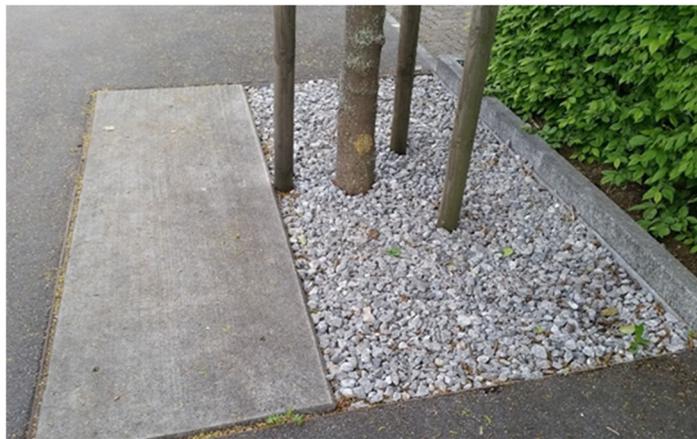


# Neue Herausforderungen bei der Strassenentwässerung

– Recherche zum Stand des Wissens –

## Technischer Bericht



### *Autoren*

Michael Burkhardt, OST – Ostschweizer Fachhochschule, Rapperswil

Beatrice Kulli, Andrea Saluz, ZHAW– Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften, Wädenswil

### *Im Auftrag von:*

Kanton Zürich, Baudirektion, Tiefbauamt, Christoph Abegg, Projektleiter Umwelt

Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft, Stefan Schmid, Sektionsleiter

4. Oktober 2022

## Zusammenfassung

Die Siedlungsräume stehen aufgrund der Klimaveränderungen vor grossen Herausforderungen. Dabei kommt dem Strassenraum eine Schlüsselrolle zu. Ein hoher Anteil von versickerungsfähigen, begrünten Flächen im urbanen Raum wirkt gegen Oberflächenabfluss, kühlt durch Evapotranspiration, erhöht die Aufenthaltsqualität für die Bevölkerung und fördert die Biodiversität. Die Pflanzung von Bäumen und die Schaffung von begrünten Flächen gehören zu den wirkungsvollsten Massnahmen zur Reduktion der Hitzebelastung und Abflussminderung.

Die vorliegende Studie im Auftrag des Kantons Zürich hatte zum Ziel, offene Fragen zur Strassenentwässerung und zu den Möglichkeiten einer neuen Regenwasserbewirtschaftung anzugehen. Dafür wurde der Kenntnisstand recherchiert und mit Lösungen zur Optimierung in einem Bericht dokumentiert. Ausserdem wurde eine zusammenfassende Planungshilfe erstellt.

Für die Versickerung von Niederschlagsabwasser sind die Eigenschaften vom Boden und Substrat entscheidend für die hydraulische und stoffliche Leistungsfähigkeit. Mittelporen braucht es für den Wasserrückhalt und Grobporen für die Versickerung sowie Luftkapazität. Technische Pflanzsubstrate sollen zudem optimale Standortbedingungen für Bepflanzungen in stark urban geprägten Gebieten schaffen. Bei der richtigen Zusammensetzung sind Pflanzsubstrate universell einsetzbar. Überfahrbare Substrate sind auf zur die geforderten Tragfähigkeiten abzustimmen. Innovative Rezepturen wie das sog. Stockholm-Substrat erlauben es, die geforderten Verkehrslasten aufzunehmen, Wasser zu speichern und abzuleiten, sowie Wurzelraum bereitzustellen.

Pflanzenkohle, richtig ausgewählt und eingesetzt, bietet grosses Potential, um die Substratmischungen zu verbessern. Der leicht alkalische pH-Wert von Pflanzenkohle pendelt sich nach kurzer Zeit im Bereich des Umgebungsmaterials ein.

Eine Bepflanzung von Mulden mit Bäumen sollte in Erwägung gezogen werden, weil deren Hitzeminderungs- und Ökosystemleistung sehr hoch ist.

Eine besondere Herausforderung für den Grundwasserschutz stellt die mögliche Belastung des Niederschlagsabwassers dar. Verschiedene gelöste und partikuläre Stoffe können im Platz- und Strassenabwasser auftreten. Gewisse Belastungen sind weithin bekannt, wie partikuläre Stoffe GUS und Schwermetalle. Weniger Wissen liegt zum Vorkommen von Spurenstoffen vor. Diese Lücke gilt es rasch zu schliessen. Die gesamte Stoffvielfalt wird in der Planung gemäss VSA bisher durch die drei Belastungsklassen gering, mittel und hoch abgebildet.

Bei geringer Belastung werden die Bodenpassage und Pflanzsubstrate als ebenbürtig hinsichtlich Stoffrückhalt eingeschätzt. Bei höherer Belastung ist die Rückhaltewirkung von Pflanzsubstraten zu klären. Für eine gewässerschutzkonforme Planung an kritischen Standorten könnten jedoch bereits heute Adsorbersubstrate eine Lösung bieten. Diese sind gezielt auf den Stoffrückhalt hin entwickelt und stellen wirkungsvolle Schadstoffbarrieren dar. Bauvarianten könnten entwickelt werden, die die Adsorbersubstrate mit Pflanzsubstraten kombinieren.

Die Bedeutung von präferenziellen Fließwegen in Makroporen, z.B. entlang abgestorbener Wurzeln, und durch Bodenbildung nimmt mit der Zeit tendenziell zu. Substrate mit Einzelkorngefüge dürften davon weniger betroffen sein als Bodenfilter. Die effektive Relevanz auf den präferenziellen Stoffaustrag ins Grundwasser sollte geklärt werden, weil dazu keine spezifischen Kenntnisse vorliegen.

Durch Tausalz werden keine wesentlichen Schäden an der Vegetation oder dem Bodengefüge unter den Witterungsbedingungen der Schweiz (hohe Regenintensitäten) erwartet. Eine pflanzenschädigende Wirkung kann zudem durch genügend Wasserzufluss vermieden werden, indem die Grösse der Anschlussfläche die Fläche der Versickerung übersteigt. Dennoch wird bei der Eignung der Pflanzenarten die Feuchtigkeit und das Streusalz als limitierende Faktoren angenommen, sodass

Bepflanzungsempfehlungen für trockene und feuchte Standorte mit geringer und hoher Salzlast gegeben werden.

Aufgrund des Klimawandels und der Dringlichkeit zu handeln, sind schnellstmöglich die Kenntnislücken zur möglichen Schadstoffbeeinträchtigung des Grundwassers zu schliessen. Die Lücken sollten aber nicht verhindern, mit der blau-grünen Umgestaltung des Strassenraums rasch vorwärts zu gehen.

## Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	2
Inhaltsverzeichnis .....	4
1. Einleitung .....	1
2. Ziele .....	2
3. Urbaner Wasserhaushalt .....	2
3.1. Anforderungen des Gewässerschutzes.....	2
3.2. Hydraulische Grundlagen von Böden und Substraten.....	4
3.3. Besondere Merkmale von Pflanzsubstraten.....	10
3.4. Eigenschaften von Pflanzenkohlen .....	14
3.5. Fazit.....	15
4. Tragfähigkeit im Verkehrswegebereich .....	17
4.1. Böden .....	17
4.2. Pflanzsubstrate .....	18
4.3. Fazit.....	19
5. Schadstoffe im Strassenabwasser.....	20
5.1. Emissionsmindernde Massnahmen .....	20
5.2. Stoffliche Emissionen im Strassenbereich .....	20
5.3. Abschätzung der Belastung.....	22
5.4. Transportverhalten der Stoffe in Boden und Substrat .....	23
5.5. Eigenschaften von Adsorberstraten und Pflanzenkohlen.....	26
5.6. Taumittel.....	27
5.7. Fazit.....	29
6. Versickerung und Behandlung von Strassenabwasser .....	30
6.1. Grundanforderungen zur Versickerung und Behandlung.....	31
6.2. Boden als Filter .....	33
6.3. Substrate in Pflanzgruben.....	34
6.4. Pflanzgruben mit Behandlung.....	35
6.5. Fazit.....	37
7. Vegetation.....	38
7.1. Wasserhaushalt für Bepflanzungen .....	38
7.2. Nährstoffbedarf .....	40
7.3. Wurzelwachstum und -lenkung .....	40
7.4. Vegetationshöhe.....	43
7.5. Bepflanzung von Bodenfiltern mit temporärem Wassereinstau .....	44
7.6. Potentiell geeignete Bepflanzungen für Bodenfilter .....	45
7.7. Bepflanzung im Strassenbereich mit Salzbelastung .....	48
7.8. Fazit.....	51
8. Gestaltungselemente .....	51
8.1. Eignung der Gestaltungselemente für Strassenabwasser .....	51
8.2. Empfehlungen für blau-grüne Gestaltungselemente .....	54

8.3.	Fazit zu Gestaltungselementen .....	58
9.	Schlussfolgerungen und Ausblick.....	59
9.1.	Schlussfolgerungen .....	59
9.2.	Ausblick.....	60
10.	Literatur.....	61
11.	Anhang .....	69
11.1.	Weitere Informationen zur Bodenfestigkeit.....	70
11.2.	Beispiele für FLL-Baumgruben .....	73
11.3.	Gestaltungselemente und ihre Bewertung.....	79

## 1. Einleitung

Der Strassenverkehr und die Verkehrsflächen im Kanton Zürich nehmen zu. Die damit einhergehende Entwässerung erfolgt über weite Strecken durch Versickerung über den Boden, durch direkte Einleitung in Oberflächengewässer und über Strassenabwasserbehandlungsanlagen in Oberflächengewässer oder den Untergrund. Die zunehmende Versiegelung führt zu einer grösseren Menge an nicht direkt versickerbarem Regenwasser, das zunehmende Verkehrsaufkommen zu erhöhten Belastungen. Ein Vergleich des Ist- und Soll-Zustandes der Strassenentwässerung zeigt, dass der Stand der Technik und die Einleitbedingungen in Oberflächengewässer vielerorts nicht mehr eingehalten sind.

Die Regenwasserbewirtschaftung steht im verdichteten Siedlungsraum vor weiteren Herausforderungen. Der Klimawandel führt zu einer Zunahme von extremen Wetterereignissen, wie Starkniederschlägen, die zu Überflutungsereignissen führen können, oder Hitzeperioden in Gebieten mit hohem Versiegelungsgrad, wodurch Trockenschäden an Bepflanzungen auftreten. An vielen urbanen Standorten kann der Wasserbedarf der vorhandenen Vegetation nicht mehr natürlicherweise gedeckt werden. Vor allem in heissen Sommern wird zusätzlich bewässert. Die Ansprüche der Bevölkerung an den Strassenraum nehmen gleichzeitig zu. Die Aufenthaltsqualität im Siedlungsraum soll verbessert und zusätzliche Flächen für den Langsamverkehr sollen geschaffen werden. Dabei ist dem Rückgang der Biodiversität auch im innerstädtischem Raum entgegenzuwirken. Aufgrund der konkurrierenden Flächenansprüche besteht folglich ein hoher Druck auf Freiflächen, diese gleichzeitig zur Versickerung von Strassenabwasser und Begrünung zu nutzen.

Blau-grüne Siedlungsstrukturen gelten für den urbanen Wasserhaushalt als vielversprechende Massnahmen zur Hitze- und Abflussminderung. Deshalb hat die Baudirektion des Kantons Zürich unter Federführung des Amtes für Wasser Energie und Luft einen Massnahmenplan zur Anpassung an den Klimawandel erarbeitet (AWEL, 2018). Die Pflanzung von Bäumen, die Schaffung von Grünflächen, Pflästerungen oder Chaussierungen anstelle von Asphalt gelten als besonders effektive und effiziente Gestaltungselemente zur Reduktion der Hitzebelastung, weil sie Niederschlagswasser versickern, halten und über Vegetation verdunsten (Fischer et al., 2021). Insbesondere Stadtbäume bringen eine hohe Ökosystemleistung wie Beschattung und Verdunstung. Durch höhere Verdunstung wird das Mikroklima verbessert. Aufgrund der knappen Flächen drängen sich multifunktionale Lösungen auf, die sich mit einer Mehrfachnutzung verbindet, z.B. Parkplätze mit begrünter, wasserdurchlässiger Oberfläche oder begehbare Baumscheiben (Benden et al., 2017; Hörnschemeyer et al., 2019).

Die zunehmende Flächenkonkurrenz hat dazu geführt, dass z.B. die Trennstreifen zwischen Strassen und Rad-/Gehwegen immer schmaler gebaut werden. Waren es früher zwischen 1.8 und 2.5 m, teilweise auch deutlich mehr, sind es heute höchstens 1.5 m. Auf derart schmalen Flächen ist es meist unmöglich, einen Bodenaufbau gemäss gültigen Richtlinien zwischen den Tragschichten der Fahrbahnen einzubauen. Das meist unkontrollierte Wurzelwachstum der Stadtbäume kann sogar die technischen Infrastrukturen beschädigen. Zudem reicht die Sickerleistung der Böden für die Bewältigung des Strassenabwassers nicht aus. Im engen Strassenraum richten sich daher grosse Erwartungen an Pflanzsubstrate (AWEL 2018). Sie sollen das Wasser zurückhalten, für die Pflanzen speichern, als Pflanzenstandort geeignet sein, aber auch das Wasser bei Starkregen schnell abführen und nötigenfalls von Verschmutzungen reinigen, um eine Belastung des Grundwassers zu vermeiden.

Die heutige innerstädtische Strassenentwässerung des Kanton Zürich entspricht aber noch nicht diesen Vorstellungen. Vor allem zu den Gestaltungselementen mit Substraten, aber auch bei Boden sind 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 mit Bäumen bepflanzt werden dürfen, ist unklar. Es besteht die Angst, dass die Funktionstüchtigkeit durch die Wurzeln beeinträchtigt werden könnte.

## 2. Ziele

Das Ziel der vorliegenden Studie war es, offene Fragen zur Strassenentwässerung (ohne Nationalstrassen) und zu den Möglichkeiten einer neuen Regenwasserbewirtschaftung im Kanton Zürich anzugehen. Dafür wurden der Kenntnisstand im relevanten Forschungsbereich zusammengestellt und Massnahmen bei der Versickerung und Reinigung von Strassen- und Platzabwasser sowie Lösungen zur Optimierung diskutiert. Die Schwerpunkte sind wie folgt gesetzt:

- Generelle Merkmale von Böden und Substraten zusammenstellen: Hydraulische und technische Eigenschaften von Böden und Substraten unter Berücksichtigung der Strassenabwasserbelastung und Tragfähigkeit.
- Besonderheiten bei der Entwässerung erläutern: Bedeutung von präferenziellen Fliess- und Transportwegen, Einfluss von Tausalz, Einfluss von Wurzeln auf die Reinigungsleistung und Einsatzmöglichkeiten von Pflanzenkohle.
- Möglichkeiten von Schwammstadt-Elementen und Bepflanzungen aufzeigen: Anforderungen an Bepflanzungen und Gestaltungselemente, Empfehlungen zu Anwendungsmöglichkeiten im Strassenraumraum.
- Empfehlungen für die Praxis geben: Anwendungsmöglichkeiten und notwendige Voraussetzungen für alternative Substrattypen sowie Konzepte mit hoher Eignung für den Strassenraum (Standortanforderung).
- Neue Lösungen aufzeigen: Umgang mit Strassenabwasser und der Behandlung insbesondere im Hinblick auf enge Platzverhältnisse.

Relevante Faktoren und besonders geeignete Konzepte sollten das Potential aufweisen, dass sie zukünftig in Richtlinien und Merkblättern der kantonalen Strassenentwässerung verankert und mit Gestaltungselemente der Flächennutzug verknüpft werden können. In einer Planungshilfe für Substrate wird für gering belastetes Strassenabwasser der Kenntnisstand für die Praxis zusammengefasst. Mit ergänzenden Untersuchungen sollen die identifizierten Wissenslücken rasch geschlossen werden, um auch für stärker belastetes Strassenabwasser Planungsempfehlungen geben zu können.

Die Störfall-Thematik wird nicht speziell behandelt. An dieser Stelle wird auf die Richtlinie Störfallvorsorge bei kantonalen Durchgangsstrassen, Baudirektion Kanton Zürich verwiesen, welche zurzeit in Erarbeitung ist.

## 3. Urbaner Wasserhaushalt

Nachfolgend wird erläutert, wie mit Boden und Substraten der Grundwasserschutz eingehalten werden kann und welche offenen Herausforderungen sich mit Pflanzgruben im Strassenbereich oder bepflanzten Bodenfiltern verbinden.

### 3.1. Anforderungen des Gewässerschutzes

Die heutige Platz- und Strassenentwässerung hat im Einklang mit der Schweizer Gewässerschutzverordnung (GSchV, 2021) und VSA-Richtlinie "Abwasserbewirtschaftung bei Regenwetter" (VSA, 2019a) zu erfolgen. Dabei sind die Wasserqualität, die Grundwasserschutzzonen, die Vulnerabilität zu berücksichtigen.

**Strassenabwasser:** Verschmutztes Niederschlagswasser, das von bebauten oder befestigten Flächen abfließt und nicht mit kommunalem Abwasser oder Industrieabwasser vermischt ist, gehört zu "anderes verschmutztes Abwasser". Solches Niederschlagsabwasser, nachfolgend Strassenabwasser genannt, ist gemäss Schweizer Gewässerschutzgesetz (GSchG, 1991) zu behandeln. Mit der

Behandlung soll die Verunreinigung des Grund- und Oberflächenwassers durch Versickerung oder Direkteinleitung vermieden werden.

Dafür legt die Behörde die Anforderungen an die Einleitung auf Grund der Eigenschaften des Abwassers, des Standes der Technik und des Zustandes des Gewässers im Einzelfall fest (GSchV, 1998). Entsprechende Anforderungswerte zur Beurteilung der Niederschlagswasserqualität fehlen.

**Anforderungswerte:** In der GSchV sind numerische Anforderungswerte zur Beurteilung der Gewässerqualität festgelegt, beispielsweise für Kupfer, Zink und organische Pestizide (Pflanzenschutzmittel, Biozidprodukte). Die Werte gelten nach weitgehender Durchmischung des eingeleiteten Abwassers mit dem Wasser des Gewässers (Tabelle 1) (GSchV, Anhang 2). Für andere zu erwartende Stoffe, wie Industriechemikalien, können beispielsweise orientierende Qualitätskriterienvorschläge für Oberflächengewässer vom Ökotoxizitätszentrum<sup>1</sup> beigezogen werden. Für viele Stoffe fehlen aber Grenzwerte, wie Mikroplastik oder Antioxidantien. Demzufolge gelangt das Vorsorgeprinzip zur Anwendung.

Gemäss GSchV kann die bewilligende Behörde höhere Stoffkonzentrationen im Abwasser als die Anforderungen zulassen, wenn durch eine Abflussverminderung die ins Gewässer eingeleitete Stofffracht reduziert wird (GSchV, 1998). Konsequenterweise gehören Retentionsmassnahmen in diese Kategorie, sofern sie besonders wirksam sind (Kap. 5.1).

**Tabelle 1:** Numerische Anforderungen der Gewässerschutzverordnung (GSchV).

Parameter	Gewässer (GSchV)
Kupfer (Cu)	2 µg/L gelöst 5 µg/L gesamt
Zink (Zn)	5 µg/L gelöst 20 µg/L gesamt
Organische Pestizide (Oberflächengewässer)	0.1 µg/L je Einzelstoff
Organische Pestizide (Grundwasser)	0.1 µg/L je Einzelstoff, Metabolit 0.5 µg/L Summe

**Zulässigkeit bei Versickerung:** Bei der Versickerung ins Grundwasser ist der Ort der Beurteilung das Grundwasser. Daraus resultiert, dass die Anforderungswerte im betroffenen Grundwasser einzuhalten sind, jedoch gelten die Anforderungswerte nicht unmittelbar für zu versickerndes Strassenabwasser. Viele Kantone verlangen die Anforderungswerte jedoch 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.

Zulässig ist die Versickerung von Platz- und Strassenabwasser mit Bodenpassage unter Berücksichtigung planerischer Vorgaben (Kap. 6) im Gewässerschutzbereich Au und uneingeschränkt im üB (VSA 2019a). Ohne Bodenpassage sind gemäss VSA Adsorberanlagen mit ausgewiesenem Wirkungsgraden einzusetzen, um den Stoffrückhalt des Oberbodens zu ersetzen.

**Zulässigkeit bei Direkteinleitung:** Aus Ermangelung von Qualitätsanforderung für Niederschlagsabwasser ist durchaus verbreitet, auf Basis der numerischen Anforderungen für Gewässer eine theoretische Einleitkonzentration bei vollständiger Durchmischung von Niederschlagsabwasser mit

<sup>1</sup> <https://www.oekotoxizitaet.ch/expertenservice/qualitaetskriterien/qualitaetskriterienvorschlaege-oekotoxizitaet/>

Oberflächenwasser herzuleiten. Für Deponiesickerwasser (Ablagerungsmaterial VVAE Typ A und B; Inertstoffe) ist beispielsweise ein Durchmischungsfaktor von 1:10 festgelegt, womit das einzu-leitende Sickerwasser bis 10-fach über dem Anforderungswert für Oberflächengewässer liegt (z.B. 1 L/s Einleitung in 10 L/s Abfluss). Übertragen auf Strassenabwasser könnte auch hier ein entsprechender Durchmischungsfaktor angesetzt werden. Unter Berücksichtigung eines theoretischen Durchmischungsfaktors von 1:5 ergibt sich beispielsweise folgende Einleitsituation:

- Einleitung: 5 L/s Abfluss mit 100 µg/L Zink und 0.5 µg/L Pestizid
  - Durchmischung 1:5: > 25 L/s Abfluss ( $Q_{347}$ )
- Gewässer: 20 µg/L Zink (gesamt) und 0.1 µg/L Pestizid eingehalten

Ist das Mischungsverhältnis mit hoch belasteten Niederschlagsabwasser  $< 1$ , ist die Einleitung nur nach einer Reinigung mit einer technischen Behandlungsanlage zulässig. Bei der Herleitung eines Faktors kann auch die Vorbelastung des Gewässers einbezogen werden (VSA, 2019a).

### 3.2. Hydraulische Grundlagen von Böden und Substraten

Natürliche Böden und technische Substrate weisen viele Gemeinsamkeiten in ihrem hydraulischen Verhalten auf. Während Böden natürlich entstanden sind, allenfalls sogenannte gewachsene Böden durch Umlagerung in ihren Eigenschaften verändert wurden, sind Substrate entwickelte Produkte für bestimmte Anwendungsbereiche. Trotz dieser Unterschiede bestimmen die Eigenschaften von Böden und Substraten das hydraulische Regime, den Stoffrückhalt und die Standortfaktoren für die Vegetation.

**Textur und Struktur:** Die Textur und Struktur bestimmen massgeblich die physikalischen Eigenschaften von natürlichen Böden und technischen Substraten, und damit den Wasserhaushalt. Unter der Textur (Körnung) ist die Korngrössenverteilung der Primärteilchen zu verstehen und die Struktur beschreibt deren räumliche Anordnung. Gemäss der Schweizerischen Bodenklassifikation wird der Feinanteil der Textur in drei Körnungsfractionen unterschieden:

- Ton  $< 0.002$  mm
- Schluff  $0.002 - 0.05$  mm (Synonym: Silt)
- Sand  $0.05 - 2$  mm.

Die drei mineralischen Feinfraktionen bestimmen die Bodenart. Abbildung 1 zeigt die Bodenarten in Abhängigkeit von den Sand-, Ton- und Schluffanteilen nach der Schweizerischen und deutschen Klassifikation (Eckelmann, 2005). Nebst den vertauschten Achsen der beiden Körnungsdreiecke fällt auf, dass das deutsche Körnungsdreieck feinere Unterteilung aufweist, um physikalische Kennwerte genauer abzubilden bzw. herzuleiten. Vorschläge für typische physikalische Kennwerte sind von Renger et al. (2008) zusammengestellt.

Als Grobboden oder Skelett werden Bestandteile  $> 2$  mm Grösse bezeichnet. Diese umfassen Kies, Schotter oder andere Gesteinsrelikte. Sowohl in natürlichen als auch technischen Substraten kann der Skelettanteil Raumvolumina  $> 30$  % einnehmen. In Böden können Steine natürlichen Ursprungs (Schotter etc.) oder anthropogen eingetragen sein, typischerweise in urban geprägten Böden bzw. sogenannten Stadtböden.

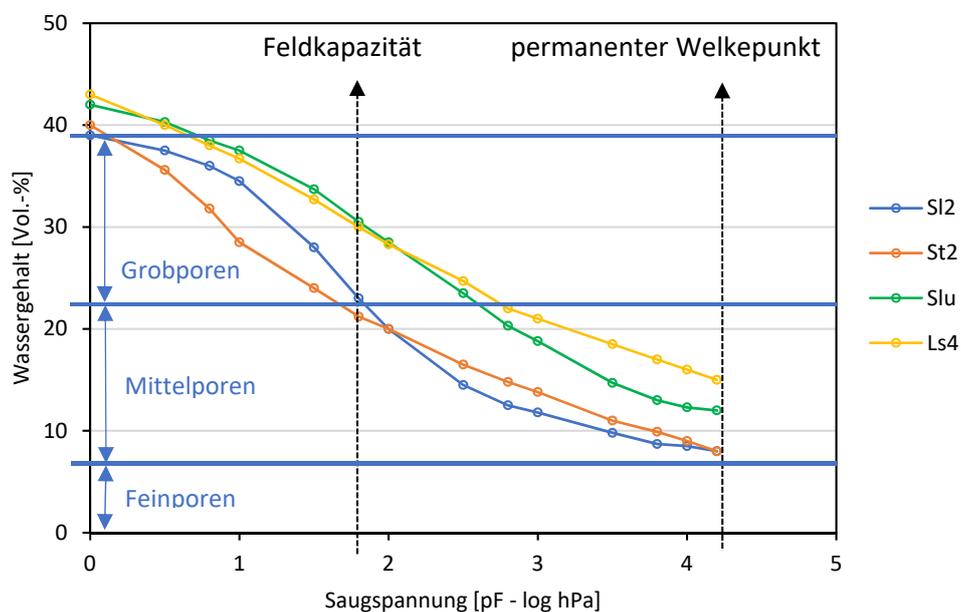
Neben der mineralischen Fraktion kommt ein organischer Anteil vor, beispielsweise Humus, Kompost oder Torf. Das Bodenleben benötigt die organische Substanz als Nahrungsgrundlage und Pflanzen ziehen daraus Nährstoffe. Die organische Substanz konzentriert sich meistens auf den Oberboden, der in der Folge als humos bezeichnet wird. Im Oberboden oder Substraten liegt der Anteil meistens zwischen 1 und 4 Masse-%. Je nach Grösse und Zersetzungsgrad wirken organische Bestandteile auf den Wasserhaushalt durch ihre wasserabweisende Wirkung bei Austrocknung (Hydrophobie) und als Wasserspeicher bei Befeuchtung.



typischerweise 0.5 bis 10 mm Durchmesser kommen auf die Fläche bezogen nur kleinräumig vor (typischerweise < 5 % Flächenanteil), weisen aber eine hohe vertikale Ausdehnung auf (Konnektivität) und sind relevant als schnelle Fließwege. Die Anzahl Makroporen steigt mit dem Alter des Bodens (Bodenbildung). Abgestorbene lange und dicke (Pfahl-)Wurzeln (Durchmesser 10 - 30 mm) können dagegen stabile Makroporen ausbilden, die über Jahrzehnte bestehen bleiben (Mitchell et al., 1995; Knechtenhofer et al., 2003).

**Wasserspannung:** Die Wasserspannung (oder Saugspannung) bezeichnet die Kraft, mit der das Wasser bei einem bestimmten Wassergehalt im Boden oder Substrat festgehalten wird. Es handelt sich dabei um einen Unterdruck, der überwunden werden muss, um dem Wasser zusätzliches Wasser zu entziehen. Die Feldkapazität (FK) entspricht einer Wasserspannung von 60 hPa ( $pF = 1.8$ ) und bezeichnet den Zustand, bei dem die Grobporen bereits entleert, die Mittelporen aber noch mit Wasser gefüllt sind. Der permanente Welkepunkt (PWP) korrespondiert mit einer Wasserspannung von 15 bar ( $pF > 4.2$ ) und beschreibt den Zustand, wenn nur noch die Feinporen mit Wasser gefüllt sind. Der Wassergehalt zwischen vollständiger Sättigung und FK entspricht den Grobporen, zwischen FK und PWP den Mittelporen, und die Wassermenge, die beim PWP noch enthalten ist, den Feinporen.

Der Zusammenhang zwischen Wasserspannung und Wassergehalt lässt sich in einer charakteristischen Kurve darstellen. Die Anteile von Grob- und Mittelporen in Abhängigkeit zur Körnung und Dichte der vier Bodenarten lassen sich nach Renger et al. (2009) unter Berücksichtigung der Trockenrohdichte hergleiten<sup>2</sup>. Abbildung 2 zeigt exemplarisch die Wasserspannungskurven für die vier in Abbildung 1 umrahmten Bodenarten für eine effektive Lagerungsdichte von  $1.65 \text{ g/cm}^3$ .



**Abbildung 2:** Wasserspannungskurven für die vier in Abbildung 1 markierten Bodenarten. Die Verläufe gelten für eine effektive Lagerungsdichte von  $1.65 \text{ g/cm}^3$ . Die blauen Linien sind die Projektion der Schnittpunkte von FK und PWP auf die Y-Achse für Bodenart Sl2 und ermöglichen das Ablesen der Anteile von Grob-, Mittel- und Feinporen.

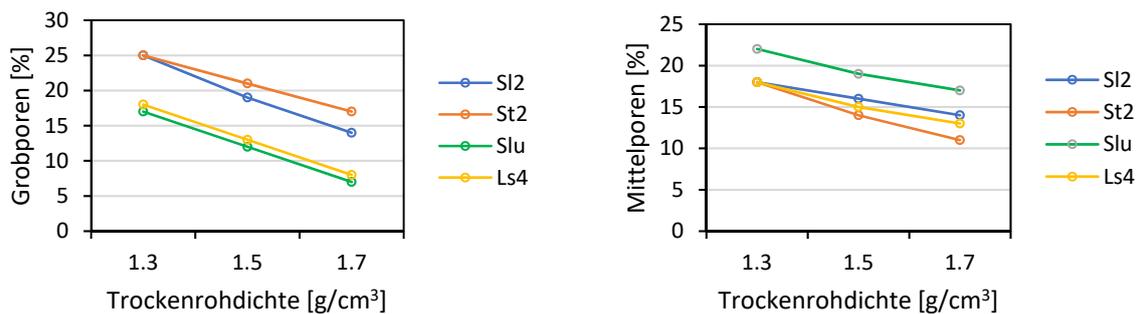
<sup>2</sup> Unterschiede zwischen den in Abbildung 2 abgelesenen und den in Abbildung 3 dargestellten Werten kommen zustande, weil die Wasserspannungskurven in Abbildung 2 für eine effektive Lagerungsdichte von  $1.65 \text{ g/cm}^3$  dargestellt sind. Die effektive Lagerungsdichte gemäss Renger et al. (2008) wird aufgrund der Struktur geschätzt und kann mit folgender empirischer Gleichung in die Trockenrohdichte umgerechnet werden:  $TRD = LD - 0.005 \% \text{ Ton} - 0.001 \% \text{ Schluff}$ .

Der Grund für die Korrektur ist, dass feinkörnigere Böden schlechter durchwurzelbar sind und entsprechend schon bei tieferen Lagerungsdichten für die Pflanzen Probleme auftreten. Daher werden Böden bezüglich ihrer Verdichtung üblicherweise mit der effektiven Lagerungsdichten verglichen.

Die Abbildung 3 zeigt, dass die grobkörnigeren Böden St2 und Ls2 mehr Grobporen aufweisen. Bezüglich der Mittelporen sticht der Boden Slu heraus, der mit seinem relativ hohen Schluffgehalt und mittleren Tongehalt den kleinsten Sandgehalt hat. Die Bodenart Slu hält also mehr pflanzenverfügbares Wasser bereit als die drei übrigen Bodenarten.

Die Bedeutung der Lagerungsdichte auf die Grob- und Mittelporen ist daher wie folgt: Je geringer die Lagerungsdichte, desto geringer der Porenraum. Eine Verdichtung betrifft primär die Sekundärporen, gefolgt von Grobporen, wobei hierbei die strukturlabilen Böden besonders betroffen sind.

Um die Wasserspannung im Feld zu messen, werden Tensiometer verwendet. Häufig geben diese keine plausiblen oder nicht repräsentative Messerwerte wider, weil der hydraulische Kontakt zwischen der Messsonde und umgebenden Bodenmatrix eingeschränkt ist.



**Abbildung 3:** Volumenanteile an Grob und Mittelporen für die vier in Abbildung 1 hervorgehobenen Bodenarten in Abhängigkeit der Dichte.

**Wasserleitfähigkeit:** Die Wasserleitfähigkeit hängt von der Textur, Struktur und dem Wassergehalt ab. Ist der Porenraum vollständig gesättigt, sind die Grob- und Makroporen stets wasserführend. Diese bestimmen deshalb den gesättigten Wasserfluss. Nimmt der Wassergehalt ab, herrschen ungesättigte Bedingungen und die Wasserleitfähigkeit reduziert sich. Je höher deren Anteile, desto höher sind die Infiltrations- und Versickerungsraten. Nimmt jedoch der Wassergehalt ab, steigt die Wandreibung und die ungesättigte Wasserleitfähigkeit reduziert sich.

Der gesättigte Wasserfluss  $j_w$  [cm/Tag] ist gemäss dem Gesetz von Darcy folgendermassen formuliert:

$$j_w = -k_f \frac{\partial}{\partial z} h_w$$

Dabei ist die gesättigte Wasserleitfähigkeit  $k_f$  (oder  $k_{sat}$ ) eine Konstante [cm/Tag], die den Gradienten des Wasserpotenzials  $\partial h_w / \partial z$  (Matrixpotentiale) mit dem tatsächlichen Wasserfluss  $j_w$  verknüpft. Der vertikale Wasserfluss  $\partial h_w / \partial z$  basiert im Wesentlichen auf dem Gravitationspotential und Gradienten der Wasserspannung. Die Potentialgradienten entstehen durch trockene und feuchte Zonen im Boden oder Substrat, wobei sich das Wasser stets vom feuchten (geringes Potential) zum trockenen (hohes Potential) bewegt. Unter Gleichgewichtsbedingungen, wenn Wasser gleichmässig oder eingestaut infiltriert, ist der Gradient vernachlässigbar und die Versickerungsrate entspricht der gesättigten Leitfähigkeit (Flühler und Roth, 2004). Wenn die Sickerwassermenge die Wasserleitfähigkeit  $k_f$  die Wasserleitfähigkeit überschreitet, bildet sich Überstau, wodurch der Gradient bzw. der Wasserfluss erhöht wird. Wenn kein Niederschlag fällt und die Pflanzen dem Boden Wasser entziehen, kann dieses auch entgegen der Schwerkraft kapillar aufsteigen, angetrieben durch die entsprechenden Gradienten im Bodenwasserpotenzial.

**Spezifische Sickerleistung:** In der Strassen- und Siedlungsentswässerung wird für die Beschreibung des Wasserflusses häufig die spezifische Sickerleistung  $S_{spez}$  [L/(min m²)] verwendet. Das Volumen pro Zeit

und Fläche kann durch Kürzen in Strecke pro Zeit umgewandelt werden und entspricht demzufolge der Einheit von  $j_w$  und  $k_f$ . Gemäss VSA (2019a) lässt sich über eine Näherungsformel  $S_{Spez}$  mit  $k_f$  verknüpfen:

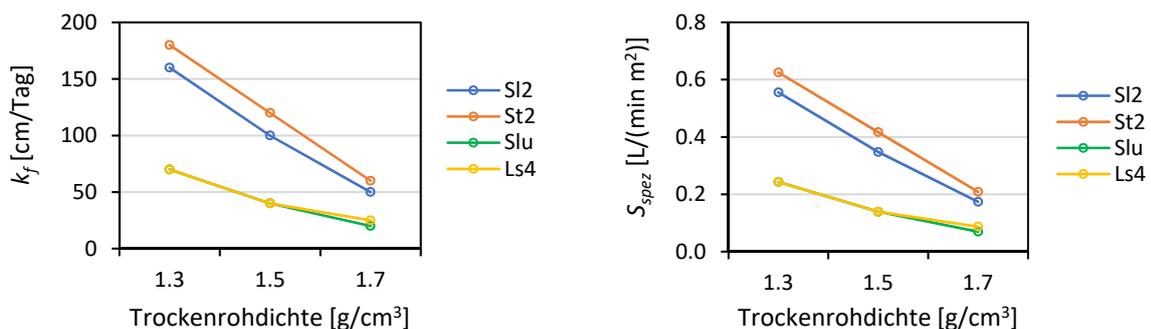
$$s_{spez} = \frac{1}{2} k_f$$

Begründet wird dieser Zusammenhang damit, dass gesättigter Fluss nach *Darcy* definitionsgemäss für eine laminare Strömung im homogenen, gesättigten Grundwasserleiter gelte, während die Versickerung in der Regel perkolativ im ungesättigten Boden erfolge. Die dabei zugrundeliegende Infiltrationsgleichung von Philip (1969) für stationären Fluss zeigt gemäss Bach et al. (1986) üblicherweise Werte von einem bis zwei Dritteln von  $k_f$ . Collis-George (1977) erklären diese Leitfähigkeitsreduktion mit Lufteinschlüssen, die während Infiltrationsereignissen auftreten und den Wasserfluss behindern.

Für Versickerungsanlagen ist gemäss VSA (2019a, Modul DA) eine spezifische Sickerleistung im Bereich von 0.5 bis 2 L/(min m<sup>2</sup>) gefordert. Abbildung 4 zeigt die Schätzwerte gemäss Renger et al. (2008) für  $k_f$  und  $S_{Spez}$  in Abhängigkeit zur Körnung und Dichte für die vier in Abbildung 1 hervorgehobenen Bodenarten. Dabei ist offensichtlich: Je grobkörniger die Bodenart, desto höher die Sickerleistung. Die Unterschiede zwischen den Bodenarten sind deutlich grösser als bei den Grobporen (Abbildung 3), und auch die Abnahme mit zunehmender Dichte ist stärker ausgeprägt. Schadverdichtungen wirken sich demnach besonders deutlich auf den gesättigten Wasserfluss aus.

Wie Abbildung 4 ebenfalls zeigt, sind die berechneten Werte  $S_{Spez}$  im Vergleich zu den VSA-Anforderungen eher tief. Nur die beiden Bodenarten mit Sandanteilen > 60 % (St2, Sl2) dürften Sickerraten  $S_{Spez} > 0.5$  L/(min m<sup>2</sup>) erreichen (Tabelle 13, Anhang). Die feinkörnigeren Böden Slu und Ls4 liegen mindestens um einen Faktor 2 darunter und sind damit für Versickerungen weniger geeignet.

Bildet sich jedoch aufgrund des Feinanteils ein Aggregatgefüge aus, können sich gut wasserleitende Sekundärporen entwickeln. So zeigten Untersuchung von Pazeller et al. (2017), dass in Strassenabwasserbehandlungsanlagen (SABA) mit Bodenfiltern  $S_{Spez}$  zwischen 0.3 und 3 L/(min m<sup>2</sup>) auftreten, wobei die Werte mit dem Alter der Anlagen korrelierten. Die älteste SABA erreichte mit 3 L/(min m<sup>2</sup>) die höchste Sickerleistung. Dort wurde auch die stärkste Durchwurzelung beobachtet.



**Abbildung 4:** Schätzungen für den Wasserabfluss für die vier betrachteten Körnungsklassen aus Abbildung 1. Links: Wasserleitfähigkeit  $k_f$  gemäss Renger et al. (2008) für verschiedene Dichten. Rechts: die daraus gemäss VSA (2019) berechneten spezifischen Sickerleistungen.

Zwar werden durch die VSA-Richtlinie (VSA, 2019a) für Bodenfilter Tongehalte zwischen 10 – 20 % empfohlen. Aufgrund vorliegender Abschätzungen und unter Berücksichtigung von Feldresultaten sollte zusätzlich die Siebfraktion (> 0.063 mm, Sand und Kies) > 60 % Anteil umfassen, um eine hohe Sickerleistung bei Entwässerungselementen zu erzielen.

