

ABSTRACT

Soil data serve as an important input parameter for hydro-ecological and climatological modeling of water and chemical movement, heat transfer or land use change. Soil properties, most especially the hydraulic properties are highly variable spatially and measuring them is time-consuming and expensive. For that matter efficient methods, for estimating soil hydraulic properties are important. The purpose of this study is to characterize the spatial variation of soil physical properties, identify suitable models and important parameters for estimating saturated hydraulic conductivity (K_s).

The study was carried out at two locations in the Volta Basin of Ghana, near Tamale (9°28'N and 0°55'W) and Ejura (7°19'N and 1°16'W) sites. Data was collected from an area of 6-km² and 0.64-km² at Tamale and Ejura pilot sites, respectively. Data collected include soil diagnostic horizon, texture, color, mottles, structure, roots, gravel concretion fraction, particle size distribution, pH, organic carbon, cation exchange capacity (CEC), bulk density and K_s at the topsoil (0-15 cm) and subsoil (30-45 cm). Semivariogram analysis and kriging interpolation were used to develop digital elevation model (DEM) and eight terrain attributes at 30 × 30 m² grid size.

Stepwise multiple regression (SMR) and generalized linear model (GLM) were used to evaluate different independent variables for estimating K_s . Statistical evaluation procedures used include: coefficient of determination (R^2), normalize mean square error (NMSE), ANOVA, non-parametric median test, geometric mean error ratio (GMER) and geometric standard deviation of error ratio (GSDER). Different pedo-transfer functions (PTFs) were evaluated and compared. Also, artificial neural network (ANN) was used to model K_s using varying data sets and the results compared.

Saturated hydraulic conductivity is highly variable with coefficient of variation more than 100 %. The soils at Ejura have comparatively high sand content (> 69 %) and high clay content, which does not change much from 23 % (topsoil) to 21 % (subsoil), compared to 7 % (topsoil) to 23 % (subsoil) at the Tamale site. A higher spatial dependency (range) was observed for most parameters in the subsoil compared to the topsoil at both sites.

The two sites have about the same mean elevation (169 m), with the Tamale site having a higher range and covering a larger area compared to the Ejura site. The Tamale pilot site is virtually flat with a mean slope gradient varying from 0.0° - 3.1° compared to 0.0-10.7° at the Ejura site. The terrain parameters had poor relationship with K_s , which resulted in poor performance in using terrain parameters for estimating K_s .

Different soil types were mapped by digitizing areas of uniform soil morphological properties into eight soil types (namely: Haplic Luvisol, Lithic Leptosol, Ferric Acrisol, Plinthic Acrisol, Dystric Plinthosol, Eutric Plinthosol, Eutric Gleysol, and Dystric Gleysol) at the Tamale site and five soil types (namely: Ferralic Cambisol, Ferric Acrisol, Haplic Acrisol, Gleyic Acrisol, and Gleyic Fluvisol) at the Ejura site. Non-parametric median test indicated differences in sand, silt, and clay content and pH for the different soil types at both sites at the two soil depths mainly as a result of differences in soil translocation and leaching at different landscape positions. Relationship between soil type and land use type was observed as specific crops dominate on certain soil types (such as, rice cultivation on Eutric and Dystric Gleysol).

In using SMR and GLM it was observed that the most important data for K_s modeling are site, soil depth, particle size distribution (sand, silt and clay content) and

bulk density. Terrain attributes, soil type and land use type parameters may be used to improve on model performance but can not be relied upon as the basis for modeling K_s .

Comparing eleven existing PTFs for estimating K_s the models of Campbell, Brutsaert, Ajuja and Rawls outperformed the remaining ones, thus indicating their wider domain of applicability. The models of Campbell ($R^2=0.38$) and Brutsaert ($R^2=0.35$) were outstanding in terms of correlation and deviation from the measured K_s based on the GMER.

With adequate sensitive data ANN can be used to estimate K_s using soil physical properties with improved estimation when terrain attributes are included. In ANN it was shown that the use of terrain parameters alone can not yield appreciable estimation of K_s . The topsoil K_s was found to be significantly influenced by source of training data but the subsoil is not affected by training data source.

