SCHADSTOFFRÜCKHALT VON SUBSTRATEN

UNTERSUCHUNG VON SUBSTRATEN FÜR BAUMRIGOLEN UND SICKERBELÄGE AUS ZÜRICH UND BASEL-STADT

Substrate für Baumrigolen oder Sickerbeläge sind wichtige Elemente des Schwammstadt-Prinzips. Mit dem Platz- und Strassenabwasser gelangen jedoch auch Schadstoffe in die Substrate. Erstmals wurde der Rückhalt verschiedener Stoffe untersucht und die Eignung aus Sicht des Gewässerschutzes beurteilt.

Michael Burkhardt, Michael Patrick
OST – Ostschweizer Fachhochschule, Institut für Umwelt- und Verfahrenstechnik (UMTEC), Rapperswil

RÉSUMÉ

RÉTENTION DES POLLUANTS PAR LES SUBSTRATS POUR LES FOSSES D'ARBRES ET LES REVÊTEMENTS PERMÉABLES

Dans l'espace routier, on intègre de plus en plus d'éléments de ville-éponge dans lesquels les eaux polluées des places et des routes sont rejetées. Toutefois, il n'est pas clair si les substrats utilisés dans les fosses de plantation et les revêtements de pavés perméables retiennent les polluants. Des essais en laboratoire sur la rétention des polluants et la remobilisation par le sel de déneigement ont été réalisés pour sept substrats pour joints et plantations ainsi que pour quatre matériaux utilisé à Zurich et à Bâle-Ville. Les substrats ont montré une rétention relativement élevée des métaux lourds dans les tests en colonne, mais celle-ci était inférieure à celle des substrats spécialement conçus pour le traitement des eaux usées routières. Tous les substrats ont montré une faible rétention des micropolluants. La remobilisation des substances par le sel de déneigement était toujours inférieure à 1%. Les substrats pour arbres utilisés à Zurich ont montré une rétention élevée et une remobilisation inférieure à 1%, pour les MES, métaux lourds et micropolluants sur une structure de profil à l'échelle. La structure zurichoise pour les fosses d'arbres est appropriée pour retenir les mêmes substances provenant des eaux de voirie des classes de charge «faible» et «moyenne» selon VSA, sans que ceux-ci n'atteignent les eaux souterraines. Les substrats pour joints de pavés utilisés à Bâle conviennent également pour une pollution faible et moyenne en MES et métaux lourds.

REGENWASSER IM STRASSENRAUM

Im urbanen Raum dienen blau-grüne Schwammstadt-Elemente dazu, die Folgen von Hitze- und Trockenperioden sowie Starkregenereignissen zu minimieren und die Aufenthaltsqualität zu erhöhen [1, 2]. Eine Schlüsselrolle bei der Regenwasserbewirtschaftung kommt dabei der Bepflanzung zu, insbesondere Bäumen. Aufgrund der knappen Flächenverfügbarkeit und der besonderen Anforderungen können jedoch oft keine natürlichen Böden eingesetzt werden. Deshalb werden in Pflanzgruben teilweise spezielle Substrate als Alternative verwendet.

Pflanzsubstrate bestehen in der Regel aus mineralischen Gerüstmaterialien und organischen Komponenten (z.B. Kompost) und sind vorrangig auf Strukturstabilität und Tragfähigkeit ausgelegt [1]. Solche Substrate bieten den Pflanzen einen Wurzelraum mit ausreichendem Gasaustausch, halten einerseits Niederschlagswasser zurück und leiten es andererseits durch die Grobporen schnell ab. Typischerweise werden die Substrate schichtweise in Pflanz- bzw. Baumgruben eingebaut *(Fig. 1)*.

Mit dem Platz- und Strassenabwasser gelangen auch Schadstoffe in die Pflanzgruben. Zu den partikelförmigen Belastungen (gesamte ungelöste Stofffraktion, GUS) zählen beispielsweise Abrieb von Reifen, Bremsen oder der Fahrbahn sowie Schwermetalle wie Zink und Kupfer, die ausgefällt oder an andere Partikel wie der Tonfraktion gebunden vorliegen [1]. Zu den gelösten

Kontakt: M.Burkhardt, michael.burkhardt@ost.ch

(© AdobeStock)

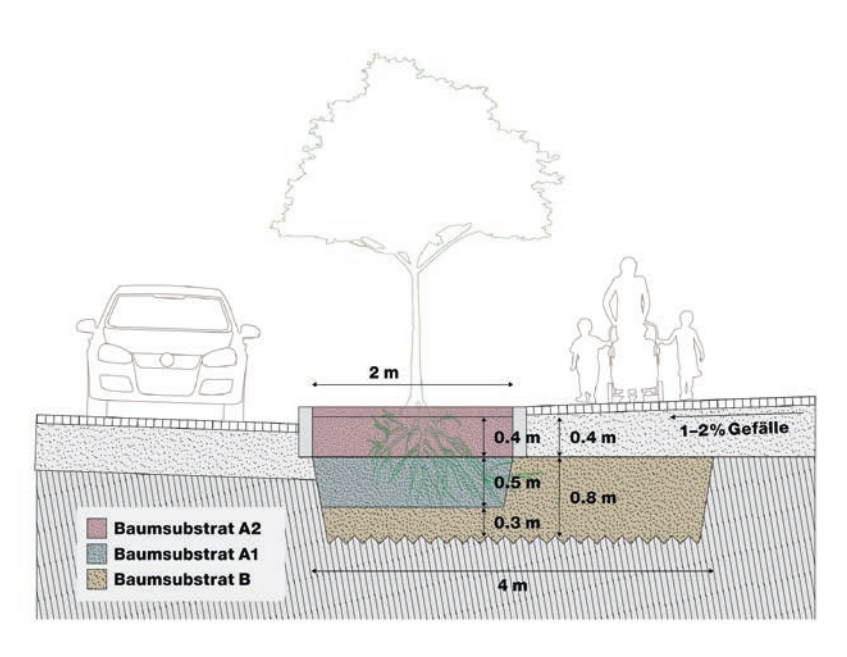

Fig. 1 Gestaltung einer Baumgrube in der Stadt Zürich [3]. Baumsubstrat A2: feine Anteile, nährstoffreich, belebt, 2,5 m³; Baumsubstrat A1: mineralisch, hohes Porenvolumen, 3 m³; Baumsubstrat B: Drainschicht Schotter, 29 m³.

Stoffen zählen wiederum Schwermetalle und organische Mikroverunreinigungen wie 6PPD-Chinon und Benzothiazol aus den Reifen (Pneuabrieb).

Aus Sicht des Grundwasserschutzes sind Pflanzsubstrate kritisch zu beurteilen, da die heutigen Baumrigolen nicht auf Schadstoffrückhalt ausgelegt sind. Die Eignung für die verschiedenen Belastungsklassen von Platz- und Strassenabwasser ist daher unklar. Gemäss Gewässerschutzgesetz dürfen wassergefährdende Stoffe nicht in Gewässer eingeleitet oder versickert werden. Es ist deshalb abzuklären, ob die Substrate sowohl partikuläre als auch gelöste Schadstoffe im Sinne des Grundwasserschutzes zurückhalten. Eine entsprechende Klärung ist umso dringlicher, da die Umsetzung von Schwammstadt-Massnahmen stark zunimmt.