Häufig wird die Sickerleistung  $S_{Spez}$  über die Absinkgeschwindigkeit in einer Grube oder einem Doppelring-Infiltrometer (DIN 19682-7, 2015) gemessen. Beide Methoden erhöhen den Druckgradienten

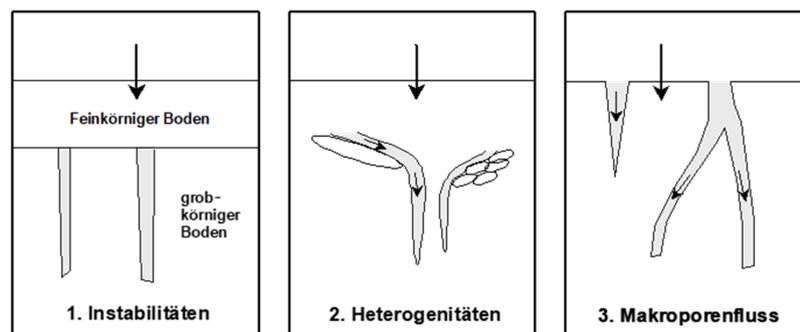
durch Überstau, wodurch die Sickerleistung leicht überschätzt wird. Eine einheitliche Messmethode mit Doppelring-Infiltrometer hätte den Vorteil, dass der Überstau definiert und laterale Strömungen weniger bedeutsam wären, damit die Resultate untereinander vergleichbar werden.

**Präferenzialer Fluss:** Wasser versickert im ungesättigten Boden gleichmässig (chromatografisch) oder ungleichmässig (präferenzial). Gleichmässige Infiltration in einem homogen porösen Medium führt dazu, dass die Bodenmatrix parallel zur Oberfläche durchfeuchtet wird. Typisch dafür sind sandige Böden mit enger Korngrössenverteilung. Bei einem ungleichmässigen Fluss versickert dagegen das Regenwasser in den wassergefüllten Makroporen schneller als in der umgebenden Bodenmatrix, sodass im Boden ein teilgesättigter Wasserfluss auftritt. Das Phänomen des lokal schnellen Fließens unter Umgehung der Matrix wird präferenzialer Fluss genannt (Hendrickx und Flury, 2001).

Der präferenziale Fluss lässt sich in drei Untergruppen gliedern (Abbildung 5):

1. Instabilitäten (Fingering Flow): hydrophobe Substanzen oder geschichtete Böden (feinkörnig über grobkörnig)
2. Heterogenitäten (Funneling Flow): Plötzlicher Wechsel von Materialien unterschiedlicher Körnung
3. Makroporenfluss: (Bypass Flow): morphologische oder funktionelle Gesichtspunkte der Poren

Abbildung 6 zeigt das Infiltrationsmuster eines Farbtacers entlang einer abgestorbenen Wurzel. Durch physikalische Prozesse entstehen Schwundrisse in sehr trockenen, tonigen Böden. Auch Grenzflächen zwischen Bodenaggregaten können Makroporen bilden (Hendrickx und Flury, 2001). Karup et al. (2017) zeigen, dass der Anteil an Feinmaterial den präferenzialen Fluss stark begünstigt.



**Abbildung 5:** Schema zu den drei wichtigsten Varianten des präferenzialen Flusses: 1. Instabilitäten (Fingering Flow), 2. Heterogenitäten (Funneling Flow) und 3. Makroporenfluss.

Laut Kim et al. (2008) spielt die Niederschlagsintensität eine entscheidende Rolle bei der Initiierung von präferenzialen Fluss. 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 (Weiler und Naef, 2003).

Wenn ein hoher Anteil an organischem Material vorliegt (Humus, Kompost, Torf etc.), kann bei Trockenheit die Hydrophobie des organischen Materials präferenzialen Fluss erlauben. Die Wände von Regenwurmgehängen sind mit hydrophoben organischen Stoffen ausgekleidet und begünstigen den raschen Wasserfluss. Staut das Wasser an der Oberfläche ein, versickert es in Makroporen, obwohl die umgebende Bodenmatrix nicht durchfeuchtet ist.



**Abbildung 6:** Präferenzierter Fluss entlang einer abgestorbenen Wurzel an einem Waldstandort (Foto: Kulli, 1997).

### 3.3. Besondere Merkmale von Pflanzsubstraten

Pflanzsubstrate kommen meist dort zum Einsatz, wo natürliche Böden fehlen oder ihre Funktion nicht mehr erfüllen können (z.B. Sicker- oder Tragfähigkeit). Urban überprägte Böden liefern beispielsweise nicht immer genügend Wurzelwachstumsergebnisse (Krieter und Malkus, 1996). Zwar nehmen Substrate ähnlich wie Boden Stoffe auf, puffern oder filtern sie, jedoch sind Substrate definiert zusammengesetzt, so wie die beiden Beispiele in Tabelle 2. Substratmischungen sind auf die Einbauanforderung abgestimmt.

Substrate müssen je nach Einsatzbestimmung mechanische, hydraulische, chemische und biologische Grundanforderungen erfüllen. Für die Strassenentwässerung stehen eine hohe Wasserleitfähigkeit, hohe Reinigungsleistung und Tragfähigkeit im Vordergrund (Kapitel 8). Substrate für Vegetationstragschichten hingegen sollen optimale Wachstumsbedingungen durch gute Durchlüftung, Wasserhaltevermögen, Nährstoffangebot und den Wurzelraum gewährleisten (Balder, 1998). Strukturstabile Pflanzsubstrate zeichnen sich durch hohe Luft- und Wasserleitfähigkeiten aus. Durch die festgelegte Mischung von überwiegend rein mineralischen Komponenten und den eher geringen Tonanteil dominiert das Einzelkorngefüge. Primäres Ziel der Pflanzsubstrate ist nicht, Schadstoffe zu binden oder zurückzuhalten.

In der Schweiz gibt es keine allgemeingültigen Richtlinien zu den technischen Anforderungen an Substrate als Vegetationstragschicht im Strassenbereich, sodass meistens auf folgende Dokumente aus Deutschland zurückgegriffen wird:

- ZTV-Vegtra-Mü: Zusätzliche Technische Vorschriften für die Herstellung und Anwendung verbesserter Vegetationstragschichten (ZTV-Vegtra-Mü, 2016)
- FLL: Empfehlungen für Baumpflanzungen Teil 2 (FLL, 2010)
- FLL: Qualitätsanforderungen/Anwendungsempfehlungen für organische Mulchstoffe und Komposte (FLL, 2016)
- DIN 18915: Vegetationstechnik im Landschaftsbau – Bodenarbeiten (DIN 18915, 2018).

Die ZTV Vegtra-Mü ist eine Vorschrift für Stadtbaumssubstrate mit Einbauhinweisen (ZTV-Vegtra-Mü, 2016) und die FLL-Richtlinie gibt umfassende Empfehlungen zur Herstellung und Ausschreibung von Substraten unter Berücksichtigung der DIN 18915 und DIN 18916. In der FLL-Richtlinie werden z.B. die Vegetationstragschicht, Möglichkeiten zur Wurzelraumerweiterung und Kontrollparameter erläutert.

**Pflanzsubstrate:** Ein Pflanzsubstrat ist gemäss FLL ein Gemisch aus mineralischen und organischen Gerüstbaustoffen und Zusatzstoffen natürlicher und künstlicher Herkunft, welches die Vegetationstragschicht darstellt und begrünt oder bepflanzt wird (FLL, 2017). Wie bei natürlichen Böden, sind die Grobfraction (> 2 mm) relevant für die Wasserleitfähigkeit und die Feinfraction (< 2 mm) für das pflanzenverfügbare Wasser (nFk). Zusätzlich ermöglicht die Grobfraction einen ausgedehnten Wurzelraum und eine tragfähige Struktur.

Zulässig sind gemäss FLL natürliche mineralische Gerüstbaustoffe und schadstofffreie mineralische Sekundärbaustoffe (RC-Materialien), wie natürlicher Boden, Sande (Bruchsand aus Granit, Ziegelsand aus Bruchziegel etc.), Blähschiefer, Splitt, Schotter und Steinmehl. Unter Einhaltung gesetzlicher Vorgaben sind gemäss FLL auch industrielle Nebenprodukte zugelassen.

Zu den Zusatzstoffen zählt organische Substanz wie Humus, Mulch, Kompost oder sog. Schwarzerde. Schwarzerde ist Kompost mit ca. 30 % EBC-Pflanzenkohle (> 10 Wochen kompostiert). Die organische Substanz kann die Puffereigenschaften des Substrats verbessern und Mikroorganismen einbringen (Verband der Humus- und Erdenwirtschaft, 2015). Dabei sollte nur eine geringe Menge von ausgereiftem Material eingesetzt werden (FLL, 2016). Die organischen Zusatzstoffe unterscheiden sich aber erheblich in ihren Eigenschaften und lassen sich nicht allein durch den pH-Wert, Salzgehalt und Massenanteil charakterisieren (Klemisch, 2017; Schönfeld, 2017). Deshalb treten selbst bei FLL-konformen Substraten grosse Schwankungen in der Qualität der organischen Substanz bzw. dem Nährstoffangebot auf.

Als weitere Zusatzstoffe gelten Hilfsstoffe (DIN 18915, 2018), 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.

Eine Gefährdung von Boden und Grundwasser durch Substrate muss ausgeschlossen sein. Daher dürfen Substrate keine Stoffe enthalten, die den vorgesehenen Gebrauch mindern oder die Umwelt belasten (DIN 18915, 2018; FLL, 2010).

**FLL-Grundrezepturen:** Durch die FLL wurden zwei Grundrezepturen entwickelt: nicht überbaubare und überbaubare Substrate (Tabelle 2) (FLL, 2010). Sie gelten als verbreiteter Standard für Pflanzsubstrate in der Schweiz und werden in zahllosen Ausschreibungen genannt:

- Nicht überbaubar: Vegetationssubstrate mit Sieblinienband A (FLL-Pflanzsubstrat 1, entspricht Gütezeichen RAL-GZ 250/7-1) für den Wurzelraum in offenen Baumgruben/-gräben. Sie gelten als unempfindlich gegen verkehrsbedingte Erschütterungen, z.B. entlang von Strassen, und werden lose, zweilagig verfüllt. Bei stärkerer Beanspruchung, z.B. in Fussgängerbereichen, sind bauliche Massnahmen gegen Verdichtung vorzusehen.
- Überbaubar: Verdichtungsfähige Substrate mit Sieblinienband B und einem geringen Anteil organischer Substanz (FLL-Pflanzsubstrat 2, entspricht Gütezeichen RAL-GZ 250/7-2) (Abbildung 25). Sie gelten nicht als primäres Pflanzsubstrat, dienen aber der Erweiterung des Wurzelraums für Bäume und Sträucher angrenzend zu Pflanzgrube, und weisen eine zu Sandboden vergleichbar hohe gesättigte Wasserleitfähigkeit auf (Tabelle 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 im Verkehrswegebereich für Stellplätze, Wege, Plätze, wassergebundene Decken, Feuerwehrezufahrten (Schmidt, 2013).

Im überbaubaren Substrat liegt das Schlämmkorn (Ton- und Schlufffraktion) mit maximal 25 Masse-% vor. Gegenüber Versickerungsböden, die alleine 10 - 20 % Tonanteil aufweisen, ist dies eher wenig. Der Anteil wasserhaltender Mittelporen ist damit gering und eine Aggregatbildung unwahrscheinlich.

**Tabelle 2:** Technische Anforderungen an Substrat A "nicht überbaubar" und Substrat B "überbaubar", auch für den eingebauten und verdichteten Zustand (FLL, 2010).

Parameter	Nicht überbaubar	Überbaubar
Körnung	0/11 - 0/32 mm	0/16 - 0/32
Schlämmkorn (< 0.063 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-%
pH-Wert	5.0 - 8.5	
Salzgehalt (in Wasser)	≤ 150 mg/100 g Festsubstanz	
Einbauwassergehalt	≤ $W_{Pr}$	≤ 0.8 $W_{Pr}$
Verdichtungsgrad $D_{Pr}$	85 %	≤ 95 %
Verformungsmodul $M_{Ez}$	keine Anforderung	≥ 45 - 60 MN/m <sup>2</sup>
Lagerungsdichte DIN EN 22476-2	keine Anforderung	13 - 25 Schläge
Gesamtporenvolumen, eingebaut	≥ 35 Vol-%	
Wasserkapazität, eingebaut	≥ 25 Vol-%	
Luftkapazität bei pF 1.8, eingebaut	≥ 15 Vol-%	
Luftkapazität, eingebaut	≥ 10 Vol-%	
Spezifische Sickerleistung $S_{spez}$	≥ 18 und ≤ 1800 L/m <sup>2</sup> h	

**Pflanzsubstrat-Rezepturen:** Viele Produkte von Firmen und ausgeschriebene Substratanforderungen orientieren sich zwar an den zwei FLL-Grundrezepturen. Einige Städte und Gemeinden geben aber eigene Empfehlungen und Anforderungen vor, die sich beispielsweise im Wädenswiler<sup>3</sup>, GSZ-Substrat<sup>4</sup>, Schönbrunner, CU-Structural Soil oder Stockholmer-Substrat widerspiegeln.

In Basel wird an Standorten mit offenen Baumscheiben ein Standard-Baumssubstrat aus Birskies und Oberboden verwendet (Stadtgärtnerei Basel, 2015). Der Einbau erfolgt durch Schüttung. An überbauten Standorten wird auf ein Granit-Baumssubstrat mit 85 % Granitschotter und gebrochenen Granitkiessanden zurückgegriffen. Die Basler Baumssubstrat-Rezeptur Radix plus® ist geschützt.

In der Stadt Zürich wird eine intern definierte Substrat-Rezeptur durch drei neue Varianten abgelöst (Tabelle 3):

- Nicht überbaubar: Substrat A1 für die obere Lage in der Baumgrube mit Staudenbepflanzung, Substrat A2 für die untere Lage.
- Überbaubar: Substratmischung B für den verdichtbaren Einbau (80 MN/m<sup>2</sup>) ca. 0.45 - 0.60 m unter der Fahrbahn, dem Gehweg sowie als Verbindung zur Baumgrube.

Die eingesetzte Landerde entspricht einem tonhaltigen Oberboden, der beispielsweise bei der Zuckerrübenwäsche anfällt (Tabelle 3). Beim gesteinsreichen Substrat B besteht das Risiko der Entmischung vor dem Einbau. Nachteilig ist, dass in den Rezepturen für Pflanzenkohle die schlechteste EBC-Klasse (EBC-Urban) zugelassen ist.

Als richtungsweisend gilt die Stockholmer-Rezeptur, welche 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 (Embrén, 2015, Embrén et al. 2017). Besonderes Merkmal ist auch, dass dies vor Ort eingebaut wird. Zunächst wird Schotter- und Gesteinsmaterial verdichtet und dann

<sup>3</sup> Wädenswiler Substrat: Mischgesteinschotter 32/64: 40 %, Mischgesteinschotter 16/32: 25 %, Ziegelsand 0/8: 10 %, Blähschiefer 8/16: 15 %, Pflanzenkohle 10 %  
<sup>4</sup> 50 % Oberboden, 25 % Kiessand 0/16 mm, 25 % Blähton 8/16 mm.

der feinkörnige 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. Stockholmer-Rezeptur wird dem Kanton Zürich zur Umsetzung im Strassenraum dringend empfohlen.

**Tabelle 3:** Substrate A1, A2 und B, die zukünftig in der Stadt Zürich eingesetzt werden sollen.

Nicht überbaubar	Substrat A1 (%)	Substrat A2 (%)	Überbaubar	Substrat B (%)
Mischgesteinschotter 16/32	-	40	Mischgesteinschotter 64/125	30
Mischgesteinschotter 8/16	45	10	Mischgesteinschotter 32/64	30
Bruchsand ¼	5	10	Bruchsand ¼	10
Blähschiefer 8/16	30	25	Blähschiefer 8/16	15
EBC-Pflanzenkohle konditioniert mit Komposttee oder gleichwertig	5	5	EBC-Pflanzenkohle konditioniert mit Komposttee oder gleichwertig	10
Landerde	15	10	Schwarzerde	5

**Hinweise zu Pflanzsubstraten:** Zahlreiche Substratprodukte werden von Firmen angeboten und verschiedenste Rezepturen sind in Ausschreibungen zu finden. Die Vielfalt an Rezepturen betrifft die Körnungslinien, aber auch die Materialeigenschaften der Komponenten.

Ob die gelieferten Produkte die Anforderungen erfüllen, ist vor Ort schwer einzuschätzen. Einige Parameter, besonders die im eingebauten Zustand, lassen sich nämlich nur mit erheblichem Aufwand oder gar nicht kontrollieren. Dazu gehören beispielsweise das Gesamtporenvolumen und die Luftkapazität.

Nicht immer ist nachvollziehbar, warum unterschiedliche Kenngrößen (chemische, physikalische) festgelegt werden. Zudem stellt sich die Frage, ob die Fülle an verschiedenen Materialien zu messbaren Unterschieden im Luft, Wasser- und Nährstoffhaushalt führen. Dabei lauten die Grundregeln, dass eine hohe Luft- und Wasserleitfähigkeit, ein hohes Wasserhaltevermögen und genügend Wurzelraum zur Verfügung zu stellen sind. Wesentlich wirken auf das Wachstum noch der pH-Wert und Nährstoffangebot. Wenn die allgemeinen Grundanforderungen eingehalten sind, entwickelt sich unter dem Einfluss des jeweiligen Standorts (Witterung, Bepflanzung etc.) über die Zeit eine spezifische Substratsignatur, die klare Differenzierungsmerkmale zum Ausgangssubstrat aufweist.

Als Grobfraction bieten sich RC-Materialien an, beispielsweise gewaschene Gleisschotter. RC-Materialien könnten bestenfalls bei Sanierungsmassnahmen vor Ort separiert, gebrochen und nach entsprechender Schadstoffkontrolle wieder als Substratbestandteil eingebaut werden. Die bestehenden Möglichkeiten dürften noch nicht ausgeschöpft sein, jedoch sollten immer die Anforderungen des Grundwasserschutzes beachtet werden.

In der Praxis werden eher selten die Schadstoffgehalte in den Einzelfractionen oder der Substratmischung angegeben. Dies kann besondere bei der Verwendung von Sekundärmaterialien kritisch sein. Vorteilhaft wäre es zudem, die Eluierbarkeit von Schadstoffen als zusätzliches Kriterium für den Eignungsnachweis einzufordern. Der Nachweis könnte z.B. mittels Perkolationsversuch erfolgen, um die Mobilität der Stoffe sowie eine mögliche Grundwasserbelastung abschätzen zu können.

Ein pH-Wert zwischen 5.0 und 7.0 soll gemäss FLL eingehalten werden, um Pflanzen, die nicht für alkalische pH-Werte geeignet sind, gute Standortbedingungen zu bieten. Empfohlen wird jedoch für den Strassenbereich, den pH zwischen 6.0 und 7.0 zu wählen, weil unter leicht sauren Bedingungen Schwermetalle mobilisiert werden können.

### 3.4. Eigenschaften von Pflanzenkohlen

Pflanzenkohle wird in Substraten gesiebt, gebrochen oder im Rohzustand als Substitut oder Ergänzung von organischer Substanz mit Menge meistens 5 bis 20 Volumen-%, eingesetzt (bevorzugt > 2 mm). Neuere Anwendungen betreffen auch Pflanzenkläranlagen oder Bodenfilter. Pflanzenkohle ist als Granulat einzusetzen, um eine Entmischung, hohe Staubentwicklung und Verlagerung im Substrat zu vermeiden.

Für die Herstellung von Pflanzenkohle wird weitgehend trockenes organisches Material unter Ausschluss von Sauerstoff pyrolysiert. 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.

Ein gängiges Temperaturfenster der Pyrolyse liegt zwischen 500 und 800 °C (Abbildung 26, Anhang) (Lehmann, 2007). Die erzeugte innere Oberfläche erreicht ca. 300 bis 600 m<sup>2</sup>/g. Bei niedrigen Temperaturen lässt sich mehr Kohle produzieren, aber die Polyzyklischen Aromatischen Kohlenstoffe (PAK) oder Dioxine treten stärker auf und die innere Oberfläche ist kleiner (Cross et al., 2016). Höhere Temperaturen wiederum bedingen eine grössere Oberfläche und geringere PAK-Gehalte, aber eine geringere Massenausbeute. Durch die Pyrolyse werden die Schwermetalle in der Kohle angereichert.

Mit Pflanzenkohle sollen die physikochemischen Eigenschaften vor allem von Substratrezepturen und das Pflanzenwachstum verbessert werden (Glaser et al., 2002). Beispielsweise zeigten Bäume im Stockholmer-Substrat einen 5-mal grösseren Zuwachs als vergleichbare Bäume in konventionellen Substraten (Embrén, 2015).

Die Gründe für die positive Wirkung von Pflanzenkohle sind vielschichtig (Lehmann und Joseph, 2015). Pflanzenkohle kann Wasser dank ihrer grossen inneren Oberfläche bis zum 5-fachen Eigengewicht aufnehmen (Schmidt, 2011; Ruyschaert et al., 2015). In sandigen und sauren Böden trug sie zu einer verbesserten Nährstoffspeicherung bei (Liang et al., 2006) und die Wasserhaltekapazität er höher (Abel et al., 2013). Nach Zugabe von Pflanzenkohle wurde eine höhere Porosität festgestellt, vor allem mehr Grob- und Mittelporen, die die höhere Wasserleitfähigkeit und Speicherung von pflanzenverfügbarem Wasser begründete (Murtaza et al., 2021; Semida et al., 2019). Offenbar unterstützt die Kohle auch die Aggregatbildung und damit mögliche Sekundärporen (Blanco-Canqui, 2017; Semida et al., 2019).

Pflanzenkohle mit Nährlösungen (Komposttee, usw.) oder durch Kompostierung konditioniert, kann wie ein Dünger wirken. Nährstoffbeladene Pflanzenkohle sollte mit reifem Kompost vermischt sein, um ein ausgewogeneres Nährstoffdargebot anzubieten. Ausserdem siedeln sich Mikroorganismen an, die die Nährstoffumsetzung und Pflanzenversorgung verbessern (Steinbeiss et al., 2009; Chan, 2009). Es gibt Hinweise, dass durch Mykorrhiza-Pilzen auf der Kohle auch die Vitalität der Pflanzen verbessert werde und diese widerstandsfähiger gegenüber Kalamitäten seien (Warnock et al., 2007).

Als nachteilig wird der alkalische pH-Wert (ca. 9.0) 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 (Schönborn et al., 2021).

Da Pflanzenkohle kaum mineralisiert wird, kann der Einsatz in Baums substraten als C-Senke finanziell vergütet werden<sup>5</sup>. Pflanzenkohle wird daher auch als Kohlenstoffsénke angepriesen.

Für hochwertige Pflanzenkohlen wurden durch das European Biochar Certificate (EBC) zwei geeignete Qualitätsanforderungen definiert (EBC-Agro, EBC-AgroBio) (EBC, 2022). Die strenger EBC-AgroBio ist für den Einsatz in Substraten zu empfehlen. Durch EBC wurde am 1.1.2022 das Kriterium EBC-Urban

<sup>5</sup> <https://www.carbon-standards.com/de/services/service-503-kohlenstoff-senken-register.html?sprache=de>

eingeführt. Abgeraten wird von Pflanzenkohle gemäss EBC-Urban, weil dafür nicht nur rein pflanzliche Biomassen zugelassen sind, sondern auch Abfälle wie beschichtetes Altholz und Kunststoffe bis zu 1.0 Massen-%.

Verwirrung stiften zwei Begrifflichkeiten. Seitens Forschung, Hersteller und ausschreibender Stellen wird von "aktivierter Pflanzenkohle" gesprochen, wenn die Kohle mikrobiell konditioniert sind, z.B. durch Co-Kompostierung oder Besprühen mit Mikroorganismen. 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 ursprünglichen Pflanzenkohle erzeugt wird (Kap. 5.5). Meistens werden dafür fossile Rohstoffe (z.B. Steinkohle) beigezogen. Nur vereinzelt findet sich chemisch aktivierte Pflanzenkohle aus heimischem Grüngut<sup>6</sup>.

### 3.5. Fazit

#### Grundwasserschutz

- Versickerungen sind in den Grundwasserschutzzonen *S1* und *S2* nicht zugelassen, in *S3* nur gering belastetes Strassenabwasser mit Bodenpassage. Versickerungen sind nicht über belastete Standort gestattet.

#### Boden und Substrate

- Die drei Bodenarten Ton, Schluff und Sand sowie der Skelettanteil bestimmen den Porenraum. Ton und Schluff fördern die Mittel- und Feinporen, die Sand- und Grobfraktion die Grobporen.
- Ein hoher Feinanteil, vor allem die Tonfraktion und organische Substanz, fördert die Gefügebildung mit Sekundärporen an den Aggregatgrenzen. Makroporen sind strukturell bedingt oder beispielsweise durch biologische Aktivität entstanden.
- Die Anteile der Grob-, Mittel- und Feinporen lassen sich aus der Körnung und Lagerungsdichte herleiten. Dabei gilt: Je höher die Lagerungsdichte, desto kleiner die Porosität. Beides sind Parameter, die sich vor Ort beim Einbau und der Kontrolle einfach bestimmen lassen.

#### Wasserleitfähigkeit

- Der Sandanteil und die Grobfraktion sind entscheidend für die dränierenden Grobporen, die gesättigte Wasserleitfähigkeit bzw. spezifische Sickerleistung, und die Luftversorgung. Der Anteil > 2 mm sollte für versickerungsfähige Standorte > 40 % betragen. Durch Sandbeimischung lässt sich natürlicher Boden magern.
- Für die ungesättigte Wasserleitfähigkeit ist der Anteil an Fein- und Mittelporen relevant, wobei die Wasserbewegung dem Potentialgradienten folgend immer von feuchten zu trockenen Bereichen erfolgt und diese in feinkörnigem Material zu kapillarem Aufstieg führt.

#### Wasserspeicherung

- Mittelporen, organische Substanz und Pflanzenkohle fördern das Wasserhaltevermögen und die nutzbare Feldkapazität (nFK), welche für die Vegetation wichtig ist.
- Die Lagerungsdichte für Versickerungsflächen empfohlenen Bodenarten hat einen grösseren Einfluss auf die Wasserhaltekapazität als die Körnung.
- Um die Wasserversorgung der Vegetation sicherzustellen, ist Schadverdichtung zu vermeiden.

---

<sup>6</sup> <https://inkoh.swiss/inkoh-clean/>

### **Präferenzialer Fluss**

- Starkregen oder eine hohe Infiltrationsmenge durch hohen Wasserzufluss führt in Makroporen (z.B. abgestorbenen Wurzeln, Regenwurmängen) zu einem lokalen, schnellen Wasserfluss.
- Bei Einzelkorngefüge der Substrate und Sandböden/Kies dürfte präferenzialer Fluss eher selten auftreten.
- Die Auftretenswahrscheinlichkeit lässt sich über die Planung minimieren, indem (1) grobkörniges Substrat mit wenig organischer Substanz gewählt, (2) auf tiefwurzelnde Bepflanzung verzichtet (maximal bis Pflanzgrubentiefe), (3) die Wurzeln zur Seite gelenkt und (4) eine oberflächennahe grobkörnige Wasserverteilschicht vorgesehen werden.

### **Pflanzsubstrate**

- Substrate sind grobkörniger (mehr Grobporen) als die meisten natürlichen Böden, sodass die Luftversorgung im Wurzelraum und die Sickerleistung grösser sind. Der Rückhalt von pflanzenverfügbarem Wasser (nFK) ist dagegen kleiner.
- Mit gewissen Substratkomponenten lässt sich der Anteil Mittelporen erhöhen, wie Pflanzenkohle, Blähton, Blähschiefer oder organisches Material.
- Die chemischen Eigenschaften, die z.B. die pflanzenverfügbaren Nährstoffe (N, P etc.), KAK, Reservennährstoffe und Schadstoffgehalte (Cu, Zn, Cr, As etc.) beschreiben, sind meistens unbekannt. Prioritäre Parameter sollten als Qualitätsmerkmal entwickelt werden.
- Substrate dürfen weder einer Entsorgung von überschüssigen Biomassen oder Sekundärmaterialien dienen, noch zu viel versprechen.
- Für eine verlässliche Beurteilung sind die Stoffgehalte (Schadstoffe, Nährstoffe), bevorzugt auch Eluatkonzentrationen, vorzulegen.

### **FLL-Substrate**

- Die überbaubaren und nicht überbaubaren FLL-Substratrezepturen gelten als etabliert und viele Produkte verweisen darauf. Die Grundrezepturen unterscheiden sich von den meisten Böden vor allem im hohen Sandanteil (0.063 – 2 mm) mit ca. 60 %.
- Eine Begrenzung der Grobfraction (Überkorn) auf  $\leq 32$  mm Grösse ist nicht notwendig. So hat sich die Stockholm-Rezeptur mit Kornfraktionen bis 150 mm bewährt.

### **Pflanzenkohle**

- Pflanzenkohle in ausreichender Menge eingesetzt kann die Standorteigenschaften für die Vegetation aufwerten, weil sie Nährstoffe und Wasser speichert.
- Qualitätskontrollierte Kohlen (mindestens EBC-Agro, besser EBC-AgroBio) sind zu bevorzugen.
- Viele Erwartungen an Pflanzenkohle lassen sich nicht erfüllen, z.B. hohe Tausalzverträglichkeit, Reinigungsleistung von Strassenabwasser oder eine ökologisch hochwertige Begleitflora.

### **Kontrollparameter**

- Gewisse Ausschreibungs- und Kontrollparameter für Boden- und Substrateigenschaften lassen sich rasch in-situ bestimmen, wie die Korngrösse ("Fingerprobe"), Lagerungsdichte (Penetrometer) und spezifische Sickerleistung (Doppelring-Infiltrometer).
- Eher ungeeignet sind hydraulische und physikalische Laborparameter, zumal diese nicht die effektive Einbausituation abbilden.

## 4. Tragfähigkeit im Verkehrswegebereich

Unter Tragfähigkeit ist die Stabilität gegenüber mechanischem Druck oder Auflast zu verstehen. Die Strukturstabilität beschreibt den längerfristigen Erhalt der räumlichen Anordnung granularer Boden- oder Substratbestandteile. Die mechanische Belastbarkeit von Bodenmaterial und Substraten hängt von der Körnung, der bereits stattgefundenen Verdichtung und Bodenfeuchtigkeit ab.

### 4.1. Böden

Bodenverdichtungen schränken die Sickerleistung, Luftkapazität und die nFK eines Bodens ein, meistens sogar irreversibel. Eine Verdichtung betrifft primär die Sekundärporen, welche 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. Auch versickerungsfähige Böden mit Vegetation sind ohne besondere Vorverdichtung und strukturstabile Kornabstufung nicht für eine Befahrung geeignet. Besondere Vorsicht ist beim Unterhalt von Bodenfiltern geboten. Mechanische Belastungen auf natürlichen Böden sollten deshalb grundsätzlich gering und regelmässiges Befahren vermieden werden.

Bodenverdichtung kann vor allem beim Einbau zum Problem werden, wenn mit zu hohen Radlasten bzw. schweren Maschinen der Bodeneinbau erfolgt. Im Unterboden können bleibende Schäden auftreten, die nicht wie im Oberboden durch biologische (Wurzelwachstum, Regenwurmaktivität) und physikalische Prozesse (Gefrieren und Tauen, Quellen und Schrumpfen) wieder aufgelockert werden.

Die effektive Belastbarkeit von Bodenmaterial hängt von der Körnung, der bereits stattgefundenen Verdichtung und der Bodenfeuchtigkeit ab, jedoch sind nur sandige, skelettreiche Böden im feuchten Zustand wenig verdichtungsempfindlich. Grundsätzlich gilt daher, dass Belastungen nur bei trockenen Bedingungen und mit geeigneten Fahrzeugen erfolgen sollen.

Die Wasserspannung (Saugspannung) ist ein gutes Hilfsmittel für die Beurteilung der Bodenfestigkeit. Anhand des Messwertes kann abgeschätzt werden, ob Erdarbeiten und Befahrungen unter den gegebenen Feuchtigkeitsbedingungen möglich oder zu vermeiden sind. Tabelle 4 gibt für leichte und mittelschwere Böden, wie sie zur Versickerung eingesetzt werden, die Wasserspannungsbereiche an. Weitere Hilfsmittel zur Vermeidung von Verdichtungen, wie terranimo.ch oder das Nomogramm aus der Richtlinie zum Schutze des Bodens beim Bau unterirdisch verlegter Rohrleitungen (BFE, 2007), sind im Anhang in Kapitel 11.1 zusammengestellt.

**Tabelle 4:** Wasserspannung und mögliche Bodenarbeiten in Abhängigkeit von der Bodenart (nach Bodenmessnetz Nordwestschweiz, vereinfacht).

Wasserspannung	Leichte und mittelschwere Böden
> 20 cbar, trocken	Befahrungen möglich
10 – 20 cbar, feucht	Bei Befahrungen ist Vorsicht geboten.
6 – 10 cbar, sehr feucht	Kein Befahren, Erdbewegungen ab 6 cbar möglich (ohne Befahren des Bodens)
< 6 cbar, nass	Kein Befahren und keine Erdarbeiten

Fehlt nach dem Einbau eine Begrünung, können durch den Aufprall des Niederschlags und beim Wassereinstau die Struktur verschlänmen (Kolmation) und eine innere Verdichtung durch innere Erosion (Suffusion) auftreten. Für platzsparende Anlagen, die zügig in Betrieb genommen werden sollen, sind folglich natürliche Böden eher ungeeignet.

Schäden durch Befahrung in Notfällen, wie bei einem Feuerwehreinsatz, können mit einem gewissen Aufwand behoben werden. Ihre Funktion als Versickerungsfläche und Pflanzenstandort überwiegt das sehr selten auftretende Risiko eines Verdichtungsschadens durch einen Feuerwehreinsatz (mündliche Kommunikation Markus Antener ERZ, Februar 2022). Die Verdichtung kann auf ausgewiesene Stellfläche der Einsatzwagen begrenzt werden.

## 4.2. Pflanzsubstrate

Die Tragfähigkeit der Substrate wird durch das verwendete Skelettmaterial bestimmt (Grabowsky und Bassuk, 2002). Das bevorzugte Material sollte einheitlich (enge Korngrößenverteilung), blockförmig oder kantig sein, wodurch in eine hohe Porosität gewährleistet sind. Wesentliches Merkmal ist, dass das Material widerstandsfähig gegen die permanente Beanspruchung durch Verkehr, Wasser (Frost-/Tauwetter) sowie Tausalz sein muss (Grabowsky et al., 1996).

FLL-Substrate können in Anlehnung an die FLL-Pflanzgrubenbauweisen 1 und 2 eingebaut werden, wobei wie folgt vorgegangen werden kann (Abbildung 12, Anhang Kap. 11.2) (FLL, 2010; ZTV-Vegtra-Mü, 2016):

- Verkehrstragschicht: Teildurchlässig, Verkehrstragschicht mit Erdbau-Planum auf Substrat mit  $M_{E2} \leq 120 \text{ MN/m}^2$  einbauen.
- Wurzelraum: Gut durchlässig, maximal erdfeuchte Konsistenz.
  - Nicht überbaubares Substrat: Zweilagig einbauen (oben lose, unterer Lage leicht verdichtet) mit  $M_{E2} \leq 45 \text{ MN/m}^2$ .
  - Überbaubares Substrat: Mindestens zwei Lagen einbauen (unterste  $> 60 \text{ cm}$ , obere  $> 40 \text{ cm}$ ) mit  $M_{E2} 45 - 60 \text{ MN/m}^2$  bei  $\leq 95 \% D_{Pr}$  (statisch oder mit mittelgrosser Rüttelplatte verdichten).
- Untergrund: Wasserdurchlässigkeit im Bereich des darüberliegenden Substrats, um Versickerung ins Grundwasser zu ermöglichen und Staunässe zu vermeiden.

Für einen mehrlagigen Einbau resultiert daraus, dass (von unten beginnend) beispielsweise Lage 1 und 2 mit je  $45 \text{ MN/m}^2$ , Lage 3  $\leq 80 \text{ MN/m}^2$  (Erdbau-Planum) und Lage 4 mit  $80 \text{ MN/m}^2$  (befahrbar Verkehrsfläche) eingebaut werden.

Für FLL-Baums substrat 2 (FLL, 2010) bestehen sehr hohe Anforderungen an die Tragfähigkeit, wenn teildurchlässige und wenige überfahrbare Flächen gebaut werden (Tabelle 2). Bereits ein Verformungsmodul  $M_{E2} \leq 45 \text{ MN/m}^2$  bedeutet, dass die Fläche mit bis zu  $45 \text{ kg/cm}^2$  belastet werden kann. Die gleichen Anforderungen werden an Schottertragschichten im Strassenbau gestellt. Materialien für Frostschutzschichten weisen dagegen geringere Anforderungen auf, z.B. bei der Körnung, sind aber ebenfalls befahrbar, und lassen sich sogar mobil herstellen (z.B. Mischungen 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.

Aufgrund der positiven Erfahrungen in Stockholm sind dort gesteinsreiche Einbauten mit Grobmaterial  $> 32$  weit verbreitet (Embrén et al., 2017). Steine und Schotter werden vor Ort lagenweise eingebaut und hohe Tragfähigkeit dadurch garantiert.

Der Verdichtungsgrad  $D_{Pr}$  wird im oberen Drittel der eingebauten Substratschicht, jedoch mindestens 20 cm unter Geländeoberkante, als Quotient aus Trockenraumgewicht und Proctordichte berechnet. Die Methode ist aufwändig und findet vermutlich in der Praxis eher selten Verwendung bei der Einbaukontrolle. Deshalb wird als in-situ Nachweis für die Lagerungsdichte eine Rammsonde (SN EN ISO 22476-2, 2012) mit 13 bis 25 Schlägen pro 10 cm Eindringtiefe empfohlen (Tabelle 2).

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 Pflanzkohle und mineralisches Material verändert sich über die Zeit kaum.

Beim Einsatz unterschiedlich gekörnter Materialien an den Baumgrubenseiten ist Kapillarbruch (Kapillarsperre) zu verhindern (Schmidt, 2013). Deshalb ist das angrenzende Substrat in die Planung einzubeziehen (FLL, 2010). Ein möglicher Kapillarsperreneffekt kann auch auftreten, wenn entgegen den Vorgaben zwei Substrate unterschiedlicher Sieblinien schichtweise eingebaut werden, wobei dies vor allem beim Einsatz feinkörniger Materialien passiert. Ob der Effekt wirklich relevant ist in der Praxis, konnte nicht ermittelt werden. Es wird aber vermutet, dass Kapillarbruch von untergeordneter Bedeutung ist für Pflanzgruben.

### 4.3. Fazit

#### **Stabilität und Tragfähigkeit**

- Die mechanische Stabilität und Tragfähigkeit von Boden und Substrat hängt von der Körnung, Materialart, organischer Substanz und Feuchtigkeit ab.
- Je feinkörniger, skelettärmer und organischer, desto grösser ist die Verdichtungsempfindlichkeit.
- Je feuchter zum Zeitpunkt der Befahrung oder Manipulation, desto grösser ist das Risiko eines Schadens.
- Gut abgestufte Mischungen nehmen die Verkehrslasten gut auf. Steine, Geröll und Schotter sollten vermehrt in Pflanzgruben verwendet werden, weil sie hohe Tragfähigkeit aufweisen (Stockholmer-Rezeptur).
- Feuerwehrzufahrten 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.

#### **Boden**

- Eine Verdichtung von Boden ist für die Versickerung nachteilig und muss durch Massnahmen beim Einbau und Unterhalt verhindert werden.
- Um eine Oberbodenverdichtung zu verhindern, empfiehlt sich direkt nach dem Einbau z.B. eine Einsaat, Pflanzmatten oder Mulch (z.B. Schotter ca. 10 cm), oder auf die Inbetriebnahme muss bis zum Aufwuchs verzichtet werden.
- Unterbodenverdichtung ist zu vermeiden, weil er sich kaum regeneriert.
- Das Planum von Versickerungsflächen soll möglichst horizontal angelegt werden, damit das versickernde Wasser an der Schichtgrenze abfließt.

#### **Pflanzsubstrate**

- Wird FLL-Substrat 1 für nicht überfahrbare Standorte eingesetzt, darf nicht verdichtet werden, allenfalls zusammengedrückt (Baggerschaufel).
- Sie sind bei maximal erdfeuchter Konsistenz lagenweise einzubauen, dabei nicht überbaubare lose bzw. mit Baggerschaufel angedrückt, überbaubare bei ca. 45 MN/m<sup>2</sup>.

