

Simulation der Wasserverteilung in unterflurbewässerten Bodenbauweisen für Sportrasenflächen*

Cordel J., R. Anlauf und W. Prämaßing

Einleitung

Strapazierfähige und nachhaltige Rasensportplätze stellen die Grundvoraussetzung für die Aufrechterhaltung des Spielbetriebes aller Amateur- und Profivereine dar. Allerdings stehen sie wie alle anderen Ökosysteme verstärkt unter Druck, sich intensiver und gezielter mit dem durch den Klimawandel verschärften Wassermangel auseinanderzusetzen und effizientere Bewässerungssysteme zu entwickeln. Nach BREUNINGER et al. (2013) ist die Notwendigkeit, die effektive Bewässerung zu maximieren, die größte Herausforderung der Zukunft und um den Fortbestand der Industrie zu gewährleisten ist es notwendig, Techniken und Managementpraktiken zu entwickeln, die die Erhaltung der Rasensportflächen mit der geringstmöglichen Wassernutzung ermöglichen. Dies sollte idealerweise geschehen, bevor es Verordnungen oder Gesetze vorschreiben.

Die alternativen Angebote für die Gestaltung von Sportbelägen sind vielfältig. In Ballungsgebieten werden meist äußerst strapazierfähige und weniger unterhaltungs- und pflegeintensive Kunststoffrasensportplätze gebaut. Jedoch ist u. a., resultierend aus der aktuellen Mikroplastikdebatte, ein Trend zu nachhaltigen und ressourcenschonenden Baustoffen und Bauweisen zu erkennen. Im Profisport gelten Rasensportplätze als etablierter Standard. Aufgrund der angenehmen Spieleigenschaften und geringen Herstellkosten zählen Rasensportplätze zu den meistverbauten Varianten. Technische Standards sind in nationalen sowie internationalen Normen definiert. Die Konzeption des technischen Aufbaus eines Rasensportplatzes und die damit verbundene Auswahl der Baustoffe fordern zum Teil, sehr unterschiedliche Ansprüche zu berücksichtigen. Wirtschaftliche Aspekte, Frequentierung, Standortfaktoren, bauliche Gegeben-

heiten sowie die tangierende Gesetzeslage zählen hierbei zu den elementaren Faktoren. Die Funktionsfähigkeit eines Rasensportplatzes, bestehend aus Rasendecke, Rasentragschicht und technischem Unterbau sowie einem System zur Wasserabführung (DFB, 2011), kann nur dann gewährleistet werden, wenn es gelingt, die unterschiedlichen Anforderungen aufeinander abzustimmen. Die Wahl der jeweiligen Baustoffe bietet Variationsmöglichkeiten zur Herstellung von Rasentragschichtgemischen sowie zur Konzeption des technischen Unterbaus, mit dem Ziel einer bedarfsgerechten Optimierung. Klimatische Bedingungen sowie die Frequentierung von Rasensportplätzen führen zu einer Strapazierung des Pflanzenbestandes sowie zu einer Veränderung des Bodengefüges. Daher ist ein an die äußeren Bedingungen und Einflüsse angepasstes Pflegemanagement zum Funktionserhalt von Rasensportplätzen von zentraler Bedeutung. Laut MÜLLER-BECK (2018) kann eine Differenzierung der Pflegearbeiten in Grund-, Erhaltungs- und Regenerationspflege erfolgen. Der im Rahmen der Grundpflege elementar notwendige Einsatz von Wasser zur Rasenbewässerung rückt hierbei zunehmend in den Fokus. Aktuell findet die Bewässerung meist über Überflurbewässerungssysteme statt. Von Nachteil können die laut DUKES et al. (2006) geringen durchschnittlichen Verteilgenauigkeiten sein. Klimatische Veränderungen mit hohen Temperaturen und geringen Niederschlagsmengen führen zu einer Beeinträchtigung des Pflanzenwachstums sowie einer Reduzierung der Rasenqualität und Funktionalität. Die für den Pflanzenbestand defizitären klimatischen Bedingungen müssen zum Funktions- sowie Qualitätserhalt der Rasennarbe über entsprechende Wasserzugabe kompensiert werden.

Die sich verschärfende Knappheit von Wasserressourcen hat besonders in den vergangenen zehn Jahren zu ver-

schiedenen innovativen Ansätzen geführt, die darauf hinauslaufen, Rasensportplätze auch in Zukunft zu erhalten. Kaltzonengräser, besonders Wiesenrispe und Deutsches Weidelgras, sind für den Bau von Sportrasenplätzen besonders geeignet (BONOS und HUFF, 2013). In diesem Zusammenhang untersuchen einige Studien den Gebrauch von aufbereitetem Wasser und den damit verbundenen höheren Salzgehalt auf Kaltzonengräser (KOCH, 2012; KOCH und BONOS, 2011). Das Ziel besteht dabei darin, die tolerantesten Sorten von Kaltzonengräsern zu identifizieren oder neue Varianten zu züchten (MEYER et al., 2017). In ähnlicher Weise sind Untersuchungen im Gange, trockenheitsresistente Gräser zu entwickeln, die für die Benutzung von Rasensportplätzen notwendigen Bedingungen auch mit weniger Bewässerung sicherstellen können (ORLOFF et al., 2016; RICHARDSON et al., 2009).

In Fachkreisen wird über den effektiven Umgang mit der Ressource Wasser diskutiert. Es gibt laut LEINAUER (2020) mehrere Strategien, um einen sparsamen Umgang mit Beregnungswasser zu ermöglichen. Eine effektive Bewässerung sollte nach CARROW et al. (2002) Verluste aus Windabdrift, Oberflächenabfluss, Versickerung und Evapotranspiration vermeiden. Eine Strategie zum effektiven Umgang mit der Ressource Wasser ist die Wasserabgabe im direkten Wurzelbereich der Rasenpflanze über ein Unterflurbewässerungssystem (LEINAUER, 2020). Hohe funktionale Anforderungen, insbesondere Wasserdurchlässigkeit und Diffusionsmöglichkeit, an meist sorptionsschwache Rasentragschichtgemische, stehen grundsätzlich im Widerspruch zum effektiven bzw. sparsamen Umgang mit Beregnungswasser (FRANKEN, 1994). Zur Kompensation sollte das Bewässerungsmanagement an die bodenphysikalischen Eigenschaften, die Konstellation des Boden-

*) Der Beitrag basiert auf den Ergebnissen der Masterarbeit an der Hochschule Osnabrück, Fakultät Agrarwissenschaften und Landschaftsarchitektur, Management im Landschaftsbau, CORDEL (2021).

aufbaus sowie an die Art der Wasser- ausbringung angepasst sein.

In der hier beschriebenen Studie steht die Unterflurbewässerung von Rasensportplätzen im Vordergrund, die zurzeit noch nicht weitverbreitet ist. Allerdings sind die bisherigen Ergebnisse eines solchen wassersparenden Ansatzes vielversprechend (LEINAUER und DEVITT, 2013). Ursprünglich entwickelte sich diese Technologie in modernen Landnutzungssystemen in den 1960er Jahren und hat seit den 1980er Jahren dort immer größere Bedeutung gewonnen (LAMM et al., 2010). Die effizientere und gezieltere Nutzung der Bewässerung und Verteilung der Nährstoffe waren in diesem Zusammenhang die größten Vorteile und haben trotz der Nachteile wie höherer Anfangsinvestitionen und schwieriger Reparaturen bestimmend zur gestiegenen Benutzung beigetragen. In der Rasensportindustrie wird die Unterflurbewässerung im Vergleich dazu erst seit den 1990er Jahren wissenschaftlich erforscht (CAMP, 1998; LAMM und ROGERS, 2017).