Neben Pflanzsubstraten werden weitere spezielle Substrate als Schwammstadt-Elemente verwendet, beispielsweise als Fugenmaterial von wasserdurchlässigen Belägen oder in dezentralen Adsorberanlagen. Adsorbersubstrate für technische Anlagen zur Regenwasserbehandlung sind Materialien, die gezielt auf die Rückhaltung von Schadstoffen ausgerichtet sind [4, 5]. Fugensubstrate für Pflasterbeläge dienen der Stabilisierung der Belagsfläche sowie der Sicherstellung der Wasserdurchlässigkeit. Gelegentlich werden sie zur Schadstoffrückhaltung eingesetzt und hierfür auch mit Adsorbermaterialien oder Boden kombiniert. Fugensubstrate werden teilweise auch zur Begrünung verwendet. Sofern eine Begrünung vorgesehen ist, stehen für die Ansaat geeignete Materialmischungen zur Verfügung, die jedoch in ihrer Zusammensetzung von den unbegrünten Varianten abweichen können.

Aus Untersuchungen naturnaher Strassenwasserbehandlungsanlagen (SABA) ist bekannt, dass sich auf rein mineralischen Sandfiltern mit Schilfbewuchs eine Deckschicht aufbaut, die Partikel und Schwermetalle gut zurückhält. Der Rückhalt der Schwermetalle ist vor allem darauf zurückzuführen, dass mehr als 50% an Partikel gebunden vorliegen. Ein hoher organischer Anteil sorgt für eine zusätzliche adsorptive Wirkung.

ZIELSETZUNG

Zur Abschätzung des Rückhaltevermögens für Schadstoffe von Pflanz- und Fugensubstraten im Vergleich zu SABA-Materialien für Schadstoffe aus Platz- und Strassenabwässern wurden verschiedene Laborversuche, teils in Anlehnung an die VSA-Leistungsprüfung [6], durchgeführt. Ausgewählt wurden Substrate, die von den jeweiligen Ämtern der Städte bzw. der Kantone Basel-Stadt und Zürich verwendet werden:

- 3 Baumsubstrate Stadt Zürich
- 2 Baumsubstrate Kt. Basel-Stadt
- 2 Fugensubstrate Kt. Basel-Stadt
- 4 Materialien von Anlagen zur Strassenabwasserbehandlung (Kt. Zürich)

Die Substrate können nur zur Versickerung von Strassenabwasser eingesetzt werden, wenn sie ein ausreichend hohes Schadstoffrückhaltevermögen aufweisen. Auf der Grundlage der Resultate sollten die Substrate erstmals gewässerschutzrechtlich beurteilt werden. Es war dabei nicht das Ziel, die Standzeit von Baumgruben in Abhängigkeit von der Beladungskapazität oder dem hydraulischen Langzeitverhalten zu ermitteln. Sämtliche Ergebnisse stehen bei *Patrick et al.* [7] zur Verfügung.

SUBSTRATE

BAUMSUBSTRATE FÜR PFLANZGRUBEN

Seit wenigen Jahren werden in Baumgruben der Stadt Zürich zwei nicht überbaubare (A1, A2) und ein überbaubares Pflanzsubstrat (B) eingesetzt *(Fig. 2)* [3]. Die unterste Schicht besteht aus Substrat B (0,3 m) und dient den Bäumen als potenzieller Wurzelraum bzw. -korridor. Darüber folgen Baumsubstrat A1 (0,5 m) und A2 (0,4 m) *(Fig. 1)*. Die Substrate sind eine

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%
Pflanzenkohle mit Komposttee	5%	5%	10%	25%
Landerde	10%	15%	–	
Schwarzerde	–	–	5%	12%

Tab. 1 Zusammensetzung (Massen-%) der drei Zürcher Baumsubstrate [3] und von Prüfsubstrat B. Landerde: A-Horizont (Oberboden) mit Anteil organischer Substanz < 5%, Schwarzerde: Kompostrotte mit EBC-Pflanzenkohle.

Fig. 2 Untersuchte Substrate: A, B) Zürcher Baumsubstrate A1 und B; C) Basler Baumsubstrate Radix plus mit kompostierter Pflanzenkohle; D) Splitt/Sand-Gemisch.

Mischung aus Mischgestein/-schotter, Blähschiefer, Bruchsand, Pflanzenkohle (Qualität EBC-AgroBio, mit Komposttee aufgeladen) und sogenannter Land- oder Schwarzerde *(Tab. 1)*. Bei Substrat B ist der hohe Steinanteil (> 32 mm) auffällig. Die Zusammensetzung ist vergleichbar zur Rezeptur eines «Stockholmer Substrats» [1, 3]. Das sogenannte «Prüfsubstrat B» entspricht dem Substrat B ohne den Steinanteil (> 32 mm).

Die Grundrezeptur des überbaubaren Baumsubstrats im Kanton Basel-Stadt heisst *Radix plus*® und weist eine Körnung von 0 bis 32 mm auf *(Fig. 2)* [7]. Es handelt sich um eine Mischung aus Splitt, Sand, Blähton, Oberboden und Komposterde. Der Granitsplitt und der Sand sorgen für eine tragfähige Struktur, während die übrigen Bestandteile die Wasserhaltekapazität, die Nährstoffversorgung und das Schadstoffbindungsvermögen fördern sollen. Die Grundrezeptur wurde sowohl als Variante ohne Pflanzenkohle (Komposterde ohne Pflanzenkohle, Radix plus ohne) als auch mit kompostierter Pflanzenkohle (Komposterde mit 50 Vol.-% Pflanzenkohle, Radix plus mit) untersucht. Die genaue Rezeptur ist vertraulich.

SUBSTRATE FÜR PFLASTERFUGEN

Aus Basel-Stadt wurden ebenfalls zwei Fugenpflastersubstrate berücksichtigt, die in wasserdurchlässigen Parkplatzbelägen eingesetzt werden *(Fig. 2)*: Das Oberboden/Splitt-Gemisch setzt sich aus natürlichem Oberboden (17 Masse-%), Splitt (4–8 mm, 82 Masse-%) und gesiebter Komposterde (0–8 mm, 1,0 Masse-%) und das Splitt/Sand-Gemisch aus Splitt (4–8 mm, 82 Masse-%) und Sand (0,5–2 mm, 18 Masse-%) zusammen [7]. Der organische Anteil des Oberboden/Splitt-Gemischs soll die Ansaat in den Fugen begünstigen und gelöste Schadstoffe besser binden als das mineralische Splitt/Sand-Gemisch.

MATERIALIEN FÜR STRASSENABWASSER

Aus dem Kanton Zürich wurden Materialien aus zwei Strassenabwasser-Behandlungsanlagen (SABA), einem Autobahnbankett und einem Mulden-Rigolen-System einbezogen:

- SABA Bülach West (Baujahr 2018): schilfbepflanzter Sandfilter mit geringmächtiger Deckschicht (2 bis 3 cm)
- SABA Egg (Baujahr 2008): wiesenbewachsener Retentionsbodenfilter, aus dem der Oberboden untersucht wurde
- Autobahnbankett Bülach Süd (Baujahr 2019): Kies/Sand-Gemisch mit erhöhtem Mittelsandanteil
- Mulden-Rigolen-System in Wädenswil (Baujahr 2015): 50:50 Oberboden-Sandgemisch

Bei den SABA und dem Bodenfilter wurden ungestörte Proben für den VSA-Säulenversuch entnommen. Im Bankettbereich konnte nur eine gestörte Probe entnommen werden.

