

Untersuchung der Nährstoffauswaschung unter Schotterrasenflächen an einem inneralpinen Standort

Veronika Slawitsch¹ · Steffen Birk¹ · Erich M. Pötsch²

Eingegangen: 28. April 2015 / Überarbeitet: 18. Januar 2016
© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2016

Zusammenfassung Schotterrasenflächen als umweltschonende Alternative zu asphaltierten Parkplätzen tragen zu einer guten Versickerung nach Starkniederschlagsereignissen bei. Die Nährstoffkonzentrationen des Sickerwassers und die damit verbundenen Nährstoffauswaschungen von Schotterrasenflächen wurden in einem zweijährigen Feldversuch an der HBLFA Raumberg-Gumpenstein durch Anlegung einer Versuchseinheit anhand von sechs Schwerkraftlysimetern analysiert. Zwei unterschiedliche regionale Materialien (Kalkschotter mit 10 % Humus und Baustoffrecyclingmaterial mit 10 % Kompost) wurden auf jeweils drei Lysimeterkammern eingebaut.

Die Sickerwassermengenbestimmungen ergaben, dass Kalkschottermaterial eine bessere Versickerungsleistung als Baustoffrecyclingmaterial erzielt. Die Nährstoffkonzentrationen und Nährstoffauswaschungen weisen im Anlagejahr als auch im Folgejahr signifikant höhere Werte im Baustoffrecyclingmaterial auf. Beide Materialien zeigen im Anlagejahr einen höheren Nährstoffkonzentrations- und Auswaschungswert als im Folgejahr an.

Der in der Trinkwasserverordnung (BGBl. I Nr. 21/2001) bestehende Nitratgrenzwert von 50 ppm wird im Kalkschottermaterial eingehalten, im Baustoffrecyclingmaterial

jedoch im Anlagejahr um das Dreifache überschritten. Im Sinne des Grundwasserschutzes sollte daher beim Einbau von Baustoffrecyclingmaterial das erhöhte Auswaschungsrisiko in der Anlagephase berücksichtigt werden.

Analysis of nutrient leaching under gravel turf on an inneralpine site

Abstract Surface stabilisation by planted gravel turf is a reliable alternative to conventionally-paved parking lots. At the HBLFA Raumberg-Gumpenstein test site, biennial nutrient concentrations in seepage water and nutrient leachate fluxes were analysed using six gravity lysimeters. Two different materials (limestone with 10 % humus and recycled building material with 10 % compost) were investigated. Seepage water fluxes showed better infiltration for lime gravel materials in comparison to recycled building materials. The nutrient concentrations and leachate flux showed significantly higher values in the recycled building materials in both years of the experiment. Both materials showed a decrease in nutrient concentration and leaching from the first to the second year. The nitrate threshold concentration given by the drinking water directive (Trinkwasserverordnung BGBl. I Nr. 21/2001) was met for lime materials but was exceeded by a factor of three for recycled building materials within the first year. In terms of groundwater protection, the high risk of nitrate leaching in the first year has to be considered if using recycled building material.

Keywords Gravel turf · Gravitation lysimeters · Limestone material · Recycled building material · Nutrient concentration · Nutrient leaching

✉ Veronika Slawitsch
veronika.slawitsch@edu.uni-graz.at

Steffen Birk
steffen.birk@uni-graz.at

Erich M. Pötsch
erich.poetsch@raumberg-gumpenstein.at

¹ Institut für Erdwissenschaften, Karl-Franzens-Universität Graz, Heinrichstraße 26, 8010 Graz, Österreich

² HBLFA Raumberg-Gumpenstein, Altdorf 11, 8952 Irdning, Österreich

Einleitung und Problemstellung

Der „Fahrplan für ein ressourcenschonendes Europa“ (KOM 571 2011) fordert die Mitgliedstaaten der Europäischen Union auf, die Versiegelung von Böden soweit wie möglich zu begrenzen. Dennoch schreitet die Flächenversiegelung ungebremst voran (Umweltbundesamt 2013). Im Zeitraum von 2009 bis 2012 betrug beispielsweise in Österreich die gesamte Flächenneuanspruchnahme 22 ha/Tag und liegt damit um beinahe das Zehnfache über dem mit 2,5 ha/Tag bezifferten Reduktionsziel der Nachhaltigkeitsstrategie; die Versiegelung von Böden mit wasserundurchlässigen Schichten betrug im Durchschnitt desselben Zeitraums zumindest 4,3 ha/Tag (Umweltbundesamt 2013). Die Bodenversiegelung verursacht vor allem in Großstädten und Ballungsräumen eine Reihe von Problemen. Versiegelte Flächen reduzieren die Versickerung von Regenwasser und verringern die natürliche Verdunstung (Göbel et al. 2007). Die Folgen davon sind ein erhöhter Oberflächenabfluss und dadurch vermehrt Überlastungen des Kanalnetzes bei Hochwasserereignissen, Absenkungen des Grundwasserspiegels und eine Verschlechterung des Kleinklimas. Aus diesem Grund sollten Flächenversiegelungen nur bei sehr hohen Nutzungsansprüchen angewendet werden, in anderen Fällen sind offene Flächenbefestigungen zu bevorzugen. Vor diesem Hintergrund werden Schotterrasen als nutzbringende und kostengünstige Alternative zu asphaltierten und betonierten Parkplätzen diskutiert (z. B. Längert 2005; Längert und Florineth 2012; Pitha und Scharf 2009). In Kombination mit einer standortgerechten Begrünung beeinflussen Schotterrasenflächen die Verdunstung im Hinblick auf das städtische Mikroklima in positiver Weise und tragen zu einer Reduzierung von Spitzenabflüssen bei.

Die bisher verfügbaren Erkenntnisse zu Schotterrasenflächen werden in einem technischen Regelwerk, der Richtlinie für die Planung, Ausführung und Unterhaltung von begrünbaren Flächenbefestigungen der Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau (FLL 2008) zusammengefasst. Darüber hinaus befassen sich verschiedene Publikationen etwa von Florineth (2012), Haslgrübler (2008), Längert (2005) und Pitha und Scharf (2009) mit den bautechnischen Anforderungen von Schotterrasen vor allem aus landschaftsbaulicher und vegetationsökologischer Sicht. Allerdings bestehen noch zahlreiche offene Fragen im Zusammenhang mit dem Versickerungsverhalten von Schotterrasenflächen und mit den damit verbundenen Nährstoffauswaschungen. Beispielsweise stellen Pitha und Scharf (2009) bei der Verwendung von Baustoffrecyclingmaterialien gegenüber Kalkschottern anfänglich eine vermehrte Auswaschung verschiedener Inhaltsstoffe fest, die jedoch bereits nach einem Jahr nicht mehr nachweisbar ist. Stoffausträge aus Recyclingbaustoffen wurden auch im Rahmen des Forschungsverbundes Sickerwasserprogno-

se untersucht. Henzler und Grathwohl (2007) und Beyer et al. (2007) diskutieren die Freisetzung von PAK und den damit verbundenen Eintrag ins Sicker- und Grundwasser. Im Sickerwasser von Feldlysimetern mit Recyclingbaustoffen wurden aber zum Beispiel auch relativ hohe Nitratkonzentrationen festgestellt (Susset und Leuchs 2008). Im vorliegenden Beitrag wird diese Problematik anhand von Lysimeterversuchen behandelt und diskutiert. Damit sollen die bisherigen Erkenntnisse erweitert werden und eine zusätzliche Entscheidungshilfe hinsichtlich der Auswahl von Ausgangsmaterialien insbesondere im Hinblick auf deren verstärkten Einsatz in alpinen Gebieten bieten.

