

# **Einfluss von Steinkorrekturen hydraulischer Bodenkennwerte auf die Wasserhaushaltsmodellierung von Forststandorten mit hohem Steingehalt im Bodenprofil**

The impact of correcting soil hydraulic properties for soil stone content on water balance modeling of forest sites with high stone contents in the soil profile

*Martin Wegehenkel, Annette Wagner, Tiziana Amoriello, Stefan Fleck, Henning Meesenburg und Stephan Raspe*

## **Zusammenfassung**

Viele Forststandorte haben in ihren Bodenprofilen einen hohen Skelettgehalt durch einen sehr hohen Steinanteil. Diese Steingehalte beeinflussen die Bodenwasserspeicherung und -flüsse und müssen daher bei Modellrechnungen zum Wasserhaushalt berücksichtigt werden. Dieser Einfluss kann z. B. durch Steinkorrekturen der bodenhydraulischen Kennwerte beschrieben werden. In der vorgelegten Studie werden einfache Verfahren zur Steinkorrektur für skelettreiche Bodenprofile von vier Level II-Standorten angewendet und der Einfluss dieser Steinkorrekturen auf die Simulationsgüte von Wasserhaushaltsmodellen analysiert. Zur Einschätzung der

Simulationsgüte dienten die Vergleiche von an den Level II-Standorten gemessenen Bestandesniederschlägen, Tensionen und Bodenwassergehalten mit den entsprechenden Modell-Outputs.

**Stichworte:** Steinkorrektur, bodenhydraulische Kennwerte, Wasserhaushaltsmodellierung, Level II, Simulationsgüte, BROOK90, Hydrus-1D

## Abstract

Many forest sites have a more or less high content of stones and rock fragments in their soil profiles which has a strong impact on soil water fluxes and soil water storage. For the application of soil water flux models at forest sites, this impact should be taken into account by, for instance, correcting soil hydraulic parameters for soil stone content. In our study, the impact of such stone corrections on the simulation performance of a physically based soil water flux model was analysed. The model performance was evaluated by comparing simulated with measured model outputs such as throughfall, pressure heads and soil water contents. These experimental data were obtained from four European Level II test sites.

**Keywords:** stone correction, soil hydraulic properties, water balance modelling, Level II, model performance, BROOK90, Hydrus-1D

## 1 Einleitung

Im Rahmen des Futmon-Projektes wurde an der Bayrischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft in Freising im Jahr 2010 ein Workshop zur Anwendung verschiedener forsthydrologischer Modelle durchgeführt (WAGNER 2011). Das Ziel dieses Workshops war die Einschätzung der Eignung dieser Modelle für Berechnungen zum Wasserhaushalt und Trockenstress von Forststandorten mit einfach verfügbaren Eingangsdaten. Diese Daten umfassten Meteorologie-, Boden- und Bestandesdaten und stammten von neun europaweit verteilten Level II-Standorten in Belgien, Deutschland, Finnland, Italien, der Schweiz und Slowenien. Zur Analyse der Modellqualität wurden gemessene und simulierte Modell-Outputs wie Bestandesniederschlag, Saugspannungen und volumetrische Bodenfeuchten verglichen und diese Vergleiche durch Performanceindizes wie z. B. das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  analysiert. Eine vollständige Zusammenfassung der Standorte und der Ergebnisse aller Modelle ist in WAGNER (2011) zu finden.

Einige dieser Standorte weisen in ihren Bodenprofilen hohe Steingehalte auf. Die Berücksichtigung des Einflusses dieser Steingehalte auf die Wasserflüsse im Boden ist daher für die Modellierung der Wasserflüsse und die Simulationsgüte des angewendeten Modells wichtig. In der vorgelegten Studie werden Ergebnisse für vier Level II-Standorte zur möglichen Verbesserung der Simulationsgüte durch einfache Steinkorrekturen der hydraulischen Funktionen für die Modellanwendung vorgestellt. Dabei werden die Ergebnisse dreier Standorte mit hohem Steingehalt im Profil mit einem Plot mit niedrigerem Steingehalt verglichen.

## 2 Material und Methoden

### 2.1 Standorte

Eine Übersicht über die in unserer Studie analysierten Level II-Standorte gibt Tabelle 1. Die ausgewählten Level II-Standorte variieren im Bereich der Baumarten, der Höhenlage und der eingesetzten Messtechnik.