VORGEHEN

In Säulen- und Schachtversuchen wurde der Rückhalt von zwei gelösten Schwermetallen (Kupfer, Zink) und zwei Mikroverunreinigungen (Diuron, Mecoprop) sowie die Remobilisierung durch Tausalz (Natriumchlorid) bilanziert, im Schachtversuch auch der Rückhalt von GUS (Quarzmehl Millisil W4, Partikelgrösse d50 0,065 mm). Die applizierten Stoffe dienen als Leitsubstanzen für Stoffe mit ähnlichem Transportverhalten, die in urbanen Niederschlagsabwässern weit verbreitet vorkommen.

Die Säulenversuche, durchgeführt gemäss VSA [6], bilden die erste Grundlage für die Beurteilung der elf Substrate. Dabei durchströmt eine Stofflösung bei je drei Geschwindigkeiten von unten nach oben die Probe und aus den Zu- und Ablaufkonzentrationen werden der Stoffrückhalt sowie die -remobilisierung ermittelt. Die Steine (> 32 mm) urden aus dem Baumsubstrat B aussortiert, da sie für die Adsorption nicht relevant sind und die Versuchsdurchführung unmöglich machten. Dadurch erhöhte sich der Anteil an Pflanzenkohle und Schwarzerde im Prüfsubstrat B um rund das Dreifache *(Tab. 1)*.

In einem Profilaufbau, der einer realen Baumrigole entspricht, wurde für die drei Zürcher Substrate der Stoffrückhalt in Anlehnung an den simulierten Feldtest für Adsorberanlagen gemäss VSA [6] ermittelt. In diesem Schachtversuch (1,2 m Tiefe, 1,2 m Durchmesser) wurden die Baumsubstrate A1, A2 und B mit praxisüblichen Schichthöhen eingebaut *(Fig. 3)*. Das unterste Substrat befand sich auf einem Gitter (GFK) mit Vliesabdeckung, sodass das Sickerwasser frei abfliessen konnte. Zusätzlich wurde das Sickerwasser an den Schichtgrenzen (A2/A1, A1/B) beprobt. Die Art und Reihenfolge der neun Prüfregenspenden, je 3-mal Stark-, Land- und Kleinregen, war wie folgt:

Starkregen

13,3 mm in 20 min bzw. 111 l/(s*ha), ca. 222 mm pro Regen auf Versickerungsfläche

Landregen

20 mm in 1 h bzw. 56 l/(s*ha), ca. 332 mm pro Regen auf Versickerungsfläche

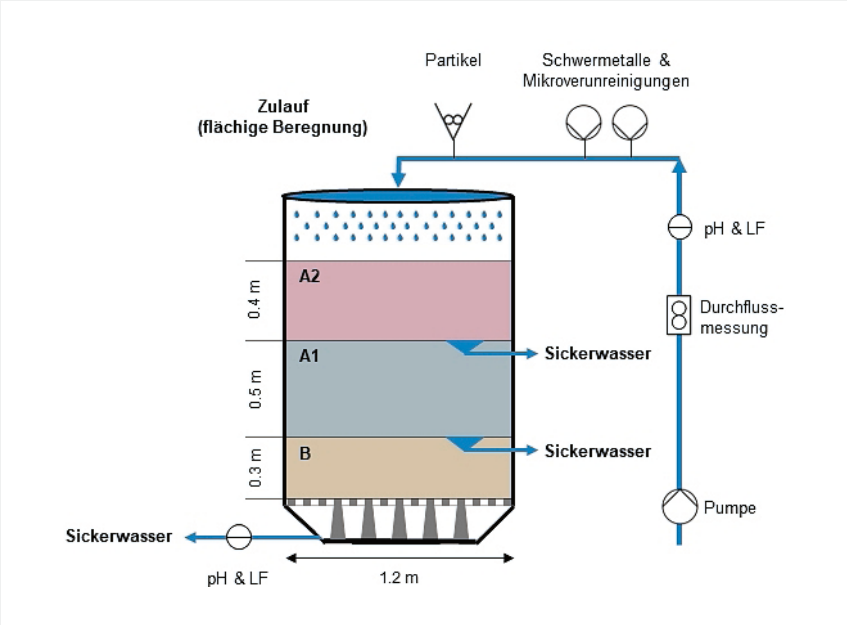

Fig. 3 Schematischer Aufbau der Schachtrigole mit Zürcher Baumsubstrat und Versuchsanordnung.

Kleinregen
10 mm in 120 min bzw. 14 l/(s*ha), ca. 166 mm pro Regen auf der Versickerungsfläche

Auch die Stoffbeschickung mit kontinuierlicher Dosierung ist vergleichbar zur VSA-Leistungsprüfung. Die flächenbezogenen Wasser- und Stoffmengen orientieren sich am maximalen Verhältnis der Entwässerungs-/Versickerungsfläche A_E/A_V von 17:1 für Baumgruben in Zürich (real 100 m² Anschlussfläche auf 6 m² Baumscheibe). Vor Versuchsbeginn wurde der Aufbau bei konstantem Zufluss (0,1 l/s) konditioniert, bis sich eine stabile elektrische Leitfähigkeit und ein stabiler pH-Wert einstellte.

Die drei Zürcher Baumsubstrate wurden zusätzlich auf ihr Adsorptionsverhalten (Feinanteil < 2 mm) nach OECD 106 [8] untersucht. Die Feinfraktion hält deutlich mehr Kupfer zurück als Diuron, wobei die Beladungskapazitäten für Kupfer in den Substraten A1 und A2 höher sind als im Substrat B. Dagegen ist die Kapazität für Diuron in der von Pflanzenkohle und Schwarzerde dominierten Feinfraktion des Substrats B höher als bei A1 und A2. Darüber hinaus ergaben weitere Untersuchungen von den Zürcher Baumsubstraten, dass diese frei von Schadstoffen sind [7].

ERGEBNISSE SÄULENVERSUCHE

BAUMSUBSTRATE

Die vier gelösten Schadstoffe werden von den Baumsubstraten A1, A2 und Prüfsubstrat B stoffspezifisch und in Abhängigkeit von der Kontaktzeit (Fliessgeschwindigkeit) zurückgehalten *(Fig. 4)*. Beispielsweise beträgt der Rückhalt von Kupfer im Substrat A2 im ersten Test (Fil-