Material und Methoden

Im Gelände der Höheren Bundeslehr- und Forschungsanstalt (HBLFA) Raumberg-Gumpenstein im steirischen Ennstal wurde Ende Mai 2013 ein Schwerkraftlysimeterversuch (Versuchsfläche 1) mit Schotterrasenflächen unter Verwendung zweier unterschiedlicher Vegetationstragschichten angelegt. Dabei ging es primär um den Vergleich von kommerziell verfügbarem Recyclingmaterial (Baustoffrecyclingmaterial der Firma Ökotechna Entsorgungs- und Umwelttechnik GmbH, Körnung 0/45 mm, mit einem bereits zugemischten Anteil von 10 % Kompost) gegenüber einer aus regional verfügbaren Materialien (Kalkschotter, Humus) aufgebauten Vegetationstragschicht. Laut Herstellerangaben handelt es sich beim verwendeten Baustoffrecyclingmaterial um eine Hochbau-Restmasse vorwiegend bestehend aus Beton und Ziegeln.

Der Aufbau der untersten 30 cm aller sechs Lysimeterkammern (je 1 m² quadratische Oberfläche mit überstehendem Rand, 1 m Tiefe) erfolgte mittels Kalkschotter mit einer Körnung von 16–32 mm, der der darauffolgenden 40 cm starken Drainschicht mittels Kalkschotter mit einer Körnung von 0–70 mm. Der Einbau der obersten 30 cm dicken Vegetationstragschicht erfolgte bei drei der sechs Lysimeterkammern mit regionalem Kalkschottermaterial (Kalkstein aus Calcit und Aragonit; Körnung 0–32 mm) mit einer Zumischung von 10 % Humus (im Folgenden kurz als „Kalkschottermaterial“ bezeichnet), bei den drei weiteren Kammern mit oben erwähntem Baustoffrecyclingmaterial (Körnung 0–45 mm) mit einer Zumischung von 10 % Kompost (im Folgenden kurz als „Baustoffrecyclingmaterial“ bezeichnet). Parallel dazu wurde auf einem 120 m² großen Areal ein Feldversuch (Versuchsfläche 2) mit denselben Vegetationstragschichten für weitere bodenphysikalische Erhebungen (Ausschütt- und Lastplattenversuche) und pflanzensoziologische Bestandsaufnahmen (Deckungsgrad, Artengruppenanteile, Einzelartenerhebung, Blattflächenindex) angelegt. Sowohl die Feldversuchsflächen als auch die Lysimeterparzellen wurden mit einer

gut belastbaren, trockenheitsverträglichen und standortgerechten Gumpensteiner Schotterrasenmischung eingesät (Slawitsch 2014).

Die Schotterrasenflächen befinden sich auf 710 m. ü. A. und liegen im Einflussbereich des gemäßigten Klimas mit einem leicht kontinental geprägten winterkalten und nur mäßig sommerwarmen Talsohlenklima (Land Steiermark – Amt der Steiermärkischen Landesregierung 2014). Die langjährig gemittelte Jahrestemperatur (1961–2014) beträgt 8 °C, die Jahresniederschläge sind relativ gleichmäßig verteilt mit durchschnittlichen 1039 mm (Schaumberger 2011).

Bodenphysikalische Eigenschaften und Bodenwasserhaushalt

Die hydraulische Durchlässigkeit beider für den Aufbau der obersten Vegetationstragschicht verwendeten Baumaterialien wurde von Slawitsch (2014) auf der Feldversuchsfläche mit unterschiedlichen Verfahren ermittelt (Tab. 1). Anhand von Ausschüttversuchen nach RVS 11.06.29 (2004) wurde für das Kalkschottermaterial ein Durchlässigkeitsbeiwert von etwa 10^{-5} m/s („durchlässig“ nach DIN 18130-1 (1998)) abgeschätzt, hingegen für das Baustoffrecyclingmaterial eine etwa um Faktor zwei geringere Durchlässigkeit (Tab. 1). Die mittels Guelph-Permeameter (Soilmoisture Equipment Corporation 2008) ermittelte feldgesättigte hydraulische Leitfähigkeit beider Materialien unterscheidet sich weniger stark und ist in beiden Fällen höher als die anhand der Ausschüttversuche abgeschätzten Werte (Tab. 1). An den Lysimetern konnte die Durchlässigkeit nur anhand von Ausschüttversuchen abgeschätzt werden. Dabei ergaben sich um zwei bis drei Größenordnungen geringere Werte, die nach DIN 18130-1 „schwach durchlässig“ beim Kalkschottermaterial und „sehr schwach durchlässig“ beim Baustoffrecyclingmaterial entsprechen (Tab. 1). Offenbar wurden beide Materialien beim Einbau in die Lysimeter doch etwas stärker verdichtet als beim Feldversuch. Darauf deutet auch die beobachtete, schwächere Vegetationsentwicklung an den Schwerkraftlysimetern verglichen mit jener an der Zufahrtsstraße hin.

Tab. 1 Vergleich der gemessenen Durchlässigkeitsbeiwerte k_f von Kalkschottermaterial (Kalk) und Baustoffrecyclingmaterial (BSRM) an der Versuchsfläche 2 – Zufahrtsstraße und an der Versuchsfläche 1 – Schwerkraftlysimeter mit der von FLL (2008) geforderten Durchlässigkeit der Vegetationstragschicht

Baumaterial	k_f [m/s]: Guelph-Permeameter Versuchsfläche 2	k_f [m/s]: Ausschüttversuche Versuchsfläche 2	k_f [m/s]: Ausschüttversuche Versuchsfläche 1	k_f [m/s]: FLL (2008)
Kalk	$5,9 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$6,7 \cdot 10^{-8}$	$5,0 \cdot 10^{-6}$ bis $5,0 \cdot 10^{-5}$
BSRM	$7,1 \cdot 10^{-5}$	$4,7 \cdot 10^{-6}$	$8,2 \cdot 10^{-9}$	$5,0 \cdot 10^{-6}$ bis $5,0 \cdot 10^{-5}$

Durch Wägung von feldfeuchten und anschließend ofentrockneten Stechzylinderproben, die drei Tage nach einem Starkregenereignis aus den obersten 30 cm der Feldversuchsfläche entnommen wurden, wurden volumetrische Wassergehalte von rund 3 % und 11 % für das Kalkschotter- bzw. Baustoffrecyclingmaterial ermittelt, die etwa der Feldkapazität der Materialien entsprechen dürften. Der geringe Wassergehalt im Kalkschottermaterial ist offenbar durch eine hohe Verdichtung bedingt. Die an den Stechzylindern ermittelte Lagerungsdichte betrug für dieses Material im Mittel rund $2,0 \text{ g/cm}^3$, beim Baustoffrecyclingmaterial dagegen nur $1,4 \text{ g/cm}^3$, woraus sich eine Porosität von 23 % bzw. 46 % ergibt (Slawitsch 2014).

Über ein gesamtes Jahr hinweg wurden an jedem der sechs Schwerkraftlysimeter die Sickerwassermengen getrennt erhoben. Dabei fand die Entnahme in meist 14-tägigen Intervallen statt, mit Ausnahme einiger Wochen, in denen die anfallenden Sickerwassermengen zum Zwecke der besseren Modellierung des Bodenwasserhaushaltes täglich entleert und erhoben wurden.

