

Vergleich der Simulationsmodelle CANDY und STOTRASIM für die ungesättigte Zone

J.C. Draxler, G. Klammler und J. Fank

Comparison of simulation models CANDY and STOTRASIM for the unsaturated zone

1 Einleitung

Der Stickstoffinput in die Grundwasserleiter des Murtales von Graz bis Radkersburg (Österreich) ist durch hohe diffuse Einträge aus der Landwirtschaft gekennzeichnet (FANK et al., 2010; WICK et al., 2012; UMWELTBUNDESAMT, 2012). Um die Grundwasserressourcen zur Trinkwassergewinnung für mehr als 100.000 Einwohner in dieser Region dauerhaft zu sichern, bleibt die Frage zu klären, welche al-

ternativen Landnutzungsstrukturen wie z. B. ein Schotterabbau in den Einzugsgebieten bzw. Wasserschongebieten von Trinkwasserbrunnen möglich sind. Diese Fragestellung soll mit Hilfe der Anwendung eines Bodenwasserhaushalts- und Stofftransportmodells beantwortet werden, um auf regionaler Basis die Effekte von Landnutzungsänderungen auf die Wasserbilanz und den Stickstoffaustrag ins Grundwasser zu untersuchen. Das Problem dabei ist, dass physikalische Modelle zwar in der Lage sind, landwirtschaftlich

Zusammenfassung

Um die langfristigen qualitativen und quantitativen Auswirkungen der Stickstoffverlagerung von der ungesättigten Zone in das Grundwasser simulieren zu können, müssen verschiedene Landnutzungsarten und Bodenbearbeitungssysteme unter landwirtschaftlichen Nutzflächen modellierbar sein. Modelle für die ungesättigte Zone müssen unter den vorherrschenden klimatischen, bodenhydrologischen sowie agrartechnischen Bedingungen getestet werden, um ihre Gültigkeit für ein Untersuchungsgebiet zu beweisen. Daher werden zwei Modelle der ungesättigten Zone in ihren Wasserflüssen verglichen: Darcy-Modell SIMWASER/STOTRASIM und das Kapazitätsmodell CANDY. Neben der Überprüfung des Wassertransports in der ungesättigten Zone anhand von Lysimeterdaten der Station Wagna (Österreich) wird die Anwendbarkeit für eine regionale Modellierung betrachtet. Beide Modelle können an die Lysimeter-Messwerte angepasst werden und ermöglichen auch eine regionale Anwendung. Im Untersuchungsgebiet des Murtaalaquifers scheint der Einsatz von SIMWASER/STOTRASIM aufgrund der Kalibrierungsergebnisse des Wasserhaushalts sinnvoller.

Schlagerworte: STOTRASIM, CANDY, Wagna-Lysimeter, regionale Modellierung, Modellinputdaten.

Summary

Qualitative and quantitative effects of nitrogen leaching into groundwater can be evaluated by simulation of different land use and tillage scenarios on arable land. Models for unsaturated water flow have to be tested for predominant climatic, soil hydraulic and agrarian conditions in an investigation area. Thus, we assess water flow of two software tools for unsaturated zone: Darcy model SIMWASER/STOTRASIM and capacity model CANDY. On the one hand we consider water balance in unsaturated soil with data of the lysimeter station in Wagna (Austria), on the other hand we compare all required input data and availability for regional modelling. In conclusion, both simulations show high agreements to lysimeter observations. Also the concepts of the models are qualified for a regional application. However, for Murtal aquifer an application of SIMWASER/STOTRASIM appears more feasible.

Key words: STOTRASIM, CANDY, Wagna lysimeter, regional modelling, model-input data.

bewirtschaftete Böden, klimatische Einflüsse und unterschiedliche Kulturen in ihrem Systemverhalten mit den wesentlichen Prozessen zu simulieren, dabei aber oft spezifische Eingangsdaten benötigen, welche für große Einzugsgebiete aufgrund von räumlicher Heterogenität und zeitlicher Variabilität nicht immer verfügbar sind (DREYHAUPT, 2004). Am Beginn einer solchen Untersuchung steht die Evaluierung von geeigneten Modellansätzen für die ungesättigte Zone (HERBST et al., 2005; WEGEHENKEL, 2008). Diese Evaluierung soll mit den beiden Software-Tools STOTRASIM und CANDY am Lysimeter in Wagna durchgeführt werden. Das Darcy-Modell STOTRASIM und das Kapazitätsmodell CANDY werden auf der Lysimeterskala mithilfe von zwei Präzisionslysimetern, bodenphysikalischen Messdaten, einem umfangreichen Wetterdatensatz und anhand der Bodenfeuchte- und Sickerwasseraufzeichnungen getestet. Ein weiterer Schwerpunkt für die Modellentscheidung liegt aber auch im Vergleich der notwendigen Inputdaten beider Modelle und der Anwendbarkeit für die regionale Modellierung von typischen landwirtschaftlichen Bewirtschaftungspraktiken unter den vorhandenen bodenhydrologischen Gegebenheiten in der untersuchten Region. Was sind die jeweiligen Vorteile, aber auch die Einschränkungen der beiden Modelle bei der regionalen Modellierung bzw. welches Modell spiegelt die vorherrschenden Prozesse im Wasserfluss und in weiterer Folge beim Stickstofftransport unter den lokalen Randbedingungen besser wider?

