

Simulation einer Präzisionsbewässerungsanlage für Obstbäume mit Hilfe des agentenbasierten Modells DropSim

Anita Fink, Sabine Timpf, Sven Grashey-Jansen

Angaben zur Veröffentlichung / Publication details:

Fink, Anita, Sabine Timpf, and Sven Grashey-Jansen. 2007. "Simulation einer Präzisionsbewässerungsanlage für Obstbäume mit Hilfe des agentenbasierten Modells DropSim." In Beiträge zum 49. Jahrestreffen des Arbeitskreises Hydrologie vom 23.-25. November 2017 in Göttingen, edited by Peter Chiffard, Daniel Karthe, and Steffen Möller, 28–36. Augsburg: Institut für Geographie, Universität Augsburg.

<https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bvb:384-opus4-499747>.

Nutzungsbedingungen / Terms of use:

licgercopyright

Dieses Dokument wird unter folgenden Bedingungen zur Verfügung gestellt: / This document is made available under the following conditions:

Deutsches Urheberrecht

Weitere Informationen finden Sie unter: / For more information see:

<https://www.uni-augsburg.de/de/organisation/bibliothek/publizieren-zitieren-archivieren/publizieren>



GEOGRAPHICA AUGUSTANA

Peter Chifflard, Daniel Karthe, Steffen Möller

**Beiträge zum 49. Jahrestreffen
des Arbeitskreises Hydrologie
vom 23.-25. November 2017 in Göttingen**

GEOGRAPHICA AUGUSTANA

**Peter Chiffard, Daniel Karthe,
Steffen Möller**

**Beiträge zum 49. Jahrestreffen
des Arbeitskreises Hydrologie
vom 23.-25. November 2017 in Göttingen**

Peter Chifflard, Daniel Karthe, Steffen Möller

**Beiträge zum 49. Jahrestreffen des Arbeitskreises Hydrologie vom 23.-25. November 2017
in Göttingen**

Augsburg 2018

Copyright: Institut für Geographie, Universität Augsburg 2006

Alle Rechte vorbehalten

**Umschlaggestaltung Jochen Bohn
Textverarbeitung Peter Chifflard**

Simulation einer Präzisionsbewässerungsanlage für Obstbäume mit Hilfe des agentenbasierten Modells DropSim

Anita Fink, Sabine Timpf und Sven Grashey-Jansen

Die Effizienz künstlicher Bewässerungsanlagen ist nicht ausschließlich an klimatische Einflussparameter geknüpft, vielmehr sind sie das Ergebnis komplexer physikalischer Prozesse und zahlreicher Wechselwirkungen in der Pedosphäre. Damit spielt der Boden durch seine kleinräumige horizontale und vertikale Heterogenität eine entscheidende Rolle, die in der Bewässerungspraxis bisher jedoch nicht ausreichend beachtet wird.

Im hier präsentierten Ansatz wird eine Präzisionsbewässerungsanlage simuliert, die sich selbstorganisiert an die Bedürfnisse einer Pflanze in einem bestimmten bodenhydrologischen Umfeld anpasst. Die selbstlernende Komponente wird dabei durch ein sogenanntes Extended Learning Classifier System (XCS) realisiert. Ein agentenbasiertes Vorgehen stellt insbesondere in der Bewässerungsforschung eine Innovation dar.

Die Ergebnisse zeigen für das simulierte Versickerungsmodell ein naturähnliches und mit der Literatur vergleichbares Verhalten. Die Präzisionsbewässerungsanlage passt sich an Tag- und Nachtwechsel sowie an ungleichmäßige Wurzelverteilungen an. Da das Modell DropSim auf einer niedrigen Skala implementiert wurde, muss dessen Skalierbarkeit diskutiert werden. Verbesserungen und Erweiterungen sind zukünftig besonders im Ausbau der Simulation von Umwelteinflüssen vorzunehmen. Dennoch konnte ein innovativer Ansatz entwickelt werden, um eine Präzisionsbewässerungsanlage zu simulieren.

1 Einleitung

1.1 Stand der Technik im Bewässerungsmanagement

Auf dem Gebiet der Agrarwissenschaften bezeichnet der terminus technicus *Präzisionsbewässerung* (PI) verschiedene Bewässerungstechniken und -strategien, um die Bewässerungseffizienz zu steigern (Madramootoo and Morrison, 2013). PI wird als der akkurate und präzise Einsatz von Wasser definiert, um die spezifischen Bedürfnisse individueller Pflanzen oder Managementeinheiten zu erfüllen. Zusätzlich zielt PI darauf ab, negative Umwelteinflüsse zu minimieren (Raine et al., 2007). Ein PI-System sollte einen initialen Input und Feedback durch ein Sensornetzwerk haben sowie selbstadaptiv und selbstlernend sein.

Die größtmögliche Steigerung der Bewässerungseffizienz ist von der Kombination mehrerer PI-Techniken zu erwarten, die die Bodenfeuchte regulieren und dabei pflanzenphysiologische Parameter miteinbeziehen. Greenwood et al. (2009) stellt eine gut recherchierte Übersicht zur Verfügung. Auf Grund hoher Investitionskosten und enormem Wartungsaufwand haben sich diese kombinierten Ansätze jedoch noch nicht im Bewässerungsmanagement etabliert.

1.2 Boden- und standortspezifische Bewässerung und Simulation von PI-Systemen

Während der letzten 30 Jahre wurden zahlreiche Modellansätze entwickelt, um die Bewässerungseffizienz zu steigern. Wegen ihrer kleinmaßstäbigen Heterogenität hat die Pedosphäre einen direkten Einfluss auf den standortspezifischen Bodenwasserhaushalt. Diese kleinmaßstäbige Heterogenität wurde bisher jedoch von nur wenigen Bewässerungssystemen und Modellansätzen beachtet (z. B. Dabach et al., 2013).