Die automatischen Messungen von Bodenfeuchte und Saugspannung ergaben kontinuierliche Zeitreihen mit Tageswerten und ermöglichen eine gute Einschätzung der verwendeten Steinkorrekturen und Modelle.

Die Zeitreihen der gemessenen meteorologischen und bodenhydrologischen Parameter umfassten die Periode vom 1.1.1999 bis zum 31.12.2008 für die Solling-Standorte und für Freising. Für Monte Rufeno lagen kontinuierliche Messungen nur für den Zeitraum 2001 - 2008 vor. Zudem wurden umfangreiche Bodenprofilaten (Horizonte, Textur, Dichte, Corg etc.) und Bestandesparameter (Wuchshöhe, LAI, Phänologie etc.) zur Verfügung gestellt (WAGNER 2011).

Tabelle 1: Level II-Standorte (aus WAGNER 2011, verändert)

Standort	Solling	Solling	Freising	Monte Rufeno
Region	Deutschland/ Niedersachsen	Deutschland/ Niedersachsen	Deutschland/ Bayern	Italien/ Latio
Datenerheber	Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (AG Meesenburg/ Fleck et al.)	Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (AG Meesenburg/ Fleck et al.)	Bayerische Landes- anstalt für Wald und Forstwirtschaft (AG Wagner/Raspe)	The Agricultural Research Council (CRA, Tiziana Amoriello)
Höhe ü. NN	508 m	504 m	508 m	690 m
Jahresmittel- temperatur	7 °C	7 °C	8,3 °C	12 °C
Mittlerer Jahresnieder- schlag	1.213 mm	1.213 mm	860 mm	974 mm
Vegetation	Fichte ( <i>Picea abies</i> )	Buche ( <i>Fagus sylvatica</i> )	Eichen-Buchen- mischwald ( <i>Quercus robur, Fagus sylvatica</i> )	Eiche ( <i>Quercus cerris</i> )
Alter (Jahre)	127	162	170	49
Bodentyp	Parabraunerde- Braunerde podsoliert mit dichter Basis	Parabraunerde- Braunerde podsoliert mit dichter Basis	Braunerde- Parabraunerde	Braunerde
Auflage- horizont	Rohhumusartiger Moder, L-Of-Oh ca. 12 cm	Rohhumusartiger Moder, L-Of-Oh ca. 12 cm	L/Of ca. 1 cm	Of/Oh ca. 5 cm
Wurzeltiefe	100 cm	100 cm	140 cm	60 cm
Skelett	ab 100 cm von 57 % bis 90 %	ab 100 cm von 57 % bis 90 %	-	ab 65 cm > 80 %
Messungen	Saugspannung, Tensiometer in 10 cm, 20 cm, 40 cm, 100 cm, 180 cm Tiefe	Saugspannung, Tensiometer in 10 cm, 20 cm, 40 cm, 100 cm, 180 cm Tiefe	Bodenfeuchte mit TDR in 5 cm, 30 cm, 70 cm, 90 cm, 140 cm Tiefe	Bodenfeuchte mit TDR in 10 cm, 30 cm, 50 cm Tiefe

## 2.2 Modelle

In der Studie wurden die Modelle BROOK90 (FEDERER 1995) und Hydrus-1D (SIMUNEK et al. 2013) benutzt. Jedes Modell beinhaltet eine detaillierte Beschreibung eines bestimmten Segments in einem Waldökosystem. BROOK90 simuliert vor allem Evapotranspiration auf der Basis des Shuttleworth-Wallace-Ansatzes und Wasserhaushalt für homogene Waldbestände, während Hydrus-1D detailliert Wasser- und Stoffflüsse in der ungesättigten Bodenzone beschreibt. Im Vergleich zu BROOK90 ermöglicht Hydrus-1D zudem eine hoch aufgelöste räumliche Diskretisierung des

Bodenprofils und gilt als ein Standard in der physikalisch basierten Modellierung von Bodenwasserflüssen auf der Basis der RICHARDS-Gleichung. Diese hoch aufgelöste Diskretisierung des Profils ist für die Einbeziehung von organischen Auflagehorizonten in die Modellrechnungen wichtig. Im Gegensatz zu BROOK90 hat Hydrus-1D jedoch nur einfache Algorithmen zur Berechnungen der Evapotranspiration zur Verfügung, die vor allem für Waldbestände ungeeignet sind.