2 Modellbeschreibung und Datengrundlage

2.1 STOTRASIM

Das Modell STOTRASIM (FEICHTINGER, 1998) ist ein Stofftransportmodell für die ungesättigte Zone basierend auf dem Bodenwasserhaushaltsmodell SIMWASER (STENITZER, 1988). Es simuliert die Stickstoffdynamik und teilweise die Kohlenstoffumsetzungen unter landwirtschaftlich genutzten Böden in eindimensionaler vertikaler Richtung im Tageszeitschritt. STOTRASIM modelliert die wesentlichen Stickstoffprozesse und berechnet so den an die Grundwasserneubildung gekoppelten Stickstoffaustrag in das Grundwasser. Im Modell wird nur Nitrat als gelöste Komponente gerechnet, andere Stickstoffkomponenten werden in Nitrat umgerechnet, wo die Verknüpfung mit dem Wassertransport realisiert ist.

Die Simulation des Bodenwasserflusses wird mit SIM-

WASER durchgeführt. Das Modell beschreibt die Wechselbeziehungen zwischen dem Bodenwasser und dem Pflanzenwachstum abhängig von den klimatischen, pflanzenphysiologischen und bodenphysikalischen Parametern (Abbildung 1). Das Modell basiert auf der Darcy-Buckingham-Gleichung in Verbindung mit der Kontinuitätsbedingung. Die tägliche Bilanz von Niederschlag, Verdunstung und Transpiration ergibt für den Wassertransport eine obere Randbedingung, während ein variabler Grundwasserspiegel oder bei einem grundwasserfernen Standort eine Free-drainage-Randbedingung als unterer Modellrand zum Einsatz kommt. In der gegenständlichen Arbeit wird SIMWASER dazu verwendet, die Wasserflüsse in einem Präzisionslysimeter von der Erdoberfläche bis in eine Tiefe von 190 cm zu berechnen.

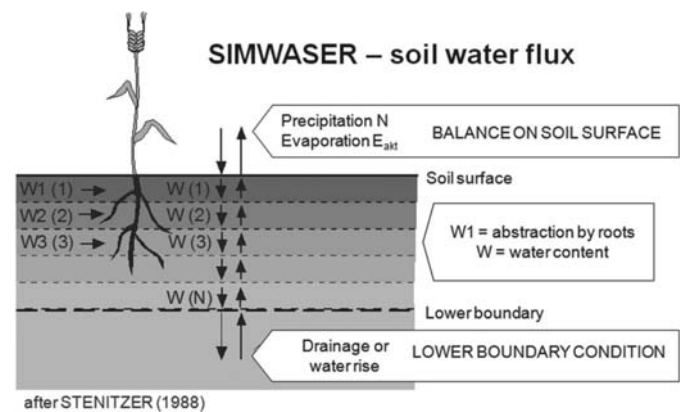


Abbildung 1: Der Bodenwasserfluss in SIMWASER
Figure 1: Soil water flux in SIMWASER

Der Schwerpunkt von STOTRASIM liegt in der Berechnung der Stickstoffauswaschung in das Grundwasser, wobei der Stickstofftransport dem Wasserfluss im Boden mit Konvektion, Diffusion und Dispersion folgt. Das Pflanzenwachstum ist bei Wasser- und Stickstoffmangel eingeschränkt, nicht aber bei Mangel an anderen Nährstoffen oder Pflanzenkrankheiten.

Neben den zahlreichen Stickstoffeinträgen über die Erdoberfläche (Abbildung 2) ist auch eine Zunahme über kapillaren Aufstieg aus dem Grundwasser möglich. Die Stickstoffausträge sind nicht auf die Auswaschung in das Grundwasser begrenzt, auch Denitrifikation oder die Aufnahme von Stickstoff durch die Pflanzen sind im Modellansatz integriert. Der Stickstoffumsatz zwischen den vorhandenen vier Stickstoff-Pools mit unterschiedlichen Abbauezeiten erfolgt durch Mineralisation, Nitrifikation und Immobilisation.

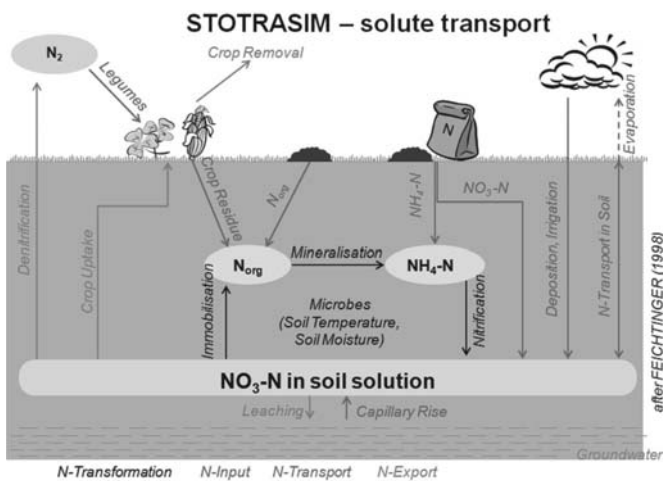


Abbildung 2: Das Stofftransportmodell STOTRASIM
Figure 2: The solute transport model STOTRASIM

2.2 CANDY

Das Simulationsmodell CANDY beschreibt die Dynamik des Kohlenstoff- und Stickstoffumsatzes im Boden als ein-dimensionalen Prozess (FRANKO et al., 1995; FRANKO et al., 2007). Das Modell simuliert die wesentlichen Prozesse unter landwirtschaftlichen Flächen auf Tagesbasis zur Berechnung des Stickstoffaustrags aus der Wurzelzone. Dazu

werden Sub-Module (Abbildung 3) u. a. für den Bodenwassergehalt, die Bodentemperatur, das Pflanzenwachstum und die organischen Umsetzungsprozesse mit vier konzeptionellen Pools für das organische Material verwendet. Das Pflanzenwachstumsmodell beschreibt den Verlauf von Wurzeltiefe und Bedeckungsgrad und ermittelt auch den Stickstoffbedarf der Pflanze.