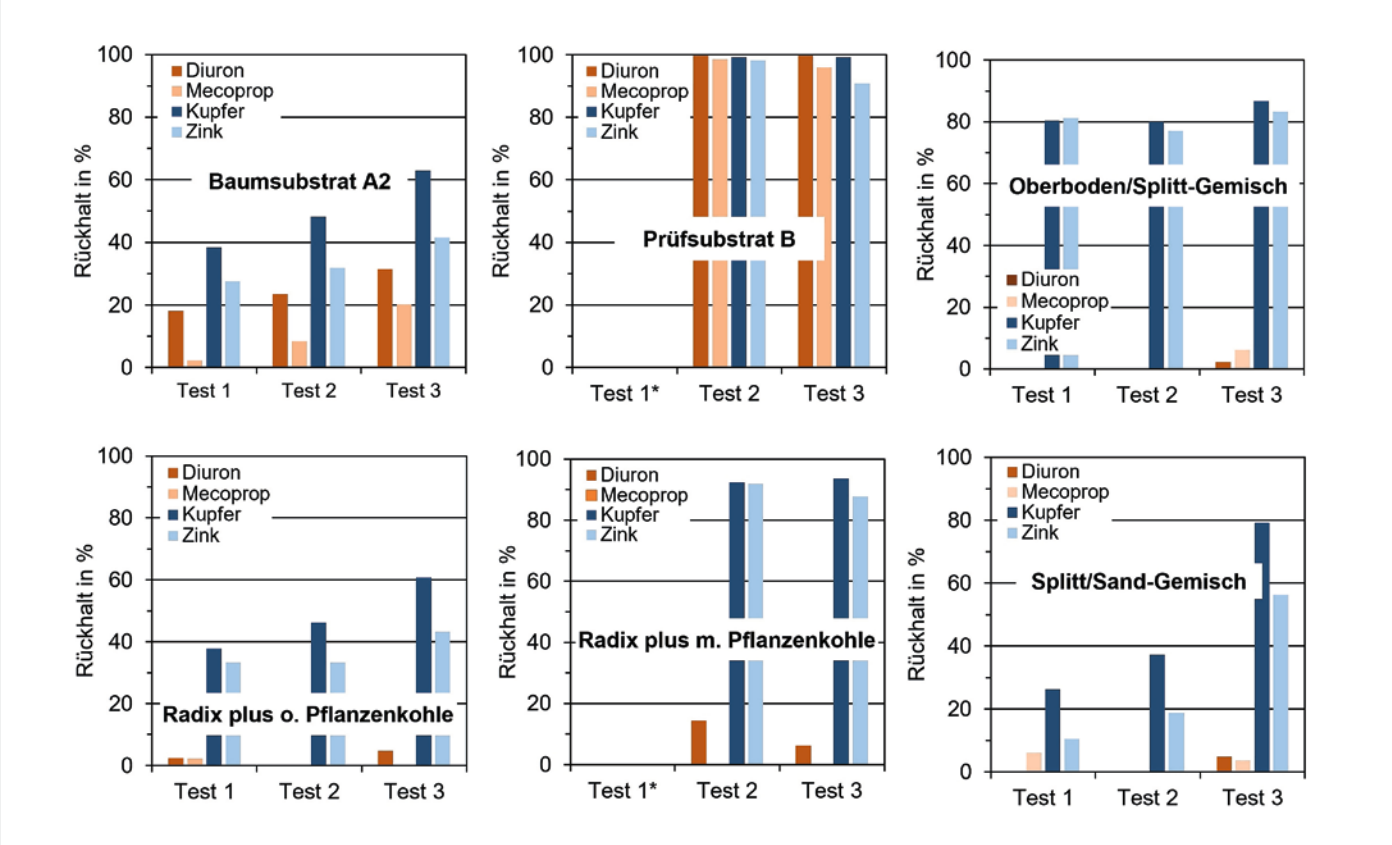

Fig. 4 Rückhalt (%) von Kupfer, Zink, Diuron und Mecoprop in den drei Tests des Säulenversuchs für das Zürcher Baumsubstrat A2, Prüfsubstrat B (< 32 mm), die Basler Baumsubstrate Radix plus mit und ohne Pflanzenkohle und die beiden Fugenpflastergemische.

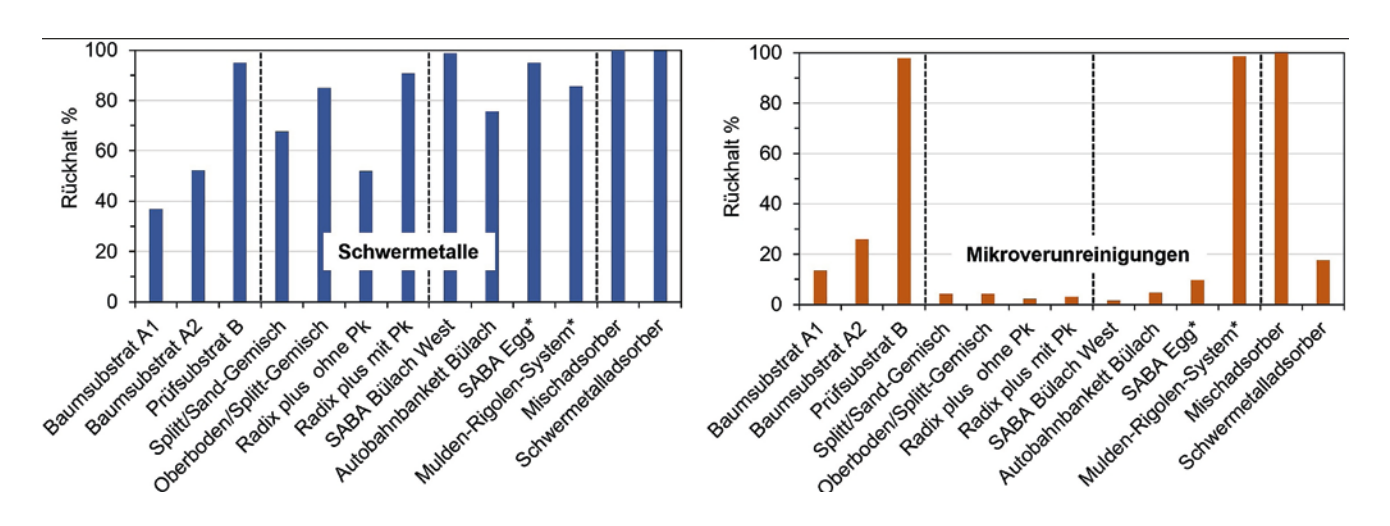

Fig. 5 Rückhalt von Schwermetallen (links) und Mikroverunreinigungen (rechts) für drei Baumsubstrate (A1, A2, Prüfsubstrat B), vier Basler Baum- und Fugensubstrate und vier Materialien aus dem Strassenbereich (SABA Bülach, SABA Egg, Bankett Bülach-Süd, Mulden-Rigolen-System Wädenswil) in Test 3 mit 0,9 m/h Filtergeschwindigkeit.
**Aufgrund geringer Wasserdurchlässigkeit wurde mit reduziertem Durchfluss von 1 l/h bzw. einer Filtergeschwindigkeit von 0,2 m/h getestet.*

tergeschwindigkeit ca. 9,0 m/h) ca. 38%, gefolgt von 48% im zweiten Test (Filtergeschwindigkeit ca. 2,2 m/h) und 63% im dritten Test (Filtergeschwindigkeit ca. 0,9 m/h). Die Kontaktzeit bestimmt also in erster Linie den ermittelten Stoffrückhalt. Dies entspricht dem Verhalten von Adsorbersubstraten unter den gleichen Versuchsbedingungen [4]. Bei der höchsten Filtergeschwindigkeit (Test 1, ca. 9,0 m/h) konnte das Prüfsubstrat B wegen zu geringer Durchlässigkeit nicht getestet werden.
Der Rückhalt von allen Stoffen durch das Prüfsubstrat B war mit >95% deutlich höher als bei den anderen Substraten A1 und A2. Diese Fraktion wird durch konditionierte Pflanzenkohle und Schwarzerde dominiert. Das Baumsubstrat B mit hohem Steinanteil (60%) lässt jedoch ein schlechteres Gesamtergebnis erwarten.
Ein höherer Schwermetallrückhalt ist bei *Radix plus®* ebenfalls nach Zugabe von Pflanzenkohle erkennbar. Dieser Effekt wird sowohl auf die kompostierte Pflanzenkohle als auch den etwas höheren pH-Wert zurückgeführt. Bezogen auf die VSA-Bewertungsstufen zu den Laborversuchen erfüllt Radix plus mit Pflanzenkohle den Rückhalt für Schwermetalle auf Stufe «standard» (70–90%).
Durch Radix plus werden die Mikroverunreinigungen im Säulenversuch kaum zurückgehalten (<15%) *(Fig. 4)*. Die beiden Substrate erfüllen keine VSA-Anforderung für Mikroverunreinigungen. Auch die Zugabe von Pflanzenkohle führt zu keiner messbaren Verbesserung. Bei der höchsten Filtergeschwindigkeit (ca. 9,0 m/h) konnte Radix plus mit Pflanzenkohle wegen zu geringer Durchlässigkeit nicht getestet werden. Die Pflanzenkohle setzte die gesättigte Wasserleitfähigkeit herab.
Für alle Baumsubstrate wurde beim Einsatz von Tausalz keine relevante Remobilisierung der Stoffe festgestellt (<1%). Aufgrund dieser Resultate ist daher nicht zu befürchten, dass die zurückgehaltenen Stoffe unter realen Bedingungen durch Tausalzeinfluss wieder freigesetzt werden.