Daher wurde BROOK90 vor allem zur Berechnung der potenziellen Evapotranspiration, des Bestandesniederschlags und Schneeschmelzwasser verwendet. Diese Parameter dienen als Eingangsdaten und als obere atmosphärische Randbedingung für die Anwendung von Hydrus-1D. Vergleichbare Modellkombinationen wurden z. B. in den Studien von JANDL et al. (2002) und HERMAN et al. (2007) verwendet. Weitere Details zu den Modellen können FEDERER (1995) und SIMUNEK et al. (2013) entnommen werden.

### 2.3 Randbedingungen und Modellparametrisierung

Für die Anwendung von Hydrus-1D müssen die hydraulischen Funktionen Saugspannung versus Wassergehalt  $h(\theta)$  und hydraulische Leitfähigkeit versus Saugspannung  $K(h)$  parametrisiert werden. Dazu wurden die Parameter  $\theta_s$ ,  $\theta_r$ ,  $\alpha$  und  $n$  der  $h(\theta)$ - und  $K(h)$ -Funktionen nach VAN GENUCHTEN (1980) und MUALEM (1976) aus gemessenen Wassergehalten bei Sättigung  $\theta_{sat}$ , bei Feldkapazität  $\theta_{fc}$ , und am Welkepunkt  $\theta_{wp}$  (WAGNER 2011) mit dem Programm RECT (VAN GENUCHTEN et al. 1991) abgeleitet. Die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit  $K_{sat}$  wurde über die Textur nach der FORSTLICHEN STANDORTSAUFNAHME (2003) abgeschätzt. Der Transpirationsszug durch den Bestand wurde mit der S-Shape-Funktion nach VAN GENUCHTEN (1987) mit Literaturwerten für die verschiedenen Baumarten mit den an den Standorten erhobenen Wurzeldichteprofilen parametrisiert und berechnet. Die Parameter wurden über eine einfache Stein-Korrektur von  $\theta_{sat}$ ,  $\theta_{fc}$ , und  $\theta_{wp}$  und  $K_{sat}$  nach

$$\theta_{sat,b} = \theta_{sat} \left(1 - \frac{\text{Steingehalt}}{100}\right) \quad (1)$$

umgerechnet. Hier ist  $\theta_{sat,b}$  das steinkorrigierte Gesamtporenvolumen und der Steingehalt ist in % angegeben.  $\theta_{fc,b}$  und  $\theta_{wp,b}$  wurden in der gleichen Weise korrigiert. Die Steinkorrektur von  $K_{sat}$  wurde nach

$$\frac{K_{sat,b}}{K_{sat}} = \frac{2 \cdot (1 - Z2)}{(2 + Z2)} \quad (2)$$

durchgeführt. Hier ist  $Z2$  der Steingehalt in Vol% und  $K_{sat,b}$  ist die steinkorrigierte, gesättigte hydraulische Leitfähigkeit (BRAKENSIEK u. RAWLS 1994; COUSIN et al. 2003). Mit dem Programm RECT wurden steinkorrigierte  $h(\theta)$ - und  $K(h)$ -Funktionen aus  $\theta_{sat,b}$ ,  $\theta_{fc,b}$  und  $\theta_{wp,b}$  berechnet. Daraus ergaben sich die steinkorrigierten Werte für  $\theta_{s,b}$ ,  $\theta_{r,b}$ ,  $\alpha_b$  und  $n_b$ . Auf der Basis dieser verschiedenen hydraulischen Kennwerte wurden folgende Simulationen durchgeführt:

- Modellrechnungen Hydrus-1D mit unkalibrierten  $\theta_s$ ,  $\theta_r$ ,  $\alpha$ ,  $n$  und  $K_{sat}$  (= vGM ungefitted)
- Modellrechnungen Hydrus-1D mit unkalibrierten, steinkorrigierten  $\theta_{s,b}$ ,  $\theta_{r,b}$ ,  $\alpha_b$ ,  $n_b$  und  $K_{sat,b}$  (= vGM ungefitted, steinkorrigiert)
- Modellrechnungen Hydrus-1D mit kalibrierten  $\theta_{s,b,cal}$ ,  $\theta_{r,b,cal}$ ,  $\alpha_{b,cal}$ ,  $n_{b,cal}$  und  $K_{sat,b,cal}$  (= vGM gefitted)