Das Wassermodul von CANDY basiert auf einem Kapazitätskonzept nach KOITZSCH (1990). Bei Überschreitung des schichtspezifischen Wertes der Feldkapazität ist aufgrund der Wasserfüllung der Grobporen eine abwärtsgerichtete Wasserbewegung möglich. Durch die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit wird die Geschwindigkeit dieser Abwärtsbewegung über den Versickerungsparameter gesteuert. Ein Wasseraufstieg erfolgt nur bei Wassergehalten über den schichtspezifischen permanenten Welkepunkt, durch die Prozesse von Evaporation und Transpiration. Der gesamte Prozess der Evapotranspiration wird nach einem modifizierten TURC-Ansatz nach KOITZSCH (1990) und KOITZSCH & GÜNTHER (1990) berechnet. Die Bodentemperaturdynamik wird über eine Abschätzung der Oberflächentemperatur und die Berechnung der Wärmeleitung im Boden simuliert. Die Stickstoffdynamik wird durch folgende Prozesse beschrieben: Mineralisierung, Immobilisierung, Pflanzenaufnahme, Auswaschung, gasförmige Verluste und symbiontische Stickstoff-Bindungen.

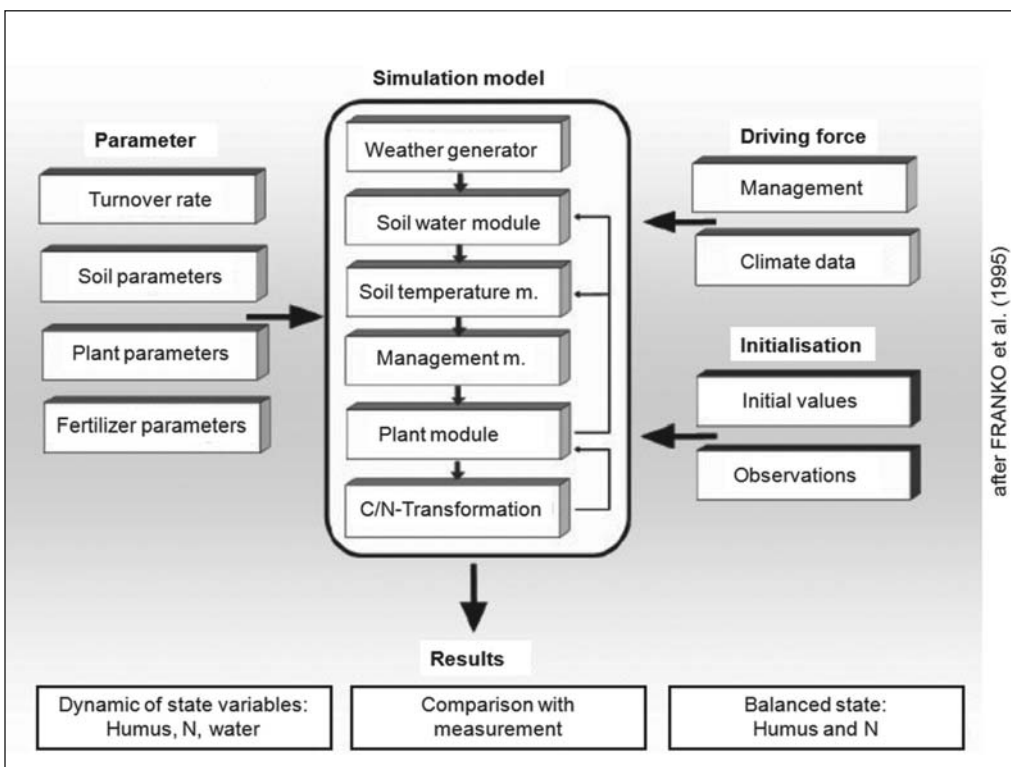


Abbildung 3: Aufbau des Simulationsmodells CANDY
Figure 3: Structure of simulation model CANDY

Die organische Bodensubstanz wird im Modell in verschiedene Pools mit unterschiedlichen Eigenschaften und Umwandlungsreaktionen aufgeteilt (Abbildung 4). Im Modell wird bei der organischen Substanz konzeptionell zwischen der organischen Bodensubstanz (OBS) oder der organischen Primärschubstanz (OPS) unterschieden. Organischer Dünger, Ernte- und Wurzelrückstände sind im OPS-Pool zu finden. Die OBS ist aus der OPS durch mikrobielle Umsatzprozesse entstanden und teilt sich in einen inerten und einen umsetzbaren Pool. Während der inerte Anteil beim Umsatz der organischen Substanz nicht berücksichtigt wird, wird bei der umsetzbaren OBS zwischen der aktiven organischen Substanz (AOS) und der stabilisierten Form (SOS) unterschieden. Beide variieren in den Zeitkonstanten ihrer Autolyse sowie in der Reaktionsabfolge bezüglich der Nähe zum OPS-Pool.

