

**Tagungsbeitrag zu:**

Jahrestagung der DBG 2009

Kommission VI

**Titel der Tagung:**

Böden - eine endliche Ressource

**Veranstalter:**

DBG, September 2009, Bonn

**Berichte der DBG** (nicht begutachtete online Publikation) <http://www.dbges.de>**Bodenhydraulische Änderungen durch Aufforstung und deren Bedeutung bei der modellgestützten Bewertung des Klimawandeleinflusses auf Standortwasserhaushalt und Hochwasserentstehung***Andreas Wahren<sup>1/2</sup>, Karl-Heinz Feger<sup>1</sup>, Kai Schwärzel<sup>1</sup>, Albrecht Münch<sup>2</sup>, Ingo Dittrich<sup>2</sup>***Zusammenfassung**

Mit dem Wasserhaushalts (WHH)- und Niederschlag-Abfluss (N-A)-Modell AKWA-M<sup>®</sup> wurden die Wasserflüsse eines Hydrotops (hydrological response unit) unter Berücksichtigung bzw. Vernachlässigung der bodenhydraulischen Veränderungen, die eine Aufforstungsmaßnahme hervorruft, quantifiziert. Als Grundlage wurden die bodenphysikalischen Parameter mit Feld- und Labormethoden bestimmt. Für die Modellierung kamen gemessene Klimareihen und Projektionen zukünftiger Klimabedingungen (IPCC-Szenarien A2 und B1, IPCC 2001; Downscaling-Verfahren: WETTREG, Enke et al. 2006) zum Einsatz. Die Vernachlässigung der landnutz-

ungsbedingten Veränderung der Bodenmatrix führt nicht nur häufig zur Unterschätzung des Wasserrückhaltes im Hochwasserfall, sondern beschreibt auch das veränderte Boden-Pflanze-System für WHH-betrachtungen nur ungenügend. Besonders zur Modellierung von Klimaanpassungsstrategien durch Landnutzungsänderungen wird die Einbindung der bodenhydraulischen Veränderungen in die Modellparametrisierung diskutiert.

**Schlüsselworte:** Aufforstung, Wasserhaushalt, Wasserretention, Klimawandel, Bodenphysik

**Einleitung**

Generell werden in hydrologischen Prognosemodellen zur Beschreibung von Landnutzungsänderungen meist nur Pflanzenparameter (LAI, Durchwurzelungstiefe, Bedeckungsgrad usw.) variiert. Die Änderungen der bodenhydraulischen Eigenschaften nach einem Landnutzungswandel werden, wenn überhaupt, nur durch eine Anpassung der Makroporen (bypass-flow) abgebildet. Die ebenfalls relevanten landnutzungsbeeinflussten Bodenparameter Porenraum und -verteilung werden bei der Modellierung von Landnutzungsänderungen jedoch oft beibehalten. Gerade diese bodenphysikalischen Eigenschaften sind jedoch stark mit der Landnutzung gekoppelt. Mittels einer unechten Zeitreihe (Acker, Jungaufforstung (6 a), Altaufforstung (50 a) und Kernwald bei gleichen pedologischen Ausgangsbedingungen) wurde im Muldeinzugsgebiet (Sachsen) die Änderung der bodenhydraulischen Bedingungen eines aufwachsenden Waldbestandes untersucht (Labormessungen, Infiltrationsmessungen und Feld-Tracerversuch). Dabei wurden deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Standorten, besonders in den oberen Bodenschichten, ermittelt.

---

<sup>1</sup> Institut für Bodenkunde und Standortlehre  
Technische Universität Dresden  
Pienner Str. 19  
01737 Tharandt  
Tel.: 035203 / 38-31386  
Fax: 035203 / 38-31388  
E-Mail: wahren@forst.tu-dresden.de

<sup>2</sup> Dr. Dittrich & Partner Hydro-Consult GmbH  
Gerlinger Str. 4  
01728 Bannewitz  
E-Mail: wahren@hydro-consult.de