Die Kalibrierung wurde auf der Basis gemessener Tensionen (Solling-Standorte) und Bodenwassergehalte (Monte Rufeno, Freising) mit der inversen Modellierungsroutine in Hydrus-1D durchgeführt (SIMUNEK et al. 2013). Die Anfangswerte für die Kalibrierung waren die steinkorrigierten Werte  $\theta_{s,b}$ ,  $\theta_{r,b}$ ,  $\alpha_b$ ,  $n_b$  und  $K_{sat,b}$ . Die Startwerte für die Modellrechnungen waren die Bodenwassergehalte bei Feldkapazität. Als obere atmosphärische Randbedingung für die Anwendung von Hydrus-1D wurden Tageswerte des Bestandesniederschlages und der potenziellen Evapotranspiration verwendet, die von BROOK90 berechnet wurden. Der Blattflächenindex LAI wurde zur Trennung zwischen Evaporation und Transpiration nach dem Ansatz von RITCHIE (1972) verwendet (s. Tab. 2).

Tabelle 2: Bestandesparameter (aus WAGNER 2011, verändert)

	Mittl. Höhe Stamm (m)	Alter Bestand 2009 (y*)	Durchwurzelungstiefe (cm)	Beginn Vegetationsperiode (DOY**)	Ende Vegetationsperiode (DOY)
Solling-Buche	29	162	100	132	263
Freising	33	170	140	124	312
Solling-Fichte	32	127	100	133	320
Monte Rufeno	15	49	60	90	283
	Min. LAI	Max. LAI	Beginn Max. LAI (DOY)	Ende Max. LAI (DOY)	Albedo
Solling-Buche	0	6,1	160	228	0,15
Freising	0	7,4	152	279	0,23
Solling-Fichte	5,4	6,7	161	263	0,10
Monte Rufeno	2,4	3,4	195	210	0,15

\*y = year

\*\*DOY = day of the year

Der jahreszeitliche Verlauf und die Tageswerte des LAI wurden durch lineare Interpolation zwischen Beginn der Vegetationsperiode und Beginn Max. LAI bzw. Ende Max. LAI und Ende der Vegetationsperiode berechnet.

### 3 Ergebnisse

Der Vergleich von gemessenen und simulierten Tages- (Solling und Freising) und Wochenwerten (Monte Rufeno) des Bestandesniederschlages für die Periode 1999 - 2008 bzw. 2001 - 2008 resultierte in Werte für  $R^2$  zwischen 0,75 und 0,92.

Die anderen bei dem Vergleich eingesetzten Modelle zeigten für die Bestandesniederschläge an den vier Level II-Standorten Werte für  $R^2$  zwischen 0,52 und 0,92 (WAGNER 2011). Die entsprechenden Jahressummen des Niederschlages für die vier Standorte liegen zwischen 493 und 1487  $\text{mm a}^{-1}$  (s. Abb. 1). Ein Kriterium der Modellüberprüfung war die Simulation von Trockenstressphasen (WAGNER 2011). Daher wurden kürzere Perioden mit feuchten und sehr trockenen Jahren betrachtet. Für die Solling-Standorte und für Freising war das die Periode 2002 - 2006 mit den niedrigsten Jahresniederschlägen in 2003 mit 493  $\text{mm a}^{-1}$  für Freising und zwischen 802 und 841  $\text{mm a}^{-1}$  für den Solling (s. Abb. 1). Für den Standort Monte Rufeno wurde die Periode 2005 - 2008 mit dem niedrigsten Jahresniederschlag in 2007 mit 638  $\text{mm a}^{-1}$  ausgewählt (s. Abb. 1). Die Einschätzung der Simulationsgüte durch den Vergleich gemessener Tensionen und Bodenwassergehalte mit den Modellrechnungen auf der Basis von  $R^2$  wurden für die gesamten Perioden 1999 - 2008 bzw. 2001 - 2008 durchgeführt.