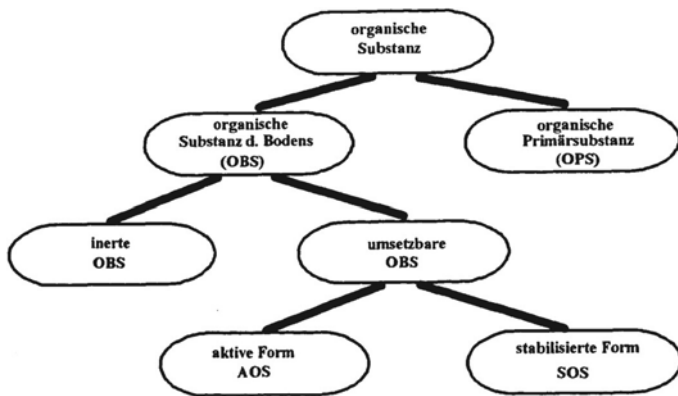


Abbildung 4: Zusammenhang der organischen Pools im Modell CANDY (Franko et al., 1995)

Figure 4: Relationship of organic pools in CANDY (Franko et al., 1995)

2.3 Wagna-Inputdaten

Auf der 4,4 ha großen landwirtschaftlichen Versuchsfläche in Wagna (Österreich) wird seit über 20 Jahren der Einfluss von unterschiedlichen Düngeregimen und Kulturführungen auf die Grundwassersituation untersucht. Dabei wird seit 2004 zwischen einer konventionellen und einer organisch-biologischen Bewirtschaftung unterschieden (FASTL & ROBIER, 2008; KÖSTENBAUER, 2008). Durch den Einbau von wägbaren, monolithisch gestochenen Präzisionslysimetern (FANK & v. UNOLD, 2007) werden Daten von meteorologischen und landwirtschaftlich geprägten Wechselwirkungen mit dem Boden gesammelt. Im Lysimeter sind u. a. Sonden zur Messung der Bodenwassergehalte, Bodentemperatur und Saugspannungen in vier verschiedenen Tiefen (35, 60, 90 und 180 cm) vorhanden. Über einen Saugkerzenrechen werden die Sickerwassermengen im Lysimeter erfasst. Die Lage auf der Schotterterrasse der Würmeiszeit mit ihren lehmig-sandigen Deckschichten ist vergleichbar mit großen Bereichen im Untersuchungsgebiet des Murtalaquifers. Die Daten von einem konventionell bewirtschafteten und einem organisch-biologisch bewirtschafteten Lysimeter (Abbildung 5) werden durch Informationen zu den angebauten Kulturen, Bewirtschaftungsaufzeichnungen und aufgetragenen Düngemengen ergänzt. Die Wetterdaten werden von einer Station der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) auf dem Versuchsfeld geliefert.

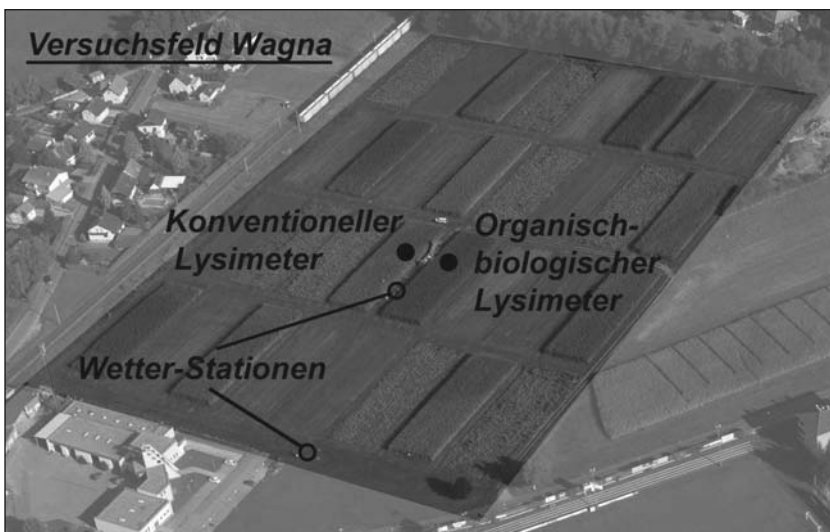


Abbildung 5: Das Versuchsfeld Wagna mit zwei unterschiedlichen Lysimetern und den Wetterstationen

Figure 5: Test field Wagna with position of lysimeters and weather stations

3 Ergebnis

Die grundlegenden Eingangsparameter in beiden Modellen neben den Wetterinformationen sind die Bodenbeschreibung und die landwirtschaftliche Bewirtschaftungsweise.

Bei den täglichen Wetterdaten sind Lufttemperatur, Globalstrahlung und Niederschlagsdaten notwendig. CANDY kann die Globalstrahlung aus der Sonnenscheindauer und der geografischen Breite modellintern berechnen. STOTRASIM benötigt zusätzlich Windgeschwindigkeit und relative Luftfeuchte, welche über offizielle Wetterstationen im Untersuchungsgebiet zugänglich sind.

Bei den Bodeninformationen sind in STOTRASIM für homogene Bodenschichten neben der jeweiligen Mächtigkeit auch Charakteristiken der Wasserspeicherfähigkeit und Wasserleitfähigkeit, Diffusions- und Dispersionskoeffizienten und Ausgangswerte zum Humusgehalt sowie Startkonzentrationen für Ammonium- und Nitrat-Stickstoff anzugeben. CANDY benötigt die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit, Trockenrohddichte, Trockensubstanzdichte, permanenten Welkepunkt, Feldkapazität und Feinanteilgehalt der einzelnen Horizonte.