Stand des Wissens

Ähnlich wie bei der Erforschung der Unterflurbewässerung gab es große wissenschaftliche Fortschritte auch hinsichtlich der Simulation der Verteilung von Niederschlags- und Beregnungswasser und anderen bodenphysikalischen Prozessen in den letzten 30 Jahren. In diesem Zusammenhang sind verschiedene Software-Simulationsmodelle entwickelt worden, die alle zum besseren Verständnis und zur besseren Voraussage komplexer bodenphysikalischer Prozesse beigetragen haben. Ein sehr guter Überblick über diese diversen Methoden findet sich bei ŠIMŮNEK et al. (2008) und ŠIMŮNEK und BRADFORD (2008). Dabei ist auch klar geworden, dass die Prozesse in der ungesättigten Bodenzone sehr viel komplizierter sind als bisher angenommen wurde und dass deren Erforschung die Zusammenarbeit von Wissenschaftlern verschiedener Disziplinen erforderlich macht (VERECKEN et al., 2016).

Was die Modellierung der Wasserverteilung und Wasserdynamik im Boden anbelangt, hat sich die Hydrus-Software (1D/2D/3D) als besonders verlässlich und vielseitig erwiesen (ŠIMŮNEK et al., 2016). Sowohl bei der Erforschung der Unterflurbewässerung in modernen Landnutzungssystemen (ANLAUF et al., 2012; DEMIREL et al., 2015; SIYAL et al., 2013) als auch in anderen Öko-

systemen (HARTMANN et al., 2018) haben Wissenschaftler eine große und zuverlässige Übereinstimmung zwischen Hydrus-Simulationen und der realen Wasserverteilung in Feldversuchen in verschiedenen Böden nachweisen können (ABID und ABID, 2019; DEMIREL et al., 2015; SHAN et al., 2019). Die Ergebnisse der Studie von KANDELOUS und ŠIMŮNEK (2010) legen nahe, dass Hydrus-2D sowohl für die Entwicklung als auch das Management von Unterflurbewässerungssystemen für Böden mit unterschiedlichen Gemischen ein gutes Instrument ist. Allerdings haben sie ebenfalls bemerkt, dass Hydrus-2D bei der Überlagerung der Wasserverteilung zwischen zwei Ermittlern (Austrittsporen eines Bewässerungsschlauches) an Genauigkeit verliert und Hydrus-3D in diesem Fall verlässlichere Ergebnisse liefert (KANDELOUS et al., 2011).

Diese diversen Studien haben allerdings auch einige Unstimmigkeiten zwischen Hydrus-Simulationen und parallel laufenden Feldversuchen hervorgehoben. Eine davon ist die Überschätzung des Wassergehaltes in der Hydrus-Simulation, die in einigen Experimenten auftrat (GHAZOUANI et al., 2019). ANLAUF et al. (2012) haben zudem betont, dass der Prozess der Hysterese der Wassergehalts-/Saugspannungs-Funktion in manchen Materialien notwendigerweise miteinberechnet werden muss, um genauere Voraussagen der realen Wasserverteilung per Hydrus-Software zu erzielen.

Schließlich haben diese Weiterentwicklung und präzisere Anwendung der Hydrus-Software es ermöglicht, bestimmte Aspekte der Bewässerung zu isolieren und zu erforschen. Dadurch konnten z. B. Faktoren wie die wichtige Rolle der Bodentemperatur (HARTMANN et al., 2018) oder die Möglichkeit der Defizitbewässerung genauer untersucht werden (PHOGAT et al., 2017; SEIDEL et al., 2015). Andere Studien haben eine erhöhte Beregnungseffizienz durch kürzere und häufigere Bewässerungsperioden vorgeschlagen und deren Vorteile nachgewiesen (ELNESR et al., 2014; GARCÍA MORILLO et al., 2017), was für die angelaufene Periode der Wasserknappheit vielversprechend sein könnte.

Material und Methoden

Die Simulation der Wasserverteilung in unterflurbewässerten Bodenbauweisen für Sportrasenflächen wurde an insge-

samt drei Varianten mit jeweils drei unterschiedlichen Bodenbauweisen, einer Unterflurbewässerung und verschiedenen Bewässerungsmengen durchgeführt. Zur Simulation der Wasserverteilung wurde die Software Hydrus-2D Standard Version 3.03.0300 eingesetzt. Die Messungen und Simulationen erfolgten jeweils ohne Pflanzenbestand bzw. Rasendecke, um die grundsätzlichen Unterschiede im Wasserhaushalt zu zeigen und die viel komplexeren Vorgänge bei der Wasseraufnahme durch Pflanzen zunächst außen vor zu lassen.

Ein Vergleich der gemessenen und simulierten Werte ergab für alle Varianten eine gute bis befriedigende Übereinstimmung (Details s. Masterarbeit CORDEL, 2021). Zur grundsätzlichen Darstellung der Unterschiede zwischen den Bodenaufbauten werden in dieser Studie im Folgenden deshalb nur die Simulationsergebnisse dargestellt.

Baustoffe und deren Eigenschaften

Insgesamt wurden neun Gerüstbaustoffe aus Quarzsand, Lava, Torf und Oberboden verwendet, um fünf kategorisierte Baustoffe in einem Körnungsbereich von 0-8 mm herzustellen. Hierbei orientierte sich die Kategorisierung der Baustoffe an einer zwei- oder drei-lagigen Bodenbauweise für Sportrasenflächen. Sämtliche Baustoffe wurden eingehend im Labor der Hochschule Osnabrück untersucht.

Zur allgemeinen Charakterisierung und Beschreibung der Baustoffe erfolgte zunächst eine Ermittlung der Korngrößenverteilung nach DIN EN ISO 17892-4. Die graphische Aufbereitung der Kornverteilungslinien erfolgte unter Berücksichtigung der nationalen Fachnorm DIN 18035-4 in Form von oberen und unteren Sollbändern. Als obere Rasentragschicht (obere RTS) fanden die Baustoffe STD (typisches Rasentragschichtgemisch bestehend aus gewaschenen Rheinsanden und Torf in einer Körnung von 0-2 mm) und ein hinsichtlich Infiltrationsleistung optimierter Baustoff UHFC (analog zu STD jedoch mit reduzierten Feinsandanteil, Körnung 0-2 mm) Verwendung (Abbildung 1). Als Drainschicht fungierte hierbei jeweils der Baustoff DS (gewaschener Rheinsand einer Körnung von 0/6 mm).

Als untere Rasentragschicht (URTS) fanden die Baustoffe URTS F (relativ feines Material bestehend aus einem doppelt gewaschenen Rheinsand Körnung 0,1-0,5 mm) und URTS C (etwas gröber, Körnung 0,2-2 mm) jeweils bei 3-lagiger Bodenbauweise Verwendung.