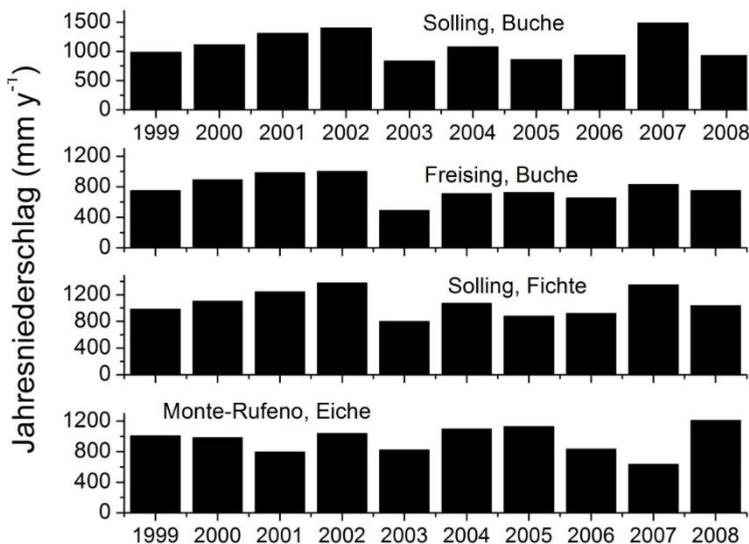


Abbildung 1: Jahressummen des Niederschlages von 1999 - 2008 für den Solling, Freising und Monte Rufeno

Die Anwendung unkalibrierter, aber steinkorrigierter  $h(\theta)$ - und  $K(h)$ -Funktionen (vGM ungefitted, steinkorrigiert) führte bei den Modellrechnungen für den Standort Solling-Buche insbesondere für den Bereich 0-20 cm zu einer deutlichen Anhebung der Simulationsgüte im Vergleich zu den Ergebnissen der Modellrechnungen mit unkalibrierten  $h(\theta)$ - und  $K(h)$ -Funktionen ohne Steinkorrektur (vGM ungefitted) (s. Tab. 3a).

Tabelle 3: Bestimmtheitsmaß  $R^2$

Depth	vGM ungefitted	vGM ungefitted, steinkorrigiert	vGM gefitted, steinkorrigiert
a) Solling-Buche, Vergleich der gemessenen mit simulierten Tensionen, 1999 - 2008			
10 cm	0,35	0,60	0,49
20 cm	0,12	0,60	0,55
40 cm	0,18	0,28	0,49
100 cm	0,44	0,50	0,61
180 cm	0,34	0,38	0,32
b) Freising, Vergleich der gemessenen mit simulierten Bodenwassergehalten, 1999 - 2008			
5 cm	0,36	-	0,72
30 cm	0,74	-	0,82
70 cm	0,67	-	0,82
90 cm	0,75	-	0,80
140 cm	0,72	-	0,75
c) Solling-Fichte, Vergleich der gemessenen mit simulierten Tensionen, 1999 - 2008			
10 cm	0,49	0,54	0,53
20 cm	0,54	0,57	0,62
40 cm	0,54	0,54	0,54
100 cm	0,47	0,55	0,48
180 cm	0,38	0,43	0,32
d) Monte Rufeno-Eiche, Vergleich der gemessenen mit simulierten Bodenwassergehalten, 2001 - 2008			
10 cm	0,61	0,70	0,71
30 cm	0,62	0,72	0,76
50 cm	0,68	0,66	0,73

In den anderen Tiefen lagen die so simulierten Tensionen trotz Steinkorrektur in den Sommermonaten noch deutlich unter den gemessenen Werten (s. Abb. 2). Daher war hier die Verbesserung der Simulationsgüte nicht so hoch wie bei den oberen Messtiefen (s. Tab. 3a). Eine weitere Verbesserung der Simulationsgüte durch die Kalibrierung der  $h(\theta)$ - und  $K(h)$ -Funktionen konnte nur für die Tiefen 40 cm und 100 cm erreicht werden (s. Tab. 3a). Auf dem Workshop lagen die entsprechenden Werte für  $R^2$  für alle getesteten Modelle zwischen 0,27 und 0,49 (WAGNER 2011).