Bei der Bewirtschaftung benötigen beide Modelle Angaben zum Zeitpunkt des Anbaus und der Ernte von Kulturen, der Bodenbearbeitung, mineralischer und organischer Düngung und einer allfälligen Bewässerung. CANDY benötigt zusätzlich Angaben zu den Erträgen der einzelnen Kulturen.

Beide Modelle wurden in einer regionalen Modellierung schon angewendet: CANDY im Bundesland Sachsen-Anhalt (Deutschland) (FRANKO et al., 2006) und STOTRASIM in mehreren Untersuchungen im Murtalaquifer (FEICHTINGER,

2008; KLAMMLER et al., 2013). Dabei werden bei beiden Modellen homogene Teilflächen abgeleitet, also Flächen mit gleichen Klima-, Boden- und Bewirtschaftungseigenschaften. Jede Teilfläche wird mit dem Modell simuliert und die Ergebnisse über ein geografisches Informationssystem verortet. Zur Implementierung der statistisch aggregierten Landnutzungsinformation verwenden beide Modelle einen Optimierungsalgorithmus, der über definierte Kulturenabfolgen die statistische Landnutzungsverteilung in einer Region nachbildet.

Die beiden Modelle STOTRASIM und CANDY verfolgen unterschiedliche Ansätze in der Charakterisierung der dominierenden bodenhydrologischen Prozesse im Untergrund. Die Modellierung des skelettreichen Bodens mit dem Kapazitätsmodell CANDY mithilfe von Daten der Forschungsstation Wagna wurde von THIEL (2010) durchgeführt. Dabei wurden einerseits die Bodenwassergehalte in den vier Tiefen 35 cm, 60 cm, 90 cm und 180 cm und andererseits die Sickerwassermenge in 190 cm Tiefe kalibriert, allerdings mit zwei unterschiedlichen Parametersätzen zu Parametrisierungen der Bodenhorizonte am konventionellen Lysimeter.

Das Darcy-Modell STOTRASIM wurde am Lysimeter in Wagna kalibriert und weiterentwickelt. Dabei wurde für die skelettreichen Böden ein Wasserfluss im Schotter auf Basis einer vereinfachten kinematischen Welle (GERMANN, 1985) implementiert, um hohe Flussraten im Boden ab einer Tiefe > 150 cm zu ermöglichen. Eine Kalibration auf dem konventionellen Lysimeter in Wagna wurde für Wassergehalte in vier verschiedenen Tiefen und die Sickerwassermenge durchgeführt. Die Ergebnisse für die Sickerwassermengen der einzelnen Kulturperioden sind in Abbildung 6 dargestellt.

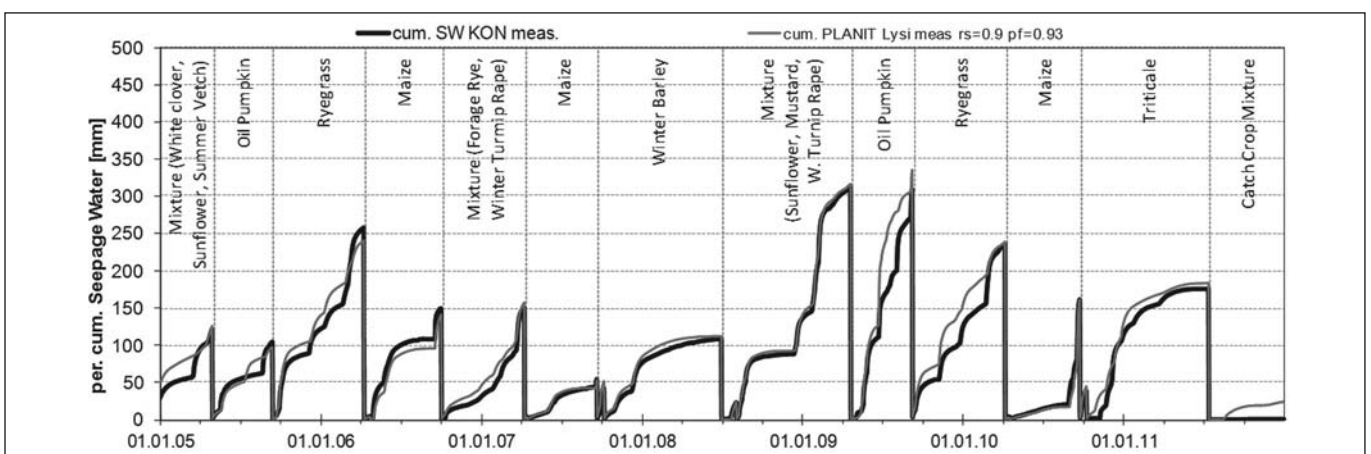


Abbildung 6: Vergleich der gemessenen und simulierten Sickerwassermengen am konventionellen Lysimeter in Wagna mit STOTRASIM
 Figure 6: Comparison of measured and simulated seepage water at conventional cultivated lysimeter in Wagna with STOTRASIM

Ein Vergleich der Ergebnisse der Kalibration zwischen STOTRASIM und dem Modell CANDY (THIEL, 2010) erfolgt für den Zeitraum 04.10.2004 bis 01.10.2007. Dabei werden der Arbeit von THIEL (2010) folgend die mittlere Fehlerdifferenz MED und der mittlere quadratische Fehler RMSE zur Bewertung der Kalibrationsergebnisse der Bodenfeuchtegehalte und des Sickerwassers verwendet. Bei der Kalibration der Bodenfeuchte ergeben sich folgende statistische Fehler (Tabelle 1).

