstrate A1, A2 und B sowie die maximale prozentuale Beladung während der Stoffbeschickung im Schachtversuch über 9 Prüfrengspenden.

	A1		A2		B	
	Diuron	Kupfer	Diuron	Kupfer	Diuron	Kupfer
Beladungskapazität kg/m ³	0.22	1.28	0.17	2.01	0.48	0.51
Beladungskapazität mg/kg	122	711	89	1057	252	268
Beladung im Schachtversuch (%)	0.6	0.1	0.6	0.1	0.3	0.3

Für die Beladung mit Kupfer scheinen die Land- und Schwarzerde wichtiger zu sein als die Pflanzenkohle (Tabelle 1). Bei den Erden sind wiederum der Tongehalt und die Huminstoffe für die Adsorption relevant. Bei Kupfer ist jedoch zu beachten, dass in den Batchversuchen nicht zwischen Adsorption und Ausfällung aufgrund von Löslichkeitseffekten (pH) unterschieden werden kann. Der Einfluss des Substrates auf den pH-Wert ist jedoch ein wichtiger Faktor, der die Schadstoffdynamik von Kupfer beeinflusst (Tomczyk et al., 2019).

Gegenüber reinen Adsorbiermaterialien sind die Bindungskapazitäten eher gering. So ermittelten Bahri et al. (2012) für granulierten Aktivkohle rund 70 g/kg Diuron und Perić et al. (2004) für Zeolith rund 25 g/kg Kupfer. Diese Werte liegen um einen Faktor 100 bis 1000 höher als bei den Zürcher Substraten. In Baumrigolen wird jedoch eine deutlich grössere Schichtmächtigkeit als in Adsorbieranlagen eingebaut (1.2 m vs. 0.3 m) und die Entwässerungsfläche mit der zu erwartenden Schadstofffracht ist bis Faktor 100 kleiner. Somit ist trotz der geringeren Beladungskapazität der Zürcher Substrate im Vergleich zu technischen Adsorbiermaterialien eine hohe Standzeit möglich.

Im Schachtversuch mit neun Prüfrengspenden (Kap. 4.7) wurde eine Stofffracht aufgebracht, die rund 0.1 bis 0.6 % der abgeschätzten Beladungskapazitäten für die jeweiligen Substrate umfasste. Wird nun berücksichtigt, dass die Kupfermenge in der Standard-Prüfung einer Jahresfracht entspricht und der Schachtversuch rund 25 % der Jahresfracht abbildete, würde die Jahresfracht rund 0.4 bis 2.4 % der Beladungskapazität der Substrate belegen. Unter diese Annahme wäre nach 30 bis 200 Jahren die Kapazität zu ca. 80 % erschöpft. Unter Berücksichtigung der Profilmächtigkeit sollte die im Laborversuch ermittelte Beladungskapazität keine kritische Standzeit erwarten lassen.

In der Praxis können gelöste organische Kohlenstoffverbindungen oder andere Stoffeinträge mit gelösten Schwermetallen und Mikroverunreinigungen um Bindungsplätze konkurrieren, was zu einer Verringerung der Beladungskapazität und der spezifischen

Standzeit führt. Dem stehen der mikrobielle Abbau von Mikroverunreinigungen, der Schwermetallrückhalt durch Fällung und der Aufbau neuer Bindungsplätze (Deckschicht) gegenüber.

Fazit: Erste Untersuchungen zur Beladungskapazität der Zürcher Substrate zeigen eine positive Korrelation für Diuron mit dem Pflanzenkohlenanteil und für Kupfer mit der Tonfraktion (Bodenanteil). Diese Ergebnisse sind konsistent mit Literaturwerten. Die Abschätzung der Beladbarkeit aus den Laborversuchen (Adsorptionsisothermen) deutet darauf hin, dass die Standzeit der Substrate kein limitierender Faktor für den Einsatz sein dürfte. Beim Einsatz im Strassenraum kann die konkurrierende Adsorption den Stoffrückhalt begrenzen, der Eintrag von Partikeln aber auch zu zusätzlichen Bindungsplätzen führen. Es wird empfohlen, diese Mechanismen durch ein Monitoring bei Pilotinstallationen zu überprüfen.

5.6 VSA-Säulenversuch

5.6.1 Baumsubstrate

Die vier untersuchten Stoffe werden von den Baumsubstraten A1, A2 und Prüfsubstrat B stoffspezifisch und in Abhängigkeit von der Kontaktzeit (Fließgeschwindigkeit) zurückgehalten (Abbildung 12). Dies entspricht dem Verhalten von Adsorbersubstraten unter den gleichen Versuchsbedingungen (Burkhardt, 2017). Die Kontaktzeit bestimmt also in erster Linie den ermittelten Stoffrückhalt. Dies wird bei den unterschiedlichen Testabschnitten für die Substrate A1 und A2 deutlich. Beispielsweise beträgt der Rückhalt von Kupfer im Substrat A2 im ersten Testabschnitt (Filtergeschwindigkeit ca. 9.0 m/h) ca. 38 %, gefolgt von 48 % im zweiten Testabschnitt (Filtergeschwindigkeit ca. 2.2 m/h) und 63 % im dritten Testabschnitt (Filtergeschwindigkeit ca. 0.9 m/h).

Kupfer wird besser zurückgehalten als Zink, möglicherweise auch beeinflusst durch den pH-Wert (Löslichkeitseffekt, Säulenversuche pH 6.4 bis 7.8), und Diuron stets besser als Mecoprop, was auf die unterschiedlichen Polaritäten der beiden Stoffe zurückzuführen ist. Auch diese Reihenfolge ist gut bekannt (Burkhardt et al., 2017).

Der Rückhalt von allen vier Stoffen durch das Prüfsubstrat B (Faktion < 32 mm) war mit > 95 % deutlich höher als bei den beiden Substraten A1 und A2. Das Gesamtsubstrat B mit hohem Steinanteil (60 %) lässt jedoch ein schlechteres Gesamtergebnis erwarten.

Für alle Baumsubstrate wurde beim Einsatz von Tausalz keine relevante Remobilisierung der Stoffe festgestellt (< 1 %). Die Beladungskapazität sollte daher langfristig nicht beeinträchtigt werden. Die relativ grosse Entwässerungsfläche und die damit verbundene Sickerwassermenge wird unter Einbaubedingungen zudem für eine rasche Ausspülung von Salz sorgen. Damit ist nicht zu befürchten, dass unter realen Bedingungen durch den Einfluss von Tausalz die zurückgehaltenen Stoffe wieder freigesetzt werden.

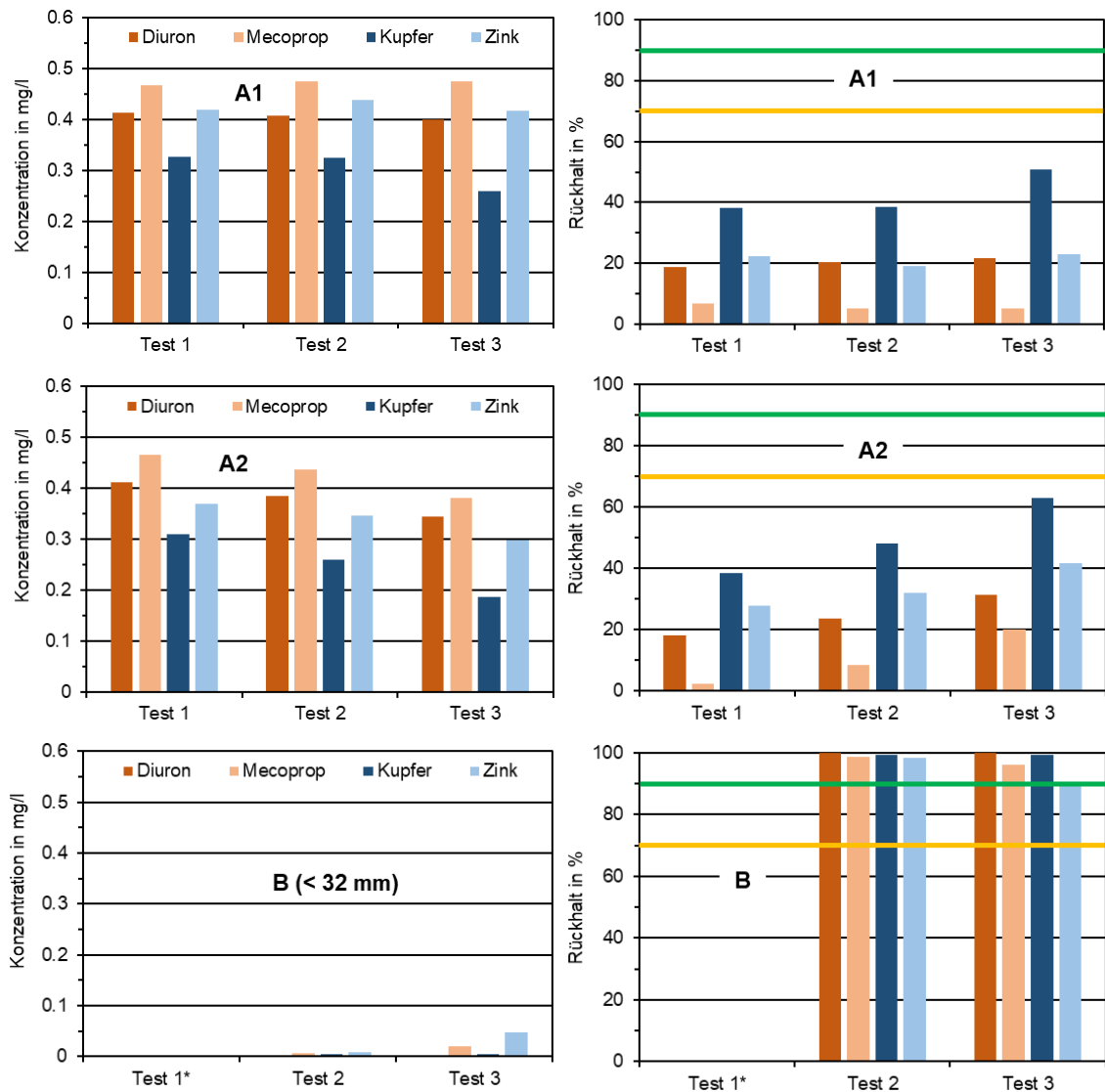


Abbildung 12: Ablaufkonzentrationen von Kupfer, Zink, Mecoprop und Diuron in den Testabschnitten 1 bis 3 (links) und deren Rückhalt (rechts) für die Baumsubstrate A1, A2 und Prüfsubstrat B (< 32 mm). *Aufgrund der geringen Wasserdurchlässigkeit konnte für die Fraktion < 32 mm der höchste Durchfluss (Testabschnitt 1, 45 L/h) nicht getestet werden.

Die Baumsubstrate A1 und A2 erfüllen nicht die Anforderung «standard» (70 bis 90 %) für Adsorbentmaterialien, weder für Schwermetalle noch für Mikroverunreinigungen (Abbildung 12 und Abbildung 23, Anhang). Die Feinfraktion des Substrats B hingegen weist einen sehr hohen Rückhalt auf und erfüllt die Anforderung «erhöht» (> 90 %). Diese Fraktion wird durch konditionierte Pflanzenkohle und Schwarzerde dominiert.

Fazit: Die Säulenversuche wurden unter wassergesättigten Bedingungen mit hoher Filtergeschwindigkeiten durchgeführt. Bei Pflanz- und Fugensubstraten sind die Wasserflüsse geringer und können auch teilgesättigt sein, wodurch der Stoffrückhalt verbessert wird. Ausserdem werden nur gelöste Stoffe dosiert. Im Feld liegen jedoch zumindest die Schwermetalle zu einem erheblichen Teil in partikulärer Form oder an Partikel gebunden vor. Partikel können durch die Filterfunktion der Substrate und eine Deckschicht zurückgehalten werden. Insofern spiegeln die vorliegenden Ergebnisse eher eine schwierige

Betriebssituation wider und sind für eine grobe Beurteilung des Schadstoffrückhalts bzw. im Quervergleich mit anderen Materialien hilfreich.