Viele Bewässerungsverfahren arbeiten mit Bodenfeuchtesensoren, die ideal auf bodenspezifische Werte kalibriert werden können. Für die mathematische Transformation einer standortspezifischen Bodenwasserdynamik sind empirische Bodendaten essentiell.

Traditionell basieren die meisten Modelle und Simulationen auf den Parametern von Van-Genuchten (Van Genuchten, 1987; Wösten and Van Genuchten, 1988). Für die Berechnung von Bodenwasserspannungskurven und anderen bodenspezifischen Werten werden sogenannte Pedotransferfunktionen (PTFs) verwendet, die mit Hilfe von Bodenparametern einfach bestimmt werden können (z. B. Børgesen et al., 2008) und die Quantifizierung von Bodenwasserdynamiken vereinfachen.

1.3 Agentenbasierte Simulation und XCS-Ansatz des PI-System

In diesem Beitrag wird ein Ansatz von Grashey-Jansen und Timpf (2010) aufgegriffen, die durch die multi-agentenbasierte Simulation AquaSim gezeigt haben, dass Bewässerungskontrolle hocheffizient durch wenige, bodenspezifisch kalibrierte Sensoren stattfinden kann. Indem einzelne Agenten (z. B. Wassertropfen) räumlich und zeitlich lokal miteinander interagieren, wird eine dynamische Bewässerungskontrolle möglich. Prozesse und Interaktionen auf Level des einzelnen Agenten (z. B. ein Wassertropfen, der sich zur nächsten Bodeneinheit bewegt) resultieren in emergenten Eigenschaften auf Systemlevel (die Bewässerungsmenge passt sich den Pflanzenbedürfnissen an).

Zusätzlich wird in diesem Ansatz eine lernende Komponente eingefügt, ein Extended Learning Classifier System (XCS), um das Verhalten des Bewässerungssystems mit der Zeit zu verbessern. Selbstlernende Programme stammen aus dem wachsenden Forschungsgebiet des Organic Computing (OC). Systeme, wie z. B. PI-Systeme, müssen dazu fähig sein sich selbst zu organisieren, adaptieren und zu lernen (Selbst-X Eigenschaften, siehe Müller-Schloer et al., 2011; Würtz, 2008). Die angewandte Methode des Selbstlernens, XCS, die von Wilson (1995) entwickelt wurde, gehört zu den Learning Classifier Systemen (LCS).

2 Methoden

2.1 Agentenbasierter Modellierungsansatz

Um das Präzisionsbewässerungssystem zu modellieren und simulieren, wurde ein agentenbasierter Ansatz gewählt. Agentenbasierte Modellierung ist eine relativ neue Vorgehensweise und eine spezielle Art der rechnergestützten Modellierung. Hierbei besteht das modellierte System aus einzelnen, autonomen Entitäten (z. B. Agenten), die in einer Umgebung eingebettet sind, in dieser Umgebung handeln und fähig sind, zu kommunizieren. Im hier vorgestellten Ansatz von DropSim kann jeder einzelne Wassertropfen, der aus einer Tropfvorrichtung kommt, als autonomer Agent betrachtet werden, der auf die lokalen Bedingungen seiner statischen oder dynamischen Umgebung reagiert (siehe Abbildung 1).

Der Erfolg des agentenbasierten Modellierens beruht unter anderem mit den Vorteilen, dass emergente Phänomene erfasst werden können

und, dass eine natürliche Umgebung geschaffen wird, um dynamische und komplexe Systeme zu studieren. Zudem ist ABM äußerst flexibel hinsichtlich spezifizierbarer potentieller Variablen und Parametern (Castle und Crooks, 2006; Crooks und Heppenstall, 2012).

Das hier vorgestellte Bewässerungsmodell zielt darauf ab, Agenten zu schaffen, die sowohl miteinander als auch mit einer sich dynamisch verändernden Umwelt interagieren. Dies ist ein neuer und innovativer Ansatz hinsichtlich der Versickerungs- und Präzisionsbewässerungsforschung.

2.2 Modellierung von Versickerung und Wasseraufnahme von Wurzeln

Der häufig verwendete Quantifizierungsansatz, um Wasserversickerung zu modellieren stammt von Darcy, der die Berechnung des Wasserflusses q erstmals im 19. Jahrhundert einführte (Ehlers und Goss, 2016). Der Wasserfluss q , der von einer Bodeneinheit A zu einer Bodeneinheit B fließt, wird durch die folgende Gleichung berechnet:

$$q = K(\Psi) \cdot \left(\frac{\Delta\phi}{\Delta z} \right) \quad (1)$$

K ist die hydraulische Leitfähigkeit, die nach dem Modell von Van Genuchten (1980) berechnet wird und vom Matrixpotential Ψ abhängt. $\Delta\phi$ ist die Differenz zwischen dem Wasserpotential der Bodeneinheit A und B und Δz ist die räumliche Distanz zwischen ihnen. Des Weiteren sind für die Transformation von Bodenfeuchtwerten in Wasserspannungs- und pF-Werte Pedotransferfunktionen (PTFs) nötig (vgl. u.a. Grashey-Jansen 2014).

Die Methode zur Modellierung der Wasserabsorption von Wurzeln ist durch Feddes (1982) inspiriert. Sie hängt von der Wasserspannung, der Bodentiefe und einer dimensionslosen Funktion ab, die die Wasserabsorption der Wurzeln in zu trockenen oder zu feuchten Bodenbereichen reduziert oder sogar unterbindet.

