

SCHWAMMSTADT IM STRASSENRAUM

HERAUSFORDERUNGEN UND LÖSUNGEN FÜR BLAU-GRÜNE MASSNAHMEN

Im Strassenraum sind nicht nur die Anforderungen an eine standortgerechte Begrünung und an den Rückhalt von Wasser für die Pflanzen hoch, auch soll das Strassenabwasser möglichst schnell abgeführt und gereinigt werden. Im Rahmen einer umfassenden Recherche wurden der Wissensstand und die offenen Herausforderungen zusammengetragen, verbunden mit konkreten Handlungsempfehlungen für die Planungspraxis.

Michael Burkhardt, OST - Ostschweizer Fachhochschule, Institut für Umwelt- und Verfahrenstechnik (UMTEC)*

Beatrice Kulli, ZHAW - Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften, Institut für Umwelt und Natürliche Ressourcen

Andrea Gion Saluz, Grün Stadt Zürich, ZHAW

RÉSUMÉ

VILLE-ÉPONGE DANS L'ESPACE ROUTIER: DÉFIS ET SOLUTIONS POUR DES MESURES BLEUES-VERTES

Les zones urbaines sont confrontées à des défis majeurs en raison des changements climatiques. L'espace routier joue un rôle clé à cet égard. La plantation d'arbres et la création de surfaces végétalisées font partie des mesures les plus efficaces pour réduire la charge thermique et diminuer le ruissellement. La présente étude, commandée par le canton de Zurich, avait pour but d'aborder les questions concernant l'évacuation des eaux de chaussée et les possibilités d'une nouvelle gestion des eaux de pluie. L'état des connaissances a été documenté dans un rapport avec des solutions d'optimisation. En outre, un guide de planification a été élaboré. Les substrats techniques pour plantes doivent créer des conditions d'implantation optimales pour la végétalisation des zones fortement urbanisées. Comme pour le sol, les propriétés des matériaux et leur disposition spatiale sont déterminantes pour les caractéristiques hydrauliques et matérielles. Il faut beaucoup de pores moyens pour la rétention d'eau et des pores grossiers pour l'infiltration et la capacité d'aération. Le charbon végétal offre un grand potentiel pour améliorer les mélanges de substrats techniques. Son pH légèrement alcalin se stabilise rapidement dans le matériau environnant. Pour les substrats carrossables, la capacité de charge exigée doit être respectée. Des compositions innovantes

EINLEITUNG

HINTERGRUND

Der Klimawandel führt zu einer Zunahme von extremen Wetterereignissen, wobei vor allem Städte und Agglomerationen durch Hitzebelastungen und Starkregen vor Probleme gestellt werden, wie Klimaszenarien für die Schweiz aufzeigen [1, 2]. Die Siedlungsräume stehen vor enormen Herausforderungen, deren Folgen für Mensch und Umwelt durch Anpassungsmassnahmen wenigstens teilweise begegnet werden können. Die Baudirektion des Kantons Zürich hat deshalb unter Federführung des Amtes für Wasser, Energie und Luft AWEL den Massnahmenplan «Anpassung an den Klimawandel» erarbeitet, um auf die Veränderungen reagieren zu können [3]. Dabei kommt dem Strassenraum eine Schlüsselrolle zu. Gegenwärtig umfassen Strassen, Wege und Parkplätze in den Städten rund 20% und in Agglomerationen 9% der Freiflächen [4]. Bekanntermassen reduzieren versiegelte Flächen den Rückhalt von Regenabwasser (Retention), verunmöglichen die Transpiration durch Pflanzen und erhöhen durch die Wärmerückstrahlung die Hitzebelastung. Die zunehmende Versiegelung führt zu einer grösseren Menge an nicht direkt versickerbarem Regenwasser, das zunehmende Verkehrsaufkommen zu erhöhen

* Kontakt: michael.burkhardt@ost.ch

Belastungen im Strassenabwasser. Die Ansprüche der Bevölkerung an den Strassenraum nehmen gleichfalls zu. Die Aufenthaltsqualität soll verbessert und zusätzliche Flächen für Langsamverkehr geschaffen werden. Aufgrund der Flächenkonkurrenz drängen sich daher multifunktionale Lösungsansätze auf, die sich mit einer Mehrfachnutzung von Flächen verbinden, wie z.B. Parkplätze mit begrünter und sickerfähiger Oberfläche [5].

Bei Gesellschaft, Politik und Behörden gelten blau-grüne Massnahmen entlang der Strassenräume als besonders zukunfts-trächtig. Zahlreiche Gestaltungsmöglichkeiten wurden bereits entwickelt und umgesetzt [6]. Die Pflanzung von Bäumen, die Schaffung von Grünflächen, offenporige Pflasterungen oder Chaussierungen gehören dabei zu den verbreitetsten Massnahmen zur Reduktion der Hitzebelastung und Abflussminderung [7]. Insbesondere Stadtbäume, bevorzugt grosse und alte, erbringen eine wirkungsvolle Beschattung und Evapotranspiration. Ausserdem erbringen sie eine hohe Ökosystemleistung. Dabei ist Sorge zu tragen, dass die Wurzeln der Stadtbäume keine Schäden an den technischen Infrastrukturen verursachen. An vielen urbanen Standorten kann der Wasserbedarf der vorhandenen Vegetation aber nicht natürlicherweise gedeckt werden. Vor allem in heissen Sommern muss zusätzlich bewässert werden.

Elemente zur Regenwasserbewirtschaftung im Strassenraum sollen also verschiedene Anforderungen erfüllen. Sie sollen das Wasser zurückhalten und für die Pflanzen speichern, ausserdem als Pflanzenstandort geeignet sein und die Pflanzen nicht nur mit Wasser, sondern auch mit Nährstoffen versorgen. Sie sollen das Wasser aber auch bei Starkregen schnell abführen und nötigenfalls von Verschmutzungen reinigen. Eine Belastung des Grundwassers durch Schadstoffe ist zu vermeiden.

Auf den schmalen Flächen entlang der Verkehrswege ist es oft schwierig, Boden einzubauen. Substrate sind als Alternative weit verbreitet, da sie über eine grössere Sicker-, Retentionsleistung und Strukturstabilität als natürliche Böden verfügen und damit für kompakt gebaute Pflanzgruben vorzüglich geeignet sind. Sowohl bei den Gestaltungselementen mit Substraten als auch bei Boden sind jedoch verschiedene Fragen offen. Die Zusammensetzung von Substraten ist

beispielsweise sehr unterschiedlich und über das Rückhaltevermögen von Schadstoffen und möglichen Risiken für das Grundwasser ist wenig bekannt. Ob Bodenfilter in der Schweiz mit Bäumen bepflanzt werden dürfen, ist unklar. Es wird befürchtet, dass die Funktionstüchtigkeit durch die Wurzeln beeinträchtigt werden könnte (präferenzierter Fluss). In Deutschland hat das neue Merkblatt DWA-A 138-1 [8] diese städtebaulich attraktive Möglichkeit eröffnet

ZIELE UND VORGEHEN

Das Ziel der vorliegenden Studie war es, offene Fragen zur Strassenentwässerung und zu den Möglichkeiten einer angepassten Regenwasserbewirtschaftung im Kanton Zürich anzugehen. Dafür wurden der Kenntnisstand zur Versickerung von Strassen- und Platzabwasser über bepflanzte Entwässerungselemente mit Boden- und Substratpassage recherchiert sowie Lösungen zur Optimierung diskutiert. Die Schwerpunkte wurden wie folgt gesetzt:

- Merkmale von Böden und Substraten zusammenstellen
- Lösungen bei Belastungen und für Substrate eruieren
- Möglichkeiten von Schwammstadt-Elementen und Bepflanzungen aufzeigen, insbesondere bei engen Platzverhältnissen
- Empfehlungen für die Planungs-, Ausführungs- und Pflegepraxis geben.

Nachfolgend werden Auszüge aus der Recherche präsentiert. Alle Ergebnisse inklusive Pflanzlisten sind im Projektbericht und einer Planungshilfe zu finden [9, 10].

SCHADSTOFFE UND GEWÄSSERSCHUTZ

BELASTUNGEN IM STRASSENABWASSER

Die Stoffbelastung ist von zentraler Bedeutung für den möglichen Handlungs-

bedarf und die Anforderungen an Boden und Substrate. In Platz- und Strassenabwasser wird sie primär durch das Verkehrsaufkommen bestimmt und in drei Belastungsklassen abgebildet (Tab. 1) [11]. Geringe Belastungen sind auf Parkplätzen, Zu-/Ausfahrten und in (verkehrsberuhigten) Wohngebieten zu erwarten, hohe Belastungen hingegen an Belastungsschwerpunkten wie Kreuzungen, Lichtsignalen, Kreisverkehr, Kurven und Brems-/Beschleunigungsbereichen. Zusätzliche Belastungen können durch Dach- und Fassadenflächen auftreten, wenn diese auf Strassen, Wege und Plätze entwässern. Zu beachten ist, dass sich die Nutzung auf den Flächen über die Jahre verändern kann, somit auch die Belastungsklasse.

Effektiv gelangen verschiedenste gelöste und partikuläre Stoffe ins Platz- und Strassenabwasser (Fig. 1) [12, 13, 14]:

- Fahrzeuge: Schwermetalle aus Reifen (Pneubtrieb), Mineralölkohlenwasserstoffe durch Tropfverluste, organische Spurenstoffe aus Pneu etc.
- Verkehrsinfrastruktur: Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) aus Asphaltbelägen, Schwermetalle aus Schutzplanken etc.
- Wege und Plätze: Organische Spurenstoffe aus Flächennutzung und -unterhalt (z.B. Pestizide) etc.

Den Partikeln (gesamte ungelöste Stoffe; GUS) kommt eine besondere Bedeutung zu, da sie selber Schadstoff, Träger von gebundenen sowie Quelle von wasserlöslichen Schadstoffen (z.B. Additive in Pneubtrieb) sein können. So liegen Schwermetalle und PAK vor allem gebunden vor (nur ca. 40% der Schwermetalle gelöst), emittieren aber auch als Partikel (Abrieb) [15, 16].

Als wesentliche Quelle von Mikroplastik dominiert Pneubtrieb die aktuelle Diskussion zur Strassenabwasserbelastung. Der Abrieb auf Schweizer Strassen beläuft sich auf fast 11 000 t pro Jahr [17]. Weitere

Belastungsklasse	Herkunftsfläche
Gering	Strassen: < 5000 DTV Haus-, Vor-, Parkplätze: selten Fahrzeugwechsel, geringe Nutzung Metalle, pestizidhaltige Materialien: leicht erhöhter Anteil
Mittel	Strassen: 5000–14000 DTV Haus-, Vor-, Parkplätze: mittlere Fahrzeugwechsel und Nutzung Metalle, pestizidhaltige Materialien: erhöhter Anteil
Hoch	Strassen: > 14000 DTV Haus-, Vor-, Parkplätze: häufige Fahrzeugwechsel, intensive Nutzung Metalle, pestizidhaltige Materialien: erhöhter Anteil

Tab. 1 Mögliche Belastungen für Herkunftsflächen im Bereich der Verkehrsflächenentwässerung [11].

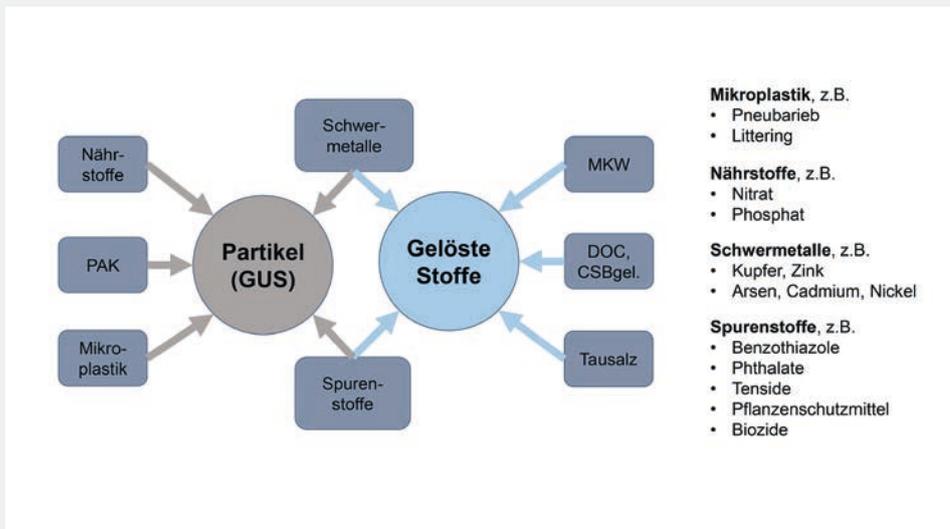


Fig. 1 Spektrum an Schadstoffen im Strassenabwasser, die als Partikel, an Partikeln gebunden oder im Wasser gelöst vorliegen können [9].