FUGENSUBSTRATE

Die Schwermetalle werden wiederum stoffspezifisch und in Abhängigkeit von der Kontaktzeit von den beiden Fugensubstraten zurückgehalten *(Fig. 4)*. Bei niedrigen Filtergeschwindigkeiten ist der Rückhalt aufgrund der längeren Kontaktzeit höher, wie die Testabschnitte für das Splitt/Sand-Gemisch zeigen.
Bezogen auf den Schwermetallrückhalt ist dieser für das Oberboden/Splitt-Gemisch hoch und für das Splitt/Sand-Gemisch geringer. Die VSA-Anforderung «standard» (70–90%) wird vom Oberboden/Splitt-Gemisch erfüllt.

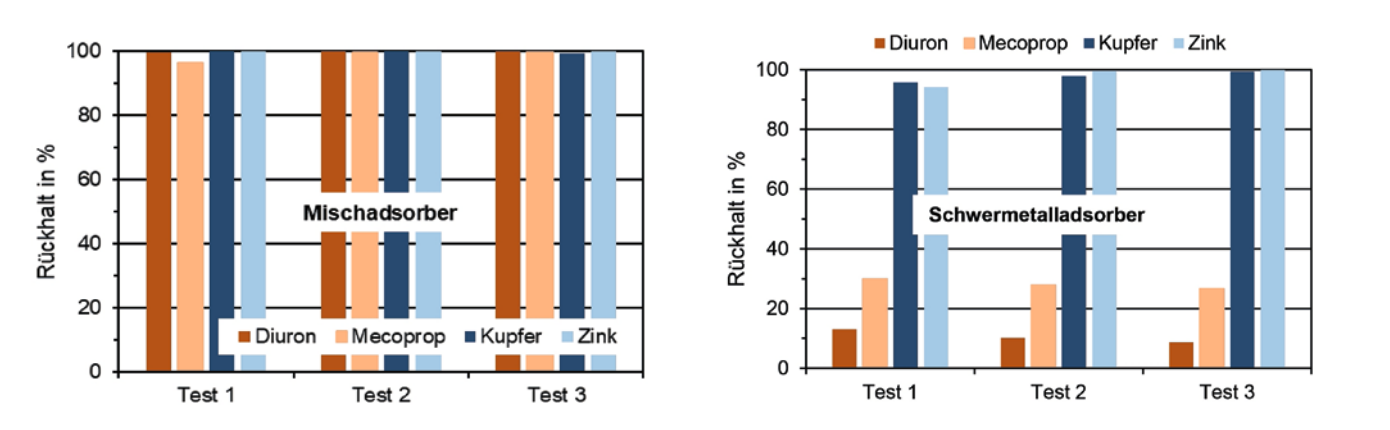

Fig. 6 Rückhalt von Kupfer, Zink, Diuron und Mecoprop für zwei technische Adsorbersubstrate (Misch- und Schwermetalladsorber) im VSA-Säulenversuch.

Keines der Fugensubstrate hält die Mikroverunreinigungen ausreichend gut zurück (< 15%), da die stark bindende Tonfraktion fehlt und die organische Substanz zu wenig humifiziert ist.
Für beide Substrate wurde ebenfalls keine relevante Remobilisierung von Schwermetallen durch Tausalz festgestellt (< 1%).

SUBSTRATVERGLEICH

Figur 5 zeigt den Stoffrückhalt der elf untersuchten Substrate bei der geringsten Filtergeschwindigkeit (ca. 0,9 m/h).
Die Pflanz- und Fugenpflastersubstrate aus Zürich und Basel-Stadt halten im Säulenversuch die Schwermetalle etwas schlechter zurück als die Substrate für SABA, zudem sind all diese Substrate ausser Prüfsubstrat B schwach im Rückhalt von Mikroverunreinigungen.
Die vier Materialien aus dem Strassenbereich weisen einen Schwermetallrückhalt von > 70% auf, wobei derjenige der beiden SABA bei über 90% liegt. Die vier Substrate aus Basel weisen einen ähnlichen Schwermetallrückhalt auf wie die drei Baumsubstrate aus der Stadt Zürich. Dabei befinden sich die Baumsubstrate A1 und A2 im unteren Bereich des Rückhalts und Radix Plus mit Pflanzenkohle im oberen Bereich (90%). Der Rückhalt von Mikroverunreinigungen ist durchwegs gering. Tendenziell schneiden die Baumsubstrate A1 und A2 etwas besser ab als die Strassensubstrate (SABA, Bankett). Nur das Prüfsubstrat B (< 32 mm) sowie das Mulden-Rigolen Material zeigen einen hohen Rückhalt von Mikroverunreinigungen auf.
Die Gründe für den geringen bzw. hohen Rückhalt sind ähnlich gelagert. Es dominieren Anteile strukturbildender Materialien mit geringem Bindungspotenzial (Kies-/Steinfraktion) und geringer Anteile der adsorptionsrelevanten Feinfraktion (< 2 mm, Land-/Schwarzerde, Tonfraktion) und konditionierten Pflanzenkohle. Dagegen haben die konditionierte Pflanzenkohle und die Land-/Schwarzerden offensichtlich einen positiven Einfluss auf die Stoffbindung.
Der hohe Rückhalt des Prüfsubstrats B (< 32 mm) ist vor dem Hintergrund einzuordnen, dass das effektive Baumsubstrat zu mehr als 60% aus Steinen (> 32 mm) besteht. Für die Adsorption gelöster Schadstoffe sind bei den SABA-Materialien der Tonanteil und/oder die humose organische Substanz relevant, die entweder im Ausgangsmaterial (Boden) oder in der entstehenden Deckschicht vorhanden sein können.
Bei der Behandlung von Siedlungs- und Strassenabwässern werden auch technische Adsorbermaterialien wie Zeolithe oder granulierte Aktivkohle eingesetzt. Diese Produkte sind jedoch weder als Baumsubstrat geeignet noch befahrbar (Tragfähigkeit). Die Ergebnisse für einen Misch- und einen Schwermetalladsorber sind in *Figur 6* 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 möglich.
Die Schichtdicken der eingebauten Adsorbersubstrate betragen 20 bis 50 cm, wobei der Betriebsmodus grosse Anschlussflächen vorsieht, die regelmässig zu einem gesättigten Wasserfluss führen. Die Ergebnisse aus den wassergesättigten Säulenversuchen mit 15 cm Filterstrecke sind daher gut auf die Einbausituation übertragbar. Baumrigolen hingegen weisen Profiltiefen bis 1,2 m auf und der Wasserfluss ist oft ungesättigt.