Mithilfe eines Bodenwasserhaushaltsmodells wurde ausgehend vom gemessenen Niederschlag und der berechneten Gras-Referenzverdunstung, welche unter Berücksichtigung der beobachteten Vegetationsentwicklung und der daraus resultierenden Schnitthäufigkeiten und Schnittzeitpunkte hinsichtlich Pflanzenkoeffizienten k_c und Einfluss der Interzeptionsverdunstung korrigiert wurde (ATV-DVWK 2002), die Wasserbilanz der Lysimeter ermittelt. Durch Kalibrierung der nutzbaren Feldkapazität wurden die modellierten an die gemessenen Sickerraten angepasst. Aus dem kalibrierten Modell ergaben sich dann die zeitliche Änderung des Bodenwasserspeichers und die tatsächliche Verdunstung der einzelnen Lysimeter. Das kalibrierte Bodenwasserhaushaltsmodell wurde weiter verwendet, um im Falle einer mehrschnittigen Nutzung von Schotterrasenflächen die Auswirkung unterschiedlicher Schnitthäufigkeiten zu untersuchen.

Nährstoffanalyse der Sickerwässer

Die anfallenden Sickerwässer, welche durch eine am Boden des Lysimeters befindliche Öffnung in einen Behälter fließen, wurden einer chemischen Analyse unterzogen und auf die Kationen Natrium (Na^+), Ammonium (NH_4^+), Kalium (K^+), Calcium (Ca^{2+}) und Magnesium (Mg^{2+}) sowie auf die Anionen Chlorid (Cl^-), Nitrit (NO_2^-), Nitrat (NO_3^-), Phosphat (PO_4^{3-}), Sulfat (SO_4^{2-}) und Schwefel (S^{2-}) untersucht.

Für die Kationenbestimmung wurden die Proben in Probenröhrchen gefüllt und mit einer 0,3-molaren Salpetersäure angesäuert und anschließend mittels Ionenchromatograph (IC) analysiert. Wie bei der Kationenbestimmung wurden auch für die Anionenbestimmung die Probenwässer in Probenröhrchen gefüllt und anschließend ohne vorherige

Ansäuerung im Ionenchromatograph (IC) analysiert. Die Nachweisgrenze für die analysierten Kationen und Anionen liegt bei 0,0001 mg/l. Die Schwefelbestimmung erfolgt mittels Verbrennungsmethode in einem CNS-Analysator.

In der vorliegenden Arbeit werden dabei besonders die aus ökologischer und gesundheitlicher Sicht bedeutsamsten Nährstoffe im Gewässerschutz, Nitrat und Phosphat, in Hinblick auf deren zeitliche Dynamik betrachtet (Frede und Dabbert 1998).

Die leicht lösliche, sehr mobile mineralische Stickstoffkomponente gelangt durch Starkniederschläge oder Schneeschmelze in tiefere Bodenschichten und damit auch ins Grundwasser. Der Nitratgrenzwert in Österreich liegt laut Trinkwasserverordnung (BGBl. I Nr. 21/2001 2001) aktuell bei 50 mg NO₃-l, welcher auf eine lebenslange Aufnahme ohne gesundheitliche Schäden ausgerichtet ist (BMLFUW 2014).

Wie Stickstoffverbindungen können auch Phosphorverbindungen zu Eutrophierung, Abnahme der Artenvielfalt und Gefährdung der Trinkwasserqualität führen. Phosphor tritt im Vergleich zu anderen Nährstoffen sowohl in der Bodenlösung als auch im Sickerwasser in sehr geringen Konzentrationen von Mikrogramm pro Liter auf, die jährlichen Auswaschungsfrachten bewegen sich im Grammbereich pro Hektar (Bohner und Rohrer 2013). In 8-jährigen Versuchen wurden etwa für unterschiedlich gedüngte Ackerkulturen, Feldfutter und Dauergrünland durchschnittliche Jahresausträge von weniger als 250 g P/ha gemessen (Eder 2001). Typische Phosphorfrachten von 0,5 kg/ha/Jahr für limnische Einzugsgebiete wurden von Strauss und Staudinger (2007) ermittelt.

Zusätzlich werden neben Nitrat und Phosphat auch die weiteren analysierten anorganischen Nährstoffe sowie die elektrischen Leitfähigkeiten der Sickerwässer beider Baumaterialien hinsichtlich ihrer Durchschnitts- und Maximalwerte ausgewertet, auf deren Plausibilität überprüft und einige dabei mit den nach BGBl. I Nr. 21/2001 (2001) vorgeschriebenen Indikatorwerten für Trinkwasser verglichen. Dieser Vergleich dient letztlich der Sicherstellung der Wasserqualität unter Schotterrasenflächen mit den hier untersuchten Aufbaumaterialien.

Nährstoffauswaschung

Durch Multiplikation der gemessenen Sickerwassermengen SW [l/m²] eines bestimmten Beprobungszeitraumes mit der dazu korrespondierenden Nährstoffkonzentration [mg/l] wurde die Nährstoffauswaschung [kg/ha] errechnet:

$$\text{Nährstoffauswaschung} \left[\frac{\text{kg}}{\text{ha}} \right] = \frac{\text{Nährstoffkonzentration} \left[\frac{\text{mg}}{\text{l}} \right] \cdot \text{SW} \left[\frac{\text{l}}{\text{m}^2} \right]}{100 [\text{ha} \cdot \text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{kg}]}$$

Die Berechnung der gesamten anorganischen Stickstofffracht erfolgte aus der Summe der Ammonium-, Nitrat- und Nitritauswaschung:

$$\text{N}_{\text{anorg}}\text{-Fracht} \left[\frac{\text{kg}}{\text{ha}} \right] = \frac{\text{NH}_4\text{-N-Konz} + \text{NO}_2\text{-N-Konz} + \text{NO}_3\text{-N-Konz} \left[\frac{\text{mg}}{\text{l}} \right] \cdot \text{SW} \left[\frac{\text{l}}{\text{m}^2} \right]}{100 [\text{ha} \cdot \text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{kg}]}$$

Um die Interpretation der berechneten Frachten zu unterstützen, wurde auch die chemische Zusammensetzung der verwendeten Baumaterialien (inklusive Humus- bzw. Kompostzumischung) bestimmt. Zu diesem Zweck wurde jeweils eine Probe durch die Österreichische Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherheit (AGES, Wien) analysiert, wobei die Bestimmung des N_{ges}-Gehaltes nach ÖNORM L 1095 (2002), jene des P-Gehaltes nach ÖNORM L 1087 (2005) erfolgte.

Statistische Auswertungen

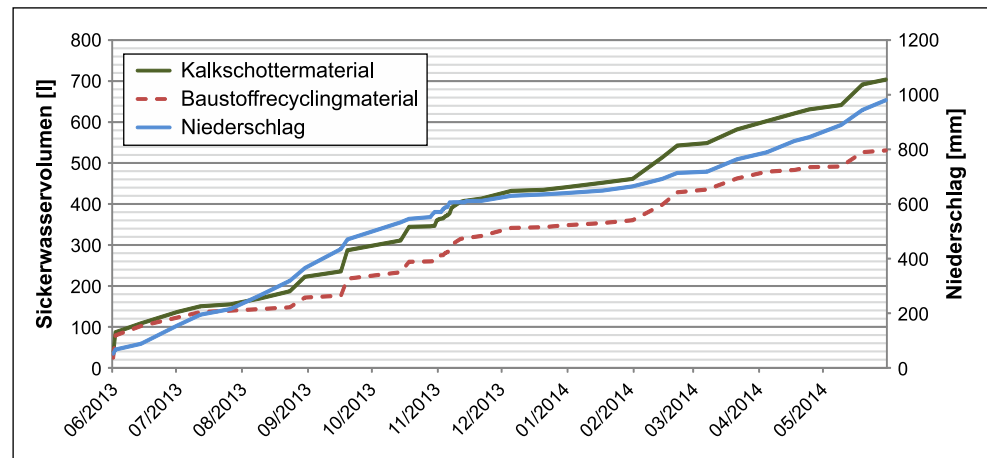
Die statistische Datenauswertung erfolgte mittels SPSS (Statistic Package of Social Sciences, Version 21). Die Daten wurden auf Varianzhomogenität geprüft und varianzanalytisch ausgewertet, wobei ein Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$ festgelegt wurde. Ein statistisch signifikantes Ergebnis ergibt sich, wenn die Irrtumswahrscheinlichkeit eines Signifikanztests zur Überprüfung der vorab aufgestellten Nullhypothese kleiner als das Signifikanzniveau α ist (Janssen und Laatz 2010).