5.6.2 Substrate zur Strassenabwasserbehandlung

Die Resultate für die Substrate SABA Egg, SABA Bülach, Bankett Bülach-Süd und Mulde-Rigole Wädenswil sind in Abbildung 13 dargestellt. Die vier Substrate halten die Schwermetalle gut zurück, insbesondere die beiden SABA-Materialien (> 90 % in Testabschnitt 3), gefolgt vom Mulden-Rigolen-System (> 90 % Kupfer, > 75 % Zink in Testabschnitt 3). Nur beim Bankett-Material ist der Rückhalt in Testabschnitt 3 geringer. Der Rückhalt der SABA-Egg deckt sich mit den Messungen aus einer Funktionskontrolle (TBA Kanton Zürich, 2020). Der hohe Rückhalt von GUS und Schwermetallen in SABAs ist durch Feldversuche nachgewiesen und als Stand-der-Technik dokumentiert (ASTRA / BAFU, 2021). Mikroverunreinigungen sind dahingehend nicht beurteilt.

Die Substrate für die Behandlung von Strassenabwasser zeigen im Säulenversuch ein geringes Rückhaltepotential für die untersuchten organischen Mikroverunreinigungen. So werden Mikroverunreinigungen mit weniger als 20 % in allen Testabschnitten zurückgehalten. Lediglich das Substrat der Mulde-Rigole weist eine bessere Leistung auf. Der geringe Rückhalt ist vermutlich auf einen geringen Tongehalt und die Unterschiede zwischen SABA Egg und Mulde-Rigole Wädenswil auf einen geringen Gehalt von organischer Substanz oder geringen Humifizierungsgrad zurückzuführen. Die Deckschicht der SABA Bülach war mit 2-3 cm Mächtigkeit vergleichsweise dünn, was ebenfalls eine Ursache für den geringen Rückhalt von organischen Mikroverunreinigungen sein kann.

Die Remobilisierung ist für alle Stoffe gering (< 1%). Die leichten Erhöhungen bei Diuron in beiden SABA- und Bankett-Materialien dürften von untergeordneter Bedeutung sein, weil die absolut gebundenen Stoffmengen sehr gering sind.

Die Säulenversuche mit den Materialien SABA Egg und Mulde-Rigole konnten nur mit einem reduzierten Durchfluss von 1 L/h (Filtergeschwindigkeit 0.2 m/h) durchgeführt werden, weil die Materialien hydraulisch limitiert waren. Die ermittelte gute Bindung von Schadstoffen geht folglich einher mit einer geringen Wasserdurchlässigkeit. Bei der Mulde-Rigole besteht eine grosse Diskrepanz zur im Feld bestimmten spezifischen Sickerleistung. Die Gründe dafür konnten nicht eruiert werden.

Keinen Einfluss auf die Wasserdurchlässigkeit der Säulen hatten präferentielle Fliesswege, die in bindigen Materialien auftreten können. Dies beruht vermutlich darauf, dass die räumliche Dichte entsprechender Makroporen gering ist und durch die Beprobung nicht erfasst wurden. Bei der Entnahme ungestörter Proben können auch Randeffekte die Durchlässigkeit erhöhen (erschleppung von grobem Material in die Tiefe etc.), die einen Bypass-Fluss bedingen. Erfreulicherweise wurde auch dieser nicht beobachtet.

Die Einstufung der vier Substrate gemäss VSA-Anforderungen lässt sich aus Abbildung 13 herleiten und ist in Abbildung 24 (Anhang) zusammengefasst. Das Substrat Mulde-Rigole Wädenswil erfüllt bei den Mikroverunreinigungen die Anforderung «erhöht» (> 90 % Rückhalt), die anderen drei Substrate bleiben aber weit dahinter zurück. Bei den Schwermetallen verhält es sich umgekehrt. Drei Substrate halten die Schwermetalle zu > 90 % zurück («erhöht») und das Bankettmaterial erfüllt die Anforderung «standard».

Bei den Schwermetallen weisen alle Substrate unter den Versuchsbedingungen ein hohes Rückhaltepotential auf.

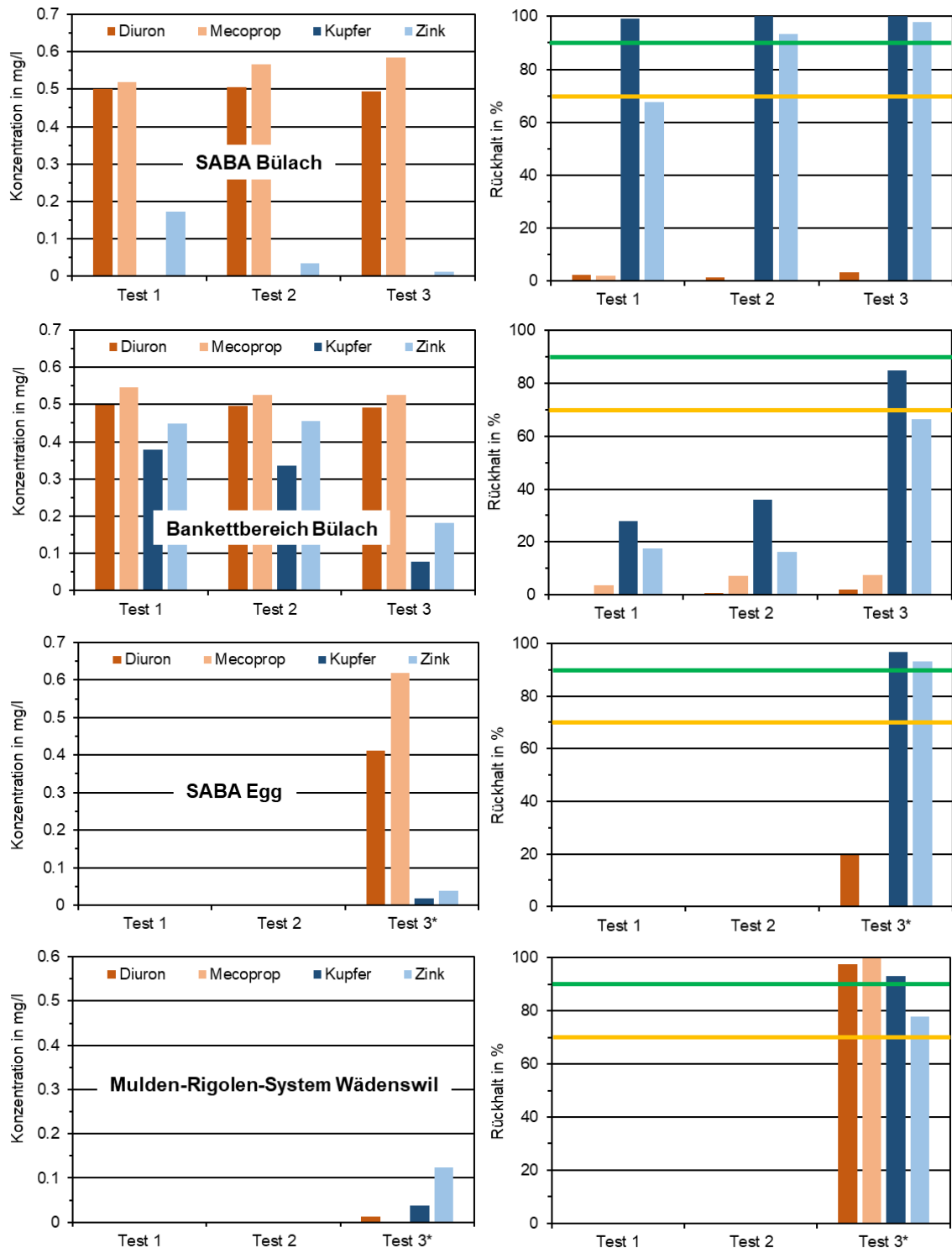


Abbildung 13: Ablaufkonzentrationen von Kupfer, Zink, Mecoprop und Diuron in den Testabschnitten 1 bis 3 (links) und deren Rückhalt (rechts) für die vier Substrate. ⁱ Aufgrund der geringen Durchlässigkeit konnte Testabschnitt 3 und die Remobilisierung nur mit reduziertem Durchfluss von 1 L/h (Filtergeschwindigkeit 0.2 m/h) durchgeführt werden. ^{*}Unzureichende Durchlässigkeit.

Fazit: Die Säulenversuche konnten für den Oberboden der SABA Egg und der Mulde-Rigole Wädenswil nicht mit den üblichen Geschwindigkeiten durchgeführt werden, weil

die Durchlässigkeit zu gering war. Bei der angepassten Filtergeschwindigkeit war der Schwermetallrückhalt jedoch durchwegs hoch. Mecoprop und Diuron wurden nur vom Substrat der Mulde-Rigole Wädenswil (Oberboden-Sandgemisch) effektiv zurückgehalten (angepasster Versuch bei 1 L/h). Im realen Betrieb liegen oft teil- oder ungesättigte Verhältnisse vor und geringere Filtergeschwindigkeiten als im Säulenversuch. Daher ist in der Praxis eher mit einem höheren Schadstoffrückhalt zu rechnen, sofern nicht präferentieller Transport (schneller Bypassfluss) die Matrix umfließt.

5.6.3 Basler Pflanz- und Fugensubstrate

Die Schwermetalle werden von den Fugen- und Pflanzsubstraten wiederum stoffspezifisch und in Abhängigkeit zur Kontaktzeit (Fließgeschwindigkeit) zurückgehalten (Abbildung 14). Bei geringer Filtergeschwindigkeit ist der Rückhalt aufgrund der längeren Kontaktzeit höher, wie die Testabschnitte für die Substrate Splitt-Sandmischung und Radix plus veranschaulichen. So beträgt der Rückhalt von Kupfer in Radix plus im ersten Testabschnitt (ca. 9.0 m/h) ca. 38 %, gefolgt von 46 % im zweiten Testabschnitt (ca. 2.2 m/h) und 60 % im dritten Testabschnitt (ca. 0.9 m/h).

Bezogen auf den Rückhalt der Schwermetalle im dritten Testabschnitt mit langsamster Filtergeschwindigkeit (ca. 0.9 m/h) ist dieser für das Pflanzsubstrat Radix plus mit Pflanzenkohle (ca. 92 %) und das Fugensubstrat Oberboden-Splittmischung (ca. 85 %) sehr hoch, während der Rückhalt bei der Splitt-Sandmischung (ca. 65 %) und Radix plus ohne Pflanzenkohle (ca. 50 %) (Abbildung 14) geringer ist. Deutlich erkennbar ist damit das höhere Rückhaltevermögen durch die Zugabe von Pflanzenkohle. Dies kann sowohl auf den etwas höheren pH-Wert (Anhang, Tabelle 17) als auch auf die kompostierte Pflanzenkohle zurückgeführt werden.

Die Mikroverunreinigungen werden im eingesetzten Säulenversuch von keinem Substrat gut zurückgehalten (< 15 %), auch nicht bei der niedrigsten Durchflussrate. Auch die Zugabe von Pflanzenkohle führt zu keiner messbaren Verbesserung.

Der erste Testabschnitt mit der höchsten Filtergeschwindigkeit (ca. 9.0 m/h) des Säulenversuchs konnte mit dem Substrat «Radix plus mit Pflanzenkohle» wegen unzureichender Durchlässigkeit nicht durchgeführt werden. Die Pflanzenkohle fördert zwar den Rückhalt der Schwermetalle, setzt aber die gesättigte Wasserleitfähigkeit herab.

Bezogen auf die VSA-Anforderungen weisen die Substrate «Oberboden-Splittmischung» und «Radix plus mit Pflanzenkohle» einen hohen Rückhalt für Schwermetalle auf (70 bis 90 %) (Abbildung 14). Das Substrat «Radix plus mit Pflanzenkohle» hält Kupfer sogar zu > 90 % zurück. Die Bindung von Mikroverunreinigungen ist dagegen sehr gering und erfüllt keine VSA-Anforderung. Die Splitt-Sandmischung und das Pflanzsubstrat Radix plus hingegen erfüllen weder für die Schwermetalle noch für die Mikroverunreinigungen die Anforderung «standard» (70 bis 90 %). Die Einstufung gemäss VSA-Anforderungen ist in Abbildung 25 (Anhang) zusammengefasst.

Bei allen Substraten wurde keine relevante Remobilisierung der Schwermetalle festgestellt (< 1 %). Die leicht erhöhten Remobilisierungen von Diuron in den Pflanzsubstraten Radix plus mit und ohne Pflanzenkohlenanteil sind von untergeordneter Bedeutung, da die absolut gebundenen Stoffmengen gering sind.