2.3 Learning Classifier Systeme (LCS)

Die Methode der selbstlernenden und selbstadaptiven Komponente im PI-Systems ist das Learning Classifier System (LCS). Es gibt zahlreiche Erweiterungen zum originalen LCS von Holland und Reitman (1978). Die hier verwendete Erweiterung ist das sogenannte Extended Learning Classifier System (XCS, vgl. Wilson, 1995), dessen Ablauf schematisch in Abbildung 2 dargestellt ist. Hierbei handelt es sich um eine performanceoptimierte Version des revolutionären Modells von Wilson (1994).

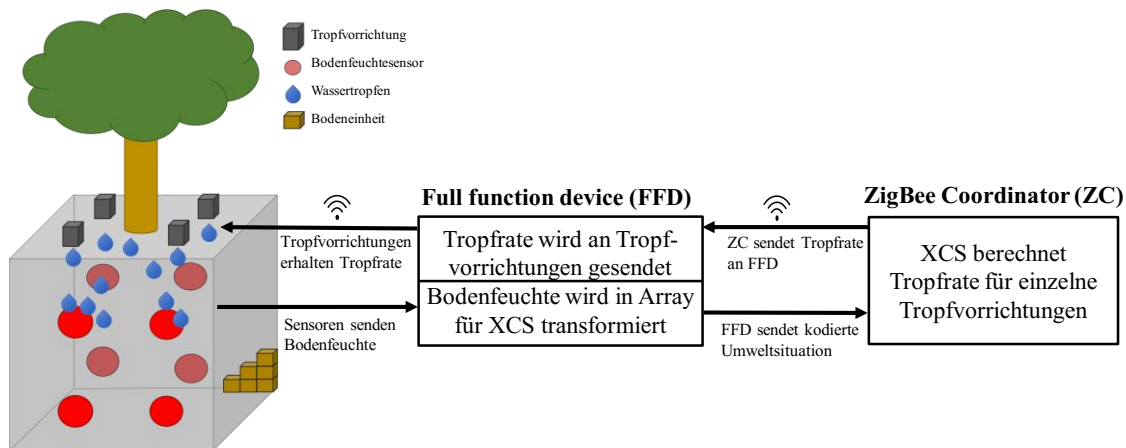


Abb. 2: Übersicht der Kommunikations- und Selbstlernenden Komponente von DropSim

Quelle: Eigene Darstellung.

Das Kernelement eines XCS ist seine Population $[P]$, in der die Classifier gespeichert sind. Jeder Classifier besteht aus einer Kondition (eine Liste von Werten oder Parametern mit # als Platzhalter, die eine gewisse Umweltsituation repräsentieren), einer vorgeschlagenen Aktion (ebenfalls eine Liste von Werten) und zusätzlichen Werten. Diese sind z. B. die bei Ausführung vorausgesagte (numerische) Belohnung, der dabei gemachte Rechenfehler und die Fitness eines Classifiers. Die Interaktion des Systems mit der Umwelt wird durch Detektoren (Sensoren) bewältigt, die Input von Ihrer Umwelt erhalten und die Population $[P]$ mit Classifiern füllen sowie durch Effektoren, die die vom System vorgeschlagene Aktion ausführen.

Das System lernt und adaptiert sein Verhalten durch folgenden Ablauf: die Detektoren empfangen eine Situation von ihrer Umwelt (eine Liste an Werten), die mit den bereits existierenden Classifiern in der Population $[P]$ verglichen wird. Da es eventuell mehrere Übereinstimmungen gibt, werden die passenden Classifier im sogenannten Match Set $[M]$ gespeichert. Wenn $[M]$ nicht genügend verschiedene Aktionen enthält, so wird ein neuer Classifier generiert. Mit einer Wahrscheinlichkeit von p_{expl} werden danach diejenigen Classifier ausgewählt, die die vielversprechendste Aktion vorschlagen, und im sogenannten Action Set $[A]$ gespeichert. Andernfalls erfolgt eine zufällige Aktionsauswahl, um Variation zu garantieren und um neue Aktionen zu erschließen. Die Effektoren führen die ausgewählte Aktion aus, dessen Auswirkungen durch eine verzögerte numerische Rückmeldung ans System zurückgegeben werden. Dies sorgt für

eine Optimierung im Bewässerungsablauf. Eine detailliertere Beschreibung des XCS findet sich in Wilson (1995) oder Butz und Wilson (2001).

3 DropSim: ein Selbstadaptives Agenten-basiertes Model einer Präzisionsbewässerungsanlage

In einer Präzisionsbewässerungsanlage sind die kleinsten Entitäten/Agenten die Wassertropfen (siehe Abbildung 1). Zusätzlich zu den Wassertropfen werden Tropfvorrichtungen, Pflanzen (in der einfachsten Form durch Wurzeln repräsentiert) sowie Bodeneinheiten (auch Würfel oder Voxel genannt) benötigt, die als individuelle Agenten agieren. Diese werden für die Versickerungssimulation verwendet.

Auf einer anderen Modellierungsebene kann das Bewässerungssystem selbst oder genauer der XCS als einzelner Agent betrachtet werden. Das Bewässerungssystem „bewegt“ sich im Raum der Lösungen zu einem bestimmten Bewässerungsproblem und versucht, ein optimales Verhalten zu finden. Dieser Agent wird für die Lernkomponente der Simulation benötigt.

Die Komponente, die das Versickerungsmodell mit dem lernenden System verbindet, ist das (simulierte) Kommunikationsnetzwerk, das ein drahtloses Sensornetzwerk (WSN) verwendet, um die Bodenfeuchte zu messen und die Wasserabgabe der Tropfvorrichtungen zu steuern, indem es Informationen des lernenden Systems verwendet.