## Material und Methoden

Um eine Aufforstung mittels einer unechten Zeitreihe zu beschreiben, musste ein Testgebiet gefunden werden, das benachbarte Standorte mit vergleichbaren Ausgangsbedingungen hinsichtlich der Bodenbildung (Geologie, Höhe, Hangneigung, Hangausrichtung usw.) aufweist. Diese sollten sich nur durch das Alter des aufgeforsteten Bestandes unterscheiden. Für alle unterschiedlichen Wachstumsstadien wurden die relevanten Bodenparameter (Porenraum und -verteilung, hydraulische Leitfähigkeit) mit Feld- und Labormethoden bestimmt. Ein aktuell bewirtschafteter Ackerstandort dient zur Beschreibung des Ausgangszustandes (Initialzustand) der Aufforstungsmaßnahme und ein durchgehend forstwirtschaftlich genutzter Standort charakterisiert den "Zielzustand". Eine gut geeignete Testfläche wurde an der Westgrenze des Zellwaldes (Sächsisches Lösshügelland, Mulde-Einzugsgebiet) gefunden. Dort forstete man am Rande eines Schutzgebietes (51°00'55"N, 13°15'54"O) in der Vergangenheit einzelne Flächen auf. Die Landnutzungsabfolge der benachbarten Testplots des gewählten Transektes ist (1) Ackerstandort (Flugbewirtschaftung); (2) Aufforstungsfläche mit 6-jährigem Bestand (Jungaufforstung); (3) Aufforstungsfläche mit 50-jährigem Bestand (Altaufforstung); (4) durchgehend forstwirtschaftlich genutzter Standort (Kernwald).

Eine Kombination aus Feld- (Hood-Infiltrometer, Tracerversuch mit Brilliant Blue) und Labormessmethoden (instationär nach der Verdunstungsmethode: Wendroth et al. 1993 und stationär mit einer hängenden Wassersäule und der Drucktopfmethode: Dane und Topp 2002) wurde gewählt, um die Änderung der bodenhydraulischen Eigenschaften unter unterschiedlich alten Waldstandorten zu be-

schreiben. Ziel hierbei war es, sowohl die landnutzungsbedingten Änderungen der Bodenmatrix als auch die Infiltrationsbedingungen im Feld, welche stark von der Bodenstruktur abhängen (z. B. Makroporen), zu beschreiben. Eine detaillierte Beschreibung der Messungen findet sich bei Wahren et al. (2009). Zur Beschreibung des Effekts der veränderten bodenphysikalischen Bedingungen auf die N-A- bzw. WHH-Modellierung wurde das Modell AKWA-M<sup>®</sup> angewendet (Münch 2008). Es beinhaltet physikalisch basierte Komponenten der Abflusentstehung und konzeptionelle Ansätze besonders für die Abflusskonzentration (Wahren et al. 2007). In diesem Modell wurde zur Beschreibung des "Initialzustands" ein Hydrotop mit der Nutzung Acker (Mais) parametrisiert. Die zu parametrisierende Aufforstung wurde dann konventionell durch Änderung der Vegetationsparameter und der Makroporen modelliert („Bodenphysik unverändert“). In einer zweiten Parametrisierung der Aufforstung wurden Porenraum und -verteilung entsprechend der gemessenen Werte ebenfalls geändert („Bodenphysik wie gemessen“).

## Ergebnisse und Diskussion

Abbildung 1 zeigt die gemessenen Wasserretentionskurven der Oberböden für die unterschiedlichen Standorte. Es wird deutlich, dass die Aufforstungsstandorte einen höheren Anteil von Mittel- und Grobporen aufweisen. Die Feldkapazität steigt von 106 mm (nFK = 55 mm) für den Ackerstandort (30 cm Horizontmächtigkeit) auf 149 mm (nFK = 82 mm) bei der Jungaufforstung und 179 mm (nFK = 120 mm) bei der Altaufforstung. Der Kernwaldstandort verhält sich anders als erwartet: Es wurden durchgehend höhere Lagerungsdichten gemessen (Wahren et al. 2009). Grund für die höheren Lagerungsdichten im Unterboden kann zum einen der Einsatz

schwerer Forstmaschinen sein. Zum anderen sind auch *a priori* Substratunterschiede zu berücksichtigen, welche offenbar eine etwas andere, für die ackerbauliche Nutzung eher ungünstige Bodenbildung (Staunässe?) bedingten. Dies mag ein wesentlicher Grund dafür sein, dass auf diesem Standort die Nutzungsform Wald erhalten blieb.

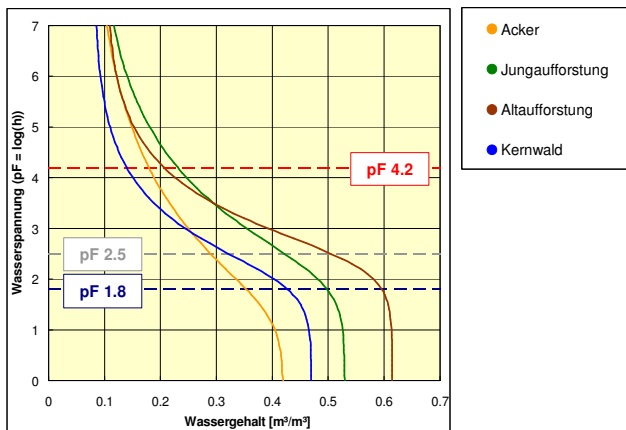


Abb. 1. Wasserretentionskurven für die Oberböden (30 cm) der unterschiedlichen Landnutzungen.