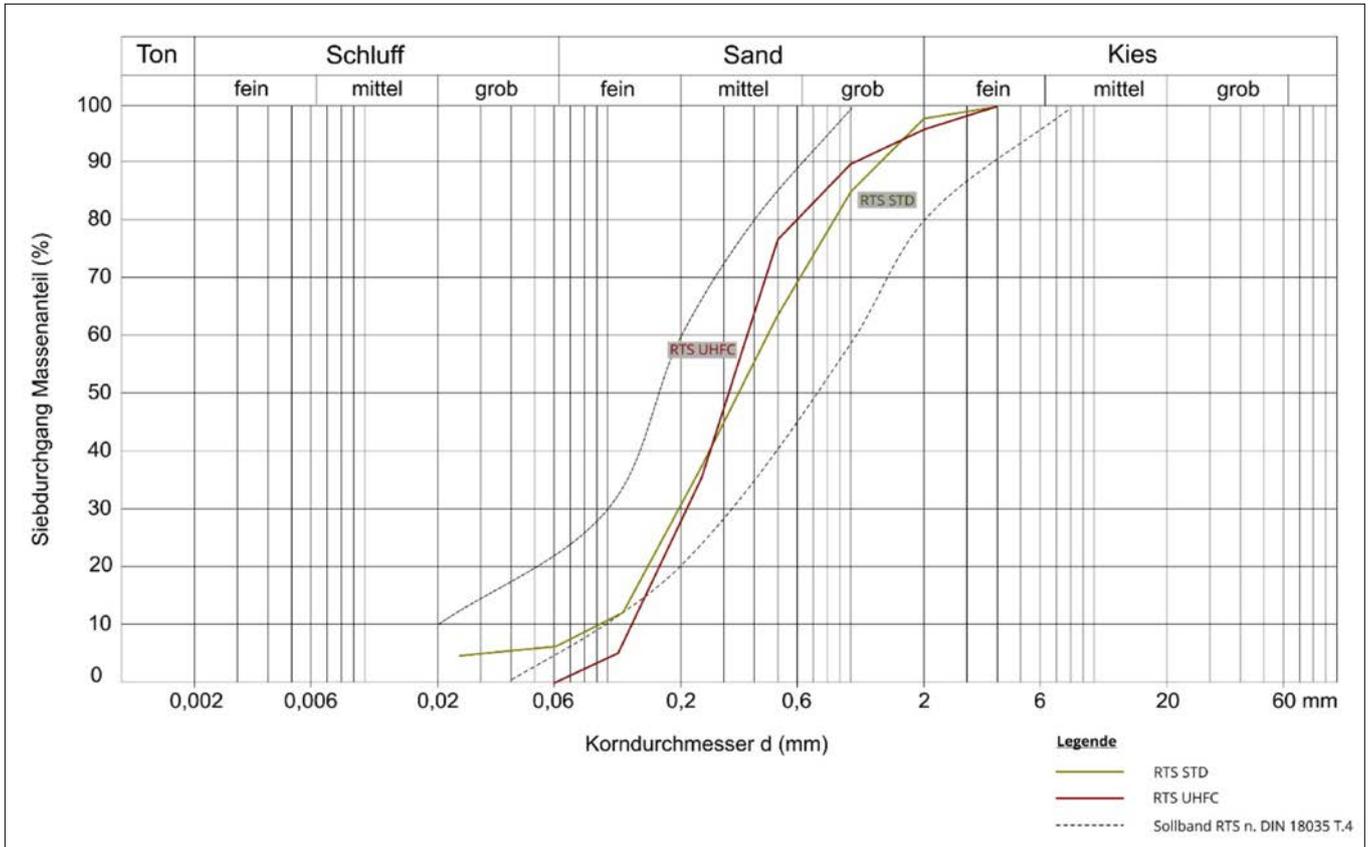


Abb. 1: Kornverteilungslinie der Baustoffe STD und UHFC sowie empfohlener Korngrößenverteilungsbereich für Gemische der Rasentragschicht nach DIN 18035-4.

Baustoff	Lagerungsdichte bei 95 % D _{PR}	gesättigte Wasserleitfähigkeit kf	
	(g/cm ³)	(cm/d)	(mm/h)
STD	1,54	528	220
UHFC	1,46	1.283	534
URTS C	1,60	14.594	6.081
URTS F	1,41	3.515	1.464
DS	1,80	2.198	916

Tab. 1: Übersicht gesättigte Wasserleitfähigkeiten der Baustoffe.

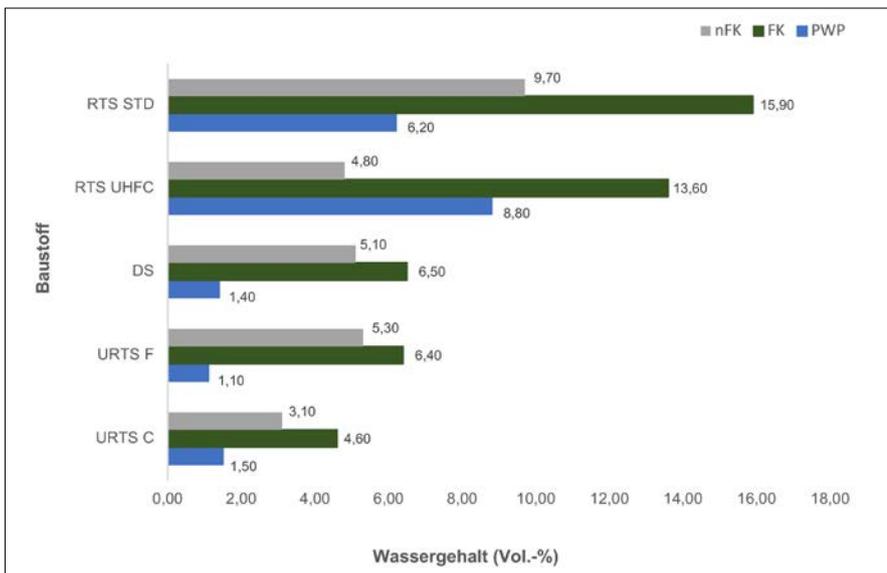


Abb. 2: Darstellung Feldkapazität (FK), permanenter Welkepunkt (PWP) und nutzbare Feldkapazität (nFK) der Baustoffe STD, UHFC, DS, URTS F und URTS C.

Zur physikalischen Charakterisierung erfolgte eine Analyse der Baustoffe auf Basis einer Lagerungsdichte von 95 % D_{PR}. Hierzu wurde zunächst die Proctordichte der Baustoffe ermittelt. Im Anschluss daran erfolgte die Ermittlung der Partikeldichte, Porenvolumina, gesättigten Wasserleitfähigkeit und Wassergehalts-Saugspannungs-Kurve. Die Hysterese der Wassergehalts-Saugspannungs-Kurve wurde nach dem Verfahren von ANLAUF et al. (2012) ermittelt.

Die Ermittlung der gesättigten Wasserleitfähigkeit (kf) erfolgte in einem Eijkelkamp-Permeameter mit jeweils 8-facher Wiederholung. Die Ergebnisse sind zusammenfassend in Tabelle 1 dargestellt.

Die Bestimmung der pF-Kurven (Wassergehalts-Saugspannungs-Kurven = Wasser-Retentionskurven) erfolgte im Unterdruckkasten für die pF-Stufen 1,0, 1,8 und 2,5 sowie für die pF-Stufe 4,2 im Überdruckbehälter in Anlehnung an DIN 11274. Die aus den Messungen rechnerisch resultierende Feldkapazität und nutzbare Feldkapazität sind zusammenfassend in Abbildung 2 dargestellt.

Als Grundlage für das Simulationsmodell und die Generierung von rele-

vanten Simulationsdaten erfolgte die Parametrisierung der bodenphysikalischen Funktionen der einzelnen Baustoffe nach MUALEM (1976) und VAN GENUCHTEN (1980). Die Beziehung zwischen Wassergehalt und Wasser-spannung $|\psi_m|$ (Betrag des Matrixpotentials) wurde im Modell entsprechend dem Ansatz von VAN-GENUCHTEN unter der Verwendung folgender Retentionsfunktion dargestellt:

$$\theta(\psi_m) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha \times |\psi_m|)^n]^m}$$

Hierbei stellen θ_r den minimalen Restwassergehalt und θ_s den Sättigungswassergehalt (Gesamtporosität) dar. Die Parameter α , n und m dienen zur Beschreibung des Funktionsgraphen.

Unter Verwendung der o. a. Retentionsfunktion und der im Labor ermittelten pF-Werte bei 1,8, 2,5 und 4,2 erfolgte auf Basis einer Iterationsrechnung die Ermittlung der zur Charakterisierung der hydraulischen Bodeneigenschaften erforderlichen VAN-GENUCHTEN-Parameter. Parameter l wurde als standardisierte Konstante mit einem Wert von 0,5 übernommen (VAN GENUCHTEN, 1980); eine zusammenfassende Darstellung zeigt Tabelle 2. Aufgrund einer Wasserabgabe im Wurzelraum und der Bedeutung des kapillaren Aufstiegs

des Wassers bei der Unterflurbewässerung wurden die Simulationsergebnisse unter Berücksichtigung des Hysterese Effekts generiert.