Als initialen Eingabeparameter der Simulation wird außerdem ein räumlich verteiltes Wurzelsystem innerhalb der Bodenmatrix benötigt.

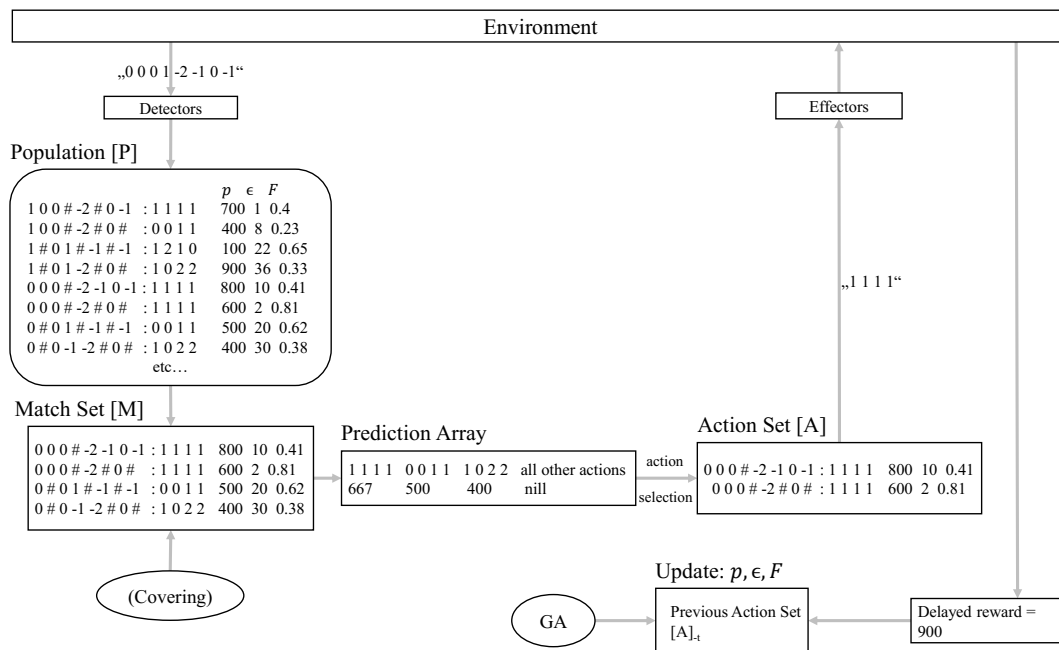


Abb. 3: Flow-chart des Extended Learning Classifier Systems as used in DropSim

Quelle: Verändert nach Wilson 1995.

Abbildung 3 zeigt ein gleichmäßig verteiltes Wurzelnetzwerk, das für die Simulation und Analyse im Folgenden verwendet wird.

3.1 Agentenbasiertes Versickerungsmodell

Das Versickerungsmodell ist das zentrale Element von DropSim. Es beschreibt, unter welchen Bedingungen sich ein Wassertropfen von einer Bodeneinheit zur nächsten bewegt. Die Bodenumgebung wird dabei als Quader modelliert, der 10x10x10 gleichgroße Würfel enthält, die spezifische Bodenarten repräsentieren. Vier Tropfvorrichtungen sind bündig mit der Gelände- und Bodenoberfläche direkt über dem Quader angebracht. Acht Bodenfeuchtesensoren sind innerhalb des Quaders in einer Bodeneinheit unterhalb einer Tropfvorrichtung in zwei verschiedenen Tiefen installiert (siehe Abbildung 1 und Abbildung 3). Das Wurzelsystem hat seinen Ursprung in der Mitte eines virtuellen Baumstamms und verteilt sich gleichmäßig im Quader.

Wassertropfen werden von Tropfvorrichtungen mit einer bestimmten Rate pro Zeit in die Bodensäule getropft. Dadurch sammeln sich Wassertropfen in einer Bodeneinheit, bis die bodenspezifische Feldkapazität (FC) erreicht ist. Danach bewegen sich die Wassertropfen seitwärts oder nach unten (abhängig vom hydraulischen Gradienten) zur nächsten Bodeneinheit, wobei sie ihre Größe nicht verändern.

Bei Wasserstau an der Oberfläche oder dem Kontakt mit dem Grundwasserspiegel am unteren Rand der Bodensäule, werden die Einzeltropfen als Oberflächen- bzw. Grundwasserabfluss aus dem System eliminiert. Eine Eliminierung von Wassertropfen aus dem System erfolgt des Weiteren, falls sie vom Wurzelsystem absorbiert werden (vgl. Abschnitt 2.2).

3.2 Die Anwendung des Extended Learning Classifier Systems von Wilson

In DropSim ist die Kondition eines Classifiers eine kodierte Liste, die die acht Bodenfeuchtwerte repräsentiert, die von den Sensoren in der Bodeneinheit zu einem bestimmten Zeitpunkt in der Simulation gemessen wurden. Des Weiteren gibt es die Aktion, sowie die vorausgesagte Belohnung, den Berechnungsfehler und die Fitness für diese spezielle Aktion. Eine Aktion besteht aus einer Liste, die die Anzahl an Tropfen beinhaltet, welche jede Tropfvorrichtung im nächsten Schritt ausgeben muss. Dementsprechend kann ein Classifier folgende Form annehmen: [1 0 0 # -2 # 0 -1: 1 1 1 1 700 1 0.4]. Die Zahlen und Symbole vor dem Doppelpunkt repräsentieren die Bodenfeuchtwerte, die vier Zahlen nach dem Doppelpunkt repräsentieren die auszugebende Anzahl an Tropfen pro Tropfvorrichtung (nämlich viermal 1) mit einer erwarteten Belohnung von 700, einem Berechnungsfehler von 1 und einer Fitness von 0.4.