Ergebnisse und Diskussion

Sickerwassermengen

Die über den Zeitraum eines Jahres durchgeführten Erhebungen zeigen für die mit Kalkschottermaterialien aufgebauten Schotterrasenflächen signifikant höhere kumulative Sickerwassermengen als für jene mit Baustoffrecyclingmaterial (Abb. 1). Die stärksten Sickerwasserereignisse mit mehr als 50 l/m² traten unmittelbar nach dem Aufbau der Versuchsanlage Ende Mai/Anfang Juni 2013 auf, wobei die im selben Zeitraum gemessenen Niederschlagsmengen 52,2 l/m² betragen. Die geringsten Sickerwassermengen wurden hingegen in den Sommermonaten im Juli und Anfang August 2013 mit weniger als 2 l/m² verzeichnet, hier fiel auch über mehrere Tage hinweg kein Niederschlag, und die Temperaturen lagen über 30 °C. In den Wintermonaten stagnierten die Sickerwassermengen bei zugleich sehr niedrigen Niederschlägen, erst ab Februar 2014 traten wieder stärkere Sickerwasserereignisse, insbesondere bei der Variante Kalkschotterrasen auf. Die durchschnittliche

Abb. 1 Kumulatives Sickerwasservolumen [l] und kumulative Niederschlagsmenge [mm] der Schwerkraftlysimetervarianten von Juni 2013 bis Mai 2014



Sickerwassermenge/Sickerwasserereignis lag beim Kalkschottermaterial bei 15,0 l/m², beim Baustoffrecyclingmaterial bei 11,5 l/m², wobei dieser Unterschied statistisch nicht signifikant ist.

Beim eingebauten Baustoffrecyclingmaterial lässt sich eine zunehmend größere Differenz des Niederschlages zur Sickerwassermenge beobachten. Der Schotterrasen mit Kalkschottermaterial weist eine Sickerwasserrate von 72 % des Gesamtniederschlages (981 l/m² im Beobachtungszeitraum) auf, jener mit Baustoffrecyclingmaterial hingegen von 51 %. Diese Unterschiede sind in den unterschiedlichen bodenphysikalischen Eigenschaften der Materialien sowie der damit verbundenen unterschiedlichen Vegetationsentwicklung begründet und auch in Bodenwasserhaushaltsberechnungen nachvollziehbar (Slawitsch 2014). Entsprechend der in Stechzylinderproben ermittelten unterschiedlichen Wassergehalte und Porositäten (siehe Materialien und Methoden) ergab die Kalibrierung des Bodenwasserhaushaltsmodells eine gegenüber dem Kalkschottermaterial höhere nutzbare Feldkapazität im Baustoffrecyclingmaterial. Der größere Bodenwasserspeicher im Baustoffrecyclingmaterial ermöglicht eine bessere Wasserversorgung des Pflanzenbestands und damit eine höhere tatsächliche Verdunstung. Dies erklärt sowohl die gegenüber dem Kalkschottermaterial geringeren Sickerraten als auch die beim Baustoffrecyclingmaterial festgestellte stärker ausgebildete Vegetationsentwicklung. So betrug die durchschnittliche Vegetationsdeckung im Sommer 2013 beim Kalkschottermaterial 2,8 % und stieg bis ins Jahr 2014 auf bis zu 17 % an, während beim Baustoffrecyclingmaterial Deckungsgrade von 7,5 % bzw. 48 % ermittelt wurden.

Die Ergebnisse des Bodenwasserhaushaltsmodells zeigen ferner, dass eine Dreischmittnutzung von Schotterrasenflächen verglichen mit der in dieser Arbeit durchgeführten Zweischmittnutzung sehr ähnliche, wenn auch etwas höhere Versickerungsraten aufweist. Demnach wäre eine Dreischmittnutzung aufgrund der besseren Versickerungsintensi-

tät einer Zweischmittnutzung vorzuziehen. Im Unterschied zum hier untersuchten niederschlagsreichen alpinen Standort sind in niederschlagsarmen Klimaten mit hohen Sommertemperaturen allerdings weniger Schnitte zu empfehlen, da sich durch eine häufigere Nutzung die Interzeptionsverdunstung und auch die gesamte tatsächliche Verdunstung (Evapotranspiration) verringert.

Nährstoffkonzentrationen im Sickerwasser

Die Nährstoffkonzentrationen im Sickerwasser lagen im Anlagejahr bei beiden Einbaumaterialien auf einem deutlich höheren Niveau als im Folgejahr (Tab. 2). Die im zweiten Hauptnutzungsjahr ermittelte Reduktion der Werte lässt sich durch ein möglicherweise besseres Retentions- und geringeres Durchlässigkeitsverhalten aufgrund der stärker ausgebildeten Vegetationsentwicklung als auch durch die im Anlagejahr erfolgte Abreicherung erklären. In beiden Jahren ergeben sich für das Baustoffrecyclingmaterial signifikant höhere Nährstoffkonzentrationen im Sickerwasser als für das Kalkschottermaterial. Mit Ausnahme von Magnesium und Aluminium weist das Sickerwasser des Baustoffrecyclingmaterials wesentlich höhere Gehalte als das des Kalkschottermaterials auf; dies zeigt sich auch in der elektrischen Leitfähigkeit mit Werten von 2307 µS/cm gegenüber 143 µS/cm. Die Konzentrationsunterschiede im Sickerwasser belaufen sich dabei je nach Mineralstoff auf das bis zu Fünzigfache (z. B. Chlorid). Diese starken Unterschiede zwischen den beiden Materialien sind bereits in deren chemischer Zusammensetzung begründet.

Das Kalkschottermaterial enthält 192 g/kg Calcium und 106 g/kg Magnesium, das Baustoffrecyclingmaterial dagegen nur 118 g/kg bzw. 20,4 g/kg (hier und im Folgenden jeweils inklusive Humus- bzw. Kompostzumischung). Hingegen liegen die Gehaltswerte für Kalium (3,3 g/kg), Phosphor (0,82 g/kg), Schwefel (3,39 g/kg) und Gesamtstickstoff (2,9 g/kg) im Baustoffrecyclingmaterial deutlich über den Werten des Kalkschottermaterials (0,4 g K/kg;

Tab. 2 Jährliche durchschnittliche und maximale Konzentrationen [mg/l] an anorganischen Nährstoffen sowie physikochemische Parameter verglichen mit Trinkwasserindikatorwerten [mg/l] nach BGBl. I Nr. 21/2001 (2001) im Sickerwasser beider Materialien (fett: Werteüberschreitung der Trinkwasserindikatorwerte [mg/l] nach BGBl. I Nr. 21/2001) (Bestimmungsgrenze BG = 0,0001 mg/l)