Bodenaufbau

Entsprechend der Fachnorm DIN 18035 - 4 erfolgte u. a. die Konzeption der Simulationskörper als zwei-lagige Drainschichtbauweise. Als oberste Lage fanden hierbei Baustoffe der Kategorie obere RTS Verwendung, während als untere Lage Baustoff DS mit einer Schichtstärke von jeweils 12 cm benutzt wurde. Als obere Rasentragschicht kamen die Baustoffe STD sowie UHFC zum Einsatz. Als Drainschichtmaterial wurde der Baustoff DS verwendet und diente als Zwischenschicht zwischen oberer Rasentragschicht und Baugrund. Als Baugrund wurde ein handelsüblicher Sand der Körnung 0/10 mm verwendet und im Simulationsprozess über die Materialdatenbank der Simulationssoftware als „Sand“ mit einer Schichtstärke von 26 cm definiert. Die daraus resultierende Gesamtkonstruktionsstärke der zwei-lagigen Bodenbauweise ergab 50 cm.

Die Verlegetiefe des Unterflurbewässerungssystems (SDI-System) lag auf 17 cm; eingebettet wurde das System bei zwei-lagiger Bauweise mittig in den Baustoff DS. Die Variantenbezeichnung bei 2-lagiger Ausbildung erfolgte in Ab-

hängigkeit des verwendeten Bewässerungssystems sowie des oberen Rasentragschichtmaterials. In Abbildung 3 ist das Konstruktionsschema bei zwei-lagiger unterflurbewässerter Bodenbauweise (2LSTD_UF und 2LUHFC_UF) dargestellt.

Von der Fachnorm DIN 18035 - 4 abweichend erfolgte weiterführend die Simulation der Wasserverteilung bei drei-lagiger Bauweise. Als Rasentragschichtgemische für die oberste Lage wurde der Baustoff RTS UHFC mit einer Einbaustärke von 12 cm verwendet, während die 6 cm starke URTS C jeweils als unterste Lage fungierte. Die mittlere ebenfalls 6 cm starke untere Rasentragschicht URTS F diente zur Einbettung des Unterflurbewässerungssystems (SDI-System). Die Verlegetiefe des SDI-Systems lag auf 17 cm. Die Definition des Baugrundes erfolgte analog zu den zwei-lagigen Bauweisen mit einer Schichtenstärke von 26 cm. Die daraus resultierende Gesamtkonstruktionsstärke der drei-lagigen Bodenbauweise ergab 50 cm. In Abbildung 3 ist das Konstruktionsschema von einer drei-lagigen unterflurbewässerten Bodenbauweise 3LUHFC_UF dargestellt.

Die Unterflurbewässerung basierte auf einem nicht druck-kompensierbaren Perlschlauchsystem mit einem Verlegetiefe von 33 cm und einer Verlegetiefe von 17 cm. Die Berechnung des Wasserflusses q als elementare Randbedingung für den Simulationsprozess ergab sich auf Basis der Geometrie des Perlschlauchs und des Volumenflusses pro m Schlauchlänge. Der Fluss q ($\text{cm}^3/(\text{cm}^2 \times h)$) quantifiziert die stündliche Wassermenge, die bei einem Druck von 0,2 bar aus dem Perlschlauch in den Boden austritt.

Die auf die Bewässerungszyklen abgestimmten Bewässerungsmengen und daraus resultierenden Laufzeiten des Unterflurbewässerungssystems ergaben sich auf Basis der Wasserabgabe des Perlschlauchsystems im Boden sowie des gewählten Verlegetiefs der Perlschlauchleitungen. Die daraus resultierende Laufzeit der Unterflurbewässerung für Bewässerungszyklus eins mit 20 l/m^2 lag bei 2,22 Stunden und bei Bewässerungszyklus zwei mit 10 l/m^2 bei 1,11 Stunden. Zusammenfassend sind die technischen Daten des Perlschlauchsystems in Tabelle 3 aufgeführt.

Simulationsmodell

Die Modellierung der Systemvarianten erfolgte innerhalb der Software Hydrus-2D-Standard an Simulations-

Baustoff	Bodenhydraulische Parameter					
	θ_r (-)	θ_s (-)	α_w (1/cm)	n (-)	K_s (cm/Std)	α_d/α_w (-)
STD	0,06	0,42	0,12	1,73	22,01	0,76
UHFC	0,09	0,45	0,09	2,49	53,47	0,63
URTS C	0,01	0,39	0,30	1,93	608,12	0,76
URTS F	0,01	0,47	0,04	2,72	146,47	0,71
DS	0,01	0,32	0,16	2,06	91,61	0,55

Tab. 2: Übersicht bodenhydraulischer Parameter der Baustoffe zur Charakterisierung der jeweiligen Retentionsfunktion und Berechnung der Matrixpotentiale.

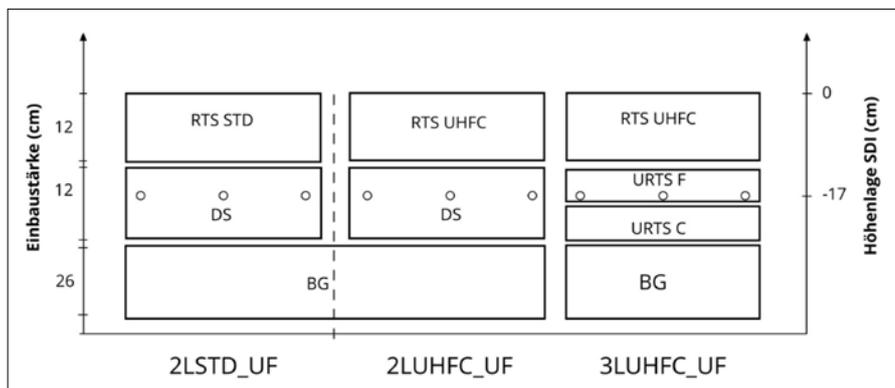


Abb. 3: Konstruktionsschema unterflurbewässerter 2-lagiger Bodenbauweisen 2LSTD_UF und 2LUHFC_UF sowie 3-lagiger Bodenbauweisen 3LUHFC_UF, Höhenlage Unterflurbewässerung (SDI) -17 cm.

körpern mit den Abmessungen von $x = 100 \text{ cm}$, $z = 50 \text{ cm}$ in zwei- oder drei-lagiger Bauweise mit Unterflurbewässerung. Resultierend aus den geometrischen Abmessungen der Simulationskörper und dem Verlegeabstand des SDI-Systems (33 cm) fanden insgesamt drei Perlschlauchleitungen mit einer Verlegetiefe von 17 cm im Simula-

tionsprozess Berücksichtigung. In Abbildung 4 sind die Abmessungen des Simulationskörpers, Verlegeabstände und für die zwei-lagigen unterflurbewässerten Varianten 2LSTD_UF und 2LUHFC_UF dargestellt. Abbildung 5 ist die entsprechende Darstellung für die drei-lagige unterflurbewässerte Variante 3LUHFC_UF zu entnehmen.

Es wurden Beobachtungsabstände von 8,25 cm mit jeweils mittlerer Ausrichtung oberhalb des SDI-Systems sowie Beobachtungstiefen von 3, 6 und 12 cm zur Interpretation der Simulationsergebnisse festgelegt. Zusätzlich wurde eine durchdringende vergleichende Betrachtung der Wasserverteilung einer handelsüblichen und der Fachnorm entsprechenden zwei-lagigen Drainschichtbauweise (Varianten 2LSTD und 2LUHFC) sowie von der Norm abweichenden drei-lagigen Bauweise (3LUHFC) jeweils bei Unterflurbewässerung ausgeführt.

Die Simulation der Wasserverteilung wurde innerhalb eines Zeitraums von 72 Stunden an den Varianten jeweils ohne Pflanzendecke durchgeführt.

Die Integration der Unterflurbewässerung in den Simulationsprozess erfolgte unter entsprechender Berücksichtigung der technischen Merkmalsausprägungen des Perlschlauchsystems. In Tabelle 5 sind zusammenfassend die Randbedingungen der Simulationsmodelle bei Unterflurbewässerung dargestellt.