ERGEBNISSE ZUM SCHACHTVERSUCH

SCHADSTOFFRÜCKHALT

Die Konzentrationen von Schwermetallen, Mikroverunreinigungen und GUS nehmen mit der Tiefe deutlich ab und sind in 0,9 m und 1,2 m Tiefe überwiegend vergleichbar gering. Kupfer und Zink waren sogar ab 0,9 m, der Schichtgrenze zwischen den Substraten A1 und B, nicht mehr nachweisbar. Diuron und Mecoprop, treten an der Sohle des Profilaufbaus in leicht höheren Konzentrationen auf als darüber. Möglicherweise gelangte durch das gröbere Baumsubstrat B ein gewisser Anteil ins Sickerwasser, vor allem bei den stärkeren Regenspenden.
Zink wurde in 1,2 m Tiefe wieder in geringer Konzentration gelöst nachgewiesen

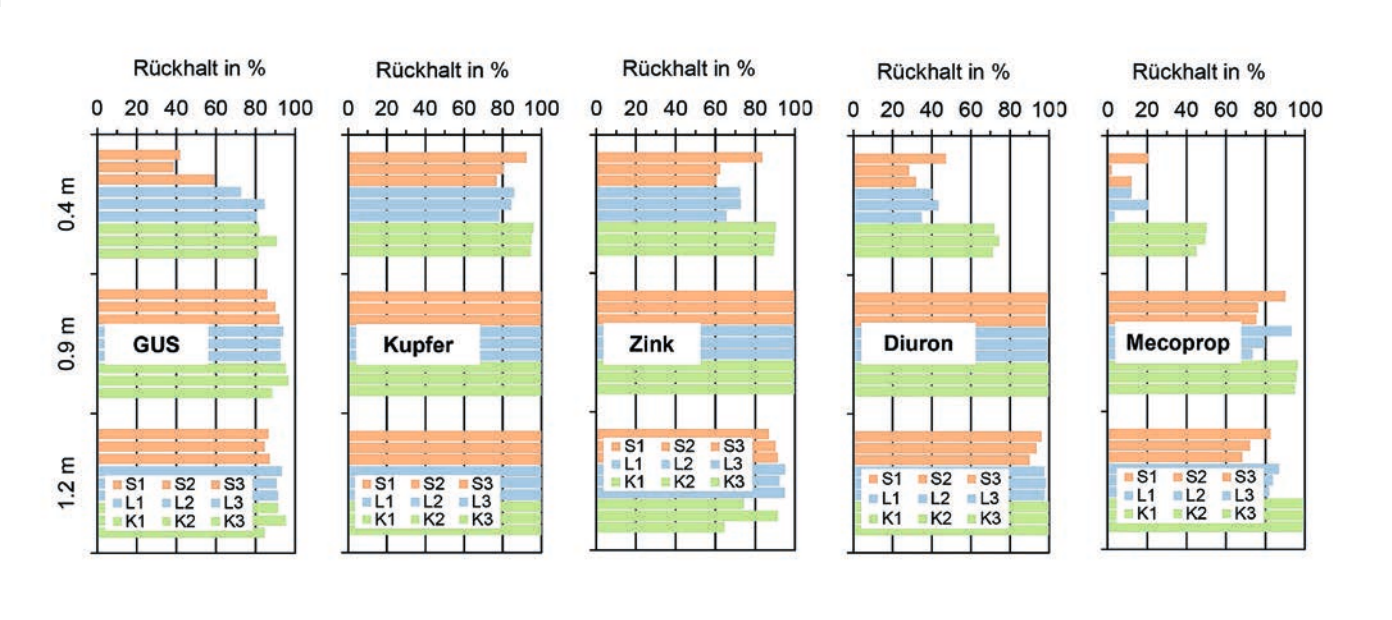

Fig. 7 Rückhalt von GUS, Kupfer, Zink, Diuron und Mecoprop bei drei unterschiedlichen Prüfregenspenden (3× Starkregen (S1, S2, S3), 3× Landregen (L1, L2, L3), 3x Kleinregen (K1, K2, K3)) an den Schichtgrenzen (0,4 m, 0,9 m) und im Sickerwasser (1,2 m) des Schachtversuchs.

(im Mittel 26 µg/l). Dies deutet auf eine gewisse Freisetzung aus dem Baumsubstrat B hin. Ein Grund dafür könnte der pH-Wert (pH 6,3) sein, der niedriger war als in den darüber liegenden Schichten (pH 7,1 und 7,4). Eine Verschleppung von Zink aus dem Versuchsaufbau konnte mit den Verfahrensblindwerten ausgeschlossen werden.

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 Quarzmehl W4 kann methodisch nicht von den Partikeln des Baumsubstrats unterschieden werden.

Der frachtgewichtete Rückhalt über alle Regenspenden beträgt im Mittel > 90% für GUS, Schwermetalle und Mikroverunreinigungen *(Fig. 7)*. Gewichtet man die Ergebnisse mit der Häufigkeit der Regenspenden wie im simulierten Feldversuch vorgesehen [6], so ergibt sich ebenfalls für jede Stoffgruppe ein Rückhalt von > 90%. Die Ergebnisse zeigen, dass die erste Schicht (A2) massgeblich für den Rückhalt von Partikeln (70% GUS) und Schwermetallen (85%) verantwortlich ist. Die zweite Schicht (A1, 0,9 m) spielt dagegen die entscheidende Rolle bei der Adsorption von Mikroverunreinigungen (56%), insbesondere von Mecoprop. 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 wirksame Schadstoffsenken darstellen.

Mit zunehmender Sättigung der Beladungskapazität in den ersten beiden Schichten (A2/A1) ist ein erhöhter Stoffeintrag in die unterste Schicht (Substrat B) möglich. Die Erfahrungen aus SABA zeigen jedoch, dass sich der Stoffrückhalt durch die Akkumulation von Partikeln an der Oberfläche (Deckschicht) mit der Zeit eher verbessern kann.

Das generelle Verhalten des Stoffrückhalts stimmt mit den Ergebnissen der Säulenversuche überein. 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).

Die Ergebnisse mit Tausalz bestätigen die Resultate der VSA-Säulenversuche mit einer remobilisierten Menge < 1%. Eine relevante Remobilisierung von Schwermetallen und Mikroverunreinigungen konnte nicht festgestellt werden. Es ist daher nicht zu befürchten, dass unter realen Bedingungen die zurückgehaltenen Stoffe durch den Einfluss von Streusalz in relevantem Umfang wieder freigesetzt werden.