Ergebnisse zeigen, dass die Abriebmengen von Asphalt und Bremsen den Pneuabrieb sogar übertreffen könnten [18]. Dies würde erklären, warum Mikroplastik nur rund 30% der GUS-Fracht in Autobahnabwasser ausmacht.

Mit der grossen Menge Pneuabrieb gelangen auch Additive in die Umwelt, wie Vulkanisationsbeschleuniger (Benzothiazol, 2-Mercaptobenzothiazol, Mercaptobenzothiazolsulfid), Antioxidantien (Amine, Phenole), Weichmacher und Stabilisatoren (z.B. 4-iso-Nonylphenol, Di(2-ethylhexyl)phthalat (DEHP), 2,2'-Bis(4-hydroxyphenyl)propan (BPA)) [19, 20]. Mercaptobenzothiazol erreicht im Strassenabwasser bis einige hundert Mikrogramm pro Liter, wirkt aber schon bei $0,8 \mu\text{g/l}$ (chronisch) toxisch auf aquatische Organismen. Vom in Pneu eingesetztem Vulkanisationsbeschleuniger 1,3-Diphenylguanidin (DPG) emittieren rund 50%, die anteilig in den mobilen Stoff Anilin umgewandelt werden [18]. Das Antioxidationsmittel δPPD (N-(1,3-Dimethylbutyl)-N'-Phenyl-P-Phenylenediamin), seit Jahren in Pneu eingesetzt, wird nach neuen Erkenntnissen durch Ozon in δPPD -Quinon umgewandelt, das schon bei $0,8 \pm 0,16 \mu\text{g/l}$ eine letale Wirkung (LC50) auf junge Lachse aufweist und im Strassenabwasser zwischen $< 0,3$ und $19 \mu\text{g/l}$ gefunden wurde [21]. Die Fülle nachgewiesener Spurenstoffe ist immens, wie auch das europäische Projekt *Microproof* im Auftrag der *Conference of European Directors of Roads* (CEDR) zeigt [22]. Der internationale Wissensstand zum Vorkommen solcher Stoffe im Strassenabwasser spiegelt sich jedoch in der Schweiz weder im Monitoring noch in

Planungshilfen wider [23]. Nur bei den Testanforderungen für Adsorberanlagen werden zwei Spurenstoffe als Leitsubstanzen beigezogen [24]. Bemerkenswert ist dabei, dass viele Spurenstoffe eine hohe Mobilität und Ökotoxizität aufweisen können, weit höher als Schwermetalle, so wie es für organische Spurenstoffe im kommunalen Abwasser seit Jahren bekannt ist.

Taumittel werden flüssig (Salzsole) oder als Tausalz eingesetzt. Zu den unerwünschten Folgen zählen Salzsäuren am Strassengrün sowie Belastungen von Böden und Gewässern [25, 26]. Das Tiefbauamt des Kantons Zürich hat einen durchschnittlichen Salzverbrauch von ca. 15 000 t pro Winter. Bei einer gestreuten Oberfläche von ca. 22 Mio. m² entspricht dies einer jährlichen Salzmenge von 650 g/m^2 [27]. Im Strassenabwasser können die Konzentrationen zwischen einigen 100 bis einigen 1000 mg/l Chlorid liegen [28]. Unter der Annahme, dass sich die jährliche Salzmenge in Zürich auf 50 Einsätze je Route verteilt und jeweils durch Abflussereignisse mit im Mittel 2501 m^2 im Winter abgeschwemmt werden, ergibt sich eine theoretische mittlere Salzkonzentration von ca. 2,6 g pro Liter. Der Salzeintrag ist insofern problematisch, da die meisten Laubbäume bei $> 100 \text{ mg/kg}$ erste Schäden aufweisen und bei $> 150 \text{ mg/kg}$ in Boden und Substraten die meisten Baumarten geschädigt werden.

Interessant ist, dass der Eintrag von Niederschlagsabwasser in Pflanzgruben selten über die Gesamtfläche erfolgt, sondern meistens über Randbefestigungen

(Ablaufkante). Daher ist nicht der ganze Sickerbereich bzw. Wurzelraum gleich stark dem Salz oder anderen Schadstoffen ausgesetzt.

GEWÄSSERSCHUTZ UND ZULÄSSIGKEIT

Belastetes Platz- und Strassenabwasser zählt gemäss Schweizer Gewässerschutzverordnung zu «anderem verschmutztes Abwasser» [29]. Es ist entsprechend seiner Belastungsklasse zu behandeln [11]. Mit der Behandlung soll die Verunreinigung des Grund- und Oberflächenwassers durch Versickerung oder Direkteinleitung vermieden werden.

Bei der Versickerung ins Grundwasser ist der Ort der Beurteilung des Grundwasser [21]. Die Anforderungswerte im betroffenen Grundwasser sind einzuhalten, gelten jedoch nicht unmittelbar für das zu versickernde Strassenabwasser. Viele Kantone verlangen die Anforderungswerte allerdings für das zu versickernde Wasser nach einer allfälligen Vorbehandlung (z.B. Bodenpassage).

Zum planerischen Grundwasserschutz gehören die Schutzzonen S1, S2 und S3 bei Trinkwassernutzung, der Gewässerschutzbereich *Au* für nutzbare unterirdische Gewässer, der Zuströmbereich *Zu* bei Verunreinigungen aus der Bodenbewirtschaftung, und übrige Bereiche *üB* mit geringerer Relevanz.

Im Kanton zulässig ist die Versickerung von Platz- und Strassenabwasser mit Bodenpassage bis zu 14 000 DTV im Gewässerschutzbereich *Au* und uneingeschränkt im *üB* [11]. Fehlt die Bodenpassage bei mittlerer und höherer Belastung, sind Adsorberanlagen mit nachgewiesenen Wirkungsgraden einzusetzen.

EIGENSCHAFTEN VON BÖDEN UND SUBSTRATEN

Während Böden natürlich entstanden sind, sind Substrate entwickelte Produkte für bestimmte Anwendungsbereiche. Trotz dieser Unterschiede bestimmen die Eigenschaften von Böden und Substraten die Standortfaktoren, das hydraulische Regime und den Stoffrückhalt.

STRUKTURELLE EIGENSCHAFTEN

Unter Textur (Körnigkeit) ist die Korngrößenverteilung der Primärteilchen zu verstehen. Die Struktur beschreibt deren räumliche Anordnung und den übergeordneten Zusammenhalt in Aggregaten. Gemäss der schweizerischen Boden-

klassifikation wird der mineralische Feinanteil, der die Bodenart bestimmt, in drei Grössenfraktionen unterschieden:

- Ton (< 0,002 mm)
- Schluff resp. Silt (0,002–0,05 mm)
- Sand (0,05–2 mm)

Als Grobboden oder Skelett werden Bestandteile >2 mm bezeichnet. Diese umfassen Kies, Schotter oder andere Gesteinsrelikte. Sowohl in natürlichen als auch technischen Substraten kann der Skelettanteil >30 Vol.-% einnehmen. Struktur und Körnung beeinflussen massgeblich die Anteile verschiedener Porengrössen:

Grobporen
($> 50 \mu\text{m}$, $pF < 1,8$)

Sie sind temporär wassergefüllt und entleeren sich nach einem Niederschlag rasch. Die Grobporen sind für die Luftversorgung der Wurzeln (Luftkapazität, LK) und die schnelle Versickerung von Wasser bei starkem Regen (hohe gesättigte Wasserleitfähigkeit oder spezifische Sickerleistung) verantwortlich. In Substraten wird ein hoher Anteil Grobporen angestrebt.

Mittelporen (0,2–50 μm , pF 4,2–2,5)

Sie halten das Wasser gegen die Schwerkraft und geben es den Pflanzen wieder ab (nutzbare Feldkapazität, nFK). Sandige und tonige Böden haben weniger Mittelporen als schluffige Böden oder Lehme (Gemische von Sand und Ton) sowie Böden mit viel organischer Substanz.

Feinporen (< 0,2 μm , pF 4,2)

Sie halten das Wasser so stark fest, dass es den Pflanzen nicht zur Verfügung steht, aber einen kapillaren Wasseraufstieg ermöglicht. Mit steigendem Tonanteil nimmt der Anteil Feinporen zu. Sandige Böden und Substrate mit Einzelkorngefüge haben wenig Mittel- und Feinporen und daher geringe Kapillarwirkung.

Die Anteile der Porenklassen lassen sich aus der Körnung und Lagerungsdichte herleiten. Beides sind Parameter, die sich vor Ort beim Einbau und zur Kontrolle einfach bestimmen lassen. Dabei gilt: je höher die Lagerungsdichte, desto kleiner die Porosität.

Der für Bäume wichtige Wasser- und Lufthaushalt kann sich durch stabile Aggregate bzw. Sekundärporen verbessern. In grobkörnigen Materialien ist hingegen die Gefügebildung von geringer

Bedeutung. Bereits in leicht bindigen Böden können biogene Makroporen (0,5–10 mm Durchmesser) entstehen, beispielsweise Regenwurmgänge und Kanäle abgestorbener Wurzeln. Diese Makroporen kommen zwar nur punktuell vor, weisen aber eine hohe vertikale Ausdehnung auf (Konnektivität) und sind relevant als schnelle Fliesswege.

Neben der mineralischen Fraktion kommt in Böden und Substraten ein organischer Anteil vor, beispielsweise Humus, Kompost oder Torf. Das Bodenleben benötigt die organische Substanz als Nahrungsgrundlage und Pflanzen ziehen daraus Nährstoffe. Im humosen Oberboden oder Substraten liegt der Anteil meistens zwischen 1 und 4 Masse-%. Je nach Feuchtezustand wirken organische Bestandteile wasserabweisend (hydrophob) oder als Wasserspeicher.

HYDRAULISCHE EIGENSCHAFTEN

Die Wasserleitfähigkeit hängt von der Textur, Struktur und dem Wassergehalt ab. Erst wenn die Fein- und Mittelporen vollständig gesättigt sind, führen in der Regel auch die Grobporen Wasser. Je mehr Grob- und Makroporen vorliegen, desto höher sind Infiltration und gesättigte Wasserleitfähigkeit k_f . Unter Gleichgewichtsbedingungen, wenn Wasser gleichmässig oder leicht eingestaut infiltriert und der Flurabstand mindestens 1 m beträgt, entspricht die Versickerungsrate der gesättigten Wasserleitfähigkeit. Nimmt der Wassergehalt ab, herrschen ungesättigte Bedingungen und die Wasserleitfähigkeit reduziert sich. Da sich Wasser stets vom feuchten (geringes Potenzial) zum trockenen (hohes Potenzial) bewegt, kann bei Trockenheit das Wasser auch entgegen der Schwerkraft kapillar aufsteigen.

In der Strassen- und Siedlungsentwässerung ist für die Beschreibung des Wasserabflusses die spezifische Sickerleistung S_{Spez} [l/(min m²)] verbreitet. Über eine Näherungsformel lässt sich S_{Spez} mit k_f verknüpfen: $S_{\text{Spez}} = k_f/2$ [11]. Der gesättigte Fluss nach Darcy gilt für eine laminare Strömung im homogenen, gesättigten Grundwasserleiter, während die Versickerung perkolativ im ungesättigten Zustand erfolgt und eine Leitfähigkeitsreduktion durch Lufteinschlüsse zu erwarten ist.

Sekundärporen erhöhen mit dem Alter der Anlagen die Sickerraten [30]. Da in Pflanzsubstraten eher kein relevantes

Aufbaugesfüge zu erwarten ist, dürfte die Anfangsdurchlässigkeit nicht zunehmen.

RÜCKHALTEVERMÖGEN FÜR STOFFE

Partikuläre Stoffe wie GUS oder Pneuabrieb werden durch mechanische Filterung an der Oberfläche und in der Matrix von durchströmten Böden sowie Substraten >90% zurückgehalten [15, 23]. Schwermetalle werden bei erhöhtem pH-Wert (> 9) ausgefällt und ebenfalls filtriert [18]. Der hohe physikalische Rückhalt durch Oberflächen- und Raumfiltration ist darauf zurückzuführen, dass (1) eine deckschichtkontrollierte Filtration an der Bodenoberfläche wirkt, (2) die Partikel meistens grösser sind als die Porenradien, und (3) eine Durchgängigkeit des Porenraums fehlt (Konnektivität). Diese Mechanismen gelten sowohl für Böden als auch Pflanzsubstrate, wobei der effektive Wirkungsgrad durch die vorliegenden Partikeleigenschaften und die physikalischen Kenngrössen des jeweiligen Materials beeinflusst ist.