Das Feedback für das System wird zeitverzögert berechnet, um den ebenfalls verzögerten Einfluss der Bewässerungsintensität auf die Bodenfeuchte zu bewerten. Ziel des XCS ist es, eine optimale Tropfrate für eine gewisse Kombination der Sensormessungen zu finden. In dieser Hinsicht ist eine Rückmeldung des Systems zwingend notwendig, um es dem System zu ermöglichen, sich an variable Bodenfeuchtebedingungen anzupassen.

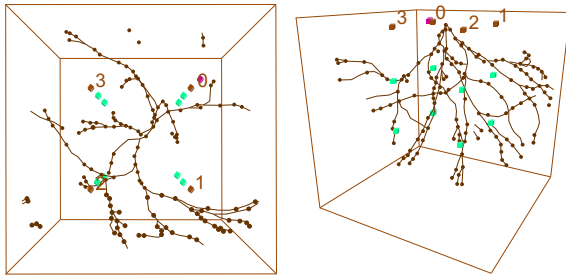


Abb. 4: Simulierte Wurzelnetzwerkumgebung

Quelle: eigene Darstellung.

3.3 Ein Drahtloses Sensornetzwerk

DropSim agiert mittels eines drahtlosen Sensornetzwerks (WSN), welches auf einem von IEEE 802.15.4 entwickelten, neuen Standardansatz basiert, der ZigBee genannt wird (Krause und Konrad, 2014). Im WSN erhält ein sogenanntes Full Function Device (FFD) die Bodenfeuchtwerte und transformiert sie in ein Array, das als Input für das lernende System passend ist. Demnach wird die Bodenfeuchte, die von den 8 Sensoren im Boden gemessen wird, als kodiertes Array vom FFD an den XCS transferiert.

Der eigentliche Lernvorgang findet im sogenannten ZigBee Coordinator (ZC) statt, der die vorgeschlagene Aktion (z. B. die Anzahl an auszugebenden Tropfen für jede Tropfvorrichtung) zurück zum FFD sendet. Dieser wiederum stellt für jede Tropfvorrichtung die vorgeschlagene Tropfrate zur Verfügung (siehe Abbildung 1). Die Bewässerungsrate kann 0, 1 oder 2 Tropfen pro Tropfvorrichtung sein (siehe $[P]$ in Abbildung 2).

4 Der Simulationsablauf von DropSim

Das in Abschnitt 3 beschriebene Modell wurde in NetLogo implementiert, einer open source und multiagentenorientierten Programmier- und Modellierungsumgebung, die von Wilensky (1999) entwickelt wurde. NetLogo ist besonders für die Imple-

mentierung komplexer und hochdynamischer Systeme geeignet. Es stellt eine 2D- sowie 3D-Version der Simulationsumgebung zu Verfügung.

Räumliche Auflösung: Das Modell wurde in 3D als 10x10x10-Einheiten-Umgebung implementiert. Dies entspricht 1 dm³ (siehe dazu die Diskussion zur Skalierbarkeit des Modells in Abschnitt 6). Der Ursprung des Koordinatensystems befindet sich in der Mitte der Oberseite des Quaders.

Zeitliche Auflösung: Ein diskreter Zeitschritt in der Simulation (genannt Tick) repräsentiert 2 Minuten in der realen Welt. Daher entsprechen 360 Ticks einem 12h-Tag. Während die Versickerung und der XCS auch im Laufe der 360 Nacht-Ticks stattfinden, stoppt die Wurzelabsorption in diesem Zeitraum. Das simulierte Bewässerungssystem benötigt eine grobe, initiale Einschätzung der Bewässerungsfrequenz, da dafür bisher keine automatische Adaption existiert.

Versickerung: Zu Beginn wird Wasser in die Bodensäule getropft und durchfließt eine Bodeneinheit. Wenn der Wassergehalt in einer Bodeneinheit A die pedospezifische Feldkapazität (FC) erreicht, was durch entsprechend kalibrierte PTFs berechnet wird, beginnt das Wasser nach unten oder seitwärts in Richtung des höchsten Gradienten zu einer Nachbarnodeneinheit B zu fließen. Wann immer sich ein Wasseragent von einer Bodeneinheit zur nächsten bewegt, werden die Bodenfeuchte und alle abhängigen Variablen (Wasserspannung, pF-Wert, Wasserleitfähigkeit) dieser beiden Bodeneinheiten aktualisiert.

Das drahtlose Sensornetzwerk: Neben den natürlichen Komponenten der Umgebung sind des Weiteren die Sensoren und das FFD als Agenten im System enthalten. Diese dienen ausschließlich dazu, Informationen zu senden und zu empfangen. Die Bodenfeuchte, die von den 8 Sensoren gemessen wird, kann über das FFD zum XCS als kodiertes Array transferiert werden. Zur Bewässerungsvorrichtung wird eine Liste zurückgesendet, die eine Bewässerungsrate von 0, 1 oder 2 Tropfen pro Tropfvorrichtung enthält (siehe $[P]$ in Abbildung 2).

Das lernende System: Die letzte Komponente im System, welche als Agent fungiert, ist der XCS selbst. Er bewegt sich im Raum der potentiellen Lösungen für ein Bewässerungsproblem und versucht dabei seine Performance zu verbessern. Autonome Entscheidungen und Interaktionen mit der

Umwelt machen das XCS zu einem unsichtbaren Agenten in der Simulation.

5 Resultate der Agentenbasierten Simulation von Präzisionsbewässerung

Der visuelle Output der DropSim Simulation zeigt für das Versickerungs- und PI-Modell natürliche und bekannte Muster.