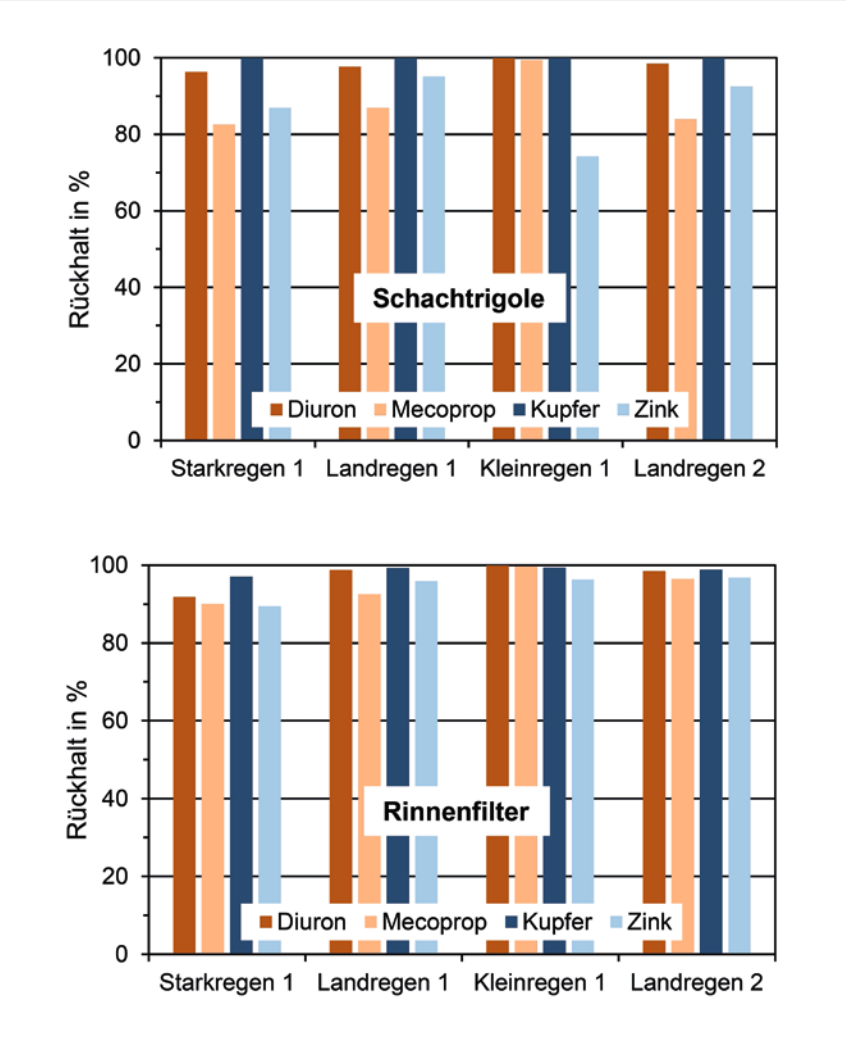

Fig. 8 Rückhalt von Kupfer, Zink, Diuron und Mecoprop im Schachtversuch mit den Baumsubstraten A2, A1 und B (oben) im Vergleich zu einem Rinnenfilter mit technischem Adsorbersubstrat (unten) für die ersten Probenahmen aus der VSA-Leistungsprüfung [6].

ADSORBERANLAGEN

Der Schachtversuch wurde in Anlehnung an den ersten Prüfblock der VSA-Leistungsprüfung für technische Adsorberanlagen durchgeführt [6]. Auf dieser Basis wurden die Ergebnisse mit technischen Adsorberanlagen verglichen.

Figur 8 zeigt die Rückhalteleistung im Schachtversuch 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. Der Gesamtaufbau mit Baumsubstraten der Stadt Zürich weist einen hohen mittleren Rückhalt (> 90%) von GUS, Schwermetallen und Mikroverunreinigungen auf, wie er nur in einer sehr guten Adsorberanlage erreicht wird. Der Rückhalt von Zink ist aufgrund der Auswaschung aus dem Baumsubstrat B etwas geringer.

Beim Vergleich mit dem Rinnenfilter ist jedoch zu berücksichtigen, dass dort die angeschlossene Fläche bzw. die aufgebrachte Stofffracht etwa dreimal so gross ist (67:1 vs. 17:1) und die Schichtdicke des Mischadsorbers nur ein Sechstel der Schachtrigole beträgt (0,2 m vs. 1,2 m).

SÄULEN- VS. SCHACHTVERSUCH

Die Schadstoffdynamik im Schachtversuch spiegelt die Erkenntnisse aus dem

Durchführung		Filtergeschwindigkeit	Kontaktzeit	A2 - Rückhalt % pro 0,1 m			
		(m/h)	(min pro 0,1 m)	Diuron	Mecoprop	Kupfer	Zink
Säule	Test 1	8,95	0,2	13	2	26	18
	Test 2	2,15	0,8	16	6	32	21
	Test 3	0,90	2,0	21	13	42	28
Schacht	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

Tab. 2 Rückhalt von Schwermetallen (Kupfer, Zink) und Mikroverunreinigungen (Diuron, Mecoprop) für Baumsubstrat A2 im normierten Säulen- und Schachtversuch (0,1 m).

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 z. B. für das Baumsubstrat A2 eine Porosität von 0,3 angenommen.

Tabelle 2 zeigt den normierten Rückhalt für die drei Tests im Vergleich zu den Regenspenden im Schachtversuch. Trotz unterschiedlicher Filtergeschwindigkeiten ergeben sich bei gleicher Schichtdicke ähnliche Kontaktzeiten ergeben. Dies ist vermutlich auf den gegenläufigen Einfluss von Strömungseffekten und Filtergeschwindigkeiten zurückzuführen.

Dabei ist jedoch zu beachten, dass die hydraulischen Bedingungen im Schacht- und im Säulenversuch verschieden sind. Der Säulenversuch wird unter wassergesättigten Bedingungen aufwärts durchströmt mit hohen Filtergeschwindigkeiten durchgeführt. Unter diesen Bedingungen ist die Strömung gleichmässig. Die Untersuchung im Schachtversuch wurde dagegen unter teilgesättigten Bedingungen mit geringeren Filtergeschwindigkeiten durchgeführt. Die längere Kontaktzeit begünstigt den Stoffrückhalt und dürfte unter Einbaubedingungen eher anzutreffen sein.

BELADUNGSKAPAZITÄT UND STANDZEIT

Die Beladungskapazitäten aus den Adsorptionsversuchen wurden rechnerisch auf das Gesamtsubstrat (mit Schotter, Steinen) hochgerechnet. Sie betragen z. B. für Diuron bei den Substraten A1, A2 und B rund 120 mg/kg Trockensubstanz (TS), 90 mg/kg TS bzw. 250 mg/kg TS. Die effektive Beladungskapazität für Diuron liegt daher bei Substrat B etwa doppelt so hoch wie bei den beiden anderen Substraten. Verschiedene Studien bestätigen die positive Wirkung von Pflanzenkohle auf den Diuronrückhalt und die Beladungskapazität, die mit dem organischen Gehalt im Boden vergleichbar ist [9, 10]. *Yu et al.* [11] untersuchten Diuron in Böden mit verschiedenen Pflanzenkohlezusätzen. So führten 2,5% Pflanzenkohle zu einer Beladung von rund 200 mg/kg Diuron. Dieser Wert liegt in der gleichen Grössenordnung wie die hier abgeschätzten Beladungskapazitäten. Diese Herleitung dient als grobe Orientierung für das Bindungspotenzial.

Für die Beladung mit Kupfer scheinen die Land- und Schwarzerde wichtiger zu sein als die Pflanzenkohle. 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 [12].

Die Bindungskapazitäten sind im Vergleich zu reinen Adsorbermaterialien eher gering. So ermittelten *Bahri et al.* [13] für granulierte Aktivkohle rund 70 g/kg Diuron und *Perić et al.* [14] für Zeolith rund 25 g/kg Kupfer. Diese Werte liegen um den Faktor 100 bis 1000 höher als bei den Zürcher Substraten. Allerdings ist die Schichtdicke in Baumrigolen deutlich grösser als in Adsorberanlagen (1,2 m vs. 0,3 m) und die Entwässerungsfläche mit der zu erwartenden Schadstofffracht ist bis zu einem Faktor 100 kleiner. Somit ist trotz der geringeren Beladungskapazität der Zürcher Substrate im Vergleich zu technischen Adsorbersubstraten eine hohe Standzeit möglich.