Gelöste Stoffe interagieren mit den Oberflächen der Feinfraktion. Vor allem Tonminerale und organisches Material, aber auch Oxide und Hydroxide, stellen die relevanten Oberflächen für die Adsorption zur Verfügung [31]. Aufgrund deren Ladung binden positiv geladene Stoffe (z. B. Schwermetalle, Nährstoffe) an Bodenpartikel. Organisches Material kann sowohl positiv als negativ geladene Stoffe binden. Die generelle Fähigkeit der festen Boden- oder Substratmatrix, geladene Stoffe zu binden, wird mit der Kationen- und Anionenaustauschkapazität beschrieben (KAK, AAK). Eine hohe KAK bedeutet, dass Schwermetalle und Nährstoffe gut binden. In tonreichen und stark humosen Böden ist die KAK besonders gross. Für Pflanzsubstrate ist die KAK oft nicht bekannt, aber die eingesetzten Komponenten und Mengenanteile deuten darauf hin, dass diese eher gering ist.

Organische Spurenstoffe werden eher schlecht von Versickerungsböden zurückgehalten. So wurden auch Spurenstoffe wie Biozide im Abstrom von Muldenrigolen nachgewiesen [32, 33]. Laborversuche bestätigen den Befund, dass gewisse Spurenstoffe von sickerfähigen Böden nur unzureichend adsorbiert werden [34]. Hierfür sind der geringe Tonanteil und die hohe Durchlässigkeit verantwortlich.

Chlorid ist ein inerte Stoff, im Boden sehr mobil und wird schnell ausgespült. Treten im Grundwasser Konzentrationserhöhungen auf, verdünnen sie sich schnell [28]. Natrium dagegen bindet gut an der Feinfraktion und erreicht Konzentrationen bis 500 mg/kg. Bei hoher Natriumzufuhr können Pflanzennährstoffe (z.B. Calcium, Magnesium, Kalium) und Schwermetalle von den Tonmineralen verdrängt werden [16, 26]. Natrium kann im massiven Überschuss auch dispergierend auf Bodenaggregate wirken. Dies kann zu Verschlammung, einer eingeschränkten Sickerleistung und Staunässe führen.

Die Stärke der Bindung durch Adsorption ist für Stoffe unterschiedlich. Schwach gebundene Stoffe können bei sich ändernden Bedingungen erneut mobilisiert und verlagert werden. Durch einen Spülostoss, ausgelöst durch Starkregen oder eine grosse Anschlussfläche, wird z.B. Tausalz ausgewaschen. Tritt genügend Sickerwasser auf, vor allem im Spätwinter, ist deshalb keine dauerhafte Schädigung der Vitalität, wie Salzsäden an Bäumen, zu erwarten. Dies belegen Felduntersuchungen [35].

Herkömmliche Pflanzsubstratrezepturen sind per se nicht dafür entwickelt, die eingetragene Stoffvielfalt zurückzuhalten. Die Filterfunktion für partikuläre Schadstoffe ist nur das zufällige Resultat der Substratmatrix. Gleiches gilt für gelöst eingetragene Schadstoffe wie Schwermetalle, die gelegentlich über die Sickerpassage entfernt werden. Es ist nicht zu erwarten, dass gelöste Schadstoffe gut gebunden werden, weil die dafür erforderliche Feinfraktion (Ton, Humus) in zu geringer Menge und Qualität vorliegen. Es ist aber auch nicht wirtschaftlich sowie technisch sinnvoll, bei jeder Pflanzgrube die Funktion als Schadstoffbarriere universell und unspezifisch vorzusehen. Sinnvoll ist hingegen eine standortspezifische Betrachtung unter Berücksichtigung der Belastungsklasse, Grundwasser-schutzzone und Verhältnismässigkeit.

PRÄFERENZIELLER FLUSS

Wasser versickert in ungesättigten Böden und Substraten gleichmässig oder ungleichmässig. Gleichmässige Infiltration in einem homogen porösen Medium führt dazu, dass die Matrix parallel zur Oberfläche durchfeuchtet wird. Typisch dafür sind sandige Böden und Pflanzsubstrate mit Einzelkorngefüge. Beim ungleichmässigen Fluss versickert dagegen das Regenwasser in Makroporen schneller als in der umgebenden Bodenmatrix. Das Phänomen des lokal schnellen Fliessens unter Umgehung der ungesättigten Matrix wird präferenzieller Fluss genannt und lässt sich in drei Untergruppen gliedern [36]:

- Heterogenitäten (*Funneling Flow*):
plötzlicher Wechsel von Materialien unterschiedlicher Körnung (feinkörnig über grobkörnig)
- Makroporenfluss (*Bypass Flow*):
morphologische oder funktionelle Besonderheiten der Makroporen (Regenwurmgänge, Wurzelkanäle)
- Instabilitäten (*Fingering Flow*):
hydrophobe Substanzen (z.B. Torf, Kompost)

Die Niederschlagsintensität spielt eine entscheidende Rolle bei der Initiierung von präferenziellem Fluss [37]. Erst wenn Regenwasser auf einer sickerfähigen Oberfläche staut, z.B. bei Starkregen, wird im Oberboden die Infiltrationskapazität überschritten, werden Makroporen angeströmt, und darin das Wasser unter gesättigten Bedingungen abgeleitet [38]. Deshalb

steigt mit der Grösse der Anschlussfläche die Häufigkeit des Wassereinstaus und damit die von präferenziellem Fluss.

Die Anzahl Makroporen steigt mit dem Alter des Bodens (Bodenbildung). Alte Pfahlwurzeln oder Regenwurmgänge verursachen biogene Makroporen. Abgestorbene lange, dicke (Pfahl-)Wurzeln (Durchmesser 10–30 mm) können stabile Makroporen ausbilden, die über Jahrzehnte bestehen bleiben [39, 40]. Schwermetalle oder andere Stoffe reichern sich in den Kanälen von Wurzeln an [41]. Eine tiefwurzelnde Bepflanzung ist daher entweder zu vermeiden oder von Beginn an gut zu planen und dabei die Wurzeln beim Wachstum zu lenken.

Wenn ein hoher Anteil an organischem Material vorliegt (Humus, Kompost, Torf etc.), kann bei Trockenheit die Hydrophobie des organischen Materials den präferenziellen Fluss begünstigen. Dies kann vor allem bei oberflächennah eingebrachten organischen Materialien bedeutsam sein. Auch die Wände von Regenwurmängen sind mit hydrophoben organischen Stoffen ausgekleidet.

Der präferenzielle Fluss tritt folglich dann auf, wenn folgende Voraussetzungen gegeben sind: (1) konnektive Makroporen (geogen, biogen), (2) hohe Niederschlagsintensität und (3) inhomogene Infiltration. Präferenzielles Fliessen ist bei technischen Substraten eher nicht zu erwarten, weil durchgängige Makroporen und strukturelle Instabilitäten meist fehlen. Versickert belastetes Wasser über präferenzielle Fliesswege, spricht man von präferenziellem Transport.

Bemerkenswert ist, dass der präferenzielle Stofftransport nahezu unabhängig von den Eigenschaften der Stoffe erfolgt und gelöste wie partikuläre Stoffe gleichermaßen verlagert werden können. Anhand der Färbung entlang der Schichtgrenze zwischen Bodenschicht (oben) und der Sandschicht (darunter) und in den groben Poren des Bodens ist in *Figur 2* zu erkennen, dass Pneuabrieb bis zur Schichtgrenze transportiert wurde. Die in die Tiefe verlagerte Stoffmenge dürfte aber gegenüber dem



Fig. 2 Verlagerung von Pneuabrieb und Farbtracer (Brilliant Blue) in einer Strassenabwasserbehandlungsanlage (SABA), in der Bodenmaterial oberhalb einer schräg verlaufenden Sandschicht eingebaut war [30].

Stoffeintrag auf der Fläche eher klein sein (<1%).

Ob präferenzielle Fliesswege in Bodenfiltern und Substraten zu einer messbaren Grundwasserbelastung im Strassenraum führen, ist unklar. Ergänzende Untersuchungen zu den transportrelevanten Faktoren im Strassenraum und den Austragsmengen in urbanes Grundwasser sind daher hilfreich. Vor dem Hintergrund, dass Baumpflanzungen in Mulden zunehmend in Erwägung gezogen werden, aber Widersprüche und Meinungen zur Relevanz von Wurzeln auf präferenziellen Transport bestehen, sollte dieser Einfluss in Behandlungsanlagen und Pflanzgruben besonders untersucht werden.

ANFORDERUNGEN AN SUBSTRATE

GRUNDEIGENSCHAFTEN

Pflanzsubstrate kommen meist dort zum Einsatz, wo natürliche Böden fehlen oder ihre Funktion nicht mehr erfüllen können (z. B. Sicker- oder Tragfähigkeit). Sie müssen je nach Einsatzbestimmung unterschiedliche mechanische, hydraulische, chemische und biologische Grundanforderungen erfüllen. Ausserdem liefern Baumpflanzungen im humosen Oberboden und mineralischen Unterboden an urbanen Standorten nicht immer genügend Wurzelwachstumsergebnisse [42]. Substrate für Vegetationstragschichten sollen daher optimale Wachstumsbedingungen durch gute Durchlüftung, Wasserhaltevermögen, Nährstoffangebot und die Grösse des Wurzelraums gewährleisten. Für die Strassenentwässerung steht eine hohe Wasserleitfähigkeit und hohe Reinigungsleistung im Vordergrund [43]. Prädestiniert sind dafür strukturstabile Gemische, welche Verdichtungen standhalten und Wasser gut versickern lassen (hohe Wasserleitfähigkeit), aber Nährstoffe und Wasser der Vegetation bereitstellen (hohe nFK). Ein pH-Wert zwischen ca. 6,0 und 7,0 ist empfehlenswert, um Pflanzen gute Standortbedingungen zu bieten.

Ein Pflanzsubstrat ist gemäss Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e. V. (FLL) ein Gemisch aus mineralischen und organischen Gerüstbaustoffen und Zusatzstoffen natürlicher und künstlicher Herkunft [44]. Wie bei natürlichen Böden, sind die Grobfraction (>2 mm) relevant für die Wasserleitfähigkeit (Sickerfähigkeit) und die

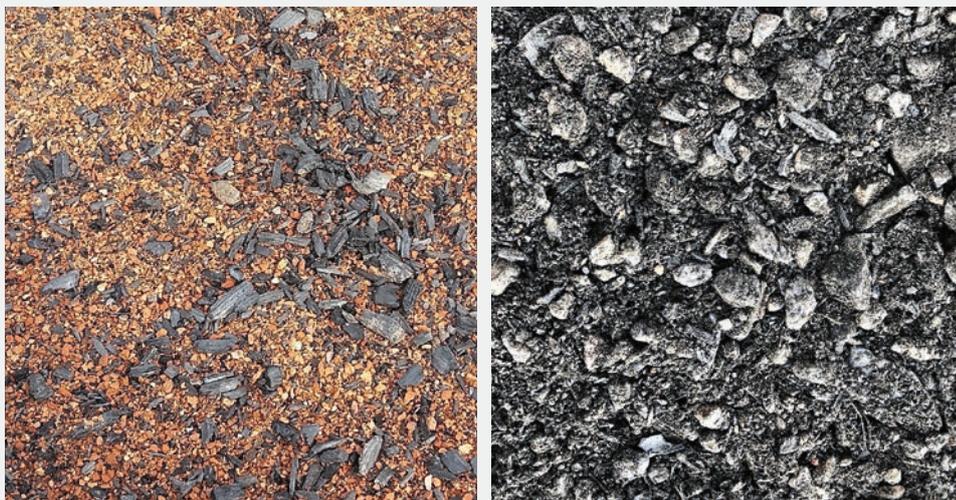


Fig. 3 Nicht überbaubare Pflanzsubstrate mit Ziegelschrot und roher Pflanzenkohle (links) und mineralisches Substrat mit kompostierter Pflanzenkohle (rechts; INKoh_{soil}). (©Burkhardt, Saluz)

Feinfraktion (<2 mm) für das pflanzenverfügbare Wasser (nFK). Zusätzlich ermöglicht die Grobfraction auch einen ausgedehnten Wurzelraum und eine tragfähige Struktur. Durch die homogene Zusammensetzung und den geringen Tonanteil dominiert das Einzelkorngefüge (Fig. 3).