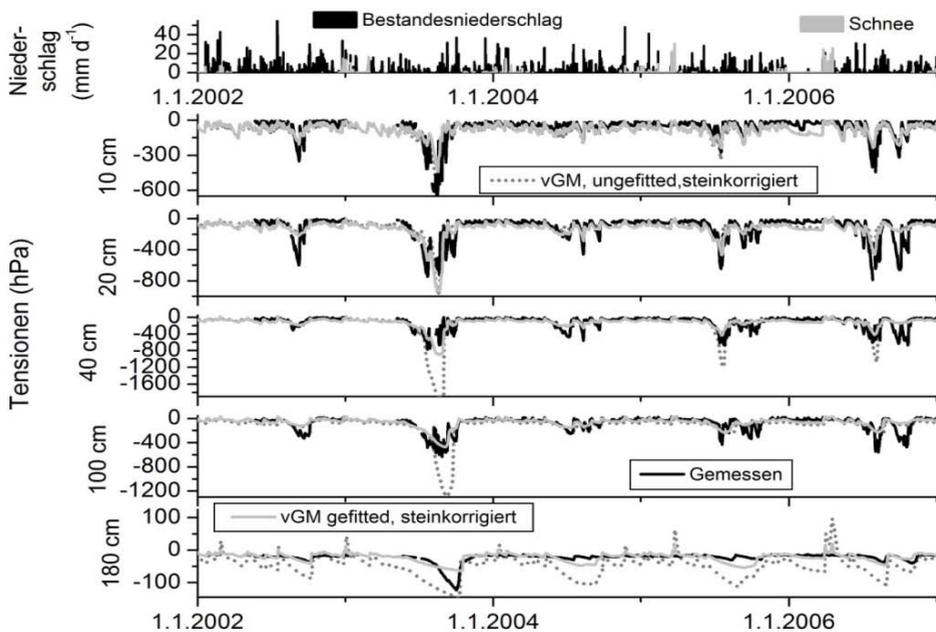


Abbildung 2: Tageswerte Niederschlag sowie gemessene und simulierte Tensionen in verschiedenen Bodentiefen, 2002 - 2006, Solling-Buche

Bei dem Standort Freising führte die Anwendung der kalibrierten  $h(\theta)$ - und  $K(h)$ -Funktionen (vGM gefitted) ebenfalls zu einer Verbesserung der Simulationsgüte für die Bodenwassergehalte, insbesondere in 5 cm (s. Tab. 3b) und in 140 cm Tiefe (s. Abb. 3). In 5 cm Tiefe wurde die zeitliche Dynamik der gemessenen Bodenwassergehalte von allen Modellanwendungen jedoch etwas überschätzt (s. Abb. 3). Im Rahmen der auf dem Workshop präsentierten Ergebnisse für den Buchenstandort Freising lagen die Werte für  $R^2$  zwischen 0,33 und 0,54 (WAGNER 2011).

Die Anwendung von Steinkorrekturen und Kalibrierung der  $h(\theta)$ - und  $K(h)$ -Funktionen führte am Fichtenstandort im Solling nur zu einer im Vergleich mit den Buchenstandorten im Solling und in Freising geringen Verbesserung der Simulationsgüte (s. Abb. 4 u. Tab. 3a-c). Auf dem Workshop lag der Wert von  $R^2$  für Solling-Fichte bei 0,18 (WAGNER 2011).

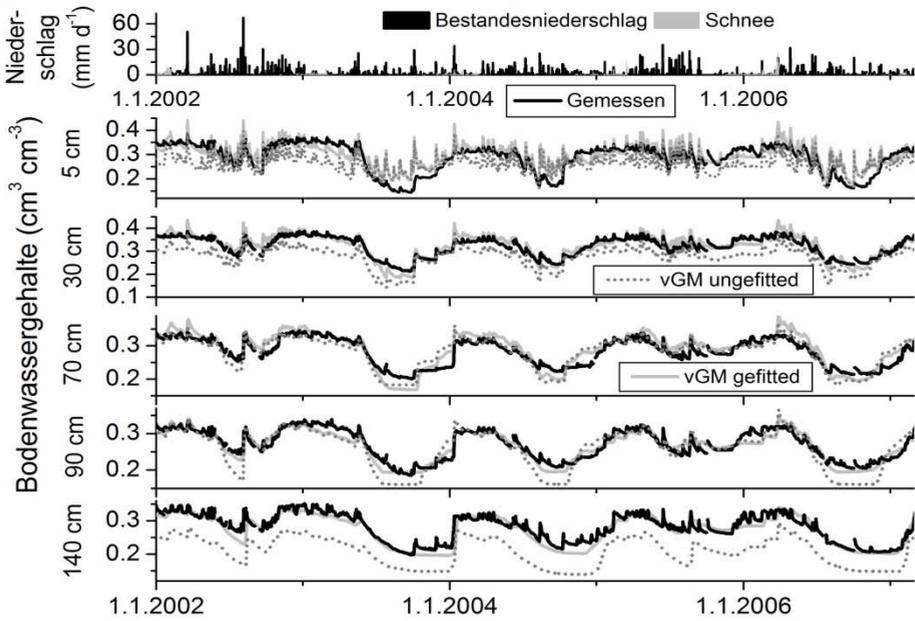


Abbildung 3: Tageswerte Niederschlag sowie gemessene und simulierte Bodenwassergehalte in verschiedenen Bodentiefen, 2002 - 2006, Freising