Nährstoffe	Indikatorwert	Kalkschottermaterial				Baustoffrecyclingmaterial			
		2013		2014		2013		2014	
		Ø	Max	Ø	Max	Ø	Max	Ø	Max
Na [mg/l]	200	5,8	17,4	3,3	7,1	120	263	69,6	141
K [mg/l]	–	11,7	35,2	8,9	17,9	248	507	137	213
Ca [mg/l]	–	41,6	88,0	40,9	102	520	685	438	822
Mg [mg/l]	–	7,8	14,8	3,9	8,5	32,1	62,6	34,9	53,9
Cl [mg/l]	200	4,5	24,8	0,5	2,4	216	488	16,7	47,4
PO ₄ [mg/l]	–	0,1	1,5	<BG	<BG	0,5	6,21	<BG	<BG
P [mg/l]	–	0,0	0,7	0,0	0,0	0,2	2,7	0,0	0,0
SO ₄ [mg/l]	250	35,4	129	12,8	74,1	1010	1301	462	1136
S [mg/l]	–	11,8	43,1	4,3	24,8	337,4	435	154	380

0,31 g P/kg; 0,09 g S/kg und 0,31 g N_{ges}/kg). Bei den Schwermetallen weist das Baustoffrecyclingmaterial mit Ausnahme von Cadmium bis zu fünffach höhere Werte als das Kalkschottermaterial auf.

Hinsichtlich der *Nitratkonzentrationen* im Sickerwasser zeigen sich zwischen den beiden untersuchten Einbaumaterialien starke Unterschiede, etwa im Verhältnis der oben erwähnten Feststoffgehalte (Abb. 2). Die durchschnittliche Nitratkonzentration des Sickerwassers beträgt auf den gesamten Beobachtungszeitraum bezogen für das Kalkmaterial 16 mg/l, beim Baustoffrecyclingmaterial hingegen 160 mg/l. Der Nitratgrenzwert von 50 mg/l wird im Anlagejahr 2013 auch beim eingebauten Kalkschottermaterial mehrfach überschritten, im Jahr 2014 flacht die Nitratkonzentration jedoch ab (Ø 3,2 mg/l mit einem Maximalwert von 10,3 mg/l).

Die Nitratbelastung des Sickerwassers unter dem Baustoffrecyclingmaterial liegt mit durchschnittlich 245 mg/l und Maximalwerten von >500 mg/l im Anlagejahr weit über dem bestehenden Grenzwert und sinkt erst im zweiten Ver-

suchsjahr auf einen durchschnittlichen Wert von 20,6 mg/l ab, wobei die Maximalwerte mit 51,8 mg/l auch noch knapp über dem Grenzwert liegen. Diese Ergebnisse bestätigen somit die auch im Bericht von Susset und Leuchs (2008) erwähnten relativ hohen, aus dem Material selbst und nicht aus atmosphärischer Deposition stammenden Nitratkonzentrationen im Sickerwasser von Recyclingbaustoffen.

Aufgrund der unterschiedlichen Gehalte im Ausgangsmaterial zeigen auch die Phosphatkonzentrationen im Sickerwasser deutliche Unterschiede zwischen den beiden Baumaterialien (Abb. 3). Die durchschnittlichen Phosphatkonzentrationen im gesamten Versuchszeitraum liegen im Kalkmaterial bei 0,1 mg/l und im Baustoffrecyclingmaterial bei 0,3 mg/l.

Im Anlagejahr liegt die durchschnittliche Phosphatkonzentration unter dem Baustoffrecyclingmaterial bei 0,5 mg/l mit einem Maximalwert im August von >6 mg/l gefolgt von einem zweiten Maximalpeak Ende Dezember mit knapp 2 mg/l, hingegen weist das Kalkschottermaterial im Anlagejahr deutlich geringere Durchschnittskonzentrationen von

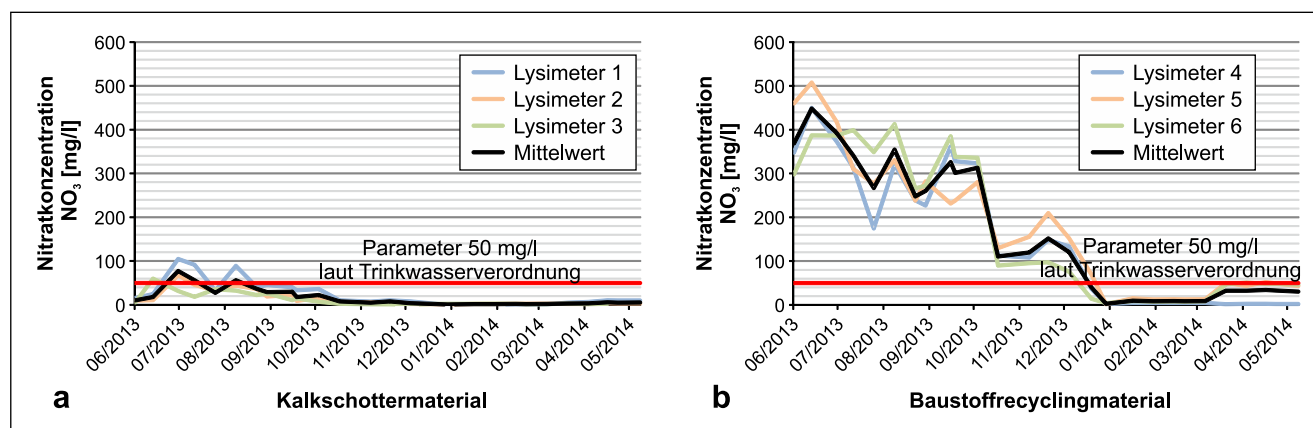


Abb. 2 Nitratkonzentration NO₃ [mg/l] im Sickerwasser über den gesamten Versuchszeitraum unter Kalkschottermaterial (a) und Baustoffrecyclingmaterial (b)

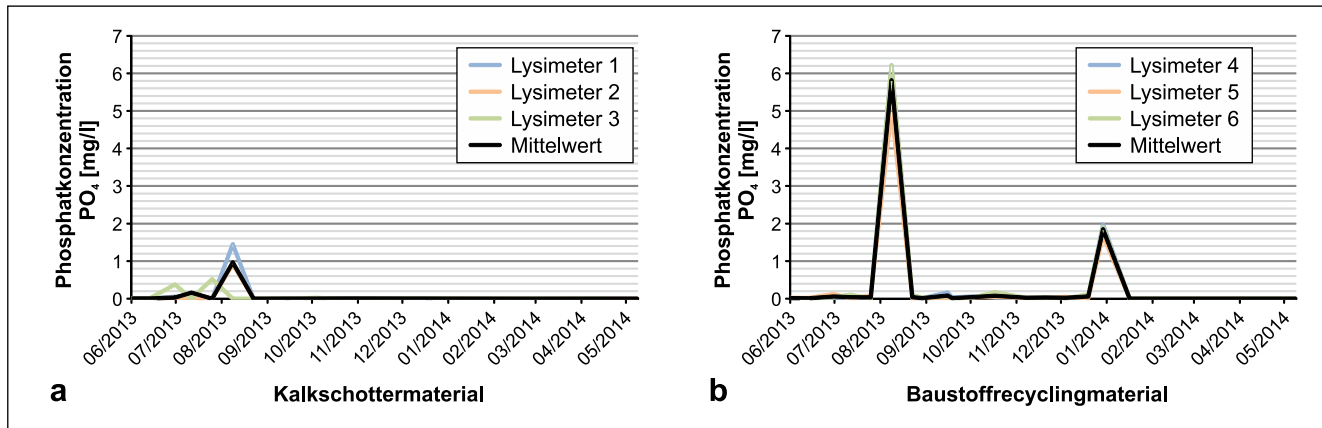


Abb. 3 Phosphatkonzentration PO_4 [mg/l] im Sickerwasser über den gesamten Versuchszeitraum unter Kalkschottermaterial (a) und Baustoffrecyclingmaterial (b)

0,1 mg/l mit einem im August ermittelten Maximalwert von 1,5 mg/l auf.