5.1 Verifizierende Resultate

Abbildung 4 zeigt die Resultate der Wasserversickerung in zwei verschiedenen Böden mit verschiedenen Bodenarten: stark sandiger Lehm (links) und Mittelsand (rechts). Während sich Wasser im Mittelsand eher vertikal ausbreitet, kann im stark sandigen Lehm eine eher horizontale Bewegung beobachtet werden.

Abbildung 5 demonstriert die simulierte Versickerung von Wasser in einem zweischichtigen Boden, wobei es sich bei der oberen Bodenschicht (z-Koordinate 0 bis -2) um Mittelsand handelt und bei der unteren um stark sandigen Lehm (z-Koordinate -3 bis -10). Die erste Abbildung von links zeigt den Beginn der Versickerung, die zweite, wie Wasser nur bis in eine Tiefe von -2 versickert und die dritte illustriert die sich fortsetzende Versickerung.

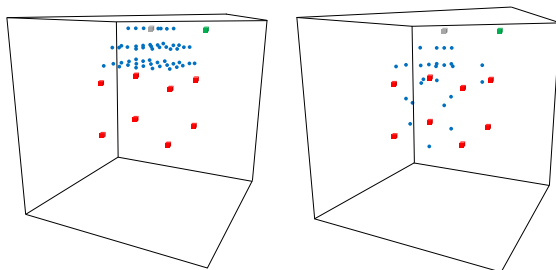


Abb. 5: Versickerungsmuster von stark sandigem Lehm (links) und mittlerem Sand (rechts).

Quelle: Eigene Darstellung.

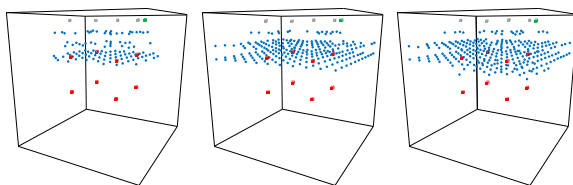


Abb. 6: Simulation von versickerndem Wasser in einem zweischichtigen Boden (mittlerer Sand oben und stark sandiger Lehm unten).

Quelle: Eigene Darstellung.

Abbildung 6 ist ein typisch beobachtbares Bewässerungsmuster der einzelnen Tropfvorrichtungen. Hier wird die Gesamtmenge des Wassers zur Bewässerung über 7200 Ticks (entspricht 10 Tagen) gezeigt. Tropfvorrichtung 1 gibt am wenigsten Wasser ins System ab, wohingegen Tropfvorrichtung 2 nahezu 1.5-mal so viel bewässert, wie Tropfvorrichtung 1. Diese Information kann nützlich sein, um Rückschlüsse auf die Dichte des Wurzelnetzwerks unterhalb des Baumes zu ziehen.

Abbildung 6 zeigt jedoch nicht nur die abgegebene Wassermenge der einzelnen Tropfvorrichtungen, sondern auch die Bewässerungsvariabilität während des Tag- und Nachtmodus. Indem der Gradient der einzelnen Linien (in Abbildung 6) analysiert wird, können Schlussfolgerungen über die Anpassungsfähigkeit des Systems an verschiedene Absorptionsraten des Wurzelnetzwerks (zeitlich oder räumlich) gezogen werden.

5.2 Robustheit der Selbstadaptation

Ein weiteres Szenario wurde mit einem etwas abgeänderten Wurzelnetzwerk simuliert. Hierbei wurde nach 10 simulierten Tagen der Ausfall zweier Sensoren vorgegeben und das System für weitere 5 simulierte Tage ausgeführt. Hiermit konnte getestet werden, ob das System auch mit verringerten Informationen aus der Umwelt funktionsfähig ist und sich selbstorganisierend erhalten kann.

Die daraus resultierende Bewässerungsrate zeigt für die ersten 10 Tage ähnliche Resultate wie Abbildung 6. Nachdem zwei Sensoren abgeschaltet wurden, können die Tropfvorrichtungen ihre Intensität größtenteils halten und verringern bzw. erhöhen diese nur leicht.

6 Diskussion

Das Ziel der hier vorgestellten Simulationsstudie war es zu zeigen, dass eine bodenspezifisch kalibrierte Präzisionsbewässerungsanlage durch Kombination eines agentenbasierten Modellierungsansatzes und eines selbstlernenden Algorithmus simuliert werden kann. Das daraus resultierende System soll eine selbstoptimierte Steuerung der Bewässerung zeigen. Neu an diesem Ansatz ist, dass einzelne Wassertropfen, die Wurzeln der Pflanze und die Bodeneinheiten als individuelle Entitäten behandelt werden. Dies stellt einen innovativen Ansatz in der Bodenhydrologie und Bewässerungstechnik dar.