Die im Feld gemessenen Infiltrabilitäten stiegen im Vergleich zur Ackernutzung für die Jungaufforstung um Faktor 2 und für die beiden älteren Waldbestände um Faktor 3 bis 4. Dasselbe gilt für die im Labor gemessenen Leitfähigkeiten bei Feldkapazität (Wahren et al. 2009).

Tab. 1. WHH-größen [mm] für unterschiedlich parametrisierte Standorte (1984 - 2001)

	Acker	Altaufforstung (Zielzustand)	
	(Initialzustand)	„Bodenphysik unverändert“	„Bodenphysik wie gemessen“
<b>Niederschlag P</b>		<b>817</b>	
<b>Gesamtverdunstung ETR</b>	<b>305</b> 37 % P	<b>592</b> 72 % P	<b>629</b> 76 % P
<b>Abfluss R</b>	<b>512</b> 62 % P	<b>227</b> 28 % P	<b>187</b> 23 % P

Aufgrund der Abweichungen des Kernwaldstandortes von den anderen Waldstandorten wurde der "Altaufforstungs"-standort als Zielzustand definiert. In Tab. 1 sind für eine 17-

jährige Reihe (1984 - 2001) die modellierten mittleren Jahreswerte der WHH-Größen Niederschlag, Abfluss und reale Verdunstung zusammengefasst.

Die Parametrisierungen zeigen, dass durch die höhere Verdunstung (hauptsächlich höhere Interzeption und Ausschöpfung tieferer Bodenschichten) auf dem Waldstandort der mittlere Abfluss erheblich reduziert ist. Dieser Effekt wird jedoch bei der Vernachlässigung der bodenphysikalischen Veränderungen um 40 mm (5 % von P) unterschätzt. Somit wird im Hochwasserfall besonders bei geringer Vorfeuchte auch das Rückhaltevermögen einer aufgeforsteten Fläche unterschätzt.

Tab. 2 zeigt die Differenzen der unterschiedlichen Parametrisierungen für die Klimaprojektionen A2 und B1 (IPCC 2001).

Tab. 2. WHH für unterschiedlich parametrisierte Standorte mit Klimaprojektionen für das Jahr 2100.

Klima	1984-2001	2100 B1	2100 A2
<b>Niederschlag [mm]</b>	<b>817</b>	<b>819</b>	<b>754</b>
		+ 2	- 63
<b>Temperatur [°C]</b>	<b>8.4</b>	<b>10.3</b>	<b>11</b>
		+ 1.9	+ 2.6
<b>Abfluss R (Acker) [mm]</b>	<b>512</b>	<b>471</b>	<b>394</b>
<b>R (Wald) [mm]</b>			
„Bodenphysik unverändert“	227	218	146
<b>R (Wald) [mm]</b>			
„Bodenphysik wie gemessen“	187	172	105
<b>Vergleich [mm] zu</b>			
„Bodenphysik unverändert“	- 40 (-18 % R)	- 46 (-21 % R)	- 41 (-28 % R)

Die Temperaturerhöhungen in den Klimaprognosen würden eine Erhöhung der Evapotranspiration bewirken, durch die der Bodenspeicher stärker ausgeschöpft wird. Wie weit der Boden eine Ausschöpfung puffern kann, hängt zum einen von der Dauer bis zur nächsten Auffüllung und zum anderen von der Größe des Speichers selbst ab. Eine Unterschätzung des pflanzenverfügbaren Speicher- raums nach einer Aufforstung führt somit auch zu einer Unterschätzung der Pufferkapazität des Bodens. In Szenario B1 (ähnliche Niederschlagssumme, Temperaturerhöhung

+1,9 °C) führt die Vernachlässigung der bodenphysikalischen Veränderungen zu einem noch größeren Fehler als für die Periode 1984-2001. In Szenario A2 (geringere Niederschlagssumme, Temperaturerhöhung +2,6 °C) ist der Verdunstungsantrieb noch größer, aber die Wassermenge, die zur Verfügung steht, ist geringer und somit auch der absolute Fehler. Die relative Differenz zwischen den zwei Parametrisierungen steigt jedoch mit zunehmender Temperatur an. Die stärkere Verdunstungsausschöpfung der Bodenspeicher unter den prognostizierten Klimabedingungen führt demnach zu einer höheren Modellsensitivität gegenüber den bodenphysikalischen Eigenschaften. Gerade in sensiblen Gebieten (z.B. Einzugsgebiete von Trinkwassertalsperren) können diese Differenzen planungsrelevant sein.

