

Hallesches Jahrbuch für Geowissenschaften, 32/33, S. 49-56, 3 Abb.  
Halle (Saale), Mai 2011

## Simulation einer sensorgestützten Präzisionsbewässerung von Standorten im Südtiroler Obstanbau

Sven Grashey-Jansen\*

Grashey-Jansen, S. (2011): Simulation einer sensorgestützten Präzisionsbewässerung von Standorten im Südtiroler Obstanbau. [Simulation of a sensor-based precision irrigation of orchards in South Tyrol.] – Hallesches Jahrbuch für Geowissenschaften, 32/33: 49-56, Halle (Saale).

**Kurzfassung:** Die Folgen des Klimawandels machen einen bewussteren Umgang mit den Wasserressourcen notwendig. Insbesondere in Agrarregionen, welche nur unter hohem Bewässerungseinsatz wirtschaftlich rentable Erträge liefern, kann durch eine bedarfsorientierte und teilflächenspezifische Bewässerung eine bedeutende Wassereinsparung ohne Ertragseinbußen erreicht werden. Mehrjährige bodenhydrologische Untersuchungen in den bewässerten Obstanbauregionen Südtirols haben ergeben, dass die pedologischen Standortunterschiede einen bedeutenden, bisher aber meist unbeachteten, Einfluss auf die lokalen Variationen der Bodenwasserdynamik und der für die Pflanzen verfügbare Wassermenge haben.

Numerische und agenten-basierte Simulationsversuche haben gezeigt, dass eine dynamisch gesteuerte Bewässerung durch den Einsatz bodenspezifisch kalibrierter Feuchtesensoren eine optimierte Wasserzufuhr ermöglicht. Durch eine verkürzte Bewässerungsdauer mit variablen Intensitäten, welche sich an bodenphysikalischen Kennwerten orientieren, können deutliche Wassereinsparungen erzielt werden.

Einer geplanten Validierung an Bodensäulen im Labor und Optimierung dieses Simulationsansatzes soll eine Praxisprüfung im Freigelände folgen.

**Abstract:** In many climatic regions, the availability of water in soils determines to a large extent their agricultural productiveness. Especially in irrigated agricultural areas information about the actual soil water dynamics can deliver valuable data to optimize the irrigation practice with regard to volume and duration of irrigation.

South Tyrol is a region where these questions are discussed currently. Intensive orcharding is practised there within an area of about 18.000 hectares. Because of the local climatic situation irrigation is considered necessary and has been practised for a long time. However, at many locations much more water is used for irrigation than the apple trees actually need. Regarding the aspects of climatic change and the decrease of water resources, the term “precision irrigation” is being increasingly discussed. Such a precision irrigation must be based on objective and quantitative criteria, which focus primarily on the physical soil properties and hydrologic balances.

One solution would be to have sensors near the plants’ roots controlling the water inflow depending on the particular demand. Such a dense soil-hydrological measuring network should be composed ideally of micro-sensors, which are distributed in the investigated soil section and thereby collect data of relevant parameters in the pedosphere using high temporal resolution and transmitting the information to a central logger-unit.

This contribution will present a simulation-based approach of a precision irrigation-system with particular consideration of pedo-specific properties.

**Schlüsselwörter:** Bodenfeuchtesensorik, Simulation, Bewässerungssteuerung, Pedotransferfunktionen

**Keywords:** soil moisture sensors, simulation, irrigation control, pedotransfer functions

---

\* Anschrift des Autors:

Sven Grashey-Jansen ([sven.jansen@geo.uni-augsburg.de](mailto:sven.jansen@geo.uni-augsburg.de)), Universität Augsburg, Institut für Geographie, Lehrstuhl für Physische Geographie & Quantitative Methoden, Universitätsstraße 10, D-86135 Augsburg.

## 1. Einleitung

Die Wasserverfügbarkeit im Boden entscheidet in vielen Klimaregionen der Erde maßgebend über deren landwirtschaftliche Ertragsfähigkeit. Rund ein Fünftel des Agrarlandes der Erde müssen aufgrund mangelnder Niederschläge künstlich bewässert werden, so dass die Bewässerung in vielen Regionen der Erde einen unverzichtbaren Produktionsfaktor darstellt. Die Heterogenität der Böden bleibt dabei meist unberücksichtigt (Grashey-Jansen 2007a, 2007b).

Der vorliegende Beitrag will einige Ergebnisse aus mehrjährigen Untersuchungen zur Bodenwasserndynamik unter Bewässerungseinfluss in Südtirol zusammenfassen und dabei Möglichkeiten der Bewässerungsoptimierung anhand eines simulativen Ansatzes aufzeigen.

Die Region Südtirol in Italien ist mit ca. 18.000ha Anbaufläche und einer jährlichen Produktionsrate von bis zu 900.000t das größte zusammenhängende Kernobstanbaugebiet in Europa. Der Übergang vom mediterranen zum mitteleuropäisch-kontinentalen Klima gewährleistet prinzipiell sehr gute klimatische Voraussetzungen für einen intensiv und großflächig betriebenen Obstanbau. Die jährlichen Niederschlagsmittel variieren lokal und liegen bei 450mm bis 550mm im inneralpiner Trockental Vinschgau und knapp 650mm im Mittleren Etschtal zwischen Meran und Bozen, so dass intensiv betriebene Obstanbau nur unter einer Zusatzbewässerung rentable Erträge liefert (Grashey-Jansen & Schröder 2009). Zwar werden inzwischen Bewässerungsstrategien verfolgt, welche auf Bodenfeuchtemessungen basieren. Doch sind diese aufgrund des nichtlinearen und bodenartspezifischen Zusammenhangs zwischen Wassergehalt und Wasserspannung selten zielführend. Infolgedessen kommt es häufig zu Wassergaben, welche deutlich über die tatsächliche Notwendigkeit und den Bedarf der Kulturpflanzen hinausgehen. Vor allem im Bereich grundwassernaher Standorte sind bereits Erscheinungsformen der Überbewässerung beobachtet worden (Thalheimer 2005, Grashey-Jansen 2008a).