Tabelle 1: Kalibrationsergebnisse der Bodenfeuchten am konventionellen Lysimeter
Table 1: Calibration results of soil moisture on conventional cultivated lysimeter

Messtiefen	CANDY		STOTRASIM	
	MED [%]	RMSE [%]	MED [%]	RMSE [%]
35 cm	-0,03	3,64	-0,38	3,64
60 cm	-0,57	2,99	1,24	3,67
90 cm	0,30	1,76	0,04	0,95
180 cm	-0,48	0,61	-0,15	0,40

Bei der Kalibration der Sickerwassermengen ergeben sich bei CANDY ein MED von 0,04 mm und ein RMSE von 3,43 mm. Bei STOTRASIM ergeben sich ein MED von 0,01 mm und ein RMSE von 0,99 mm. Abbildung 7 stellt die gemessene Sickerwassersummenkurve für den Zeitraum Oktober 2004 bis Oktober 2007 den beiden Modellkalibrationen von CANDY und STOTRASIM gegenüber.

Die gemessene kumulative aktuelle Evapotranspiration (1701 mm) wird in CANDY mit 1766 mm und in STOTRASIM mit 1686 mm ausgegeben.

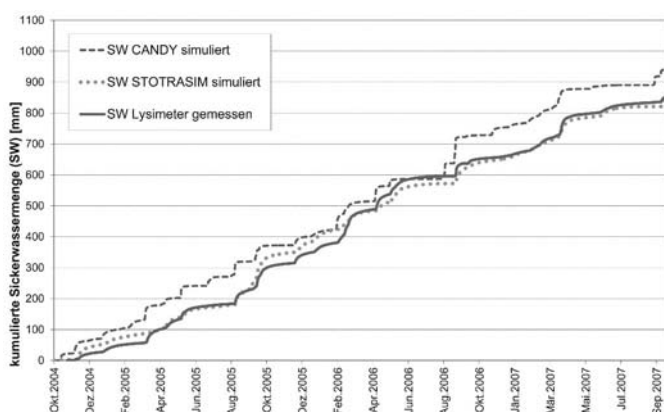


Abbildung 7: Ergebnis der simulierten Sickerwassermengen von CANDY und STOTRASIM am konventionellen Lysimeter in Wagna

Figure 7: Results of simulated seepage water of CANDY and STOTRASIM at conventional cultivated lysimeter in Wagna

4 Diskussion und Schlussfolgerung

Während bei den Wettereingangsdaten keine Einschränkungen in der Datenverfügbarkeit für beide Modelle vorliegen, müssen bei den Bodendaten in beiden Modellen Pedotransferfunktionen für einige notwendige Bodenparameter in der regionalen Modellierung angewendet werden, was Unsicherheiten mit sich bringt (WAGNER et al., 2001). In STOTRASIM liegen alle notwendigen Parameter für eine regionale Modellierung im Untersuchungsgebiet bereits in einer Datenbank vor, woraus in weiterer Folge die notwendigen Bodenparameter für CANDY ermittelt werden können.

Die Verarbeitung der statistischen Landnutzungsinformation erfolgt in beiden Fällen über Optimierungstools. StotraPGen ist ein Pre- und Post-Processing-Modul für STOTRASIM, mit dem stochastisch repräsentative Fruchtfolgen für die Modellierung auf Tagesbasis erstellt werden können. Durch dieses Modul werden bisherige einfache Ansätze zur Berücksichtigung der Landnutzung (LERNER & HARRIS, 2009) zur Berechnung der Grundwasserneubildung und des Stoffaustrags wesentlich verbessert. Es besteht auch die Möglichkeit, zeitliche Änderungen in der landwirtschaftlichen Bewirtschaftungsweise über geänderte Fruchtfolgen und Düngermengen automatisiert zu implementieren. Eine detaillierte Beschreibung der Funktionalität und Validierung der Methode von StotraPGen wird in DRAXLER et al. (2010) und KLAMMLER et al. (2012) gegeben.

Eine Gewichtung von Fruchtfolgen anhand der Landnutzungsverteilung wurde auch schon bei einer regionalen Modellierung von CANDY angewendet (FRANKO et al., 2006). Dabei wurde ferner ein N_{\min} -Düngemodul integriert, um realitätsnahe Düngermengen den mineralisierten Stickstoffgehalten im Boden anzupassen, wie es in dieser Region praxisüblich ist. Dabei werden u. a. auch Vor- und Zwischenfrüchte oder die Bodenschwere für die Berechnung der Düngermenge berücksichtigt.

CANDY benötigt für die Modellierung im Gegensatz zu STOTRASIM die Erträge der einzelnen Kulturen. Außerdem sind die Kulturen Sojabohne (*Glycine max*) und Perko (*Brassica chinensis x Brassica rapa*) für das Modell CANDY noch zu parametrisieren.