Im Schachtversuch mit neun Prüfregenspenden wurde eine Stofffracht aufgebracht, die rund 0,1 bis 0,6% der geschätzten Beladungskapazitäten für die jeweiligen Substrate umfasste. Berücksichtigt man, dass die Kupfermenge in der VSA-Leistungsprüfung einer Jahresfracht entspricht und davon im Schachtversuch rund 25% aufgebracht wurden, deckt die Jahresfracht rund 0,4 bis 2,4% der Beladungskapazität der Substrate ab. 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 Realität kann die konkurrierende Adsorption den Stoffrückhalt begrenzen, aber auch der Eintrag von Partikeln zu zusätzlichen Bindungsplätzen führen. Es wird empfohlen, diese Mechanismen durch ein Monitoring bei Pilotinstallationen zu überprüfen.

SCHLUSSFOLGERUNGEN

Der VSA-Säulenversuch ist ein geeigneter Test zur schnellen Abschätzung des Schadstoffrückhaltevermögens von Substraten unter reproduzierbaren Bedingungen im Labormassstab. Die direkte Übertragbarkeit auf Baumrigolen ist jedoch aufgrund der hydraulischen Bedingungen nur eingeschränkt möglich.

Die Säulenversuche wurden unter wassergesättigten Bedingungen mit hohen Filtergeschwindigkeiten durchgeführt. In der Praxis treten bei kleinen Anschlussflächen fast ausschliesslich ungesättigte Bedingungen auf, die zu geringeren Filtergeschwindigkeiten und höherem Stoffrückhalt führen. So liegen die gemessenen Sickerleistungen von *Radix Plus*® im Feld nur zwischen 0,09 und 0,39 m/h. Sie liegen damit noch um den Faktor 2 bis 10 niedriger als die langsamte Filtergeschwindigkeit im Säulenversuch (ca. 0,9 m/h). Es ist daher wahrscheinlich, dass die gelösten Schwermetalle im realen Gesamtaufbau deutlich besser zurück-

Das Projekt wurde gefördert und unterstützt durch GSZ Grün Stadt Zürich, ERZ Entsorgung + Recycling Zürich, das AWEL Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft, 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.

gehalten werden. Ausserdem wurden nur gelöste Stoffe dosiert. Im Feld liegen die Schwermetalle jedoch zumindest zu einem erheblichen Teil in partikulärer Form oder an Partikel gebunden vor. Partikel können durch die Filterfunktion der Substrate und die Deckschicht zurückgehalten werden. Bei einer hohen Wasserinfiltration (z.B. bei Starkregen) kann die Rückhalteleistung durch präferenzielle Stoffverlagerung in den groben Poren zeitweilig unterlaufen werden.

Der Rückhalt von GUS und Schwermetalle im Schachtversuch, aufgebaut wie Zürcher Baumrigolen, ist in der obersten Schicht hervorragend. Ein hoher Rückhalt von Mikroverunreinigungen, deren tatsächliche Relevanz im Strassenabwasser noch zu klären ist, wird nach der mittleren Schicht erreicht. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass das Substrat B bei Sättigung der Adsorptionsplätze in den ersten beiden Substraten eine gute Reserve für den Schadstoffrückhalt darstellt. In diesem Zusammenhang könnte eine periodische Erneuerung der obersten Substratschicht oder das Einbringen einer oberen austauschbaren Lage, die speziell für den Rückhalt konzipiert ist, von Vorteil sein. Bei einer Bepflanzung mit Bäumen ist der Austausch dieser Schicht gut zu planen.

Werden die Resultate zusammengeführt, stehen relevante Grundlagen für eine Beurteilung der Zulässigkeit des Zürcher Substrataufbaus im Gewässerschutzbereich A_u zur Verfügung. Der getestete dreischichtige Aufbau für Baumrigolen mit den Zürcher Substraten A1, A2 und B (1,2 m Mächtigkeit) ist nach heutigem Kenntnisstand geeignet, Platz- und Strassenabwasser der VSA-Belastungsklasse «gering» und «mittel» zurückzuhalten, ohne dass diese ins Grundwasser gelangen. Für einen möglichen Einsatz im Bereich der Belastungsklassen «hoch» wird vorsorglich empfohlen, zunächst die Erfahrungen aus Standorten mit geringer und mittlerer Belastung abzuwarten (Monitoring) und die kombinierte Anwendung mit Adsorbermaterial und -anlagen oder einer Oberbodenpassage zu prüfen.

Pflanzsubstrate unterliegen im Laufe der Jahre einem natürlichen Bodenbildungsprozess, bei dem sich der pH-Wert, der Gehalt an organischer Substanz, die biologische Aktivität und die Infiltrationskapazität pro Schicht verändern. Diese Prozesse sind auch von Bodenpassagen oder SABA mit Bodenfiltern bekannt. Daher wird auch 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. Durch die Identifizierung der für den Schadstoffrückhalt entscheidenden Parameter können die Pflanzsubstrate und die Bauweisen der Pflanzgruben noch noch effektiver auf den Stoffrückhalt ausgerichtet werden (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.

BIBLIOGRAPHIE

[1] *Burkhardt, M. et al. (2022): Schwammstadt im Strassenraum – Neue Herausforderungen für blau-grüne Infrastrukturen bei der Strassenentwässerung, Aqua & Gas, 10, 16-39*

[2] *BlueGreenStreets (Hrsg.) (2022): BlueGreenStreets Toolbox – Teil A und Teil B. Multifunktionale Straßenraumgestaltung urbaner Quartiere. Erstellt im Rahmen der BMBF-Fördermaßnahme «Ressourceneffiziente Stadtquartiere für die Zukunft» (RES:Z). Hamburg*

[3] *Grün Stadt Zürich (GSZ): 2023. Baumgruben mit Baumsubstrat 2.0, Merkblatt für Planende*

[4] *Burkhardt, M. et al. (2017): VSA-Leistungsprüfung. Aqua & Gas N°17, 33–41*

[5] *Hasler, S. (2023): Adsorber schliessen Lücke zur Umsetzung von Schwammstadt-Massnahmen. VSA-News, Aqua & Gas*

[6] *VSA (2023): Leistungsprüfung für Adsorbermaterialien und dezentrale technische Anlagen zur Behandlung von Niederschlagswasser. 2. Aufl., VSA Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute, Glattbrugg*

[7] *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*

[8] *OECD (2000): Test No. 106: Adsorption – Desorption Using a Batch Equilibrium Method. OECD Guidelines for the Testing of Chemicals, Section 1, OECD Publishing, Paris*

[9] *Petter, F.A. et al. (2019): Biochar increases diuron sorption and reduces the potential contamination of subsurface water with diuron in sandy soil. Pedoshere 29(6): 801–809.Tomczyk., A., Boguta, P., Sokolowska, Z. 2019. Biochar efficiency in copper removal from Haplic soils. International Journal of Environmental Science and Technology 16:4899–4912*

[10] *Liu, Y. et. al. (2010): Adsorption and desorption behavior of herbicide diuron on various Chinese cultivated soils. Journal of Hazardous Materials 178: 462–468*

[11] *Yu, X. et al. (2006): Sorption and desorption behaviours of diuron in soils amended with charcoal. Journal of agricultural and food chemistry 54: 8545–8550*

[12] *Tomczyk., A. Boguta, P., Sokolowska, Z. (2019): Biochar efficiency in copper removal from Haplic soils. Environmental Science and Technology 16:4899–4912*

[13] *Bahri, M.A. (2012): Mechanic understanding of the behavior of diuron in the adsorption from water onto activated carbon. Chemical Engineering Journal 198–199*

[14] *Perić, J. et al. (2004): Removal of zinc, copper and lead by natural zeolite – a comparison of adsorption isotherms. Water Research 38: 1893–1899*