#### **Einbaukontrolle**

- Der mechanische Zustand von Böden und Substraten lässt sich in-situ mit Tensiometer, Penetrometer/Rammsonde, Doppelring-Infiltrometer, Plattendruckversuch und/oder Fingerprobe erfassen.

## 5. Schadstoffe im Strassenabwasser

### 5.1. Emissionsmindernde Massnahmen

Niederschlagsabfluss von Verkehrsflächen gilt als verschmutzt. Daraus leitet sich die planerische Verantwortung ab, mögliche Belastungen entsprechend dem Stand-des-Wissens zu identifizieren und zu vermeiden, oder durch eine Behandlung zu vermindern. Die Planung muss deshalb an der Quelle von Stoffemissionen beginnen, denn mit einer geringeren Schadstoffbelastung eröffnen sich mehr Möglichkeiten zur Nutzung des Strassenabwassers. Beispiele aus der Praxis zeigen, dass in verkehrsberuhigten Zonen blau-grüne Gestaltungselemente (z.B. bepflanzte Sickermulden, Baumrigolen) vielfältiger umsetzbar sind und sich die Aufenthaltsqualität und Biodiversität besonders gut steigern.

In der Planungsphase "Priorität 0" gemäss VSA-Richtlinie sind abfluss- und emissionsmindernde Massnahmen zu prüfen und umzusetzen (VSA, 2019a). Zu den möglichen Massnahmen zählt z.B.:

- Verkehrsdichte und Schwerlastverkehr reduzieren (Anzahl Fahrzeuge)
- Verkehrsfluss verlangsamen (reduziert Abrieb)
- Strassenreinigung intensivieren (Anzahl Reinigungsintervalle)
- Winterdienst differenziert durchführen.

Mit dem Strassenwischgut werden beispielsweise partikuläre Schadstoffe von der Strasse entfernt, sodass die Belastung im Strassenabwasser geringer wird. Der Eintrag in Boden und Gewässer von Tausalz lässt sich durch einen differenzierten Winterdienst unter Berücksichtigung der Verkehrsbedeutung reduzieren. So wird sogar durch die Schweizer Salinen z.B. in Wohngebieten grundsätzlich die Nullstreuung empfohlen.

Die Umsetzung gestaltet sich in der Praxis schwierig. Dabei sollte jedoch berücksichtigt werden: Je besser sich der Widerspruch zwischen Erwartungen und Forderungen an die Mobilität und die Regenwasserbewirtschaftung auflösen lässt, desto mehr Möglichkeiten eröffnen sich für blau-grüne Elemente und desto mehr Flächen mit geringer Belastung sind erschliessbar.

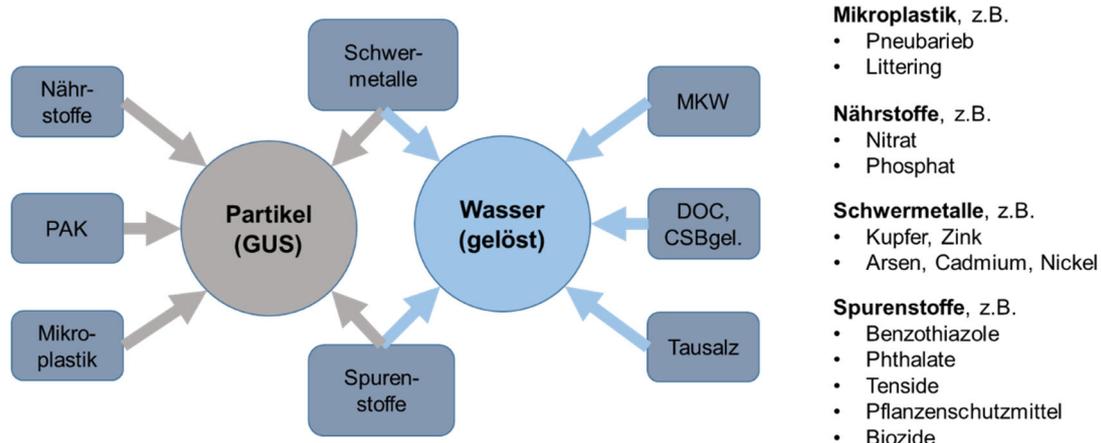
Die Richtlinien zur Strassenentwässerung im Kanton Zürich bilden die Priorität 0 nicht ab. Im Planungsablauf stellen daher Reduktionsmassnahmen kein integrales Element dar. Hier sollte nachjustiert werden, auch um dem Vorsorgegedanken im Gewässerschutz gerecht zu werden.

### 5.2. Stoffliche Emissionen im Strassenbereich

Im Strassenabwasser kommen zahlreiche organische sowie anorganische Stoffe in gelöster und partikulärer Form (gesamte ungelöste Stoffe; GUS) vor, die aus verschiedenen Quellen stammen können (Clara et al., 2014; Wicke et al., 2017; Polukarov et al., 2020). Dazu zählen z.B. Abschwemmungen von der Fahrbahnoberfläche und Infrastrukturelementen, Tropfverluste sowie Abrieb von Bremsen und Pneus. Die Emissionen unterliegen sehr grossen zeitlichen und räumlichen Schwankungen. Die Belastungen treten auch im Strassenwischgut und Spritzwasser auf. Die dazu verfügbare Literatur ist umfassend. Nachfolgend ist eine Auswahl von Referenzen aufgeführt.

**Etablierte Schadstoffe:** Durch Fahrzeuge gelangen Schwermetalle wie Zink aus Fahrzeugreifen (Pneuabrieb), Mineralölkohlenwasserstoffe (MKW) durch Tropfverluste und organische Spurenstoffe durch Additive aus Pneus in die Umwelt (VSA, 2019a). Die Verkehrsinfrastruktur setzt Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) aus Asphaltbelägen und wiederum Schwermetalle aus Schutzplanke o.ä. frei. Auf Wegen und Plätzen sind Aktivitäten und Flächenunterhalt (z.B. Pestizide) entscheidend für das Stoffvorkommen, ebenso wie angeschlossene Dach- und Fassadenabflüsse. Der VSS beschreibt PAK und Schwermetalle als ökotoxikologisch relevanteste Stoffgruppen (VSS Norm 640 347). Bisher wurden vorwiegend diese Stoffgruppen untersucht.

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 Pneubetrieb) sein können (Tabelle 2). So liegen die meisten Schwermetalle und PAK zu 50 - 90 % gebunden an der GUS-Fraktion vor oder werden als partikulärer Schadstoff emittiert (Abrieb) (Boller, 2002; Kasting, 2002). Darüber hinaus kann die GUS-Fraktion zur Kolmation von Versickerungsanlagen (BMLRT, 2013), aber auch zu einer Verbesserung der Reinigungsleistung in Behandlungsanlagen führen (Bayrisches Landesamt für Umwelt, 2007).



**Abbildung 7:** Spektrum von Schadstoffen im Strassenabwasser, welche als Partikel bzw. an Partikeln gebunden und/oder im Wasser gelöst vorliegend.

Da der Feinanteil von GUS besonders relevant ist für die Schadstoffbindung (Schwermetalle, PAK), wurde in Deutschland der Parameter AFS63 (< 0.063 mm) eingeführt (DWA A-102, 2022). Dieser wird zukünftig zur Bemessung von Behandlungsanlagen verwendet. Noch existiert keine normierte analytische Methode. In der Schweiz bietet der Parameter GUS immer noch die beste Orientierung für die Partikelfracht.

**Neue Stoffbelastungen:** Seit einigen Jahren sind neue Stoffe in den Fokus der Strassenabwasserbelastung gerückt. Dazu zählen vor allem die grossen Mengen Pneubarieb und die darin enthaltenen Additive (5 bis 10 Mass-%) wie Vulkanisationsbeschleuniger (Benzothiazol, 2-Mercaptobenzothiazol, Mercaptobenzothiazolsulfid), Weichmacher und Stabilisatoren (z.B. 4-iso-Nonylphenol, Di(2-ethylhexyl)phthalat (DEHP), 2,2'-Bis(4-hydroxyphenyl)propan (BPA)), sowie Antioxidantien (Amine, Phenole) (Björklund et al., 2009; Baensch-Baltruschat et al., 2020; Polukarov et al., 2020). Die Fülle im Strassenabwasser nachgewiesener organischer Spurenstoffe ist immens, wie auch das international richtungsweisende Projekt Microproof im Auftrag der Conference of European Directors of Roads (CEDR) zeigte<sup>7</sup>.

Pneubarieb als wesentliche Quelle von sekundärem Mikroplastik in der Umwelt dominiert die aktuelle Diskussion zur Strassenabwasserbelastung in der Schweiz. Sieber et al. (2019) schätzt den Abrieb pro Jahr auf 10'600 t ± 3'800 t für das ganze Schweizer Strassennetz, und davon würden 1'700 t ± 500 t über SABAs geleitet. Pro Person schwankt der Pneubarieb zwischen 0.2 bis 5.5 kg/a (Baensch-Baltruschat et al., 2020). Eine vereinfachende Annahme ist, dass sich die Abriebmenge proportional zur den DTV verhält. Beobachtet wurde, dass sich die Fracht proportional zur Abflussmenge entwickelt und Mikroplastik rund 30 % der GUS-Fracht in Autobahnabwasser erklärt (Kolb, 2020). Wagner et al. (2018) zeigen, dass die Abriebmengen vom Asphalt und den Bremsen den Pneubarieb übertreffen

<sup>7</sup> <https://www.microproof-cedr.nl/deliverables.php>

können. Die Abschätzungen sollten nur einer groben Orientierung dienen, weil nur wenige Messdaten zur effektiven Belastung vorliegen.

Der in Pneus eingesetzte Vulkanisationsbeschleuniger 2-Mercaptobenzothiazol erreicht im Strassenabwasser bis einige hundert Mikrogramm pro Liter, wirkt aber schon bei 0.8 µg/l (chronisch) toxisch auf aquatische Organismen. Für den Vulkanisationsbeschleuniger 1,3-Diphenylguanidin (DPG) wird angenommen, dass rund 50 % emittieren und in den mobilen Stoff Anilin umgewandelt werden können (Wagner et al., 2018).

Ein gelöster organischer Spurenstoff, der international viel Aufmerksamkeit auf sich zieht, ist das Antioxidationsmittel 6PPD (N-(1,3-Dimethylbutyl)-N'-Phenyl-P-Phenylenediamin). Der Stoff wird ebenfalls seit Jahren in Pneus eingesetzt. Neu ist die Erkenntnis, dass durch Ozon 6PPD-Quinon entsteht, welches eine letale Wirkung (LC50) schon bei  $0.8 \pm 0.16$  µg/L auf junge Lachse aufweist und im Strassenabwasser zwischen < 0.3 und 19 µg/L gefunden wurde (Tian et al., 2020). Im Schweizer Strassenabwasser wurde bisher nicht nach der Substanz gesucht.

Der internationale Wissensstand zum Vorkommen solcher Stoffe im Strassenabwasser spiegelt sich in der Schweiz weder im Monitoring noch in Planungshilfen wider. Fast ausschliesslich stehen GUS, Schwermetalle, PAK und MKW im Fokus. Nur bei den Testanforderungen für Adsorberanlagen werden zwei Spurenstoffe als Leitsubstanzen beigezogen (VSA, 2019b). Bemerkenswert ist, dass viele Spurenstoffe eine hohe Mobilität und Ökotoxizität aufweisen können, weit höher als Schwermetalle und manchmal auch verbunden mit einer endokrinen Wirkung (z.B. Nonylphenol, Bisphenol A).

### 5.3. Abschätzung der Belastung

Die Belastungen gelangen einerseits über die Strassenentwässerung in Boden und Gewässer, andererseits durch Wind- und Sprüheffekte in die Rand- und Böschungsbereiche der Strassen. Die Strassenentwässerung führt nicht zu einem konstanten Stoffeintrag in die Umwelt, sondern einer zeitlich befristeten Pulsbelastung.

Je nach Herkunftsfläche sind die Konzentrationen und der Zustand (gelöst, ungelöst) der Schadstoffe sehr unterschiedlich. Beispielsweise werden Schwermetalle und PAK an Partikeln gebunden verlagert. Hjortenkrans et al. (2008) zeigten, dass nur ca. 40 % der Schwermetalle im Strassenabwasser in gelöster Form und leicht mobilisierbar vorliegen.

**Transportdistanz:** Die Mobilität und Transportdistanz werden durch die Phase des Vorkommens und das damit verbundene Verhalten in Wasser, Boden und Substrat bestimmt. So sind die Transportdistanzen für grobkörnige Fraktionen gering, während suspendierte Feststoffe durch das langsamere Absetzverhalten (Sedimentation) weiter verfrachtet werden. Wasserlösliche Stoffe, wie organische Spurenstoffe und Salze, werden am weitesten transportiert. Deshalb kann die höhere Mobilität (geringe Adsorption) vieler organischer Spurenstoffe besonders kritisch für die Gewässerqualität sein, wie sich aus deren Verhalten im kommunalen Abwasser und Umwelt herleiten lässt.

Mit dem Spritzwasser und der Trockendeposition gelangen partikuläre sowie gelöste Schadstoffe in den Strassenrandbereich. Das Spritzwasser kann Schadstoffe zwischen 0 - 10 m weit transportieren (Werkenthin et al., 2014). Gemäss VSA (2019a) sind Belastungsstreifen von 1 - 3 m Breite entlang von Strassen zu erwarten. Schadstoffe, die über Luft- oder Spritzwassertransport auf einen Stamm oder an die Krone eines Baumes gelangen, akkumulieren dort und können mit dem Regen auf die umgebende Fläche eingetragen werden. Bei Moosen unterhalb der Kronentraufe wurden deshalb signifikant mehr Schwermetalle (Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn) als in Moosen auf einer Vergleichsfläche nachgewiesen (Meyer, 2017).

Die Belastung des Strassen- und Platzwassers an einem Standort ist zeitlich nicht konstant, weder über ein Abflussereignis, noch über den Jahresverlauf. Typisch ist, dass zu Beginn eines Abflussereignisses

höhere Konzentrationen auftreten und diese rasch abnehmen. Dieser asymmetrische Stoffaustrag wird als "First-Flush" beschrieben. Dabei ändert sich die Fracht nicht proportional zur Wassermenge, weil die Stoffmenge auf der entwässerten Fläche begrenzt ist (Trockendeposition) und mit dem Regen abgeschwemmt wird.

**Belastungsabschätzung:** In Platz- und Strassenabwasser wird die Belastung primär durch das Verkehrsaufkommen bestimmt, die gemäss VSA in drei Belastungsklassen abgebildet ist (Tabelle 5):

- Gering: < 5000 DTV pro Tag
- Mittel: 5000-14'000 pro Tag
- Hoch: > 14'000 DTV pro Tag

Die Verkehrsfrequenz bedingt die Grundbelastung, die durch einige weitere Faktoren beeinflusst werden kann, welche erhöhend oder vermindern wirken, wie Strassenreinigung, Anteil Schwerverkehr und Steigung. Details sind in der VSA-Richtlinie hinterlegt (VSA, 2019a).

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 (Tabelle 5). Zu beachten ist, dass sich die Nutzung auf den Flächen über die Jahre verändern kann, somit auch die Belastungsklasse. Die hohe Stoffdynamik und komplexe Zusammensetzung des Strassenabwassers ist in der Planung nicht berücksichtigt.

Zusätzliche Belastungen können durch Dach- und Fassadenflächen auftreten, wenn diese auf Strassen, Wege und Plätze entwässern (Tabelle 5) (VSA 2019, AUE 2021):

- Gering: < 50 m<sup>2</sup> Dach, < 250 m<sup>2</sup> Fassade mit Metallen oder pestizidhaltigen Materialien
- Mittel und hoch: > 50 m<sup>2</sup> Dach, > 250 m<sup>2</sup> Fassade mit Metallen (beschichtet, unbeschichtet) oder pestizidhaltigen Materialien.

**Tabelle 5:** Belastungsklassen für Herkunftsflächen im Bereich der Verkehrsflächenentwässerung (VSA, 2019a).

Belastungsklasse	Herkunftsflächen
Gering	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Strassen: &lt; 5'000 DTV</li> <li>• Haus-, Vor-, Parkplätze: selten Fahrzeugwechsel, geringe Nutzung</li> <li>• Dach, Fassade (Metall, Pestizide): &lt; 50 m<sup>2</sup></li> </ul>
Mittel	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Strassen: 5'000 – 14'000 DTV</li> <li>• Haus-, Vor-, Parkplätze: mittlere Fahrzeugwechsel und Nutzung</li> <li>• Dach, Fassade (Metall, Pestizide): 50-500 m<sup>2</sup></li> </ul>
Hoch	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Strassen: &gt; 14'000 DTV</li> <li>• Haus-, Vor-, Parkplätze: häufige Fahrzeugwechsel, intensive Nutzung</li> <li>• Dach, Fassade (Metall, Pestizide): &gt; 500 m<sup>2</sup></li> </ul>

#### 5.4. Transportverhalten der Stoffe in Boden und Substrat

Ob Schadstoffe verlagert oder zurückgehalten werden, hängt von drei Faktoren ab:

- Stoffeigenschaften: Partikulär oder gelöst, geladen oder unpolar.
- Eigenschaften von Boden / Substrat: Ladung der Partikeloberfläche, Geometrie und Durchgängigkeit der Poren (Konnektivität).
- Wasserfluss: Menge und Geschwindigkeit des Wasserflusses.

Tabelle 6 zeigt eine zusammenfassende Übersicht über den Einfluss der chemisch-physikalischen Eigenschaften auf den Rückhalt von Schwermetallen und organischen Schadstoffen.

**Partikuläre Stoffe:** Partikuläre Stoffe, wie Pneubrieb und GUS (und daran gebundene Schadstoffe), werden durch mechanische Filterung an der Oberfläche oder in der Matrix von durchströmten Böden sowie Substraten > 90 % zurückgehalten (Kasting, 2002; BMLRT, 2013; ASTRA, 2021).

Durch die Oberflächen- und Raumfiltration werden folglich der grösste Teil der partikulären Fracht aus dem Strassenabwasser entfernt (LfU, 2008; Kocher, 2016). 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. Dazu zählen die Grösse und Form der Partikel, die Korn- und Porengrössenverteilung der Matrix sowie Uniformität des Materials. Die chemischen Eigenschaften des Porenraums sind von untergeordneter Bedeutung.

**Tabelle 6:** Übersicht über das Verhalten von Schadstoffen in einem porösen Medium und den Einfluss chemischer und physikalischer Eigenschaften von Schadstoff und Medium auf dieses Verhalten.

Einflussfaktoren	Schwermetalle	Organische Spurenstoffe
Ladung	In gelöster Form positiv geladen	Meistens unpolar, teils aber aktive Gruppen mit lokaler Ladung
Adsorption	An Tonmineralen, organischer Substanz und Eisen-/Manganoxiden; konkurrierende Sorption mit Nährelementen und Natrium	Je nach chemischer Struktur an Tonmineralen, organischer Substanz und Aktivkohlen; konkurrierende Sorption mit DOC
pH-Wert	pH < 5 mobilisiert, pH > 9 fällt Metalle aus	Eher geringe Bedeutung, aber abhängig von chemischer Struktur des Moleküls
Mikrobielle Aktivität	Keine Bedeutung	Aerober biologischer Abbau möglich
Organischer Kohlenstoff (C <sub>org</sub> )	C <sub>org</sub> erhöht die Adsorption, gelöste organische Kohlenstoffverbindungen (DOC) erhöhen Mobilität	C <sub>org</sub> erhöht die Adsorption. Ein Abbau von C <sub>org</sub> kann Schadstoffe freisetzen.
Partikel (GUS)	Schwermetallpartikel (Abrieb), im Partikeln enthalten (Pneubrieb) oder adsorbiert	In Partikeln wie Pneubrieb enthalten (Additive), gebunden an mineralischer Fraktion
Filterung	Partikuläre Schadstoffe werden durch die mechanische Filterung im Sickermedium aus Platz- und Strassenabwasser entfernt	
Bodeneigenschaften	Adsorption: Gehalte an Tonmineralen, C <sub>org</sub> , pH Mechanische Filterung: Korn- und Porengrössenverteilung, Uniformität des Filtermediums, Vorhandensein von präferenziellen Fließwegen	

Für eine mechanische Filterung müssen die Poren nicht zwingend kleiner sein als die zu filternden Teilchen. Gemäss Hermann (2010) wurden sehr feine Teilchen in Sandfiltern auch dann zurückgehalten, wenn sie kleiner als der Porendurchmesser waren. Der Grund ist, dass die Konnektivität der Poren fehlte (Durchgängigkeit) und sich über die Betriebsdauer an der Bodenoberfläche eine deckschichtkontrollierte Filtrationsleistung aufbaut.

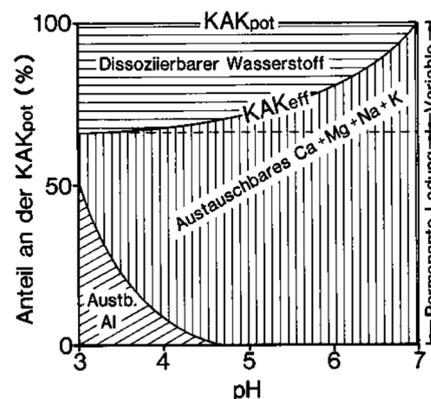
**Gelöste Stoffe:** Gelöste Stoffe interagieren mit den Oberflächen der Feinfraktion. Vor allem Tonminerale und organisches Material, aber auch Oxide und Hydroxide, stellen die relevanten Oberflächen für die Adsorption zur Verfügung. Dabei spielt die Grösse des Moleküls eine Rolle, aber

auch seine Ladung. Aufgrund der Ladung ist beispielsweise Zink das mobilste und Blei das immobilste Element ( $Zn > Cd > Cu > Pb$ ) (de Matos et al., 2000). Die Stärke der Interaktion zwischen Stoff und Bodenoberfläche lässt sich durch Verteilungskoeffizienten beschreiben, welche den Anteil der adsorbierten Stoffmenge im Verhältnis zur Gesamtstoffmenge beschreibt. Die Stoffbindung wird auch über einen Retardationsfaktor beschrieben, der den Transport des Stoffs im Verhältnis zum Wasserfluss angibt.

Tonminerale ( $< 2 \mu m$ ) haben die Form feiner Plättchen und eine negative Oberflächenladung. Entsprechend binden positiv geladene Elemente (z.B. Schwermetalle, Nährstoffe) oder Spurenstoffe mit positiver Ladung. Organisches Material kann sowohl positiv als negativ geladene Elemente oder Spurenstoffe binden. Es bietet mehr Adsorptionsmöglichkeiten als die Tonfraktion, kommt aber nur im Oberboden vor. Bevorzugt binden Spurenstoffe an Humuskomplexen im organischen Oberboden (Piguet et al., 2008). Da in den meisten natürlichen Böden oder Substraten die Anteile an organischem Material und der Tonfraktion begrenzt sind, wurden Biozide im Abstrom von Mulden-Rigolen nachgewiesen (Lange, 2020). Burkhardt et al. (2017b) haben im Labor zwei Böden aus SABAs auf den Rückhalt von Spurenstoffen untersucht. Dabei zeigte sich, dass die Spurenstoffe beim gesättigtem Fluss zu weniger als 30 % zurückgehalten werden, Schwermetalle jedoch zu mehr als 95 %. Für den schlechten Rückhalt dürften der hohe Sand- und geringe Tonanteil verantwortlich sein.

Die generelle Fähigkeit der festen Boden- oder Substratmatrix, geladene Stoffe zu binden, wird mit der Kationen- und Anionenaustauschkapazität beschrieben (KAK, AAK). In tonreichen und stark humosen Böden ist die KAK besonders gross. Eine hohe KAK bedeutet, dass Nährstoffe und Schwermetalle gut gebunden werden, eine hohe AAK hingegen, dass Anionen gut gebunden werden. Dazu zählt leider nicht das einwertige Chlorid vom Tausalz.

Sowohl die KAK als auch AAK werden vom pH beeinflusst. Leicht gebundene Stoffe können bei sich ändernden Bedingungen erneut mobilisiert. Abbildung 8 zeigt den Zusammenhang zwischen der effektiven KAK ( $KAK_{eff}$ ) und dem pH-Wert des Bodens. Die potenzielle KAK ( $KAK_{pot}$ ) würde sich bei einem neutralen pH einstellen. Bei sauren Bedingungen nimmt die KAK ab und die AAK zu.



**Abbildung 8:** Effektive Kationenaustauschkapazität als Funktion des pH (Blume et al., 2002).

**Präferenzialer Stofftransport:** Versickert verschmutztes Wasser über präferenziale Fließwege, spricht man von präferenzialer Transport. Wenn bei einem stärkeren Niederschlagsereignis präferenzialer Fluss auftritt, könne auch gelöste oder partikuläre Stoffe schnell durch Boden und Substrat transportiert werden, ohne dass diese mit der Bodenmatrix interagieren. Präferenzialer Transport wurde von Stamm et. al (1998) als einer der Hauptmechanismen identifiziert für die Verlagerung von

partikulärem Phosphor aus Gülle in landwirtschaftlichen Böden und von Kim et al. (2008) für gelöste Schwermetalle in natürlich gewachsenen Böden beschrieben.

In einer Studie von Knechtenhofer et al. (2003) auf einem Schiessplatz wurde festgestellt, dass die Schwermetalle (Pb, Cu, Sb) im Oberboden gut zurückgehalten werden. Unterhalb von 20 cm lagen präferenzielle Fliesswege durch grosse Baumwurzeln vor. Entlang dieser Kanäle gab es signifikant höhere Konzentrationen gegenüber der umgebenden Bodenmatrix. Schwermetalle, organische Schadstoffe oder andere Stoffe können dort anreichern, wenn die Kanäle über mehrere Jahre bestehen (Bundt et al., 2002). Die in die Tiefe verlagerte Stoffmenge ist aber gegenüber der eingetragenen Stoffmenge auf der Fläche eher klein (< 1 %).

Bemerkenswert ist, dass der präferenzielle Stofftransport nahezu unabhängig von den Eigenschaften der Stoffe erfolgt und gelöste wie partikuläre Stoffe gleichermassen verlagert werden können. Abbildung 9 zeigt das Fliessmuster eines gelösten blauen Farbtacers, der den Wasserfluss in einer SABA nachzeichnet. Das Wasser versickert im Boden viel heterogener ist als im darunterliegenden Sand. Anhand der Färbung entlang der Schichtgrenze und in den groben Poren des Bodens ist zu erkennen, dass Pneumabtrieb bis zur Schichtgrenze transportiert wurde.

Ob präferenzielle Fliesswege in Bodenfiltern und Substraten zu einer messbaren Grundwasserbelastung führen, ist unklar. 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. Nur damit lassen sich die potentiell wichtigsten Eintrittspforten von Schadstoffen ins Grundwasser qualitativ und quantitativ erfassen und beurteilen.



**Abbildung 9:** Fliessmuster und Ablagerungen von Pneumabtrieb im Filter einer SABA, in der Bodenmaterial oberhalb einer schräg verlaufenden Sandschicht eingebaut wurde (Pazeller et al., 2017).

## 5.5. Eigenschaften von Adsorberstraten und Pflanzenkohlen

Adsorbersubstrate sind auf eine hohe hydraulische Durchlässigkeit (hohe Wasserleitfähigkeit) und maximalen Stoffrückhalt ausgerichtet (Haile und Fürhacker, 2018; Burkhardt et al., 2017a, b). Die Schadstoffe werden an der Oberfläche und in den Poren gebunden. Für die Adsorptionswirkung ist meistens die Kontaktzeit ausschlaggebend. Verbaut werden die Materialien lose geschüttet oder in Kissen, Matten und Modulen. Gegenüber Boden besteht der Vorteil, dass Adsorbersubstrate die Schadstoffe platzsparend stark anreichern und damit die diffuse Belastung des Strassenabwassers gezielt entfernt wird.

Zur Schadstoffbindung werden spezifische Komponenten mit Korngrößen der Einzelkomponenten von 1 - 5 mm Grösse eingesetzt, wie organische Materialien, Zeolithe, granuliert Eisenhydroxide (GEH) und granuliert Aktivkohlen (GAK). GAK findet in neueren Filtermaterialien zur Bindung von Spurenstoffen, wie in der Abwassertechnik, Verwendung.

In der Schweiz (VSA, 2019b)<sup>8</sup>, Deutschland<sup>9</sup> und Österreich (ÖNORM B 2506-3) existieren Merkblätter und Richtlinien, nach denen die stoffliche und hydraulische Leistungsfähigkeit für solche Materialien ermittelt werden. Unter jeweils definierten Bedingungen wird der Stoffrückhalt, ggf. auch die Beladungskapazität bzw. Standzeit, bestimmt und die Leistungsfähigkeit bewertet. Die Standzeit ergibt sich unter Berücksichtigung der Anlagendimensionierung (Kap. 6.4).

Die Komponenten kommen einzeln oder als Mischungen zum Einsatz. So setzen Hersteller für den Rückhalt von GUS, Schwermetallen und MKW beispielsweise auf Zeolith, Mischungen aus Zeolith und Betongranulat (zur pH-Regulation) oder Zeolith und GEH. Die organischen Materialien sind oft faserig und bestehen aus Kokosfasern o.ä. Mischungen sind auch auf den Rückhalt von Spurenstoffen ausgerichtet (Burkhardt et al. 2017b, Wicke et al. 2022).

Das Potential ist in der Umsetzung nicht ausgeschöpft, um Grundwasser vor Schadstoffeinträgen, vor allem Spurenstoffen, aus dem Strassenabwasser zu schützen. Besonders interessant zur Vorbehandlung von Strassenabwasser sind hierbei Kombinationen mit Pflanzsubstraten, z.B. Adsorbersubstrate als Vorbehandlung.

Vielfach wird beschrieben, dass Pflanzenkohle Schadstoffe wie Schwermetalle aufgrund ihrer grossen Oberfläche binde, jedoch die Immobilisierungswirkung mit der Zeit (ca. 2 - 3 Jahre) nachlasse (Semida et al., 2019; Guo et al., 2020; Wang et al., 2021; Yuan et al., 2021). Die Gründe der Abnahme sind unklar, könnten beispielsweise mit Veränderungen des pH-Werts, der Auswaschung von Komponenten oder Interaktion mit Pflanzenwurzeln und Mikroorganismen verbunden sein. So ist beispielsweise nicht auszuschliessen, dass die Schwermetalle 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. Die widersprüchlichen Aussagen zeigen, dass die langfristige Schadstoffbindung durch Pflanzenkohlen zurzeit nicht eindeutig belegt ist und kritisch hinterfragt, beziehungsweise weiter untersucht werden sollte.

Nachgewiesen ist aber, dass chemisch aktivierte Aktivkohle (GAK) Spurenstoffe effizient bindet. Deshalb findet GAK in Adsorbersubstraten Verwendung. Die Hersteller können dazu Auskunft geben. Diese Fähigkeit bringt auch chemisch aktivierte Pflanzenkohle mit (Hartmann et al., 2019), jedoch kann bisher nur die Firma INEGA AG (Maienfeld)<sup>10</sup> ein entsprechendes qualitätskontrolliertes Produkt aus Schweizer Pflanzenkohle anbieten. Die Anwendung in Mischadsorbern für die Regenwasserbehandlung steht dabei aber noch nicht im Fokus.

## 5.6. Taumittel

Taumittel werden im Winter flüssig (Salzsole) oder als Tausalz eingesetzt. Zu den unerwünschten Folgen zählen Salzsäden an Fahrzeugen, Beton- und Stahlbauwerken, am Strassengrün, sowie Belastungen von Böden und Gewässern (Zuber, 2013).

Der spezifische Salzaustrag dürfte gemäss Boller (2011) bei 10 bis 20 g/m<sup>2</sup> liegen. Im Strassenabwasser können daraus Konzentrationen zwischen einigen 100 bis einigen 1000 mg/L Chlorid resultieren. Für die Einleitung und Versickerung von Niederschlagswasser mit Tausalz gibt es weder gesetzliche

---

<sup>8</sup> <https://vsa.ch/fachbereiche-cc/siedlungsentwaesserung/regenwetter/adsorber/>

<sup>9</sup> <https://www.dibt.de/de/bauprodukte/informationsportal-bauprodukte-und-bauarten/produktgruppen/bauprodukte-detail/bauprodukt/anlagen-zur-behandlung-mineraloelhaltiger-niederschlagsabfluesse-fuer-die-versickerung>

<sup>10</sup> <https://inkoh.swiss/inkoh-clean/>

Vorgaben, noch thematisieren die VSA- oder VSS-Richtlinien diesen Belastungsparameter. Damit fehlen Instrumente, die hohen Verbrauchsmengen zu hinterfragen und Alternativen zu suchen.

Das Tiefbauamt des Kantons Zürich hat einen durchschnittlichen Salzverbrauch von ca. 15 000 t pro Winter. Bei einer gestreuten Oberfläche von ca. 22 Mio. m<sup>2</sup> entspricht dies einer jährlichen Salzmenge von 650 g/m<sup>2</sup> (TBA ZH, 2022). Unter der Annahme, dass sich die jährliche Salzmenge in Zürich auf 50 Einsätze je Route verteilt und jeweils durch Abflussereignisse mit im Mittel 250 l/m<sup>2</sup> 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 mg/kg erste Schäden aufweisen und bei > 150 mg/kg in Boden und Substraten die meisten Baumarten geschädigt werden.

Der Eintrag in die Baumscheibe erfolgt selten über die Gesamtfläche, sondern meistens punktuell entlang der Randbereiche von Randbefestigungen (Ablaufkanten). Daher ist nicht der ganze Bodenkörper bzw. Wurzelraum gleichstark dem Salz ausgesetzt. Vermutlich auch darum zeigen Untersuchungen unter realen Bedingungen in Wien keine messbaren Salzsäden (Grimm et al., 2021).

Chlorid ist ein inerte Stoff und im Boden sehr mobil, da nur wenige Bindungsplätze für den Rückhalt von Chlorid vorliegen. Daher wird Chlorid ausgespült. Die Salzkonzentrationen im Boden oder Substrat sind nur solange hoch, bis das Chlorid durch einen Spülostoss bei Starkregen oder via grosse Anschlussfläche ausgewaschen wird. In der Schweiz ist aufgrund der Niederschlagsmengen fast immer von einer entsprechend grossen Auswaschung auszugehen. Treten im Grundwasser Konzentrationserhöhungen auf, verdünnen sie sich schnell gemäss Boller (2011).



**Abbildung 10:** Salzbarrieren im Strassenrandbereich (Giessereistrasse, Zürich).

Natrium kann gut binden am Boden und deshalb Konzentrationen bis 500 mg Na/kg erreichen (Boller, 2011). Bei hoher Salzzufuhr werden Pflanzennährstoffe (Calcium, Magnesium und Kalium) sowie Spurenelemente (Mangan, Zink und Bor) von den Bindungsplätzen der Tonminerale verdrängt, wodurch Mangelerscheinungen bei den Pflanzen auftreten können (Zuber, 2013). Natrium kann bei hohen Konzentrationen dispergierend auf das Bodengefüge wirken. Dadurch können Bodenaggregate zerfallen und eine Verschlammung auftreten, die die Sickerleistung einschränkt. Durch hohe Natriumkonzentrationen können auch Schwermetalle mobilisiert werden (Hjortenkrans et al., 2008; Zuber, 2013). Daher ist bei Adsorbersubstraten ein Tausalz-Nachweis verbreitet, um die Remobilisierung zu bestimmen.

Auf Wegen und Plätzen sind die Tausalzkonzentrationen möglicherweise am höchsten. Deshalb ist der Winterdienst besonders auf diesen Flächen differenziert durchzuführen (Kapitel 7.7, S. 48).

Streusalz wird eine geringe Menge Ferrocyanid als Rieselhilfe beigegeben. Das Mittel ist nicht sehr toxisch, wird aber unter Lichteinwirkung zu toxisch wirkendem Cyanwasserstoff. Die abgeschätzten Konzentrationen von Cyanwasserstoff lassen dennoch keine Gefährdung erwarten (Boller, 2011).

Alternative Taumittel z.B. Zucker, Kaliumcarbonat oder Harnstoff stehen ebenfalls zur Verfügung. Der Anspruch auf uneingeschränkte Nutzung der Verkehrsflächen ist aber so hoch, dass die ökologischen Anforderungen nachrangig scheinen. Als nachgeschaltete Massnahme können an Strassen Salzabweiser montiert werden, die manuell in der Winterzeit geschlossen werden (Abbildung 10). Für den richtigen Winterbetrieb ist jedoch ein hoher personeller, logistischer Aufwand erforderlich.

## 5.7. Fazit

### Emittierte Stoffe

- Die Vermeidung und Verringerung der Abflussmengen und Belastungen (Priorität 0, VSA) sollte konsequent verfolgt werden. Die effektiven Handlungsmöglichkeiten sind meistens gering.
- Strassenreinigung, Verkehrsberuhigung und Langsamverkehr können die Belastung von Platz- und Strassenabwasser reduzieren.
- Kenntnisse zur stofflichen Belastung im Strassenabwasser liegen in der Schweiz vor allem für GUS, Kupfer und Zink vor, selten für andere Schwermetalle, und fast keine für Spurenstoffe.
- Die Schadstoffe sind für Gewässer relevant, nicht für die Vegetation.

### Stoffeigenschaften

- Partikuläre Stoffe sind teils abbaubar, führen zu Co-Transport und Trübung. Rückhalt durch Sedimentation, Filtration (Kolmation).
- Anorganische Stoffe (Cu, Zn, etc.) sind nicht abbaubar, in gelöster Form toxisch, häufig partikelgebunden. Rückhalt: Adsorption, Filtration, Fällung.
- Organische Spurenstoffe sind oft langsam abbaubar, teils sehr toxisch. Rückhalt: Adsorption, biologischer Abbau.

### Boden und Substrat

- Partikuläre Stoffe werden mechanisch zurückgehalten und gelöste Stoffe adsorbiert (Schwermetalle, einige Spurenstoffe).
- Der Tongehalt (10 – 20 %) ist für die Adsorptionskapazität von gelösten Schadstoffen und Nährstoffen verantwortlich. Die Minimalanforderung von 5 % ist ebenso zu vermeiden wie die maximale von 25 %. Ein Sandanteil von > 40 % verbessert die Wasserleitfähigkeit und reduziert präferenziellen Fluss.
- Die mikrobielle Aktivität im Oberboden hat keinen Einfluss auf Schwermetalle, aber auf den Abbau von organischen Stoffen.
- Der Grundwasserschutz wird bei der Bodenpassage gewährleistet, wenn > 20 cm Oberboden und > 30 cm Unterboden, > 1.0 m Grundwasserflurabstand eingehalten sind, und feinwurzeln- oder flachwurzeln-vegetation gewählt wird.
- Pflanzsubstratrezepturen sind nicht dafür entwickelt, eingetragene Stoffe zurückzuhalten. Die Filterfunktion für GUS ist das zufällige Resultat der Substratmatrix.
- Der effektive Rückhalt von Boden und Substraten für organische Spurenstoffe ist unklar. Experimentelle Untersuchungen können die offenen Fragen klären.
- Substratmischungen, die den Schadstoffrückhalt bewerben, sollten nachvollziehbare Untersuchungsergebnisse für gelöste organische und anorganische Stoffe vorgelegen. Hierfür bietet sich der VSA-Labortest für Adsorbermaterialien an (VSA, 2019b).

- Adsorbersubstrate (Filtermaterialien) sind für den Schadstoffrückhalt entwickelt. Sie lassen sich als Schadstoffbarrieren alleine oder in Kombination mit Pflanzsubstraten einsetzen, um das Grundwasser für unerwünschten Stoffeinträgen zu schützen (Kap. 8.2, 54).

#### **Präferenzialer Transport**

- Wurmgänge oder abgestorbene Wurzeln tiefwurzelnder Pflanzen bilden Makroporen und können dadurch den präferenzialen Stofftransport begünstigen.
- Die ausgetragenen Stoffmengen sind in der Regel gering, die effektive Relevanz des präferenzialen Transports für mögliche Grundwasserbelastungen sollte aber geklärt werden.

#### **Tausalz**

- Salz kann Bodenaggregate dispergieren und die Wasser- und Luftdurchlässigkeit herabsetzen.
- Hohe Natriumkonzentrationen können Nährstoffe von den Bindungsplätzen verdrängen.
- Chlorid wird mit dem Sickerwasser rasch ausgewaschen, wenn genügend Sickerwasser vorhanden ist (gesättigter Wasserfluss).
- Stressfaktoren wie Hitze, Wassermangel und Verdichtung der Wurzelzone überwiegen oft den Einfluss vom Tausalz auf die Pflanzen.