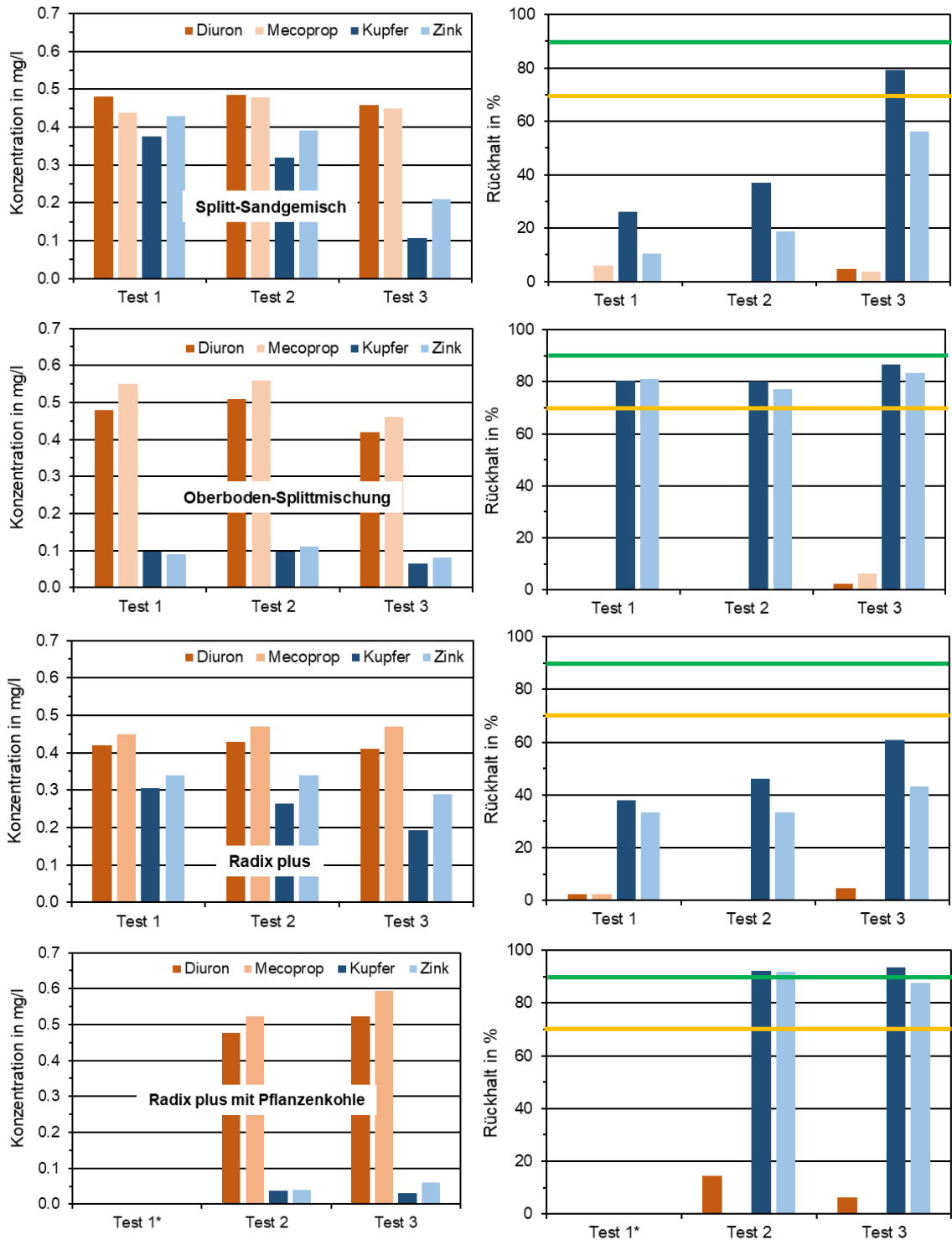


Abbildung 14: Ablaufkonzentrationen von Kupfer, Zink, Mecoprop und Diuron in den Testabschnitten 1 bis 3 (links) und deren Rückhalt (rechts) für je zwei Fugen- und Pflanzsubstrate aus Basel-Stadt. *Aufgrund der geringen Durchlässigkeit konnte Testabschnitt 1 nicht durchgeführt werden.

Fazit: Die Rückhalte der Schwermetalle zeigen deutliche Unterschiede zwischen den Substraten, die direkt auf die Zusammensetzung zurückzuführen sind. So führt beispielsweise die Zugabe von Pflanzenkohle zu einer Erhöhung des Rückhaltevermögens für die Schwermetalle, vermutlich durch die Erhöhung des pH-Werts. Die Ergebnisse zeigen auch, dass die Mikroverunreinigungen unter diesen Versuchsbedingungen nur schwach

von den Fugen- und Pflanzsubstraten gebunden werden, unter anderem weil die Tonfraktion fehlt und die organische Substanz zu wenig humifiziert ist. Die gemessenen Sickerleistungen von Radix Plus im Feld liegen ausserdem nur zwischen 0.09 und 0.39 m/h. Sie liegen damit noch um einen Faktor 2 bis 10 niedriger als die langsamste Filtergeschwindigkeit im Säulenversuch (ca. 0.9 m/h). Ausserdem liegen in der Realität häufig ungesättigte Bedingungen vor, die zu geringeren Filtergeschwindigkeiten und höherem Stoffrückhalt führen. Es ist daher wahrscheinlich, dass die Splitt-Sandmischung für Pflasterfugen und das Pflanzsubstrat Radix plus die gelösten Schwermetalle im realen Gesamtaufbau deutlich besser zurückhalten, da dann die Wasserkontaktzeit, die Filterstrecke und der Einfluss des pH-Wertes deutlich stärker ausgeprägt sind.

5.6.4 Vergleich von allen Substraten

Die Substrate weisen Ähnlichkeiten, aber auch deutliche Unterschiede auf. Abbildung 15 zeigt den Stoffrückhalt der untersuchten Substrate im Vergleich für die geringste Filtergeschwindigkeit (ca. 0.9 m/h). Die Ergebnisse für alle Testabschnitte sind in Abbildung 26 (Anhang) angegeben.

Generell ist der Rückhalt von Schwermetallen hoch. Die vier Substrate zur Strassenwasserbehandlung halten die Schwermetalle > 70 % zurück. Die vier Substrate aus Basel weisen einen ähnlichen Schwermetallrückhalt auf wie die drei Baumsubstrate der Stadt Zürich. Dabei befinden sich die Baumsubstrate A1 und A2 an der unteren Grenze des Rückhalts und Radix Plus mit Pflanzenkohle am oberen (90 %).

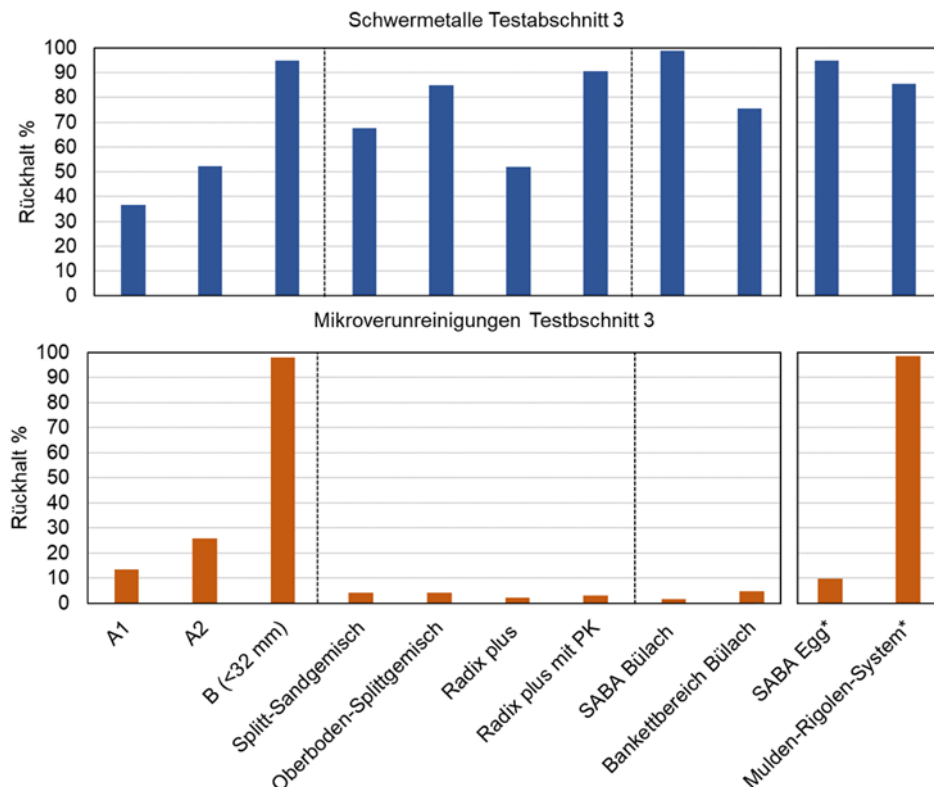


Abbildung 15: Rückhalt von Schwermetallen (oben) und Mikroverunreinigungen (unten) für drei Baumsubstrate (A1, A2, Prüfsubstrat B), vier Basler Fugen- und Pflanzsubstrate und vier Substrate aus dem Strassenbereich (SABA Bülach, SABA Egg, Bankett Bülach-Süd, Mulde-Rigole Wädenswil) in Testabschnitt 3. *Aufgrund geringer Wasserdurchlässigkeit wurde mit reduziertem Durchfluss von 1 L/h bzw. einer Filtergeschwindigkeit von 0.2 m/h getestet.

Der Rückhalt von Mikroverunreinigungen ist bei fast allen Substraten gering. Tendenziell schneiden die Baumsubstrate A1 und A2 geringfügig besser ab als die Strassensubstrate (SABA, Bankett). Nur Prüfsubstrat B, die Teilfraktion des Substrats B (< 32 mm), sowie das Mulden-Rigolen Material zeigen einen hohen Rückhalt für Mikroverunreinigungen auf.

Deutliche Unterschiede zeigten sich auch bei den gesättigten Durchlässigkeiten. Diese sind bei den Baumsubstraten und den Substraten Bankett Bülach-Süd und SABA Bülach sehr hoch, dagegen gering bei den Substraten der Mulde-Rigole und SABA Egg.

5.6.5 Adsorbersubstrate für Regenwasserbehandlungsanlagen

Bei der Behandlung von Strassenabwasser können Adsorbentmaterialien wie Zeolithe oder granuliert Aktivkohle zur Entfernung von gelösten Schadstoffen und Partikeln verwendet werden. Solche Substrate werden typischerweise in dezentralen Adsorberanlagen mit standardisierter Bauweise und Anschlussflächen bis 4000 m² eingesetzt (Schacht-, Rinnensysteme) (VSA, 2023). In natürlichen SABAs mit fallspezifischer Dimensionierung und grösseren Anschlussflächen kommen dagegen Boden-, Sand- oder Splittfilter zum Einsatz, bei denen die sich bildende Deckschicht aus eingetragenen Partikeln und Schlamm die gelösten Schwermetalle bindet. Adsorber werden für Nationalstrassen nicht empfohlen (ASTRA, 2023).

Die Ergebnisse für einen Misch- und einen Schwermetalladsorber sind in Abbildung 16 dargestellt. Beide Substrate wurden ebenfalls in VSA-Säulenversuchen untersucht. Es ist nicht überraschend, dass die Adsorber einen deutlich besseren Schadstoffrückhalt aufweisen als die Pflanzsubstrate. Ein Rückhalt von Schwermetallen und Mikroverunreinigungen > 90 % ist bei entsprechender Rezeptur möglich.

Die Schichtmächtigkeiten von Adsorbersubstraten im Einbau belaufen sich auf 20 bis 50 cm, wobei der Betriebsmodus grosse Anschlussflächen vorsieht, die regelmässig zu einem gesättigten Wasserfluss führen. Die Ergebnisse aus den Säulenversuchen mit 15 cm Filterstrecke sind daher vergleichsweise gut auf die Einbausituation übertragbar. Baumrigolen weisen hingegen Profile bis 1.2 m Mächtigkeit auf. Daher ist die Übertragbarkeit der Ergebnisse differenzierter zu betrachten und die Bewertung erst unter Berücksichtigung der Bau- und Betriebsbedingungen sinnvoll.