Das Wasser zur Beregnung wird insbesondere im Mittleren Etschtal aus Tiefbrunnen entnommen. Aufgrund des hohen Wasserverbrauches, sind zeitweise Absenkungen im Grundwasserspiegel registriert worden. Eine zentrale Aufgabe der regionalen Landwirtschaft wird es in den kommenden Jahren sein, den Wasserverbrauch auf ein minimal notwendiges Maß zu reduzieren.

Daher wird es auch aus Gründen der Kostenbegrenzung in Zukunft notwendig werden, den Bewässerungsbedarf und die Menge der einzelnen Wassergaben objektiv nach messbaren Parametern festzulegen. Der Terminus "Precision irrigation" als teilflächenspezifische Bewässerung ist definiert als eine exakte Wasserapplikation in Abstimmung auf die räumlichen und zeitlichen Variationen der Bodeneigenschaften und in Abhängigkeit der verschiedenen phänologischen Entwicklungsphasen, während der Vegetationsperiode (Al-Karadsheh et al. 2003, Schoengold et al. 2004, Al-Kufaishi et al. 2006, Rain et al. 2007).

Nicht nur das regionale Bewusstsein, sondern auch die Empfehlungen und Vorschriften der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie ziehen einen Handlungszwang nach sich, so dass in Südtirol und im gesamten europäischen Raum vermehrt Überlegungen getroffen werden, welche in die Richtung einer Bewässerungsoptimierung auf Basis messbarer Kriterien abzielen.

## 2. Datengrundlage und Methodik

### 2.1 Voruntersuchungen

Durch umfangreiche bodenkundliche und bodenhydrologische Untersuchungen an 15 repräsentativen Standorten konnte im Zeitraum von 2003 bis 2009 eine solide Datenbasis zur quantitativen Beschreibung der Bodenwasserndynamik unter Bewässerungseinfluss gewonnen werden (Grashey-Jansen 2008b). Neben Profilaufnahmen und Laboranalysen, stand dabei vor allem die simultane Erfassung tiefendifferenzierter Saugspannungen, Grundwasserspiegelschwankungen und Bewässerungseinheiten sowie relevanter klimatischer Parameter (Niederschläge, Boden- und Lufttemperaturen, Wind und Luftfeuchtigkeit) im Vordergrund. Die hohe zeitliche Auflösung (stündlich) ermöglichte den effizienten Einsatz statistischer Verfahren zur Daten- und Zeitreihenanalyse.

Längerfristige Variationen und markante Anomaliephasen im Gesamtverlauf der tensiometrischen Zeitreihen wurden durch die Anwendung numerischer Tiefpassfilter beschrieben. Die Anwendung numerischer Hochpassfilter erlaubte eine optimierte Analyse der hochfrequenten Variabilitäten. Bivariate und partielle Korrelationsrechnungen dienten einer initialen Überprüfung und Quantifizierung vermuteter Zusammenhänge zwischen den Saugspannungen und den erfassten Einflussgrößen. Die Berechnung (par-

tieller) Autokorrelationsfunktionen gestattete die Identifikation standort- und tiefenspezifischer Trägheitsmäße und Wiederholungsmuster. Um die natürlichen Zeitverzögerungen sowie die damit verbundenen Abhängigkeiten und Reaktionsgeschwindigkeiten im bodenhydrologischen Prozessgeschehen quantifizieren zu können, wurden für alle Korrelationspaare die entsprechenden Zeitversätze durch Kreuzkorrelationen berechnet. Hauptkomponentenanalysen dienten durch die Informationsverdichtung und Mustererkennung dazu grundlegende Typen der Saugspannungsvariabilitäten zu extrahieren. Letztendlich konnten dann im Zuge schrittweiser Regressionsverfahren aus der Gesamtmenge der erfassten Parameter diejenigen Einflussgrößen ermittelt werden, welche als Prädiktoren einen signifikanten Erklärungsanteil zur Variation der Zielgröße Saugspannung beitragen.

## 2.2 Simulationsansatz der sensorgestützten Bewässerungsoptimierung

Der bio- und bodenphysikalische Zusammenhang zwischen der Saugspannung des Wassers in der Bodenmatrix und dem Wasserversorgungsstatus der Pflanzen legt eine kontinuierliche und tiefendifferenzierte Saugspannungserfassung für die Umsetzung einer bedarfsorientierten Bewässerung nahe, die im Idealfall sensorgestützt erfolgt.

Der Einsatz von Sensoren zur Bewässerungssteuerung ist in der landwirtschaftlichen Praxis jedoch an verschiedene Restriktionen geknüpft. Die minimalinvasive Installation einer wartungsarmen Sensorik ist vorteilhaft, weil sie den laufenden Betrieb nicht stört und in hoher raumzeitlicher Auflösung Messwerte liefert. Im Bereich der Bodenfeuchtemessung hat sich daher in den letzten Jahren die Verwendung von Mikrosensoren etabliert. Eine auf Feuchtesensoren basierende Bewässerungssteuerung kann jedoch nur unter Einbeziehung entscheidender bodenphysikalischer Parameter effizient arbeiten. Hierbei nimmt die mineralische Korngrößenzusammensetzung (neben der spezifischen Lagerungsdichte und dem Gehalt an organischer Substanz) eine zentrale Stellung ein, weil sie den Bodenwasserhaushalt und seine raumzeitliche Dynamik entscheidend beeinflusst. Ohne Berücksichtigung dieses Parameters ist ein Rückschluss auf die korrespondierenden Matrixpotentiale im Boden und damit eine bedarfsorientierte Bewässerung nicht möglich. Sensortechnisch ist eine minimalinvasive Messung der Matrixpotentiale nur unter einem unverhältnismäßig hohen Kostenaufwand mit war-

tungsintensiven Mikro-Tensiometern zu realisieren.