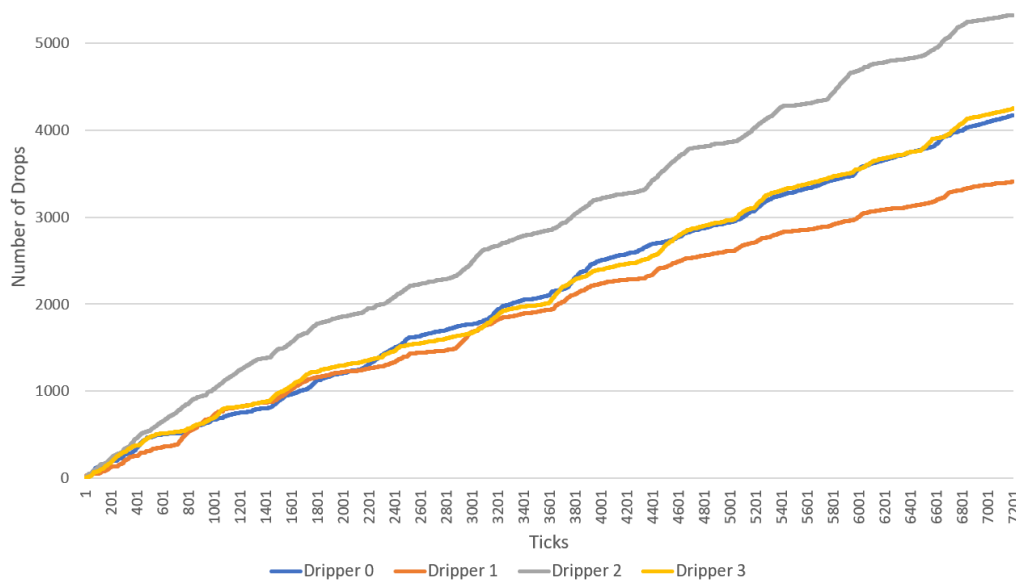


Abb. 7: Gesamte Bewässerungsmenge und Entwicklung der Bewässerungsrate der einzelnen Tropfvorrichtungen für Tag- und Nachtwechsel alle 360 Ticks.

Quelle: Eigene Darstellung.

Das in DropSim implementierte Versickerungsmodell zeigt ein naturnahes Verhalten, das ähnlich zu Ergebnissen in der Literatur und Beobachtungen in der Realität ist. Dies wird vor allem in Abbildung 4 und 5 verdeutlicht. Diese Muster emergieren aus dem System und basieren ausschließlich auf den Bodenparametern und lokalen Bewegungen der Wassertropfen. Hervorzuheben ist dabei, dass durch den agentenbasierten Ansatz die rechenintensive Differentialgleichung zur Lösung der Richardsgleichung nicht benötigt wird.

Abbildung 6 zeigt die Selbstadaptation an den Tag-Nacht-Zyklus des PI-Systems. Die gestufte Bewässerungsrate der Tropfvorrichtungen zeigt, dass nachts eine reduzierte Wasserabgabe realisiert wird, wohingegen die Pflanze tagsüber nach ihrem Bedarf bewässert wird.

Ein weiterer Selbstadaptionsprozess findet bezüglich der Verteilung des Wurzelnetzwerks statt. Das Wurzelnetzwerk in Abbildung 3, das zuvor als gleichmäßig eingeschätzt wurde, besitzt in der Realität Bereiche mit höherer und niedrigerer Wurzeldichte. Aus diesen lokalen Variationen des Wurzelnetzwerks resultiert die räumliche, zeitliche und quantitative Differenzierung (siehe Abbildung 6). Das Simulationsexperiment zeigt, dass das System auch mit zwei ausfallenden Sensoren eine noch akzeptable Performance über mehrere Tage leisten kann.

Betrachtet man die Simulation kritisch, so müssen folgende Aspekte beachtet werden. Aus rechnerischen Gründen wurde das System so skaliert, dass eine Bodenrastereinheit einem Kubikzentimeter entspricht. Eine Simulation mit realer Skalierung und einer rechenstarken Hardware ist deshalb dringend notwendig, um die Anzahl der Tropfvorrichtungen, die Position der Sensoren und weitere Parameter zu testen. Jedoch sollte die Veränderung der Inputparameter hinsichtlich einer gewählten Skala die beobachteten Verhaltensmuster der Versickerung nicht ändern.

Die Anwendung der Simulation auf eine größere räumliche Bodeneinheit (1 m^3) hat keine Auswirkungen auf die Funktionsweise des XCS. Es muss jedoch beachtet werden, dass die bisherige Simulation klein genug ist, um dem System nur einmalig ein repräsentatives Feedback zu geben. Wird die Bodentiefe jedoch auf einen Meter erweitert, so kann es von Interesse sein, zu unterscheiden, ob eine spezifische Bewässerungsrate sowohl gut für obere als auch für untere Bereiche im Verlauf des Bodenprofils ist.

Abschließend ist eine kritische Betrachtung des gesamten Systems notwendig. Während der Analysen konnte beobachtet werden, dass die ersten Tage des Lernprozesses essentiell für das System sind, was noch eingehend untersucht werden muss. Sehr positiv ist hervorzuheben, dass die Konstruktion des XCS losgelöst von jeglicher Pflanzenart und Skala des Bewässerungssystems ist.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Das implementierte Versickerungsmodell zeigt ein naturnahes Verhalten, das ähnlich zu Ergebnissen in der Literatur und den Beobachtungen in der Realität ist. Die vorgestellte Simulation eines adaptiven Präzisionsbewässerungssystems bietet dabei zwei neue Ansätze: Erstens ermöglicht die agentenbasierte Modellierung des Bodenwassers, die Umgehung der Differentialgleichung zur Lösung der Richardsgleichung, was die Berechnungen erleichtert. Zweitens adaptiert sich das System selbstständig sowohl an die Bedürfnisse der Pflanze als auch an sich ändernde Umweltbedingungen (wie z. B. verschiedene Korngrößenverteilungen im Boden, variable Bodenfeuchten, Tag- und Nachtzyklen, Wurzelsysteme oder ausgefallene Feuchtesensoren).

Die präzise Steuerung begründet die Annahme, dass ein reduzierter Wasserverbrauch mit dem beschriebenen Modell erreicht werden kann. Dennoch befindet das Modell noch im initialen Stadium seiner Entwicklung und mehrere Probleme der realen Praxis wurden bisher bewusst ausgeschlossen. So gibt es bislang z. B. weder eine Adaption an den natürlichen Niederschlag noch an Temperaturveränderungen, was in der Realität die Evapotranspirationsverhältnisse und damit auch den Wasserbedarf von Kulturpflanzen beeinflusst.