Im zweiten Hauptnutzungsjahr sinken die Werte beider Baumaterialien auf wenige Mikrogramm pro Liter ab. Die durchschnittlichen Phosphatkonzentrationen des Baustoffrecyclingmaterials liegen unter der Bestimmungsgrenze von 0,0001 mg/l, mit einem Maximalwert von 0,003 mg/l. Das Sickerwasser unter Kalkschottermaterial weist dabei Durchschnittswerte von 0,0009 mg/l und einen Maximalwert von 0,01 mg/l auf.

Hinsichtlich der Eutrophierung des Grundwassers, zu deren Beurteilung der Schwellenwert für die Beeinträchtigung von Fließgewässer-Ökosystemen von 0,2 mg/l Phosphat herangezogen wird, stellen die durchschnittlich ermittelten Phosphatkonzentrationen sowie auch die daraus resultierenden Maximalpeaks weder für das Kalkschotter- noch für das Baustoffrecyclingmaterial ein Problem dar (LUBW 2007). Damit können hinsichtlich der Phosphatkonzentrationen im Sickerwasser beide Materialien bezüglich einer Eutrophierung als unbedenklich eingestuft werden.

Die anorganischen Nährstoffe *Natrium*, *Chlorid*, *Sulfat* und *Ammonium* sowie die *elektrischen Leitfähigkeiten* weisen im Anlagejahr in den Baustoffrecyclingmaterialien ebenfalls höhere Durchschnitts- und auch Maximalwerte auf, als die nach BGBl. I Nr. 21/2001 festgelegten Indikatorparameter. Dabei überschreiten neben Nitrat auch Sulfat und die elektrische Leitfähigkeit die vorgeschriebenen Indikatorparameter bis um das Fünffache. Im Folgejahr kommt es zu einer Reduktion der Werte und damit zur Einhaltung der Richtlinien, jedoch liegen die Durchschnittswerte des Sulfats sowie der elektrischen Leitfähigkeit des Baustoffrecyclingmaterials immer noch knapp 25 % höher als die festgelegten Grenzwerte für Indikatorparameter (Tab. 2).

Aus Sicht des Grundwasserschutzes sind die Nährstoffgehalte im Sickerwasser des Baustoffrecyclingmaterials im Anlagejahr bedenklich. Im zweiten Hauptnutzungsjahr

kommt es jedoch zu einer deutlichen Reduktion aller Nährstoffkonzentrationen im Sickerwasser. Im Gegensatz zu der von Pitha und Scharf (2009) beobachteten Angleichung unterscheidet sich die Sickerwasserqualität der beiden Materialien hier aber nach wie vor deutlich (Tab. 2).

Demzufolge sollte vor einer Verwendung von Baustoffrecyclingmaterialien zum Aufbau von Schotterrasenflächen geprüft werden, inwieweit etwaige Trinkwasserentnahmen durch die vorübergehend erhöhten Nährstoffeinträge beeinträchtigt sein könnten.

Nährstoffauswaschung

Die aus der Summe von Ammonium-N, Nitrat-N und Nitrit-N berechneten anorganischen Stickstoffauswaschungen an den Schotterrasenversuchsflächen zeigen ebenfalls signifikante Unterschiede zwischen den beiden Materialien und zudem hohe Austräge (Abb. 4). Im Kalkschottermaterial liegen die durchschnittlichen anorganischen Stickstoffauswaschungen je Beprobungsintervall bei 0,28 kg/ha, im Baustoffrecyclingmaterial signifikant höher bei 2,75 kg/ha (Tab. 3). Im Kalkschottermaterial liegt die Stickstoffauswaschung über das gesamte erste Versuchsjahr gesehen bei 22,1 kg/ha, im Baustoffrecyclingmaterial beträgt die Stickstofffracht im selben Zeitraum hingegen 221 kg/ha. Dieser um das zehnfache höhere Wert liegt sogar über der erlaubten jährlichen Obergrenze zur Stickstoffdüngung von Dauergrünland (BGBl. Nr. 215/1959, BMLFUW 2009).

Die sehr hohe Stickstofffracht des Baustoffrecyclingmaterials mit Kompostzumischung lässt sich sicherlich primär durch dessen höheren Nährstoffausgangsgesamtgehalt begründen. Da die Versuchsflächen keine Düngungsmaßnahmen erfuhren, wäre allenfalls ein atmosphärischer Stickstoffeintrag für beide Aufbaumaterialien anzurechnen, wobei die Jahresgesamtwerte für nasse und trockene Deposition für den

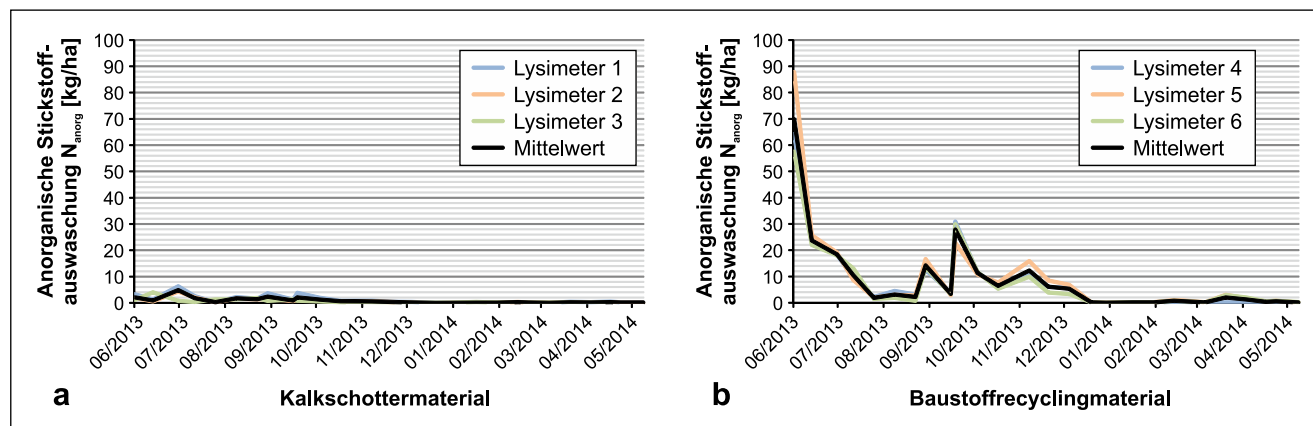


Abb. 4 Anorganische Stickstoffauswaschung N_{anorg} [kg/ha] im Sickerwasser über den gesamten Versuchszeitraum unter Kalkschottermaterial (a) und Baustoffrecyclingmaterial (b)