Ergebnisse

Die Abbildungen 6 und 7 zeigen die Wasserverteilung unter Berücksichtigung der Bodenbauweise sowie des technischen Aufbaus mit einer jeweiligen Gesamtkonstruktionsstärke von 50 cm. Abbildung 6 zeigt die Wasserverteilung innerhalb der Simulationskörper bei Unterflurbewässerung und einer Bewässerungsmenge von 20 l/m^2 (Zyklus 1). Vergleichend betrachtet zeigen die Varianten 2LSTD_UF und 2LUHFC_UF zu Versuchsbeginn einen stärker ausgeprägten kapillaren Aufstieg des Bewässerungswassers in den oberen Bereich der Simulationskörper als Variante 3LUHFC_UF. Nach Abschluss des 2,2-stündigen Bewässerungsvorgangs ist ein weiterführender kapillarer Aufstieg des Bewässerungswassers festzustellen, jedoch findet zusätzlich eine Verlagerung des Bewässerungswassers in tiefere Bodenzonen statt. Ein konträres Verhalten zeigt die drei-lagige Variante 3LUHFC_UF. Nach Abschluss des Bewässerungsvorgangs ist der kapillare Aufstieg zunächst geringer als innerhalb der zwei-lagigen Varianten ausgeprägt, jedoch findet abweichend eine Konzentration des Bewässerungswassers im Bereich des Unterflurbewässerungssystems auf 17 cm Tiefe statt. Zu einem Beobachtungszeitpunkt von

Technische Daten Perlschlauchsystem					
ID ¹ (mm)	AD ² (mm)	Betriebsdruck (bar)	Verlegetiefe (cm)	Verlegeabstand (cm)	Wasserabgabe (l/(h × m))
13,00	18,00	0,20	17,00	33,00	3,00

¹ID=Innendurchmesser, ²AD=Außendurchmesser

Tab. 3: Übersicht der technischen Daten des Perlschlauchsystems.

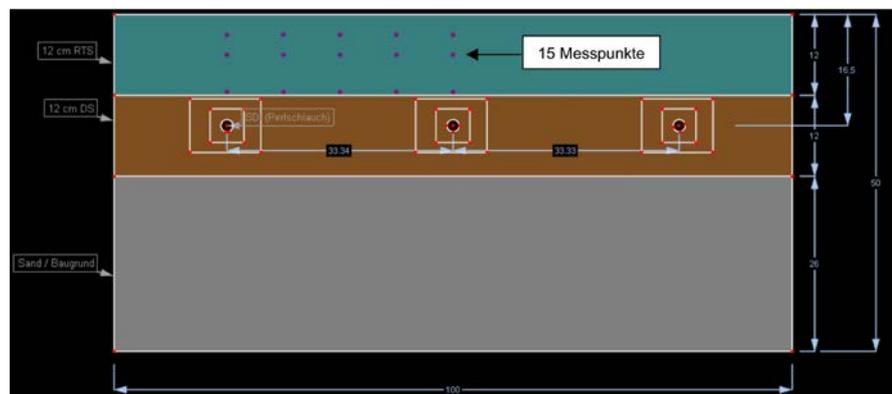


Abb. 4: Querschnitt der 2-lagigen Simulationskörper 2LSTD_UF und 2LUHFC_UF mit Unterflurbewässerung sowie Darstellung der 15 Messpunkte zur Generierung der Simulationsergebnisse.

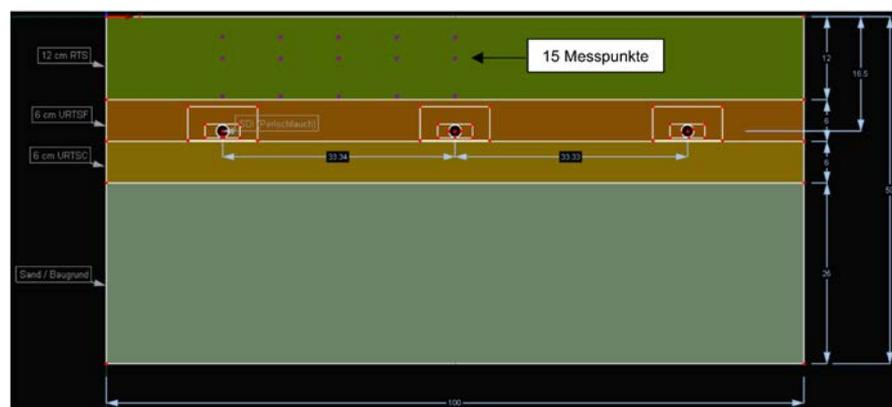


Abb. 5: Querschnitt eines 3-lagigen Simulationskörpers 3LUHFC_UF mit Unterflurbewässerung sowie Darstellung der 15 Messpunkte zur Generierung der Simulationsergebnisse.

Bewässerungsart	Zyklus	Zeit	Niederschlag	Evaporation	Wasserfluss q
	(-)	(h)	(cm/h)	(cm/h)	(cm ³ /(cm ² × h))
Unterflurbewässerung	1	0,00	0,00	0,01	5,31
		2,22	0,00	0,01	5,31
		96,00	0,00	0,01	0,00
	2	0,00	0,00	0,01	5,31
		1,11	0,00	0,01	5,31
		96,00	0,00	0,01	0,00

Tab. 5: Randbedingungen des Simulationsmodells zur Ermittlung der Wasserverteilung bei Unterflurbewässerung unter Berücksichtigung der beiden Bewässerungszyklen (1 = 20 l/m^2 , 2 = 10 l/m^2).

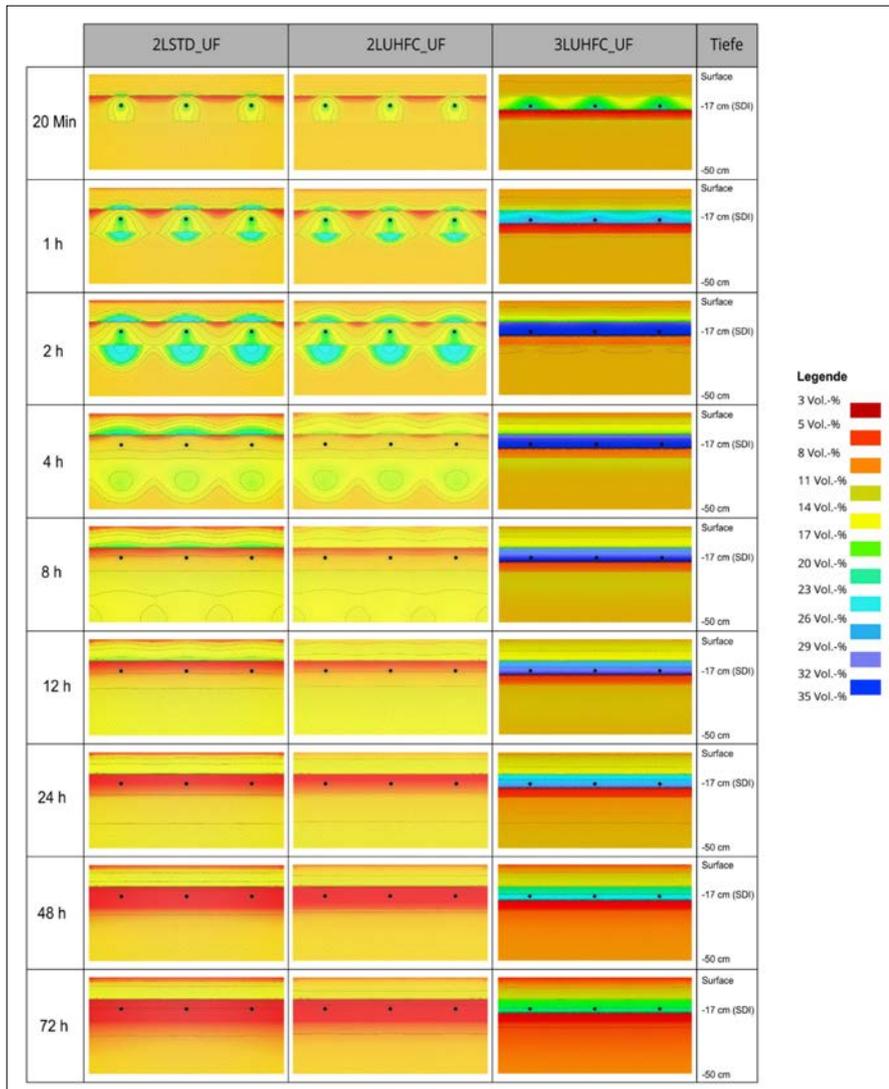


Abb. 6: Zeitliche Entwicklung und räumliche Verteilung des berechneten volumetrischen Wassergehalts der Bodenbauweisen 2LSTD_UF; 2LUHFC_UF und 3LUHFC_UF bei Unterflurbewässerung (UF). Bewässerungsmenge Zyklus 1 = 20 l/m². Beobachtungszeitraum t = 72 h.