Der hier vorgestellte Simulationsansatz basiert daher auf stromsparenden low-cost Bodenfeuchtesensoren, welche den volumetrischen Wassergehalt in porösen Medien über Spannungsänderungen kapazitiv an der Sonde messen. Die korrespondierenden pF-Werte im Boden werden in der Simulation über regressionsbasierte Pedotransferfunktionen berechnet, welche für alle 34 Bodenarten der deutschen bodenkundlichen Systematik erstellt wurden (Grashey-Jansen & Timpf 2010). Über diese spezifischen Pedotransferfunktionen wird eine simultane Wiedergabe der Saugspannungen und damit eine objektive und quantitativ basierte Abschätzung der Bewässerungsnotwendigkeit möglich.

Die Sensoren werden unmittelbar an den jeweiligen oberen und unteren Horizontgrenzen positioniert. Diese Sensorknoten sind mit einer Kontrolleinheit an der Bodenoberfläche verbunden (Abbildung 1). Die Bodenfeuchtwerte zwischen diesen Sensorknoten (innerhalb der homogenen Einzelhorizonte) werden zentimeterweise über ein lineares Interpolationsverfahren berechnet, so dass letztlich für jeden Zentimeter im Gesamtprofil zeitgleich gemessene und simulierte Bodenfeuchtwerte vorliegen. Basierend auf diesen Feuchtwerten wird über die bodenart-spezifischen Pedotransferfunktionen der korrespondierende Vertikalverlauf der Wasserspannungen im Bodenprofil berechnet.

Der Bewässerungsbeginn wird durch das Überschreiten kritischer Saugspannungswerte (für den Obstbau ab 550hPa; vgl. Quast 1986) im Hauptdurchwurzelungsbereich von den betroffenen Tiefenbereichen signalisiert. Diese Signalgebung kann dabei sowohl durch die physischen Sensorknoten als auch aus den virtuellen Zwischenbereichen erfolgen. Die Wiedergabe der raumzeitlichen Dynamik der descendenten Wasserbewegung im Bodenprofil erfolgt durch die Berechnung der relevanten Teilpotentiale sowie der hydraulischen Gradienten  $\text{grad}\psi_h$  und der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeiten  $k(\Psi)$ . Die Berechnung von  $k(\Psi)$  basiert dabei auf dem Ansatz von Mualem (1976) und dem Vorhersagemodell van Genuchten (1980). Es wird von einem idealisierten Kolbenfluss des Wassers im Boden ausgegangen, der das Bodenprofil kaskadenartig bis zum Erreichen der bodenart-spezifischen Feldkapazität zentimeterweise aufsättigt.  $K(\Psi)$  ermöglicht über die Berechnung des Wasserflusses  $q$  eine quantitative Beschreibung der Zeitdauer, welche das Wasser auf seinem Fließ-

weg durch die jeweils betrachtete Tiefenlage  $dx$  im vertikalen Bodenprofil im Laufe des Aufsättigungsprozesses benötigt. Der dafür notwendige hydraulische Potentialgradient wird für den mittleren Wassergehalt des jeweiligen und dem aktuellen Wassergehalt des nächst tieferen Zentimeters berechnet.

$$q = k(\psi) \cdot \text{grad}\psi_h \quad [1]$$

Die Berechnung von  $q$  entspricht damit der maximal möglichen Bewässerungsintensität, bei der es noch zu keinem Wasserstau kommen kann.

Hierbei wird im Modell vereinfachend davon ausgegangen, dass die Wasserspannungen in den tieferen Bodenbereichen nach Aktivierung des Bewässerungsvorganges und dem Einsetzen der damit verbundenen Infiltration bis zum Befeuchtungsmoment nicht weiter ansteigen, sondern stagnieren. Im Bereich der Horizontübergänge muss dabei auf die Pedotransferfunktionen der nächstfolgenden Bodenart vorgegriffen werden, um den zugehörigen hydraulischen Gradienten zu berechnen.

Die simulierte Abwärtsbewegung des Bewässerungswassers im Boden von einem Zentimeter in der Tiefe  $d_{x1}$  zum nächsten in der Tiefe  $d_{x2}$  erfolgt nach einem eigens entwickelten Kaskadenmodell, welches in das Gesamtmodell integriert ist. Dabei wird in einem ersten Schritt das jeweils aktuell auffüllbare Wasserspeichervolumen  $wc_{fill}$  pro Zentimeter Bodentiefe im Zeitverlauf berechnet:

$$wc_{fill} = (wc_{sat} - wc_{act}) \cdot 0,1 \quad [2]$$

mit:

$wc_{fill}$  = auffüllbare Wassermenge [mm]

$wc_{sat}$  = Wassergehalt bei Feldkapazität (pF 1,8) [mm]

$wc_{act}$  = aktueller Wassergehalt [mm]

Mit  $q$  und  $wc_{fill}$  kann die Zeitdauer  $it$  berechnet werden, welche zum Auffüllen des betrachteten Zentimeters benötigt wird, wenn sich das Wasser mit der Intensität  $q$  durch den Boden bewegt:

$$it = \frac{wc_{fill}}{q} \quad [3]$$

Die Berechnung der Zeit, welche zum Durchsickern durch den inzwischen aufgesättigten Zentimeter  $d_x$  bis zum Erreichen von dessen Basis und damit dem Erreichen vom darunterliegenden Zentimeter  $d_{x+1}$  verstreicht, wird hier als Perkola-

tionszeit  $t_p$  bezeichnet. Die Größe  $t_p$  kann letztlich aus der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit der entsprechenden Bodenart abgeleitet werden, da der Wert des hydraulischen Gradienten innerhalb von  $d_x$  nach seiner zeitweiligen Vollaufsättigung stets 1 beträgt.