#### **Störungen und Unfälle**

- Werden nicht explizit beschrieben, weil im Falle einer Havarie der gesamte Boden oder das Substrat ausgetauscht werden muss.

## **6. Versickerung und Behandlung von Strassenabwasser**

Niederschlagsabwasser von Strassen und Plätzen ist zu versickern und entsprechend der Belastungsklassierung und des Gewässerschutzbereichs zu behandeln (VSA, 2019, Modul DB). Dieses etablierte Vorgehen legt die Grundlage auch für die Ableitung von Platz- und Strassenabwasser in Pflanzgruben. Werden Dach-/Fassaden- mit Platz-/Verkehrsflächenabflüssen gemeinsam versickert, gelten die jeweils strengeren Anforderungen.

**Zulässigkeitsprüfung:** Platz- und Strassenabwasser mit geringer, mittlerer und hoher Belastung darf im *Au* und *üB* über eine Bodenpassage immer versickert werden (Abbildung 11) (VSA, 2019a). Im *Au* ohne Bodenpassage ist eine Behandlung der Anforderungsstufe "Standard" vorzusehen und bei hoher Belastung eine Behandlung mit der Anforderung "Erhöht" (VSA, 2019b). Dach- und Fassadenwasser mit geringer und mittlerer Belastung darf ebenfalls immer im *üB* der Versickerung zugeführt werden. Ein Grund ist die starke Durchmischung von vergleichsweise wenig Sickerwasser in einem viel grösseren Grundwasserkörper sowie die fehlende direkte Nutzung für Trinkwasserzwecke. Im Bereich von belasteten Standorten und insbesondere auf Altlasten darf ohne Massnahmen kein Niederschlagsabwasser künstlich versickert werden.

Gemäss AWEL-Richtlinie darf von Privatgrund Niederschlagswasser mit mittlerer Belastung über eine besonders ausgeführte Bodenpassage ( $\geq 20$  cm Oberboden,  $\geq 20$  cm Unterboden) auch in der Trinkwasserschutzzone *S3* versickert werden (AWEL, 2022). Zudem darf im Kanton Zürich 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 in Grundwasserschutzzone *S3* und im Gewässerschutzbereich *Au* vielleicht kombinierte Adsorber- und Pflanzsubstrate an (Kap. 8.2).

Versickerung							
Gewässerschutzbereich A <sub>U</sub> , S1–S3, S <sub>IV</sub> , S <sub>m</sub> , üB gemäss Gewässerschutzkarte	Bodenpassage (Aufbau gemäss Modul DA Kap. 1.3)	Art der zu entwässernden Fläche					
		Dach- und Fassadenflächen			Platz- und Verkehrsflächen		
		Belastungsklasse des Niederschlagsabwassers gemäss Tabelle B6					
		gering			hoch		
		gemäss Tabelle B6			gemäss Tabelle B7 und B8		
		gering	mittel	hoch	gering	mittel	hoch
übrigen Bereich üB	mit	+	+	+ <sup>2</sup>	+	+	+ <sup>2</sup>
	ohne	+	+	B <sub>erhöht</sub>	B <sub>standard</sub> <sup>3</sup>	B <sub>standard</sub>	B <sub>erhöht</sub>
Bereich A <sub>U</sub>	mit	+	+	+ <sup>2</sup>	+	+	+ <sup>2</sup>
	ohne	+	B <sub>standard</sub> <sup>1</sup>	B <sub>erhöht</sub>	B <sub>standard</sub> <sup>4</sup>	B <sub>standard</sub>	B <sub>erhöht</sub>
S3, S <sub>IV</sub> , S <sub>m</sub>	mit	+	–	–	+	–	–
	ohne	–	–	–	–	–	–
Schutzreal/S2/S1	nicht relevant	–	–	–	–	–	–

Legende	
+	Versickerung zulässig
B <sub>standard</sub>	Versickerung zulässig mit Behandlung in Anlage der Anforderungsstufe «standard» oder «erhöht»
B <sub>erhöht</sub>	Versickerung zulässig mit Behandlung in Anlage der Anforderungsstufe «erhöht»
–	Versickerung nicht zulässig

Informationen zu Behandlungsanlagen und Anforderungsstufen siehe Kap. 7 im vorliegenden Modul.

**Abbildung 11:** Anforderungen an die Behandlung bei Versickerung von Platz- und Strassenabwasser mit und ohne Bodenpassage in Abhängigkeit von den Gewässerschutzbereichen (VSA, 2019a).

## 6.1. Grundanforderungen zur Versickerung und Behandlung

**Bodenpassage (belebter Oberboden):** Mit organischer Substanz angereicherter Oberboden wird als belebte Bodenzone oder Bodenpassage umschrieben, weil sich in dieser Zone die mikrobielle Aktivität konzentriert. In einer Versickerungsanlage eingesetzt, soll die Schichtmächtigkeit > 20 cm Oberboden betragen (VSA, 2019a, AWEL, 2022). Die organische Substanz mit 1 - 4 Masse-% kann Pflanzenreste, aber auch zugesetzte Stoffe wie Kompost und Torf, umfassen. Gut zersetzte organische Substanz weist meistens ein hohes Bindungsvermögen auf (KAK). Der Oberboden bindet daher Schadstoffe gut. Gelöste organische Spurenstoffe werden aufgrund ihrer Stoffeigenschaften schlechter zurückgehalten oder ungenügend abgebaut. PAK oder Schwermetallen können auch an Eisen(hydr)oxiden und Tonmineralen im Unterboden zurückgehalten werden, sodass neben dem Oberboden eine zusätzliche Schutzbarriere für das Grundwasser besteht.

**Anschlussflächenverhältnis:** Die Versickerung von Niederschlagswasser im Strassenraum erfolgt in der Regel über eine kleinere Versickerungsfläche im Vergleich zur Anschlussfläche. Die anfallende Wassermenge kann daher auf der Versickerungsfläche einstauen, sodass regelmässig – und nicht nur bei Starkregen – gesättigte Bedingungen auftreten. Je weiter die Flächenverhältnisse auseinanderliegen, desto wichtiger wird die Leistungsfähigkeit der durchströmten Fläche bezogen auf Wasserleitfähigkeit (Überstau) und Schadstoffrückhalt (Standzeit).

**Retention:** Eine Retentionsmassnahme ist vorzusehen, um die hydraulische Leistung und den stofflichen Rückhalt von Boden oder Substrat nicht zu überfordern. Diese Drosselung sollte bevorzugt oberirdisch (Zuflussbegrenzung zur Anlage/Versickerungsfläche) oder unterirdisch (Hohlkörper aus Beton, Kunststoff etc.) vorgesehen sein. Die Vielfalt an technischen Möglichkeiten ist gross und kann beispielsweise bei oberirdischer Retention dazu dienen, die Sichtbarkeit (Aufenthaltsqualität) oder Biodiversität (Feuchtbiotop) zu verbessern. Bei Anlagen ist das Retentionsvolumen auf die Jährlichkeiten gemäss VSA auszulegen. Im Kanton Zürich wird die Auslegung in der Regel auf Einjährlichkeit vorgenommen. Stets ist bei der Dimensionierung auch die Überlaufsituation zu planen (Notentwässerung).

**Versickerungen und Anlagen:** Zu unterscheiden sind Versickerungen, Versickerungs- und Behandlungsanlagen, wobei es sich ab einem Verhältnis von Entwässerungs- zu Versickerungsfläche  $A_E/A_V \geq 5$  um eine bewilligungspflichtige Anlage handelt, je nach Anlagenfunktion um eine Versickerungs- oder Behandlungsanlage (Tabelle 7) (VSA, 2019a, Modul DB).

- Versickerung (Flächenverhältnis  $< 5:1$ ): Versickerungen sind nicht bewilligungspflichtig, weil das Niederschlagsabwasser am Ort des Anfalls versickert.
  - *Mit Bodenpassage:* Niederschlagsabwasser mit geringer und stärkerer Belastung von Parkplätze, Wege o.ä. kann direkt über Rasenflächen, Wiesen etc. versickert werden.
  - *Ohne Bodenpassage:* Eine Versickerung über Sicker-/Verbundsteine, Schotterrasen, nicht befestigte Wege und Ruderalflächen ist nur zulässig, wenn eine geringe Belastung vorliegt (*üB*) oder undurchlässige Flächen (z.B. Fahrstreifen bei Parkplätzen) nicht überwiegen (*Au*).

Pflanzgruben mit Substraten und kleiner Anschlussflächen fallen in diese Kategorie, sofern gering belastetes Wasser anfällt.

- Versickerungsanlage (Flächenverhältnis  $\geq 5:1$ ): Eine Versickerungsanlage weist ein Verhältnis von Anschluss- zu Versickerungsfläche  $\geq 5:1$  auf und die Anforderungen der VBBo gelten nicht. Die Sickerstrecke zwischen der Anlagensohle und dem Grundwasserspiegel muss  $> 1$  m betragen, um das Grundwasser vor allfälligen Stoffeinträgen zu schützen.
  - *Mit Bodenpassage:* Die Versickerung z.B. über Böschungen und Grünstreifen ist für geringe, mittlere und hohe Belastung in den Gewässerschutzzonen *Au* und *üB* zugelassen (Abbildung 11).
  - *Ohne Bodenpassage:* Bei einer Versickerung z.B. über Kieskörper ist hierfür eine Behandlungsanlage der Anforderungsstufe "Standard" bei geringer oder mittlerer Belastung und "Erhöht" bei hoher Belastung vorzusehen.

Pflanzgruben mit Substraten können die fehlende Bodenpassage bei geringer Belastung ersetzen. Die Substrate erfüllen aber nicht den Zweck einer Behandlung.

- Behandlungsanlage (Flächenverhältnis  $\geq 5:1$ ): Das Niederschlagsabwasser wird durch eine Bodenpassage oder ein Adsorbersubstrat behandelt und danach meistens über eine Versickerungsanlage oder in ein Oberflächengewässer abgeführt. Gering belastetes Wasser darf ohne Behandlungsanlage über Boden oder Substrate versickert werden. Eine Behandlung von Platz- und Strassenabwasser ist bei mittlerer und hoher Belastung aber stets vorzusehen. Bei hohen Belastungen ist eine dezentrale Behandlung mit höherem Stoffrückhalt (VSA "erhöht"  $> 90$  % Wirkungsgrad) sinnvoll.

Pflanzgruben mit Substraten erfüllen die Anforderungen bei mittlerer und hoher Belastung nicht.

Eine Vorreinigung mittels Sedimentation (Sandfang etc.) reduziert die Kolmation von Anlagen und verlängert die Standzeit. Für Mulden-Rigolen Systeme empfiehlt der VSA explizit die Vorreinigung (VSA, 2019a).

**Tabelle 7:** Übersicht zu Versickerung, Versickerungs- und Behandlungsanlagen mit und ohne Bodenpassage gemäss VSA-Richtlinie (VSA, 2019a, Tabellen B9, modifiziert).

	Typ	Kurzbeschreibung	Beispiele
Mit Bodenpassage	Versickerung (Ort des Anfalls)	• Keine Versickerungs- oder Behandlungsanlage	• Durchlässige Flächenbeläge wie Rasengittersteine
	Versickerungsanlage ( $A_E:A_V \geq 5:1$ )	• Keine Versickerung • Keine Behandlungsanlage	• Über Schulter oder Böschung • Versickerungsbecken
	Behandlungsanlage ( $A_E:A_V \geq 5:1$ )	• Keine Versickerung • Keine Versickerungsanlage	• Retentionsbecken mit Bodenfilter • Mulden-Rigolen
Ohne Bodenpassage	Versickerung (Ort des Anfalls)	• Keine Versickerungs- oder Behandlungsanlage	• Sicker-/Verbundsteine, Schotterrasen, nicht befestigte Wege, Ruderalflächen etc.
	Versickerungsanlage ( $A_E:A_V \geq 5:1$ )	• Keine Versickerung • Keine Behandlungsanlage (nur Vorreinigung)	• Kieskörper • Versickerungsschacht • Versickerungsstrang
	Behandlungsanlage ( $A_E:A_V \geq 5:1$ )	• Keine Versickerung • Filtermaterial	• Retentionsfilterbecken mit Sand, Kies-Splitt und/oder Adsorber • Technische Filteranlagen

## 6.2. Boden als Filter

Belastetes Platz- und Strassenabwasser, teils durch Fassaden- und Dachflächen beeinflusst, ist gemäss VSA über  $\geq 30$  cm bewachsenem Ober-/Unterboden zu versickern, davon mindestens 20 cm Oberboden (VSA, 2019, Modul DB; DWA-A 138-1, 2020). 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  $\geq 50$  cm Ober-/Unterboden einzubauen, wobei alleine das Oberbodenmaterial bis zu 50 cm Schichtmächtigkeit umfassend kann.

Der Boden sollte bevorzugt 10 – 15 % Tonanteil aufweisen, um ausreichend Stoffbindung zu gewährleisten, und eine hohe Wasserleitfähigkeit mit  $S_{Spez}$  30 - 120 L/m<sup>2</sup> h. Hydraulisch besonders gut geeignet sind körnige, strukturstabile Böden, die aber eine schwache Rückhaltewirkung für gelöste Schadstoffe aufweisen können. Als Anforderung für den Untergrund wird  $S_{Spez} > 60$  L/m<sup>2</sup> h empfohlen, in jedem Fall nicht geringer als für das darüberliegende Material.

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 wasser-gesättigte Bodenzone meiden.

Werden Bodenfilteranlagen fachgerecht ausgeführt, wird für die etablierten Schadstoffe wie GUS und Schwermetalle  $> 90$  % Stoffrückhalt erwartet. Zahlreiche bauliche Varianten sind in der Schweiz möglich (ASTRA, 2021). In anderen Ländern bestehen zum Design solcher Systeme weitere Konzepte (Payne et al., 2015).

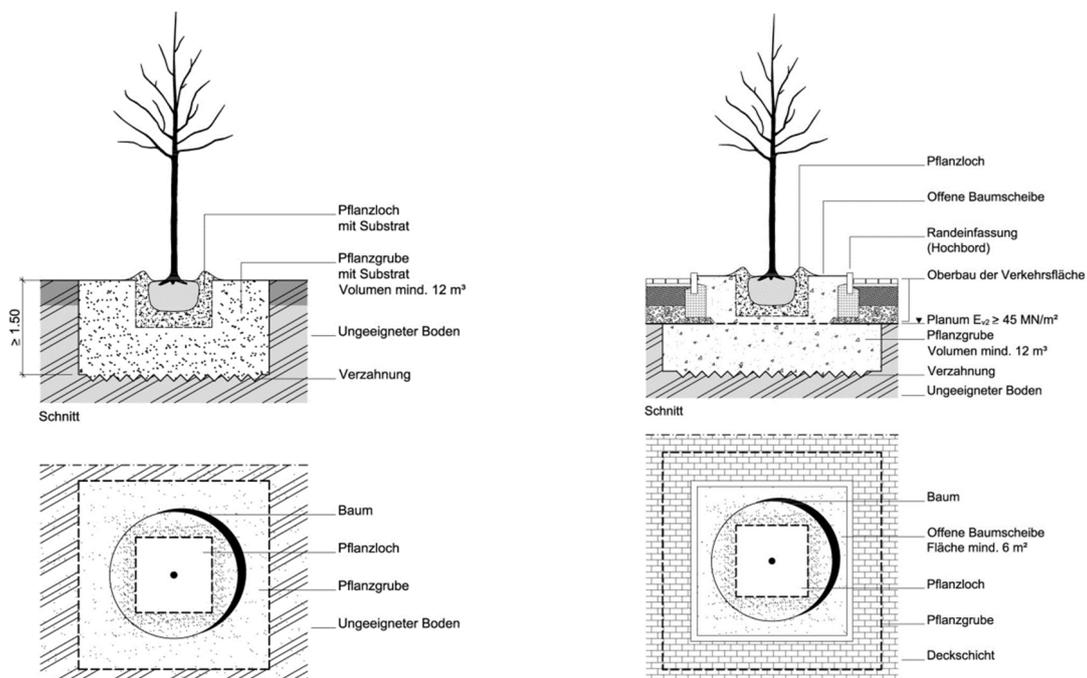
Flanagan et al. (2016) weisen aber darauf hin, dass gelöste Spurenstoffe und Feinstpartikel bei Tausalzeinfluss die Bodenfilter passieren können. Präferenzialer Fluss in konnektiven Makroporen sei eine der Ursachen. Auch ein unsachgemässer Einbau, z.B. bei verdichteten Zonen, ungleichen Schichtdicken usw. werden vermutet. In der Untersuchung von Pazeller et al. (2017) von SABAs zeigte sich bei Sandfiltern, dass die Infiltration mit den Jahren heterogener wird, obwohl diese nicht zu Struktur-bildung neigen.

In Bodenfiltern ist immer eine geschlossene Pflanzendecke mit Ansaat (Wiese, Gras) und/oder Bepflanzung vorzusehen, um Verschlämmung 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 verkürzen. Kleine und feine Wurzeln, wie jene von Gras, bilden keine stabilen präferenziellen Fliesswege aus. Eine tiefwurzelnde Bepflanzung muss von Beginn an gut geplant sein oder die Wurzeln beim Wachstum gelenkt werden (Kapitel 7.3, S. 40).

### 6.3. Substrate in Pflanzgruben

Ist an einem urbanen Standort eine Bepflanzung vorgesehen, sollen Pflanzsubstrate den Oberboden und mineralischen Unterboden nachahmen. Zusätzlich sollen grosse Baumscheiben, Tiefenbelüftung sowie ein ausgedehnter Wurzelraum bis unter Belagsflächen die Standorte begünstigen. Ein entsprechendes System heisst Pflanzgrube (Synonyme z.B. Baumrigole, Baumgrube, Versickerungsbeet, Mulden-Rigole). Wesentliche Elemente einer Pflanzgrube sind eine wasserdurchlässige Fläche (z.B. Baumscheibe), über die Wasser versickert wird, und die Pflanzgrube, welche einen temporären Wasserspeicher bildet und als Wurzelraum dient. Die Aufbauten werden teils mit Retentionsräumen (unterirdische Wanne, Schacht etc.) kombiniert, um noch mehr Wasser für Trockenperioden bereitzustellen.

Typische Bauweisen von Pflanzgruben in der Schweiz orientieren sich an den FLL-Empfehlungen (Abbildung 12, Abbildung 30, S. 74). Der Aufbau einer Pflanzgrube kann sich je nach Standort aber auch länderspezifisch unterscheiden.



**Abbildung 12:** Pflanzgrubenbauweise 1 und 2 für überbaubare Substrate A (links) und nicht überbaubare Substrate B (rechts) (FLL, 2010).

Das Niederschlagwasser kann punktuell über eingefasste Rinnen oder 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. Durch eine zielgerichtete Zuführung von Niederschlagswasser an Baumstandorte erhöhen sich die Vitalität und das Wachstum. Daher ist auch die Anschlussfläche zu maximieren und bepflanzte Oberfläche ist so anzulegen, dass das Niederschlagsabwasser zufließt (konkav). Vielmals wird aber bei Pflanzgruben aus gestalterischen Gründen eine gewölbte Substratoberfläche vorgesehen. Diese Ausführung ist zu vermeiden.

Um optimale Standortbedingungen für Bäume bereitzustellen, sind diese bevorzugt wie folgt zu dimensionieren, wobei die Anforderungen teils über die der FLL hinausgehen (Abbildung 12):

- Gesamte Pflanzgrube: > 24 m<sup>3</sup> Volumen, entspricht 2 – 4 m<sup>3</sup> Wasservorrat
- Direkter Wurzelraum (nicht überbaubares Substrat): > 3 m<sup>3</sup>, lose einzubauen, maximal mit Baggerschaufel andrücken
- Baumscheibe: > 6 m<sup>2</sup> Fläche, offen oder teildurchlässig
- Tiefe: > 1.5 m.

Als Faustregeln gilt, dass der Durchmesser Baumkrone dem Durchmesser des Wurzelraums entspricht und pro m<sup>2</sup> Kronenprojektionsfläche etwa 0.75 m<sup>3</sup> Wurzelraumvolumen anzustreben sind. Um optimale Standortbedingungen zu bieten, sollte sich die Grösse der Pflanzgrube primär an den Anforderungen der Bepflanzung orientieren.

Unter der Annahme, dass eine versickerungsfähige Baumscheibe von 6 m<sup>2</sup> Fläche mit Boden erstellt ist, können bis zu 30 m<sup>2</sup> Anschlussfläche ( $A_E:A_V < 5:1$ ) 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.

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.

Pflanzenkohle, roh oder konditioniert, wird in Einzelschichten (Sandwich), eingemischt in Substraten (5–30 Vol.-%), oder eingeschlämmt in grobes Material eingebaut. 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.

Baumrigolen lassen einen der Bodenpassage ebenbürtigen Rückhalt von 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 (s.u.).

#### 6.4. Pflanzgruben mit Behandlung

Entlang von vielbefahrenen Strassen wird bei der Planung von Pflanzgruben mit Substraten eher selten oder gar nicht die mögliche Belastung des Strassenabwassers berücksichtigt. Dies dürfte darauf zurückzuführen sein, dass bisher einerseits bevorzugt Platzflächen mit einer geringen Belastung des Niederschlagsabwassers begrünt wurden, sich kein expliziter Behandlungsbedarf ergab, und andererseits nicht alle Beteiligten über die mögliche Strassenabwasserbelastung und die damit verbundenen Anforderungen an den Grundwasserschutz informiert sind.

Für die meisten Pflanzsubstrate ist unklar, welche Fähigkeit vorliegt, eingetragene Schadstoffe zu filtern oder zu binden. In keiner etablierten Richtlinie wird darauf explizit eingegangen. In Baumgruben

mit nicht überbaubaren und überbaubaren Substraten A und B ist vermutlich auch deshalb die gezielte Versickerung von Überschusswasser nicht vorgesehen (FLL, 2010).

Für die Strassenentwässerung lassen sich Adsorbersubstrate (Synonym: Filtermaterial) mit Pflanzgruben vorzüglich kombinieren. So könnte eine Pflanzgrube, in der hoch belastetes Strassenabwasser versickert werden soll, als Versickerungsanlage mit integrierter oder vorgeschalteter Behandlungsanlage, ggf. mit Vorreinigung zur Abtrennung sedimentierbarer Partikel, ausgeführt werden (Tabelle 8).

Kompaktanlagen, Schacht- und Rinnenfiltersysteme können gelöste und partikuläre Schadstoffe entfernen (VSA 2019a). Ein unspezifischer, breiter Rückhalt bietet hohe Flexibilität für verschiedene Anwendungsbereiche. Für Behandlungssysteme, die zur Vorreinigung mit stärker belastetem Platz- und Strassenabwasser beschickt werden, ist festzulegen, welche Schadstoffe und Belastungshöhen entfernt werden sollen (Kap. 5.5). Die Entsorgung des mit Schadstoffen angereicherten Filtermaterials ist gemäss Abfallrecht (VVEA etc.) vorzunehmen. Materialien sind weniger ausgerichtet auf eine Bepflanzung.

Kompakte Behandlungssysteme, die auf wenig Raum die Schadstoffe stark akkumulieren und damit platzsparend das Niederschlagsabwasser reinigen, bieten beispielsweise Firmen wie ACO AG, CREABETON BAUSTOFF AG, 3P Technik Filtersysteme GmbH, Mall Umweltsysteme AG, REHAU Vertriebs AG und Funke Kunststoffe GmbH an. Der Einbau erfolgt oberirdisch oder unterirdisch. Die

Dimensionierung der Anlagen erfolgt über die mögliche Belastung auf der Anschlussfläche, woraus sich die theoretische Standzeit ergibt. Die Standzeit der Substrate sollte je nach Verkehrsbelastung und Menge auf > 10 Jahre ausgelegt sein. So überwacht die Firma Funke Kunststoffe an mehreren Standorten in Deutschland seit vielen Jahren die Akkumulation in Rinnenfiltern mit Adsorbersubstrat der Schwermetalle, PAK und GUS. Die Wirkungsgrade sind hoch und erreichen > 80 % Stoffrückhalt (mündliche Kommunikation, Rudolf Töws, Funke). Nachher lassen sich die Materialien aussaugen und durch neues Substrat rasch ersetzen.

Behandlungsanlagen mit technischen Filtermaterialien sind gemäss VSA (2019a, 2019b) gleichgestellt zur Bodenpassage mit entsprechendem Leistungsnachweis (Tabelle 8). Der Stoffrückhalt im Labortest und im Feld ist in drei Leistungsstufen eingeteilt. In der Schweiz läuft gegenwärtig eine Leistungsprüfung zur Beurteilung der Anforderungsstufen GUS, Metalle und Pestizide (Spurenstoffe)<sup>11</sup>. In Österreich gibt es ein vergleichbares Verfahren (ÖNORM B 2506 – 1, 2016; ÖNORM B 2506 – 2, 2012; ÖNORM B 2506 – 3, 2018).

**Tabelle 8:** Geforderte Wirkungsgrade für Adsorberanlagen, in denen technische Substrate als Filtermaterialien dienen und zur Behandlung von Platz- und Strassenabwasser geeignet sein können (VSA, 2019a).

Anforderung	Geforderte Wirkungsgrade		
	GUS	Metalle (Kupfer, Zink)	Pestizide (Mecoprop, Diuron)
Erhöht	≥ 90 %	≥ 90 %	≥ 90 %
Standard	≥ 80 %	≥ 70 %	≥ 70 %

<sup>11</sup> [https://www.umtec.ch/index.php?id=6652&L=0&content=20160&id\\_project=2912](https://www.umtec.ch/index.php?id=6652&L=0&content=20160&id_project=2912)

## 6.5. Fazit

### Versickerung und Behandlung

- Bei mittlerer und hoher Belastung sind Behandlungsanlagen auszuführen. Die Bodenpassage nach VSA stellt eine solche Behandlung oder Adsorberanlagen mit nachgewiesenem Wirkungsgrad dar.
- Bei kleinen Anschlussflächen, z.B. bei vielen Baumrigolen, bestimmen Starkregenereignisse das hydraulische Regime. Wird Niederschlagswasser von grösserer Anschlussfläche auf Versickerungsfläche konzentriert ( $\geq 5:1$ ), kann häufiger präferenzialer Fluss auftreten als Starkregen erwarten lässt.

### Bodenfilter

- Im Kanton Zürich zulässig ist die Versickerung von Platz- und Strassenabwasser mit Bodenpassage bis zu 14 000 DTV im Gewässerschutzbereich *Au* und uneingeschränkt im *üB*.
- Versickerungs-/Behandlungsanlagen sind mit Oberboden von  $S_{Spez}$  von 0.5 bis 2 L/(m<sup>2</sup> min), Untergrund von 1 bis 3 L/(m<sup>2</sup> min), sowie einen Grundwasserflurabstand  $\geq 1$  m auszuführen.
- Ob gelöste organische Spurenstoffe in Bodenfiltern zurückgehalten werden, ist unsicher. In der Schweiz fehlen für Behandlungsanlagen entsprechende Untersuchungsergebnisse. Die internationale Literatur stellt jedoch eine hohe Leistungsfähigkeit in Frage.
- Sand-/Splittfilter halten GUS (Mikroplastik), Schwermetalle, PAK und MKW nachweislich zurück. Deren Rückhaltewirkung auf Spurenstoffe ist unklar, weil Untersuchungsergebnisse fehlen.

### Pflanzgruben mit Substraten

- Pflanzgruben können nach FLL ausgeführt werden, schränken jedoch planerische Möglichkeiten ein.
- Internationale Beispiele zu Pflanzgruben und Substraten bieten neue Möglichkeiten entlang von Strassen. Es wird empfohlen, über die FLL Pflanzgrubenbauweisen hinauszugehen.
- FLL-Pflanzgruben sind nicht kongruent mit den Zielen des Gewässerschutzes, sofern sie entlang von Strassen mit mittlerer und hoher Belastung des Strassenabwassers gebaut werden.
- Gängige Substrate sind nicht auf den Rückhalt gelöster Stoffe ausgelegt, filtern aber GUS und daran gebundene Schadstoffe.
- Stark belastetes Strassenabwasser sollte vorerst nur in Pflanzgruben versickert werden, in denen keine tiefwurzelnde Vegetation angepflanzt wurde, bis zu deren Relevanz weitere Abklärungen erfolgt sind.
- Filtermaterialien eröffnen für Strassenabwasser neue Möglichkeiten, beispielsweise in Kombination mit herkömmlichen Pflanzgrubensubstraten. Adsorbersubstrate mit einem Wirkungsgrad für Schwermetalle und Pestizide  $> 70$  % ("Standard") sind für mittleres und  $> 90$  % ("Erhöht") für hohe Belastungen anzustreben.

### Tausalz

- Behandlungsanlagen können Chlorid nicht binden.
- Blau-grüne Infrastrukturen verlangen einen differenzierten, möglichst reduzierten Winterdienst, wie Vorrang von mechanischer Schneeräumung, Reduktion der Fahrgeschwindigkeit (den Strassenverhältnissen angepasstes Fahrverhalten) und Deponierung des mit Salz vermischten Schnees abseits von Bepflanzungen.

## 7. Vegetation

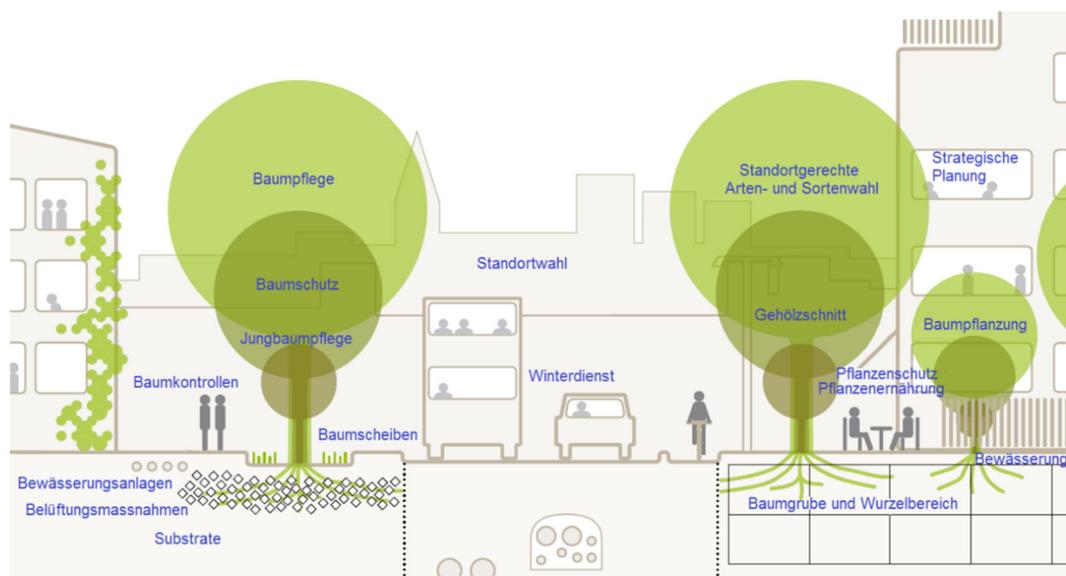
In der Stadt Zürich sind 22'200 Strassenbäume, 40'000 Bäume in Grünanlagen und 40'000 auf Privatgrund (Stand 2020) mit 255 Spezies gezählt worden, wobei Laubbäume an Strassen bestimmend sind (Schubert, 2021). Die Lebenserwartung und die Vitalität von Stadtbäumen können durch gezielte Massnahmen in verschiedenen Bereichen der Planungs-, Bau- und Pflegephase optimiert werden.

Durch eine gute Versorgung mit Wasser wird die Transpirationsleistung der Pflanzen erhöht. Zudem wird das Wachstum der Pflanzen gefördert, so dass der Kühleffekt durch die vergrösserte und vitale Blattoberfläche noch verstärkt werden dürfte.

Die Auswahl der Bepflanzung wird nach Standorteigenschaften, Wuchsneigung und erwartende Grösse, Widerstandsfähigkeit (Hitze, Wassermangel, Salz etc.) und Pflegeaufwand gewählt. Zu berücksichtigen sind jeweils der Abstand zu Gebäuden, Leitungen, Lichtprofil, Laubfall, etc. Sehr häufig werden die Bäume nach ihrer erwarteten Höhe selektiert (Baumordnung):

- 1. Ordnung: Grosse Bäume  $\geq 15$  m
- 2. Ordnung: Mittलगrosse Bäume  $\geq 10$  m
- 3. Ordnung: kleine Bäume und schmalkronige Formen  $\geq 6$  m

Durch ihre Schattenwirkung und die Verdunstungsleistung zeigen Bäume im Vergleich zu anderen Grünelementen den grössten Effekt auf die Reduktion von Hitzestress in Stadtgebieten. Die Bepflanzung ist aber gut auf die Standortbedingungen abzustimmen, um diese Ziele zu erreichen.



**Abbildung 13:** Relevante Bereiche in der Planungs-, Bau- und Pflegephase (Weiss, 2015).

### 7.1. Wasserhaushalt für Bepflanzungen

**Wasserangebot:** Die Wasserbilanz am jeweiligen Pflanzenstandort wird durch Interzeption (Direkter Wasserrückhalt der Vegetation), Transpiration (aktive Verdunstung der Pflanze) sowie Evaporation (Verdunstung von der Bodenoberfläche) beeinflusst. Die Transpiration beschreibt die Wasserabgabe über die Blätter der Pflanze. Wenn das Wasserpotenzial in der Wurzel unter das des umgebenden Bodens fällt, entsteht ein Wasserfluss von der Wurzel bis zu den Blättern.

Gemäss Literatur umfassen die Interzeption 20 – 40 % und die Transpiration 30 – 50 % des Niederschlags, sodass nur noch 30 – 60 % versickern. Nicht nur Bäume und Sträucher, sondern auch Bodenvegetation kann erheblich zur Gesamttranspiration beitragen. Eine offene Rasenfläche eines Sportplatzes verdunstet beispielsweise an einem heissen Sommertag ca. 4 L/m<sup>2</sup> d (ÖWAV, 2016).

In der Stadt Zürich beträgt der Flurabstand ca. 2 – 5 m (AWEL, 2021). Aus dem Grundwasser kann Wasser kapillar gegen die Schwerkraft aufsteigen. Nach Steinel et al. (2012) nutzen die Wurzeln von Bäumen das Sickerwasser und kapillar aufsteigende Wasser. Je nach Bodenart kann zwischen Grubensole und ca. 1 m unterhalb der Hauptwurzelraums noch genügend Wasser bereitstehen.

**Wasserbedarf:** Der Wasserbedarf der Vegetation wird durch die Pflanzenart, Grösse, Kronenprojektionsfläche, Standortbedingungen usw. beeinflusst. Da Stadtbäume eine gegenüber Waldbäumen 2- bis 3-mal höhere Transpirationsleistung zeigen, sofern genügend Wasser bereitsteht, benötigen sie täglich 2 – 5 L pro m<sup>2</sup> Kronenfläche (Fischer, 2021). Ein Baum mit 10 m Kronendurchmesser kann pro Tag 160 – 400 L transpirieren.

Neu gepflanzte Bäume brauchen nach der FLL-Empfehlung (2015) und DIN (DIN 18919:2018-12) regelmässige Wasserzugaben. So sollten Jungbäume im ersten Standjahr (April-September) zweimal pro Monat gewässert werden, bei trockenen Witterungsbedingungen sogar häufiger.

Bei Trockenheit können Pflanzen sich anpassen und schnell regenerieren, sobald wieder Wasser zur Verfügung steht (Allokation) (Dickhaut und Eschenbach, 2019; Larcher, 2001). Pflanzen aus gemässigten Klimazonen bilden während Trockenheit verstärkt Wurzeln aus, um neue Wasserressourcen zu erschliessen, und verringern die Sprossentwicklung. Arten aus arider Umgebung entwickeln das Wurzelwerk erst bei ausreichender Wasserversorgung weiter.

An vielen urbanen Standorten kann der Wasserbedarf nicht natürlicherweise gedeckt werden. Vor allem in heissen Sommern muss zusätzlich bewässert werden. Die Bewässerung für städtische Park- und Grünflächen kann zu einem monatlichen Bewässerungsbedarf von 20 – 100 L/m<sup>2</sup> und über die Vegetationsperiode von 390 L/m<sup>2</sup> führen (Tabelle 2) (ÖWAV, 2016). Hochstämme (Stammumfang 20 - 25 cm) benötigen in Abhängigkeit von der Baumart 100 bis 150 L pro Bewässerung. Als Richtwert gilt, dass pro m<sup>2</sup> Kronenprojektionsfläche 20 L Wasser pro Bewässerung benötigt werden (FLL, 2015).

Gezielte Bepflanzungskonzepte können das Feuchtigkeitsregime verbessern. Sinnvoll ist eine grosse Vielfalt unterschiedlicher Pflanzenarten und -typen, um die Widerstandsfähigkeit des Systems in nassen und trockenen Perioden zu gewährleisten. Die Pflanzen sollten möglichst dicht stehen und ein ausgedehntes, feines Wurzelsystem aufweisen (Payne et al., 2015).

**Tabelle 9:** Empfohlene Wassermengen pro Bewässerungsgang (Liter) pro Pflanzengrösse, Bodenart und Vegetationsform (DIN 18919:2018-12).

Pflanzengrösse	Wassermenge je Pflanze (Liter)	
	Sand, lehmiger Sand	sandiger Lehm, Lehm, Ton
Bodendecker, Stauden, Gräser	3	4
Sträucher, Jungpflanzen	15	20
Heister, Solitärsträucher < 175 cm	35	50
Hochstämme StU 10 – 18 cm, Solitärsträucher > 175 cm	80	120
Hochstämme StU 20 – 25 cm	100	150
Hochstämme StU 40 – 50 cm	200	300

## 7.2. Nährstoffbedarf

Anders als bei Pflanzen der Nahrungsmittelproduktion fehlen im urbanen Bereich Kenntnisse zum genauen Nährstoffbedarf (Schönfeld et al., 2015; Schönfeld 2017). Meist wird versucht, einen Zusammenhang zwischen Vitalität und Nährstoffangebot im Substrat abzuleiten (Klemisch, 2017).

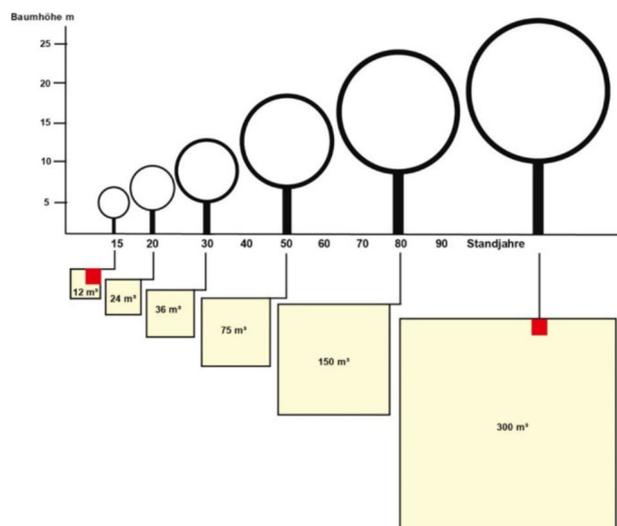
Ungeeignet ist, den Nährstoffbedarf aus landwirtschaftlichen Richtlinien für produktive Nutzpflanzen herzuleiten (Krieter und Malkus 1996; Schönfeld et al., 2015). Vergessen wird auch häufig, dass der Stickstoffeintrag durch die Luft in der Schweiz bei rund 19 kg/ha pro Jahr liegt und in Ballungsgebieten des Mittellands auf 54 kg N/ha ansteigt (Klaus, 2014). Jede entsprechende Klassifikation führt zwangsläufig zu einer Überdüngung, vor allem mit Stickstoff. Übermässiger Stickstoffeintrag führt zu flacheren Wurzeltellern, artenärmeren Unterwuchs und weniger widerstandsfähigen Bäumen (Fitze, 2014).

## 7.3. Wurzelwachstum und -lenkung

Nicht nur im Hinblick auf die Wasserversorgung, sondern auch bezogen auf Makroporen, die den präferenziellen Fluss begünstigen, ist das Wurzelwachstum und dessen Ausprägung auf Sickerflächen von Interesse. Bei Stauden, Sträuchern und Bäumen korreliert die Vegetationshöhe nicht mit der Wurzeltiefe, sondern eher mit der Wurzelmasse. Bäume mit tiefen und starken Wurzeln, sowie Pflanzen mit Pfahlwurzeln, sollten auf Sickerflächen, auf denen Niederschlagsabwasser mit mittleren und hohen Belastungen behandelt werden soll, nach heutigem Kenntnisstand vermieden werden.

Die Wurzeltiefen hängen von deren Alter, Standort sowie der Baumart ab. Einige Arten können beträchtliche Wurzeltiefen erreichen, z.B. Linde und Esche 1.5 m, Robinie und Eibe 3 m, Wachholder sogar 6 m (Jachomowski, o.J.). Dabei muss beachtet werden, dass die Wurzelausprägung an urbanen Standorten von der genetisch vorbestimmten abweichen kann (Streckenbach, 2009). Zudem ist an Strassenstandorten die ursprüngliche Unterteilung in Pfahl-, Herz- und Senkwurzeln nicht mehr deutlich (Malek et al. 1999).

Das Volumen an durchwurzelbarem Substrat in einer Pflanzgrube wird meistens über die Baumkronenfläche hergeleitet. Mit zunehmender Baumhöhe, bzw. Alter des Baums, nimmt der Anspruch an einen grösseren Wurzelraum kontinuierlich zu (Abbildung 14). Das Mindestvolumen gemäss FLL umfasst  $3 \text{ m}^3$  (ca.  $1.5 \times 1.5 \times 1.5 \text{ m}$ ) und der gesamte Wurzelraum sollte  $> 12 \text{ m}^3$  Volumen bieten (FLL, 2010). In der Stadt Basel wird, sofern möglich, der durchwurzelbare Raum sogar auf  $60 \text{ m}^3$  vergrössert (Ramin und Sonderegger, 2017). Ist zu wenig Wurzelraum vorhanden, schaffen sich Bäume diesen auf der Suche nach Nährstoffen, Sauerstoff und Wasser unter dem Belag oder in Leitungen.

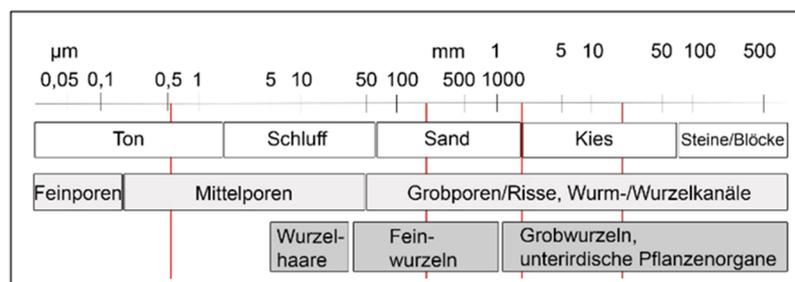


**Abbildung 14:** Bedarf an Wurzelraum in Verhältnis zu Baumhöhe und dem Alter des Baums (FLL, 2010).

Die Baumscheibe als offene Fläche oder mit luft-/wasserdurchlässigem Belag sollte mindestens 6 m<sup>2</sup> gross sein (FLL, 2010). Anzustreben ist sogar 24 m<sup>2</sup> offene Bodenfläche bereitzustellen. Als Faustformel für die Flächenausdehnung gilt, dass der Durchmesser der erwarteten Baumkrone dem Durchmesser des Wurzelraums entsprechen sollte.

Für das Wurzelwachstum sind sowohl Mittelporen zur Wasser- und Nährstoffversorgung als auch Grobporen zur Sauerstoffversorgung förderlich (Abbildung 15). Baumwurzeln erschliessen hauptsächlich Grobporen (Stengel, 2016).

Dem Traufbereich, der peripheren Zone des Wurzelraums, wird selten Beachtung geschenkt. Dort sammelt sich das meiste Wasser, entsprechend sind die meisten Nährstoffe und ein Grossteil der Feinwurzeln in diesem Bereich. Die Städte Zürich und Basel versuchen daher, durchgehende Grünstreifen zum Schutz dieser Bereiche zu etablieren, doch ist die Durchsetzung planerisch schwer möglich (Bosshard, 2016; Ramin und Sonderegger, 2017).



**Abbildung 15:** Wurzel- und Porendurchmesser im Bezug zu Porendurchmesser in Böden (Stengel, 2016).

**Aktive Wurzellenkung:** Gemäss Balder (1998) entwickeln die Bäume standortangepasst ihre Wurzeln. Bei knapper Versorgung erweitern Bäume ihren Wurzelraum mit Primär- und Suchwurzeln aktiv. Daraus entstehen Schäden durch Wurzeleinwuchs in Leitungen.

Mit geeigneten Substraten lassen sich die Wurzeln aktiv lenken, Korridore unter Leitungen, Koffierungen und Foundationen (Unterbau) bauen. Die Korridore können auch als entwässerndes Element eingeplant werden. Pflanzenkohle kann als wasserspeichernde und adsorptionsfähige Komponente das Wurzelwachstum zusätzlich steuern.

Solche Korridore sind zu planen, zu vernetzen, um die Ausbildung eines symmetrischen Wurzelwerks zu gewährleisten. Ein Vorteil von Korridoren ist die Möglichkeit ihrer unterirdischen Vernetzung, sowohl bei Neuanlagen als auch Standortsanierungen. So können die Bäume die wichtige Wurzelkommunikation ausüben. Bei richtiger Ausführung wirken die Korridore nicht als Kapillarsperre.

Durch die aktive Wurzellenkung werden Schäden an Leitungen nachweislich vermieden. Zum zusätzlichen Schutz von Werkleitungen werden weitere gängige Massnahmen empfohlen, wie Wurzelschutzmatten o.ä. Eine Übersicht zu schadenreduzierenden Massnahmen bieten Costello und Jones (2003).

Grobporeige Substrate in der Stadt Stockholm zeigten, dass die Wachstumszunahme von Baumkronen und Feinwurzeln bereits nach einem Jahr nachweisbar sind (Abbildung 16). Der Einbau erfolgte in Korridoren im Strassenunterbau und unter Gehwegen. Wesentliches Merkmal ist die geringere Lagerungsdichte als im benachbarten Material der Foundationsschicht. Die Grobporen suggerieren der Wurzelhaube einen durchwurzelbaren Raum. Dies ist mit der Durchwurzelung von Leitungen und

Leitungsgräben zu vergleichen (Heidger, 2002). Die Wurzel wächst in die vorgesehenen Korridore und findet aufgrund der Grobporen, auch der Pflanzenkohle, genügend Luft, Wasser und Nährstoffe vor.

Die wurzelnackten Bäume durchwurzeln das Substrat sofort nach der Pflanzung, während die Bäume mit Resten von Lehm einen Nährstoff- und Körnungsbruch zu überwinden hatten. Daher wäre entgegen der etablierten Praxis eher zu empfehlen, die Anzucht ausschliesslich in nicht überbaubaren Pflanzsubstraten vorzunehmen, die auch später in den Gruben verwendet werden.

Das Wurzelwerk, der Stamm und die Krone können durch Bautätigkeiten geschädigt werden. Werden im Rahmen vom Leitungsbau Wurzelkorridore mit eingeplant, entsteht ein neues Verständnis zur Wichtigkeit solche Konzepte und erhöht die Vitalität der Bäume.

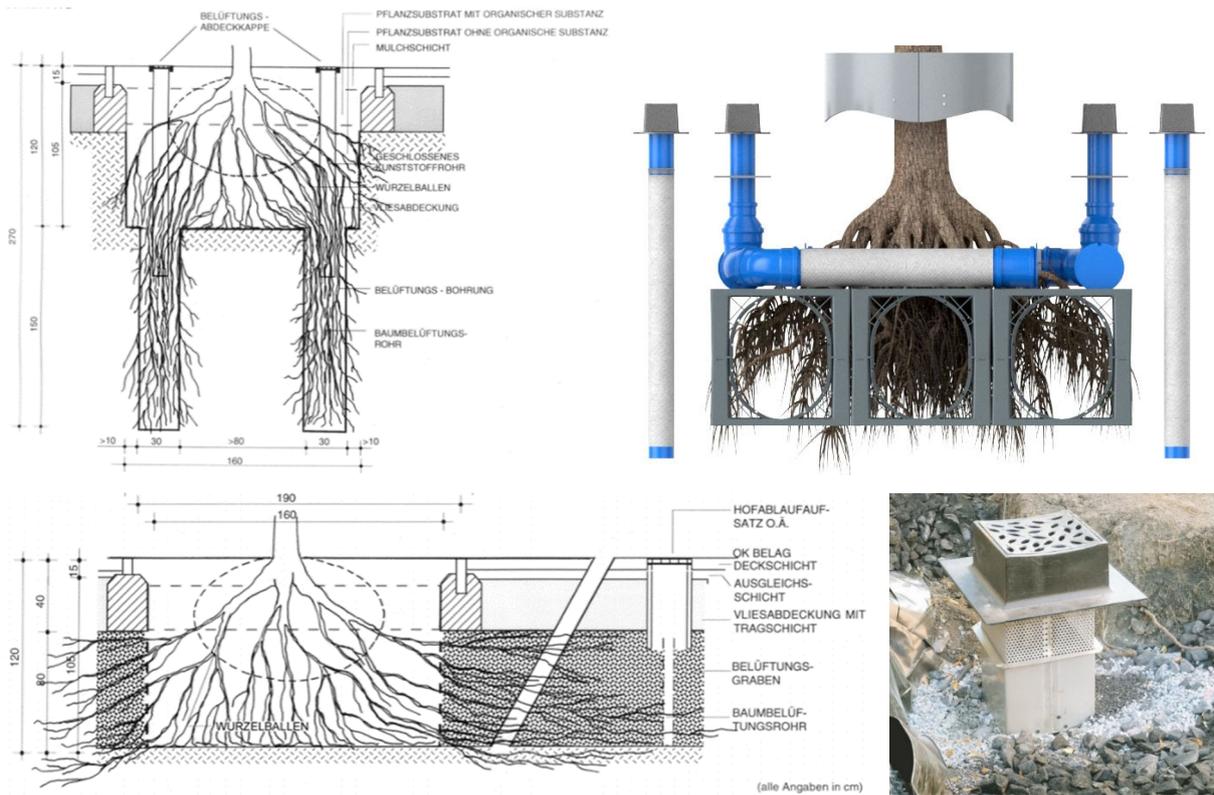
Wurzelapplikationen von Pflanzenkohle oder in die künftige Wurzelzone regt zunächst das Feinwurzelwachstum an. Die Applikation kann auch ringförmig um den Wurzelballen erfolgen. Dafür ist nicht nur die Wasserspeicherfähigkeit verantwortlich, sondern auch die in der konditionierten Kohle enthaltenen Nährstoffe, ggf. auch Mikroorganismen.



**Abbildung 16:** Aktive Wurzellenkung durch Pflanzenkohle nach asymmetrischem Einbau (Saluz, 2017).

**Wurzelbelüftung:** Aktive technische Belüftungsmassnahmen sind eine weitere Strategie, den Baumstandort zu verbessern und Wurzelwachstum zu beeinflussen. Unter Verkehrsflächen angrenzend an Pflanzgruben werden Belüftungsrohre (DN 100) bis 2/3 der Grubentiefe empfohlen (Abbildung 17) (FLL, 2010). Dadurch entstehen voraussehbare Wurzelkorridore, weil der Luftaustausch die Wurzeln dorthin lenkt. Sind die Baumscheibenflächen  $< 6 \text{ m}^2$ , wird gemäss FLL eine Tiefenbelüftung empfohlen. Typische Ausführungen sind Belüftungsrohre, wie sie in Zürich am Sechseläuten-Platz eingebaut wurden (Abbildung 17). Die Tiefenbelüftung erschliesst dem Baum zusätzlichen Wurzelraum, der aufgrund der Verdichtung oder des geringen Gasaustauschs weniger zugänglich wäre. Die Belüftungsrohre lassen sich teils auch zur Unterflurbewässerung nutzen.

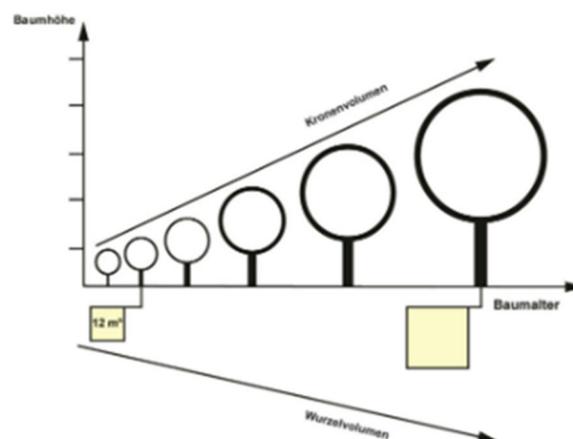
Im Stockholmer Pflanzgruben-Konzept werden vergleichsweise grosse Belüftungs- und Einlaufschächte eingesetzt, die befahrbar und gut kontrollierbar, bzw. zu unterhalten, sind. Dadurch ist der Zulauf von Oberflächenwasser über eine grosse Anschlussfläche sichergestellt.



**Abbildung 17:** Aktive Tiefenbelüftungsmassnahmen gemäss FLL-Empfehlung (links oben, links unten), für Pflanzgruben (rechts oben) und Belüftungsbewässerungsschacht für das Stockholmer-Konzept (rechts unten<sup>12</sup>).

#### 7.4. Vegetationshöhe

Die Verkehrssicherheit beginnt bei der Entwurfs- und Ausführungsplanung von Bäumen. In diesen Phasen müssen alle technischen und funktionalen Belange berücksichtigt werden. Dazu zählt auch die Entscheidung, welche Bereiche mit Strassenbäumen bepflanzt oder nicht-bepflanzt werden. Massgebliche Faktoren sind die Nutzung der Verkehrsfläche, Breite des Verkehrsraums, Verkehrssicherheit und Sichtachsen und die Art und Gestaltung des baulichen Umfeldes. Lichtsignale, Kreuzungen und Verkehrszeichen müssen frei sichtbar bleiben und dürfen von den Bäumen nicht verdeckt werden. Um dies zu verhindern, muss der jährliche Zuwachs des Baumes berücksichtigt werden (Abbildung 18).



**Abbildung 18:** Schematisch dargestellte Entwicklung von Kronen- und Wurzelvolumen über die Zeit (FLL, 2010).

<sup>12</sup> <https://stadtundgruen.de/artikel/strassenbaeume-als-komponente-der-ueberflutung-und-hitzevorsorge-in-staedten-10881.html>

Aus diesem Grund werden jährlich Pflegemassnahmen für einen Lichtraumprofilsschnitt durchgeführt. Können die Bäume in diesem Bereich nicht aufgeastet werden, muss der Pflanzabstand vergrössert werden. Nach FLL handelt sich beim Lichtraum um den Raum des Strassenquerschnitts, der von festen Hindernissen freizuhalten ist (FLL, 2020).

Für den Verkehr sind als lichter Raum nach FLL-Richtlinien bis 4.50 m über der Fahrbahn und 2.50 m über dem Radweg einzuhalten (FLL, 2015). Gemäss § 20 Verkehrserschliessungsverordnung beträgt das Lichtraumprofil im Fahrbahngebiet 4.50 m und 2.65 m im Bereich von Trottoirs, Fuss- und Velowegen. Die bodennahe Vegetation im Strassenraum darf 80 cm Höhe nicht überschreiten, was die Verwendung von Strauchgehölzen verhindert. Die Vegetation für ein strassennahes Schwammstadt-Prinzip sollte demnach aus Bäumen mit einem Kronenansatz > 4.50 m und Kleingehölzen oder Stauden, welche die Höhe von 80 cm nicht überschreiten, bestehen. Für Bäume bis 15 m Höhe wird Innerorts 1 m Abstand von der Strasse empfohlen, bei noch grösseren mindestens 2 m (SN 640 677, 2000). Eine Auswahl wird nachgehend beschrieben.

In regelmässigen Zeitabständen sind Baumkontrollen durch fachlich qualifizierte Personen durchzuführen. Je nach Situation werden die Bäume entweder häufiger kontrolliert, benötigen eine baumpflegerische Massnahme oder werden gefällt. Mit dem zunehmenden Alter des Baumes erhöht sich auch die Gefährdung der Verkehrssicherheit. Doch nicht nur das Alter des Baumes fördert die Totholz-bildung, auch Holzfäule, Lichtmangel, Wassermangel etc. sind dafür Ursache. Die Baumkontrollrichtlinie (FLL, 2020) kann für das genaue Vorgehen beigezogen werden.

## 7.5. Bepflanzung von Bodenfiltern mit temporärem Wassereinstau

Versickerungsflächen müssen in der Lage sein, auch das Wasser ihrer Anschlussflächen aufzunehmen. Je nach Niederschlagsereignis kann es dabei zu temporärem Wassereinstau kommen. Die Bedingungen variieren über die Zeit und auch innerhalb der Fläche.

Bei gezielter Überflutung einer Fläche wird von einer maximalen Einstauhöhe von 30 cm und einer Einstaudauer von maximal 24 Stunden ausgegangen. Unter diesen Bedingungen besteht für gesunde Bäume ein geringes Schädigungsrisiko infolge Einstau. Sollten Bäume durch weitere Stressfaktoren (Auftausalze, Trockenstress, Schadstoffe, hohes Alter, Vorschädigungen) geschwächt sein, reagieren sie auch auf Wassereinstau empfindlicher.

Die VSA-Richtlinie empfiehlt keine Bepflanzung von Versickerungsmulden bzw. -anlagen mit Gehölzen (VSA, 2019a). Diese Planungsempfehlung basiert auf Bedenken hinsichtlich der Risiken für den Grundwasserschutz durch präferenziellen Fluss, einer unerwünschten Verdichtung des Untergrunds durch Wurzeln oder einer möglichen Beeinträchtigung der Filterstabilität.

**Bepflanzungskonzept:** In Bodenfiltern herrschen unterschiedliche Umweltbedingungen, die von der Lichtverfügbarkeit, Neigung, Hydrologie, Wassermenge etc. abhängen. Sinnvoll ist daher die Einteilung der Bepflanzung in Nischen (Philadelphia Water Departement, 2018):

- Einfluss-Zone: Direkter Einfluss von Niederschlagsabwasser Pflanzen
- Obere Zone: Eher trocken, oberhalb des Wassereinstaus
- Tiefste Zone: Wechselfeucht, staunäsetolerante Pflanzen.

Für jede Nische können unterschiedliche Arten ausgewählt und kombiniert werden. Dabei ist vor allem der Bereich, an dem das Niederschlagsabwasser in die Anlage fliesst, zu beachten, denn hier treten in der Regel die höchste Fliessgeschwindigkeit, die grösste Wassermenge sowie hohe Konzentrationen von Sedimenten und Schadstoffen auf. Daher ist es wichtig, langlebige Arten, z.B. Gräser mit starken Strukturen und Wurzelsystemen, auszuwählen. Darüber hinaus fallen dort oftmals die meisten Unterhaltsarbeiten an, weshalb es wichtig ist, robuste Pflanzen auszuwählen.

**Bäume in Mulden:** Eine Bepflanzung von Mulden mit Bäumen ordnet das DWA Arbeitsblatt A 138-1 neu ein (Gelbdruck DWA-A 138-1, 2020). Darin wird explizit auf die Möglichkeit einer Bepflanzung hingewiesen, weil die langjährigen Erfahrungen mit solchen Ausführungen in der Praxis positiv waren (z.B. in Berlin über 10 -15 Jahre; Vitalität, Stammumfang, Wuchshöhe etc.) und blau-grüne Elemente neue Konzepte verlangen (Rehfeld-Klein et al., 2021).

Generell ist eine standortgerechte Bepflanzung von Versickerungsmulden mit Stauden, Gräsern und Bodendeckern sehr zu empfehlen, ohne das nach heutigem Wissensstand die Sicker- und Reinigungsleistung massgeblich eingeschränkt wird. Eppel-Hotz (2019) zeigte sogar, dass bepflanzte Mulden eine grössere Versickerungsleistung aufweisen als mit Rasen oder Stauden bepflanzte Muldenvarianten. Um den Pflegeaufwand möglichst gering zu halten, werden > 20 cm Vegetationstragschicht aus Oberboden und eine zusätzliche Schicht aus wasserdurchlässigen Materialien wie Sand, Kies oder Schotter empfohlen.

Bäume können mit den Standortbedingungen gut umgehen, flachwurzelnde sind aber zu bevorzugen, um präferenzielle Fliesswege und Stoffeinträge entlang abgestorbener Wurzeln ins Grundwasser zu vermeiden. Durch Wurzellenkung lassen sich auch Erdhebungen reduzieren. Ziel muss sein, dass sich die Bäume schnell am Standort adaptieren und nachfolgend gleichmässig wachsen, ohne dass die Funktion der Mulden beeinträchtigt wird. Dies setzt voraus, dass die Ansprüche der jeweiligen Baumart erfüllt sind und genügend ober- und unterirdischer Wuchsraum für die gesamte Standzeit der Bäume zur Verfügung steht. Sind Geotextilien eingesetzt, kann nur Rasen eingesetzt werden.

In Berlin sind für Baumpflanzungen in Mulden, in denen der Oberbodenschicht bis zum Stamm des Baums ausgebildet und bewachsen sein muss, sechs Prüfaspekte definiert worden (Senatsverwaltung, 2021; Rehfeld-Klein, 2021):

- Bei vereinfachter Dimensionierung des Retentionsvolumens ist vorsorglich ein Bemessungszuschlag von generell 1.2 einzuhalten, weil durch den Baumdurchmesser das effektive Einstauvolumen sinkt.
- Die Muldengrösse für eine Bepflanzung mit einem Baum beträgt mindestens 20 m<sup>2</sup>.
- In schmalen Muldensystemen (0.8 - 1.5 m Muldensohle) darf der Stammdurchmesser nach 70 Jahren (in 1 m Höhe) maximal 50 % der Breite der Muldensohle betragen.
- Der Mindestabstand zwischen den Kronen benachbarter Bäume beträgt 5 m. Der Abstand zwischen den Bäumen darf die Hälfte des maximal möglichen Kronendurchmessers, gemessen am äusseren Rand, nicht unterschreiten.
- Zwischen Mulden-Rigolen oder Mulden-Rigolen-Systemen und Baum ist ein Abstand eines halben maximalen Kronendurchmessers einzuhalten, jedoch mindestens 2.50 m.
- Bei Mulden mit Streusalzeinsatz im Einzugsgebiet ist eine Bepflanzung mit Bäumen nicht zulässig. Dies betrifft u.a. Haltestellen des öffentlichen Nahverkehrs und Kreuzungsbereiche der Strassen mit höherem Verkehrsaufkommen.

Nicht alle Kriterien sind schon auf deren Notwendigkeit und Absolutheit eruiert. Aufgrund der bisher vorliegenden Erfahrungswerte wird empfohlen, Baumpflanzungen in Mulden unter Einbezug der obenstehenden Prüfaspekte verstärkt vorzusehen. In der Planung können die von Balder et al. (2018) dokumentierten Erfahrungen zu Unterhalt, Wurzelentwicklung, Sortenwahl etc. einbezogen werden. Dabei bietet sich an, zunächst in Pilotanwendungen zu starten, um Chancen und Probleme zu erfassen.

## 7.6. Potentiell geeignete Bepflanzungen für Bodenfilter

**Lebensbereich "Auen- und Ufergehölze":** Diese Arten aus potenziellen Überschwemmungsbereichen nach Kiermeier (1995) haben eine breite Standorttoleranz, wachsen auf vielen Substraten, nährstoffreichen Böden, bei periodischen Überflutungen und temporärer Trockenheit, und, je nach Art, auch bei hoher UV-Strahlung oder Übersättigung. Einige Arten finden sich auch im Lebensbereich 9 "Gehölze der Hecken und Strauchflächen".

- **Sonnig/hitzeverträglich:** *Alnus incana* 2242, *Betula nigra* 2132, *Fraxinus excelsior* 2421, *Fraxinus tomentosa* (viele Unterarten) 2112, *Taxodium distichum* 2121, *Menispermum canadense* 2129, *Rosa roxburghii* 2424 (viele Unterarten), *Rhamnus carolinianus* 2224, *Hamamelis vernalis* 2225, *Wisteria macrostachya* 2229 (viele Unterarten), *Liquidambar styraciflua* 2312, *Arundinaria simonii* 2314, *Liriodendron tulipifera* 2322, *Quercus palustris* (viele Unterarten) 2322, *Acer saccharinum* 2331, *Malus sp.* 2333 (viele Unterarten), *Amelanchier arborea* 2333, *Vitis vinifera* 2429 (viele Unterarten), *Parthenocissus inserta* 2439, *Philadelphus incanus* 2525 (Unterarten), *Populus alba* 2421, *Populus nigra* 2431, *Salix alba* 2231
- **Halbschattig/schattig:** *Hydrangea panicum* 2155, *Rubus parviflorus* 2155, *Sasa tessellata* 2156, *Viburnum dentatum* 2165, *Prunus padus* 2244 (viele Unterarten), *Holodiscus discolor* 2245, *Clematis virginiana* 2459 (viele Unterarten), *Rhus verniciflua* 2554 (viele Unterarten)

**Lebensbereich "Freifläche, Steppenheide etc.":** Mögliche Arten finden sich in den Lebensbereichen Freifläche, Steppenheide, Steinfläche, Felssteppe oder Freifläche mit Heidecharakter, wobei diese eine grosse Feuchtigkeitstoleranz in den Mulden haben sollten (Eppel-Hotz, 2019):

- **Wechselfeuchte Bereiche:** *Geranium sanguineum*, *Veronica teucrium*, *Sporobolus heteroleosus*, *Molinia caerulea*, *Iris sibirica*, *Archillea millefolium*, *Calamagrostis arundinacea* var. *Brachytricha*, *Inula ensifolia* `Compacta`, *Anemone sylvestris*, *Euphorbia sequieriana* subsp. *niciana*, *Liatris spicata*, *Solidago caesia*, *Teucrium chamaedrys*.
- **Trockene Bereiche:** *Aronia melanocarpa*, *Achillea filipendula*, *Panicum virgatum*, *Iris spuria*.
- **Gehölze am Rand:** *Halimodendron halodendron*, *Potentilla fruticosa*, *Cytisus nigricans*.

**Sumpfpflanzen:** Dobler und Holthuis (2007) weisen darauf hin, dass Helophyten sich gut für die Bepflanzung von Bodenfiltern eignen. Tabelle 10 zeigt Spezies, die für Pflanzenfilter geeignet sind und eine gewisse Toleranz gegen Schadstoffe mitbringen sollen. Diese Sumpfpflanzen vertragen zeitweise überstaute Flächen sowie Lebensräume mit wenig Sauerstoff. Aus der Liste werden als besonders geeignet folgende Arten empfohlen: *Phalaris arundinacea*, *Juncus effusus*, *Lythrum salicaria*, *Epilobium hirsutum*, *Iris pseudacorus*, *Typha latifolia*, *Alnus glutinosa*.

**Tabelle 10:** Pflanzenauswahl für Bodenfilter nach Dobler & Holthuis (2007).

Gattung	Art	Name	Grösse	Vorkommen
<i>Acorus</i>	<i>calamus</i>	Kalamus	0.6 - 1.2 m	Ufer, Gräben
<i>Alnus</i>	<i>glutinosa</i>	Schwarzerle	Baum	Flussufer, Bruchwälder
<i>Carex</i>	<i>acuta</i>	Schlanke Segge	0.3 – 1.5 m	Ufer, Sumpfwiesen
<i>Carex</i>	<i>aquatilis</i>	Wasser-Segge	0.3 – 0.9 m	Ufer, Sumpfwiesen
<i>Cladium</i>	<i>mariscus</i>	Schneide	0.8 – 2.0 m	Sümpfe, Moore, kalkliebend
<i>Epilobium</i>	<i>hirsutum</i>	-Z. Weidenröschen	0.5 – 1.5 m	Ufer, nasse Wiesen
<i>Eupatorium</i>	<i>cannabium</i>	Wasserdost	0.5 – 1.5 m	Feuchte Stellen, Gräben
<i>Helianthus</i>	<i>tuberosus</i>	Topinambur	1.5 – 2.0 m	Feuchte Wiesen, Schutt
<i>Iris</i>	<i>pseudacorus</i>	Gelbe Schwertlilie	0.5 – 1.0 m	Röhrichte, Ufer, Gräben
<i>Juncus</i>	<i>effusus</i>	Flatterbinse	0.3 – 0.8 m	Nasse Wiese
<i>Juncus</i>	<i>inflexus</i>	Blaugrüne Binse	0.3 – 0.6 m	Feuchte, sandige Böden
<i>Lythrum</i>	<i>salicaria</i>	Blut-Weiderich	0.5 – 1.2 m	Ufer, nasse Wiesen
<i>Phalaris</i>	<i>arundinacea</i>	Rohrglanzgras	0.5 – 1.5 m	Ufer, nasse Wiesen
<i>Phragmites</i>	<i>australis</i>	Schilf	2.0 – 4.0 m	Ufer von Flüssen und Seen
<i>Salix</i>	<i>alba</i>	Silberweide	Baum	Ufer, Wiesen
<i>Salix</i>	<i>viminalis</i>	Korbweide	Strauch	Ufer
<i>Typha</i>	<i>augustifolia</i>	schmalbl. Rohrkolben	1.0 - 2.0 m	Röhrichtzone
<i>Typha</i>	<i>latifolia</i>	breitbl. Rohrkolben	1.0 - 2.0 m	Verlandungszone

**Flachwurzler:** Geringe Wurzeltiefen schränken präferenzielles Fließen im Boden ein. Daher ist diese Vegetation sehr vorteilhaft für Bodenfilter. Hierbei muss aber bedacht werden, dass die effektive Wurzelansatztiefe wesentlich durch die Standortbedingungen bestimmt ist. Bei Muldensystemen mit unterirdischem Zwischenspeicher (Rigolen) werden nur Flachwurzler empfohlen.

Zu den klassischen Flachwurzlern gehören (Monning, 2018): Weiden, Erlen, Hainbuchen, Zypresse, Birken, Ahorn, Schwarzerle, Esche, Traubenkirsche, Akebie, Felsenbirne, Trompetenblume, Judasbaum, Kornelkirsche, Holunder, Zaubernuss, Hortensie, Liguster, Heckenkirsche, Magnolie, Pfeifenstrauch, Schlehe sowie viele Obstbäume (*Malus sp.*).

Baumschule Lorenz von Ehren (2020) empfiehlt:

- Flachwurzler mit weit verzweigten Feinwurzeln: *Acer buergerianum*
- Flache Wurzeln, Stickstoffsammler, stadtklimafest: *Cercis siliquastrum*
- Unempfindliches Wurzelsystem, flach bis mässig tief: *Gleditsia triacanthos*
- Flachwurzler: *Parrotia Persica*
- Flachwurzler, anpassungsfähig an Boden: *Acer cappadocicum `Rubrum`*

**Pflanzenkläranlagen:** Von Stollhoff (2009) werden zur Umsetzung ökologischer Abwasserkonzepte folgende Pflanzen empfohlen: *Phragmites australis*, *Thypha latifolia*, *Thypha angustifolia*, *Carex spec.*, *Acorus calamus*, *Filipendula ulmaria*, *Caltha palustris*, *Sparganium erectum*.

**Sumpfpflanzendächer:** Häufig empfohlene Arten für Sumpfpflanzendächer sind (Zehnsdorf, 2019): *Carex acutiformis*, *Carex panicea*, *Carex vulpina*, *Glechoma hederacea*, *Juncus effusus*, *Myosotis palustris*, *Potentilla anserina*, *Scirpus lacustris*, *Caltha palustris*, *Geum rivale*, *Mentha aquatica*, *Fritillaria meleagris*, *Valeriana officinalis*, *Filipendula ulmaris*, *Gratiola officinalis*, *Lysimachia nummularia*, *Mimulus sp.*, *Polygonum bistorta*, *Scirpus sylvaticus*, *Typha minima*, *Ranunculus flammula*.

**Phytosanierung:** Zu den Baumarten, die typischerweise für die Phytosanierung verwendet werden, gehören Weiden, Pappeln (Pappelhybriden) oder Maulbeerbäume, da sie über ein tiefes Wurzelsystem, schnelles Wachstum und eine hohe Feuchtigkeitstoleranz verfügen, und in der Lage sind, die Verlagerung von Schadstoffen zu kontrollieren, indem sie grosse Mengen Wasser verbrauchen (Metro, 2002; Puckette, 2001). Arten wie *Gingko biloba*, *Gleditsia triacanthos*, *Liquidambar styraciflua*, *Liriodendron tulipifera*, *Sophora japonica* oder *Carpinus betulus* sind neben Weidenarten auch resistent gegenüber Schwermetallen.

Mögliche Arten vom Philadelphia Water Departement (2018):

- **Bäume:** *Amelanchier canadensis*, *Cercis canadensis*, *Crataegus viridis*, *Prunus maackii*  
Sträucher: *Cornus sericea*, *Clethra alnifolia*, *Aronia arbutifolia* `Brilliantissima`, *Hamamelis virginiana*, *Juniperus virginiana*, *Rosa carolina*, *Virburnum lantana*
- **Gräser:** *Panicum virgatum* `Shenandoah`, *Juncus effusus*, *Carex pensylvanica*  
Stauden: *Echinacea purpureum*, *Solidago rugosa* `Fireworks`, *Veronica spicata*, *Coreopsis lanceolata*, *Crocus vernus*, *Helleborus niger*, *Narcissus minor*

Weitere Pflanzenarten von Fairfax County, Virginia (2007): *Carex stricta*, *Elymus riparus*, *Juncus effusus*, *Aruncus dioicus*, *Aster laevis*, *Eupatorium fistulosum*, *Geranium maculatum*, *Myosotis laxa*, *Phlox stolonifera*, *Rudbeckia hirta*, *Alnus serrulata*, *Aronia sp.*, *Callicarpa americana*, *Gaylussacia baccata*, *Hydrangea arborescens*, *Ilex glabra*, *Rhododendron viscosum*, *Rosa palustris*, *Sambucus canadensis*, *Rhus sp.*, *Vaccinium sp.*, *Viburnum prunifolium*, *Acer rubrum*, *Amelanchia arborea*, *Betula nigra*, *Carpinus caroliniana*, *Celtis occidentalis*, *Fraxinus pennsylvanica*, *Hamamelis virginiana*, *Ilex opaca*, *Liquidambar styraciflua*, *Magnolia virginiana*, *Platanus occidentalis*, *Populus deltoides*

## 7.7. Bepflanzung im Strassenbereich mit Salzbelastung

Ähnlich wie beim temporären Wassereinstau variiert auch die Salzeempfindlichkeit je nach Pflanzenart. Dass vor der einsetzenden Vegetationsperiode ausgebrachte Tausalz ist für Pflanzen noch relativ unbedenklich, da sich deren Wurzeln noch in einer Ruhephase befinden und bis zum Frühjahr das Salz oft ausgewaschen ist. Dagegen kann die Spätwinterstreuung erhebliche Schäden verursachen.

Für die Vegetation und den Nährstoffhaushalt kann der Salzeintrag entlang von Gehwegen, Plätzen und Strassen relevant sein. Gewisse Pflanzen reagieren sehr empfindlich auf geringste Salzmengen (Zuber, 2013). Im schlimmsten Fall sterben Wurzelspitzen ab und die Neubildung von Feinwurzeln oder Mykorrhiza bleibt ungenügend.

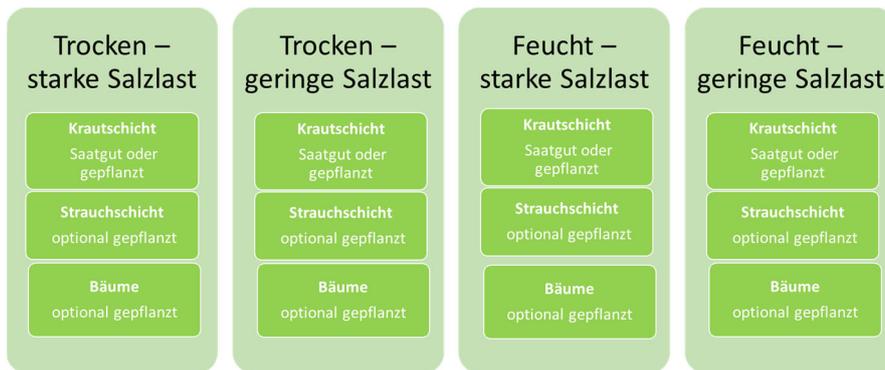
Die aufgenommenen Ionen gelangen über den Wasserfluss in Krone und Blätter (Zuber, 2013; Kadereit et al., 2014). Dieser Effekt ist vor allem bei Trockenheit und verdichteten Böden zu erwarten. Als Schutz verringern die Bäume ihre Photosyntheseleistung und produzieren kleinere Blattflächen (Gillner et al., 2017). Die gehemmten Stoffwechselforgänge schlagen sich in einer geringeren Verdunstungsleistung der Blätter nieder, die zur Blattwelke, einem frühzeitigen Blattabwurf im Sommer oder Kleinblättrigkeit führt. Durch das Salz sterben nicht nur junge Triebe und Knospen ab, sondern Chlorid beschleunigt auch den Abbau von Chlorophyll, wodurch die Blätter vergilben (Chlorose) (Zuber; 2013). Zudem wird der Kalium-Gehalt durch hohe Natrium-Konzentrationen beeinträchtigt, da diese miteinander konkurrieren. Das reduzierte Zellteilungswachstum führt zur Bildung schmalerer Jahrringe. Zu weiteren sichtbaren Schädigungen gehören die Verbraunung von Nadeln und Blätter sowie Nekrosen, meist im direkten Kontaktbereich mit Streusalz (GALK, 1998, Wohlers, 2005). Die vielseitige Schwächung der Baumvitalität führt dazu, dass Bäume bei Sturm anfälliger für Astbrüche sind oder auch schneller von Krankheiten oder Parasiten befallen werden (Zuber, 2013). Die Beeinträchtigungen an Pflanzen durch Streusalz zeigen sich oft erst nach Jahren.

Pflanzenschäden durch Tausalz lassen sich am besten durch die  $\text{Na}^+$ - und  $\text{Cl}^-$ -Gehalte im Blattwerk oder im Boden nachweisen. Durch Tausalz geschädigt gelten Laubbäume, wenn ihre Chlorid-Konzentration  $> 1\%$  der Trockenmasse aufweisen und Nadelbäumen bei  $> 0.5\%$ . Im Boden gelten Werte  $< 50\text{ mg/kg}$  Chlorid als unproblematisch, bei  $> 100\text{ mg/kg}$  können erste Schäden an Laubbäumen auftreten, und bei  $> 150\text{ mg/kg}$  werden die meisten Baumarten geschädigt.

Grundsätzlich entstehen aber Pflanzenschäden erst dann, wenn die internen Entgiftungsmöglichkeiten und Reparaturmechanismen einer Pflanze überschritten sind. Werden Bodenaggregate durch Salz zerstört, kann Sauerstoffmangel folgen, weil das Kohlendioxid der Pflanzenwurzeln nicht mehr abgegeben werden kann (Rust und Roloff, 2008). Baumstandortsanierungen sind kostenintensiv (Streckenbach, 2009). Ein differenzierter Winterdienst mit abgestufter Verwendung von Streumitteln kann Schäden minimieren (Zuber, 2007)

Viele Stressfaktoren können auf Bäume wirken und eine klare Kausalkette zu ziehen ist nicht immer einfach. Bei Bäumen, die durch weitere Faktoren gestresst sind, wirken die Einflüsse von Tausalz kumulativ (Zuber, 2013).

**Klassierung Salz/Feuchte:** Basierend auf Erkenntnissen der Pflanzenphysiologie und Pflanzenverwendung wird Salz als limitierender und massgebender Faktor bestimmt, obwohl bei guter Planung die Schadwirkung auf die Vitalität der Vegetation als gering eingestuft wird. Darauf aufbauend wurden vier Vegetationsmodule konzipiert (Abbildung 19). Die Vegetationen können gepflanzt oder ausgewählte Pflanzen gesät werden. Gehölze sind enger an pH-Wert gebunden als Stauden.



**Abbildung 19:** Vier Vegetationsmodule für die Bepflanzung im Strassenbereich bei hoher und geringer Salzlast sowie trockenem oder feuchten Standorten.

### Salztolerante und salzempfindliche Baumarten

Die folgende Auflistung zeigt eine Auswahl von salztoleranten bis salzempfindlichen Baumarten. Diese sind entsprechend der am Standort vorherrschenden Bedingungen zu verwenden. Die Auswahl wurde mit dem Biodiversitätsindex 2021 abgeglichen (Gloor et al. 2021). Die Arten mit einem Strassenbaum-Biodiversitätsindex von 3 und höher sind in der Aufzählung **fett** gelistet.

- Tolerant: **Quercus rubra**, *Quercus alba*, *Thuja plicata*, *Robinia pseudoacacia* (inv. Neophyt), *Populus tremuloides*, **Populus nigra**, *Betula lenta*, *Betula papyrifera*, *Betula populifera*, *Betula alleghaniensis*, *Prunus serotina*, *Fraxinus americana*, *Populus grandidentata*, *Taxus baccata*, *Platanus x hispanica*, **Salix sp.**, *Alnus cordata*, *Gleditsia triacanthos*, *Picea pungens*, *Picea sitchensis*, *Sophora japonica*, *Ulmus pumila*
- Weniger tolerant: Birken, Erlen, Eschen, Föhren, Sorbus-Arten, Prunus-Arten, Pyrus-Arten
- Nicht tolerant: **Tilia americana**, *Carya ovata*, *Ulmus americana*, *Acer rubrum*, *Pinus strobus*, *Tsuga spec.*, *Acer saccharum*, *Alnus incana*, *Pinus resinosa*, *Pseudotsuga menzieslii*, **Aesculus hippocastanum**, **Carpinus betulus**

Nachfolgend werden vier Vegetationsmodule gelistet, welche auch aus Erfahrungen der angewandten Forschung vielversprechend sind (Abbildung 36, S. 81). Es wird hierbei in Salztoleranz und Trockenheit unterschieden. Daraus resultieren die vier Vegetationssysteme "trocken und starke Salzlast", "trocken und geringe Salzlast", "feucht und starke Salzlast" und "feucht und geringe Salzlast" (Tabelle 11). Die Salzlast wurde gemäss Kapitel 7.7 folgendermassen definiert:

- Geringe Salzlast: < 100 mg/kg Chlorid
- Starke Salzlast: ≥ 100 mg/kg Chlorid

**Tabelle 11:** Pflanzenauswahl für den Strassenbereich unter Berücksichtigung des Feuchthaushalts (feucht, trocken) und der Salzlast (stark, gering). Mulch: Hartgesteinssplitt 8/16; \* : heimisch; \*A = Archeophyt, mit Römern nach Mitteleuropa gelangt, gilt als heimisch (etabliert); \*Eu = Europäische Art.

<b>Stauden</b>			
<b>Trocken starke Salzlast</b>	<b>Trocken geringe Salzlast</b>	<b>Feucht starke Salzlast</b>	<b>Feucht geringe Salzlast</b>
<i>Acanthus mollis</i> , <i>A. hungaricus</i> *A			
<i>Anemone sylvestris</i> *	<i>Anemone sylvestris</i> *	<i>Anemone sylvestris</i> *	<i>Anemone sylvestris</i> *
<i>Anthericum ramosum</i> *	<i>Aristolochia clematitis</i> *A	<i>Asperula taurina</i> *	<i>Asperula taurina</i> *
<i>Aster amellus</i> *	<i>Buglossoides purpureoacaerula</i> *	<i>Buphthalmum salicifolium</i> *	<i>Buphthalmum salicifolium</i> *
<i>Aster linosyris</i> *	<i>Buphthalmum salicifolium</i> *	<i>Calendula arvensis</i> *A	<i>Crambe maritima</i> *Eu
<i>Buphthalmum salicifolium</i> *	<i>Calendula arvensis</i> *A	<i>Cichorium intybus</i> *	<i>Digitalis lutea</i> *
<i>Ceratostigma plumbaginoides</i>	<i>Ceratostigma plumbaginoides</i>	<i>Crambe maritima</i> *Eu	<i>Eupatorium cannabinum</i> *
<i>Digitalis lutea</i> *	<i>Clematis recta</i> *	<i>Digitalis lutea</i> *	<i>Filipendula ulmaria</i> *
<i>Fragaria vesca</i> Wildform*	<i>Digitalis lutea</i> *	<i>Filipendula ulmaria</i> *	<i>Fragaria vesca</i> Wildform*
<i>Geranium nodosum</i> *	<i>Euphorbia cyparissias</i> *	<i>Fragaria vesca</i> Wildform*	<i>Geranium nodosum</i> *
<i>Geranium sanguineum</i> *	<i>Fragaria vesca</i> Wildform*	<i>Geranium nodosum</i> *	<i>Hemerocallis citrina</i>
<i>Hieracium pilosella</i> *	<i>Geranium nodosum</i> *	<i>Hemerocallis fulva</i> `Kwanso`	<i>Hieracium aurantiacum</i> *
<i>Ononis repens</i> *	<i>Geranium sanguineum</i> *	<i>Hieracium aurantiacum</i> *	<i>Lathyrus pratensis</i>
<i>Salvia glutinosa</i> *	<i>Lobularia maritima</i> *A	<i>Lathyrus sylvestris</i> *	<i>Lathyrus sylvestris</i> *
<i>Salvia nemorosa</i> *	<i>Lotus corniculatus</i> * (optional)	<i>Lobularia maritima</i> *A	<i>Lysimachia nummularia</i> *
<i>Stellaria holostea</i> *	<i>Malva sylvestris</i> * (Saat)	<i>Lysimachia nummularia</i> *	<i>Lythrum salicaria</i> *
	<i>Nigella damascena</i> *A	<i>Lysimachia punctata</i> *Eu	<i>Salvia glutinosa</i> *
	<i>Ononis repens</i> *	<i>Lythrum salicaria</i> *	<i>Succisia pratensis</i> *
	<i>Ononis spinosa</i> *	<i>Nigella damascena</i> *A	
	<i>Salvia glutinosa</i> *	<i>Salvia glutinosa</i> *	
	<i>Salvia nemorosa</i> *	<i>Succisia pratensis</i> *	
	<i>Salvia verticillata</i> *		
	<i>Scabiosa ochroleuca</i> *Eu		
	<i>Stellaria holostea</i> *		
<b>Bäume</b>			
<i>Quercus frainetto</i> *Eu	<i>Alnus x spaethii</i>	<i>Betula pendula</i>	<i>Betula pendula</i>
<i>Platanus x hybrida</i>	<i>Fraxinus angustifolia</i>	<i>Ulmus Resista Gruppe</i>	<i>Ulmus Resista Gruppe</i>
<i>Ulmus 'Rebona'</i>	<i>Maclura pomifera</i>	<i>Salix alba 'Liempde'</i>	<i>Salix alba 'Liempde'</i>
<i>Alnus x spaethii</i>	<i>Platanus x hybrida</i>	<i>Sophora japonica</i>	<i>Tilia americana</i>
		<i>Gleditsia triacanthos</i>	<i>Quercus robur</i>
<b>Sträucher</b>			
<i>Spiraea betulifolia</i> 'Tor'	<i>Aronia melanocarpa</i>	<i>Alnus cordata</i>	<i>Alnus cordata</i>
<i>Rosa gallica</i> wurzelecht	<i>Cornus mas</i>	<i>Cornus sanguineum</i>	<i>Cornus sanguineum</i>
<i>Rosa pimpinellifolia</i> 'Nana'	<i>Cotinus coggygria</i>		<i>Hamamelis virginiana</i>
<i>Cotinus coggygria</i>	<i>Hippophae rhamnoides</i> *		<i>Pinus mugo</i>
<i>Cornus mas</i>	<i>Rosa gallica</i> wurzelecht		
	<i>Rosa pimpinellifolia</i>		
<i>Hippophae rhamnoides</i> *	'Nana'		
	<i>Spiraea betulifolia</i> 'Tor'		

## 7.8. Fazit

### Bepflanzung

- Die Bepflanzung ist das zentrale Element einer blau-grünen Infrastruktur. Mit Ausnahme von Tausalz ist durch Belastungen im Platz- und Strassenabwasser keine Schädigung der Vegetation zu erwarten.
- Interzeption, Transpiration und Evaporation können die Sickerwassermenge um 20 – 60 % reduzieren.
- Für verschiedene Standorte sind unterschiedliche Pflanzen geeignet. Die Bepflanzung ist hinsichtlich zu erwartender Feuchte und Salzbelastung auszuwählen.
- An Standorten mit geringer Belastung sind bepflanzte Versickerungen bzw. Pflanzgruben immer umsetzbar, z.B. mit Stauden, Sträuchern und Bäumen, ohne das Gewässer belastet werden.
- Bei mittlerer Belastung können auf Bodenfiltern, auch unter Berücksichtigung von möglichen präferenziellen Fliesswegen, Stauden, Sträucher oder Bäume gepflanzt werden, bevorzugt Flachwurzler. Böden weisen eine ausreichende Filterfunktion für diese Belastung aus.
- Die geeignete Bepflanzung aus Bäumen, Sträuchern und Stauden sollte unter Berücksichtigung der am Standort erwarteten Feuchtigkeit (feucht, trocken) und Salzlast (hoch, gering) festgelegt werden-

### Wasserbedarf-

- Der Wasserbedarf von Bäumen ist hoch. Die Anschlussfläche und Wasserretention sind in die Planung einzubeziehen.
- Trockenstress beginnt, wenn ca. 60 % der nFK verbraucht ist.
- Bäume benötigen während der Vegetationszeit täglich 2 – 5 L Wasser pro m<sup>2</sup> Kronenfläche
- Bäume können durch Kapillaraufstieg aus dem Grundwasser versorgt werden.
- Die Einleitung von privaten Flächen in öffentliche Baumstandorte sollte möglich sein.

### Wurzellenkung

- Die vielversprechenden Resultate zur Wurzellenkung mit Pflanzenkohlen, Belüftung und wenig verdichteten Substraten sind praxiserprobt.
- Wurzelkorridore sollten vernetzt sein.

## 8. Gestaltungselemente

### 8.1. Eignung der Gestaltungselemente für Strassenabwasser

**Kriterien für die Beurteilung:** In der Wegleitung zur Hitzeminderung bei Strassenprojekten sind Gestaltungselemente beschrieben, die auf ihre Wirkung und Einsatzmöglichkeiten mit nachfolgenden Kriterien beurteilt werden (Fischer et al., 2021):

- **Wasserspeicherung:** Die Wasserspeicherung beschreibt die Kapazität eines Elements, nach einem Niederschlagsereignis Wasser für Pflanzen zurückzuhalten. Die Wasserspeicherung hängt vom Anteil an Mittelporen eines Substrats/Bodens ab, die wiederum von der Körnung, dem Anteil an organischem Material und der Lagerungsdichte bestimmt wird. Des Weiteren spielt das pflanzennutzbare Volumen eine Rolle, in dem sich die Wurzeln ausbreiten können. Der Anteil an Skelett (Kies, Steine) bleibt unberücksichtigt, weil er nichts zur Wasserhaltekapazität beisteuert.
- **Sickerleistung:** Die Sickerleistung beschreibt die Kapazität eines porösen Mediums, Wasser abzuführen. Sie kann durch  $S_{Spez}$  oder  $k_f$  beschrieben werden. Hier ist es vor allem der Anteil an

Grob- und Makroporen, die einen grossen Einfluss haben, die wiederum von Körnung (Sieblinie), Skelettanteil und biologischer Aktivität abhängen. Die Sickerleistung kann durch Verdichtung oder schlechter durchlässige Schichten (Wasserstau) reduziert werden.

- **Tragfähigkeit:** Grobkörnige und skelettreiche Materialien sind stabiler als feinkörnige mit einem hohen Anteil an organischer Substanz. Frisch geschüttete Böden sind empfindlicher gegenüber Befahrung als ältere, strukturierte und durchwurzelte Böden oder Substrate mit hohem Sand- oder Skelettanteilen. Böden, die zum Zeitpunkt einer Belastung feucht sind, gelten als empfindlicher als trockene.
- **Strukturstabilität:** Ein hoher Anteil leicht abbaubarer organischer Substanz (Zusatzstoffe) reduziert die Strukturstabilität, da organisches Material durch Mineralisation abgebaut wird und damit die Lagerungsdichte verändert. Der Zerfall von grösseren primären mineralischen Komponenten zu kleineren Körnern, beispielsweise durch Frostsprengung oder Lösungsverwitterung (auch bei RC-Granulaten wie Betonbruchstücke), setzt ebenfalls die Strukturstabilität herab.
- **Rückhalt von gelösten Stoffen:** Dieses Kriterium beschreibt die Fähigkeit eines porösen Mediums, Schadstoffe durch Adsorption zurückzuhalten. Für den Rückhalt gelöster Stoffe sind KAK, durch Tonminerale oder organisches Material angeboten, und AAK förderlich. Es ist davon auszugehen, dass Makroporen und der damit verbundene präferenzielle Fluss die Reinigungsleistung einschränken. Eine grössere Mächtigkeit der Bodenpassage verbessert hingegen den Stoffrückhalt.
- **Rückhalt von partikulären Stoffen:** Dieses Kriterium beschreibt die Fähigkeit, Schadstoffe durch mechanische Filtration zurückzuhalten. Für den Rückhalt von Partikeln ist ein homogenes, sandiges Material geeignet. Auch hier besteht kann präferenzieller Fluss die Reinigungsleistung verschlechtern, besonders bei geringer Mächtigkeit der Boden- oder Substratschicht.
- **Eignung für Belastungskategorie:** Die Eignung für die Versickerung von Platz- und Strassenabwasser gemäss VSA-Belastungsgrad hängt vom erwarteten Rückhalt partikulärer und gelöster Stoffe ab. In vorliegender Klassierung wurde differenziert nach der Belastungshöhe, wobei der jeweils geringere Rückhalt entscheidend ist für die gesamte Belastungsklassierung.

**Eigenschaften der Gestaltungselemente:** In einem anschliessenden Schritt wurden die Eigenschaften der Gestaltungselemente geprüft und diese den Beurteilungskriterien zugeordnet:

- **Durchströmtes Medium:** Körnung, Skelettgehalt und Porosität des Mediums beeinflussen alle Beurteilungskriterien. Bei einigen Gestaltungselementen lässt sich die Zusammensetzung des Bodens/Substrats gut abschätzen. So ist bei Schotterrasen und Ruderalflächen davon auszugehen, dass grobkörniges, skelettreiches Material eine hohe Sickerleistung, Tragfähigkeit und Strukturstabilität bedingen, aber eine geringe Wasserspeicherung und geringes Adsorptionsvermögen für gelöste Schadstoffe vorliegen. Im Gegensatz dazu ist bei der Entwässerung über die Schulter mit Bodenpassage eine gewisse Bandbreite an Körnungen möglich, die sich in der Breite der Beurteilung niederschlägt. Bei Gestaltungselementen wie der Mittelzone mit Begrünung (E-13) sind sowohl Boden als auch Substrat möglich, sodass die Beurteilungsbreite noch grösser wird.
- **Technische Filtermaterialien:** In der Wegleitung sind technische Filtermaterialien nicht erwähnt, die darauf ausgelegt sind, Schadstoffe besonders gut zurückzuhalten. Diese Absorber enthalten beispielsweise Aktivkohle oder Zeolith, welche gelöste Spurenstoffe und Schwermetalle stark binden. Technische Materialien können so gemischt sein, dass in ihnen flachwurzelnde Pflanzen wachsen. Sie lassen sich mit Gestaltungselementen kombinieren.
- **Schichtmächtigkeit und Wurzelraum:** Das Volumen, das durchsickert wird oder den Wurzeln zur Verfügung steht, beeinflusst die Wasserspeicherung und Reinigungsleistung. Bei Bodenfiltern ist gemäss VSA (2019a)  $\leq 50$  cm Bodenpassage und  $> 1$  m Grundwasserflurabstand vorgeschrieben. Davon wird bei der vorliegenden Einschätzung der Reinigungsleistung ausgegangen. Bei Substraten kann die Wasserspeicherung massgeblich durch das Volumen beeinflusst werden.

- **Bepflanzung:** Sie beeinflusst das Potenzial der Hitzeminderung, das hier nicht beurteilt wurde, aber auch die Bodenstruktur. Ein biologisch aktiver, strukturierter Boden zeigt tendenziell mehr Makroporen, welche die Reinigungsleistung hemmen kann. Pflanzen mit Pfahlwurzeln könnten zur Bildung präferenzialer Fließwege beitragen.
- **Verdichtung:** Verdichtung hemmt den Wasserfluss und das pflanzenverfügbare Wasserspeichervermögen. Es gibt Gestaltungselemente, die als verdichtet eingestuft werden, wie beispielsweise offene, nicht durch einen Rost oder ein Gitter geschützte Baumscheiben oder Rasengitter. Bei allen übrigen Elementen wird von einem moderaten Verdichtungsrisiko ausgegangen.
- **Offene Fläche:** Ist der Anteil der Fläche, die bei einem Gestaltungselement der Infiltration und dem Bewuchs zur Verfügung steht, kleiner als die Gesamtfläche, werden Parameter wie die Sickerleistung oder die Wasserspeicherung entsprechend vermindert. Dies ist beispielsweise bei Rasengittern (insbesondere aus Beton) der Fall.

Ins Schema passen künstliche Oberflächen wie Sickerbeton, offenporiger Asphalt, Platten und Pflasterung nicht vollständig. Bei diesen Gestaltungselementen wird weder Boden noch Substrat durchsickert. Bei Platten und Pflasterungen ist der potenziell durchlässige Flächenanteil zudem sehr klein. Sickerbeton oder offenporiger Asphalt dürfte zwar eine gute Wasserdurchlässigkeit haben und partikuläre Schadstoffe herausfiltern, die Kolmation kann aber zur Verschlammung führen (Legret et al. 2007). Diese schränkt die Sickerleistung und die Wasserspeicherung im Vergleich zu offenen aufweisen weiter ein.

**Klassierung Gestaltungselemente:** Die Gestaltungselemente wurden basierend auf den Eigenschaften unterteilt (Tabelle 12). Die Bewertung der Kategorien in gering, mittel und hoch fasst die Einzelbeurteilungen pro Element zusammen, welche im Anhang (Kapitel 11.3) zu finden sind. In der Praxis können die Gestaltungselemente variantenreich ausgeführt sein, beispielsweise die Grösse der Baumscheibe. Vorschläge von neuen, innovativen Gestaltungselementen sind in Kapitel 8.2 zusammengestellt.

**Tabelle 12:** Klassen der Gestaltungselemente und die Beurteilung der Kriterien aufgrund ihrer Eigenschaften.

Kategorie	Wasserspeicherung	Sickerleistung	Tragfähigkeit	Struktur-stabilität	Reinigungsleistung	Rückhalt gelöste Stoffe	Rückhalt Partikel	Eignung für Belastungsklassen nach VSA
Künstliche Oberflächen	gering	mittel	hoch	hoch	mittel	gering	mittel	gering
Grobkörnige Böden, z.B. sandig, kiesig	gering	hoch	mittel	hoch	mittel	gering	mittel	gering
Substrate ohne Bäumen	hoch	hoch	mittel	hoch	mittel	gering	hoch	gering
Substrate mit Bäumen	hoch	hoch	mittel	mittel	hoch	gering	hoch	gering
Rasenliner/ Rasengitter	mittel	mittel	mittel	mittel	mittel	mittel	hoch	mittel
Böden mit Bäumen	hoch	hoch	mittel	hoch	hoch	mittel	hoch	mittel
Böden ohne Bäume	hoch	hoch	gering	mittel	hoch	hoch	hoch	hoch
technische Filtermaterialien	hoch	hoch	gering	hoch	hoch	hoch	hoch	hoch

**Beurteilung der Kriterien:** Anhand in Tabelle 12 dargestellter Beurteilung lassen sich Funktionen bezüglich Entwässerung und Reinigung von Oberflächenabfluss, Wasserspeicherung und Standorteigenschaften für die Vegetation herleiten. Nicht abgedeckt ist die Beurteilung der Biodiversität.

- **Schnelles Abführen von Niederschlagswasser:** Alle Entwässerungselemente sollten die erforderliche Sickerleistung erfüllen, wenn sie gemäss den Vorgaben erstellt werden. Für beispielsweise Boden bedeutet es, dass keine Verdichtung auftritt und die Vorgaben für  $S_{Spez}$  eingehalten sind. Ausnahmen sind eingesandete Platten und Pflastersteine. In der Praxis treten bei Bodenfiltern immer wieder Probleme mit der Sickerleistung auf. Grund dafür dürfte häufig eine falsche Körnung, Verdichtung oder Kolmation sein.
- **Wasserspeicherung für die Vegetation:** In Bezug auf die nFK sind nebst den künstlichen Oberflächen, die nicht als Träger von Vegetation dienen, vor allem grobkörnige Bodenmaterialien limitierend. Die Wasserspeicherung hängt auch stark vom pflanzenverfügbaren Volumen ab. Schotterrasen und Ruderalflächen sind schlechte Wasserspeicher und deshalb Trockenstandorte. Ihr Beitrag zur Hitzeminderung ist deshalb klein, da ein lückenhafter Bewuchs wenig Evapotranspiration erwarten lässt.
- **Tragfähigkeit:** Im Hinblick auf die Tragfähigkeit sind künstliche Oberflächen gut ausgerichtet und Böden am schlechtesten. Da eine Verdichtung der Böden die übrigen Funktionen wie Versickerung und Wasserspeicherung negativ beeinflussen, ist auf ein Befahren besonders im nassen Zustand zu verzichten. Nur strukturstabile Substrate sind durch eine abgestufte Körnung für das Befahren ausgerichtet.
- **Strukturstabilität:** Böden können durch den Abbau von organischem Material, Verschlammung und Erosion verändert werden. In der Bewertung wurde die Strukturstabilität als mittel bis hoch eingestuft. Pflanzsubstrate sind in der Regel per Definition strukturstabile Gemische.
- **Reinigungsleistung:** Böden ohne Bäume und technische Filtersubstrate sind nach heutigem Wissensstand die zwei Kategorien, die für eine Versickerung von Niederschlagsabwasser der hohen Belastungsklasse uneingeschränkt geeignet sind (Tabelle 12). Bei Böden wird vorausgesetzt, dass Ober- und Unterboden bevorzugt 50 cm mächtig sind. Filtermaterialien allein sind nicht Pflanzenstandorte, vor allem nicht für Bäume, können aber Elemente ergänzen und damit deren Eignung für höhere Verschmutzungsgrade ermöglichen. Bei Böden mit Bäumen besteht das Risiko, dass präferenzielle Fließwege die Filterwirkung reduzieren. Bei feinen, flachen Baumwurzeln, grossem Flurabstand und feinkörnigem Untergrund ist die Filterleistung gesichert. Auch das Verhältnis von entwässerter Fläche zu Sickerfläche spielt eine Rolle: Je grösser, desto eher stellen sich gesättigte Bedingungen ein.

Essentiell ist ein fachgerechter und den Vorschriften entsprechender Einbau. Vor allem im Hinblick auf die Wasserspeicherung und die Reinigungsleistung können eine gute Planung und bauliche Varianten die Funktionen der Elemente verbessern.

## 8.2. Empfehlungen für blau-grüne Gestaltungselemente

Um im Bereich der Platz- und Strassenentwässerung eine für die Belastungsklasse optimale Reinigungsleistung zu erzielen, sind an die Belastungsklasse angepasstes Gestaltungselement zu wählen oder zu entwickeln. Stets ist gemäss VSA die Priorität 0 (Abfluss und Belastungen vermeiden oder zu vermindern) aufzunehmen in der Planung und Reduktionsmassnahmen umzusetzen.

Versickerungsfähige Bodenaufbauten gemäss VSA ohne Bäume sind für Regenwasser aller Belastungsklasse geeignet. In solchen Anlagen können auch flachwurzelnde Stauden und Sträucher gepflanzt werden, solange sie keine Pfahlwurzeln bilden. Salztolerante Arten für die eher trockenen Standorte sind zu bevorzugen.

Substratrabatten sind unabhängig vom Bewuchs nur für mittlere Belastungen geeignet. Dies, weil davon auszugehen ist, dass sie gelöste Schadstoffe schlecht zurückhalten. Mithilfe von vorgeschalteten Absorbieren könnten solche Systeme aber auch für die Versickerung von Wasser mit mittlerer oder sogar hoher Belastung verbessert werden. So würden in Bereichen mit höheren Belastungen zusätzliche

Flächenelemente für Stauden, Bäume und Sträucher geschaffen werden, die das Stadtklima positiv beeinflussen. Um den Wasserbedarf der Pflanzen zu sichern, sind unterirdische Wasserspeicher oder Strukturen zur Wurzellenkung sinnvoll, wie sie in Kapitel 7.3 beschrieben sind.

Grobkörniges Material wie für Ruderalflächen oder Schotterrasen sollten nur bei Herkunftsflächen mit schwach belastetem Oberflächenabfluss eingesetzt werden. Sie leiten Wasser sehr gut ab, sind aber keine guten Speicher und verbessern das Stadtklima kaum durch Verdunstung.

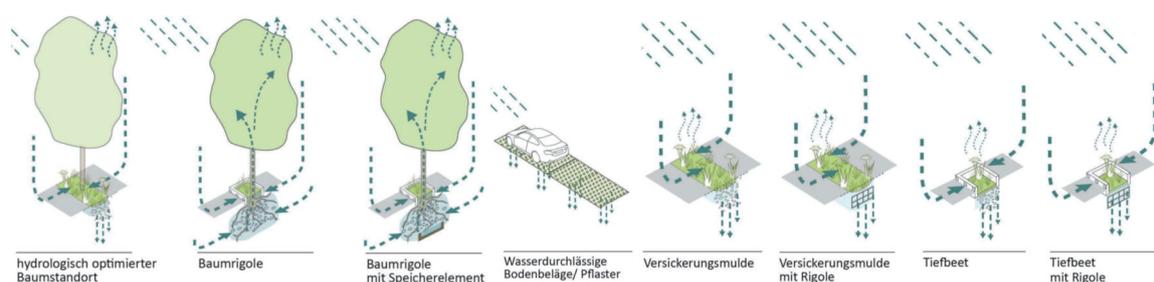
Rasenliner und Rasengitter sind gut geeignet für die Filterung von mittel bis stark belastetem Wasser, aber die Sickerleistung dürfte wegen der Befahrung nicht besonders hoch sein. Auch die Wasserspeicherung ist beschränkt, sodass das darauf wachsende Gras in Hitzeperioden an Wassermangel leiden werden. Trotzdem leisten sie einen Beitrag zur Abflussminderung und Kühlung und sind versiegelten Flächen immer vorzuziehen.

Zur Verbesserung der Wasserspeicherung (nFK) kann an Stellen, wo die Sickerleistung geringer sein darf, ein feinkörnigerer Boden oder höherer Anteil an organischem Material oder Pflanzenkohle eingebracht werden. Unterirdische Speichersysteme können die Versorgung der Pflanzen mit Wasser zusätzlich erhöhen. Besonders wichtig ist der zugängliche Wurzelraum. Hier ist zu beachten, dass der Volumenanteil der Grobfraction den potenziellen Wurzelraum verkleinert.

Verbessernd wirken beim Schadstoffrückhalt eine mächtigere Oberbodenschicht oder Substrate mit hoher Reinigungsleistung. Strukturstabile, substratbasierte Pflanzgruben, mit und ohne Vorbehandlung, werden daher als blau-grüne Schwammstadt-Elemente besonders empfohlen.

**Bepflanzte Versickerungselemente:** Die gängigen FLL-Systeme eignen sich gut für gering belastete Strassenabflüsse (Abbildung 30). Neben Baumstandorten sind auch begrünte Mulden und Tiefbeete als Elemente geeignet, die die Sichtachsen im Strassenraum wenig beeinträchtigen (Abbildung 20).

Um die vielfältigen Anforderungen an den Einbau und die Nutzung noch besser abzudecken, werden weitere Systeme empfohlen, für die international bereits gute Ergebnisse zur Bepflanzung, Wasserspeicherung und Sickerleistung vorliegen. Nachfolgend sind Beispiele aus Stockholm, New York, Melbourne, Toronto und Hamburg sowie Varianten aus Melbourne und zur Behandlung gezeigt (Abbildung 21, Abbildung 22, Abbildung 31, Abbildung 32).

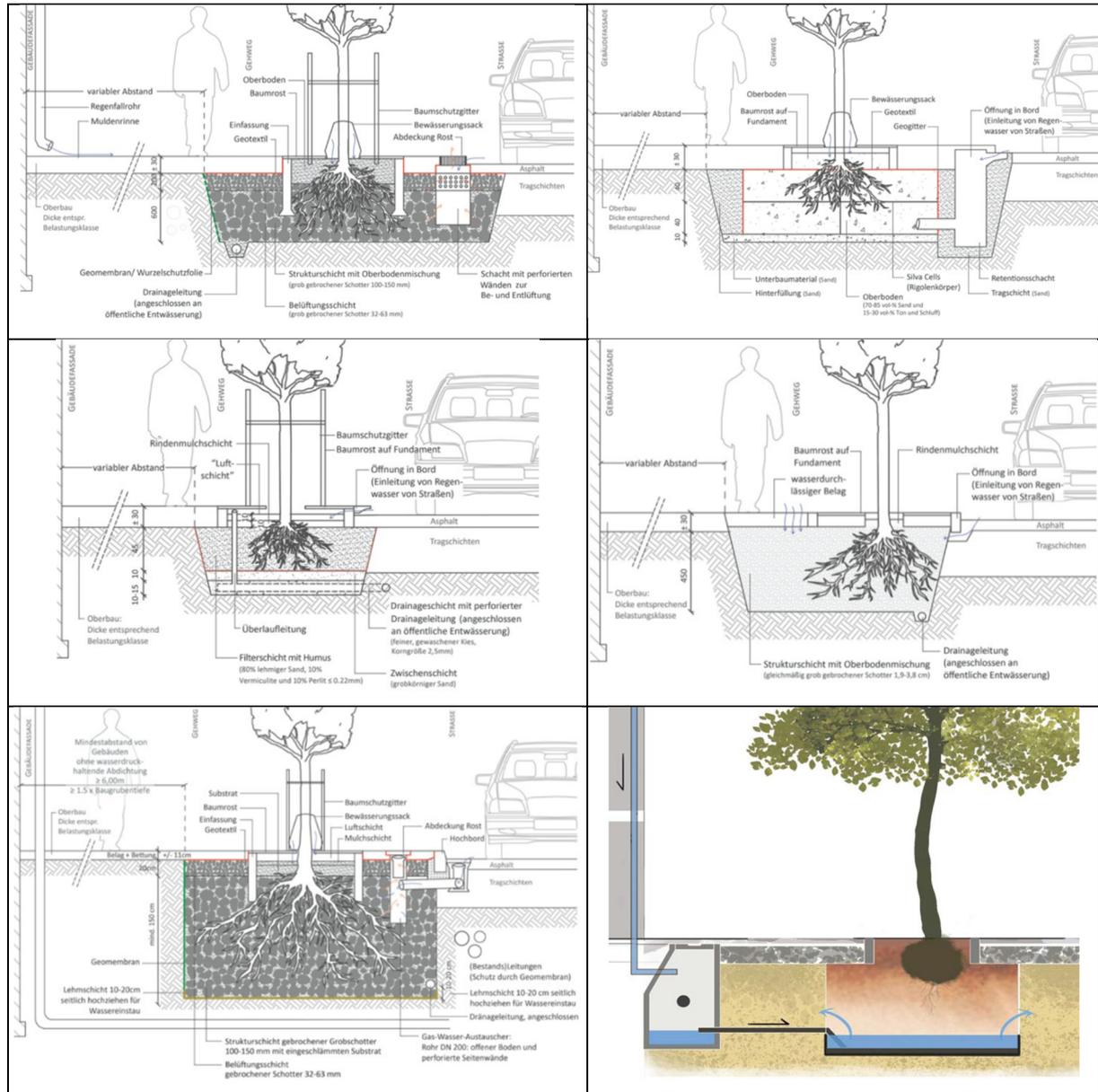


**Abbildung 20:** Systematisierung für Baumstandorte, Mulden und Tiefbeete sowie Sickerbeläge (Biber).

Pflanzgruben mit Boden oder Substraten werden oft im Verbund realisiert, sodass der Wurzelraum miteinander zusammenhängt, überwiegend bei neuen Anpflanzungen. Tragfähige Systeme wie in Stockholm werden auch unterhalb von Verkehrswegen ausgeführt. In New York wird das Substrat gemischt eingebaut, während in Stockholm vor Ort das Feinmaterial in die Steine eingeschlämmt wird.

Als Retentionsmassnahmen sind unterirdische Speicherzellen (Plastik/Beton/Mineralwolle) mit hoher Tragfähigkeit und > 90 Vol-% und gedrosseltem Abfluss verbreitet (Abbildung 34). Unterirdische Einstaubereiche (z.B. Wannen) können das Wasserangebot für die Pflanzen zusätzlich verbessern.

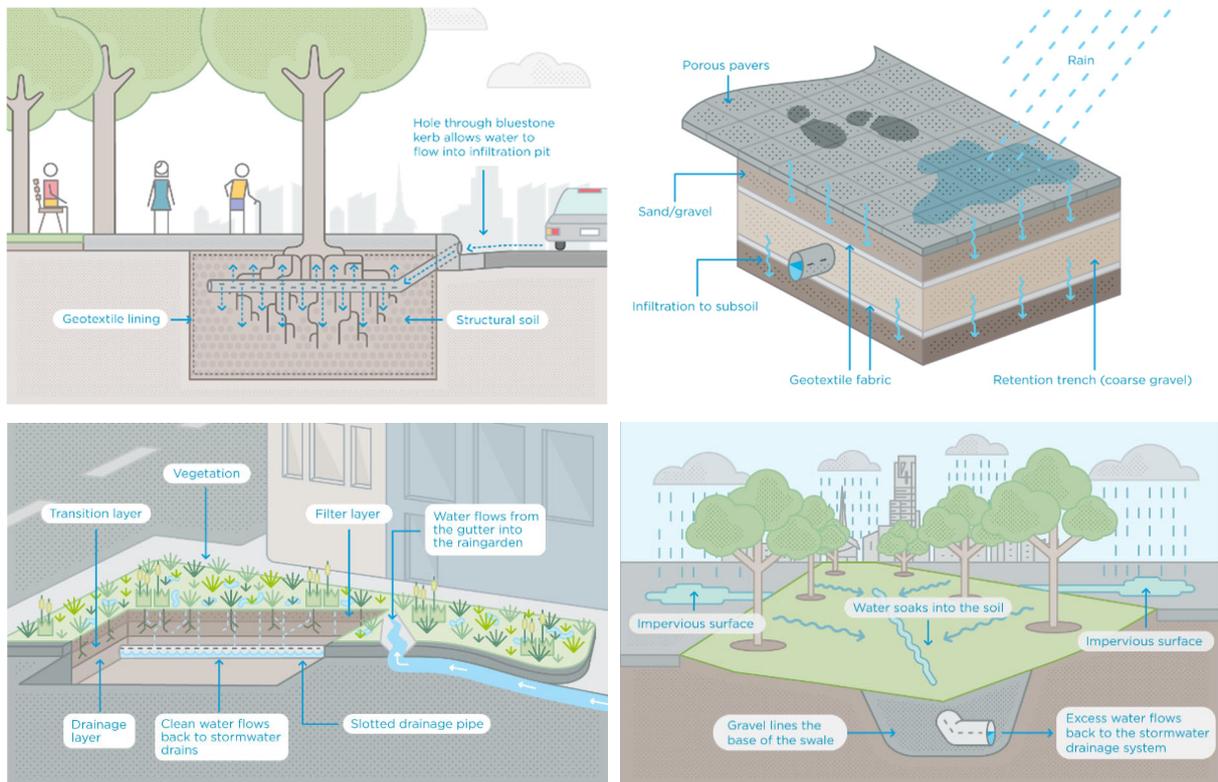
Bei Systemen in Hamburg wurde die Grubensohle mit Bentonit-Matten auskleidet, um temporären Wassereinstau zu ermöglichen (Abbildung 21, unten rechts). Das effektiv verfügbare Volumen ist aber eher klein (ca. 1000 L), um Trockenperioden zu überbrücken. Interessant ist, dass der unterirdische Schacht einerseits die Baumgrube bewässert, andererseits bei Starkregen mit Notentwässerung in den Regenwasserkanal entwässern kann. Entsprechende Notentwässerungen sind weit verbreitet, um Niederschläge grösser als der Bemessungsregen sicher abzuleiten.



**Abbildung 21:** System Stockholm mit grossformatigen Steinen/Pflanzenkohle/Kompost und Einleit-/Belüftungsschacht (links oben), System Toronto mit Rigolen (rechts oben), System Melbourne mit natürlichem Boden (links unten), System New York mit mittelgrossen Steinen im CU-Structural Soil (rechts unten) und FLL-Weiterentwicklung aus Hamburg (unten links und rechts) (Abbildungen von Carmen Biber)<sup>13</sup>.

<sup>13</sup> <https://stadtungruen.de/artikel/strassenbaeume-als-komponente-der-ueberflutungs-und-hitzevorsorge-in-staedten-10881.html>

Versickerungsfläche ("raingarden") werden in Melbourne stark unterstützt und in der Regel in der Nähe von Gebäuden, Strassen und anderen undurchlässigen Flächen angelegt (Abbildung 22). Sie fangen den Abfluss auf, verlangsamen ihn und entfernen Schadstoffe.



**Abbildung 22:** Varianten aus Melbourne: Eine Versickerungsmulde fängt Wasser von der Strasse auf, um die Bäume unterirdisch über Rigolen zu bewässern (links oben), poröses Pflaster/Asphalt lässt das Wasser in den darunter liegenden Boden versickern (rechts oben), unter der Oberfläche einer Versickerungsfläche ("raingarden") entfernen spezielle Filterschichten Verunreinigungen aus dem Regenwasser (links unten) und oberflächliche Rinnen leiten das gesammelte Niederschlagsabwasser durch grosse begrünte Flächen<sup>14</sup>.

**Pflanzgruben mit Adsorberanlagen:** Gegenüber Boden haben Adsorbersubstrate den Vorteil, dass auf kleinem Volumen die Schadstoffe stark angereichert werden und damit die diffuse Belastung des Strassenwassers gezielt entfernt wird. Festzulegen ist, welche Schadstoffe entfernt werden sollen. Besonders vorteilhaft sind universell wirksame Substrate, die stoffunspezifisch reinigen, und damit Spurenstoffe, Schwermetalle, MKW und GUS entfernen (Abbildung 23, Abbildung 24). Empfohlen wird ein Nachweis zur Leistungsfähigkeit gemäss VSA (VSA, 2019b). Es ist auch denkbar, die Wasserzufuhr durch einen Sommer-/Winterbetrieb (z.B. Schieber) zu steuern, sofern eine hohe Salzfracht kritisch sein könnte für die Bepflanzung.

Die Standzeit der Substrate wird auf > 10 Jahre je nach Verkehrsbelastung und Menge geschätzt. Sie lassen sich aussaugen und durch neues Substrat rasch ersetzen. Laub oder Abfälle (Littering) können manuell entfernt werden oder zersetzen sich auf dem Substrat. Die Entsorgung kann über eine Bodenwaschanlage oder Deponierung erfolgen.

<sup>14</sup> <http://urbanwater.melbourne.vic.gov.au/melbournes-water-story/water-sensitive-urban-design-wsud/>



**Abbildung 23:** Einbauweisen mit Adsorbersubstrat von Fa. Funke Kunststoffe zur Entfernung von Spurenstoffen, MKW, Schwermetallen und GUS aus Strassenabwasser, bevor das Wasser in Baumrignolen geleitet wird (mündl. Mitteilung, R. Töws).

Eine bodendeckende Bepflanzung ist bei Rinnensystemen teils möglich (Abbildung 23). Grundsätzlich kann die Vegetation die Standzeit der Substratmulde verlängern, weil die Wurzelaktivität der Kolmation entgegenwirkt und die mikrobiologische Aktivität organische Schadstoffe abbauen hilft. Für Strassenrandbereiche werden Bodendecker empfohlen, wie *Pachysandra*, *Mahonie*, *Vicor minor* oder Sedumgewächse. Für grossflächige Sickermulden oder offene Sickerschächte seien Büsche und Pflanzen des Röhrichtsaußens geeignet.



**Abbildung 24:** Einbau einer MEACLEAN Filtersubstratrinne (MEA Group) mit Zulauf von 2,6 l/s pro Meter Rinne und Ringzuleitung um den Wurzelballen. Das Substrat Biocalith MR-F1 stammt von ENREGIS und kann Schwermetalle, MKW und GUS zurückhalten<sup>15</sup>.

### 8.3. Fazit zu Gestaltungselementen

Im Strassenbereich mit hoher Belastung ist eine Bodenpassage mit mindestens 50 cm Schichtmächtigkeit erforderlich. Die KAK wird massgeblich durch den Tonanteil und humose organische Substanz bestimmt. Gelöste Schadstoffe binden daran. Die Gestaltungselemente sind für den Rückhalt gelöster Schadstoffe eher schlechter geeignet.

Die in Tabelle 12 wiedergegebene Einschätzung ist nahe an den Richtlinien des VSA (2019a) und des AWEL (2022). Lediglich die Rasengitter/Rasenliner werden beim Stoffrückhalt als wirkungsvoller eingeschätzt als beispielsweise eingesandete Pflaster. Die Unterschiede basieren auf der höheren Sickerleistung, Adsorption und geringeren Wahrscheinlichkeit für präferenziellen Fluss.

<sup>15</sup> <https://stadtbaumbewaesserung.de/wp-content/uploads/2020/01/Pilotprojekt-2.pdf>

Neue Gestaltungselemente oder Varianten der bestehenden können zusätzliche Chancen im Bereich der Strassenwasserversickerung und -behandlung eröffnen. Zahlreiche Beispiele aus der Praxis unterstreichen die Eignung von Adsorbersystemen als Vorbehandlungsstufen.

## 9. Schlussfolgerungen und Ausblick

### 9.1. Schlussfolgerungen

Blau-grüne Elemente im Strassenraum erbringen eine hohe Ökosystemleistung. Dabei sind die Massnahmen wirtschaftlich, wenn sie «Huckepack» mit anstehenden Strassenerneuerungen und Instandsetzungsarbeiten durchgeführt werden. Bereits heute bieten sich blau-grüne Gestaltungselemente vor allem in *Au* und *üB* an.

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. Substrate sind grobkörniger, haben somit mehr Grobporen als natürliches Bodenmaterial. Die Luftversorgung im Wurzelraum und die Sickerleistung sind grösser, der Rückhalt von pflanzenverfügbarem Wasser (nutzbare Feldkapazität) ist aber kleiner, sofern nicht ein Teil der Substratteile selber porös ist (Pflanzenkohle, Blähton, Blähschiefer oder organisches Material). Bei der richtigen Zusammensetzung sind sie universell einsetzbar. Bei der Substratauswahl sollten Ausschreibungen klar kontrollierbare Parameter vorsehen, wie Lagerungsdichte, spezifische Sickerleistung, pH-Wert und Korngrössenverteilung.

Ein breites Spektrum an Schadstoffen ist im Strassenabwasser möglich. Daher ist die Differenzierung in Herkunftsflächen und Belastungsklassen wichtig. Über das Vorkommen gelöster organischer Spurenstoffe ist noch wenig bekannt. Diese Kenntnislücke sollte behoben werden, um die grundsätzlichen Risiken für das Grundwasser zu kennen und Massnahmen zielgerichtet zu treffen.

Der Behandlungsbedarf sollte am Stoffspektrum ausgerichtet sein. Bei einer geringen Belastung ist keine Behandlung erforderlich und eine Bepflanzung vorzusehen. Bei mittlerer und hoher Belastung sind eine gute Planung mit Optimierung von Anschlussflächenverhältnis, stofflicher Rückhalt etc. anzustreben. Punktuelle Schadstoffbarrieren vor-/nachgeschaltet sowie technische Kaskadensysteme können die Einträge begrenzen oder gezielt konzentrieren. Boden und Substrate von Behandlungsanlagen reichern Schadstoffe an und sind nach Erreichen der Standzeit zu entsorgen.

Grosse Anschlussflächen an Pflanzgruben sind vorteilhaft, weil sie die Wasserversorgung von Bäumen deutlich verbessern und das Auswaschen von Tausalz beschleunigen. Ist bei einer Pflanzgrube (Baumrigole, Tiefbeet etc.) ein Flächenverhältnis  $A_E/A_V \geq 5$  vorgesehen, wird diese zu einer Anlage. Der Standort ist dann regelmässiger feucht und das Tausalz wird besser ausgewaschen. Unterirdische Wannen können die Versorgung der Pflanzen mit Wasser zusätzlich verbessern.

Unter Berücksichtigung der Merkmale von Substraten und Böden lässt sich vorsichtig formulieren, dass das Risiko einer relevanten präferenziellen Stoffverlagerung in Grundwasser gering sein dürfte. Durch Untersuchungen an bestehenden Versickerungen mit Bepflanzung lässt sich diese Fragen hinreichend genau klären. Die Wahrscheinlichkeit von präferenziellem Wasserfluss im Boden und Substraten kann über die Planung gesteuert werden (Grösse der Anschlussfläche, Materialwahl, Vegetation). Dazu gehört z.B. die Verwendung von Flachwurzeln, Wurzelentkung und ein fachgerechter Einbau des Materials.

Baumpflanzungen sind in Bodenfiltern anzustreben, zunächst schrittweise, z. B. in Pilotversuchen, um Erfahrung zu sammeln, und ausserhalb von Grundwasserschutzzonen und Gewässerschutzbereich *Au*, d. h. im übrigen Bereich *üB* oder bei grossem Grundwasserflurabstand.

Wenn genügend Anschlussfläche vorhanden ist oder ausreichend Niederschlagswasser in die Grünflächen versickert, ist bei den Schweizer Niederschlagsverhältnissen durch Tausalz keine Schädigung an der Vegetation oder am Bodengefüge zu erwarten. Auch die leicht alkalischen pH-Werte durch die eingesetzte Pflanzenkohle stellen bei den entsprechenden Verhältnissen kein Problem dar. Dennoch sollte berücksichtigt werden, dass bei trocknen Verhältnissen die Salzlast in Böden und Substraten hoch und für Pflanzen toxisch sein kann. Dafür ist eine grosse Vielfalt an Bautypen für Baumrigolen und Bodenfilter verfügbar. Verschiedene Bepflanzungen sind unter Berücksichtigung von Salzlast und Feuchthaushalt möglich (Kap. 7.7).

## 9.2. Ausblick

Für weitere Untersuchungen im Bereich Umsetzung und Erfolgskontrolle wurden folgende Bereiche identifiziert, die sich durch Pilotstudien bearbeiten lassen:

- **Relevanz präferenzierter Fluss:** Der Einfluss von Bäumen oder Stauden mit Pfahlwurzeln auf präferenzielle Fliesswege und das damit verbundene Risiko, dass Schadstoffe durch mindestens 50 cm Ober- und Unterboden und den Untergrund bis in mehr als 1 m Tiefe gelangen, ist durch Untersuchungen an bestehenden Versickerungen mit Bepflanzung zu klären. Die Standorte mit tiefem Wurzelwerk (Bäume) können in den DACH-Ländern liegen. Vorgesehen sind primär Farbtracer-Versuche zur Färbung der präferenziellen Fliessweg, wie sie in zahlreichen Untersuchungen umgesetzt wurden. Entlang der möglichen Fliesswege lassen sich auch Bodenproben entnehmen.
- **Relevanz organische Spurenstoffe:** Abklärungen sind zu treffen zu organischen Spurenstoffen im Strassenabwasser. Zunächst sind die Stoffe zu priorisieren und ein Analysenprogramm festzulegen. Mögliche Standorte sind Direkteinleitungen von Strassenabwasser in Gewässer, behandeltes Sickerwasser aus SABAs, oder Tunnel-/Brückenabwasser. Mehrere Stichproben sind zu entnehmen und die Spurenstoffe im Vergleich mit Standardparametern zu bewerten.
- **Behandlungsanlage mit Pflanzgrube:** Pilotinstallation mit einem Filtersubstrat gemäss VSA-Anforderungsstufe "Standard" oder "Erhöht" vorgeschaltet zu 3-6 Pflanzgruben mit Baumpflanzungen. Die Standorte sollen eine hohe Strassenwasserbelastung aufweisen. Ein begleitendes Monitoring bilanziert den Wasser- und Stoffhaushalt, insbesondere auch die Salzlast. Damit wird die Vorbehandlung des Sickerwassers bei Gestaltungselementen mit fehlender oder geringer Reinigungsleistung beurteilt und Lösungen für die Zukunft bereitgestellt.
- **Planungsleitfaden:** Entwicklung eines Planungsleitfadens für blau-grüne Elemente, der sich an bewährten Vorlagen orientiert, aber auf Schweizer Anforderungen spezifisch eingeht. Gegenwärtig gibt es eine hohe Fragmentierung von Leitfäden, Richtlinien etc. Benötigt wird ein integrales Planungswerkzeug. Einbezogen wird das Institut für Landschaft und Freiraum an der OST (ILF, Prof. Tobias Baur).

## 10. Literatur

- Abel, S., Peters, A., Trinks, S., Schonsky, H., Facklam, M., Wessolek, G. (2013): Impact of biochar and hydrochar addition on water retention and water repellency of sandy soil. *Geoderma*, 202-203, 183-191.
- ASTRA (2021): Strassenabwasserbehandlungsverfahren – Stand-der-Technik. Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, Bern.
- AWEL (2018): Klimawandel im Kanton Zürich - Massnahmenplan Anpassung an den Klimawandel, Baudirektion Kanton Zürich - Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft, Abteilung Luft.
- AWEL (2021): Grundwasserschutz: Grundwasserkarte Mittelwasserstand. Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft, Zürich, Abgerufen am 19. Januar 2021 von <http://maps.zh.ch/?topic=AwelGrundWaMWwwwZH&offlayers=bezirkslabels&scale=310000&x=692000&y=252000>
- AWEL (2022): Regenwasserbewirtschaftung - Richtlinie und Praxishilfe zum Umgang mit Regenwasser. Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL), Abteilung Gewässerschutz, Zürich.
- Baensch-Baltruschat, B., Kocher, B., Stock, F., Reifferscheid, G. (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.
- Bach, L.B., Wierenga, P.J., Ward, T.J. (1983): Estimation of the Philip infiltration parameters from rainfall simulation data. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 50: 1319-1323.
- Balder, H. (1998): Die Wurzeln der Stadtbäume. Berlin: Parey Buchverlag.
- Balder, H., Goll, L., Nickel, D., Rehfeld-Klein, M. (2018): Befunde zur Verwendung von Bäumen in Muldensystemen im Rahmen der Regenwasserbewirtschaftung. *Pro Baum*, 4:15-21.
- LfU (2008): Bodenkundliche Untersuchungen im Rahmen des Entwicklungsvorhabens Versickerung des Niederschlagswassers von befestigten Verkehrsflächen. Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg.
- Bayrisches Landesamt für Umwelt (2007): Versickerung des Niederschlagsabwassers von befestigten Verkehrsflächen. Abschlussbericht des Entwicklungsvorhabens Oktober 1996 bis Oktober 2005.
- Benden, J., Broesi, R., Illgen, M., Leinweber, U., Lennartz, G., Scheid, C., Schmitt, T. G. (2017): Multifunktionale Retentionsflächen. MURIEL Publikation.
- BFE (2007): Richtlinien zum Schutze des Bodens beim Bauz unterirdisch verlegter Rohrleitungen, Bundesamt für Energiewirtschaft.
- Blanco-Canqui, H. (2017): Biochar and Soil Physical Properties. *Soil Science Society of America Journal* 81, 687–711.
- Blume, H.-P., Brümmer, G. W., Horn, R., Kandeler, E., Kögel-Knabner, I., Kretzschmar, R., Stahr, K., Wilke, B.-M. (2010): Scheffer/Schachtschabel Lehrbuch der Bodenkunde (16. Auflage). Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg.
- Björklund, K., Cousins, A.P., Strömvall, A.-M., Malmqvist, P.-A. (2009): Phthalates and nonylphenols in urban runoff: Occurrence, distribution and area emission factors. *Sci. Total Environ.*, 407 (16), 4665-4672.
- Boller, Markus (2002): Charakterisierung von Strassenabwasser - Emissionen und Immissionen, VSA-Fortbildungskurs 2002 – Strassenentwässerung der Zukunft.
- Boller, M. (2011): Häufig gestellte Fragen zur Strassensalzung. Eawag, Dübendorf.

- Bosshard, H. (28. 12. 2016): Interview mit dem Produkteverantwortlichen Stadtbäume GSZ. (A. Saluz, & A. Heinrich, Interviewer).
- BMLRT (2013): Entwicklung von Methoden zur Prüfung der Eignung von Substraten für die Oberflächenwasser-behandlung von Dach- und Verkehrsflächen. Langfassung, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft Wien.
- Burkhardt, M., Schmidt, S., Gohl, G., Zenker, A., Schmocker, M., Zbinden, D., Loretz, A., Bigler, R. (2017a): Behandlung von Regenwasser. *Aqua & Gas*, 4:78-85.
- Burkhardt, M., Schmidt, S., Bigler, R. (2017b): VSA-Leistungsprüfung – Leistungsermittlung in Labor- und Feldtests für Anlagen zur Niederschlagswasserbehandlung. *Aqua & Gas*, 11:33-41.
- Burkhardt, M., Hodel, P. (2019): Abschwemmung von Metallflächen und Eintrag ins Grundwasser – Literaturrecherche und Messungen unter Berücksichtigung von drei urbanen Pestiziden. Bericht im Auftrag des Schweizer Bundesamts für Umwelt (BAFU), Rapperswil, S. 44.
- 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.
- Clara, M., Ertl, T., Giselbrecht, G., Gruber, G., Hofer, T., Humer, F., Kretschmer, F., Kolla, L., Scheffknecht, C., Weiß, S., Windhofer, G. (2014): Spurenstoffemissionen aus Siedlungsgebieten und von Verkehrsflächen. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. Wien, Österreich.
- Collis-George, N. (1977): Infiltration equations for simple soil systems. *Water Resources Research*. 13:395-403.
- Costelloe, L., Jones, K. S. (2003): Reducing Infrastructure Damage by Tree Roots: A Compendium of Strategies. Western Chapter of the International Society of Arboriculture (WSISA), USA.
- Cross, A., Zwart, K., Shackley, S., Ruyschaert, G. (2016): The Role of Biochar in Agricultural Soils. In S. Shackley, G. Ruyschaert, K. Zwart, B. Glaser, *Biochar in European Soils and Agriculture - Science and Practice*, London: earthscan from Routledge, S. 83-98.
- Dickhaut, W., Eschenbach, A. (2019): Entwicklungskonzept Stadtbäume: Anpassungsstrategien an sich verändernde urbane und klimatische Rahmenbedingungen. HafenCity Universität, Hamburg.
- DIN 18915:2018-06 (2018): Vegetationstechnik im Landschaftsbau – Bodenbearbeitung. DIN Deutsches Institut für Normung, Berlin.
- DIN 18916:2016-06 (2016): Vegetationstechnik im Landschaftsbau – Pflanzen und Pflanzarbeiten. DIN Deutsches Institut für Normung, Berlin.
- DIN 19682-7:2015-08 (2015): Bodenbeschaffenheit - Felduntersuchungen - Teil 7: Bestimmung der Infiltrationsrate mit dem Doppelring-Infiltrometer. DIN Deutsches Institut für Normung, Berlin.
- Dobler, I., Holthuis, J. U. (2017): Entwicklung eines modular einsetzbaren Pflanzenfilters zur Absicherung dezentraler Regenwasserversickerungsmassnahmen. Abschlussbericht, Bremen.
- DWA (2010): Strassenentwässerung, Seminarunterlagen, Fürth.
- DWA A 102-2 (2020): Grundsätze zur Bewirtschaftung und Behandlung von Regenwetterabflüssen zur Einleitung in Oberflächengewässer – Teil 2: Emissionsbezogene Bewertungen und Regelungen. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef.

- DWA A 138-1 (2020): Entwurf - Anlagen zur Versickerung von Niederschlagswasser – Teil 1 Planung, Bau, Betrieb. DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., Hennef.
- EBC (2022): European Biochar Certificate – Richtlinien für die Zertifizierung von Pflanzenkohle. Ithaka Institute, Arbaz, Schweiz. Version 10.1G vom 10. Januar 2022.
- Eckelmann, W. (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung KA5. 5. verbesserte u. erweiterte Auflage, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in Zusammenarbeit mit den Staatlichen Geologischen Diensten, Hannover.
- Embrén, B. (2015): Planting urban Trees with Biochar - The Stockholm Project. *The Biochar Journal*, 44-47.
- Embrén, B., Alvem, B.-M. (2017): *Plant beds in Stockholm city – a handbook 2017*.
- Eppel-Hotz, A. (2019): Pflanzen für Versickerung und Retention. *Veitshöchheimer Berichte* 186, 73-85.
- Fischer, G. (2021): Wie Stadtbäume an Wasser kommen. *TASPO Garten Design*, 3:40-46.
- Fitze, U. (02 2014). Zu viel Stickstoff ist ungesund. *Umwelt - Natürliche Ressourcen in der Schweiz*, S. 14-17.
- Flanagan, K., Branchu, P., Boudahmane, L., Caupos, E., Demare, D., Deshayes, S., Dubois, P., Meffray, L., Partibane, C., Saad, M., Gromaire, M.-C. (2019): Retention and transport processes of particulate and dissolved micropollutants in stormwater biofilters treating road runoff. *Science of The Total Environment*, 656, 1178-1190.
- FLL (2010): Empfehlungen für Baumpflanzungen – Teil 2: Standortvorbereitung für Neupflanzungen; Pflanzgruben und Wurzelraumerweiterung, Bauweisen und Substrate. Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e. V. (FLL), Bonn.
- FLL (2015): Richtlinien für die Planung, Installation und Instandhaltung von Bewässerungsanlagen in Vegetationsflächen. Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e. V. (FLL), Bonn.
- FLL (2015): Empfehlungen für Baumpflanzungen – Teil 1: Planung, Pflanzarbeiten, Pflege. 2. Ausg. Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e. V. (FLL), Bonn.
- FLL (2016): Qualitätsanforderungen/Anwendungsempfehlungen für organische Mulchstoffe und Komposte. Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e. V. (FLL), Bonn.
- FLL (2020): Baumkontrollrichtlinien - Richtlinien für Regelkontrollen zur Überprüfung der Verkehrssicherheit von Bäumen. 2. Ausg., Nachdr. Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau, Bonn.
- Flühler, H., Roth, K. (2004): *Physik der Ungesättigten Zone*. Vorlesungsskript. ETH Zürich / Universität Heidelberg.
- Fischer, L., Beerli, N., Massimiliano, D.L., Zallot, D. (2021): Wegleitung Hitzeminderung bei Strassenprojekten. Metron Zürich AG im Auftrag der Baudirektion des Kanton Zürich.
- GALK (2013): *Strassenbaumliste*. GALK, Deutsche Gartenamtsleiterkonferenz Arbeitskreis Stadtbäume.
- Gillner, S., Korn, S., Hofmann, M. & Roloff, A. (2017). Contrasting strategies for tree species to cope with heat and dry conditions at urban sites. *Urban Ecosystems*, No. 20, 853–865.
- Glaser, B., Lehmann, J., Zech, W. (2002): Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal—a review. *Biology and Fertility of soils*, 219-230.

- 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.
- Grabowsky, J., Bassuk, N., van Es, H. (1996): Further testing of rigid urban tree soil materials for use under pavement to increase street tree rooting volumes. *Journal of Arboriculture* 22 (6), 255-263.
- Grimm, K., Murer, E., Schmidt, S. (2021): Das Schwammstadt-Prinzip für Stadtbäume in Österreich. In: ÖWAV, Tagungsband Aqua Urbanica 2021, Innsbruck.
- Guo, M., Song, W., Tian, J. (2020): Biochar-Facilitated Soil Remediation: Mechanisms and Efficacy Variations. *Front. Environ. Sci.*, 8, 521512.
- Hagedorn, F., Bundt, M. (2002): The age of preferential flow paths. *GEODERMA* 108 (1-2), 119-132.
- Haile, T.M., Fürhacker, M. (2018): Simultaneous Adsorption of Heavy Metals from Roadway Stormwater Runoff Using Different Filter Media in Column Studies. *Water*, 10, 1160.
- Hartmann, N.; Bucheli, T.D.; Schmidt, H.-P.; Kägi, R.; Böhler, M.; McArdeell, C. (2019): Aktivkohle – Made in Switzerland! *Aqua & Gas*, 1:32-38.
- Heidger, C. (2002): Wurzeln sind lenkbar! Optimierungsmöglichkeiten im Wurzelraum von Straßenbäumen. Tagungsband der 20. Osnabrücker Baumpflege 2002.
- 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.
- Hermann, F. (2010): Dicke Filter mit grossen Löchern – Numerische Simulation von Raumfiltern, Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL) Zürich.
- Hörnschemeyer, B., Kramer, S., Henrichs, M., Uhl, M. (2019): Verdunstung als Zielgröße wassersensitiver Stadtplanung, *KA Korrespondenz Abwasser, Abfall* (66), 911-918.
- 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.
- Jachomowski, I. (o.J.): Tiefwurzler: Welche Bäume gehören dazu. Abgerufen am 19. Januar 2021 von <https://www.gartenjournal.net/tiefwurzler-baeume>.
- Kadereit J. W., Körner Ch., Kost B, Sonnewald U., Strasburger (2014) *Lehrbuch der Pflanzenwissenschaften*, Springer Spektrum Berlin, Heidelberg.
- Karup, D., Moldrup, P., Paradelo, M., Katuwal, S., Norgaard, T., Greve, M.H., de Jonge, L.W. (2016): Water and solute transport in agricultural soils predicted by volumetric clay and silt contents; *Journal of Contaminant Hydrology* 192 (2016) 194–202.
- Kasting, U. (2002): Reinigungsleistung von zentralen Anlagen zur Behandlung von Abflüssen stark befahrener Strassen, Diss. Universität Kaiserslautern.
- Kiermeier, P. (1995): Die Lebensbereiche der Gehölze: Eingeteilt nach dem Kennziffersystem. 3. überarb. Aufl., Thalacker-Medien, Braunschweig.
- 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.
- Klaus, G. (02 2014): Lecks im Kreislauf - Stickstoff als Umweltproblem. *Umwelt - Natürliche Ressourcen in der Schweiz*, 5-6.

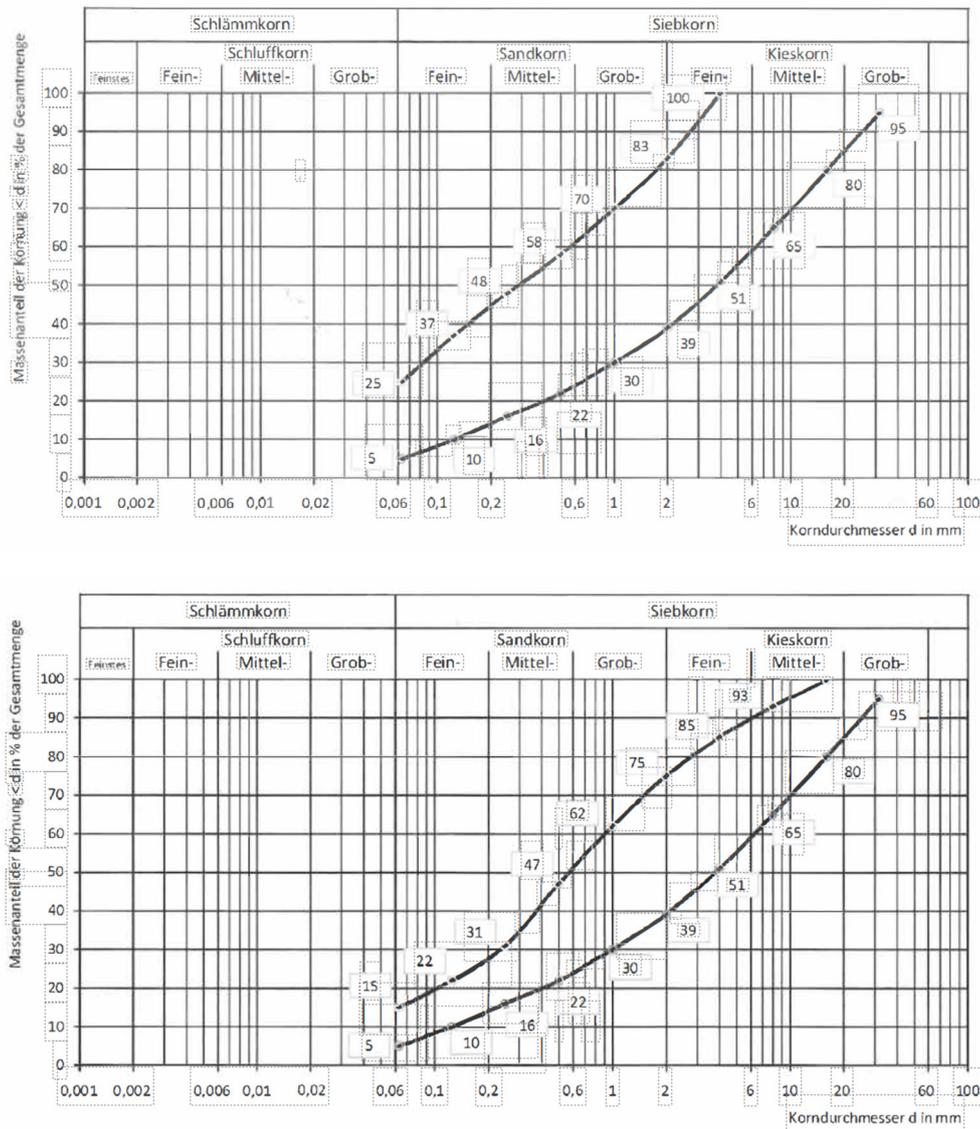
- Klemisch, M. (2017): Sind Stadtbäume in standardisierten Substraten unterversorgt? Deutsche Baumpflegetage, Augsburg.
- Knechtenhofer, L. A., Xifra, I. O., Scheinost, A.C., Flühler, H., Kretzschmar, R. (2003): Fate of heavy metals in a strongly acidic shooting-range soil: small-scale metal distribution and its relation to preferential water flow. *J. Plant. Nutr. Soil Sci.* 166, 84-90.
- Kolb, M. (2020): Mikroplastik und Reifenabrieb in Gewässern - Zustandsanalyse des Holder- und Chatzenbachs und Betrachtung eines Autobahnabschnittes und dessen Entwässerung in den Laichsee. Maturaarbeit, HSR Hochschule für Technik Rapperswil.
- Krieter, M., Malkus, A. (1996): Untersuchungen zur Standortoptimierung von Strassenbäumen. Bonn: Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung und Landschaftsbau e.V. (Hrsg.).
- KURAS (2017): Konzepte für urbane Regenwasserbewirtschaftung und Abwassersysteme. Ökologischer Stadtplan als Loseblatt-Sammlung. Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Wohnen Berlin.
- Lange, J., Olsson, O., Jackisch, N., Weber, T., Hensen, B., Zieger, F., Schuetz, T., Kümmerer, K. (2017): Urbane Regenwasserversickerung als Eintragspfad für biozide Wirkstoffe in das Grundwasser? *Korrespondenz Wasserwirtschaft*, 10(4):198-202.
- Larcher, W. (2001): Ökophysiologie der Pflanzen: Leben, Leistung, und Stressbewältigung der Pflanzen in ihrer Umwelt. 6 Aufl., Eugen Ulmer: Stuttgart.
- Legret M., Colandini, V., Pagotto, C., Jullien, A. (2007): The Quality of Infiltrated Water through Porous and Conventional Asphalt Pavements. *Road Materials and Pavement Design*, 8(4): 617-641.
- Lehmann, J. (2007): Bio-energy in the black. *Frontiers in ecology and the environment*, 5, 381-387.
- Lehmann, J., Joseph, S. (2015): Biochar for environmental management – science, technology and implementation. London: Earthscan from Routledge.
- Liang, B., Lehmann, J., Solomon, D., Kinyangi, J., Grossman, J. (2006): Black carbon increases cation exchange capacity in soils. *Soil Science Society of America Journal* 70 (5), 1719-1730.
- Lorenz von Ehren (2020): Der Klimabaum-Hain: 70 Baumarten im Vergleich. <https://www.lve-baumschule.de/pflanzen/klimabaeume>.
- Malek, J., Molitor, W., Pessler, K., Wawrik, H. (1999): Der Baumpfleger. Ulmer. Stuttgart.
- de Matos, A.T., M.P.F. Fontes, L.M., da Costa, Martinez, M.A. (2001): Mobility of heavy metals as related to soil chemical and mineralogical characteristics of Brazilian soils. *Environmental Pollution*, 111(3) 429-435.
- Meyer, M. (2017): Standortsspezifisch differenzierte Erfassung atmosphärischer Stickstoff- und Schwermetalleinträge mittels Moosen unter Berücksichtigung des Trauffeffektes und ergänzende Untersuchungen zur Beziehung von Stickstoffeinträgen und Begleitvegetation. Dissertation, Universität Vechta.
- Mitchell, A. R., Ellsworth, T. R., Meek, B. D. (1995): Effects of root systems on preferential flow in swelling soil. *Commun. Soi. Sci. Plant. Anal.*, 26(15&16), 2655-2666.
- Monning, E. (2018): Gartenwissen: Flachwurzler. Abgerufen am 24. Januar 2021 von <https://www.mein-schoener-garten.de/gartenpraxis/ziergaerten/was-sind-flachwurzler-35001>.
- Murtaza, G., Ahmed, Z., Usman, M., Tariq, W., Ullah, Z., Shareef, M., Iqbal, H., Waqas, M., Tariq, A., Wu, Y., Zhang, Z., Ditta, A. (2021): Biochar induced modifications in soil properties and its impacts on crop growth and production. *Journal of Plant Nutrition*, 1–15.

- ÖNORM B 2506 – 1 (2016): Regenwasser-Sickeranlagen für Abläufe von Dachflächen und befestigten Flächen - Anwendung, hydraulische Bemessung, Bau und Betrieb. ÖNORM B 2506-1: 2013 08 01.
- ÖNORM B 2506 – 2 (2012): Regenwasser-Sickeranlagen für Abläufe von Dachflächen und befestigten Flächen – Teil 2: Qualitative Anforderungen an das zu versickernde Regenwasser sowie Anforderungen an Bemessung, Bau und Betrieb von Reinigungsanlagen. ÖNORM B 2506-2: 2012 11 15.
- ÖNORM B 2506 – 3 (2018): Regenwasser-Sickeranlagen für Abläufe von Dachflächen und befestigten Flächen – Teil 3: Filtermaterialien – Anforderungen und Prüfmethode. ÖNORM B 2506-3: 2018 07 15.
- ÖWAV (2016): ÖWAV-Regelblatt 407 - Empfehlungen für die Bewässerung. Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband (ÖWAV), Wien.
- Pazeller, A., von Känel, Ch., Steiner, M., Rutz, F., Kulli Honauer, B. (2017): Vergleich der Eignung von bewachsenen Boden- und Sandfiltern zur Reinigung von Strassenabwasser, Forschungsprojekt VSS 2011/204 auf Antrag des Schweizerischen Verbandes der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS).
- Payne, E., Hatt, B., Deletic, A., Dobbie, M., McCarthy, D., Chandrasena, G. (2015): Adoption Guidelines for Stormwater Biofiltration Systems. Cooperative Research Centre for Water Sensitive Cities, Melbourne, Australia. [https://watersensitivecities.org.au/wp-content/uploads/2016/09/Adoption\\_Guidelines\\_for\\_Stormwater\\_Biofiltration\\_Systems.pdf](https://watersensitivecities.org.au/wp-content/uploads/2016/09/Adoption_Guidelines_for_Stormwater_Biofiltration_Systems.pdf)
- Philadelphia Water Department (2018): Green Stormwater Infrastructure: Landscape Design Guidebook. Version 3.0. Philadelphia Water Department.
- Philip J.R (1969): Theory of infiltration. *Advances in Hydroscience* 5:215-296.
- Piguet P., Parriaux, A., Bensimon, M. (2008): The diffuse infiltration of road runoff: An environmental improvement. *Science of the Total Environment*, 397, 13-23.
- Polukarov, M., Markiewicz, A., Björklund, K., Strömvall, A.M., Galfi, H., Andersson Sköld, Y., Gustafsson, M., Järleskog, I., Aronsson, M. (2020): Organic pollutants, nano- and microparticles in street sweeping road dust and washwater. *Environment International*, 135:105337.
- Ramin, S., Sonderegger, M. (05.01 2017): Interview mit den Verantwortlichen der Stadt Basel. (A. Saluz, & A. Heinrich, Interviewer).
- Rehfeld-Klein, M. (2021): Bäume in Versickerungsmulden – Impuls zum Regelungsrahmen. Vortrag am BGS-Workshop, online, 10.6.2021.
- Renger, M., Bohne, K., Facklam, M., Harrach, T., Riek, W., Schäfer, W., Wessolek, G., Zacharias, S. (2008): Ergebnisse und Vorschläge der DBG-Arbeitsgruppe „Kennwerte des Bodengefüges“ zur Schätzung bodenphysikalischer Kennwerte. Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft DBG.
- Rust, S., & Roloff, A. (2008): Die Auswirkungen des Klimawandels auf die Stadtbäume. *Jahrbuch der Baumpflege*, S. 40-47.
- Ruyschaert, G., Niessen, V., Postma, R., Bruun, E., O'Toole, A., Hammond, J., Shackley, S. (2015): Field applications of pure biochar in the North Sea region and across Europe. In S. Shackley, G. Ruyschaert, K. Zwart, B. Glaser: *Biochar in European Soils and Agriculture: Science and Practice*. Oxford: Earthscan from Routledge, S. 99-131.
- Saluz, A. (2017): Entwicklung eines strukturstabilen Stadtbaumsubstrates mit Pflanzenkohle. Forschungsbereich Urbane Ökosysteme. Forschungsgruppe Pflanzenverwendung der Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften ZHAW.

- Semida, W.M., Beheiry, H.R., Sétamou, M., Simpson, C.R., Abd El-Mageed, T.A., Rady, M.M., Nelson, S.D. (2019): Biochar implications for sustainable agriculture and environment: A review. *South African Journal of Botany* 127, 333–347.
- Senatsverwaltung (2021): Hinweisblatt 2 zur Antragstellung: Versickerung von Niederschlagswasser mit Anlagen. Senatsverwaltung für Umwelt, Mobilität, Verbraucher- und Klimaschutz, Berlin. <https://www.berlin.de/sen/uvk/umwelt/wasser-und-geologie/publikationen-und-merkblaetter/>
- Schachtschabel, P., Blume, H.-P., Brümmner, G. W., Hartge, K. H., Schwertmann, U. (1992)::Lehrbuch der Bodenkunde. 13. Auflage.
- Schmidt, H. (2011): Wege zu Terra Preta - Aktivierung von Pflanzenkohle. *Ithaka Journal*, 28-32.
- Schmidt, S. (2013): Die Schönbrunner Mischung. HBLFA Schönbrunn, Schönbrunner Gartenblatt, 1-6.
- Schönborn, A., Krähenbühl, N., Saluz, A., Bleuler, M. (2021): Abschlussbericht Biokohle für Stadtbäume. UTF 570.28.17, Bundesamt für Umwelt (BAFU), Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften (ZHAW).
- Schönfeld, P., Herrmann, J., Körber, K., Böll, S. (2015): Baumsubstrate und Nährstoffe, alles im Lot? Substratuntersuchungen im Projekt "Stadtgrün 2021". *Veitshöchheimer Berichte* 173, 49-57.
- Schönfeld, P. (2017): Baumsubstrate - Spektrum der Substrate in der Stadtgrünpraxis.
- Schubert, L. (2021): Beurteilung der Eignung von einheimischen und fremdländischen Baumarten im urbanen Raum und Ermittlung ihrer Kühlleistung sowie ihrer Trockenstressverträglichkeit mithilfe baumphysiologischer Messungen. Masterarbeit ZHAW, Wädenswil.
- Sieber, R., Kaweck, D., Nowack, B. (2019): Dynamic probabilistic material flow analysis of rubber release from tires into the environment. *Environmental Pollution*, 113573.
- SN EN ISO 22476-2:2012-03 (2012): Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Felduntersuchungen - Teil 2: Rammsondierungen. DIN Deutsches Institut für Normung, Berlin.
- SN 640 677 (2000): Alleebäume. Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute, Zürich.
- SN 640 678a (2003): Alleebäume - Baumartenwahl. Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute, Zürich.
- Stamm, C., Flühler, H., Gächter, R., Leuenberger, J., Wunderli, H. (1998): Preferential Transport of Phosphorus in Drained Grassland Soils. *Journal of Environmental Quality*, 27:515-522.
- Streckenbach, M. (2009): Interaktionen zwischen Wurzeln und unterirdischer technischer Infrastruktur – Grundlagen und Strategien zur Problemvermeidung. Dissertation. Ruhr- Universität Bochum.
- 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.
- Steinel, A., Houben, G., Himmelsbach, T. (2012): Auswirkungen auf das Grundwasser. In Mosbrugger, V., Brasseur, G., Schaller, M., Stribney, B. (Hrsg.): Klimawandel und Biodiversität – Folgen für Deutschland, 57-90.
- Stollhoff, K. (2009): Planung eines ökologischen Abwasserkonzeptes am Beispiel des Ökologischen Kulturzentrums Kesselberg e.V., Diplomarbeit, Universität Berlin.
- TBA ZH (2021): Persönliche Mitteilung. Tiefbauamt Kanton Zürich.
- Tian, Z. et al (2020): A ubiquitous tire rubber-derived chemical induces acute mortality in coho salmon. *Science* 371, 185-189.

- Zehnsdorf, A., Trabitze, R. (2019): Zum Thema Sumpfpflanzendächer: Projekt Forschungsgründach. UFZ Zentrum für Umweltforschung, Leipzig.
- Verband der Humus- und Erdenwirtschaft (2015): Kompost für Stadtbäume; Anforderungen an Baumsubstrate in bodenversiegelter Umgebung. Aachen.
- VSA (2019a): Abwasserbewirtschaftung bei Regenwetter. Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute, Glattbrugg, Schweiz.
- VSA (2019b): Merkblatt - VSA Leistungsprüfung für Behandlungsanlagen. Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute, Glattbrugg, Schweiz.
- Wagner, S., Hüffer, T., Klöckner, P., Wehrhahn, M., Hofmann, T., Reemtsma, T. (2018): Tire wear particles in the aquatic environment - a review on generation, analysis, occurrence, fate and effects. *Water Res.*, 139:83-100.
- Wang, J., Shi, L., Zhai, L., Zhang, H., Wang, S., Zou, J., Shen, Z., Lian, C., Chen, Y. (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.
- Warnock, D., Lehmann, J., Kuyper, T., Rillig, M. (2007): Mycorrhizal responses to biochar in soil - concepts and mechanisms. *Plant and soil*, 300, 9-20.
- 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.
- Weiss, M. (2015): Nachhaltiges Management von Stadtbäumen zur Optimierung der Lebenserwartung und der Vitalität. Masterarbeit ZHAW, Wädenswil.
- Wicke, D., Matzinger, A., Sonnenberg, H., Caradot, H., Schubert, R.-L., Rouault, P., Heinzmann, B., Dünnebier, U., von Seggern, D. (2017): Spurenstoffe im Regenwasserabfluss Berlins. *KA Korrespondenz Abwasser, Abfall*, 5:394-404.
- Wicke, D., Matzinger, A., Rouault, P., Burkhardt, M., Rohr, M., Patrick, P., Töws, R., Steinweg, F., Leusmann, J., Gerwing, T. (2022): Neue Maßnahmen zur Reduzierung der Gewässerbelastung durch Spurenstoffe aus urbanem Regenwasserabfluss. Abschlussbericht, DBU-Forschungsprojekt.
- Werkenthin, M., Kluge, B., Wessolek, G. (2014): Metals in European roadside soils and soil solution - A review. *Environmental Pollution* 189 (2014) 98-110.
- Yuan, C., Gao, B., Peng, Y., Gao, X., Fan, B., Chen, Q. (2021): A meta-analysis of heavy metal bioavailability response to biochar aging: Importance of soil and biochar properties. *Science of The Total Environment* 756, 144058.
- ZTV-Vegtra-Mü (2016): Zusätzliche Technische Vorschriften für die Herstellung und Anwendung verbesserter Vegetationstragschichten. Landeshauptstadt München, Baureferat HA Gartenbau, München.
- Zuber, R. (2007): Streusalz: Auswirkungen auf die Stadtbäume und Gegenmassnahmen - Literaturstudie. Chur: Stadt Chur Gartenbauamt.

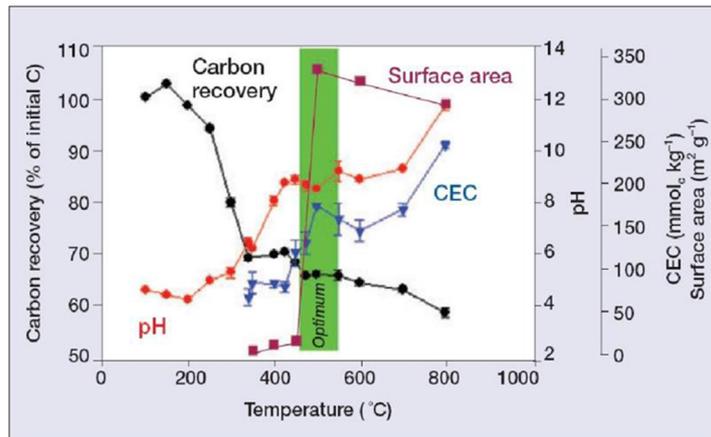
# 11. Anhang



**Abbildung 25:** Sieblinienbereiche für nicht überbaubare Substrate (A, oben) und überbaubare Substrate (B, unten).

**Tabelle 13:** Körnung,  $k_f$  und  $s_{spezif}$  für die vier in Kapitel 3.2 dargestellten Bodenarten.

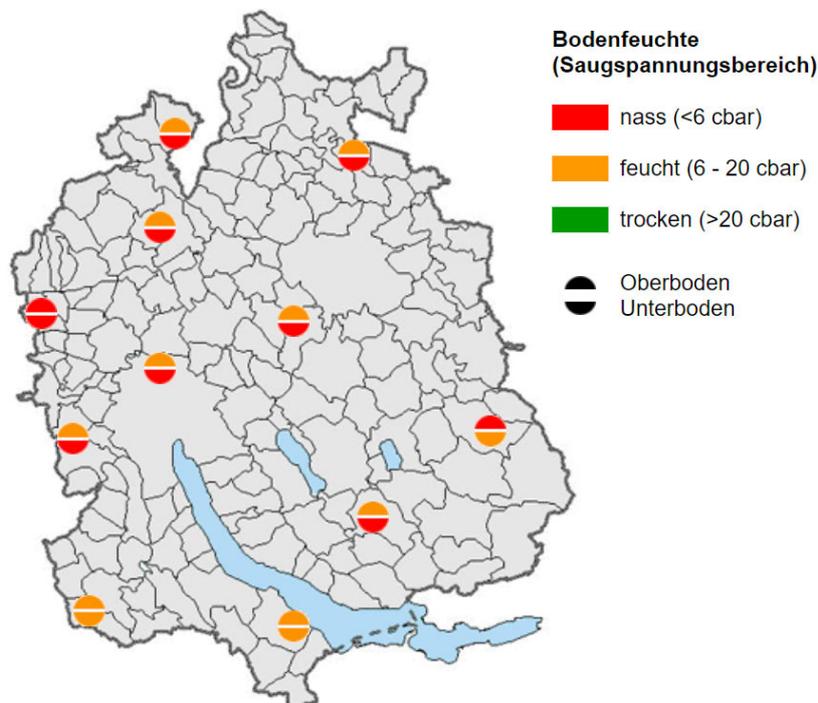
Bodenart nach DBG Dichte=1.5 kg/L	Ton	Schluff % Masse	Sand	$k_f$ cm/Tag	$s_{spez}$ mm/min
Sl2	5-8	10-25	67-85	100	0.35
St2	5-17	0-10	73-95	120	0.42
Slu	8-17	40-50	33-52	40	0.14
Ls4	17-25	15-30	45-68	40	0.14



**Abbildung 26:** KAK, Oberfläche, PH-Wert und C-Gehalt während des Pyrolyse-Prozesses. In Grün das Optimum bei ca. 450-600 Grad Celsius (Lehmann, 2007).

### 11.1. Weitere Informationen zur Bodenfestigkeit

Verschiedene Kantone bieten Tensiometer-Messnetze an, die für bestimmte Standorte Saugspannungswerte für den Ober- und Unterboden zeigen. Diese können Anhaltspunkte für den aktuellen Bodenzustand sein, sollten aber nicht beliebig auf andere Standorte übertragen werden, da die Saugspannung standortabhängig ist und nebst dem Boden auch die Exposition, die Vegetation und das Wetter eine Rolle spielen. Abbildung 27 zeigt das Messnetz Bodenfeuchte des Kanton Zürich. Mit Tensiometern lässt sich die Saugspannung messen, solange hydraulischer Kontakt zur Bodenmatrix besteht (bindige Böden).

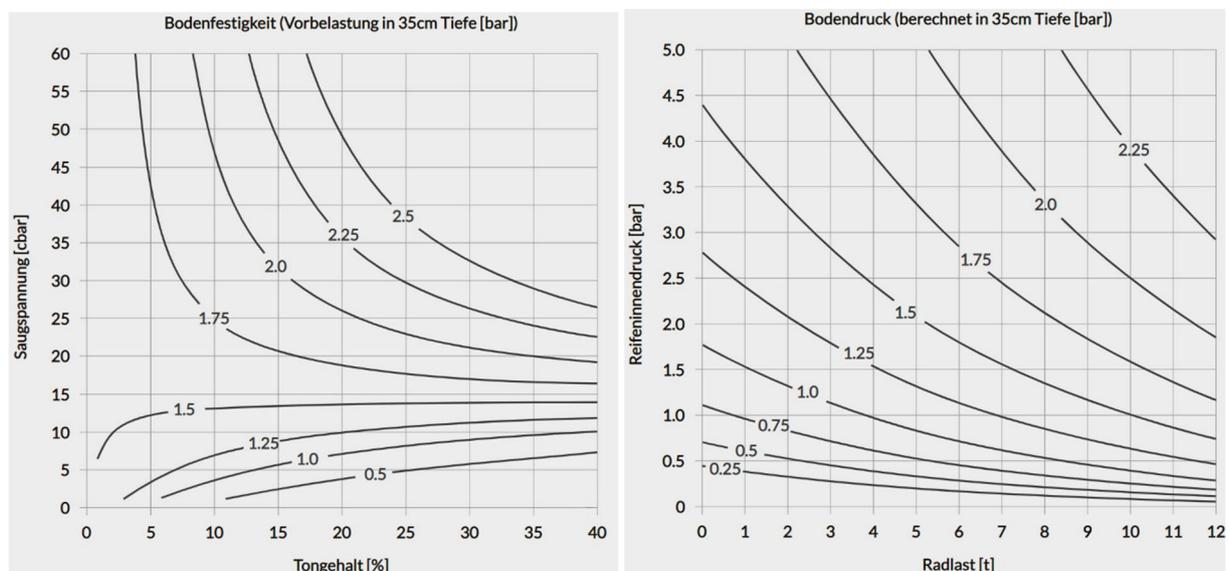


**Abbildung 27:** Tensiometer-Messnetz im Kanton Zürich (Quelle: Messnetz Bodenfeuchte | Kanton Zürich (zh.ch) abgerufen am 18.3.2022).

Die Legende von Abbildung 27 enthält ein Ampelsystem, das sich auf das Befahren und Bearbeiten von Böden bei den unterschiedlichen Saugspannungen bezieht. Eine Saugspannung > 20 cbar wird als ideal für Bodenarbeiten eingestuft und < 10 cbar ist darauf zu verzichten, < 6 cbar sogar auf jegliche Bodenarbeiten zu verzichten. Bei einem Tongehalt > 30 % verschärfen sich die Empfehlungen und Befahrungen sind erst > 20 cbar gestattet. Dies ist eine erste grobe Faustregel, die aber die genaue Zusammensetzung des Bodens und vor allem auch das Maschinengewicht und den Kontaktflächendruck (Bodenpressung) nicht berücksichtigt. Somit kann damit nicht abgeschätzt werden, ob bei einer bestimmten Saugspannung gewisse Maschinen evtl. schon zum Einsatz kommen dürfen und auf andere auf jeden Fall noch zu verzichten ist.

Eine genauere Einschätzung über die Wahl möglicher Maschinen liefern die Nomogramme in Abbildung 28. Das Nomogramm in Abbildung 4 zeigt die Tragfähigkeit (Bodenfestigkeit) in kPa für eine Tiefe von 35 cm in Abhängigkeit vom Tongehalt und der Saugspannung (links) und den Bodendruck, der bei einem Radfahrzeug je nach Radlast und Reifendruck eine bestimmte Tiefe erreicht (rechts). Übersteigt der durch das Fahrzeug in der betreffenden Tiefe wirkende Druck die Bodenfestigkeit, ist von einer Schädverdichtung auszugehen.

Bodenverdichtung ist vor allem im Unterboden ein Problem, weil dort nicht wie im Oberboden durch biologische (Wurzelwachstum, Regenwurmaktivität) und physikalische Prozesse (Gefrieren und Tauen, Quellen und Schrumpfen) mit der Zeit wieder eine Lockerung eintritt.

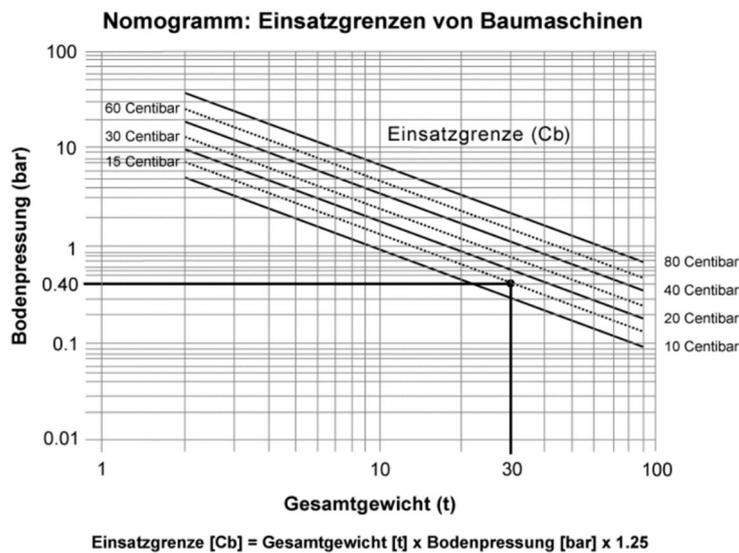


**Abbildung 28:** Nomogramme zur Bestimmung der Bodenstabilität und Druckbelastung in 35 cm Tiefe (Quelle terranimo.ch). Oben: Nomogramm zur Bestimmung der Bodenstabilität in Abhängigkeit des Tongehalts und der Saugspannung. Die Linien bezeichnen die Bodenfestigkeit in für einen Boden in 35 cm Tiefe in kPa. Unten: Nomogramm zur Bestimmung des Drucks, der in Abhängigkeit der Radlast und des Reifendruckes eines Radfahrzeugs in 35 cm Tiefe ankommt in kPa.

Für Raupenfahrzeuge gibt es ein ähnliches Hilfsmittel (Abbildung 29), welches anhand der Radlast und Bodenpressung einer Baumaschine die Bestimmung der nötigen Saugspannung für eine Befahrung ermöglicht (BFE, 1997). Die Bodenpressung (Kontaktflächendruck) wird errechnet durch die Masse der Baumaschine mal Erdbeschleunigung geteilt durch die Standfläche. Sie kann in Pascal oder Bar angegeben werden, gelegentlich wird auch die Einheit kg/cm<sup>2</sup> verwendet, was zwar keine Druckeinheit ist, aber einfacher berechnet werden kann und einem Bar entspricht. Was das Nomogramm nicht berücksichtigt, ist der Einfluss des Tongehalts auf die Verdichtungsempfindlichkeit des Bodens. Diese

Brücke schlägt Tabelle 14, die das bereits aus Abbildung 27 bekannte Ampelsystem für die Saugspannung in 35 cm Tiefe zeigt, aber zusätzlich für feinkörnige Böden eine Korrektur von +10 cbar für die aus dem Nomogramm abgelesenen Werte festlegt (Quelle: Bodenmessnetz Nordwestschweiz)<sup>16</sup>.

Auch bei Einhaltung der Grenzwerte für die Befahrung ist Vorsicht geboten. Nicht immer ist beispielsweise das Gewicht einer Maschine gleichmässig auf die Räder oder Raupen verteilt. Zudem können bei dynamischen Manövern zusätzliche Kräfte wirken oder zusätzliche Effekte wie Verscherung oder Verschmierung zur reinen Bodenverdichtung dazu kommen. Und natürlich muss für die Berechnung des Maschinengewichts und der Bodenpressung die Masse einer Last oder Ladung ebenfalls berücksichtigt werden.

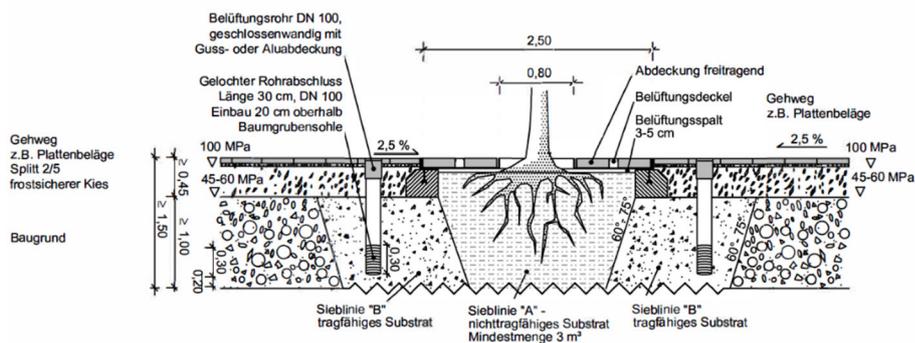
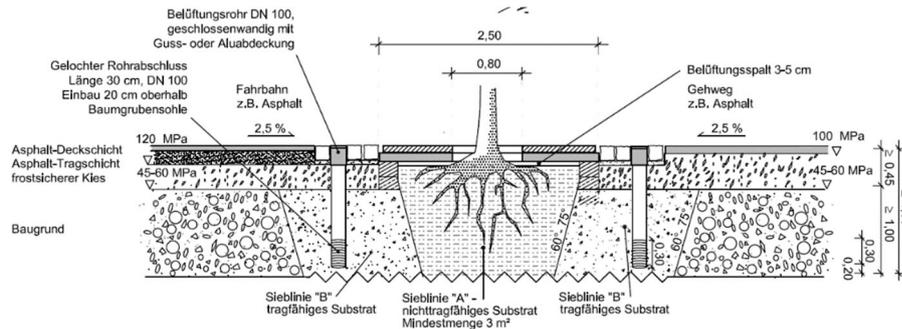
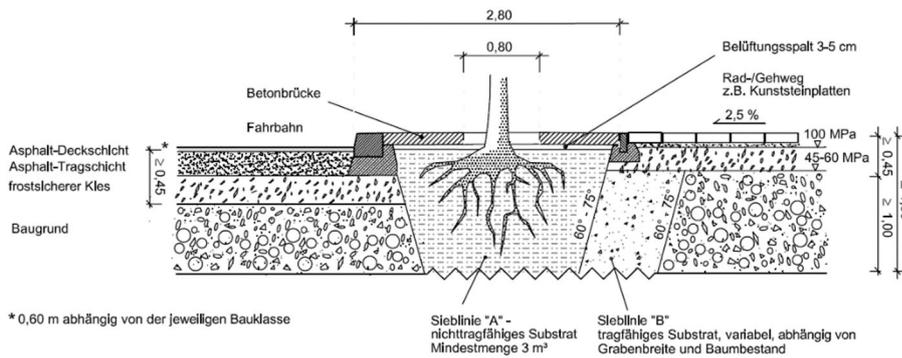
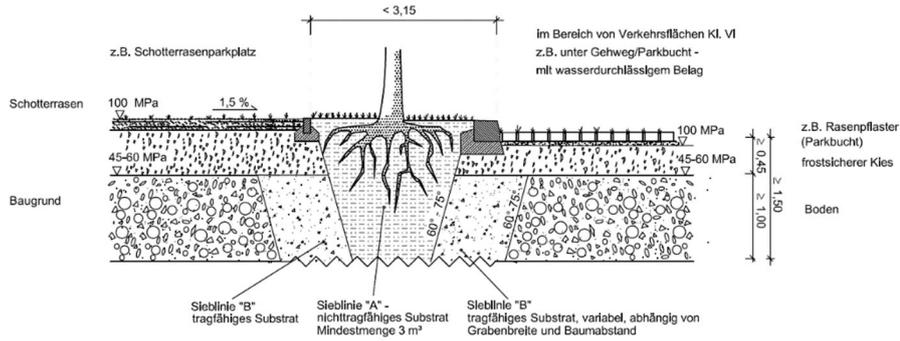
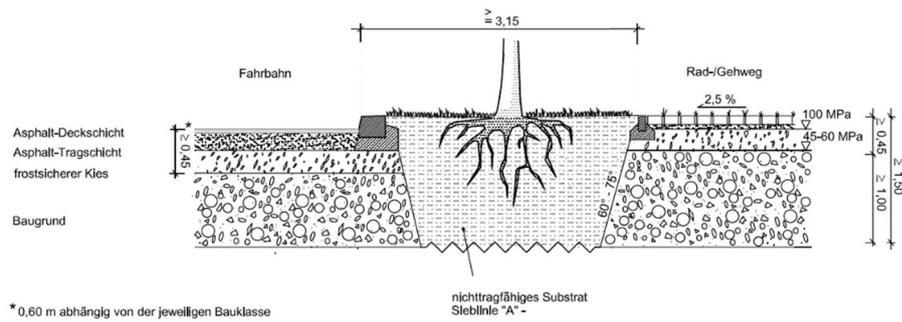


**Abbildung 29:** Nomogramm zur Bestimmung der nötigen Saugspannung für die Befahrung mit eine, Raupenfahrzeug in Abhängigkeit vom Gesamtgewicht der Maschine und der Bodenpressung. Eingezeichnet ist das Beispiel einer Maschine mit einem Gewicht von 30 t und einer Pressung von von 0.4 bar, für deren Einsatz gemäss Diagramm eine Saugspannung von 15 cbar nötig wäre (BFE, 1997).

**Tabelle 14:** Saugspannungsbereiche und mögliche Bodenarbeiten in Abhängigkeit von der Bodenart und dem Skelettgehalt (Bodenmessnetz Nordwestschweiz).

Saugspannung in 35 cm Tiefe	Tongehalt > 30 %	Schwere Böden (Tongehalt > 30 Masse-% und Steingehalt < 50 Vol.%)
> 20 cbar "trocken"	Befahren frei für alle Fahrzeuge unter Einhaltung der Nomogramm-Werte	Erforderlicher Saugspannungswert für schwere Böden: Werte gemäss Nomogramm + 10 cbar
10–20 cbar "feucht"	Befahren frei für Fahrzeuge mit Raupen, Niederdruckreifen oder Traktor-Doppelrädern unter Einhaltung der Nomogramm-Werte	Minimalwerte zum Befahren: 20 cbar Erforderlicher Saugspannungswert für schwere Böden: gemäss Nomogramm + 10 cbar Kein Befahren für Pneufahrzeuge mit Normalreifen
6–10 cbar "sehr feucht"	Kein Befahren Erbewegungen (ohne Befahren des Bodens) ab 6 cbar möglich	Kein Befahren Erbewegungen (ohne Befahren des Bodens) ab 15 cbar möglich
< 6 cbar "nass"	Kein Befahren und keine Erdarbeiten	

## 11.2. Beispiele für FLL-Baumgruben



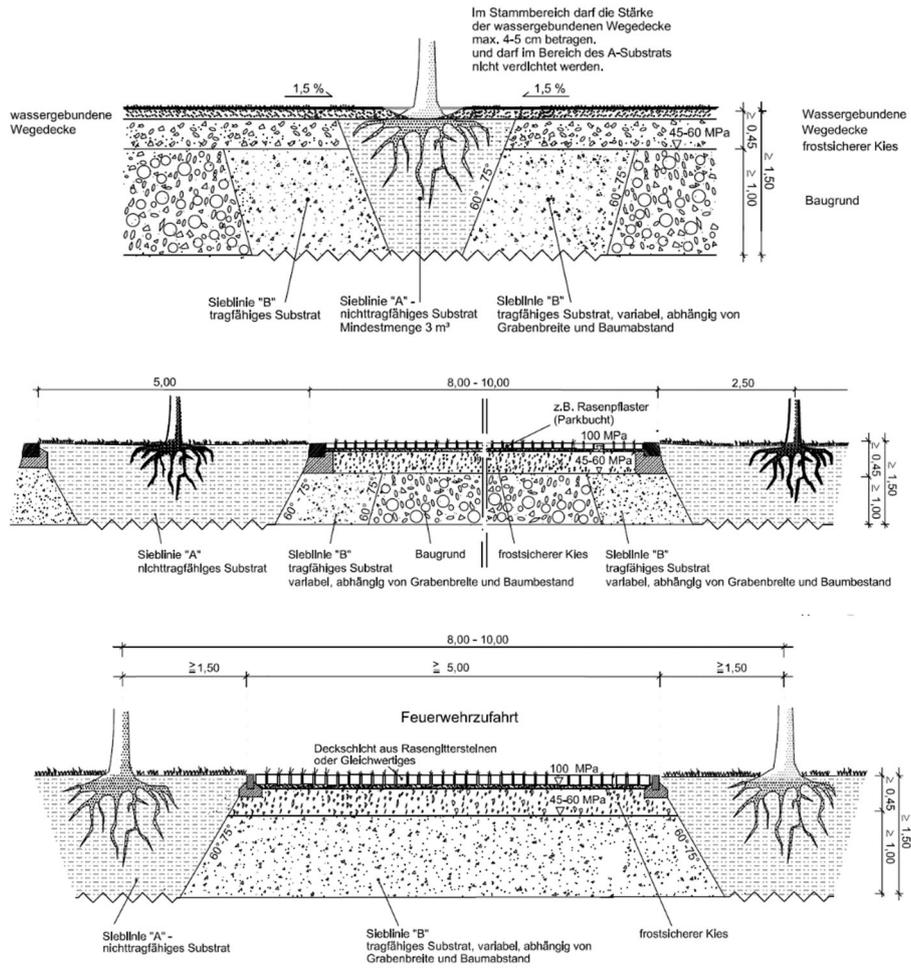
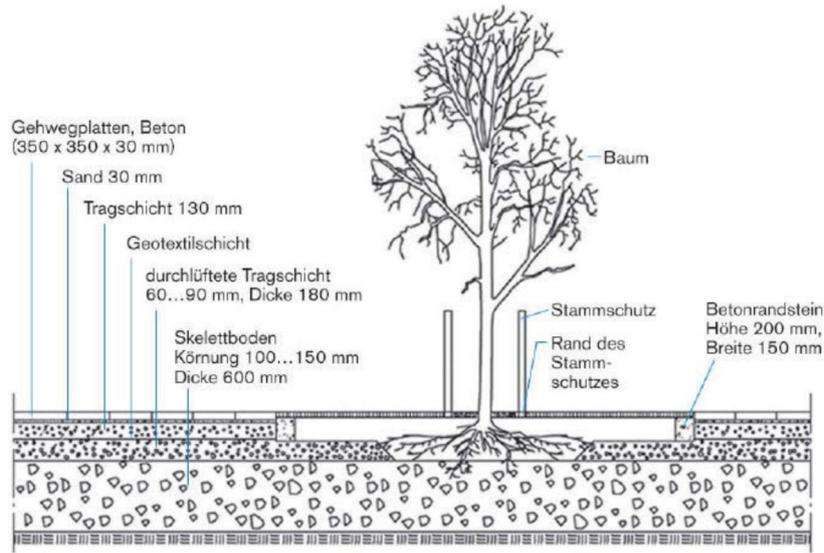
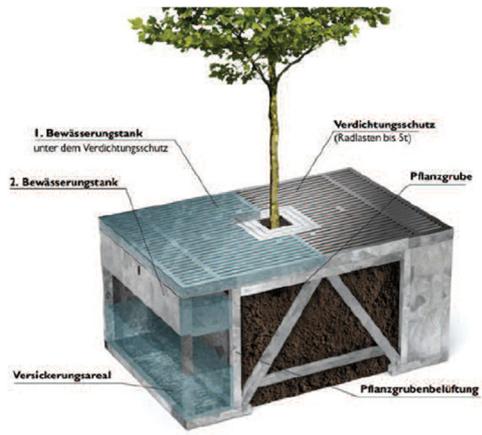


Abbildung 30: Beispiele von Pflanzgruben gemäss FLL (FLL, 2010).



### Structural soil with biochar

A method for building with stability and to create good growing conditions for trees in paved areas with the use of stormwater and the added value of decreasing the risk of roots damaging paving or underground pipes



FHK 150311

1. Paved surface with dished stormwater gutters
2. Geotextile
3. Leveling layer (crushed rock 8-16 mm) – also used for concrete bunker and water/air inlet.
4. Aerated bearing layer (crushed rock 32-63 mm)
5. Structural soil (crushed rock 100-150 mm) with fertilized biochar holed into the structural volume
6. Pure biochar on terrace
7. Concrete bunker
8. Surface grid
9. Crushed rock with fertilized biochar
10. Inlet for air and water supply

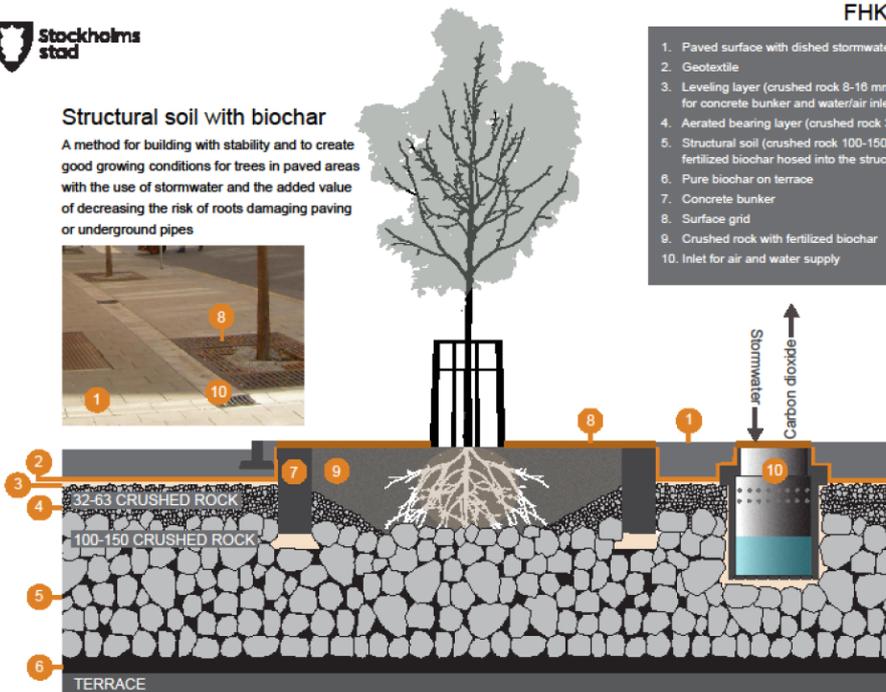


Abbildung 31: Planbeispiele von Pflanzgruben mit innovativen Ausführungen.



**Baumrigole mit gemischtem Einzugsgebiet, Hamburg (Harburg)**

- Rigole mit Substrat (ca. 50 m<sup>3</sup>, Gestaltungselement Baumscheibe Gitter, L19)
- Gemischtes Einzugsgebiet (Wege-, Platz- und Dachwasser)
- Belastung: gering, Behandlung: nein
- Notüberlauf in Kanal



**Baumrigolen mit gemischtem Einzugsgebiet, Bergkamen/DE (seit 1999)**

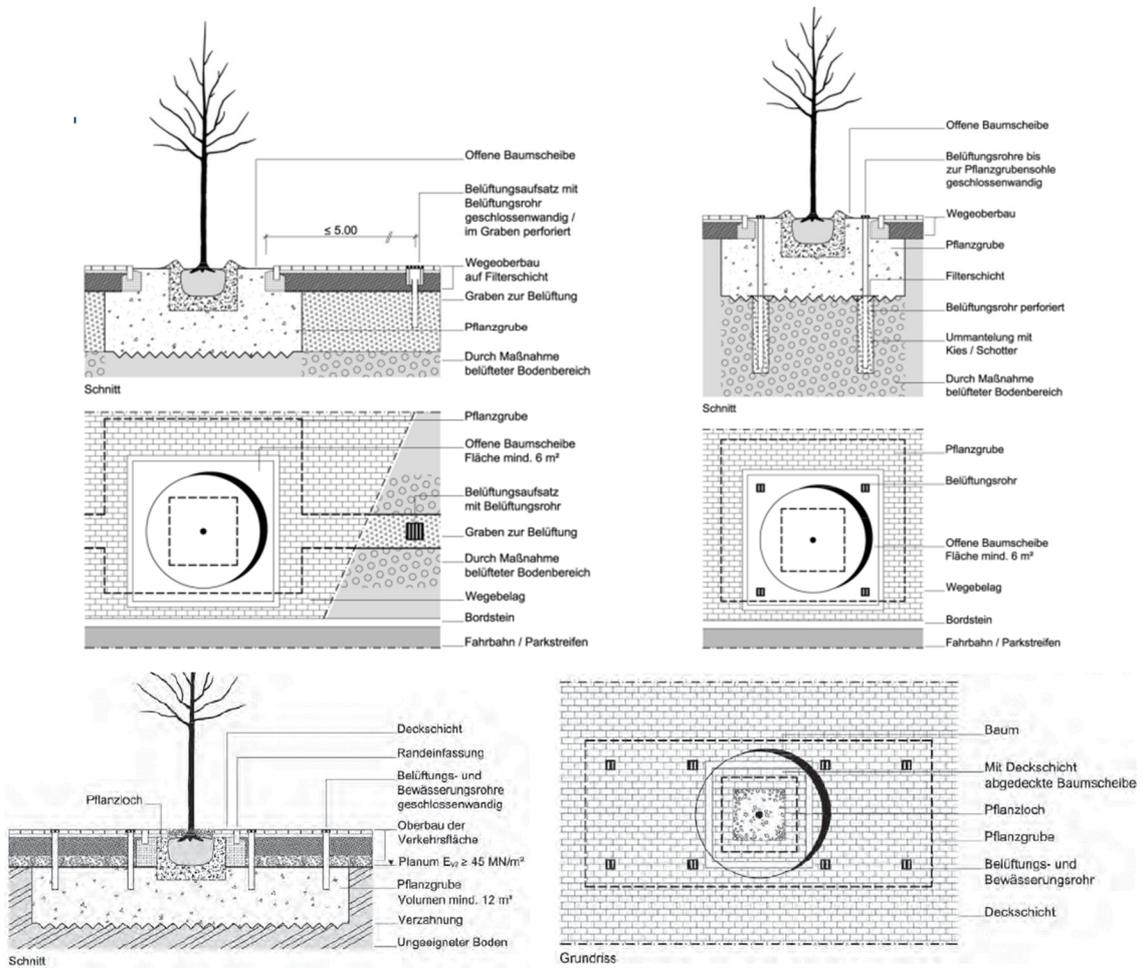
- Baumrigole mit Boden (49 m<sup>3</sup>, Gestaltungselement Baumgrube begrünt, L17)
- Gemisches Einzugsgebiet (Strasse, Dachfläche)
- Belastung: mittel, Behandlung: nein
- Notüberlauf in Kanal



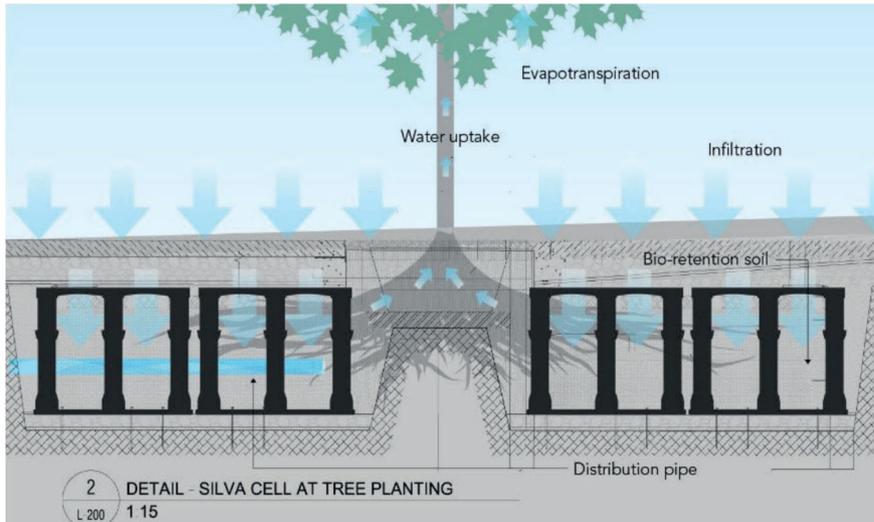
**Baumrigolen an Strassen, Hamburg (Bergedorf)**

- Rigole mit Boden (Gestaltungselement Mittelzone mit Begrünung, E13)
- Reines Strassenabwasser
- Belastung: hoch (> 15'000 DTV), Behandlung: nein
- Notüberlauf in Kanal

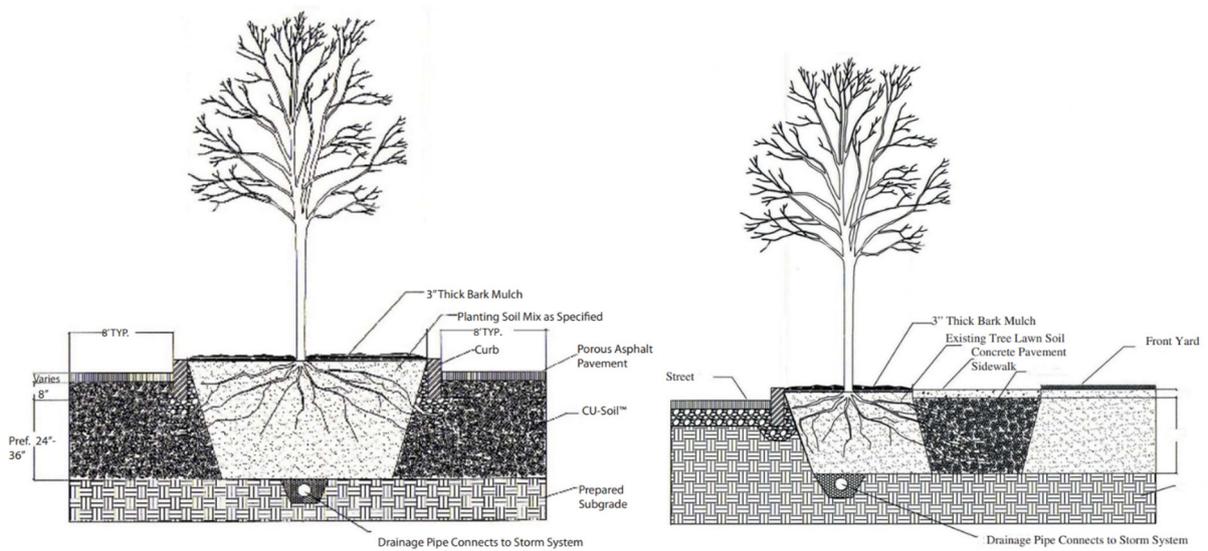
**Abbildung 32:** Ausführungsbeispiele von Pflanzgruben in Hamburg und Bergkamen.



**Abbildung 33:** Aktive Belüftungsmassnahmen und Belüftungs-Bewässerungssysteme in Pflanzgruben gemäss FLL (FLL, 2010). Link: Grabenbelüftung, rechts: Tiefenbelüftung, unten: Belüftung und Bewässerung.



**Abbildung 34:** Regenwasserableitung unter befestigten, befahrbaren Flächen mit Silva Cell Systemen<sup>17</sup>.



**Abbildung 35:** Ein Baum in einer typischen Pflanzgrube oder auf einem Parkplatz mit porösem Asphalt mit CU Structural Soil®, einem marktreifen Produkt<sup>18</sup>.

### 11.3. Gestaltungselemente und ihre Bewertung

**Tabelle 15:** Übersicht über alle Entwässerungselemente nach Kategorie und ihrer gutachterlichen Beurteilung

	Wasserspeicher	Sickerleistung	Tragfähigkeit	Strukturstabilität	Rückhalt von gelösten Stoffen	Rückhalt von partikulären Stoffen	Eignung für Belastungsklasse
<b>Künstliche Oberflächen</b>							
A-15 Platten (eingesandet)	gering	gering	hoch	hoch	gering	mittel	gering
A-16 Pflasterung (eingesandet)	gering	gering	hoch	hoch	gering	mittel	gering
A-17 verfestigte/verfestigte, sicherfähige Beläge (Sickerbeton / offenporige Beläge)	gering	mittel	mittel	mittel	gering	mittel	gering
<b>Spezialfall Rasenliner</b>							
A-18 Rasenliner / Rasengitter	gering	mittel	mittel	mittel	mittel	hoch	mittel
<b>Grobkörniges Bodenmaterial</b>							
A-22 Schotterrasen	gering	hoch	mittel	mittel	gering	mittel	gering
A-23 Ruderalflächen	gering	mittel	mittel	hoch	gering	mittel	gering
<b>Böden ohne Bäume</b>							
A-21 Rasen	mittel	hoch	gering	mittel	hoch	hoch	hoch
C-12 Versickerung / Entwässerung über die Schulter	hoch	hoch	gering	mittel	hoch	hoch	hoch
E-15 Mittelzone mit Retention (Boden) (Substrat)	mittel	hoch	gering	mittel	hoch	hoch	hoch
<b>Böden mit Bäumen</b>							
E-13 Mittelzone mit Begrünung (Boden, Substrat)	mittel	hoch	gering	mittel	mittel	hoch	mittel
L-11 Strassenbaum / Strassenhecke, Fahrbahnrand	hoch	hoch	gering	mittel	mittel	hoch	mittel
L-12 Strassenbaum / Strassenhecke, hinter Trottoir	hoch	hoch	gering	mittel	mittel	hoch	mittel
L-13 Strassenbaum / Strassenhecke, in Fahrbahnmitte	hoch	hoch	mittel	mittel	mittel	hoch	mittel
L-14 Allee / Baumreihe dichte Anordnung	hoch	mittel	mittel	mittel	mittel	hoch	mittel
L-15 Allee / Reihe lockere Anordnung	hoch	mittel	mittel	mittel	mittel	hoch	mittel
L-16 Einzelbäume / Baumgruppen	hoch	mittel	gering	mittel	mittel	hoch	mittel

	Wasserspeicher	Sickerleistung	Tragfähigkeit	Strukturstabilität	Rückhalt von gelösten Stoffen	Rückhalt von partikulären Stoffen	Eignung für Belastungsklasse
<b>Substrate ohne Bäume</b>							
L-20 Rabatte	mittel	mittel	mittel	gering	gering	hoch	gering
L-22 Rabatte mit Retentionsfunktion (einseitig)	mittel	hoch	gering	mittel	gering	hoch	gering
L-23 Rabatte mit Retentionsfunktion (beidseitig)	mittel	hoch	gering	mittel	gering	hoch	gering

#### Substrate mit Bäumen

E-13 Mittelzone mit Begrünung (Boden, Substrat)	mittel	hoch	gering	mittel	gering	hoch	gering
L-17 Baumgrube begrünt	mittel	mittel	gering	mittel	gering	hoch	gering
L-18 begehbare Baumscheibe	mittel	mittel	mittel	mittel	gering	hoch	gering
L-19 Baumscheibe Gitter / Rost	mittel	mittel	mittel	mittel	gering	hoch	gering
L-21 Rabatte mit Bäumen	mittel	mittel	mittel	mittel	gering	hoch	gering
F-15 Baumtor	hoch	hoch	gering	mittel	gering	hoch	gering
I-11 Längsparkfelder abgesetzt mit Strassenbäumen	mittel	mittel	mittel	mittel	gering	hoch	gering
I-12 Längsparkfelder abgesetzt (Parkfelder um Strassenbaum)	mittel	mittel	mittel	mittel	gering	hoch	gering
N-11 Sickerflächen	mittel	hoch	mittel	mittel	gering	hoch	gering

#### Filtermaterialien

Technische Substrate ohne Bepflanzung	hoch	hoch	gering	hoch	hoch	hoch	hoch
Technische Substrate mit Bepflanzung (Stauden, ggf. Sträucher)	hoch	hoch	gering	hoch	hoch	hoch	hoch



**Abbildung 36:** Bepflanzungen im Strassenbereich "trocken und starke Salzllast (oben) und "feucht und starke Salzllast (links unten) und "feucht und geringe Salzllast" (rechts unten).