acht Stunden findet eine ausgeprägte Verlagerung des Bewässerungswassers in tiefer gelegene Bodenzonen innerhalb der zwei-lagigen Varianten in Kombination mit abnehmendem kapillarem Aufstieg statt. Die Variante 3LUHFC_UF zeigt weiterhin Konzentrationen des Bewässerungswassers auf Höhe des Unterflurbewässerungssystems in Kombination mit beginnender Durchfeuchtung oberflächennaher Bereiche. Nach 24 Stunden zeigt die Variante 3LUHFC_UF eine abnehmende Konzentration des tiefergelegenen Bewässerungswassers mit anhaltender Durchfeuchtung oberflächennaher Bereiche, während die zwei-lagigen Varianten auf Höhe des Unterflurbewässerungssystems abnehmende Wassergehalte bzw. Bodenfeuchten aufzeigen. Im fortlaufenden Simulationsprozess findet eine zunehmende Austrocknung der zwei-lagigen Varianten statt und zu Simulationseende weisen beide Varianten geringe Bodenfeuchten in Höhe des

Bewässerungssystems sowie im oberflächennahen Bereich auf. Die drei-lagige Variante zeigt mit fortschreitender Simulationsdauer ebenfalls geringere Bodenfeuchten an. Abweichend zu den zwei-lagigen Varianten ist ein Verbleib des Bewässerungswassers insbesondere im Übergangsbereich der unteren Rasentragschicht und Zwischenschicht festzustellen. Deutliche Unterschiede sind innerhalb der zwei- und drei-lagigen Varianten hinsichtlich des Durchfeuchtungsverhaltens festzustellen. Die Varianten 2LSTD_UF und 2LUHFC_UF zeigen erst nach acht Stunden eine horizontal relativ homogene Durchfeuchtung der jeweiligen Bodenzonen, dahingegen weist Variante 3LUHFC_UF bereits nach zwei Stunden innerhalb der Schichten eine gleichmäßige Wasserverteilung auf.

Im Vergleich zum ersten Bewässerungszyklus führt der zweite Bewässerungszyklus mit einer Bewässerungs-

menge von 10 l/m² zu einer analogen Charakteristik der Wasserverteilung und Wasserbewegung innerhalb der Simulationskörper (Abbildung 7). Es ist jedoch festzustellen, dass eine Reduzierung der Bewässerungsmenge um 10 l/m² insbesondere bei Variante 3LUHFC_UF zu analogen Wasseranreicherungen, Wasserverteilungen und verbleibenden Bodenfeuchten führt. Die zwei-lagigen Varianten zeigen ein analoges Verhalten. Vergleichend zum ersten Zyklus betrachtet, bewirkt eine Reduzierung des Bewässerungswassers kaum veränderte Wasserverteilungen und verbleibende Bodenfeuchten. Auffällig ist, dass Variante 2LUHFC_UF und Variante 2LSTD_UF abweichend zum ersten Bewässerungszyklus bereits nach vier Stunden relativ homogene Bodenfeuchten aufweisen. Weiterführend zeigt eine gegenüberstellende Betrachtung beider Zyklen zu einem Beobachtungszeitpunkt von acht Stunden in Zyklus 2 höhere Bodenfeuchten der zwei-lagigen Varianten als in Zyklus 1.

Diskussion/Schlussfolgerung

Die vorliegenden Simulationsergebnisse verdeutlichen einen signifikanten Einfluss der Bodenbauweise auf die Wasserverteilung. Die Ergebnisse der zwei-lagigen Varianten zeigen insbesondere bei einer nicht der Bauweise angepassten Bewässerungsmenge rasche Überschreitungen der maximalen Wasserhaltekapazität der Rasentragschichtgemische mit einer daraus resultierenden Verlagerung von Bewässerungswasser in tiefere Bodenzonen. Die drei-lagige Variante zeigt bei hoher Infiltrationsleistung ebenfalls hohe Wasserspeicherkapazitäten in Kombination mit reduzierteren Austrocknungsverhalten oberflächennaher Bereiche. Eine Reduzierung der Bewässerungsmenge um 10 l/m² (Zyklus 2 zu Zyklus 1) bewirkt keine signifikant unterschiedliche Wasserverteilung und deutet auf Wassereinsparpotentiale bei angepasstem Bewässerungsmanagement hin.

Die unterflurbewässerten Varianten zeigen bei zwei-lagiger Konzeption der Bodenbauweise eine geringe Fixierung des Bewässerungswassers mit rascher Verlagerung in tiefere Bodenzonen. Konträr hierzu zeigt die drei-lagige unterflurbewässerte Variante 3LUHFC_UF eine ausgeprägte Fixierung des Bewässerungswassers im Hauptwurzelschicht in Kombination mit reduzierten