Die Simulationsergebnisse beider Modelle zeigen, dass die Abbildung der relevanten Prozesse in der ungesättigten Zone anhand der Lysimeterdaten von Wagna ausreichend kalibriert werden können. STOTRASIM wurde mehrmals mit Messwerten der Station Wagna überprüft und gerech-

net (FANK et al., 2004; KLAMMLER, 2013). Das Modell CANDY wurde im Gegensatz zu STOTRASIM auf einem tiefgründigen Lössstandort erstellt, kalibriert und validiert und zeigt in der Anwendung unter den vorherrschenden Böden mit Bodenskelettgehalten bis 78 Masseprozent einige Anpassungsprobleme (THIEL, 2010). Die Simulation am konventionellen Lysimeter in Wagna benötigt in CANDY zwei verschiedene Bodenparametersätze zur Anpassung des Sickerwassers bzw. der Bodenwassergehalte in den vier Tiefen. Ab einer Tiefe von 40 cm wurden dabei über unterschiedliche Feldkapazitäten und gesättigte hydraulische Leitfähigkeiten die Zielgrößen kalibriert. Im Zuge der Anwendung von CANDY in Wagna wurde der TURC-Ansatz zur Berechnung der Evapotranspiration durch die Möglichkeit bereichert, extern berechnete Werte der potenziellen Evapotranspiration einzulesen (THIEL, 2010). Somit wird die gemessene kumulative aktuelle Evapotranspiration in beiden Modellen gut wiedergegeben. Wie auch beim Sickerwasser gelingt die Kalibration mit STOTRASIM für die aktuelle Evapotranspiration besser (RMSE 0,99). Bei der Anpassung der Bodenfeuchte ergibt sich ein differenzierteres Bild. Die Kalibration in den oberen Schichten weist bei CANDY geringere Residuen auf und wird in 60 cm Tiefe unterschätzt, während in STOTRASIM die Bodenfeuchtegehalte in dieser Tiefe überschätzt werden. Die Anpassung an die Messwerte in den Tiefen 90 cm und 180 cm wird in STOTRASIM besser realisiert.

Die Modellierung mit STOTRASIM kann die dominierenden Prozesse, sowohl beim Wasser- als auch beim Stofftransport, gut abbilden (KLAMMLER et al., 2013). Eine abwärts gerichtete sequenzielle Kopplung des Stofftransportmodells STOTRASIM mit einem instationären Grundwasserströmungs- und Transportmodell wurde bereits vollzogen (KLAMMLER et al., 2013). Für die Umsetzung einer solchen Kopplung müssen die Ergebnisse aus CANDY für unterschiedliche Tiefenstufen bereitgestellt werden, was für CANDY noch zu implementieren wäre.

Weitere Schritte bestehen nun in der Kalibration und Anwendung der Stickstoffmodellierung für das Modell CANDY, um die simulierten Stickstoffausträge aus der ungesättigten Zone beider Modelle vergleichen und bewerten zu können.

Literatur

- DREYHAUPT, J. (2004): Die Bedeutung der Heterogenität von Boden, Klima und Landnutzung für die Regionalisierung von Modellzustandsgrößen. Dissertation, Universität Bayreuth, 2–3.
- DRAXLER, J.C., G. KLAMMLER, G. ROCK & J. FANK (2010): Lösungsansätze zur besseren Berücksichtigung von Landnutzungsinformationen in der instationären Modellierung von Grundwasserneubildung und Stoffaustrag. *Journal of Alpine Geology*, PANGEO Austria 2010, Vo. 52/2010, Leoben, 104–105.
- FANK, J., E. STENITZER, F. FEICHTINGER & P. CEPUDER (2004): Messdaten und Modellkalibration an der Forschungsstation Wagna und daraus abzuleitende Anforderungen an Messstellen zur Kalibration von Bodenwasserhaushalts- und Stofftransportmodellen. *GSF-Bericht* 02/04, 79–85.
- FANK, J. & G. v. UNOLD (2007): High-precision weighable field Lysimeter – a tool to measure water and solute balance parameters. *Int. Water & Irrigation* 27(3), 28–32.
- FANK, J., G. DERSCH, F. FEICHTINGER & J. ROBIER (2010): Erforderliche Maßnahmen und Umsetzungsoptionen für eine grundwasserverträgliche Landwirtschaft im Murtal-Grundwasserleiter. Bericht zum 2. Umweltökologischen Symposium 2010: Boden- und Gewässerschutz in der Landwirtschaft. Lehr- und Forschungszentrum für Landwirtschaft Raumberg-Gumpenstein, Irdning, 43–50.
- FASTL, G. & J. ROBIER (2008): Der Großparzellenversuch und dessen Bewirtschaftung (1987 bis 2003). In: FANK, J. & Ch. LANTHALER (Hrsg.): Diffuse Einträge in das Grundwasser: Monitoring – Modellierung – Management. Landwirtschaft und Wasserwirtschaft im Fokus zu erwartender Herausforderungen. Beiträge zur Hydrogeologie, 56 (Jg. 2007/08), Graz, 46–50.
- FEICHTINGER, F. (1998): STOTRASIM – Ein Modell zur Simulation der Stickstoffdynamik in der ungesättigten Zone eines Ackerstandortes. In: BUNDESAMT FÜR WASSERWIRTSCHAFT (Hrsg.): Modelle für die gesättigte und ungesättigte Bodenzone. Schriftenreihe d. Bundesamtes f. Wasserwirtschaft, Vo. 7, Vienna, 14–41.
- FEICHTINGER, F. (2008): Regionale Anwendung des Bodenwasserhaushalts- und Stofftransportmodells STOTRASIM. In: FANK, J. & Ch. LANTHALER (Hrsg.): Diffuse Einträge in das Grundwasser: Monitoring – Modellierung – Management. Landwirtschaft und Wasserwirtschaft im Fokus zu erwartender Herausforderungen. Beiträge zur Hydrogeologie, 56 (Jg. 2007/08), 27–32.
- FRANKO, U., B. OELSCHLAGEL & S. SCHENK (1995): Modellierung von Bodenprozessen in Agrarlandschaften zur Untersuchung der Auswirkungen möglicher Klimaveränderungen.