Auf die Grenzen des Versickerungsmodells wurde im letzten Abschnitt hingewiesen. Diese beziehen sich hauptsächlich auf eine zeitliche, räumliche und massebezogene Diskretisierung. Da eines der zukünftigen Ziele die Adaption des PI-Systems an Niederschlagsereignisse und Temperaturschwankungen sowie andere Umweltvariablen ist, müssen verschiedene Modellkomponenten angepasst werden.

Die Anwendung des Modells in einer realen Umgebung bleibt der letzte zukünftige Schritt. Eine Voraussetzung hierfür ist, dass die Konstruktion des XCS losgelöst ist von jeglicher Kulturpflanzenart und Skala des Bewässerungssystems. Zusätzlich zeigte das Experiment, dass ausfallende Sensoren vom System über mehrere Tage kompensiert werden können, bis der defekte Sensor ausgetauscht ist.

Demnach können das hier vorgestellte PI-System und das Versickerungsmodell als vielversprechende Ansätze zusammengefasst werden, die durchaus ein Potential für weitere Fragestellungen bieten.

Grundsätzlich kann die Betrachtung von standort-spezifischen Bodeneigenschaften einen wichtigen Beitrag zur Optimierung und Verbesserung der Wassernutzungseffizienz im Bewässerungsmanagement leisten. Deshalb erscheint es erforderlich, die Korngrößenzusammensetzung und Textur der Böden mit in Präzisionsbewässerungssysteme einzubeziehen.

Literaturverzeichnis

- Børgesen C.D., Iversen B.V., Jacobsen O.H., Schaap M.G. (2008): Pedotransfer functions estimating soil hydraulic properties using different soil parameters. *Hydrological Processes* 22, 1630-1639.
- Butz M.V., Wilson S.W. (2001): An Algorithmic Description of XCS, in: Luca Lanzi, P., Stolzmann, W., Wilson, S.W. (Eds.), *Advances in Learning Classifier Systems: Third International Workshop, IWLCS 2000 Paris, France, September 15-16, 2000 Revised Papers*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 253-272.
- Castle C.J.E., Crooks A.T. (2006): Principles and Concepts of Agent-Based Modelling for Developing Geospatial Simulations, UCL Working Papers series. University College London, CASA, London, p. 60.
- Crooks A.T., Heppenstall A.J. (2012): Introduction to Agent-Based Modelling, in: Heppenstall, A.J., Crooks, A.T., See, L.M., Batty, M. (Eds.), *Agent-Based Models of Geographical Systems*. Springer, pp. 85-105.
- Dabach S., Lazarovitch N., Šimůnek J., Shani U. (2013): Numerical investigation of irrigation scheduling based on soil water status. *Irrigation Science* 31, 27-36.
- Ehlers W., Goss M. (2016): *Water dynamics in plant production*. CABI.
- Feddes R.A. (1982): Simulation of field water use and crop yield, *Simulation of Plant Growth and Crop Production*. Pudoc, pp. 194-209.
- Grashey-Jansen S. (2014): Optimizing irrigation efficiency through the consideration of soil hydrological properties - examples and simulation approaches. *Erdkunde* 68, 33-48.
- Grashey-Jansen S., Timpf S. (2010): Soil Hydrology of Irrigated Orchards and Agent-Based Simulation of a Soil Dependent Precision Irrigation System. *Advanced Science Letters* 3, 259-272.
- Green S., Kirkham M., Clothier B. (2006): Root uptake and transpiration: from measurements and models to sustainable irrigation. *Agricultural Water Management* 86, 165-176.
- Greenwood D.J., Zhang K., Hilton H.W., Thompson A.J. (2009): Opportunities for improving irrigation efficiency with quantitative models, soil water sensors and wireless technology. *The Journal of Agricultural Science* 148, 1-16.
- Holland J.H., Reitman J.H. (1978): Cognitive systems based in adaptive algorithms, in: Waterman, D.A., Hayes-Roth, F. (Eds.), *Pattern-directed inference systems*. Academic Press, New York.
- Krause M., Konrad R. (2014): IEEE 802.15.4, *Drahtlose ZigBee-Netzwerke*. Springer, pp. 83-90.
- Madramootoo C.A., Morrison J. (2013): Advances and challenges with micro-irrigation. *Irrigation and Drainage* 62, 255-261.
- Müller-Schloer C., Schmeck H., Ungerer T. (2011): *Organic Computing - A Paradigm Shift for Complex Systems*. Springer-Verlag.
- Raine S.R., Meyer W.S., Rassam D.W., Hutson J.L., Cook F.J. (2007): Soil-water and solute movement under precision irrigation: knowledge gaps for managing sustainable root zones. *Irrigation Science* 26, 91-100.
- Schultz B., De Wrachien D. (2002): Irrigation and drainage systems research and development in the 21st century. *Irrigation and Drainage* 51, 311-327.
- Van Genuchten M.T. (1980): A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil science society of America journal* 44, 892-898.
- Van Genuchten M.T. (1987): *A Numerical Model for Water and Solute Movement in and Below the Root Zone*. United States Department of Agriculture Agricultural Research Service U.S. Salinity Laboratory.
- Wilensky U. (1999): NetLogo. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, Evanston, IL.
- Wilson S.W. (1994): ZCS: A zeroth level classifier system. *Evol. Comput.* 2, 1-18.
- Wilson S.W. (1995): Classifier fitness based on accuracy. *Evol. Comput.* 3, 149-175.
- Wösten J.H.M., Van Genuchten M.T. (1988): Using texture and other soil properties to predict the unsaturated soil hydraulic functions. *Soil Science Society of America Journal* 52, 1762-1770.
- Würtz, R.P., 2008. *Organic Computing*. Springer Science & Business Media.