Zu den natürlichen mineralischen Gerüstbaustoffen und schadstofffreien mineralischen Recyclingbaustoffen (RC-Materialien) zählen beispielsweise natürlicher Boden, Landerde, Sande wie Bruchsand aus Granit, Ziegelsand aus Bruchziegel, Blähschiefer, Splitt, Schotter, Steinmehl und Kieswaschschlamm. Als Landerde gilt ein tonhaltiger Oberboden, der beispielsweise bei der Zuckerrübenwäsche anfällt. Unter Einhaltung gesetzlicher Vorgaben sind gemäss FLL auch industrielle Nebenprodukte zugelassen. Die Substrate dürfen aber keine Stoffe enthalten, die das Grundwasser belasten können [44]. Die Schadstoffgehalte in den Einzelfractionen oder der Substratmischung werden jedoch nur gelegentlich angegeben.

Zu den Zusatzstoffen zählt organische Substanz wie Humus, Mulch, Kompost oder sog. Schwarzerde. Schwarzerde ist ein Kompost mit ca. 30% Pflanzenkohle (mehr als zehn Wochen kompostiert). Durch Mineralisation der Biomasse wird primär der Nährstoffbedarf der Vegetation abgedeckt. Zusätzlich kann organische Substanz die Puffereigenschaften des Substrats verbessern und Mikroorganismen einbringen.

Als weitere Zusatzstoffe gelten Hilfsstoffe, z. B. Pflanzenkohle und Mykorrhiza-Impfstoffe. Die Mengenanteile sind deutlich verschieden. Beispielsweise wird ein

Animpfen in geringster Menge dosiert, um die Entwicklung von Pilzhyphen zu stimulieren. Welchen effektiven Mehrwert die Zusatzstoffe auf das Pflanzenwachstum haben, ist eher unsicher.

RELEVANZ VON PFLANZENKOHLE

Für die Herstellung von Pflanzenkohle für Böden und Substrate wird organisches Material unter Ausschluss von Sauerstoff pyrolysiert. Ein dafür gängiges Temperaturfenster liegt zwischen 500 und 800 °C und die erzeugte innere Oberfläche zwischen 300 und 600 m²/g [45]. In Substraten sollten ausschliesslich Pflanzenkohlen aus natürlichem, unbelasteten Grüngut und eine qualitätsgesicherte Prozessführung in der Pyrolyse eingesetzt werden (z. B. Holzreste, Strauchschnitt). Die positiven Eigenschaften der Pflanzenkohle dürfen nämlich nicht durch den möglichen Eintrag von Schadstoffen unterlaufen werden. Für hochwertige Pflanzenkohlen wurden durch das *European Biochar Certificate* (EBC) zwei geeignete Qualitätsanforderungen definiert (EBC-Agro, EBC-Agro-Bio), wobei das etwas strenger EBC-Agro-Bio zu bevorzugen ist [46]. Diese sollten von den eingesetzten Pflanzenkohlen erfüllt werden. Abgeraten wird von EBC-Urban, weil dafür nicht nur rein pflanzliche Biomassen zugelassen sind, sondern auch Abfälle aus industriellen Prozessen wie beschichtetes Altholz und Kunststoffe bis zu 1,0 Massen-%, und höhere Schadstoffgehalte toleriert werden.

Pflanzenkohle kann Wasser dank ihrer grossen inneren Oberfläche bis zum 5-fachen Eigengewicht aufnehmen, wodurch die Nährstoffspeicherung und Wasserhalte-

tekapazität (FK) verbessert werden [47, 48, 49]. In Substraten mit Pflanzenkohle nehmen die Mittelporen (nFK) zu [50]. Offenbar unterstützt die Kohle auch die Aggregatbildung und damit wasser- und luftleitende grobe Sekundärporen [51]. Interessant ist der Einsatz in Substraten auch deshalb, weil sie dafür als C-Senke finanziell vergütet werden kann [52].

Pflanzenkohle soll vor dem Einsatz mit Nährstoffen und evtl. mit Mikroorganismen angereichert werden, beispielsweise durch Konditionierung mit Flüssigmedien (Komposttee o.ä.) oder Co-Kompostierung. So zeigten Bäume im «Stockholmer Substrat» mit kompostierter Pflanzenkohle einen 5-mal grösseren Zuwachs als vergleichbare Bäume in konventionellen Substraten [53]. Ausserdem siedeln sich Mikroorganismen an, die die Nährstoffumsetzung verbessern [54, 55].

Als nachteilig wird der pH-Wert der rohen Pflanzenkohle (ca. pH 9) beschrieben. Beobachtet wurde aber, dass sich dieser durch das Sickerwasser schnell dem Umgebungsmilieu anpasst und keinen signifikanten Einfluss auf Pflanzenwachstum, Mobilisierung von Schwermetallen oder Grundwasserqualität hat [56].

Vielfach wird darauf hingewiesen, dass Pflanzenkohle Schadstoffe wie Schwermetalle aufgrund ihrer grossen Oberfläche binde, andererseits aber auch erwähnt, dass die Wirkung mit der Zeit nachlasse [57]. Die zahlreichen widersprüchlichen Aussagen zeigen, dass die Schadstoffbindung durch Pflanzenkohlen nicht eindeutig belegt ist. So ist beispielsweise nicht auszuschliessen, dass die Schwermetalle nur wegen des erhöhten pH-Werts in der rohen Kohle temporär ausfallen und mit Absinken des pH-Werts wieder remobilisieren. Diese entspräche keinem langfristigen Rückhalt der Schadstoffe.

Verwirrung stiften zwei Begrifflichkeiten. Wenn von «aktivierter Pflanzenkohle» gesprochen wird, dann ist biologisch bzw. mikrobiell aktivierte Kohle, z. B. durch Co-Kompostierung oder Besprühen mit Mikroorganismen, gemeint. Eine chemisch aktivierte «Aktivkohle» zeichnet sich dagegen vor allem durch ein hohes Bindungsvermögen für gelöste Spurenstoffe aus, weil durch den Prozess der Aktivierung eine rund doppelt so grosse innere Oberfläche und andere Porengrössenverteilung als in der ur-

sprünglichen Pflanzenkohle erzeugt wird. Meistens werden dafür fossile Rohstoffe (z. B. Steinkohle) beigezogen. Nur vereinzelt findet sich chemisch aktivierte Pflanzenkohle aus heimischem Grüngut.¹

RICHTREZEPTUREN FÜR PFLANZSUBSTRATE

Substratmischungen sind auf die Einbauanforderung abzustimmen. Durch die FLL wurden deshalb zwei Grundtypen entwickelt: nicht überbaubare und überbaubare Substrate (Tab. 2) [44]. Viele Produkte von Firmen und ausgeschriebene Substratanforderungen orientieren sich an diesen FLL-Grundrezepturen.

FLL-Pflanzsubstrat 1

Die nicht überbaubaren Vegetationssubstrate sind für den Wurzelraum in offenen Baumgruben vorgesehen. Sie gelten als unempfindlich gegen verkehrsbedingte Erschütterungen, z. B. entlang von Strassen, und werden lose, zweilagig verfüllt. Bei stärkerer Beanspruchung (z. B. Fussgängerbereiche) sind bauliche Massnahmen gegen Verdichtung vorzusehen. Der Anteil wasserhaltender Mittelporen ist gegenüber natürlichen Böden eher gering.

FLL-Pflanzsubstrat 2

Überbaubare Substrate dienen primär der Wurzelraumerweiterung für Bäume angrenzend zur Pflanzgrube, und weisen eine zu Sandboden vergleichbar hohe gesättigte Wasserleitfähigkeit auf (Tab. 2). Der Einbau erfolgt schichtweise, um eine Nachverdichtung zu vermeiden. Solche Substrate werden als Unterbau unter der Frostschutz- und Tragschicht eingesetzt, z. B. unter sickerfähigen Belägen für Stell-

plätze, Wege, Plätze, wassergebundene Decken, Feuerwehruzufahrten.

PFLANZSUBSTRATE IN DER PRAXIS

In Städten und Gemeinden werden weitere Empfehlungen und Anforderungen an Pflanzsubstratrezepturen definiert, wie durch das Wädenswiler-, GSZ-, Schönbrunner-, Basler *Radix plus*[®]-Substrat oder Stockholmer-Substrat. In der Stadt Zürich sind drei Varianten vorgesehen: zwei nicht überbaubare Substrate A1 und A2 und ein überbaubares Substrat B für den verdichtbaren Einbau unter der Fahrbahn, dem Trottoir sowie als Verbindung zur Baumgrube. Die Rezepturvielfalt betrifft einerseits die Körnungslinien, andererseits die Materialeigenschaften der Komponenten.

Ob die eingebauten Produkte immer die gestellten Anforderungen erfüllen, ist eher unklar. Dies ist auch darauf zurückzuführen, dass sich einige vorgegebene Parameter, besonders im eingebauten Zustand, nur mit erheblichem Aufwand kontrollieren lassen. Dazu gehören beispielsweise das Gesamtporenvolumen oder die Luftkapazität.

Schwer nachvollziehen lässt sich, warum so viele verschiedene Substratrezepturen mit voneinander leicht abweichenden Kenngrössen (chemische, physikalische) gefordert werden. Wenn die allgemeinen Grundanforderungen an die Substratrezeptur eingehalten sind, entwickelt sich sowieso unter dem Einfluss des jeweiligen Standorts (Witterung, Bepflanzung etc.) über die Zeit eine spezifische Substratsignatur. Gleiche Rezepturen zeigen folglich langfristig standortspezifische Differenzierungsmerkmale.

Parameter	Nicht überbaubar	Überbaubar
Körnung	0/11–0/32	0/16–0/32
Schlammkorn (< 0,06 mm)	5–25 Masse-%	< 10 Masse-%
Sand (0,06–2 mm)	≥ 30 Masse-%	
Überkorn (32–63 mm)	≥ 10 Masse-%	
Organische Substanz	1–4 Masse-%	1–2 Masse-%
Verdichtungsgrad D_{pr}	85%	≤ 95%
Verformungsmodul M_{Ez}	–	≥ 45–60 MN/m ²
Gesamtporenvolumen	≥ 35 Vol.-%	
Wasserkapazität	≥ 25 Vol.-%	
Luftkapazität	≥ 10 Vol.-%	
Luftkapazität bei pF 1,8	≥ 15 Vol.-%	
S_{spez}	≥ 18 und ≤ 1800 l/m ² h	

Tab. 2 Ausgewählte technische Anforderungen an Substrat 1 «nicht überbaubar» und Substrat 2 «überbaubar» gemäss FLL (FLL, 2010) [44].

¹ *inkoh.swiss/inkoh-clean*

Als richtungweisend gilt das Stockholmer-Substrat, welches im Kern nur aus zwei Komponenten besteht: 85% Gestein (100/150 mm) für eine hohe Wasser-/Luftdurchlässigkeit, Durchwurzelbarkeit und Tragfähigkeit, und 15% kompostierte Pflanzenkohle als Wasser-/Nährstoffspeicher und zur Filterung eingetragener Partikel [53]. Weiteres Merkmal ist, dass das Material vor Ort gemischt wird. Zunächst wird Schotter- und Gesteinsmaterial verdichtet und dann der Pflanzenkohle-Kompost eingeschlämmt. Im Einbau werden darüber eine kiesige Tragschicht (32/90 mm) und als Unterlage reine Pflanzenkohle eingesetzt. In der Schweiz ist ein solches Gemisch noch immer die Ausnahme.

ADSORBERSUBSTRATE

Technische Adsorbersubstrate sind auf eine hohe hydraulische Durchlässigkeit (hohe Wasserleitfähigkeit) und maximalen Stoffrückhalt, auch von Spurenstoffen, ausgerichtet [24, 34]. Sie bestehen aus spezifischen Komponenten zur Schadstoffbindung, wie organischem Material (Kokos etc.), Zeolith, granuliertem Eisenhydroxid (GEH) oder granulierter Aktivkohle (GAK). Die Komponenten kommen einzeln oder als Mischungen zum Einsatz, mit Korngrößen der Einzelkomponenten von 1–5 mm. Die organischen Materialien sind oft faserig. GAK findet in neueren Filtermaterialien zur Bindung von Spurenstoffen, wie in der Abwassertechnik, Verwendung. Diese Fähigkeit bringt auch chemisch aktivierte Pflanzenkohle mit [58]. Ein qualitätskontrolliertes Produkt aus heimischer Pflanzenkohle bietet nur ein Schweizer Hersteller an (*INKoh_{Clean}*).