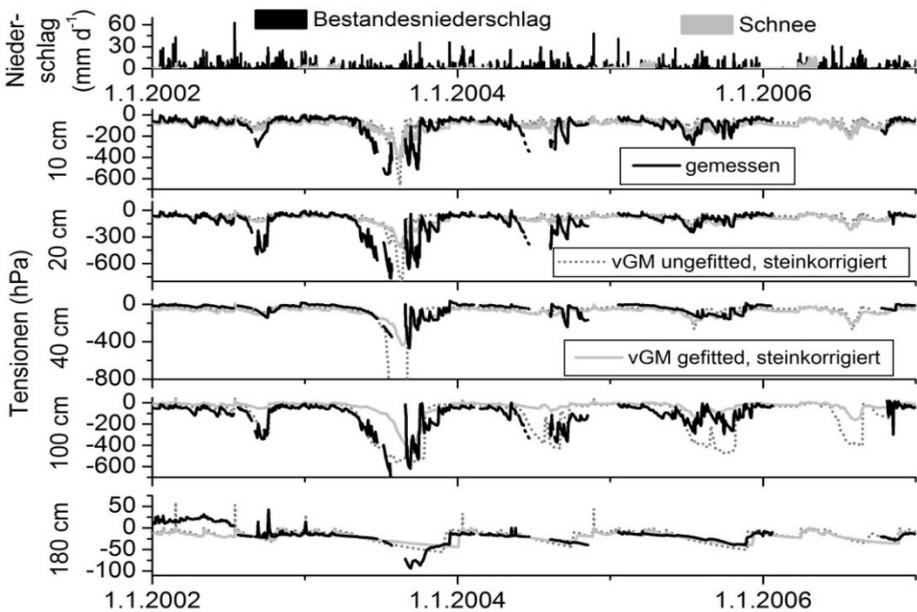


Abbildung 4: Tageswerte Niederschlag sowie gemessene und simulierte Tensionen in verschiedenen Bodentiefen, 2002 - 2006, Solling-Fichte

Auf dem Plot Monte Rufeno mit dem Eichenbestand führten Steinkorrektur und Kalibrierung der  $h(\theta)$ - und  $K(h)$ -Funktionen bei den entsprechenden Modellrechnungen ebenfalls zu einer Verbesserung der Simulationsgüte. Trotz vergleichsweise hoher Werte für  $R^2$  unterschätzten alle Modellanwendungen die hohe zeitliche Dynamik der gemessenen Bodenwassergehalte insbesondere in 30 cm und 50 cm Tiefe (s. Tab. 3d u. Abb. 5). Entsprechende Modellrechnungen auf dem Workshop 2010 zeigten für Monte Rufeno ein  $R^2$  zwischen 0,59 und 0,78 (WAGNER 2011).

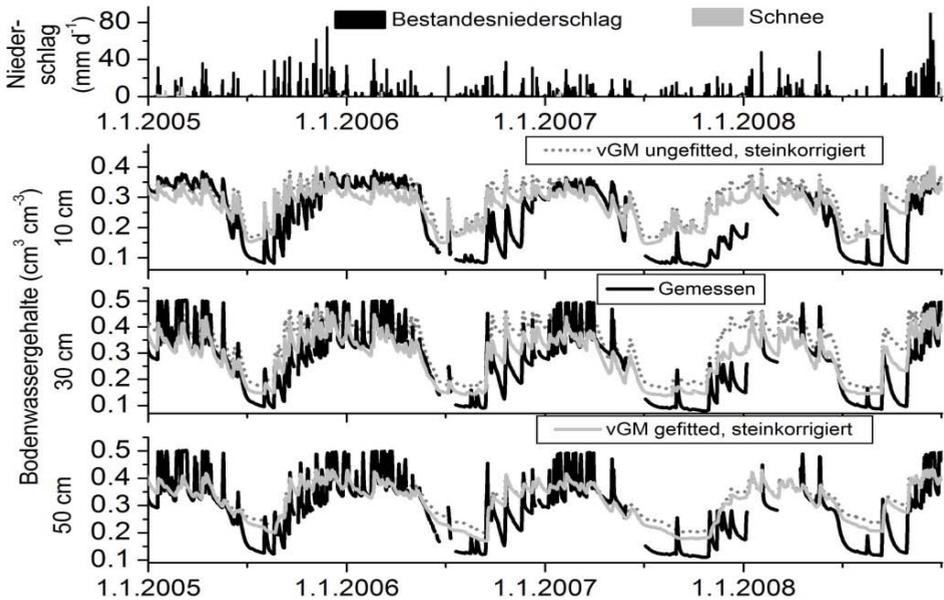


Abbildung 5: Tageswerte Niederschlag sowie gemessene und simulierte Bodenwassergehalte in verschiedenen Bodentiefen, 2005 - 2008, Monte Rufeno