Die Bestimmung der Gesamtdauer  $tt$  für die Versickerung des Bewässerungswassers erfolgt kumulativ:

$$\begin{aligned} tt_{d_{x2}} &= tt_{d_{x1}} + it_{d_{x2}} + tp_{d_{x2}} \\ \rightarrow tt_{d_{x3}} &= tt_{d_{x2}} + it_{d_{x3}} + tp_{d_{x3}} \\ \rightarrow \rightarrow tt_{d_{x4}} &= tt_{d_{x3}} + it_{d_{x4}} + tp_{d_{x4}} \quad [4] \\ \rightarrow \rightarrow \rightarrow tt_{d_{x5}} &= tt_{d_{x4}} + it_{d_{x5}} + tp_{d_{x5}} \\ \rightarrow \rightarrow \rightarrow \rightarrow &\dots \end{aligned}$$

Die Bewässerung endet sobald das gesamte Bodenprofil seine maximale Feldkapazität bis in den Hauptdurchwurzelungsbereich hinein erreicht hat.

Die numerischen Teilsimulationen wurden in der freien Programmiersprache R geschrieben und entwickelt. Die eigentliche Simulation erfolgt mit dem ebenfalls freien Simulationstool SeSAM (Shell for Simulated Agent Systems), welches javabasiert mit einer visuellen Programmierumgebung arbeitet. In dieser Multi-Agenten-Simulation werden die Einzelsensoren durch "Agenten" repräsentiert, wobei jeder Agent mit Eigenschaften, Informationen und Fähigkeiten ausgestattet ist. Durch das "Verhalten" jedes einzelnen Agenten und der Interaktion mit benachbarten Agenten können die Wirkungsgefüge im Bodenwasserhaushalt beschrieben und damit der Bewässerungsablauf als ein emergentes Phänomen simuliert werden (Grashey-Jansen & Timpf 2010).

### 3. Ergebnisse

#### 3.1 Ergebnisse der Voruntersuchungen

Die Felduntersuchungen haben gezeigt, dass in der Untersuchungsregion eine große pedologische Standortheterogenität vorliegt. Den Analysen und Berechnungen nach erweist sich die Saugspannung als ein sehr tiefenabhängiger Parameter, der bis in 45cm Bodentiefe (= Hauptdurchwurzelungsbereich der Obstbäume) einer deutlichen Steuerung durch atmosphärische Einflussgrößen unterliegt. Im Bereich grundwassernaher Standorte konnten die Grundwasserflurabstände und kapillare Aufstiegsprozesse als ein signifikanter

Steuerungsparameter nachgewiesen werden, so dass stellenweise eine ganzheitliche Wasserversorgung der Obstbäume ohne jegliche Zusatzbewässerung denkbar ist (Grashey-Jansen 2008a, 2008b).

Die Bodenwasserdynamik wird dabei maßgebend von der Heterogenität pedologischer Eigenschaften gesteuert, wobei die Zusammensetzung und Verteilung der mineralischen Korngrößen eine zentrale Rolle spielt. Die Saugspannung als messbare Zielgröße erwies sich im Rahmen der Voruntersuchungen als ein gut geeigneter Parameter zur quantitativen Beschreibung der Bodenwasserdynamik unter Bewässerungseinfluss.

Um die Bewässerungspraxis für die Region in ökonomischer und ökologischer Hinsicht zu optimieren, ist eine Bewässerungsplanung auf objektiver Basis essentiell. Dabei dürfen atmosphärische Parameter und der Einfluss des Grundwassers nicht überbewertet werden, sondern die Beachtung der pedologischen Verhältnisse muss in den Vordergrund gestellt werden. Nur mit ihrer Kenntnis lässt sich die Wirksamkeit atmosphärischer und hydrologischer Einflussgrößen effektiv abschätzen, um damit essentielle Informationen für eine bedarfsgerechte Bewässerung zu liefern.

### 3.2 Simulationsergebnisse

Als Simulationsergebnis wird vom Modell ein Bewässerungsplan ausgegeben. Die Bewässerung erfolgt dabei weder statisch noch intermittierend, sondern kontinuierlich dynamisch. Dies bedeutet, dass das Verhältnis zwischen ausgebrachter Wassermenge und der zugehörigen Bewässerungsdauer kontrollierten Variationen unterliegt. Diese dynamische Bewässerungsweise ermöglicht eine sukzessive Wasserzufuhr in das Bodenprofil unter Anpassung an die bodenhydrologischen Eigenschaften.

Die folgenden Ergebnisse basieren auf dem in Abbildung 1 gezeigten Bodenprofilaufbau, der sich horizontweise aus den drei verschiedenen Bodenarten Mittelsand (mS: 0-17cm), schwach schluffigem Sand (Su2: 18-30cm) und sandig-lehmigem Schluff (Uls: 31-45cm) zusammensetzt.