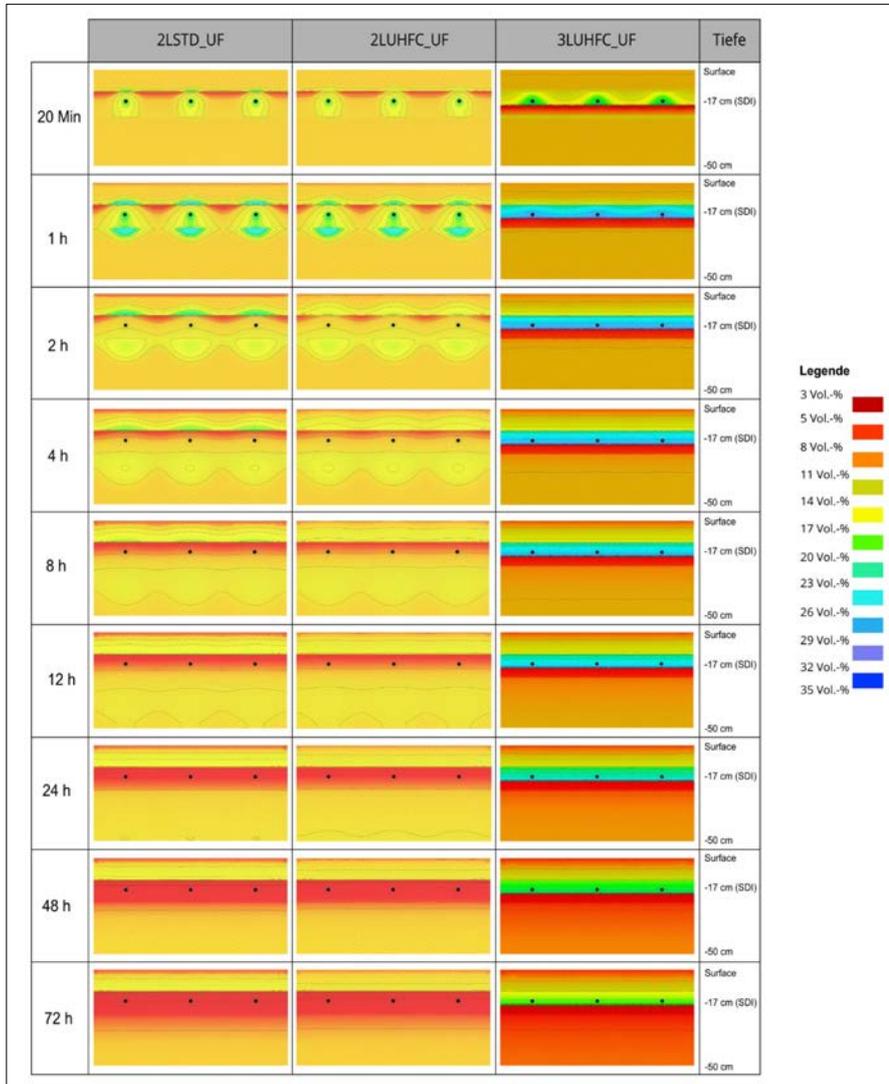


Abb. 7: Zeitliche Entwicklung und räumliche Verteilung des berechneten volumetrischen Wassergehalts der Bodenbauweisen 2LSTD_UF; 2LUHFC_UF und 3LUHFC_UF bei Unterflurbewässerung (UF). Bewässerungsmenge Zyklus 2 = 10 l/m². Beobachtungszeitraum t = 72 h.

Austrocknungsverhalten oberflächennaher Bereiche. Bei Unterflurbewässerung ist variantenübergreifend eine geringe Durchfeuchtung oberflächennaher Bereiche festzustellen. Hierbei ist kritisch zu betrachten, dass eine geringe Durchfeuchtung oberflächennaher Bereiche zwar zu einer Reduzierung des Krankheitsdrucks führt, jedoch erschwerte Bedingungen zur Etablierung von Neu- und Regenerationssaaten verursacht.

Insgesamt lässt sich über die Simulation mit Hydrus-2D die Wasserverteilung in unterflurbewässerten Bodenbauweisen für Sportrasenflächen darstellen.

Für die Praxis im Sportrasen zeigt sich, dass das Modell anhand der vorliegenden Daten und Rahmenbedingungen realistische Wasserverteilungen prognostizieren kann. Allerdings liefert ein Fußballstadion bzw. eine Amateur-

sportanlage sehr spezielle Voraussetzungen und Ansprüche für den Sportrasen, die das Hydrus-Modell nicht berücksichtigt. Dazu zählen Belastungen und Veränderungen des Bodengefüges resultierend aus dem Spielbetrieb, aus organischer Substanz entstehende und funktionstechnisch beeinflussende Dynamik im Rasentragschichtgemisch, eingeschränkte Wachstumsbedingungen aufgrund baulicher Gegebenheiten im Vergleich zu Freilandflächen sowie ein an den Spielbetrieb angepasstes Pflegemanagement zur Aufrechterhaltung und Sicherstellung der Rasenqualität. Um für Entscheidungsträger realistische Daten zum Wasserverteilungsverhalten zu generieren, müssen zum einen die Integration des Pflanzenbestandes in den Simulationsprozess erfolgen und zum anderen die aus o. a. Gründen entstehende Dynamik im Simulationsprozess Berücksichtigung finden.

Grundsätzlich ist festzustellen, dass eine ganzheitliche Betrachtung des Bodenaufbaus sowie die Art der Bewässerungstechnik einen elementaren Beitrag zur Steigerung der Produktivität des Bewässerungswassers leisten kann. Insbesondere zeigen die dreilagigen Varianten hohes Wasserspeicherpotential mit reduziertem Austrocknungsverhalten oberflächennaher Bereiche. Die zwei-lagigen Bauweisen neigen zu rascher Überwässerung mit ausgeprägter Verlagerung des Bewässerungswassers in tiefere Bodenzonen. Daher sollte die Bewässerungsmenge zur Steigerung der Beregnungseffizienz an die bodenphysikalischen Eigenschaften angepasst werden. Die Software Hydrus-2D zeigt bei entsprechender und dem Bodenaufbau angepasster Definition der Geometrie und der Eingangsdaten ein enormes Potential, um zukünftig geplante und bereits installierte Sportrasenflächen hinsichtlich der Wasserverteilung zu analysieren sowie Lösungsvorschläge zur Steigerung der Beregnungseffizienz zu erarbeiten.

Literatur

- ABID, H.N. und M.B. ABID, 2019: Predicting Wetting Patterns in Soil from a Single Subsurface Drip Irrigation System. *Journal of Engineering* 25, 41-53.
- ANLAUF, R., P. REHRMANN und H. SCHACHT, 2012: Simulation of Water Uptake and Redistribution in Growing Media during Ebb-and-Flow Irrigation. *Journal of Horticulture and Forestry* 4 (1), 8-21.
- BONOS, S.A. und D.R. HUFF, 2013: Cool-Season Grasses: Biology and Breeding. In: Stier, J.C., B.P. Horgan, S.A. Bonos (Hrsg.) "Turfgrass: Biology, Use, and Management". Madison, WI: American Society of Agronomy; Crop Science Society of America; Soil Science Society of America, 591-660.
- BREUNINGER, J.M., M.S. WELTERLEN, B.J. AUGUSTIN, V. CLINE und K. MORRIS, 2013: The Turfgrass Industry. In: Stier, J.C., B.P. Horgan, S.A. Bonos (Hrsg.) "Turfgrass: Biology, Use, and Management". Madison, WI: American Society of Agronomy; Crop Science Society of America; Soil Science Society of America, 37-104.
- CAMP, C.R., 1998: Subsurface drip irrigation: a review. *Transactions of the ASAE* 41, 1353-1367.
- CARROW, R.N., P. BROOMHALL, R.R. DUNCAN und C. WALTZ, 2002: Turfgrass water conservation Part 1: Primary strategies. GCM (Golf Course Management).
- CORDEL, J., 2021: Simulation und Messung der Wasserverteilung in unterschiedlichen Bodenbauweisen für unter- und überflurbewässerte Sportrasenflächen. Masterarbeit, Angewandte Nutztier- und Pflanzenwissenschaften (unveröffentlicht).