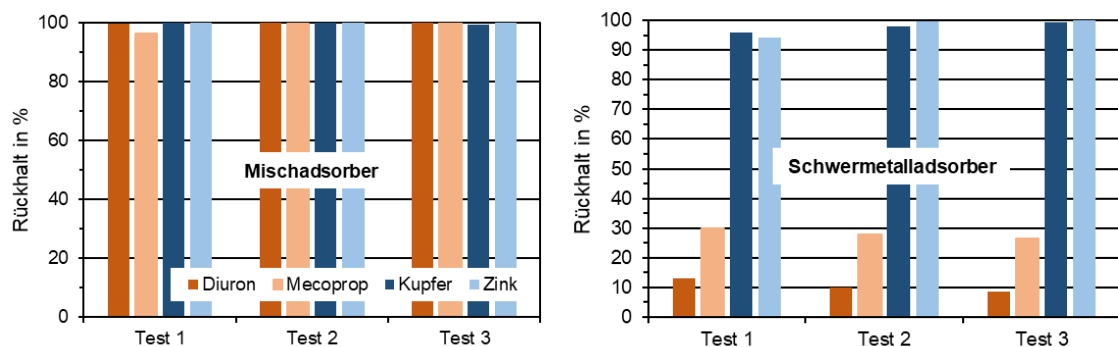


Abbildung 16: Rückhalt von Kupfer, Zink, Mecoprop und Diuron für zwei technische Adsorbersubstrate (Misch- und Schwermetalladsorber) im VSA-Säulenversuch.

5.7 Schachtversuch

5.7.1 Konzentrationsverlauf und Stoffrückhalt

Die Konzentrationen von Schwermetallen, Mikroverunreinigungen und GUS nehmen mit zunehmender Tiefe deutlich ab (Abbildung 17). So sind die Konzentrationen in 0.9 m und 1.2 m Tiefe vergleichbar gering. Kupfer und Zink waren sogar ab 0.9 m, der Schichtgrenze zwischen den Substraten A1 und B, nicht mehr nachweisbar. Zink wurde jedoch im Sickerwasser bei 1.2 m wieder gelöst nachgewiesen (im Mittel 26 $\mu\text{g/L}$). Dies deutet auf eine geringe Freisetzung aus dem Baumsubstrat B hin. Ein Grund dafür könnte der pH-Wert (pH 6.3) sein, der niedriger war als in den darüberliegenden Schichten (pH 7.1 und 7.4). Der Verlauf des pH-Werts und der elektrischen Leitfähigkeit für alle Regenspenden ist in Abbildung 30 im Anhang dargestellt. Eine Verschleppung von Zink aus dem Versuchsaufbau kann mit den Verfahrensblindwerten ausgeschlossen werden.

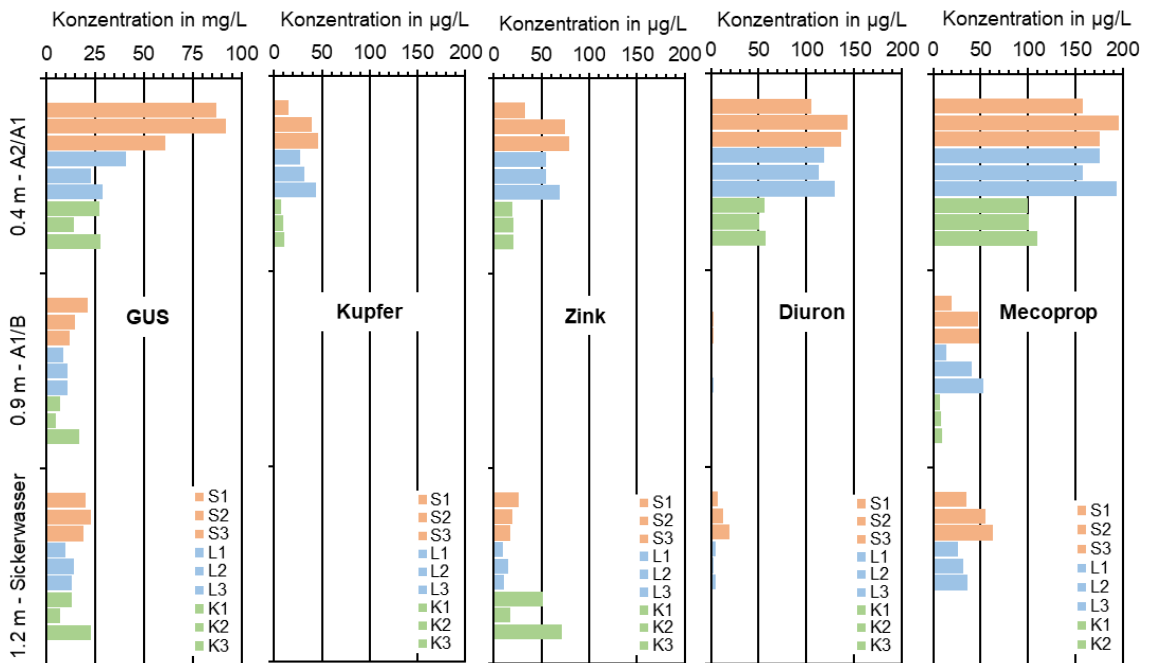


Abbildung 17: Konzentrationen von GUS, Kupfer, Zink, Diuron und Mecoprop bei den Prüfrengspenden (3 x Starkregen S1, S2, S3; 3x Landregen L1, L2, L3; 3x Kleinregen K1, K2, K3) im Sickerwasser (1.2 m) sowie an den Schichtgrenzen zwischen den Baumsubstraten A2/A1 (0.4 m) und A1/B (0.9 m) der Schachtrigole.

Der Anstieg der GUS-Konzentrationen bei den simulierten Starkregen, insbesondere in der Tiefe von 0.4 m (A2), ist mit hoher Wahrscheinlichkeit auf eine stärkere Auswaschung aus dem Substrat zurückzuführen, da es nicht plausibel ist, dass die Partikel mobiler sind als die Schwermetalle und Mikroverunreinigungen. Das zugegebene Quarzmehl W4 ist jedoch methodisch nicht von den Partikeln des Baumsubstrats zu unterscheiden.

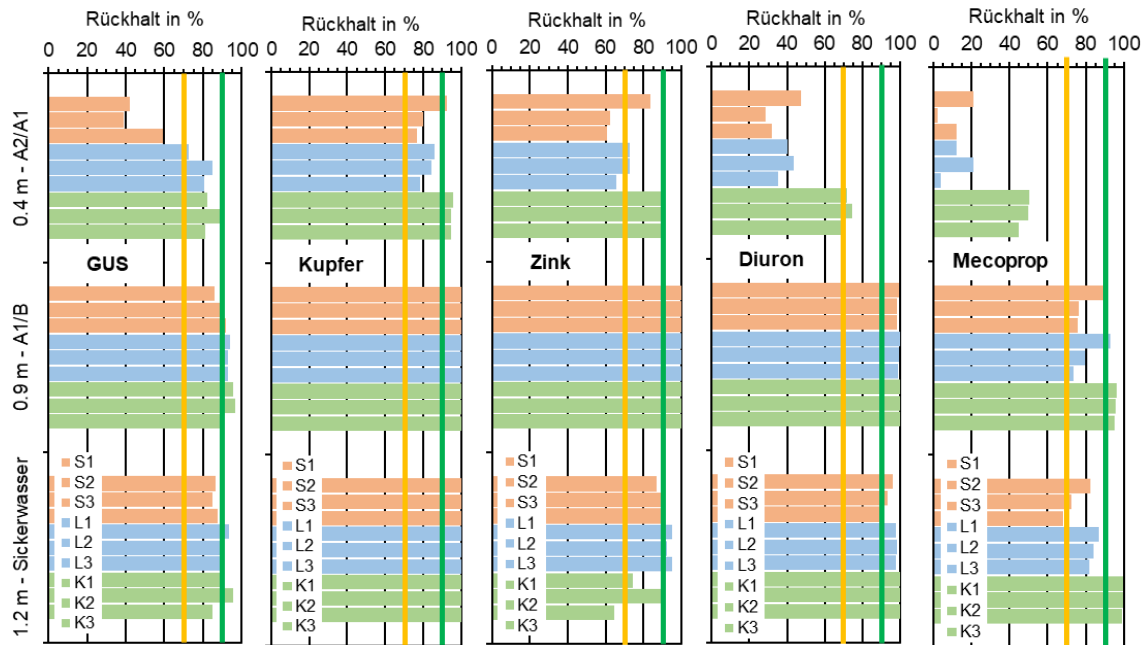


Abbildung 18: Rückhalt von GUS, Kupfer, Zink, Diuron und Mecoprop bei unterschiedlichen Regenspenden (3x Starkregen (S1, S2, S3), 3x Landregen (L1, L2, L3), 3x Kleinregen (K1, K2, K3)) an den Schichtgrenzen (0.4 m, 0.9 m) und im Sickerwasser (1.2 m) des Schachtversuchs.

Das generelle Verhalten des Stoffrückhalts deckt sich mit den Ergebnissen der Säulenversuche und ist konsistent mit den Resultaten zu technischen Adsorberanlagen: Der Stoffrückhalt nimmt mit steigender Kontaktzeit vom Starkregen über den Landregen bis zum Kleinregen zu. Besonders ausgeprägt ist dieser Einfluss in der ersten Substratschicht (A2). Der Rückhalt ist ebenfalls stoffspezifisch und hängt wie in den Laborversuchen (Abbildungen 12, 13, 14) von der Kontaktzeit (Fließgeschwindigkeit) ab. So wurde Kupfer besser zurückgehalten als Zink und Diuron besser als Mecoprop (Abbildung 18). Die Schwermetalle wurden vermutlich wie im Säulenversuch nicht nur adsorbiert, sondern aufgrund von pH- und Löslichkeitseffekten auch stoffspezifisch zurückgehalten.

Tabelle 9: Gesamtrückhalt im Schachtversuchs sowohl bezogen auf die zugegebene Stofffracht als auch die Anzahl Prüfreagenspenden.

Substanz	Gesamtrückhalt (%)	
	Fracht	Anzahl Regen
GUS	90	91
Diuron	97	99
Mecoprop	85	95
Kupfer	> 98	> 98
Zink	89	82

Der frachtgewichtete Rückhalt über alle Regenspenden beträgt im Mittel > 90 % für GUS, Schwermetalle und Mikroverunreinigungen (Tabelle 9). Gewichtet man die Ergebnisse mit der Anzahl der Regenspenden (Kleinregen 71 %, Landregen 24 %, Starkregen 5 %), so ergibt sich ebenfalls für jede Stoffgruppe ein Rückhalt von > 90 %. Weitere Ergebnisse sind im Anhang in Abbildung 29 dargestellt.

Die Ergebnisse für das an den Schichtgrenzen beprobte Sickerwasser zeigen, dass die erste Schicht (A2) massgeblich für den Rückhalt von Partikeln (70 % GUS) und Schwermetallen (85 %) verantwortlich ist (Tabelle 10). Die zweite Schicht (A1, 0.9 m) spielt dagegen die entscheidende Rolle bei der Adsorption der Mikroverunreinigungen (56 %), insbesondere von Mecoprop.

Weniger als 10 % der aufgebrachten Fracht an Schwermetallen und Mikroverunreinigungen erreichte die tiefste Schicht (Substrat B). Aufgrund des hohen Rückhalts bis in eine Tiefe von 0.9 m (Substrate A2/A1) kann der spezifische Stoffrückhalt von Substrat B nicht genau beurteilt werden. Andererseits kann gezeigt werden, dass die Substrate A1 und A2 bereits unter Versuchsbedingungen wirksam sind.

Tabelle 10: Durchschnittlicher frachtbezogener Rückhalt von GUS, Schwermetallen und Mikroverunreinigungen pro Baumsustrat im Schachtversuch.

Substrat	Frachtbezogener Rückhalt (%)		
	GUS	Schwermetalle	Mikroverunreinigungen
A2	70	85	37
A1	22	18	56
B	n.d.	n.d.	n.d.

Der Schachtversuch diente nicht zur Ermittlung der Beladungskapazität und der Standzeit. Bei zunehmender Sättigung der Beladungskapazität in den ersten beiden Schichten (A2/A1) könnte jedoch eine Zunahme des Stoffeintrags in die unterste Schicht (Substrat B) möglich sein. Erfahrungen aus SABAs zeigen aber, dass sich der Schadstoffrückhalt durch die Akkumulation von Partikeln an der Oberfläche (Deckschicht) mit der Zeit durchaus verbessern kann.

Fazit: Die Ergebnisse des Schachtversuchs zeigen, dass mit dem getesteten Substrataufbau ein wirksamer Rückhalt von GUS, Mikroverunreinigungen und Schwermetalle erreicht wird (> 90 % Rückhalt). Die Ergebnisse sind plausibel und werden durch die Säulenversuche bestätigt. Aufgrund des hohen Rückhalts kann der Aufbau nach derzeitigem Kenntnisstand für geringe und mittlere Belastungen in Platz- und Strassenabwässern empfohlen werden. Unter hohen Belastungen sollte weitere Praxiserfahrung (Monitoring) gesammelt werden.