Gegenüber Boden besteht der Vorteil, dass Adsorbersubstrate die Schadstoffe platzsparend stark anreichern und damit die diffuse Belastung des Strassenabwassers gezielt entfernt wird. Kompaktanlagen, Schacht- und Rinnenfiltersysteme mit Adsorbersubstraten können bestenfalls GUS, Schwermetalle und Spurenstoffe gleichzeitig und gleich gut entfernen. Gemäss Herstellerangaben schwankt die Standzeit bis zur Beladungsgrenze, je nach Material und Anlagenkonzept, zwischen fünf und fünfzehn Jahren. Der Einbau erfolgt oberirdisch oder unterirdisch.

Für angebotene Substratmischungen, die den Schadstoffrückhalt für Strassenabwasser bewerkstelligen, sollten nachvollziehbare Untersuchungsergebnisse vorgelegt werden. Als Nachweis bietet sich der VSA-Labortest für Adsorbermaterialien an [24].

BAULICHE UMSETZUNG IM STRASSENRAUM

VERSICKERUNGEN UND ANLAGEN

Die Versickerung von Niederschlagswasser im Strassenraum erfolgt in der Regel über eine kleinere Versickerungsfläche im Vergleich zur Anschlussfläche. Die anfallende Wassermenge wird daher auf der Versickerungsfläche einstauen können. Die bepflanzte Oberfläche ist auch so anzulegen, dass das Niederschlagsabwasser zufließt (konkav). Durch eine zielgerichtete Zuführung von Niederschlagswasser an Baumstandorte erhöhen sich die Vitalität und das Wachstum. Daher ist auch die Anschlussfläche unter Berücksichtigung

der hydraulischen Leistungsfähigkeit der eingebauten Materialien zu maximieren. Vielmals wird aber bei Pflanzgruben aus gestalterischen Gründen eine gewölbte Substratoberfläche vorgesehen. Diese Ausführung ist unbedingt zu vermeiden.

Versickerungen mit einem Verhältnis $A_E/A_V < 5$ sind nicht bewilligungspflichtig, weil das Niederschlagsabwasser am Ort des Anfalls versickert [11]. Dazu gehören Rasenflächen, Wiesen, Strassenböschungen, durchlässige Flächenbeläge wie Rasengittersteine, Sicker-/Verbundsteine, Schotterrassen, nicht befestigte Wege, Ruderalflächen und Pflanzgruben mit kleiner Anschlussfläche. Bei einem Verhältnis von Entwässerungs- zu Versickerungsfläche $A_E/A_V \geq 5$ handelt es sich um eine bewilligungspflichtige Anlage, je nach Anlagenfunktion um eine Versickerungs- oder Behandlungsanlage. Bei Anlagen ist Retentionsvolumen auf die Jährlichkeiten gemäss VSA auszuliegen. Im Kanton Zürich wird die Auslegung in der Regel auf Einjährlichkeit vorgenommen. Stets ist bei der Dimensionierung auch die Überlaufsituation zu planen (Notentwässerung).

Gering belastetes Wasser kann ohne Behandlungsanlage über Substrate versickert werden. Bei mittlerer und hoher Belastung ist eine Bodenpassage oder Filtermaterial vorzusehen. Die Pflanzsubstrate erfüllen nicht den Zweck einer Behandlung für stärker belastetes Strassenabwasser, bzw. hierfür müssen die spezifischen Nachweise erst erbracht werden. Im Kanton Zürich darf gering und mittel belastetes Strassenabwasser im Gewässerschutzbereich *üB* ohne Bodenpassage versickert werden. Im *Au* ist für alle drei Belastungsklassen eine Bodenpassage erforderlich.

Bei der Ableitung von höher belastetem Strassenabwasser bieten sich insbesondere in Grundwasserschutzzone S3 und im Gewässerschutzbereich *Au* kombinierte Adsorber- und Pflanzsubstrate an. Eine Pflanzgrube, in der Strassenabwasser versickert werden soll, kann als Versickerungsanlage mit vorgeschalteter Behandlung ausgeführt werden, ggf. sogar mit Vorreinigung zur Abtrennung sedimentierbarer Partikel (GUS). Anschauliche Beispiele, teils sogar mit langjähriger Betriebserfahrung, sind aus Deutschland bekannt (Fig. 4). Diese Systeme lassen sich auch in der Schweiz etablieren.



Fig. 4 Adsorbersubstrat in Rinne zur Entfernung von Spurenstoffen, Mineralölkohlenwasserstoffen, Schwermetallen und GUS aus Strassenabwasser, bevor das Wasser in eine Pflanzgrube mit Baum ($A_E/A_V \geq 5$) geleitet wird. (©Fa. Funke Kunststoffe)

Einzuhalten ist ein Flurabstand zwischen 10-jährlichem Hochwasserspiegel und Pflanzgrubensohle von $\geq 1,0$ m. Die Grundwasserspiegel sind beispielsweise im Kanton Zürich im Layer «Grundwasserkarte» des kantonalen GIS Browsers ersichtlich oder können bei der kantonalen Gewässerschutzfachstelle nachgefragt werden.

BODENAUFBAU

Platz- und Strassenabwasser ist gemäss VSA über ≥ 30 cm bewachsenem Ober-/Unterboden zu versickern, davon mindestens 20 cm Oberboden [11, 59]. Möglich ist auch ein einschichtiger Aufbau mit > 40 cm Oberboden. Dies ist eine Minimalanforderung an die Schichtmächtigkeit, weil in der Praxis Setzungen, Unebenheiten etc. auftreten. Daher wird empfohlen, bevorzugt ≥ 50 cm Ober-/Unterboden einzubauen, wobei alleine das Oberbodenmaterial bis zu 50 cm Schichtmächtigkeit umfassend kann. Dies bedingt aber eine geeignete Bepflanzung. Der Boden sollte bevorzugt 10–15% Tonanteil aufweisen, um hohe Stoffbindung und Wasserdurchlässigkeit zu gewährleisten. Wird ein Abstand zwischen der unteren Wurzelzone und dem Grundwasser von $> 0,5$ m eingehalten, kann ein unerwünschter Stoffeintrag ausgeschlossen werden, auch weil Wurzeln die dauerhaft wassergesättigte Bodenzone meiden.

Böden sollten eine hohe Sickerfähigkeit aufweisen mit S_{Spez} von 30–120 l/m² h aufweisen [11]. Hydraulisch besonders gut geeignet sind körnige, strukturstabile Böden. Diese können aber eine schwache Rückhaltewirkung für gelöste Schadstoffe aufweisen. Die Minimalanforderung für den Untergrund beträgt $S_{\text{Spez}} 60$ l/m² h.

In Bodenfiltern ist immer eine geschlossene Pflanzendecke mit Ansaat (Wiese, Gras) und/oder Bepflanzung vorzusehen, um Verschlammung und Kolmation zu vermeiden. Zur Etablierung ausreichenden flächigen Bewuchses ist bis zu zwölf Monaten Vorlaufzeit einzukalkulieren. So lange kann die Anlage nicht mit Regenabwasser beschickt werden. Als alternative Erstabdeckung können Mulch (Schotter, Kies je ca. 10 cm), Pflanzmatten (Holz, Jute o.ä., möglichst keine Kunststoffe) oder Rollrasen dienen und die Vorlaufzeit massiv verkürzen. Kleine und feine Wurzeln, wie

jene von Gras, verursachen keinen präferenziellen Fluss.

SUBSTRATE IN PFLANZGRUBEN

Typische Bauweisen von Pflanzgruben (Synonyme: Baumrigole, Baumgrube, Versickerungsbeet etc.) orientieren sich oft an den FLL-Empfehlungen. Sie zeichnen sich beispielsweise durch offene Baumscheiben, tiefe Pflanzgruben mit Substraten, Tiefenbelüftung und überbaufähige Substrate aus [44]. Wesentliche Elemente einer Pflanzgrube sind eine wasserdurchlässige Fläche (z. B. Baumscheibe), über die Niederschlagswasser versickert wird, und die Pflanzgrube, welche einen temporären Wasserspeicher bildet und als Wurzelraum dient. Die Systeme werden teils mit Retentionsräumen (unterirdische Wanne, Schacht etc.) kombiniert, um noch mehr Wasser für Trockenperioden bereitzustellen.

Das Niederschlagabwasser kann punktuell über eingefasste Rinnen/Rohre oder flächig allseitig zur Baumscheibe geleitet werden. Selbst unterirdische Zuleitungen in den Wurzelraum sind verbreitet. Mit einer Mulchschicht (z. B. abdeckende Schicht aus Hartgesteinsplitt 8/16) lässt sich der Aufprall des Regens und damit die Verschlammung der Oberfläche vermeiden.

Um optimale Standortbedingungen für Bäume in Pflanzgruben bereitzustellen, sind diese bevorzugt wie folgt zu dimensionieren, wobei die Anforderungen teils über die der FLL hinausgehen [44]:

- Gesamtvolumen:
> 24 m³, entspricht 2–4 m³ Wasservorrat

- Direkter Wurzelraum (nicht überbaubares Substrat):
> 3 m³, lose einzubauen, maximal mit Baggerschaufel andrücken
- Baumscheibe:
> 6 m², offen oder teildurchlässig
- Tiefe: > 1,5 m Grube

Unter der Annahme, dass eine versickerungsfähige Baumscheibe von 6 m² Fläche mit Boden erstellt ist, können bis zu 30 m² Anschlussfläche ($A_{\text{H}}/A_{\text{V}} < 5$) angeschlossen werden, ohne dass eine bewilligungsfähige Anlage vorliegt. Viele Baumstandorte entlang von Wegen, Plätzen und Strassen fallen in diesen Bereich, weil eine vergleichsweise kleine Anschlussfläche in die Baumscheibe entwässert.

Als Faustregel gilt, dass der Durchmesser der Baumkrone dem Durchmesser des Wurzelraums entspricht und pro Quadratmeter Kronenprojektionsfläche etwa 0,75 m³ Wurzelraumvolumen anzustreben sind [44]. Um optimale Standortbedingungen zu bieten, sollte sich die Grösse der Pflanzgrube primär an den Anforderungen der Bepflanzung orientieren.

Pflanzenkohle, roh oder konditioniert, wird in Einzelschichten (Sandwich), eingemischt in Substraten (5–30 Vol.-%), oder eingeschlammte in grobes Material eingebaut (Fig. 3, 5). Welche Einbauart sich längerfristig mit einer höheren Vitalität verbindet, ist nicht eindeutig. Sehr viel wahrscheinlicher dürften die Qualität und Konditionierung der Kohle sowie die Menge den Wachstumserfolg bestimmen.



Fig. 5 Eingebautes Pflanzsubstrat mit vor Ort eingearbeiteter roher Pflanzenkohle, Baumbelüftungsrohren und Baumbewässerungswinkeln.

(© Burkhardt)

Pflanzgruben mit Pflanzsubstrat lassen bei der Filterung einen der Bodenpassage ebenbürtigen Rückhalt für GUS erwarten. Daher kann Strassenabwasser mit geringer Belastung nach heutigem Wissensstand ohne Behandlung versickert werden. Sind Substrate im Bereich höherer Belastungen vorgesehen, sollte bis zum Vorliegen entsprechender Untersuchungsergebnisse der Stoffrückhalt durch ein Barrierenkonzept mit Adsorbersubstraten umgesetzt werden. Über den Rückhalt von gelösten Spurenstoffen ist wenig bekannt und es herrscht ebenfalls Untersuchungsbedarf.

PFLANZGRUBEN MIT BEHANDLUNG

Für technische Behandlungssysteme, die zur Vorreinigung mit stärker belastetem Platz- und Strassenabwasser beschickt werden, ist festzulegen, welche Schadstoffe und Belastungshöhen entfernt werden sollen. Besonders vorteilhaft sind universell wirksame Substrate, die stoffunspezifisch reinigen und damit Spurenstoffe, Schwermetalle und GUS entfernen (Fig. 4).

Eine bodendeckende Bepflanzung ist bei Rinnensystemen möglich. Für grossflächige Sickermulden oder offene Sickerschächte sind sogar Büsche und Pflanzen des Röhrchsaumes geeignet. Es gibt Hinweise, dass die Vegetation die Reinigungsleistung und die Standzeit der Substrate verlängern, weil die Wurzelaktivität der Kolmation entgegenwirkt, die mikrobiologische Aktivität organische Schadstoffe abbauen hilft und sich durch den Eintrag von Pflanzenmaterial eine Deckschicht bildet, die ebenfalls eine Reinigungsleistung übernimmt.