Abbildung 2 zeigt die vertikale Verteilung der simulierten, volumetrischen Bodenwassergehalte (a) und der korrespondierenden Saugspannungen (b) zum Zeitpunkt des Bewässerungsbeginns, welche das Modell aus den Pedotransferfunktionen synchron berechnet. Als Schwellenwert wurde im Beispiel eine kritische Saugspannung

von 500hPa für den Hauptdurchwurzelungsbereich (beginnend bei ca. 15cm) festgelegt.

Die horizontspezifische Verteilung der volumetrischen Wassergehalte kommt dabei deutlich zum Ausdruck (Abbildung 2a). Dagegen zeigen die korrespondierenden Saugspannungen (Abbildung 2b) aufgrund des sich bereits eingestellten Potentialausgleichs einen erwartungsgemäß wesentlich ausgeglicheneren Vertikalverlauf.

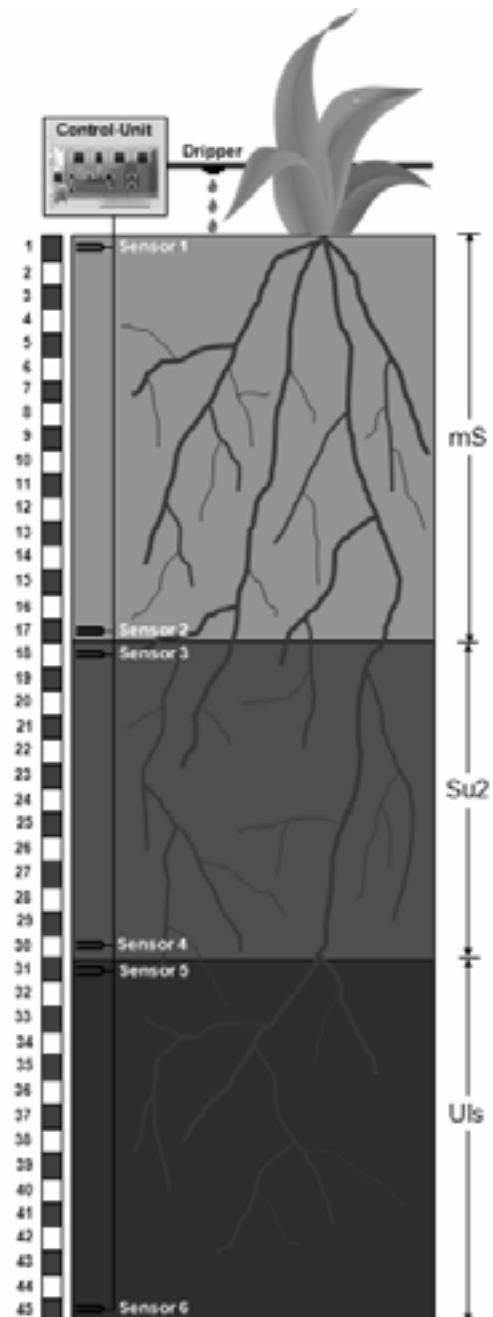


Abb. 1: Anordnung der Bodenfeuchtesensoren an den Horizontgrenzen in einem heterogenen Beispielprofil.

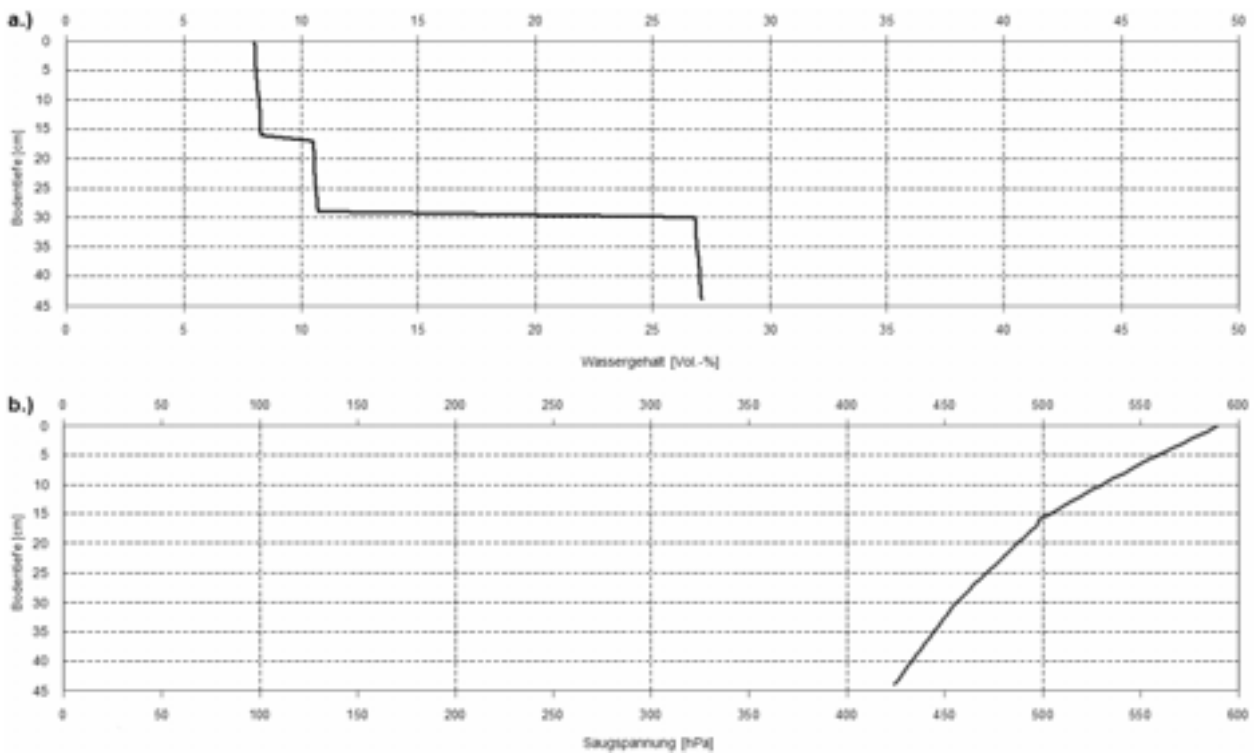


Abb. 2 a: Vertikalverteilung des volumetrischen Wassergehaltes im Bodenprofil.  
 b: Vertikalverteilung der zeitgleich korrespondierenden Saugspannungen im Bodenprofil.