5.7.2 Remobilisierung

Die Ergebnisse des Versuchs mit Tausalz bestätigen die Resultate der VSA-Säulenversuche mit einer remobilisierten Menge < 1 % (Tabelle 19, Anhang). Die Ursache für die leichte höhere Zinkkonzentrationen verbindet sich vermutlich mit einer geringen Auswaschung von Zink aus Substrat B.

Fazit: Eine relevante Remobilisierung von Schwermetallen und Mikroverunreinigungen wurde bei der Anwendung von Streusalz in der Schachtrigole nicht festgestellt. Es ist daher nicht zu befürchten, dass unter realen Bedingungen die zurückgehaltenen Stoffe durch den Einfluss von Streusalz in relevantem Umfang wieder freigesetzt werden.

5.7.3 Schachtversuch vs. Adsorberanlagen

Der Schachtversuch wurde in Anlehnung an den ersten Prüfblock der VSA-Leistungsprüfung für technische Adsorberanlagen durchgeführt (VSA, 2023). Damit ist ein orientierender Vergleich des Stoffrückhalts mit technischen Adsorberanlagen möglich.

Abbildung 19 zeigt die Rückhalteleistung der Schachtrigole im Vergleich zu einem Rinnenfilter mit Mischadsorber (technische Adsorberanlage). Dargestellt sind jeweils die ersten vier Probenahmen der VSA-Leistungsprüfung, die äquivalent im Schachtversuch durchgeführt wurden.

Beide Anlagen zeichnen sich durch einen vergleichbar hohen Stoffrückhalt aus. Lediglich der Rückhalt von Zink ist bei der Schachtrigole aufgrund der Auswaschung aus Baumsubstrat B etwas geringer. Allerdings ist die angeschlossene Fläche bzw. Stofffracht des Rinnenfilters etwa dreimal so gross (67:1 vs. 17:1) und die Schichtdicke des Mischadsorbers beträgt nur ein Sechstel der Schachtrigole (0.2 m vs. 1.2 m).

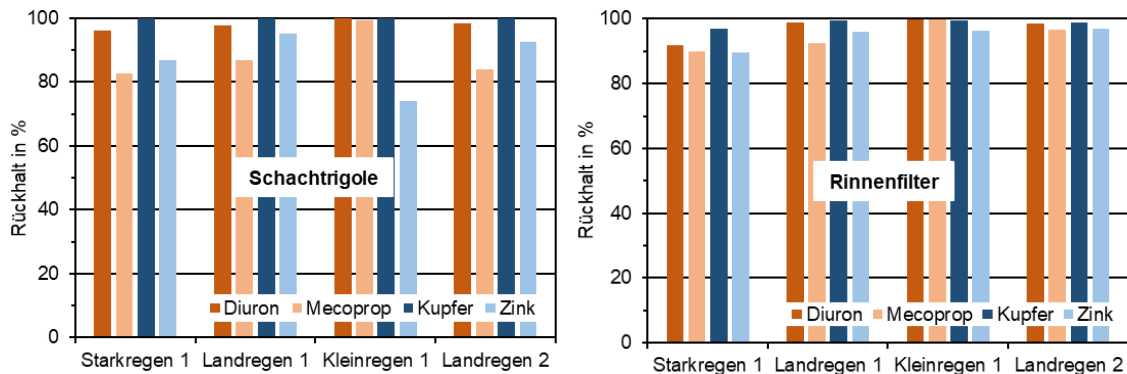


Abbildung 19: Rückhalt von Kupfer, Zink, Diuron und Mecoprop im Schachtversuch mit den Pflanzsubstraten A2, A1 und B (links) im Vergleich zu einem Rinnenfilter mit Adsorbersubstrat (rechts) für die ersten Probenahmen der VSA-Leistungsprüfung.

Fazit: Der hohe effektive Rückhalt des Rinnenfilters unter Berücksichtigung der grossen Anschlussfläche und geringen Schichtdicke des Adsorbersubstrats verdeutlicht die primäre Funktion der technischen Adsorberanlage als Schadstoffbarriere.

5.7.4 Schacht- vs. Säulenversuch

Die Schadstoffdynamik der gelösten Stoffe im Schachtversuch spiegelt die Erkenntnisse aus dem VSA-Säulenversuch wider, wie eine vergleichende Betrachtung zeigt. Dabei wurde der prozentuale Rückhalt im Schachtversuch (1.2 m) und in den Säulen (0.15 m) einheitlich auf 0.1 m Substratdicke normiert. Für die Berechnung der Kontaktzeit wurde für z.B. Baumsubstrat A2 eine Porosität von 0.3 angenommen.

Der normierte Rückhalt ist für die drei Testabschnitte im Vergleich zu den Regenspenden im Schachtversuch in Tabelle 11 dargestellt. Es zeigt sich, dass sich trotz unterschiedlicher Filtergeschwindigkeiten bei gleicher Schichtdicke ähnliche Kontaktzeiten ergeben. Dies ist vermutlich auf den gegenläufigen Einfluss von Strömungseffekten und Filtergeschwindigkeiten zurückzuführen.

Tabelle 11: Vergleich des Rückhalts von Mikroverunreinigungen (Diuron, Mecoprop) und Schwermetallen (Kupfer, Zink) für Baumsubstrat A2 im auf 0.1 m normierten Säulen- und Schachtversuch.

	Durchführung	Filtergeschwindigkeit (m/h)	Kontaktzeit (min pro 0.1 m)	A2 - Rückhalt % pro 0.1 m			
				Diuron	Mecoprop	Kupfer	Zink
Säule (0.5 mg/L)	Testabschnitt 1	8.95	0.2	13	2	26	18
	Testabschnitt 2	2.15	0.8	16	6	32	21
	Testabschnitt 3	0.90	2.0	21	13	42	28
Schacht (0.2 mg/L)	Starkregen	0.64	0.4	9	3	21	17
	Landregen	0.30	0.7	10	3	21	18
	Kleinregen	0.10	2.2	18	12	24	23

Anzumerken ist jedoch, dass die hydraulischen Bedingungen im Schachtversuch und im Säulenversuch unterschiedlich sind. Der Säulenversuch wird unter gesättigten Bedingungen aufwärts durchströmt mit hohen Filtergeschwindigkeiten durchgeführt. Unter wassergesättigten Bedingungen ist die Strömung gleichmässig. Die Untersuchung im Schachtversuch erfolgte dagegen unter teilgesättigten Bedingungen mit geringen Filtergeschwindigkeiten (Tabelle 11). Die längere Kontaktzeit, die den Stoffrückhalt begünstigt, entspricht eher den Einbaubedingungen von Pflanzsubstraten.

Fazit: Der VSA-Säulenversuch ist ein geeigneter Test zur schnellen Abschätzung des Schadstoffrückhaltevermögens von Substraten (eher nicht für Boden) unter reproduzierbaren Bedingungen im Labormassstab. Die direkte Übertragbarkeit auf Baumrigolen ist jedoch aufgrund der unterschiedlichen hydraulischen Bedingungen nur eingeschränkt möglich.

6 Schlussfolgerungen

Mit den Versuchen konnten erste dringende Wissenslücken und offene Fragen zum Rückhaltepotential von Stofffrachten und zur Reinigungsleistung von Substraten in Pflanzgruben beantwortet werden.

Schadstoffgehalte der Zürcher Pflanzsubstrate: Von den drei untersuchten Baumsubstraten A1, A2 und B aus Zürich geht keine Gefahr der Schadstofffreisetzung aus. Es sollte darauf geachtet werden, dass auch in Zukunft Materialien mit nachweislich hoher und gleichbleibender Qualität verwendet werden.

Schadstoffbindung im Säulenversuch: Die Pflanz- und Fugenpflastersubstrate aus Zürich sowie Basel-Stadt halten im Säulenversuch die Schwermetalle etwas schlechter zurück als die Substrate für SABAs, und alle Substrate sind vergleichbar schwach im Rückhalt von Mikroverunreinigungen. Die Leistungsfähigkeit der Substrate liegt damit im Bereich der Materialien für vier untersuchte SABAs. Die Gründe für den geringen bzw. hohen Rückhalt sind ähnlich gelagert: Dominierend sind Anteile strukturbildender Materialien mit geringem Bindungspotential (Kies-/Steinfraktion) und geringe Anteile der adsorptionsrelevanten Feinfraktion (< 2 mm, Land-/Schwarzerde, Tonfraktion) und konditionierter Pflanzenkohle. Die konditionierte Pflanzenkohle und die Land-/Schwarzerden haben offensichtlich positiven Einfluss auf die Stoffbindung. Der hohe Rückhalt der Teilfraktion von Substrat B (< 32 mm) ist vor dem Hintergrund einzuordnen, dass das

effektive Baumsubstrat zu mehr als 60 % aus Steinen (> 32 mm) besteht. Bei den Materialien aus SABAs sind für die Adsorption von gelösten Schadstoffe der Tonanteil und/oder die humifizierte organische Substanz von Relevanz, die entweder im Ausgangsmaterial (Boden) oder der entstehenden Deckschicht vorkommen können. Technische Adsorbersubstrate weisen dagegen von Beginn an einen sehr hohen und definierten Schadstoffrückhalt auf. Diese Produkte sind jedoch weder als Baumsubstrat geeignet noch befahrbar (Tragfähigkeit).

Übertragbarkeit (Schachtversuch): Der Gesamtaufbau mit Baumsubstraten der Stadt Zürich lässt einen hohen mittleren Rückhalt (> 90 %) von GUS, Schwermetallen und Mikroverunreinigungen erwarten, wie er sonst in sehr guten Adsorberanlagen (z.B. trockenfallende Rinnenfilter) erreicht wird. Der Rückhalt von Schwermetallen ist bereits in der obersten Schicht hervorragend, während der Rückhalt der Mikroverunreinigungen (deren tatsächliche Relevanz im Strassenabwasser noch zu klären ist) erst in der mittleren Schicht erreicht wird. Von diesen werden weniger als 10 % in die unterste Schicht eingetragen. Dennoch ist der hervorragende Rückhalt der Mikroverunreinigungen überraschend, da die Säulenversuche der Einzelschichten unter wassergesättigten Bedingungen zunächst das Gegenteil erwarten liessen. Eine genauere Analyse der Ergebnisse hinsichtlich effektiver Wasserkontaktzeiten zeigt, dass die Schadstoffdynamik im Schachtversuch durch die Ergebnisse der VSA-Säulenversuche bestätigt wird.

Der im Schachtversuch beobachtete Rückhalt ähnelt dem in technischen Adsorberanlagen. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Schachtrigole im Vergleich zu typischen Adsorberanlagen eine deutlich höhere Substratmächtigkeit und eine geringere Anschlussfläche aufweist. Ausserdem ist das Volumen an kontaminiertem Material, das am Ende der Lebensdauer des Substrates ausgetauscht werden muss, bei technischen Adsorberanlagen deutlich geringer.

Unter Berücksichtigung der Ergebnisse des Schachtversuchs lässt sich ableiten, dass ein Grossteil der Schadstofffracht bereits in den ersten Substratschichten (A2 und A1) gebunden wird. Demgemäss kann angenommen werden, dass Substrat B bei Sättigung der Adsorptionsplätze der ersten beiden Substrate eine gute Reserve für den Schadstoffrückhalt darstellt. In diesem Zusammenhang könnte eine periodische Erneuerung der obersten Substratschicht oder das Einbringen einer austauschbaren Schicht, die speziell für den Rückhalt konzipiert ist, von Vorteil sein.

Bewertung: Der getestete dreischichtige Aufbau für Baumrigolen mit den Zürcher Substraten A1, A2 und B (1.2 m Mächtigkeit) ist nach heutigem Kenntnisstand geeignet, eingetragene Schadstoffe aus gering und mittel belastetem Platz- und Strassenabwasser zurückzuhalten, ohne dass diese ins Grundwasser gelangen (von der Sohle der Baumgrube 1 m Abstand bis zum Hochwasserspiegel). Für einen möglichen Einsatz Platz- und Strassenabwässern der VSA-Belastungsklasse «hoch» wird vorsorglich empfohlen, zunächst die Erfahrungen aus Standorten mit geringer und mittlerer Belastung abzuwarten (Monitoring) und die kombinierte Anwendung mit Adsorbermaterial oder Boden zu prüfen.