## Synthese und Schlussfolgerungen

Bodenhydraulische Parameter sind keine festen Standortseigenschaften, sondern werden von der Vegetationsbedeckung und vom Landnutzungsmanagement stark mitbeeinflusst. Landnutzungsänderungen führen mittel- und langfristig zu einer Veränderung der bodenphysikalischen Eigenschaften. Unsere Messungen belegen, dass Aufforstung zu einer Erhöhung des Mittel- und Grobporenanteils führt. Dies ist u.a. mit dem höheren Anteil organischer Substanz im Oberboden (Wahren et al. 2009) zu erklären. Hydrologische Modelle zur Quantifizierung von Landnutzungseffekten sollten diese Änderungen abbilden können. Natürlich sind auch Generalisierungen notwendig; so wird im Modell AKWA-M<sup>®</sup> derzeit der Einfluss der organischen Substanz und der Lagerungsdichte auf die Porosität aus den Bodenkundlichen Kartieranleitungen KA 4 und KA 5 (Ad-hoc-AG-Boden 1996, 2005) abgeleitet. Die aktuelle

Landnutzungsverteilung ist auch Ausdruck der standörtlichen Limitierungen: z.B. sind in Sachsen bodenphysikalische Daten für Waldstandorte auf tiefgründigen Substraten mit hohem Wasserspeicherpotential nicht vorhanden. Die überwiegend aus landwirtschaftlichen Standorten gewonnene „Bodenkundliche Kartieranleitung“ reicht demnach auch nicht aus, um gerade bei einer Aufforstung die bodenphysikalischen Änderungen vollständig zu beschreiben (vgl. Wahren et al. 2009). Ähnliche Untersuchungen an weiteren Substrattypen mit einer Baumartendifferenzierung wären deshalb wünschenswert, besonders da die Klimaprojektionen einen angespannteren Wasserhaushalt prognostizieren und Standorte noch sensibler auf Landnutzungsänderungen reagieren werden.

## Literatur

- Ad-hoc-AG Boden (2005):** Bodenkundliche Kartieranleitung (KA5): Hrsg.: Bundesanstalt für Geowissenschaften in Zusammenarbeit mit den staatlichen geologischen Diensten der Bundesrepublik Deutschland, 5. Auflage, 438 S, Hannover.
- Ad-hoc-AG-Boden (1996):** Bodenkundliche Kartieranleitung (KA4), Hrsg.: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe und den Geologischen Landesämtern in der Bundesrepublik Deutschland, 4. Auflage, Hannover, 1994, berichtigter Nachdruck.
- Dane J. H., G. C. Topp (Eds.) (2002):** Methods of Soil Analysis: Part 1, Physical Methods, 3rd edition, Soil Sci. Soc. Am., Madison, WI.
- Enke, W.; A. Spekat; F. Kreienkamp (2006):** Neuentwicklung von regional hoch aufgelösten Wetterlagen für Deutschland und Bereitstellung regionaler Klimaszenarien mit dem Regionalisierungsmodell WETTREG 2005 auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit ECHAM5/ MPI – OM T63L31 2010 bis 2100 für die SRES – Szenarien B1, A1B und A2, Projektbericht im Rahmen des F+E-Vorhabens 204 41 138 „Klimaauswirkungen und Anpassung in Deutschland – Phase 1: Erstellung regionaler Klimaszenarien für Deutschland“, 94 S.
- IPCC (2001) - B. Metz, O. Davidson, R. Swart & J. Pan (Eds.):** Mitigation, Contribution of Working Group III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press.
- Münch, A. (2008):** AKWA-M<sup>®</sup> - Teilflächenbasiertes Wasserhaushalts- und Hochwassermodell, Dr. Dittrich & Partner Hydro-Consult GmbH Bannewitz, Programm und Dokumentation.
- Wahren, A., K. Schwärzel, K.H. Feger, A. Münch, I. Dittrich (2007):** Identification and model based assessment of the potential water retention caused by land use changes. Adv. Geosci. 11, 49-56
- Wahren, A., K. Schwärzel, K.H. Feger, A. Münch (2009):** Land-use effects on flood generation - considering soil hydraulic measurements in modeling. Adv. Geosc. 21, 99-107.
- Wendroth, O., W. Ehlers, J.W. Hopmans, H. Kage, J. Halbertsma, J.H.M. Wösten (1993):** Reevaluation of the evaporation method for determining hydraulic functions in unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 57, 1436-1443.