Basierend auf dieser bodenhydrologischen Ausgangssituation wird von den simulierten Sensoren der Bewässerungsplan berechnet (Abbildung 3). Daraus wird ersichtlich, dass die Bewässerungsintensität über den gesamten Bewässerungszeitraum variiert, weil jede Bodentiefe die Wassermenge erhält, die auch ihrem maximal möglichen Speichervolumen bei Feldkapazität entspricht. Aufgrund dieses dynamischen Bewässerungsvorgangs, wird dem Bodenprofil das notwendige Wasser sukzessive in Anpassung an seine (sich im Zeitverlauf ändernden) bodenhydrologischen Eigenschaften zugeführt. Der Bewässerungsplan setzt sich somit aus einzelnen Slots unterschiedli-

cher Bewässerungsdauer und Wassermenge zusammen (= dynamische Intensität). Im gezeigten Beispiel beträgt die gesamte Bewässerungsdauer 78,7 Minuten, um das Bodenprofil bis in 45cm Tiefe mit einer aufsummierten künstlichen Niederschlagshöhe von 44,15mm bis auf seine Feldkapazität aufzusättigen. Die kurze Bewässerungsdauer erklärt sich durch die hohen Ausgangssaugspannungen im gesamten Bodenprofil und den damit verbundenen hohen hydraulischen Gradienten im Bereich der jeweiligen Infiltrationsfronten, welche die Wasserbewegung zusätzlich antreiben.

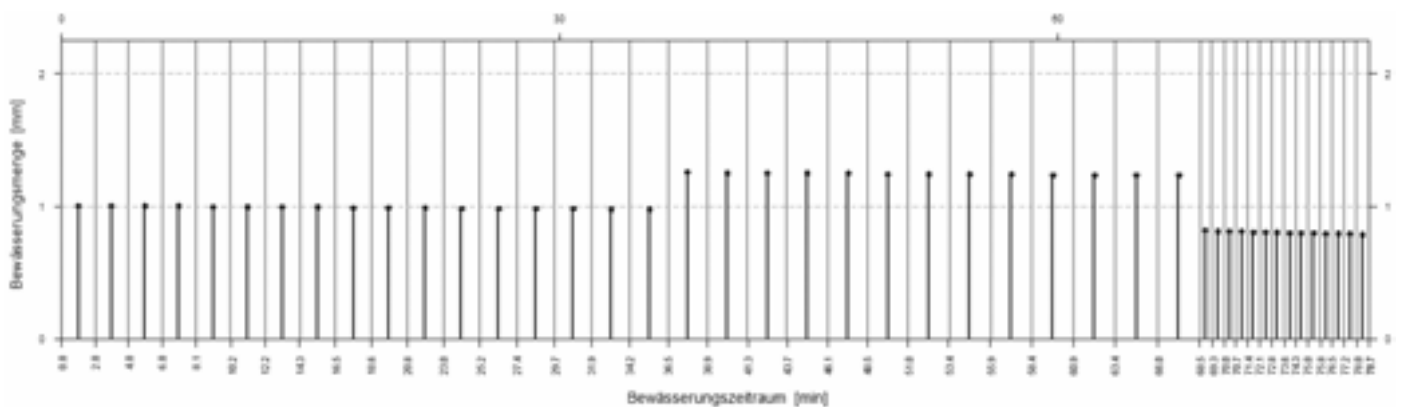


Abb. 3: Bewässerungsplan als Simulationsergebnis für eine sensorgestützte Präzisionsbewässerung. Die Länge der Zeitfenster (= Slots; begrenzt durch dünne Linien) sowie die innerhalb der Slots ausgebrachten Wassermengen (dicke Linien mit Punktsignatur im Maximalbereich) unterliegen dabei dynamischen Variationen.

## 4. Diskussion

Der Simulationsansatz zeigt, dass eine Bewässerungssteuerung durch den Einsatz weniger, aber pedospezifisch kalibrierter Feuchtesensoren effizient erfolgen kann. Im Gegensatz zu der herkömmlichen Bewässerungspraxis, welche meist fixierten Zeitplänen mit pauschalen Wassergaben und dabei eher subjektiven Kriterien folgt, liefert die Simulation eine dynamische Bewässerungssteuerung. Diese basiert auf den bodenphysikalischen Eigenschaften des Standortes und nutzt die Saugspannung als Führungsgröße für ein bedarfsorientiertes Bewässerungsschema.