Die Standzeit der Substrate sollte je nach Verkehrsbelastung und Menge auf > 10 Jahre ausgelegt sein. Nachher lassen sich die Materialien aussaugen und durch neues Substrat rasch ersetzen. Die Entsorgung kann über eine Bodenwaschanlage oder Deponierung erfolgen.

EINBAU: PHYSIKALISCHE ANFORDERUNGEN

Oberbodenverdichtung oder Verschmieren der Bodenoberfläche sind für die Versickerung nachteilig. Eine Verdichtung betrifft primär die Sekundärporen, die infolge der Gefügebildung entstanden sind, gefolgt von Grobporen, besonders in strukturlabilen Böden. Je feinkörniger, skelettärmer und organischer das einzubauende Material, desto grösser ist die Verdichtungsempfindlichkeit. Selbst ver-

sickerungsfähige Böden mit Vegetation sind ohne besondere Vorverdichtung und strukturstabile Kornabstufung nicht für eine Befahrung geeignet. Besondere Vorsicht ist beim Unterhalt von Bodenfiltern geboten.

Organisches Material, das leicht abbaubar ist wie Kompost oder Torf, bietet Nährstoff an, kann aber durch den mikrobiellen Abbau zu Setzungen führen. Schlecht abbaubares organisches Material wie Pflanzenkohle und mineralisches Material verändert sich über die Zeit kaum.

Die Tragfähigkeit von Substraten wird durch das Skelettmaterial bestimmt [60]. Das Material sollte einheitlich (enge Korngrößenverteilung), blockförmig oder kantig sein, wodurch eine hohe Porosität gewährleistet ist. Für hohe Tragfähigkeit und Durchlässigkeit hat sich Grobmaterial > 32 mm bewährt. Beispielsweise werden beim Stockholmer-Substrat Steine und Schotter eingebaut. Gut abgestufte Mischungen nehmen die Verkehrslasten gut auf. Wesentliches Merkmal ist, dass das Material widerstandsfähig gegen die permanente Beanspruchung durch Verkehr, Wasser (Frost-/Tauwetter) sowie Tausalz sein muss.

Pflanzsubstrate sind ebenfalls bei maximal erdfeuchter Konsistenz lagenweise einzubauen, dabei nicht überbaubare Substrate lose, maximal mit der Bagger-schaufel angedrückt, und überbaubare Substrate bei max. 45 MN/m² verdichtet. Die FLL empfiehlt, sich an folgenden Anforderungen zu orientieren [44]:

- Verkehrsstragschicht, teildurchlässig: Tragschicht und Erdbau-Planum auf Substrat mit M_{Ez} max. 120 MN/m² einbauen
- Wurzelraum mit Substrat, gut durchlässig: (1) nicht überbaubares Substrat mit $M_{Ez} \leq 45$ MN/m² zweilagig einbauen (oben lose, untere Lage leicht verdichtet) und (2) überbaubares Substrat mit M_{Ez} 45–60 MN/m² bei $\leq 95\%$ D_{Pr} und mindestens zwei Lagen einbauen (unten > 60 cm, oben > 40 cm) sowie statisch oder mittelgrosser Rüttelplatte verdichten
- Untergrund: Wasserdurchlässigkeit im Bereich vom Substrat, um Versickerung ins Grundwasser zu ermöglichen und Staunässe vermeiden

Für einen mehrlagigen Einbau resultiert, dass (von unten beginnend) Lage 1 und 2 mit je 45 MN/m², Lage 3 ≤ 80 MN/m² (Erd-

bau-Planum) und Lage 4 mit 80 MN/m² (befahrbar Verkehrsfläche) eingebaut werden. Als Nachweis für die Lagerungsdichte bieten sich eine Rammsonde oder eine rechnerische Herleitung aus der Summenkurve an.

Ein Verformungsmodul von $M_{Ez} \leq 45$ MN/m² bedeutet, dass die Fläche bereits mit bis zu 45 kg/cm² belastet werden kann. Die gleichen Anforderungen werden an Schottertragschichten im Strassenbau gestellt. Materialien für Frostschuttschichten weisen dagegen geringere Anforderungen auf (z. B. der Körnung), sind aber ebenfalls befahrbar und lassen sich mobil herstellen (z. B. Mischen im Radlader). Einbauvarianten für geringere M_E -Werte im Verkehrswegebereich sollten entwickelt und nachgefragt werden, weil sich damit die Standortbedingungen für Bepflanzungen (Wasserleitfähigkeit, Luftkapazität, Wurzelraum) deutlich verbessern lassen.

Feuerwehruzufahrten können weniger hoch verdichtet werden als Strassen oder Parkplätze, denn die Befahrung findet nur im Ausnahmefall statt. Hohe Verdichtung kann auf ausgewiesene Standplätze für Leiterwagen begrenzt werden.

BEPFLANZUNG IM STRASSENRAUM

Bäume reduzieren durch Interzeption, Transpiration und Evaporation die Sickerwassermenge um 20–60%. Sofern genügend Wasser bereitsteht, zeigen Stadtbäume eine gegenüber Waldbäumen 2- bis 3-mal höhere Transpirationsleistung und benötigen dafür täglich 2–5 l Wasser pro m² Kronenfläche [61]. Ein Baum mit 10 m Kronendurchmesser kann pro Tag 160–400 l transpirieren. Sie benötigen jedoch optimale Bedingungen bei Wasser-, Luft- und Nährstoffversorgung, um im Umfeld von Strassen ihre volle Leistung zu erbringen.

Verdunstung, Beschattung oder Biodiversitätsbeitrag werden durch die Art der Vegetation bestimmt. Insbesondere bei Bäumen ist aber die Wahl für den Strassenraum eingeschränkt, weil viele einheimische Arten, vor allem solche aus Baumschulen (veredelte Arten), dem Stress durch Hitze, Trockenheit, temporären Wassereinstau und Salz im Strassenraum langfristig nicht standhalten [62, 63]. Nicht nur standortspezifisch, sondern über die Zeit wirken die Stressfaktoren. Fallen beispielsweise die Frühjahrsniederschläge aus, um das Tausalz

auszuwaschen, können eher Salzschäden auftreten. Zudem werden sich in den nächsten 20 Jahren die klimatischen Bedingungen im innerstädtischen Raum erheblich verschärfen, sodass bereits heute auf diese Veränderungen eingegangen werden muss.

Daher sind standortgerechte Arten (bevorzugt Wildformen) und Diversifikation in den Vordergrund zu rücken. Dazu sollen auch Arten aus anderen Regionen, beispielsweise dem Mittelmeerraum, vorgesehen werden. Der Beitrag zur Biodiversität ist dann besonders gross, wenn möglichst viele verschiedene und auch einheimische Arten gepflanzt werden. Im Kanton Zürich sollten bevorzugt Arten des Biodiversitätsindex 3 und höher gewählt werden [64].

Bäume entwickeln ihre Wurzeln standortangepasst [43]. Mit Pflanzenkohle, Belüftung und wenig verdichtetem Substrat lässt sich die Wurzelrichtung aktiv lenken [65]. Wuchskorridore können unter Leitungen, Kofferungen und Foundationen (Unterbau) gebaut werden. So treten die genetischen Grundtypen in den Hintergrund und es lassen sich Schäden an der Infrastruktur vermeiden [66]. Aktive technische Belüftungsmassnahmen sind eine weitere Strategie, den Baumstandort zu verbessern und Wurzelwachstum zu beeinflussen (Fig. 5).

In Berlin wurden seit vielen Jahren positive Erfahrungen mit Baumpflanzungen in Mulden gemacht. Daher wurden sechs

Prüfaspekte für die Planungspraxis entwickelt [67]. Ziel ist, dass sich die Bäume schnell am Standort adaptieren und gleichmässig wachsen, ohne dass die Funktion der Mulden beeinträchtigt wird. Bei gelegentlicher Einstauhöhe bis 30 cm über 24 Stunden bestehe für gesunde Bäume ein geringes Schädigungsrisiko [68]. Eine intensivere Bepflanzung stösst auch in der Schweiz auf Interesse, weil für Bäume innerstädtische Freiflächen knapp sind und Trockenperioden grosse Schäden verursachen.

Die erarbeiteten Pflanzvorschläge für wechselfeuchte Vegetationsflächen für Mulden oder Pflanzgruben beziehen Stauden, Sträucher und Bäume ein [9, 10]. Die Typologie berücksichtigt den Feuchtebedarf (trocken, feucht) und die Tausalzverträglichkeit (geringe Salzlast < 100 mg/kg Chlorid, hohe Salzlast ≥ 100 mg/kg Chlorid) (Fig. 6):

- $A_E/A_V < 5$: trocken, salztolerante Pflanzen bei versiegelten Anschlussflächen
- $A_E/A_V \geq 5$: feucht, Salztoleranz nicht relevant, weil Salz ausgewaschen wird

In Versickerungsböden und Pflanzsubstraten ist der kapillare Wasseraufstieg limitiert. Längere Trockenperioden können flachwurzelnder Vegetation Probleme bereiten. Relevant für die Wurzelzone ist deshalb der Untergrund unterhalb der Pflanz- bzw. Versickerungsgrube. Je nach Untergrund kann zwischen Grabensohle und ca. 1 m unterhalb der Hauptwurzel-

raums noch genügend Wasser bereitstehen.

Wurzelnackte Bäume durchwurzeln die Pflanzsubstrate sofort nach der Pflanzung. Daher wird entgegen der etablierten Praxis empfohlen, die Anzucht bevorzugt in den Pflanzsubstraten vorzunehmen, die auch später in den Gruben verwendet werden.

PLANERISCHE EMPFEHLUNGEN

In einem Merkblatt wurden im Rahmen dieses Projekts für Platz- und Strassenabwasser einige Empfehlungen und Hintergrundinformationen für die Praxis zusammengefasst [10]. Der Fokus liegt primär auf gering belastetem Strassenabwasser. Für mittel und hoch belastetes Strassenabwasser werden aber erste Hinweise zu Gestaltungsoptionen gegeben. Werden die Planungsgrundsätze eingehalten, ist nach heutigem Kenntnisstand der Grundwasserschutz ausreichend berücksichtigt. Nachfolgend einige Eckpunkte der Planungshilfe.

BELASTUNGSREDUKTION

Durch Massnahmen lassen sich stoffliche Belastungen vermeiden oder vermindern, beispielsweise Verkehr beruhigen (reduzieren, verlangsamen) und Strassenreinigung intensivieren (Kehrdienst). Auf Flächen mit höherer Belastung können emissionsmindernde Massnahmen dazu führen, dass sich diese zu geringeren Belastungen verändern. Empfohlen wird, die Umsetzbarkeit der Massnahmen in einer frühen Planungsphase stets zu prüfen.

TAUSALZ

Für die Einleitung und Versickerung von Niederschlagswasser mit Tausalz gibt es weder gesetzliche noch planerische Vorgaben. Dennoch sollte Winterdienst besonders im Einzugsbereich von baumbestandenen Pflanzgruben flächendifferenziert und mit reduzierten Tausalzmengen durchgeführt werden. Eine geschickte Entwässerung hilft Salzschäden an Bäumen zu vermeiden. Salztolerante Arten werden für trockene Standorte empfohlen.