Die Ergebnisse unterstreichen weiterhin die Notwendigkeit, den Schichtaufbau von Pflanzgruben und Parkplatzbelägen sorgfältig zu planen und die standortbezogene Belastungsklasse des Strassenabwassers zu berücksichtigen. Auch das Verhältnis von

Entwässerungs- zu Versickerungsfläche, dass die Wasser- und Schadstoffmenge beeinflusst, ist zu berücksichtigen. Bei Parkplätzen versickert nur das Niederschlagswasser am Ort des Anfalls.

Methodisches Vorgehen: Der VSA-Säulenversuch bietet einen schnellen und vergleichbaren Ansatz zur Abschätzung des Rückhaltepotenzials für vier Stoffe unter hydraulisch anspruchsvollen Bedingungen (kurze Wasserkontaktzeiten) und zur vergleichbaren Bewertung von Adsorbermaterialien. Im Säulenversuch werden nur gelöste Stoffe dosiert. Im Freiland hingegen ist zu erwarten, dass ein Grossteil der Schwermetalle in partikulärer Form bzw. an Partikel (Ton, Silt) gebunden vorliegt und somit durch die Filterfunktion des Substrates zurückgehalten wird. Die Partikel können aber auch zu Kolmation führen. Die Ergebnisse sind daher nicht uneingeschränkt auf die Einbausituation (Pflanzgruben) übertragbar, sondern erst unter Berücksichtigung der vorgesehenen Anschlussfläche, Schichtmächtigkeit und des Profilaufbaus. Die Kombination von Batch-, Säulen- und Schachtversuch ist vielversprechend sowohl für die Bestimmung des Schadstoffrückhalts einzelner Pflanzsubstrate als auch für die Abklärung der Zulässigkeit von Schichtaufbauten im Hinblick auf den Grundwasserschutz. Werden alle Resultate zusammengeführt, stehen relevante Grundlagen für eine Beurteilung der Zulässigkeit des Zürcher Substrataufbaus im Gewässerschutzbereich A_U zur Verfügung.

Offene Fragen: Die Bedeutung einzelner Komponenten (z.B. Land-, Schwarzerde, Pflanzenkohle) für den Schadstoffrückhalt ist noch zu klären. Durch die Identifizierung der für den Schadstoffrückhalt entscheidenden Parameter können die Pflanzsubstrate noch effektiver auf den Stoffrückhalt ausgerichtet werden. Die Charakterisierung der Materialeigenschaften bildet die Basis für die Qualitätssicherung.

Die Pflanzsubstrate werden im Laufe der Jahre einem natürlichen Bodenbildungsprozess unterliegen, bei dem sich der pH-Wert, der Anteil an organischer Substanz, die biologische Aktivität und die Infiltrationskapazität pro Schicht verändern. Diese Prozesse sind auch von Bodenpassagen oder SABAs mit Bodenfiltern bekannt.

Aufgrund des begrenzten Erfahrungswissens über Pflanzsubstrate wird empfohlen, die Sickerleistung und das Rückhaltevermögen von Baumrigolen über die Zeit (z.B. an realen Standorten) zu beobachten und substratspezifische Veränderungen (Deckschichtbildung, Kolmation, biologische Aktivität) zu erfassen. Daraus können sich Hinweise zur Optimierung der Substrate ergeben (Schichtabfolge, Mächtigkeit etc.).

Unabhängig davon ist zu klären, ob in der Praxis Baumrigolen mit schadstoffhaltigem Strassenabwasser beaufschlagt werden sollen oder ob andere Barrieremassnahmen sinnvoller sind.

7 Literatur

- ASTRA (2023). Strassenabwasserbehandlung an Nationalstrassen. Richtlinie ASTRA 18005.
- BAFU / ASTRA (2021). Strassenabwasserbehandlungsverfahren - Stand der Technik. Dokumentation ASTRA 88002.
- Bahri, M.A., Calvo, L., Lemus, J., Gilarranz, M.A., Palomar, J., Rodriguez J.J. 2012. Mechanic understanding of the behavior of diuron in the adsorption from water onto activated carbon. *Chemical Engineering Journal* 198-199.
- Baudirektion Kanton Zürich, Tiefbauamt (TBA), 2020. Funktionskontrollen SABA, K52, Forchstrasse. SABA 5, Tüftal.
- Burkhardt, M., Schmidt, S., Bigler, R., 2017. VSA-Leistungsprüfung. *Aqua und Gas* N°17, 33-41, 2017.
- Burkhardt, M., Kulli, B., Saluz, A. (2022a): Schwammstadt im Strassenraum – Neue Herausforderungen für blau-grüne Infrastrukturen bei der Strassenentwässerung, *Aqua und Gas*, 10.
- Grün Stadt Zürich (GSZ), 2023. Baumgruben mit Baums substrat 2.0, Merkblatt für Planende.
- Liu, Y., Xu, Z., Wu, X., Gui, W., Zhu, G., Zhu, G. 2010. Adsorption and desorption behavior of herbicide diuron on various Chinese cultivated soils. *Journal of Hazardous Materials* 178: 462-468.
- OECD (2000): Test No. 106: Adsorption -- Desorption Using a Batch Equilibrium Method. OECD Guidelines for the Testing of Chemicals, Section 1, OECD Publishing, Paris.
- Patrick M., Burkhardt, M., 2024. Schadstoffrückhalt von Fugensubstraten für Parkplatzbeläge und Pflanzsubstraten. Bericht im Auftrag des Kanton Basel-Stadt.
- Perić, J., Trgo, M., Medvidović, N.V. 2004. Removal of zinc, copper and lead by natural zeolite – a comparison of adsorption isotherms. *Water Research* 38: 1893-1899.
- Petter, F.A., Ferreira, T.S., Sinhoro A.P., Lima, L.B., Almeida, F.A., Pacheco, L.P., Silva, A.F. 2019. Biochar increases diuron sorption and reduces the potential contamination of subsurface water with diuron in sandy soil. *Pedosphere* 29(6): 801-809.
- Tomczyk., A., Boguta, P., Sokolowska, Z. 2019. Biochar efficiency in copper removal from Haplic soils. *Environmental Science and Technology* 16:4899-4912.
- VSA (2023): Leistungsprüfung für Adsorbentmaterialien und dezentrale technische Anlagen zur Behandlung von Niederschlagswasser. 2. Aufl., VSA Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute, Glattbrugg.
- Yu, X., Ying, G., Kookana, R.S. 2006. Sorption and desorption behaviours of diuron in soils amended with charcoal. *Journal of agricultural and food chemistry* 54: 8545-8550.

8 Anhang

Tabelle 12: Gesamtgehalte von 29 Elementen in den drei Baumsubstraten und Richtwerte der Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBo).

Element	Gehalt (mg/kg)			
	A1	A2	B	VBBo
Aluminium	11'700	10'700	10'400	-
Antimon	<3.0	<3.0	<3.0	-
Arsen	<7.00	<7.00	9.14	-
Barium	32	33	22	-
Blei	6.6	7.3	4.4	50
Bor	37.6	26.1	62.1	-
Cadmium	<0.40	<0.40	<0.40	0.8
Calcium	229'000	241'000	150'000	-
Chrom (gesamt)	28	23.8	43.1	50
Eisen	15'000	12'700	22'900	-
Kalium	5'640	3'730	7'680	-
Kobalt	5.6	4.2	5.4	-
Kupfer	7.9	10.7	3.8	40
Magnesium	6'250	6'180	8'620	-
Mangan	355	372	303	-
Molybdän	<0.60	<0.60	<0.60	5
Natrium	415	428	331	-
Nickel	15.1	13.2	12	50
Phosphor (gesamt)	273	89	108	-
Quecksilber	0.04	0.03	<0.03	0.5
Selen	<5.0	<5.0	<5.0	-
Silber	<2.00	<2.00	<2.00	-
Strontium	377	284	253	-
Thallium	<1.5	<1.5	<1.5	-
Titan	190	196	162	-
Uran	1.7	1.1	0.6	-
Vanadium	24.5	25	31.5	-
Zink	25.8	29.1	23	150
Zinn	<3.6	<3.6	<3.6	-

Tabelle 13: Konzentrationen von 27 Elementen in den Eluaten der Substrate A1, A2 und B.

Elemente	Konzentration (µg/l)		
	A1	A2	B
Aluminium	66.7	113.1	197.2
Antimon	<3	<3	<3
Arsen	<7	<7	<7
Barium	<10	<10	<10
Blei	<0.6	<0.6	<0.6
Bor	< 21	<21	<21
Cadmium	<0.4	<0.4	<0.4
Calcium	17.9	7.7	<3
Chrom	<4	<4	<4
Cobalt	<1.5	<1.5	<1.5
Eisen	<40	<40	<40
Kalium	2.0	2.4	32.3
Kupfer	<4	<4	<4
Magnesium	1.3	1.1	1.1
Mangan	<4	<4	<4
Molybdän	<0.6	<0.6	<0.6
Natrium	0.5	0.6	1.7
Nickel	<4	<4	<4
Phosphor	<70	<70	<70
Quecksilber	<0.2	<0.2	<0.2
Selen	<5	<5	<5
Silber	<2	<2	<2
Strontium	90.9	32.8	22.6
Tellur	<1.5	<1.5	<1.5
Titan	<4	<4	<4
Uran	<0.5	<0.5	<0.5
Vanadium	<4	<4	<4
Zinn	<4	<4	<4
Zink	<9	<9	<9

Tabelle 14: Hydraulische Bedingungen im VSA-Säulenversuch.

	Filtergeschwindigkeit (m/h)	Filtergeschwindigkeit (L/h)	Sickerleistung (L/(min·m ²))
Testabschnitt 1	8.95	45	149
Testabschnitt 2	2.15	10.8	36
Testabschnitt 3	0.895	4.5	15
Remobilisierung	2.15	10.8	36

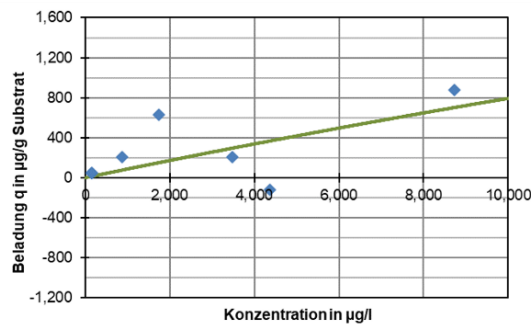
Tabelle 15: Blindprobe und Wiederfindungen in den Ausgangslösungen der VSA-Säulentests.

	Wiederfindung (% Ausgangslösung)							Blindprobe (mg/L)
	A1	A2	B	SABA-Bülach	Bankett Bülach-Süd	SABA-Egg	Mulde-Rigole	
Diuron	102	100	98	102	100	102	102	<LOQ (0.00005)
Mecoprop	81	95	100	106	113	109	109	<LOQ (0.00005)
Kupfer (gesamt)	106	100	101	104	105	107	107	<LOQ (0.004)
Kupfer (gelöst)	114	109	110	107	109	113	113	<LOQ (0.004)
Zink (gesamt)	108	102	105	103	101	103	103	<LOQ (0.009)
Zink (gelöst)	113	102	115	99	105	114	114	0.062 (12.4 %)

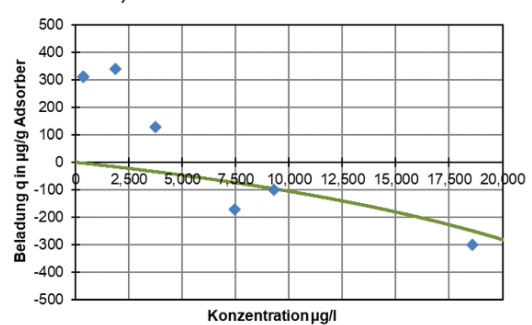
Tabelle 16: Zielkonzentrationen von Kupfer, Zink, Diuron und Mecoprop zur Bestimmung des Adsorptionsverhaltens. Der pH-Wert wurde nach 24 h Schütteln bestimmt.