- DEMIREL, K., Y. KAVDIR und R. ANLAUF, 2015: Using HYDRUS-2D Simulations to Predict Soil Water Contents on Soil Water Retention Barriers in Turfgrass. *Fresenius Environmental Bulletin* 24, 4322-4332.
- DFB, 2011: Sportplatzbau und -erhaltung. Frankfurt/Main: Deutscher Fußballbund.
- DFL, 2018: Qualitätssicherung für Stadionrasen Arbeitsbuch für das Greenkeeping. Frankfurt am Main: DFL Deutsche Fußball Liga GmbH.
- DIN, 2018: Sportplätze –Teil 4: Rasenflächen (DIN 18035-4). Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DRG, 2020: Pflegemaßnahmen für den Sportrasen. <https://www.rasengesellschaft.de/sportrasen-pflegemaßnahmen.html> (Zugriff am 22.02.2020).
- DUKES, M.D., M.B. HALEY und S.A. HANKS, 2006: Sprinkler Irrigation and Soil Moisture Uniformity, 446-460.
- <https://www.irrigation.org/IA/FileUploads/IA/Resources/TechnicalPapers/2006/SprinklerIrrigationAndSoilMoistureUniformity.pdf> (Zugriff am 08.03.2021).
- EL-NESR, M.N., A.A. ALAZBA, und J. ŠIMŮNEK, 2014: HYDRUS simulations of the effects of dual-drip subsurface irrigation and a physical barrier on water movement and solute transport in soils. *Irrigation Science* 32, 111-125.
- FRANKEN, H., 1994: Anforderungen an einbaufertige Rasentragschichtgemische. *Rasen –Turf – Gazon* 4/1994, 92-94.
- GARCÍA MORILLO, J., J.A. RODRÍGUEZ DÍAZ, E. CAMACHO und P. MONTESINOS, 2017: Drip Irrigation Scheduling Using HYDRUS 2-D Numerical Model Application for Strawberry Production in South-West Spain. *Irrigation and Drainage* 66, 797-807.
- GHAZOUANI, H., G. RALLO, A. MGUIDICHE, B. LATRECH, B. DOUH, A. BOUJELBEN und G. PROVENZANO, 2019: Assessing HYDRUS-2D Model to Investigate the Effects of Different On-Farm Irrigation Strategies on Potato Crop under Subsurface Drip Irrigation. *Water* 11, 540.
- HARTMANN, A., J. ŠIMŮNEK, M.K. AIDOO, S.J. SEIDEL und N. LAZAROVITCH, 2018: Implementation and Application of a Root Growth Module in HYDRUS. *Vadose Zone Journal* 17, 1-16.
- KANDELOUS, M.M. und J. ŠIMŮNEK, 2010: Numerical simulations of water movement in a subsurface drip irrigation system under field and laboratory conditions using HYDRUS-2D. *Agricultural Water Management* 97, 1070-1076.
- KANDELOUS, M.M., J. ŠIMŮNEK, M.T. VAN GENUCHTEN und K. MALEK, 2011: Soil Water Content Distributions between Two Emitters of a Subsurface Drip Irrigation System. *Soil Science Society of America Journal* 75, 488-497.
- KOCH, M.J., 2012: Screening and evaluation of cool-season turfgrasses for increased salinity tolerance. Dissertation. State University of New Jersey, Rutgers, NJ.
- KOCH, M.J. und S.A. BONOS, 2011: Salinity Tolerance of Cool-Season Turfgrass Cultivars Under Field Conditions. *Applied Turfgrass Science* 8, 1-11.
- LAMM, F.R., J.P. BORDOVSKY, L.J. SCHWAN- KL, G.L. GRABOW, J. ENCISO-MEDINA, R.T. PETERS, P.D. COLAIZZI, T.P. TROOEN und D.O. PORTER, 2010: Subsurface Drip Irrigation: Status of the Technology in 2010. ASABE Conference Presentation, Paper Number IRR10-9847, 2-11.
- LAMM, F.R. und D.H. ROGERS, 2017: Longevity and Performance of a Subsurface Drip Irrigation System. *Transactions of the ASABE* 60, 931-939.
- LEINAUER, B., 2020: Sparsamer Umgang mit Beregnungswasser auf Rasenflächen des öffentlichen Grüns. *Rasen – Turf – Gazon* 4/2020, 91-96.
- LEINAUER, B. und D.A. Devitt, 2013: Irrigation Science and Technology. In: Stier, J.C., B.P. Horgan, S.A. Bonos (Hrsg.) "Turfgrass: Biology, Use, and Management". Madison, WI: American Society of Agronomy; Crop Science Society of America; Soil Science Society of America, 1075-1132.
- MEYER, W.A., L. HOFFMAN und S.A. BONOS, 2017: Breeding Cool-Season Turfgrass Cultivars for Stress Tolerance and Sustainability in a Changing Environment. *International Turfgrass Research Society Journal* 13, 3-10.
- MUALEM, Y., 1976: A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Res. Res.*, 12, 513-522.
- MÜLLER-BECK, K.G., 2018: Rasenmanagement-Grundpflege. In: Hornoff, E., M. Mahabadi, M. Thieme-Hack (Hrsg.) "Handbuch Rasen". Stuttgart (Hohenheim): Ulmer, 171-276.
- ORLOFF, S.B., E.C. BRUMMER, A. SHRESTHA und D.H. PUTNAM, 2016: Cool-Season Perennial Grasses Differ in Tolerance to Partial-Season Irrigation Deficits. *Agronomy Journal* 108, 692-700.
- PHOGAT, V., M.A. SKEWES, M.G. MCCARTHY, J.W. COX, J. ŠIMŮNEK und P.R. PETRIE, 2017: Evaluation of crop coefficients, water productivity, and water balance components for wine grapes irrigated at different deficit levels by a sub-surface drip. *Agricultural Water Management* 180, 22-34.
- RICHARDSON, M.D., D.E. KARCHER, K. HIGNIGHT und D. RUSH, 2009: Drought Tolerance of Kentucky Bluegrass and Hybrid Bluegrass Cultivars. *Applied Turfgrass Science* 6, 1-10.
- SEIDEL, S.J., N. SCHÜTZE, M. FAHLE, J.-C. MAILHOL und P. RUELLE, 2015: Optimal Irrigation Scheduling, Irrigation Control and Drip Line Layout to Increase Water Productivity and Profit in Subsurface Drip-Irrigated Agriculture. *Irrigation and Drainage* 64, 501-518.
- SHAN, G., Y. SUN, H. ZHOU, P. SCHULZE LAMMERS, D.A. GRANTZ, X. XUE und Z. WANG, 2019: A horizontal mobile dielectric sensor to assess dynamic soil water content and flows: Direct measurements under drip irrigation compared with HYDRUS-2D model simulation. *Biosystems Engineering* 179, 13-21.
- ŠIMŮNEK, J. und S.A. BRADFORD, 2008: Vadose Zone Modeling: Introduction and Importance. *Vadose Zone Journal* 7, 581-586.
- ŠIMŮNEK, J., M.T. VAN GENUCHTEN und M. ŠEJNA, 2008: Development and Applications of the HYDRUS and STANMOD Software Packages and Related Codes. *Vadose Zone Journal* 7, 587-600.
- ŠIMŮNEK, J., M.T. VAN GENUCHTEN und M. ŠEJNA, 2016: Recent Developments and Applications of the HYDRUS Computer Software Packages. *Vadose Zone Journal* 15, 1-25.
- SIYAL, A.A., M.T. VAN GENUCHTEN und T.H. SKAGGS, 2013: Solute transport in a loamy soil under subsurface porous clay pipe irrigation. *Agricultural Water Management* 121, 73-80. Meyer, W.A., L. Hoffman, S.A. Bonos, 2017: Breeding Cool-Season Turfgrass Cultivars for Stress Tolerance and Sustainability in a Changing Environment. *International Turfgrass Research Society Journal* 13, 3-10.
- VAN GENUCHTEN, M.T., 1980: A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. Journal* 44, 892-898.
- VEREecken, H., A. SCHNEPF, J.W. HOPMANS, M. JAVAUX, D. OR, T. ROOSE, J. VANDERBORGHT, M.H. YOUNG, W. AMELUNG, M. AITKENHEAD, S.D. ALLISON, S. ASSOULINE, P. BAVEYE, M. BERLI, N. BRÜGGEMANN, P. FINKE, M. FLURY, T. GAISER, G. GOVERS, T. GHEZZEHEI, P. HALLETT, H.J. HENDRICKS FRANSSEN, J. HEPPELL, R. HORN, J.A. HUISMAN, D. JACQUES, F. JONARD, S. KOLLET, F. LA-FOLIE, K. LAMORSKI, D. LEITNER, A. MCBRATNEY, B. MINASNY, C. MONTZKA, W. NOWAK, Y. PACHEPSKY, J. PADARIAN, N. ROMANO, K. ROTH, Y. ROTHFUSS, E.C. ROWE, A. SCHWEN, J. ŠIMŮNEK, A. TIKTAK, J. VAN DAM, S. VAN DER ZEE, H.J. VOGEL, J.A. VRUGT, T. WÖHLING und I.M. YOUNG, 2016: Modeling Soil Processes: Review, Key Challenges, and New Perspectives. *Vadose Zone Journal* 15, 1-57.

Autoren:

M.Sc., Dipl.-Ing. (FH) Jan Cordel
Nachhaltiges Rasenmanagement
j.cordel@outlook.de

Prof. Dr. Rüdiger Anlauf
Boden- und Substratphysik
r.anlauf@hs-osnabrueck.de

Prof. Dr. Wolfgang Prämaßing
Nachhaltiges Rasenmanagement
praemassing@hs-osnabrueck.de

Hochschule Osnabrück
Fakultät Agrarwissenschaften und
Landschaftsarchitektur
49090 Osnabrück