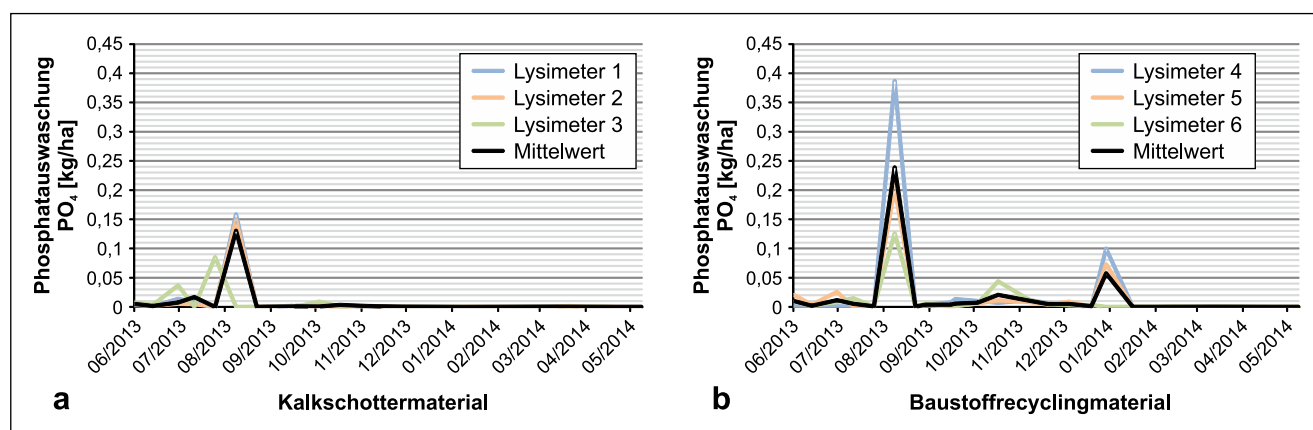


Abb. 5 Phosphatauswaschung PO_4 [kg/ha] im Sickerwasser über den gesamten Versuchszeitraum unter Kalkschottermaterial (a) und Baustoffrecyclingmaterial (b)

Tab. 3 Durchschnittliche Auswaschungswerte [kg/ha] an anorganischen Nährstoffen beider Materialien pro Sickerwasserereignis im gesamten Versuchszeitraum von Juni 2013 bis Mai 2014

Nährstoffe [kg/ha]	Kalkschottermaterial	Baustoffrecyclingmaterial	Nährstoffe [kg/ha]	Kalkschottermaterial	Baustoffrecyclingmaterial
Na	1,61	33,82	S	0,70	16,59
K	0,75	13,93	NH_4	0,00	0,02
Ca	3,26	28,93	NH_4-N	0,00	0,02
Mg	0,55	1,81	NO_2	0,00	0,09
Cl	0,27	11,02	NO_2-N	0,00	0,03
PO_4	0,002	0,005	NO_3	1,23	11,97
P	0,001	0,002	NO_3-N	0,28	2,71
SO_4	2,09	49,66	N	0,28	2,75

Standort Gumpenstein im Durchschnitt von 2002 bis 2014 bei rund 9 kg/ha liegen (Schink 2015).

Bis zur Entwicklung eines stabilen Vegetationsaufbaus muss jedenfalls mit erhöhten Stickstoffausträgen über das Sickerwasser gerechnet werden, in weiterer Folge dürften sich die Austräge dann weitgehend denen von typischen Grünlandflächen angleichen (Taube und Pötsch 2001).

Die aus den Phosphatkonzentrationen und den dazu korrespondierenden Sickerwassermengen berechneten Phosphatauswaschungen zeigen wiederum, wie bei den anorganischen Stickstofffrachten, in den Baustoffrecyclingmaterialien leicht höhere Werte als in den Kalkschottermaterialien (Abb. 5).

Im Kalkschottermaterial liegen dabei die durchschnittlichen Phosphatauswaschungen pro Beprobungsintervall bei 0,0022 kg/ha, im Baustoffrecyclingmaterial bei 0,0048 kg/ha pro Sickerwasserereignis. Im gesamten Versuchszeitraum liegt die Phosphatfracht im Kalkschottermaterial bei 0,06 kg/ha, im Baustoffrecyclingmaterial beträgt die Phosphatauswaschung 0,13 kg/ha.

Dieser an beiden Baumaterialien ermittelte Phosphataustrag liegt im gesamten Versuchszeitraum auf einem sehr niedrigen Niveau, wobei im Anlagejahr die Gesamtphosphatfracht sowohl im Kalkschotter als auch im Baustoffrecyclingmaterial höher ist als im zweiten Hauptnutzungsjahr. Grund dafür ist der im Anlagejahr noch nicht ausreichend entwickelte Pflanzenbestand, wodurch weniger Ertrag gebildet und damit auch weniger Phosphor über die Pflanzen entzogen wurde. Durch das festgestellte sehr niedrige Niveau des Gesamtphosphataustrages mit dem Sickerwasser stellen beide Baumaterialien bezüglich der Sickerwasserqualität damit kein Eutrophierungsproblem dar.

Verglichen zu den vorhin erläuterten Werten der anorganischen Stickstofffrachten sowie Phosphatfrachten liegen die durchschnittlichen Nährstofffrachten pro Sickerwasserereignis für Kalium im Kalkschottermaterial bei <1 kg/ha bzw. im Baustoffrecyclingmaterial bei knapp 14 kg/ha. Für Calcium ergeben sich unter Kalkschottermaterial Auswaschungswerte von 3 kg/ha, unter Baustoffrecyclingmaterial betragen die Calciumfrachten knapp 30 kg/ha (Tab. 3).

Schlussfolgerungen

Aufgrund der fortschreitenden Bodenversiegelung ist es notwendig, versickerungsaktive Flächen zu erhalten und neue zu schaffen (Umweltbundesamt 2014; ZAMG 2014). Um mögliche Auswirkungen solcher Flächen in Bezug auf Menge und insbesondere auch Qualität des Sickerwassers zu untersuchen, wurden an der HBLFA Raumberg-Gumpenstein Schotterrasenflächen mit unterschiedlichen Materialien (Kalkschotter mit einer Mischung von 10 % Humus, Baustoffrecyclingmaterial mit einer Mischung von 10 % Kompost) an Schwerkraftlysimetern aufgebaut und in einem einjährigen Feldversuch die Nährstoffauswaschungen, im speziellen der für die Gewässerbelastung bedeutsamen Stickstoff- als auch Phosphatauswaschung, quantifiziert.

Die Messungen der Sickerwassermengen ergaben, dass die Kalkschottermaterialien höhere Versickerungsraten aufweisen als die Baustoffrecyclingmaterialien. Dies ist in der geringeren Wasserdurchlässigkeit und dem aufgrund besserer Vegetationsentwicklung und höherer nutzbarer Feldkapazität besseren Wasserrückhaltevermögen des Baustoffrecyclingmaterials begründet.

Das Baustoffrecyclingmaterial weist im Anlagejahr sehr hohe Nährstoffauswaschungen auf, welche in Bezug auf die Umweltverträglichkeit bedenklich erscheinen, jedoch im zweiten Hauptnutzungsjahr deutlich geringer werden. Insgesamt ist die im Sickerwasser unter den Baustoffrecyclingmaterialien analysierte durchschnittliche Nitratkonzentration knapp dreimal so hoch wie der in der Trinkwasserverordnung (BGBl. I Nr. 21/2001) festgelegte Grenz-

wert. Aufgrund dieser Tatsache sollte im Anlagejahr von Schotterrasenflächen keine oder maximal eine mäßige Düngung erfolgen, um Nährstoffauswaschungen im Grundwasser zu minimieren.

Die ermittelten Phosphatausträge liegen an beiden Baumaterialien bereits im Anlagejahr auf einem sehr niedrigen Niveau und sinken im zweiten Hauptnutzungsjahr stetig ab. Damit stellt weder die Sickerwasserqualität unter Kalkschotter- noch jene unter Baustoffrecyclingmaterialien ein Eutrophierungsproblem dar.