Die Wasserersparnis gegenüber der traditionellen Bewässerungsweise ist aufgrund der großen pedologischen Standortheterogenität für die Untersuchungsregion nur schwer abschätzbar. Ausgehend von einer künstlichen Niederschlagsdichte von 6mm/h und einem 9-stündigen Bewässerungszeitraum bei der herkömmlichen Oberkronenberechnung (Grashey-Jansen 2008b) ergibt sich im Vergleich zu dem hier vorgestellten Beispiel eine Wassereinsparung von rund 10Liter/m<sup>2</sup> (= 1000Liter/ha) je Bewässerungsgang. Zudem reduziert der verkürzte Bewässerungszeitraum der dynamischen Variante Wasserverluste durch Winddrift, Evaporation und Interzeption, welche jedoch aufgrund der Abhängigkeit von der Witterung und dem phänologischen Stadium bisher noch nicht quantifizierbar sind.

Bezüglich der simulierten Bodenwasserdynamik muss davon ausgegangen werden, dass die reale Fließgeschwindigkeit noch höher liegt, weil das Wasser die Matrix „umfließen“ muss (Ehlers & Goss 2004). Das heißt die tatsächliche Fließstrecke, welche innerhalb dieser Zeit zurückgelegt wird ist länger als es der Modelldistanz von einem Zentimeter entspricht. Dieser Effekt (wie auch der Einfluss von Makroporenflüssen) kann bisher noch nicht zielführend simuliert werden.

Die Validierung des Modells im Feld- und Laborversuch ist in Vorbereitung, wobei zunächst eine pedospezifische Kalibrierung der Sensorknoten im Vordergrund steht. Nach einer erfolgreichen Validierung dieses Simulationsansatzes an Bodensäulen im Labor und der Praxisprüfung im freien Gelände, wird eine große Problematik im Bereich der technischen Umsetzung liegen. Der technische und finanzielle Aufwand für eine

sensorbasierte, dynamische Präzisionsbewässerung ist deswegen bislang noch nicht abschätzbar.

## 5. Schlussfolgerungen

Um die Bewässerungspraxis für die vorgestellte Region in ökonomischer und ökologischer Hinsicht zu optimieren, ist eine Bewässerung auf objektiver Basis essentiell. Dabei dürfen die atmosphärischen Parameter und auch die Grundwassernähe als objektive Kriterien nicht überbewertet werden, sondern die Beachtung der pedologischen Verhältnisse muss in den Vordergrund rücken. Die Bewässerungspraxis kann deutlich optimiert und bedarfsorientiert gestaltet werden, wenn ihr kein administrativ und subjektiv gesteuerter Bewässerungszeitplan zugrunde liegt, sondern die Bewässerungsnotwendigkeit an der tatsächlich pflanzenverfügbaren Bodenwassermenge gemessen wird. Die Saugspannung im Boden ist dabei eine optimale Führungsgröße.

Eine sensorgestützte und zeitgleich minimalinvasive Erfassung der Matrixpotentiale ist technisch bisher nur schwer und unter sehr hohem Kostenaufwand realisierbar, weshalb der Einsatz von stromsparenden und kostengünstigen Bodenfeuchtesensoren zielführender erscheint.

Die Steuerung der Bewässerung mithilfe von pedospezifisch kalibrierten Feuchtesensoren, deren Messwerte simultan durch entsprechende Transferfunktionen in die korrespondierenden Saugspannungen umgerechnet werden hat, sich im Modellversuch als effizient erwiesen. Die Einbindung dieses Systems in ein Sensornetzwerk ist ein denkbarer Ansatz für eine teilflächenspezifische und bedarfsorientierte Bewässerung. Angaben zur potentiellen Wassereinsparung konnten bereits abgeschätzt werden.

Zur Optimierung des Modells sollen in einem weiteren Simulationsschritt exogene Parameter in das Modell integriert werden, um dem Einfluss von Niederschlägen, Luft- und Bodentemperaturen, relativen Luftfeuchten und Grundwasserspiegelständen gerecht zu werden. Auch die Berücksichtigung phänologischer Variationen im Jahresgang, welche den Wasserbedarf der Obstbäume und den Wasserentzug aus dem Hauptdurchwurzelungsbereich maßgebend steuern (Noga & Lenz 1982, Mager 1988), sind im aktuellen Modellstatus noch unzureichend berücksichtigt. Desweiteren soll die zusätzliche Einbindung variierender Lagerungsdichten und Humusgehalte als ergän-

zende Bodenparameter, welche den Wassergehalt beeinflussen, durch eine Modifizierung der bereits erstellten Pedotransferfunktionen umgesetzt werden. Auch der Einfluss von Makroporenflüssen sowie die Wasserbewegung in Sekundärporen, wie sie beispielsweise in tonreicheren Substraten infolge von Quellungs- und Schrumpfungsprozessen eine Rolle spielt, sollen quantitativ eingebunden werden.

Durch die genannte Ergänzung und Optimierung der Berechnungsstrukturen kann der bestehende Simulationsansatz noch verbessert und somit an die realen Bedingungen und Prozeduren angenähert werden, um einen effektiven Beitrag zur Präzisionsbewässerung liefern zu können.

## 6. Literatur

- Al-Karadsheh, E. W., Sourell, H. & Sommer, C. (2003): Neue Berechnungsstrategien: Precision irrigation; Teilflächenspezifische Berechnung. – *Der Kartoffelanbau*, 54: 105-107.
- Al-Kufaishi, S. A., Blackmore, B. S. & Sourell, H. (2006): The feasibility of using variable rate water application under a central pivot irrigation system. – *Irrigation and Drainage Systems*, 20: 317-327.
- Ehlers, W. & Goss, M. (2004): *Water Dynamics in Plant Production*: 288 S.; Cambridge (CABI).
- Grashey-Jansen, S. (2007a): Boden und Bewässerung im Obstbau. – *ObstbauWeinbau*, 44: 253-256.
- Grashey-Jansen, S. (2007b): Der Einfluss des Bodens auf die Wasserversorgung von Apfelbäumen. Ein Beispiel aus Südtirol. – *Obstbau*, 32: 626-629.
- Grashey-Jansen, S. (2008a): Zur Bodenwasserdynamik eines bewässerten Standortes im Südtiroler Erwerbsobstbau. – *WasserWirtschaft*, 98: 61-65.
- Grashey-Jansen, S. (2008b): Zur raumzeitlichen Differenzierung der Bodenwasserdynamik auf obstbaulich genutzten Standorten in Südtirol unter Bewässerungseinfluss. – 271 S.; Augsburg (Institut für Geographie).
- Grashey-Jansen, S. & Schröder, L. (2009): Zur Physiogeographie des Vinschgaus. – *er Schlern*, 83: 52-65.
- Grashey-Jansen, S. & Timpf, S. (2010): Soil Hydrology of Irrigated Orchards and Agent-Based Simulation of a Soil Dependent Precision Irrigation System. – *Journal of Adv. Sci. Lett.*, 3: 1-14.
- Mager, A. (1988): Einfluss verschiedener Klimafaktoren auf den Wasserverbrauch von Apfelbäumen in Abhängigkeit von Nährstoffversorgung, Erziehungsmaßnahmen und Fruchtbehang: 134 S.; Bonn (Universität Bonn).
- Mualem, Y. (1976): A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. – *Water Res. Research*, 12: 513-522.
- Noga, G. & Lenz, F. (1982): Transpiration von Äpfeln während der Licht- und Dunkelperiode in Abhängigkeit von verschiedenen Klimafaktoren. – *Gartenbauwiss.*, 47: 274-278.
- Quast, P. (1986): *Düngung, Bewässerung und Bodenpflege im Obstbau*. – 231 S.; Stuttgart.
- Raine, S. R., Meyer, W. S., Rattan, D. W., Hutson, J. L. & Cook, F. J. (2007): Soil water and solute movement under precision irrigation: knowledge gaps for managing sustainable root zones. – *Irrig. Sci.*, 26: 91-100.
- Schoengold, K., Sunding, D. L. & Moreno, G. (2004): Agricultural Water Demand and the Gains from Precision Irrigation Technology. – *Giannini Foundation of Agricultural Economics. ARE Update*, 7: 5-8.
- Thalheimer, M. (2005): Zur Dynamik des Bodenwassers an einem grundwassernahen Obstbau-Standort im Etschtal (Südtirol/Italien). – *Laimburg Journal*, 2: 50-57.
- Van Genuchten, M.Th. (1980): A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. – *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44: 892-898.



**Hallesches Jahrbuch für Geowissenschaften, 32/33, S. 57-68, 6 Abb., 3 Tab.**  
Halle (Saale), Mai 2011

## **Saisonale Variabilität des Einflusses von Karsttributären auf die hydrologische Entwicklung der Altmühl (Bayern)**

Eva Olmo Gil, Martin Trappe & Michael Becht<sup>\*</sup>

Olmo Gil, E., Trappe, M. & Becht, M. (2011): Saisonale Variabilität des Einflusses von Karsttributären auf die hydrologische Entwicklung der Altmühl (Bayern). [Seasonal variability influence of karst tributaries to the hydrological behaviour of Altmühl River (Bavaria).] – Hallesches Jahrbuch für Geowissenschaften, 32/33: 57-68, Halle (Saale).

**Kurzfassung:** Im Bereich des Karstgebietes der Südlichen Frankenalb wurde der Einfluss der Schüttung verschiedener Karstquellen auf das hydrologische Verhalten der Altmühl untersucht. Jedoch lassen sich in Karstgebieten aufgrund der karsttypischen Besonderheiten keine einfachen N-Q- Beziehungen für die jeweiligen Quelleinzugsgebiete angeben. Daher wurden nur Schüttungsaufzeichnungen der Karstquellen als Inputdaten für die Modellierung des Abflussverhaltens der Altmühl herangezogen.

Mit Hilfe des ATV-DVWK-Gewässergütemodells wurden in mehreren Szenarien die Auswirkungen und die Bedeutung der Schüttung von Karstquellen und einigen Nebengewässern auf den Abfluss der Altmühl dargestellt. Insbesondere in den Sommermonaten tragen die Karstquellen erheblich zum Abfluss der Altmühl bei, während im Winter das Wasser überwiegend aus dem mittelfränkischen Vorland stammt.

**Abstract:** The influence of several karst springs and tributaries to the hydrological behaviour of a surface river was examined for the example of the Altmühl River (South Franconian Alb, Bavaria). Simple relations between precipitation and discharge of karst springs are uncommon for karst areas. Instead discharge hydrographs of the different karst springs were used for modelling of the hydrological properties of the surface river.

To evaluate the importance of the hydrological characteristics of karst springs and other tributaries to the Altmühl discharge the ATV-DVWK water quality model was applied. Especially during summer karst springs show a high contribution to the water quantity of the Altmühl River whereas in winter most water comes from the upper catchment, which is located outside the South Franconian Alb in the Mid-Franconian foreland.

**Schlüsselwörter:** Abflussmodellierung, ATV-DVWK-Gewässergütemodell, Hydrologie, Karsthydrologie

**Keywords:** runoff modelling, ATV-DVWK water quality model, hydrology, karst hydrology

---

<sup>\*</sup> Anschriften der Autoren:

Eva Olmo Gil (evaolmogil@ku-eichstaett.de), Martin Trappe, Michael Becht, Lehrstuhl für Physische Geographie, Katholische Universität Eichstätt-Ingolstadt, Ostenstr. 18, D-85072 Eichstätt.