ANSCHLUSSFLÄCHE

Grosse Anschlussflächen an Pflanzgruben sind vorteilhaft, weil sie die Wasserversorgung von Bäumen deutlich verbessern und das Auswaschen

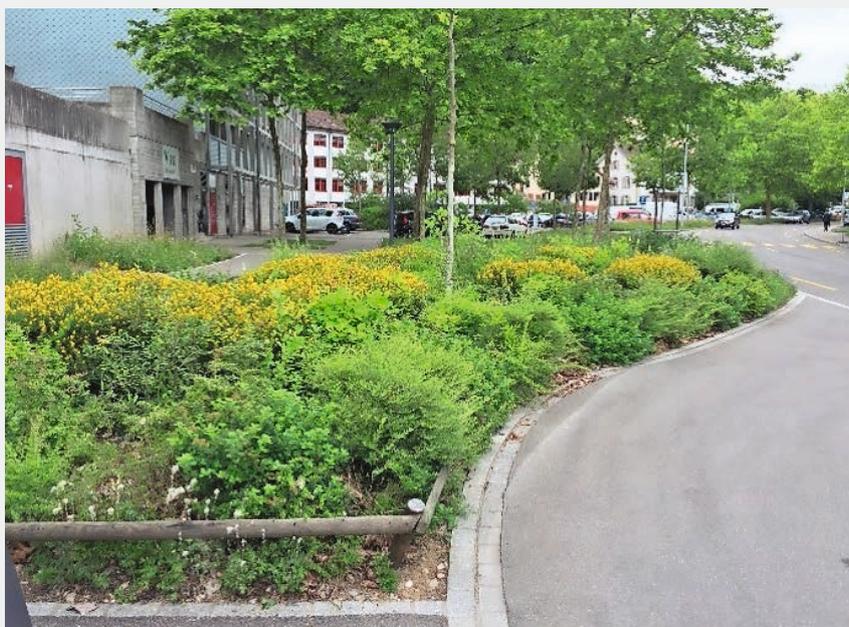


Fig. 6 Bepflanzungen im Strassenbereich mit feuchten Standortbedingungen und starker Salzlast ($A_E/A_V > 5$). (© Saluz)

von Tausalz beschleunigen. Ist bei einer Pflanzgrube (Baumrigole, Tiefbeet etc.) ein Flächenverhältnis $A_p/A_v > 5$ vorgesehen, wird diese zu einer Anlage. Der Standort ist dann regelmässig feucht, aber nicht hoch belastet mit Tausalz.

BEHANDLUNGSBEDARF

Bei gering belastetem Niederschlagsabwasser ist keine Behandlung, bei stärker belastetem eine Vorbehandlung mit Adsorbersubstrat oder Bodenpassage erforderlich. Die Verhältnismässigkeit einer kombinierten Massnahme aus Adsorber- und Pflanzsubstrat ist gut abzuwägen. Ein VSA-Nachweis zum Rückhaltevermögen wird für Adsorbersubstrate empfohlen.

RICHTREZEPTUREN

Substrate sind grobkörniger und haben somit mehr Grobporen als natürliches Bodenmaterial. Die Luftversorgung im Wurzelraum und die Sickerleistung ist grösser, der Rückhalt von pflanzenverfügbarem Wasser aber kleiner, sofern nicht ein Teil der Substratteile selber porös ist (Pflanzenkohle, Blähton, organisches Material). Für Boden und Substrate werden folgende Anteile empfohlen: Schlämmkorn ($< 0,05$ mm) 15-25% mit einem Tonanteil von rund 5-15% (oder vergleichbar bindungsstarkes Material), Siebfraction ($> 0,05$ mm) mit Sandanteil $> 30\%$, organische Substanz 1-4%, konditionierte Pflanzenkohle EBC-*AgroBio* $> 5\%$, $S_{spez} > 30$ l/m² h, Lagerungsdichte 1,4 g/cm³ und maximal 1,6 g/cm³. Daraus leiten sich eine Luftkapazität und Feldkapazität von je $> 30\%$ und KAK > 10 cmolc/kg ab. Die Qualität muss nachgewiesen werden (s.u. Pflanzenkohle und Schadstoffgehalte). In der Schweiz darf nur über nicht verschmutztes Material konzentriert versickert werden.

INNOVATIVE REZEPTUR

Das Stockholmer-Substrat mit Kornfraktionen bis 150 mm Grösse hat sich bewährt. Daher sollten vermehrt grössere Gesteinsfraktionen eingesetzt werden. Besonders in der Grobfraktion bieten sich auch schadstofffreie RC-Materialien wie gewaschene Gleisschotter, ggf. Betonbruch an.

PFLANZENKOHLE

Pflanzenkohle erhöht die Wasserhaltekapazität (nFK) und dient als Aufwuchsfläche für Mikroorganismen. Vor-

konditionierte Kohle kann Nährstoffe bereitstellen. Der pH-Wert der rohen Pflanzenkohle (ca. pH 9) geht durch Sickerwasser rasch zurück und hat keinen signifikanten Einfluss auf Pflanzenwachstum, Mobilisierung von Schwermetallen oder Grundwasserqualität. Als Mindestanforderung für die Qualität sollte EBC-*AgroBio* gewählt werden.

SCHADSTOFFGEHALTE

Qualitätsnachweise sind für die relevanten Materialien in Substraten vorzulegen (organische Substanz, RC-Materialien etc.). Vorteilhaft ist, wenn auch durch Wasser mobilisierbare Schadstoffe nachgewiesen werden, z.B. mittels Perkolationsversuch, um die Mobilität der Stoffe sowie eine mögliche Grundwasserbelastung abschätzen zu können.

PRÄFERENZIELLER FLUSS

Die Auftretenswahrscheinlichkeit von präferentiellem Fluss lässt sich über die Planung minimieren, indem (1) grobkörniges Substrat mit wenig organischer Substanz gewählt, (2) auf tiefwurzelnde Bepflanzung verzichtet (maximal Pflanzgrubentiefe), (3) die Wurzeln zur Seite gelenkt, und (4) eine oberflächennahe grobkörnige Wasserverteilschicht (Mulch) vorgesehen werden.

BEPFLANZUNG

Für die Ausarbeitung eines Bepflanzungskonzepts sollten möglichst viele verschiedene Arten mit Biodiversitätsindex 3 oder höher gewählt, sowie die Salz- und Feuchtebelastung abgeschätzt werden. Der Beizug einer Fachperson ist für den langfristigen Erfolg der Pflanzung unerlässlich.

QUALITÄTSSICHERUNG

Einfach zu ermittelnde Parameter für die Qualitätssicherung bei Anlieferung auf der Baustelle oder nach dem Einbau sind vorteilhaft. Dafür prädestiniert sind die Korngrössenansprache (Fingerprobe), der Verdichtungszustand (Penetrometer) und spezifische Sickerleistung (Doppelring-Infiltrimeter). Durch Lieferanten sind gewisse Materialeigenschaften wie Körnungskurve, pH, Salz- und Schadstoffgehalte nachzuweisen.

SCHLUSSFOLGERUNGEN

Ein hoher Anteil von versickerungsfähigen, begrünter Flächen im urbanen

Raum wirkt gegen Oberflächenabfluss, kühlt durch Evapotranspiration, erhöht die Aufenthaltsqualität für die Bevölkerung und fördert die Biodiversität. Dabei sind die Massnahmen wirtschaftlich, wenn sie «Huckepack» mit anstehenden Strassenerneuerungen und Instandsetzungsarbeiten durchgeführt werden. Bereits heute bieten sich blaugrüne Gestaltungselemente vor allem in *Au* und *üB* an.

Um die Umsetzung und Vernetzung von Strukturen voranzutreiben, ist die Strassenraumgestaltung enger mit der Verkehrs- und Freiraumplanung zu verknüpfen. Zudem sind Baumpflanzungen in Bodenfiltern anzustreben, zunächst schrittweise, z.B. in Pilotversuchen, um Erfahrung zu sammeln, und ausserhalb von Grundwasserschutz zonen und Gewässerschutzbereich *Au*, d.h. im übrigen Bereich *üB* oder bei sehr grossem Grundwasserflurabstand. Dennoch kann punktuell Strassengrün nicht annähernd die Versiegelung in Städten wettmachen.

Aufgrund von Tausalz und leicht alkalischen pH-Werte wegen beigegebener Pflanzenkohlen werden keine wesentlichen Schäden an der Vegetation oder beim Bodengefüge unter den Witterungsbedingungen der Schweiz (hohe Regenintensitäten), insbesondere bei grosser Anschlussfläche, erwartet. Die Auswahl der Pflanzenarten sollte trotzdem auf die erwartete Feuchtigkeit und Tausalzmenge abgestimmt sein.

Substrate bieten optimale Standortbedingungen im urbanen Raum für Bäume, Stauden etc., wenn die wesentlichen Grundanforderungen an den Wasser- und Lufthaushalt, allenfalls die Tragfähigkeit und das Nährstoffangebot, erfüllt sind. Bei der richtigen Zusammensetzung sind sie universell einsetzbar. Aus der natürlichen Bodengese (-entwicklung) lässt sich ausserdem herleiten, dass Substrate nicht standortspezifisch entwickelt werden müssen, weil sich diese am Standort über die Zeit spezifisch verändern (Einfluss der Witterung, Pflanzen etc.). Ausschreibungen sollten für die Substratauswahl und Pflanzgrubenbauweisen einfache, klar kontrollierbare Parameter vorsehen und die Anforderungen der FLL eher zur Orientierung nutzen.

Das Potenzial der Substrate, Schadstoffe im Strassenabwasser zu binden, lässt sich bereits heute über einen Labortest grob abschätzen. Damit steht eine Methodik bereit, um die Materialeignung im Be-

DANK

Das Projekt wurde im Auftrag vom Tiefbauamt des Kantons Zürich und vom Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft des Kantons Zürich durchgeführt. Für die gute Unterstützung und Projektbegleitung danken wir *Christoph Abegg, Sarah Marthaler, Stefan Schmid und Natascha Torres*.

reich von mittel bis hoch belastetem Strassenabwasser zu ermitteln. Prioritäre Parameter für Pflanzsubstrate gilt es als Qualitätsmerkmal zu entwickeln. Um praktikable Barrierekonzepte zu etablieren, sind weitere Abklärungen angezeigt. Damit liesse sich die Vorbehandlung bei Entwässerungselementen verlässlicher einschätzen.

Unklar ist weiterhin, welche Bedeutung abgestorbene Wurzeln von Bäumen auf den präferenziellen Stofftransport ins Grundwasser haben können. Unter Berücksichtigung der technischen Merkmale von Substraten lässt sich vorsichtig formulieren, dass das Risiko einer relevanten Stoffverlagerung gering sein dürfte. Durch Untersuchungen an bestehenden Versickerungen mit Bepflanzung lässt sich diese Fragen hinreichend genau klären.

Bei der heutigen Planung von Pflanzgruben an Plätzen und Strassen wird selten die mögliche Belastung berücksichtigt. Auch ist festzuhalten, dass keine Daten zur effektiven stofflichen Belastung durch organische Spurenstoffe im Strassenabwasser vorliegen. Der Fokus lag bisher auf GUS, Kupfer und Zink. Diese Kenntnislücke sollte behoben werden, um die grundsätzlichen Risiken für das Grundwasser zu kennen und Massnahmen zielgerichtet zu treffen.