Mit regionalen Kalkschottermaterialien und einer darauf aufbauenden standortgerechten Begrünung ist eine umweltschonende Bauweise von Schotterrasenflächen mit einer für das Grundwasser unbedenklichen Nitratkonzentration möglich. Als Alternative zu versiegelten Parkflächen erscheint dies insbesondere in inneralpinen Gegenden mit häufigen, starken und anhaltenden Niederschlägen sinnvoll.

Literatur

- ATV-DVWK: Merkblatt M 504, Verdunstung in Abhängigkeit von Landnutzung, Bewuchs, Boden. ATV-DVWK Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser, Abfall (2002)
- BGBl. I Nr. 21/2001: RIS – Bundesrecht konsolidiert – Gesamte Rechtsvorschrift für Trinkwasserverordnung. <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=20001483>, Zugegriffen März 2015
- BGBl. Nr. 215/1959: RIS – Bundesrecht konsolidiert – Gesamte Rechtsvorschrift für Wasserrechtsgesetz. https://www.ris.bka.gv.at/Dokumente/BgblPdf/1959_215_0/1959_215_0.pdf, Zugegriffen April 2015
- Beyer, C., Konrad, W., Rügner, H., Bauer, S., Chan Hee, P., Liedl, R.: Modellbasierte Sickerwasserprognose für die Verwertung von Recycling-Baustoff in technischen Bauwerken. *Grundwasser* **12**(2), 94–107 (2007)
- Bohner, A., Rohrer, V.: Jahreszeitlicher Verlauf der Phosphorkonzentration im Bodenwasser eines Grünlandbodens. In: Bericht zum 18. Alpenländischen Expertenforum „Phosphor im Grünlandbetrieb – Bedeutung und aktuelle Problembereiche“, S. 33–40. HBLFA Raumberg-Gumpenstein, (2013)
- Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft: Hydrographisches Jahrbuch von Österreich 2006. Wien (2009)
- Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft: http://www.bmlfuw.gv.at/wasser/wasserqualitaet/grundwasser/nitrat_grundwasser.html, Zugegriffen Juli 2014
- DIN 18130-1: Baugrund – Untersuchung von Bodenproben – Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts. 19 S, Beuth, Berlin (1998)
- Eder, G.: Stickstoff-, Phosphor- und Kaliumauswaschung bei Wirtschaftsdüngeranwendung im Grün- und Ackerland. Gumpensteiner Lysimetertagung **9**, 61–66 (2001)
- Florineth, F.: Pflanzen statt Beton. Patzer, Berlin (2012)
- Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e. V.: Richtlinie für die Planung, Ausführung und Unterhaltung von begrünbaren Flächenbefestigungen. Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau, Bonn (2008)
- Fredde, G., Dabbert, S.: Handbuch zum Gewässerschutz in der Landwirtschaft. ecomed Verlagsgesellschaft, Landsberg (1998)
- Göbel, P., Coldewey, W.G., Dierkes, C., Kories, H., Meßer, J., Meißner, E.: Einfluss von Gründächern und Regenwassernutzungen auf

- Wasserhaushalt und Grundwasserstand in Siedlungen. *Grundwasser* **12**(3), 189–200 (2007)
- Haslgrübler, P.: Vegetationsverhalten auf Schotterrasenparkplatzflächen aus Baustoffrecyclingmaterial – Optimierung der GREEN CONCRETE Gräser-Kräuter-Saatgutmischung. Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau, Wien (2008). Diplomarbeit
- Henzler, R., Grathwohl, P.: PAK-Freisetzung aus verfestigten Recyclingbauprodukten und mineralischen Abfällen (Release of PAHs from solidified recycled construction materials and solid waste). *Grundwasser* **12**(4), 292–300 (2007)
- Janssen, J., Laatz, W.: Statistische Datenanalyse mit SPSS. Springer, Berlin Heidelberg (2010)
- KOM 571: Fahrplan für ein ressourcenschonendes Europa (2011). http://www.parlament.gv.at/PAKT/EU/XXIV/EU/05/94/EU_59457/imfname_10011245.pdf, Zugegriffen April 2015
- Land Steiermark – Amt der Steiermärkischen Landesregierung: <http://www.umwelt.steiermark.at/cms/beitrag/10023700/25206>, Zugegriffen Sep 2014
- Längert, S.: Anlage und Monitoring von Schotterrasen Versuchsflächen im Raum Wien – Empfehlung für die Errichtung und Erhaltung von Schotterrasen. Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau, Wien (2005). Diplomarbeit
- Längert, S., Florineth, F.: Schotterrasen – Eine Grüne Alternative zu asphaltierten Parkplätzen. Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau, Department für Bautechnik und Naturgefahren, Wien (2012)
- LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg: Maßnahmenplanung im Hinblick auf die Phosphorbelastung der Fließgewässer. Teil I: Maßnahmen-Zielwerte und Überwachungsergebnisse. LUBW, Baden-Württemberg (2007)
- ÖNORM L 1095: Chemische Bodenuntersuchungen: Bestimmung des Gesamt-Stickstoffgehaltes durch trockene Verbrennung. Austrian Standards Institute, Österreichisches Normungsinstitut, Wien (2002)
- ÖNORM L 1087: Chemische Bodenuntersuchungen: Bestimmung von „pflanzenverfügbarem“ Phosphor und Kalium nach der Calcium-Acetat-Lactat (CAL)-Methode. Austrian Standards Institute, Österreichisches Normungsinstitut, Wien (2005)
- Pitha, U., Scharf, B.: „Green Concrete“-Schotterrasen: Blühende Parkplätze aus Baustoffrecyclingmaterialien. *Neue Landschaft* **7**, 41–46 (2009)
- RVS 11.06.29: Grundlagen Prüfverfahren Steinmaterial. Wien (2004)
- Schaumberger, A.: Räumliche Modelle zur Vegetations- und Ertragsdynamik im Wirtschaftsgrünland. Dissertation, Technische Universität Graz. HBLFA Raumberg-Gumpenstein, Irnding (2011)
- Schink, M.: Persönliche Mitteilung unveröffentlichter Daten der HBLFA Raumberg-Gumpenstein (2015)
- Slawitsch, V.: Bodenphysikalische Untersuchungen und Bodenwasserhaushalt von Schotterrasenflächen an einem inneralpinen Standort. Masterarbeit, Karl-Franzens-Universität Graz. Institut für Erdwissenschaften, Graz (2014)
- Soilmoisture Equipment Corporation: 2800 KI Operating instructions-Guelph Permeameter. Soilmoisture Equipment Corporation, Santa Barbara (2008)
- Strauss, P., Staudinger, B.: Berechnung der Phosphor- und Schwefelstofffrachten zweier Hauptzubringer (Zellerache, Fuschlerache) des Mondsees. *Schriftenr BAW* **26**, 18–33 (2007)
- Susset, B., Leuchs, W.: Stofffreisetzung aus mineralischen Ersatzbaustoffen und Böden – Ermittlung der Quellstärke-Entwicklung und des Rückhalte- und/oder Abbaupotentials mittels Freilandlysime-tern und Laborelutionen. Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen, Recklinghausen (2008)
- Taube, F., Pötsch, E.M.: On-farm nutrient balance assessment to improve nutrient management on organic dairy farms. *Grass Sci Eur* **6**, 225–234 (2001)
- Umweltbundesamt: Zehnter Umweltkontrollbericht, Umweltsituation in Österreich. Reports, Bd. REP-0410. Umweltbundesamt, Wien (2013)
- Umweltbundesamt: Klimaschutzbericht. Reports, Bd. REP-0491. Umweltbundesamt, Wien (2014)
- Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG). <http://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/informationsportal-klimawandel/klimazukunft/europa/extremereignisse>, Zugegriffen Sep 2014