- derungen. UFZ-Bericht, Vo. 3/1995, Leipzig-Halle, 91.
- FRANKO, U., M. PUHLMANN, K. KUKA, F. BÖHME & I. MERBACH (2007): Dynamics of water, carbon and nitrogen in an agricultural used Chernozem soil in Central Germany. In: KERSEBAUM, K.C., J.M. HECKER, W. MIRSCHHEL & M. WEGEHENKEL (Hrsg.): Modelling water and nutrient dynamics in soil crop systems, Dordrecht, 245–258.
- FRANKO, U., M. PUHLMANN, H. RINGE, I. PRUTZER, F. BÖHME, J. SEEGER, P. PETERSOHN, O. SPOTT & B. HERRMANN (2006): Integrierte Methodik zur Bewertung der ökologischen und ökonomischen Entwicklung landwirtschaftlicher Bodennutzung im Bundesland Sachsen-Anhalt. FKZ 76213/01/03.
- GERMANN, P. (1985): Kinematic wave approach to infiltration and drainage into and from macropores. Transactions of the ASAE 28, 745–749.
- HERBST, M., W. FIALKIEWICZ, T. CHEN, T. PÜTZ, D. THIERY, C. MOUVET, G. VACHAUD & H. VEREECKEN (2005): Intercomparison of flow and transport models applied to vertical drainage in cropped lysimeters. Vadose Zone Journal, 4, 240–254.
- KLAMMLER, G., G. ROCK, H. KUPFERSBERGER & J. FANK (2012): Generating land-use information to derive diffuse water and nitrate transfer at aquifer scale. In: OSWALD, S.E., O. KOLDITZ & S. ATTINGER (Eds.): Models – Repositories of Knowledge, ModelCARE 2011, Leipzig/Germany, IAHS Publ. 355, 237–242.
- KLAMMLER, G., H. KUPFERSBERGER, G. ROCK & J. FANK (2013): Modeling coupled unsaturated and saturated nitrate distribution of the aquifer Westliches Leibnitzer Feld, Austria. Environ. Earth Sci., doi:10.1007/s12665-013-2302-6.
- KOITZSCH, R. (1990): Bodenfeuchte- und Verdunstungsmodell BOWA. Interner Bericht FZ Müncheberg.
- KOITZSCH, R. & R. GÜNTHER (1990): Modell zur ganzjährigen Simulation der Verdunstung und der Bodenfeuchte landwirtschaftlicher Nutzflächen mit und ohne Bewuchs. Archiv für Acker und Pflanzenbau und Bodenkunde/Archives of Agronomy and Soil Science 34: 803–810.
- KÖSTENBAUER, H. (2008): Der organisch-biologische Ackerbau und dessen versuchstechnische Umsetzung im Vergleich zur konventionellen ackerbaulichen Bewirtschaftung am Versuchsfeld Wagna. In: FANK, J. & Ch. LANTHALER (Hrsg.): Diffuse Einträge in das Grundwasser: Monitoring – Modellierung – Management. Landwirtschaft und Wasserwirtschaft im Fokus zu erwartender Herausforderungen. Beiträge zur Hydrogeologie, 56 (Jg. 2007/08), Graz, 50–53.
- LERNER, D.N. & B. HARRIS (2009): The relationship between land use and groundwater resources and quality. Land Use Policy 26(1), 265–273.
- STENITZER, E. (1988): SIMWASER – Ein numerisches Modell zur Simulation des Bodenwasserhaushaltes und des Pflanzenertrages eines Standortes. Mitteilung Nr. 31, Bundesanstalt für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt, 3252 Petzenkirchen, 203.
- THIEL, E. (2010): Modellierung des Einflusses landwirtschaftlicher Landnutzung auf Bodenfunktionen mit dem Modell CANDY. Hallenser Bodenwissenschaftliche Abhandlungen, Band 15, Halle, 48–57.
- UMWELTBUNDESAMT (2012): Erhebung der Wassergüte in Österreich gemäß Wassergüte-Erhebungsverordnung (WGVE), BGBl. Nr. 338/91 (gültig bis Dezember 2006) bzw. Gewässerzustandsüberwachung (GZÜV) in Österreich gemäß Wasserrechtsgesetz, BGBl. Nr. 123/06.
- WAGNER, B., V.R. TARNAWSKI, V. HENNINGS, U. MÜLLER, G. WESSOLEK & R. PLAGGE (2001): Evaluation of pedo-transfer functions for unsaturated soil hydraulic conductivity using an independent data set. Geoderma, August 2001, Vo. 102, Issues 3-4, 275–297.
- WEGEHENKEL, M., Y. ZHANG, T. ZENKER & H. DIESTEL (2008): The use of lysimeter data for the test of two soil-water balance models: A case study. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, Vo. 171, Issue 5, 762–776.
- WICK, K., Ch. HEUMESSER & E. SCHMID (2012): Groundwater nitrate contamination: Factors and indicators. Journal of Environmental Management, Vo. 111, 178–186.

Autorenanschrift

Mag. Johannes C. Draxler, Mag. Gernot Klammler & Univ.-Doz. Dr. Johann Fank, JOANNEUM RESEARCH, RESOURCES – Institut für Wasser, Energie und Nachhaltigkeit, Elisabethstraße 18/II, 8010 Graz, Österreich.

Eingelangt: 20. November 2012

Angenommen: 31. Mai 2013