Ansatz	Kupfer (mg/L)	Zink (mg/L)	Diuron	Mecoprop (mg/L)	pH (24 h)		
					A1	A2	B
Blind	40	20	15	10	4.4	4.4	4.4
1	0.8	0.4	0.3	0.2	7.9	7.6	7.7
2	4	2	1.5	1	7.3	6.9	6.7
3	8	4	3	2	6.8	6.6	6.5
4	16	8	6	4	6.5	6.4	6.3
5	20	10	7.5	5	6.4	6.3	6.2
6	40	20	15	10	6.2	6.2	6.1

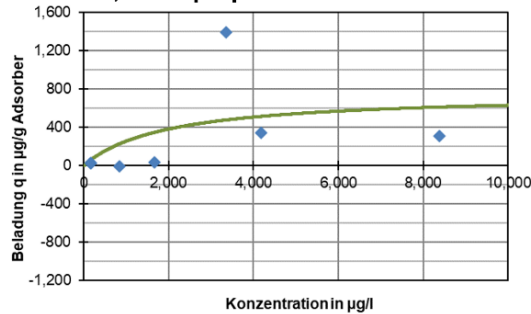
A1 < 2 mm, Mecoprop



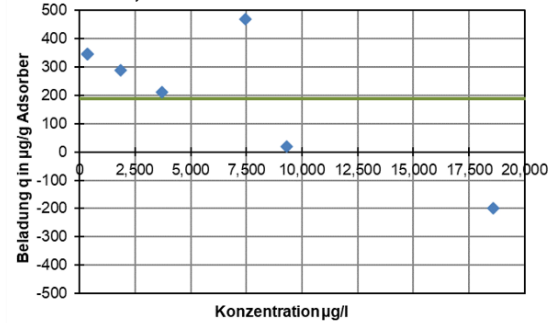
A1 < 2 mm, Zink



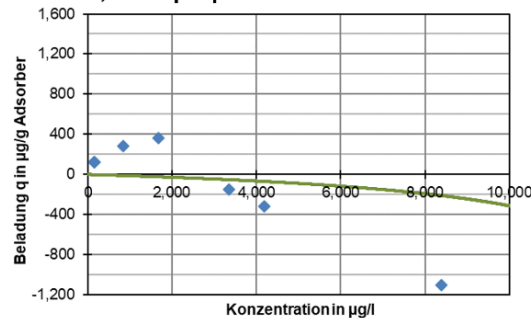
A2 < 2 mm, Mecoprop



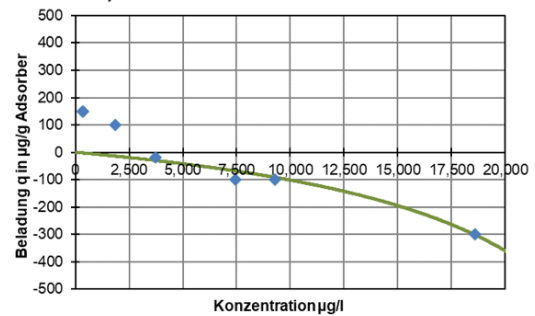
A2 < 2 mm, Zink



B < 2 mm, Mecoprop



B < 2 mm, Zink



— Langmuir

Abbildung 20: Adsorptionsverhalten und Langmuir-Adsorptionsisothermen von Mecoprop (links) und Zink (rechts) für die Feinanteile (< 2 mm) der Baumsubstrate A1, A2 und B.

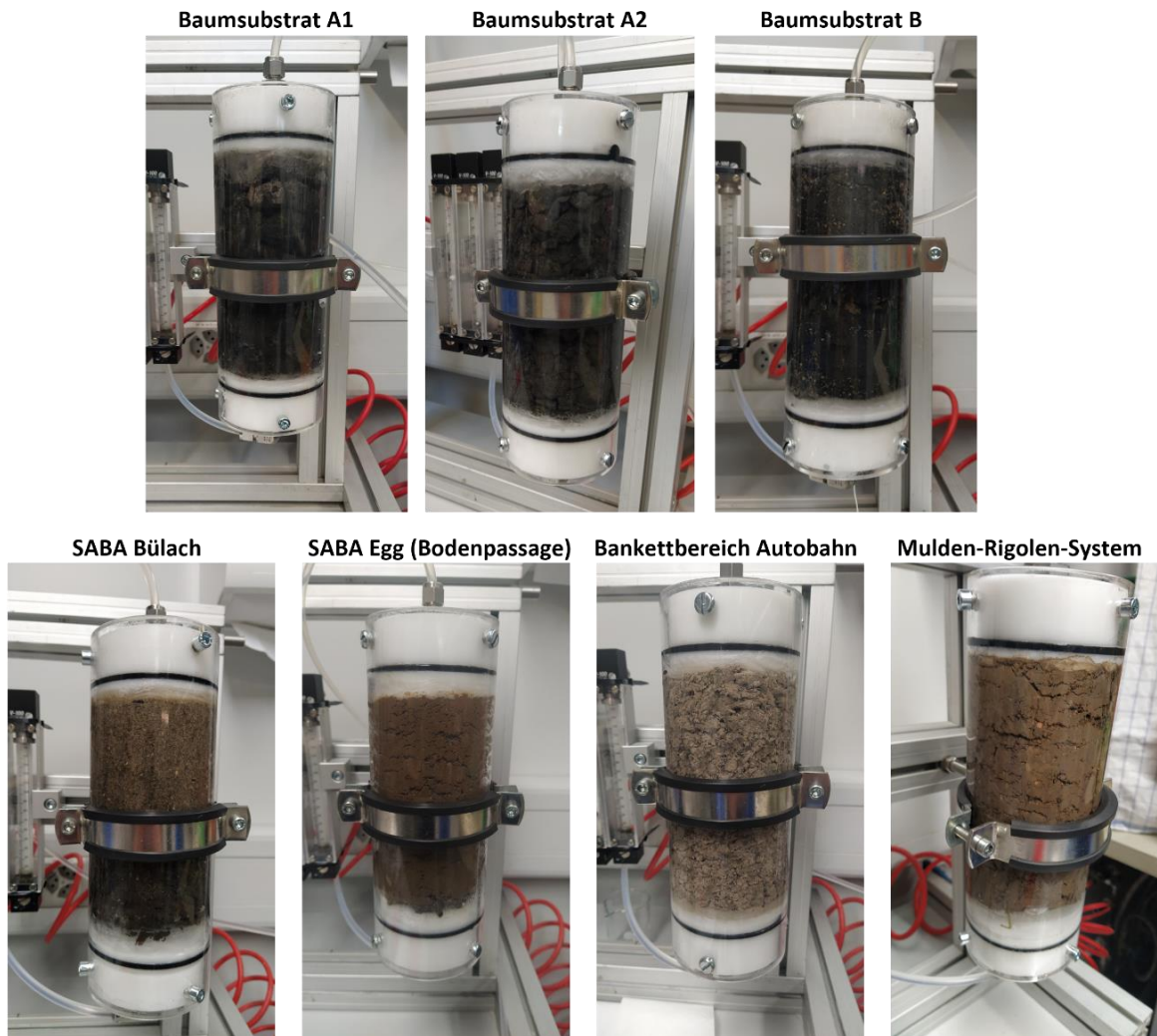


Abbildung 21: Baumsubstrate A1, A2 und B, sowie Substrate SABA Bülach, SABA Egg, Bankett Bülach-Süd und Mulde-Rigole Wädenswil in Säulen für den VSA-Säulentest.

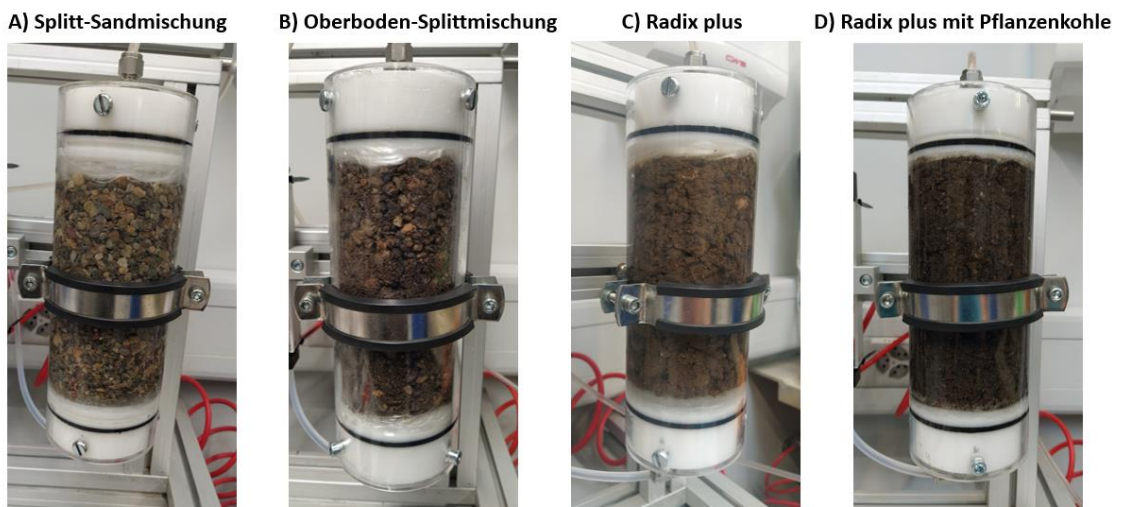


Abbildung 22: Fugensubstrate (Splitt-Sandmischung, Oberboden-Splittmischung) und Baumsubstrate (Radix plus, Radix plus mit Pflanzenkohle) in Säulen für den VSA-Säulentest.

A1

	Metalle				Pestizide				
	Kupfer [%]		Zink [%]		Mecoprop [%]		Diuron [%]		
Test 1	38.1	●	0	22.4	●	0	6.6	●	0
Test 2	38.4	●	0	18.9	●	0	5.2	●	0
Test 3	50.9	●	0	22.8	●	0	5.2	●	0
Tot:		●	0		●	0		●	0

A2

	Metalle				Pestizide				
	Kupfer [%]		Zink [%]		Mecoprop [%]		Diuron [%]		
Test 1	38.3	●	0	27.6	●	0	2.3	●	0
Test 2	48.1	●	0	32.0	●	0	8.4	●	0
Test 3	62.9	●	0	41.6	●	0	20.2	●	0
Tot:		●	0		●	0		●	0

B (<32 mm)

	Metalle				Pestizide				
	Kupfer [%]		Zink [%]		Mecoprop [%]		Diuron [%]		
Test 1									
Test 2	99.2	●	1	98.3	●	1	98.5	●	1
Test 3	99.2	●	1	90.8	●	1	96.0	●	1
Tot:		●	2		●	2		●	2

Abbildung 23: Beurteilung des Stoffrückhalts von drei Baumsubstraten. Beim Substrat B wurde nur die Fraktion < 32 mm des Gesamtsubstrats und aufgrund der zu geringen Wasserdurchlässigkeit Testabschnitt 1 (45 l/h) untersucht.

SABA Bülach

	Metalle				Pestizide				
	Kupfer [%]		Zink [%]		Mecoprop [%]		Diuron [%]		
Test 1	99.2	●	1	67.5	●	0	1.9	●	0
Test 2	100.0	●	1	93.5	●	1	0.0	●	0
Test 3	100.0	●	1	97.8	●	1	0.0	●	0
Tot:		●	3		●	2		●	0

Bankettbereich

	Metalle				Pestizide				
	Kupfer [%]		Zink [%]		Mecoprop [%]		Diuron [%]		
Test 1	28.0	●	0	17.5	●	0	3.5	●	0
Test 2	36.0	●	0	16.2	●	0	7.2	●	0
Test 3	85.0	●	0.5	66.3	●	0	7.4	●	0
Tot:		●	0.5		●	0		●	0

SABA Egg

	Metalle				Pestizide				
	Kupfer [%]		Zink [%]		Mecoprop [%]		Diuron [%]		
Test 3*	96.6	●	1	93.2	●	1	0.0	●	0

Mulden-Rigolen-System

	Metalle				Pestizide				
	Kupfer [%]		Zink [%]		Mecoprop [%]		Diuron [%]		
Test 3*	93.1	●	1	77.8	●	0.5	99.7	●	1

Abbildung 24: Beurteilung des Stoffrückhalts der Substrate von zwei SABAs, einem Bankett an der Autobahn und der Mulde-Rigole Wädenswil. *Aufgrund der geringen Wasserdurchlässigkeit konnte nur Testabschnitt 3 und die Remobilisierung nur mit reduziertem Durchfluss von 1 l/h durchgeführt werden.