## 4 Schlussfolgerungen

Die in der Studie verwendeten Steinkorrekturen der  $h(\theta)$ - und  $K(h)$ -Funktionen führte zu z. T. erheblichen Verbesserungen der Simulationsgüte der verwendeten Modelle. Am Standort Solling-Fichte waren nur geringe Verbesserungen der Simulationsgüte zu erkennen. Daher müssen hierzu noch weitere Studien durchgeführt werden.

## Literatur

- BRAKENSIEK, D. L. u. RAWLS, W. J. (1994): Soil containing rock fragments: effects on infiltration. *Catena*, 23, 99-110
- COUSIN, I; NICOLLAUD, B. u. COUTADEUR, C. (2003): Influence of rock fragments on the water retention and water percolation in a calcareous soil. *Catena*, 53, 97-114
- FEDERER C. A. (1995): BROOK90 manual: a simulation model for evaporation, soil water and streamflow, Version 3.1. USDA
- FORSTLICHE STANDORTSAUFNAHME (2003): Begriffe, Definitionen, Einteilungen, Kennzeichnungen, Erläuterungen / bearb. u. zsgest. vom „Arbeitskreis Standortskartierung“ in der „Arbeitsgemeinschaft Forsteinrichtung“. 6. Aufl. Eching bei München, IHW-Verlag, 2003, 352 S.
- HERMAN, F.; SMIDT, S.; BUTTERBACH-BAHL, K.; ENGLISCH, M.; GEBETSROITHER, E.; JANDL, R.; KATZENSTEINER, K.; LEXER, M.; STREBL, F. u. ZECHMEISTER-BOLTENSTERN, S. (2007): Modeling of Nitrogen Dynamics in an Austrian Alpine Forest Ecosystem on Calcareous Soils: A Scenario-Based Risk Assessment under Changing Environmental Conditions. *TheScientificWorldJOURNAL*, 7(S1), 159-165
- JANDL, R.; SPÖGLER, H.; SIMUNEK, J. u. HENG, L. K. (2002): Simulation of Soil Hydrology and Establishment of a Nitrogen Budget of a Mountain Forest. *Environmental Science and Pollution Res.*, Special Issue 2, 42-45
- MUALEM, Y. (1976): A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resour. Res.*, 12, 3, 513-522
- RITCHIE, J. T. (1972): Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. *Water Resour. Res.*, 8, 5, 1204-1213
- SIMUNEK, J.; SEJNA, M.; SAITO, H.; SAKAI, M. u. VAN GENUCHTEN, M. (2013): The Hydrus-1D-Software Package for simulating the one-dimensional movement of water, heat and multiple solutes in variably saturated media Version 4.1. Department of Environmental Sciences, University of California Riverside, 281 S.
- VAN GENUCHTEN, M. (1980): A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44, 892-898
- VAN GENUCHTEN, M. T.; LEIJ, F. J. u. YATES, S. R. (1991): The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils, Version 1.0. EPA Report 600/2-91/065, U.S. Salinity Laboratory, USDA, ARS, Riverside, California
- VAN GENUCHTEN, M. (1987): A numerical model for water and solute movement in and below the root zone. Research Report No 121, U.S. Salinity laboratory, USDA, ARS, Riverside, California
- WAGNER, A. (2011): The FutMon Water Budget Model Comparison Action FutMon C1-Met-29 (BY) Report, 106 S.

Korrespondierender Autor:

Dr. Martin Wegehenkel

Zentrum für Agrarlandschaftsforschung e.V., Institut für Landschaftssystemanalyse

Eberswalder Straße 84

D-15374 Müncheberg

mwegehenkel@zalf.de

Annette Wagner

Deutscher Wetterdienst, Meteorologisches Observatorium Hohenpeißenberg

Tiziana Amoriello

CRA Experimental Institute for Plant Nutrition/Italien

Dr. Stefan Fleck

Henning Meesenburg

Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt

Dr. Stephan Raspe

Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft