

Laborverfahren zur Ermittlung von Standzeiten dezentraler Anlagen zur Verkehrsflächenabflussbehandlung

Maximilian Huber¹⁾, Antje Welker²⁾, Martina Dierschke²⁾ und Brigitte Helmreich¹⁾

¹⁾ Technische Universität München, Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft, Am Coulombwall 8, D-85748 Garching, b.helmreich@tum.de

²⁾ Frankfurt University of Applied Science, Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft und Hydromechanik, Nibelungenplatz 1, D-60318 Frankfurt am Main, antje.welker@fb1.fh-frankfurt.de

Kurzfassung

Das Ziel des dargestellten Forschungsvorhabens war die Entwicklung eines Laborverfahrens, um realistische Standzeiten und Reinigungsleistungen von dezentralen Behandlungsanlagen für Verkehrsflächenabflüsse sowie deren zeitliche Veränderungen in Bezug auf gelöste Schwermetalle zu ermitteln. Das Verfahren basiert auf den Prüfgrundsätzen des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) für Niederschlagswasserbehandlungsanlagen und wurde vom Bayerischen Landesamt für Umwelt (LfU) begleitet. Die Versuchsdurchführung unter reproduzierbaren Laborbedingungen sowie gleichen Randbedingungen für alle Anlagen gliedert sich in drei Versuchsteile. Im ersten Teil wird eine Vorbelastung aufgebracht, um im Zeitraffer Aussagen zur Schadstoffrückhaltekapazität der Filtersubstrate treffen zu können. Im zweiten Teil wird das zeitliche Verhalten der Anlagensubstrate anhand dreier definierter Regenspenden simuliert und im dritten Teil wird das Remobilisierungsverhalten der Schwermetalle mittels eines erweiterten Auftausalzversuches bestimmt. Die Evaluierung dieses neuen Verfahrens erfolgte anhand von Laboruntersuchungen an kommerziellen Behandlungssystemen für Verkehrsflächenabflüsse, die bereits 2012 durch das DIBt zugelassen waren. Anschließend wurden weitere Anlagen mit diesem Verfahren untersucht. Eine repräsentative Auswahl der Ergebnisse wird anhand zweier Rinnensysteme, eines Schachtsystems und eines bewachsenen Oberbodens dargestellt und erläutert. Ferner erfolgte eine Validierung der Ergebnisse anhand einer Feststoff-Feldbeprobung. Mit Hilfe dieses Verfahrens können nun realistische Standzeiten mit einer einheitlichen Methodik ermittelt werden, wodurch Behörden, Planern und Betreibern ein objektiverer Vergleich der Anlagen ermöglicht wird.

Einleitung

Niederschläge, die von Verkehrsflächen abfließen, sind oftmals mit einer Vielzahl von Stoffen (z. B. Schwermetalle und PAK) verschmutzt und bedürfen vor Einleitung ins Grundwasser oder in Oberflächengewässer einer Behandlung. In den letzten Jahren wurden zahlreiche dezentrale Behandlungsanlagen als Alternativen zu zentralen Anlagen wie Regenklärbecken bzw. Retentionsbodenfilter für Verkehrsflächenabflüsse entwickelt. Da diese erst seit wenigen Jahren verstärkt auf dem Markt sind, fehlen fundierte und flächendeckende Betriebserfahrungen zur Abschätzung der Standzeit der dezentralen Anlagen.

Die dezentralen Anlagen können für den deutschen Markt für die anschließende Versickerung in Boden und Grundwasser durch das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt) geprüft und zugelassen werden (DIBt, 2011). Das Kernstück der DIBt-Zulassungsgrundsätze für Filteranlagen ist die Wirksamkeitsprüfung. Das Rückhaltevermögen für Abfiltrierbare Stoffe sowie für Mineralölkohlenwasserstoffe wird an der Originalanlage der Hersteller geprüft. Die Prüfanordnung, die Zusammensetzung des Beschickungswassers, die Höhe und Dauer der Regenspenden, die Art der Probenahme, der Analytik und der Ergebnisauswertung werden detailliert beschrieben. Der Schwermetallrückhalt und die anschließende Salzprüfung werden an einem repräsentativen Filtermodell durchgeführt, um so wenig wie möglich schwermetallhaltiges Abwasser zu produzieren. Das Modell wird mit einer aus einer umfangreichen Literaturstudie festgelegten Schwermetalljahresfracht, die auf

drei definierte Regenspenden aufgebracht wird, beschickt. Die Anforderungen daran sowie an die anschließende Regenspende des Auftausalzversuchs sind auf die Einhaltung der Prüfwerte der deutschen Bundesbodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV, 1999) abgestimmt. Da die Vorgehensweise zur Berechnung der Standzeit derzeit noch nicht im Prüfverfahren definiert ist, ist es aktuell Praxis, dass die Hersteller die Standzeiten mittels unterschiedlicher Verfahren (z. B. Bestimmung der Kationenaustauschkapazität oder der Adsorptionskapazität bzw. durch Säulenversuche) ermitteln. Im Zulassungsverfahren werden die von den Herstellern vorgeschlagenen Standzeiten der Substrate vom DIBt, ggf. nach einer Korrektur, übernommen.

Bei der Entwicklung einer Methodik für die Standzeitbestimmung bei Filteranlagen für Verkehrsflächenabflüsse muss zunächst geprüft werden, ob der Rückhalt an Schwermetallen (Reduktion der stofflichen Rückhalteleistung) oder eine mögliche Kolmation (hydraulisches Betriebsversagen), z. B. durch Feinpartikel oder biologischen Aufwuchs, limitierend für die Standzeit ist. Dabei kann eine mögliche Kolmation nur in umfassenden und vergleichenden Feldversuchen an verschiedenen Standorten festgestellt werden, da diese vorwiegend durch eine erhöhte Feststoffbelastung sowie kolmationsfördernde Randbedingungen der Örtlichkeit bestimmt wird. Dahingegen können die Reduktion der stofflichen Rückhalteleistung, bei der meist die Rückhaltekapazität des Filtersubstrats hinsichtlich der Schwermetalle limitierend ist, und eine mögliche Remobilisierung der Schwermetalle durch Auftausalze auch in Laboruntersuchungen gut beschrieben werden. Daher war das Ziel dieses Forschungsvorhabens die zeitliche Veränderung der Rückhalteleistungen in Bezug auf den gelösten Anteil von Zink (Zn) und Kupfer (Cu) an maßstabsgetreuen Filtermodellen für dezentrale Niederschlagswasserbehandlungsanlagen für Verkehrsflächenabflüsse labortechnisch zu bestimmen. Das Forschungsprojekt wurde von der TU München in Kooperation mit der Frankfurt University of Applied Sciences durchgeführt. Anschließend wurden weitere Anlagen mit diesem Verfahren am Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft der TU München im Auftrag von Herstellern untersucht, sodass mittlerweile zu acht Anlagen sowie Oberboden Untersuchungsergebnisse vorliegen.

Neues Laborverfahren

Das Ziel des Vorhabens war die Entwicklung eines Verfahrens zur Bestimmung des stofflichen Betriebsversagens unter reproduzierbaren Bedingungen im Labor sowie gleichen Versuchsrandbedingungen für alle Anlagen.

Grundlagen

Als Grundlage des Verfahrens diente eine umfassende Literaturstudie zu repräsentativen Stoffkonzentrationen in Verkehrsflächenabflüssen (u. a. eawag, 2006; Helmreich, 2010; Kayhanian et al., 2012; Welker, 2005/2013), welche zur Berechnung der Jahresfrachten benötigt wurde. Aufgrund der Relevanz sowie aus versuchspraktischen Gründen ergaben sich die Schwermetalle Zink und Kupfer in gelöster Form als geeignete Inhaltsstoffe für das Beschickungswasser, in dem die beiden Schwermetalle als Nitratverbindungen in deionisiertem Wasser in Kombination gelöst wurden. Der pH-Wert lag zwischen 4,8 und 5,1 (Zugabe von Salpetersäure 65 %, gelöste Schwermetalle) und die Leitfähigkeit des Beschickungswassers war kleiner als 50 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Die gelösten Anteile der Jahresfrachten bezogen auf die angeschlossene undurchlässige Fläche wurden ausgehend von der eigenen Literaturstudie analog zum DIBt mit 135 mg Zn/m² und 15,5 mg Cu/m² festgesetzt.

Bei den Laboruntersuchungen wurden außerdem die relevanten Auftausalze Natriumchlorid (NaCl) und Calciumchlorid (CaCl₂) unter Verwendung von Trinkwasser herangezogen, um über eine mögliche Rücklösung von Schwermetallen Aussagen treffen zu können. Ausgehend von den gemessenen Spitzenwerten an Chlorid (ca. 7.500 mg/L) sowie den Erkenntnissen aus der Verwendung von Feuchtsalzen im Straßenwinterdienst wurden bei den Auftausalzversuchen Konzentrationen von 10 g NaCl/L und 2,5 g CaCl₂/L eingestellt. Für die im Ablauf der Anlagen einzuhaltenden Reinigungsleistungen wurden ergänzend zu den Prüfwerten der BBodSchV, die derzeit in Deutschland zum Schutz von Boden gilt, zukünftig in Deutschland eventuell zu erwartende Anforderungen (z. B. Verschärfung der Grenzwerte durch die Mantel-V, die als Verordnung u. a. Anforderungen für das Einbringen oder das Einleiten von Stoffen in das Grundwasser festlegt; aktuell Entwurf vom 31.10.2012) herangezogen.

Ferner wurden bei der Durchführung der Untersuchungen die Durchströmungsrichtungen und Arten der Behandlungsanlagen (Rinnen- oder Schachtsysteme) unterschieden und berücksichtigt. Außerdem wurden in den Frachtberechnungen die Anschlussfläche, der Modellmaßstab und die Standzeit nach Herstellerangabe berücksichtigt, sodass differenzierte Anlagenmodelle unter gleichen Versuchsrandbedingungen verwendet wurden.

Aufbau

Bei den Standzeitversuchen wurden die zu untersuchenden Systeme in geeigneten Versuchsmodellen abgebildet. Die Einfüllhöhen, die Substratmengen sowie die Einbringverfahren wurden entsprechend den Angaben der Einbauanleitungen der Hersteller sowie des Modellmaßstabs berücksichtigt. Die Anlagen wurden über eine

Pumpe aus dem Vorlagebehälter beschickt. Die Beregnungsintensitäten wurden über den Durchfluss der Pumpe gesteuert, über das Schwebekörper-Durchflussmessgerät bestimmt und über die Waage kontrolliert. Ein Beispiel für einen Versuchsaufbau ist als Fließbild in Abbildung 1 für ein Schachtsystem-Modell dargestellt.

Die Höhe des bewachsenen Oberbodens nach DWA-A 138 (2005), der aus Vergleichsgründen ebenfalls untersucht wurde, betrug 20 cm und wurde in Säulen mit 10 cm Durchmesser eingebaut. Der Rechenwert undurchlässige Fläche zu Versickerungsfläche wurde zu 15:1 festgelegt und als Standzeit wurden 20 Jahre angenommen.

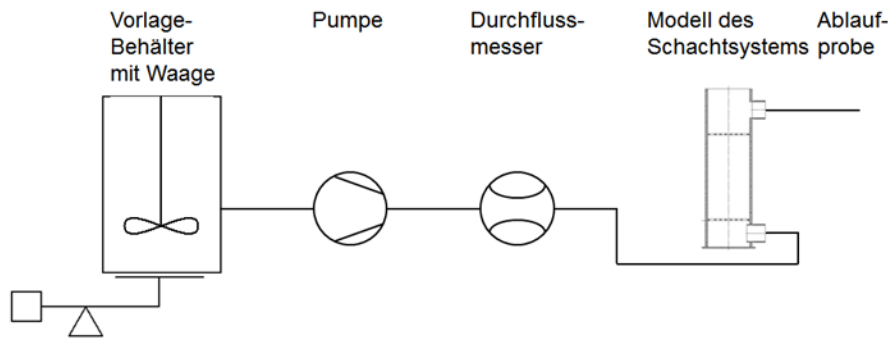


Abbildung 1: Versuchsaufbau für ein Schachtsystem – Fließbild.

Versuchsdurchführung

Das entwickelte Verfahren zur Bestimmung der Standzeit besteht aus drei Teilen, welche in Abbildung 2 dargestellt sind. Im ersten Teil werden die Substrate einer Vorbelastung unterzogen, um den Nachweis der Anlagenstandzeit im Zeitraffer zu ermöglichen. Während des ersten Versuchsteils werden die Stofffrachten in Abhängigkeit von der prognostizierten Anlagenstandzeit aufgegeben, wobei eine Vorbelastung mit n-1 Jahren (n: Standzeit in Jahren gemäß Herstellerangabe) auf das Filtermodell solange aufgebracht wird, bis jedes Schwermetall zu mindestens 90 % vom Filtersubstrat zurückgehalten wird, um einen Rückschluss auf die Schadstoffrückhaltekapazität des Systems ziehen zu können. In Teil 2 wird das mit (n-1) Jahren vorbelastete Filterelement durch das Aufbringen des letzten Betriebsjahres, also einer Jahresfracht, durch drei definierte Regenspenden analog zum DIBt mit je einem Drittel einer Jahresstofffracht mit jeweils gleichem Wasservolumen beaufschlagt. Das Ziel der Beregnung der Anlagen mit den drei Regenspenden (2,5; 6,0 und 25,0 L/(s•ha)) und entsprechenden Versuchsdauern (480 min, 200 min und 48 min) im Teil 2 ist es, das zeitliche Verhalten der Anlagen und der Substrate im Praxisbetrieb bestimmen zu können. Pro Regenspende werden vier Ablaufproben genommen, im Labor mittels Atomabsorptionsspektrometrie (AAS) gemessen und daraus die einzelnen prozentualen Rückhaltewerte berechnet.

	Bezeichnung	Stoffbelastungen	Versuchsbedingungen	Kriterien für Zielgrößen
Standzeit -Versuch (Rückhalt Cu, Zn)	Teil 1 Vorbelastung mit n-1 Betriebsjahren *	Aufbringung Stofffracht (Cu, Zn) n-1 Jahre *	Kreislaufführung mit 10 L/(s•ha) Analytik: photometrischer Schnelltest und AAS	Rückhalt Cu und Zn je mindestens 90 %
	Teil 2 DIBt Prüfung eines Betriebsjahres	Aufbringung Stofffracht (Cu, Zn) 1 Jahr	2,5 L/(s•ha) (480 min) 6,0 L/(s•ha) (200 min) 25 L/(s•ha) (48 min) Analytik: AAS	Rückhalt Cu: 80 % Rückhalt Zn: 70 % (DIBt-Vorgabe)
Auftausalz - Versuch (Remobilisie- rung)	Teil 3 Auftausalzprüfung mit Na und Ca	Aufbringung NaCl (10 g/L) CaCl ₂ (2,5 g/L)	Zwischenspülung Beginn nach 16 h 6,0 L/(s•ha) (200 min) Analytik: AAS	Cu und Zn in Ablauf: Prüfwerte der BBodschV und Belastung der Auftausalzlösung

* n = Standzeit nach Herstellerangabe

Abbildung 2: Versuchsdurchführung: Darstellung der einzelnen Teile (Huber et al., 2014)

Frühestens 16 Stunden nach Beendigung von Teil 2, also nach dem erfolgten Aufbringen der für die jeweilige Standzeit und Anschlussfläche berechneten Frachten, sowie der Zwischenspülung der Anlage mit Trinkwasser

werden die Anlagen im Teil 3 durch ein definiertes Beregnen mit einer Feuchtsalzlösung aus NaCl und CaCl₂ einem Rücklöseversuch unterzogen. Dabei soll die Bestimmung des Schwermetallrückhalts unter Salzeinfluss den Auftausalzeintrag durch den differenzierten Winterdienst (LfU, 2013) simulieren, welcher es dem kommunalen Zuständigen ermöglicht, die Streuaktivitäten jeweils den konkreten Fahrbahnzuständen vor Ort anzupassen und somit lokal angemessen zu reagieren. In diesem neuen Verfahren wird die mögliche Remobilisierung der Schwermetalle bei einer Regenspende von 6,0 L/(s•ha) und einer Versuchsdauer von 200 min untersucht.

Die Methodik dieses Verfahrens zur Ermittlung realistischer Standzeiten wurde als neues Laborverfahren zur Ermittlung von Standzeiten dezentraler Anlagen zur Behandlung von Verkehrsflächenabflüssen in Huber et al. (2014) ausführlich vorgestellt.

Ergebnisse

Das entwickelte Verfahren zur einheitlichen und reproduzierbaren Ermittlung realistischer Standzeiten wurde durch Versuche an mehreren Filtersubstraten evaluiert. Die Ergebnisse der Laboruntersuchungen mit acht ausgewählten Anlagen und bewachsenen Oberboden (exemplarische Ergebnisse in Tabelle 1) ergaben, dass die Versuchsanordnung insbesondere für Rinnensysteme (als repräsentative Beispiele in Tabelle 1: Systeme Fa. Funke und Hauraton) geeignet ist, sich aber auch auf Schachtsysteme übertragen lässt (Beispiel Fa. Fränkische in Tabelle 1). Eine Übertragung der Methodik auf die Untersuchung von Flächenbelägen mit diesem Verfahren ist noch nicht durchgeführt worden, erscheint aber möglich.

Als Ergebnis von Tabelle 1 kann festgehalten werden, dass die Vorbelastungen aus Teil 1 immer problemlos auf alle Systeme aufgebracht werden konnten und somit die Aufnahmekapazität für Kupfer und Zink bis in das letzte Betriebsjahr gegeben ist. Während der drei Regenspenden in Teil 2 (2,5; 6,0 und 25,0 L/(s•ha)) zeigte sich ein unterschiedliches Verhalten der dargestellten dezentralen Anlagen sowie des bewachsenen Oberbodens. Gleichwohl können alle getesteten Systeme auch im letzten Jahr einen ausreichenden Rückhalt nachweisen. Beim bewachsenen Oberboden wurden diese Anforderungen ebenfalls eingehalten, jedoch muss einschränkend gesagt werden, dass in der Realität auch Oberboden eingebaut wird, der im Labor die geforderte Vorbelastung meist aufgrund zu hoher Durchlässigkeit nicht zurückhalten konnte (Daten nicht gezeigt). Somit sind die angegebenen Rückhaltewerte nicht verallgemeinernd auf alle bewachsenen Oberböden übertragbar.

Folglich können mit dem in diesem Vorhaben entwickelten Verfahren im Labor Aussagen zur Standzeit und zu Veränderungen im Rückhalt der beiden Leitparameter Zink und Kupfer getroffen und die Herstellerangaben zu den Standzeiten einiger Systeme bestätigt werden. Die Ergebnisse des Verfahrens ermöglichen es zusätzlich Behörden, Planern und Betreibern die auf dem Markt verfügbaren Anlagen bezüglich der Dauerhaftigkeit besser vergleichen und bewerten zu können.

Tabelle 1: Ergebnisse der Standzeit-Versuche als prozentuale Rückhaltewerte, die sich aus den jeweiligen Quotienten aus den gemittelten Ablaufkonzentrationen der entsprechenden Versuchsteile und den dazugehörigen Zulaufkonzentrationen getrennt für Zink und Kupfer ergeben (LfU, 2014; eigene Arbeiten).

Hersteller (Standzeit)	Fa. Funke (10 Jahre)		Fa. Hauraton (10 Jahre)		Fa. Fränkische (4 Jahre)		Oberboden (20 Jahre)	
	Zn	Cu	Zn	Zn	Cu	Cu	Zn	Cu
Rückhalt	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
Teil 1 – Vorbelastung	> 90	> 90	> 90	> 90	> 90	> 90	> 90	> 90
Vorgabe erfüllt	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja
Teil 2 – 2,5 L/(s•ha)	99,4	99,2	98,5	99,3	99,7	99,3	76,9	88,0
Teil 2 – 6,0 L/(s•ha)	99,5	99,2	99,5	99,3	98,2	99,1	88,6	86,6
Teil 2 – 25 L/(s•ha)	99,4	99,2	99,7	99,3	70,4	85,3	95,9	91,4
Teil 2 – gemittelt	99,4	99,2	99,2	99,3	89,4	94,6	87,1	88,7
Anforderungen	> 70	> 80	> 70	> 80	> 70	> 80	> 70	> 80
Vorgabe erfüllt	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja

Die Untersuchungen zum Einfluss von Salzbelastungen (NaCl, CaCl₂) zeigten, dass nicht bei allen acht untersuchten Anlagen eine Beständigkeit gegenüber dem eingesetzten Salzmisch besteht (Daten hier nicht gezeigt). Im Gegensatz dazu wird bei den in Deutschland beim DIBt zugelassenen dezentralen Anlagen während der DIBt-Prüfungen mit reinem Natriumchlorid und deionisiertem Wasser keine erhöhte Rücklösung der Schwermetalle festgestellt. Als erste Erkenntnis dieser Untersuchungen kann festgehalten werden, dass der Effekt bei der teilweisen Beobachtung einer Remobilisierung von Schwermetallen bei dezentralen Anlagen unterschiedlich stark ist. So können zum einen beide Schwermetalle oder nur Zink remobilisiert werden und teils scheinen NaCl und CaCl₂ bzw. nur CaCl₂ für die Rücklösung verantwortlich zu sein. Ferner ist unklar, ob und wie weit die Remobilisierung durch die Zusammensetzung des verwendeten Trinkwasser verstärkt wird. Somit

ist eine Klärung der Vorgänge, auch bei der Simulierung des Einsatzes von Magnesiumchlorid im Straßenwinterdienst, durch weitere Untersuchungen notwendig.

Auch die Untersuchungen bewachsener Oberböden zeigten, dass bei der Salzuntersuchung im Labor Schwermetalle gelöst wurden. So lagen die Zink-Konzentration der Auftausalzlösung bei 902 µg/L und die gemittelte Zink-Ablaufkonzentration bei 3.850 µg/L. Die Kupfer-Konzentration der Auftausalzlösung betrug 17,8 µg/L und die gemittelte Kupfer-Ablaufkonzentration 64,6 µg/L. Unter Betrachtung des maximal zulässigen Wertes nach BBodSchV (Zn 500 µg/L, Cu 50 µg/L) und des maximal zulässigen Wertes nach Entwurf der Mantel-V (Zn 58 µg/L, Cu 14 µg/L) muss somit festgestellt werden, dass die Anforderungen des Verfahrens an die Zielgrößen im Teil 3 vom getesteten Oberboden zum größten Teil nicht eingehalten werden konnten.

Validierung

Dezentrale Behandlungsanlagen für Niederschlagsabflüsse werden erst seit einigen Jahren eingebaut, sodass es noch wenige Erfahrungen aus der Praxis bezüglich des Langzeitverhaltens der eingesetzten Substrate gibt. Eine Ausnahme stellt das System D-Rainclean der Fa. Funke dar, für das Betriebserfahrungen von bis zu neun Jahren vorliegen, sodass mit diesem System ein Vergleich zu den Laborversuchen bezüglich der Belastung des Filtermaterials hergestellt werden konnte. Der Vergleich der gemessenen Schwermetallgehalte aus der Anreicherung von neun Jahren einer auf einem Recyclinghof in Berlin eingebauten Rinne (186 mg/kgTR Zink und 39 mg/kgTR Kupfer; Schriefer, 2009) mit den im Labor nach zehn simulierten Jahren gemessenen Gehalten (468 mg/kgTR Zink und 70 mg/kgTR Kupfer) ergab in der Tendenz eine gute Übereinstimmung (Huber et al., 2014). Der Unterschied ergibt sich aus den getroffenen Annahmen für die Schwermetallkonzentrationen zur Versuchsdurchführung, die im Vergleich zu den tatsächlichen Belastungen dieser einen Rinne in situ höher sind. Somit wird durch dieses Vorgehen sichergestellt, dass an anderen Einbauorten mit höheren Belastungen die sich daraus ergebenden höheren Frachten in der gleichen Zeit zurückgehalten werden können. Folglich erscheint diese Methode für die Standzeitbestimmung geeignet zu sein.

Danksagung

Teilergebnisse dieser Arbeit sind Teil des vom LfU beauftragten Forschungsvorhabens „Untersuchung von Anlagen zur Behandlung des Niederschlagswassers von Verkehrsflächen - 76e133“. Die Beregnungsanlage wurde vom TÜV Rheinland LGA Products GmbH, Würzburg, als Leihgabe zur Verfügung gestellt.

Literatur

- BBodSchV (1999): Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung vom 12. Juli 1999. BGBl. Nr. 36, S. 1554.
- DIBt (Deutsches Institut für Bautechnik) (2011): Zulassungsgrundsätze für Niederschlagswasserbehandlungsanlagen. Teil 1. Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin, Februar 2011.
- DWA-A 138 (2005): Planung, Bau und Betrieb von Anlagen zur Versickerung von Niederschlagswasser. DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Henny, 2005.
- eawag (2006): Untersuchung der Versickerung von Straßenwasser über Straßenrandstreifen an einer bestehenden Strasse. Dübendorf, Schlussbericht.
- Helmreich, B. (2010): Stoffliche Betrachtungen der dezentralen Niederschlagswasserbehandlung. Berichte aus der Siedlungswasserwirtschaft, TU München, Band 199, ISSN 0942-914X.
- Huber, M., Welker, A., Dierschke, M., Drewes, J.E., Helmreich, B. (2014): Ein neues Laborverfahren zur Ermittlung von Standzeiten dezentraler Anlagen zur Behandlung von Verkehrsflächenabflüssen. gwf Wasser/Abwasser 155 (5), 630-638.
- Kayhanian, M., Fruchtmann, B.D., Gulliver, J.S., Montanaro, C. Ranieri, E., Wuertz, S. (2012): Review of highway runoff characteristics: Comparative analysis and universal implications. Wat. Res. 46 (20), 6609-6624.
- LfU (Bayerisches Landesamt für Umwelt) (2013): UmweltWissen – Praxis. Streusalz und Splitt im differenzierten Winterdienst.
- LfU (Bayerisches Landesamt für Umwelt) (2014): Abschlussbericht zum F + E-Vorhaben Untersuchung von Anlagen zur Behandlung des Niederschlagswassers von Verkehrsflächen, 2012-2014.
- Mantel-V (2012): Verordnung zur Festlegung von Anforderungen für das Einbringen oder das Einleiten von Stoffen in das Grundwasser, an den Einbau von Ersatzstoffen und für die Verwendung von Boden und bodenähnlichem Material. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Entwurf 31.10.2012.
- Schriefer, T. (2009): Projekt Berliner Stadtreinigung, Recyclinghof „Spindlersfeld“. Niederschlagswasserbehandlung in vorgefertigten Sickermulden mit Substrat. Bericht vom 29.05.2009.
- Welker, A. (2005/2013): Schadstoffströme im urbanen Wasserkreislauf - Aufkommen und Verteilung, insbesondere in den Abwasserentsorgungssystemen. Habilitationsschrift. Schriftenreihe der TU Kaiserslautern, FG Siedlungswasserwirtschaft, Band 20. Aktualisierter Anhangband.