Splitt-Sandmischung

	Metalle				Pestizide			
	Kupfer [%]		Zink [%]		Mecoprop [%]		Diuron [%]	
Test 1	26.1	●	0	10.4	●	0	0	●
Test 2	37.1	●	0	18.8	●	0	0	●
Test 3	79.2	●	0.5	56.3	●	0	4.8	●
Tot:		●	0.5		●	0		●

Oberboden-Splittmischung

	Metalle				Pestizide			
	Kupfer [%]		Zink [%]		Mecoprop [%]		Diuron [%]	
Test 1	80.4	●	0.5	81.3	●	0	0	●
Test 2	80.0	●	0.5	77.1	●	0	0	●
Test 3	86.8	●	0.5	83.3	●	6.1	2.3	●
Tot:		●	1.5		●	0		●

Radix plus

	Metalle				Pestizide			
	Kupfer [%]		Zink [%]		Mecoprop [%]		Diuron [%]	
Test 1	37.8	●	0	33.3	●	2.2	2.3	●
Test 2	46.1	●	0	33.3	●	0	0	●
Test 3	60.8	●	0	43.1	●	0	4.7	●
Tot:		●	0		●	0		●

Radix plus mit Pflanzenkohle

	Metalle				Pestizide			
	Kupfer [%]		Zink [%]		Mecoprop [%]		Diuron [%]	
Test 1								
Test 2	92.3	●	1	91.8	●	0	14.4	●
Test 3	93.6	●	1	87.8	●	0	6.3	●
Tot:		●	2		●	0		●

Abbildung 25: Beurteilung des Stoffrückhalts der Fugen- und Pflanzsubstrate. Beim Substrat «Radix plus mit Pflanzenkohle» konnte der erste Testabschnitt aufgrund der geringen Wasserdurchlässigkeit nicht durchgeführt werden.

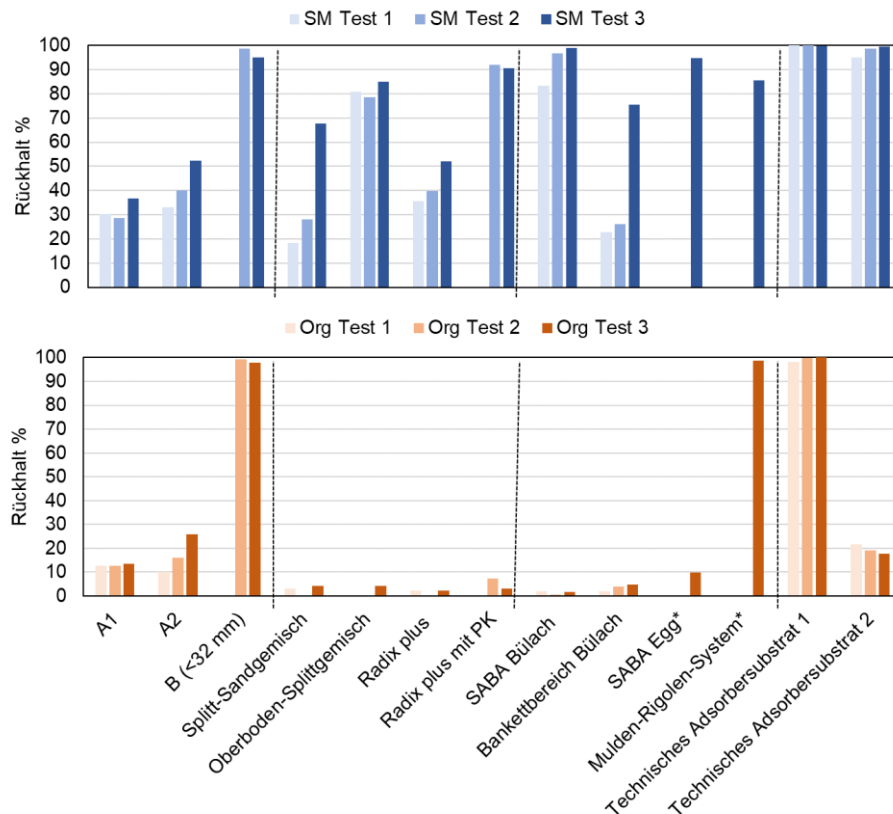


Abbildung 26: Rückhalt von allen im Säulenversuch getesteten Substraten .

Tabelle 17: pH-Wert und elektrische Leitfähigkeit im Ablauf der Testabschnitte 1 bis 3.

	Testabschnitt 1		Testabschnitt 2		Testabschnitt 3	
	pH	LF ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	pH	LF ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	pH	LF ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
Baumsubstrat A1	6.4	873	6.8	890	7.0	917
Baumsubstrat A2	6.5	872	6.8	895	7.2	916
Baumsubstrat B	-	-	7.4	1002	7.8	981
Saba Bülach	6.7	922	7.4	955	8.4	959
Saba Egg	-	-	-	-	7.9	952
Bankettbereich	6.5	893	7.2	938	7.8	970
Mulden-Rigolen-System	-	-	-	-	7.8	971
Splitt-Sandmischung	6.3	898	6.9	926	7.6	966
Oberboden-Splittmischung	6.4	925	6.8	941	7.4	928
Radix plus ohne PK	6.2	890	6.5	898	6.9	928
Radix plus mit PK	-	-	6.8	964	7.1	945



Abbildung 27: Aufbau der Schachtrigole mit den drei Baumsubstraten.

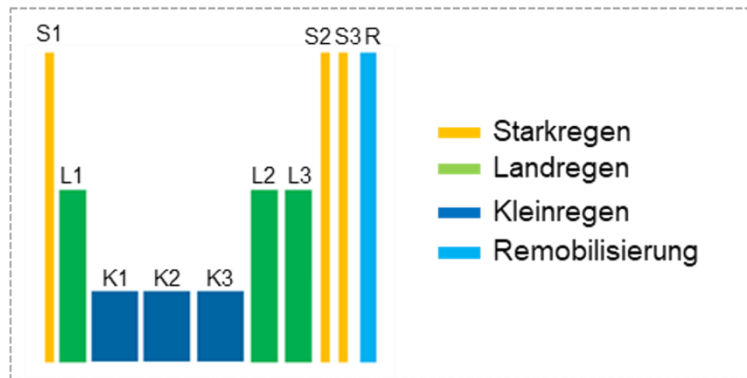


Abbildung 28: Testplan für die Schachtrigole bestehend aus drei Starkregen-, Landregen- und Kleinregenspenden sowie einem Remobilisierungstest. Die gesamte Testdauer betrug 3 Wochen.

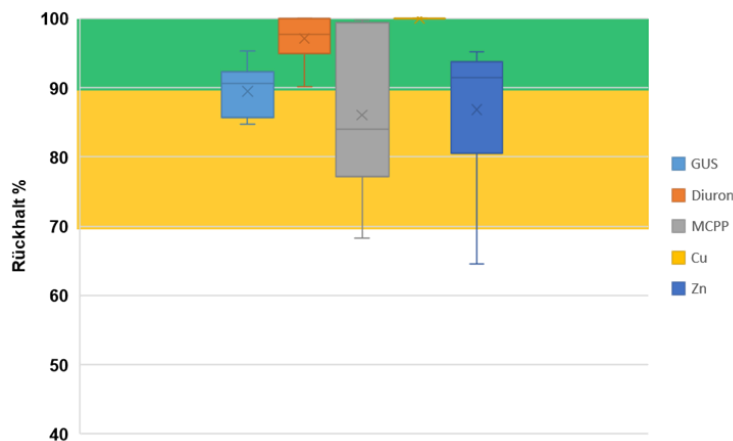


Abbildung 29: Boxplot des Schadstoffrückhalts (GUS, Diuron, Mecoprop, Kupfer und Zink) im Ablauf der Schachtrigole für alle Regenspenden.

Tabelle 18: Blindproben und Wiederfindungen in den Zulaufproben des Schachtversuchs.

	Wiederfindung (% Ausgangslösung)			Blindprobe 1 Spülung (mg/L)	Blindprobe 2 Konditionierung (mg/L)
	Zulauf 1	Zulauf 2	Zulauf 3		
Diuron	97	107	99	-	-
Mecoprop	104	111	111	-	-
Kupfer (gesamt)	105	110	98	<LOQ (0.004)	0.004
Zink (gesamt)	98	101	93	<LOQ (0.02)	<LOQ (0.02)

Tabelle 19: Konzentrationen und prozentuale Remobilisierung von Diuron, Mecoprop, Zink und Kupfer im Ablauf der Schachtrigole während des Remobilisierungstests.

Probe	Diuron		MCPP		Kupfer (mg/L)		Zink (mg/L)	
	Konz. (µg/L)	Remob. %	Konz. (µg/L)	Remob. %	Konz. (µg/L)	Remob. %	Konz. (µg/L)	Remob. %
Ablauf (1.2 m)	0.72	0.04	2.08	0.11	< 4.0	< 0.2	38.7	1.98

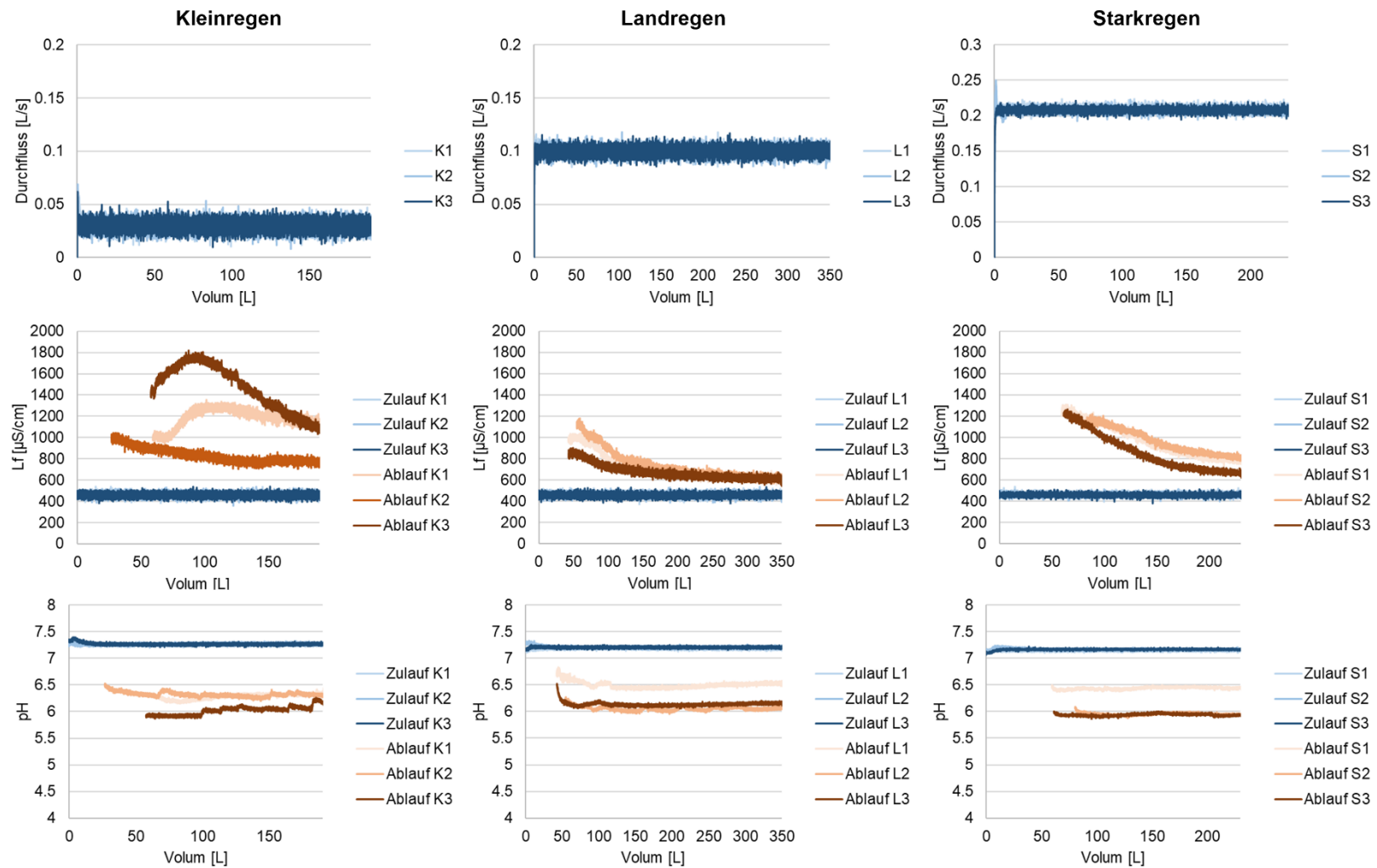


Abbildung 30: Durchflussmenge, elektrische Leitfähigkeit und pH-Wert im Zu- und Ablauf der Schachtrigole für alle Regenspenden (Kleinregen, Landregen, Starkregen).