Die Schadstoffe sind aber nicht für die Vegetation relevant. Auch sollten die Wissenslücken zu präferenziellem Transport und dem Schadstoffspektrum nicht verhindern, mit der blau-grünen Umgestaltung des Strassenraums rasch vorwärts zu gehen. Aufgrund des Klimawandels und der Dringlichkeit zu handeln, müssen gleichzeitig schnellstmöglich Kenntnisse über die mögliche Schadstoffbeeinträchtigung des Grundwassers beschafft werden.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] CH2018 (2018): CH2018 – Climate Scenarios for Switzerland. Technical Report, National Centre for Climate Services, Zurich
- [2] BAFU/ARE (2022): Regenwasser im Siedlungsraum. Starkniederschlag und Regenwasserbewirtschaftung in der klimaangepassten Siedlungsentwicklung. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bundesamt für Raumentwicklung (ARE), Umwelt-Wissen Nr. 2201, 115 S.
- [3] AWEL (2018): Klimawandel im Kanton Zürich – Massnahmenplan Anpassung an den Klimawandel, Baudirektion Kanton Zürich – AWEL
- [4] ARE & BWO – Bundesamt für Wohnungswesen Bundesamt für Raumentwicklung (2014): Freiraumentwicklung in Agglomerationen. Bern
- [5] Benden, J. et al. (2017): Multifunktionale Retentionsflächen. MURIEL Publikation
- [6] BlueGreenStreets (Hrsg.) (2022): BlueGreenStreets Toolbox – Teil A und Teil B. Multifunktionale Straßenraumgestaltung urbaner Quartiere, März 2022, Hamburg. Erstellt im Rahmen der BMBF-Fördermassnahme «Ressourceneffiziente Stadtquartiere für die Zukunft» (RES:Z)
- [7] Fischer, L. et al. (2021): Wegleitung Hitze-minderung bei Strassenprojekten, Metron Zürich AG im Auftrag der Baudirektion des Kanton Zürich
- [8] DWA A 138-1 (Gelbdruck): Entwurf – Anlagen zur Versickerung von Niederschlagswasser – Teil 1 Planung, Bau, Betrieb. DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.
- [9] Burkhardt, M.; Kulli, B.; Saluz, A. (2022): Neue Herausforderungen bei der Strassenentwässerung – Recherche zum Stand des Wissens. Technischer Bericht im Auftrag des Tiefbauamts Kanton Zürich und Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft. OST & ZHAW, Rapperswil & Wädenswil
- [10] Burkhardt, M.; Kulli, B.; Saluz, A. (2022): Schwammstadt im Strassenraum: Planungshilfe zum Umgang mit Platz- und Strassenabwasser bei geringer Belastung. OST & ZHAW, Rapperswil & Wädenswil
- [11] VSA (2019): Abwasserbewirtschaftung bei Regenwetter. Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute, Glattbrugg
- [12] Clara, M. et al. (2014): Spurenstoffemissionen aus Siedlungsgebieten und von Verkehrsflächen. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. Wien, Österreich
- [13] Wicke, D. et al. (2017): Spurenstoffe im Regenwasserabfluss Berlins. KA Korrespondenz Abwasser, Abfall, 5: 394–404
- [14] Polukarov, M. et al. (2020): Organic pollutants, nano- and microparticles in street sweeping road dust and washwater. Environment International, 135: 105337
- [15] Kasting, U. (2002): Reinigungsleistung von zentralen Anlagen zur Behandlung von Abflüssen stark befahrener Strassen. Diss. Universität Kaiserslautern
- [16] Hjortenkrans, D.S.T.; Bergbäck, B.G.; Häggerud, A.V. (2008): Transversal immission patterns and leachability of heavy metals in road side soils. Journal of Environmental Monitoring, 10, 739–746
- [17] Sieber, R.; Kawecki, D.; Nowack, B. (2019): Dynamic probabilistic material flow analysis of rubber release from tires into the environment. Environmental Pollution, 113573
- [18] Wagner, S. et al. (2018): Tire wear particles in the aquatic environment – a review on generation, analysis, occurrence, fate and effects. Water Res., 139: 83–100
- [19] Björklund, K. et al. (2009): Phthalates and nonylphenols in urban runoff: Occurrence, distribution and area emission factors. Sci. Total Environ., 407(16), 4665–4672
- [20] Baensch-Baltruschat, B. et al. (2020): Tyre and road wear particles (TRWP) – A review of generation, properties, emissions, human health risk, ecotoxicity, and fate in the environment. Science of the Total Environment 733, 137823
- [21] Tian, Z. et al. (2020): A ubiquitous tire rubber-derived chemical induces acute mortality in coho salmon. Science 371, 185–189
- [22] <https://www.microproof-cedr.nl/deliverables.php>
- [23] ASTRA (2021): Strassenabwasserbehandlungsverfahren – Stand-der-Technik. UVEK, Bern
- [24] VSA (2019): Merkblatt – VSA Leistungsprüfung für Behandlungsanlagen. Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute, Glattbrugg,
- [25] Dai, H.L. et al. (2012): Evaluation on the Effects of Deicing Chemicals on Soil and Water Environment. Procedia Environmental Sciences, 13, 2122–2130
- [26] Zuber, R. (2007): Streusalz: Auswirkungen auf die Stadtbäume und Gegenmassnahmen – Literaturstudie. Stadt Chur Gartenbauamt
- [27] TBA ZH (2021): Persönliche Mitteilung. Tiefbauamt Kanton Zürich
- [28] Boller, M. (2011): Häufig gestellte Fragen zur Strassensalzung. Eawag, Dübendorf
- [29] GSchV (2021): Schweizerische Gewässerschutzverordnung vom 28. Oktober 1998, Bern
- [30] Pazeller, A. et al. (2017): Vergleich der Eignung von bewachsenen Boden- und Sandfiltern zur Reinigung von Strassenabwasser. Forschungsprojekt im Auftrag des Schweizerischen Verbandes der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)
- [31] Pignet, P.; Parriaux, A.; Bensimon, M. (2008): The diffuse infiltration of road runoff: An environmental improvement. Science of the Total Environment, 397, 13–23
- [32] Lange, J. et al. (2017): Urbane Regenwasserver-sickerung als Eintragspfad für biozide Wirkstoffe in das Grundwasser? Korrespondenz Wasserwirtschaft, 10(4): 198–202
- [33] Flanagan, K. et al. (2019): Retention and transport processes of particulate and dissolved micropollutants in stormwater biofilters treating road runoff. Science of The Total Environment, 656, 1178–1190
- [34] Burkhardt, M.; Schmidt, S.; Bigler, R. (2017): VSA-Leistungsprüfung – Leistungsermittlung im Labor- und Feldtests für Anlagen zur Niederschlagswasserbehandlung. Aqua & Gas, 11: 33–41

- [35] Grimm, K.; Murer, E.; Schmidt, S. (2021): Das Schwammstadt-Prinzip für Stadtbäume in Österreich. In: ÖWAV, Tagungsband Aqua Urbanica 2021, Innsbruck
- [36] Hendrickx, J.M.H.; Flury, M. (2001): Uniform and Preferential Flow Mechanisms in the Vadose Zone. Workshop on Conceptual Models of Flow and Transport in the Fractured Vadose Zone, 149–187
- [37] Kim, Y.J.; Steenhuis, T.S.; Nam, K. (2008): Movement of Heavy Metals in Soil through Preferential Flow Paths under Different Rainfall Intensities. *Clean* 2008, 36(12), 984–989
- [38] Weiler, M.; Naef, F. (2003): An experimental tracer study of the role of macropores in infiltration in grassland soils. *Hydrological Processes*, 17(2), 477–493
- [39] Mitchell, A. R.; Ellsworth, T. R.; Meek, B. D. (1995): Effects of root systems on preferential flow in swelling soil. *Commun. Soil Sci. Plant. Anal.*, 26(15&16), 2655–2666
- [40] Knechtenhofer, L. A. et al. (2003): Fate of heavy metals in a strongly acidic shooting-range soil: small-scale metal distribution and its relation to preferential water flow. *J. Plant. Nutr. Soil Sci.* 166, 84–90
- [41] Hagedorn, F.; Bundt, M. (2002): The age of preferential flow paths. *GEODERMA* 108 (1–2), 119–132
- [42] Krieter, M.; Malkus, A. (1996): Untersuchungen zur Standortoptimierung von Strassenbäumen. Bonn: Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung und Landschaftsbau e.V. (Hrsg.)
- [43] Balder, H. (1998): Die Wurzeln der Stadtbäume. Berlin: Parey Buchverlag
- [44] FLL (2010): Empfehlungen für Baumpflanzungen – Teil 2: Standortvorbereitung für Neupflanzungen; Pflanzgruben und Wurzelraumerweiterung, Bauweisen und Substrate. Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. (FLL)
- [45] Lehmann, J. (2007): Bio-energy in the black. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 5, 381–387
- [46] EBC (2022): European Biochar Certificate – Richtlinien für die Zertifizierung von Pflanzenkohle. Ithaka Institute, Arbaz, Schweiz. Version 10.1G vom 10. Januar 2022
- [47] Ruysschaert, G. et al. (2015): Field applications of pure biochar in the North Sea region and across Europe. In S. Shackley, G. Ruysschaert, K. Zwart, B. Glaser: *Biochar in European Soils and Agriculture: Science and Practice*. Oxford: Earthscan from Routledge, S. 99–131
- [48] Liang, B. et al. (2006): Black carbon increases cation exchange capacity in soils. *Soil Science Society of America Journal*, 70(5), 1719–1730
- [49] Abel, S. et al. (2013): Impact of biochar and hydrochar addition on water retention and water repellency of sandy soil. *Geoderma*, 202–203, 183–191
- [50] Murtaza, G. et al. (2021): Biochar induced modifications in soil properties and its impacts on crop growth and production. *Journal of Plant Nutrition*, 1–15
- [51] Blanco-Canqui, H. (2017): Biochar and Soil Physical Properties. *Soil Science Society of America Journal*, 81, 687–711
- [52] www.carbon-standards.com/de/services/service-503~kohlenstoff-senken-register.html?sprache=de
- [53] Embrén, B. (2015): Planting urban Trees with Biochar – The Stockholm Project. *The Biochar Journal*, 44–47
- [54] Steinbeiss, S.; Gleixner, G.; Antonietti, M. (2009): Effect of biochar amendment on soil carbon balance and soil microbial activity. *Soil Biology and Biochemistry*, 1301–1310
- [55] Chan, K. (2009): Biochar: Nutrient Properties and their enhancement. In J. Lehmann, & S. Joseph, *Biochar for environmental management – science, technology and implementation*. London: earthscan from Routledge
- [56] Schönborn, A. et al. (2021): Abschlussbericht Biokohle für Stadtbäume. Bundesamt für Umwelt (BAFU), UTF 570.28.17, Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften (ZHAW)
- [57] Wang, J. et al. (2021): Analysis of the long-term effectiveness of biochar immobilization remediation on heavy metal contaminated soil and the potential environmental factors weakening the remediation effect: A review. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 207, 111261
- [58] Hartmann, N. et al. (2019): Aktivkohle – Made in Switzerland! *Aqua & Gas*, 1: 32–38
- [59] AWEL (2022): Regenwasserbewirtschaftung – Richtlinie und Praxishilfe zum Umgang mit Regenwasser. AWEL
- [60] Grabowsky, J.; Bassuk, N. (2002): A street tree shoot growth in two skeletal soil installations compared tree lawn plantings. *Journal of Arboriculture*, 28(2), 106–108.
- [61] Fischer, G. (2021): Wie Stadtbäume an Wasser kommen. *TASPO Garten Design*, 3: 40–46
- [62] Dickhaut, W.; Eschenbach, A. (2019): Entwicklungskonzept Stadtbäume: Anpassungsstrategien an sich verändernde urbane und klimatische Rahmenbedingungen. *HafenCity Universität, Hamburg*
- [63] Weiss, M. (2015): Nachhaltiges Management von Stadtbäumen zur Optimierung der Lebenserwartung und der Vitalität. *Masterarbeit ZHAW, Wädenswil*
- [64] Gloor, S.; Göldi Hofbauer, M. (2018): Der ökologische Wert von Stadtbäumen bezüglich der Biodiversität. *Jahrbuch der Baumpflege*, 22: 33–48
- [65] Heidger, C. (2002): Wurzeln sind lenkbar! Optimierungsmöglichkeiten im Wurzelraum von Stadtbäumen. *Tagungsband der 20. Osnabrücker Baumpflegetagung 2002*
- [66] Streckenbach, M. (2009): Interaktionen zwischen Wurzeln und unterirdischer technischer Infrastruktur – Grundlagen und Strategien zur Problemvermeidung. *Dissertation. Ruhr-Universität Bochum*
- [67] Rehfeld-Klein, M. (2021): Bäume in Versickerungsmulden – Impuls zum Regelungsrahmen. Vortrag am BGS-Workshop, online, 10.6.2021
- [68] Eppel-Hotz, A. (2019): Pflanzen für Versickerung und Retention. *Veitshöchheimer Berichte* 186, 73–85

> SUITE DU RÉSUMÉ

permettent d'absorber les charges de trafic correspondantes tout en permettant le stockage et l'évacuation de l'eau et en mettant à disposition un espace pour les racines. La pollution des eaux de pluie représente un défi particulier. Différentes substances dissoutes et particulaires se retrouvent dans les eaux usées qui ruissèlent des places et des rues. Cette diversité de substances est représentée dans la planification par trois classes de pollution (faible, moyenne, élevée) et leurs besoins en matière de mesures à prendre. En cas de faible pollution, le passage au sol et les substrats de plantation sont considérés comme équivalents. L'effet néfaste du sel de déneigement peut être évité par un apport d'eau suffisant. La plantation d'arbres dans des fosses devrait être envisagée, car leur capacité à atténuer la chaleur et à fournir des services écosystémiques est très élevée. En cas de pollution plus élevée, plusieurs questions restent ouvertes. On dispose certes de connaissances sur la présence de composés traces organiques dissous, mais leur pertinence pour la gestion de la situation n'est pas encore claire. La formation de voies d'écoulement préférentielles, et donc l'évacuation rapide des polluants en contournant la matrice du sol, ont tendance à augmenter avec le temps. Les substrats à structure monogranulaire devraient être moins concernés par ce phénomène. L'importance effective des macropores biogènes (par exemple le long des racines mortes) et de la formation du sol pour le transport préférentiel devrait être clarifiée. Pour une planification conforme à la protection des eaux sur des sites critiques, les substrats adsorbants pourraient offrir une solution. Ils ont été développés de manière ciblée pour la rétention des substances. Les matériaux avec certificat de performance constituent des barrières efficaces contre les polluants et peuvent être combinés avec des fosses de plantation.