In general, it was found that soil physical properties vary spatially and that through soil mapping it is possible to put soils in groups of uniform texture (sand, silt and clay content) and pH as these properties vary across the catena for the topsoil and subsoil. Amongst the evaluated PTFs the models by Campbell and Brutseart were more suitable for estimating K_s at the two sites. The ANN method can be used to model K_s with improved results compared to PTFs. The soil parameters; sand, silt, clay content, and bulk density were found to be the most important for modeling K_s .

Bodencharakterisierung und Modellierung der räumlichen Verteilung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit an zwei Standorten im Voltabecken in Ghana

KURZFASSUNG

Bodendaten sind wichtige Parameter für die hydro-ökologische und klimatologische Modellierung von Wasser und Chemikalien, Wärmetransfer oder Landnutzungsveränderungen. Bodeneigenschaften, insbesondere die hydraulischen Eigenschaften, sind stark variable und ihre Messung ist zeitaufwändig und teuer. Daher sind effiziente Methoden zur Bestimmung bodenhydraulischer Eigenschaften wichtig. Das Ziel dieser Studie ist die Charakterisierung der räumlichen Variabilität der bodenphysikalischen Eigenschaften, die Identifizierung geeigneter Pedotransferfunktionen (PTF) und die Entwicklung eines Modells für die Bestimmung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit (K_s).

Die Studie wurde an zwei Standorten im Voltabecken in Ghana in Tamale ($9^{\circ}28'N$ und $0^{\circ}55'W$) und Ejura ($7^{\circ}19'N$ und $1^{\circ}16'W$) durchgeführt. Die Untersuchungsgebiete umfassen eine Fläche von 6-km^2 in Tamale bzw. 0.64-km^2 in Ejura. Folgende Bodenparameter wurden untersucht: bodendiagnostischer Horizont, Textur, Farbe, Marmorierung, Struktur, vorhandene Wurzeln, Kies-/Schotterkonkretion, Korngrößenverteilung, pH-Wert, organischer Kohlenstoff, Kationenaustauschkapazität (KAK), Lagerungsdichte und hydraulische Leitfähigkeit (K_s). Eine Semivariogrammanalyse bzw. Kriginginterpolation diente zur Erstellung eines digitalen Höhenmodells (DEM) mit acht Geländeattributen und einer Rastergröße von $30 \times 30 \text{ m}^2$.

Verschiedene Pedotransferfunktionen (PTF) wurden bewertet und anschließend miteinander verglichen. Außerdem wurde ein künstlich-neuronales Netzwerk (ANN) zur Modellierung von K_s mit verschiedenen Datengruppen eingesetzt und die Ergebnisse verglichen. Die schrittweise multivariante Regression (SMR), das generalisierte lineare Modell (GLM) und künstliche neuronale Netzwerk (ANN) wurden zur Modellierung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit verwendet. Die eingesetzten statistischen Bewertungsverfahren umfassen: Bestimmungsmaß (R^2), normalisierter mittlerer Quadratfehler (NMSE), ANOVA, nicht-parametrischer Mediantest, GMER und GSDER.

Die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit ist mit einem Variationskoeffizient von über 100 % stark variable. Die Böden in Ejura besitzen einen relativ hohen Sandgehalt ($> 69 \%$) und hohen Tongehalt, der sich innerhalb des Bodenprofils von 23% im Oberboden bis 21% im Unterboden kaum verändert, verglichen mit 7% im Oberboden und 23% im Unterboden für Böden in Tamale. Dagegen wurde an beiden Standorten eine höhere räumliche Abhängigkeit zwischen Unter- und Oberböden bei anderen Bodenparametern beobachtet.

Beide Standorte liegen ungefähr auf gleicher Höhe (169 m), wobei in Tamale die Höhenunterschiede über eine größere Fläche ausgeprägter sind als in Ejura. In Tamale ist das Gelände fast flach mit einem mittleren Hanggradient zwischen 0.0° und 3.1° , verglichen mit $0.0\text{-}10.7^{\circ}$ in Ejura. Die Geländeparameter weisen nur eine schwache Beziehung zu K_s auf; dies bedeutet, dass die Geländeparameter nur bedingt zur Bestimmung von K_s genutzt werden können.

Anhand der Digitalisierung von Gebieten mit gleichen morphologischen Eigenschaften werden acht verschiedene Bodentypen in Tamale (Haplic Luvisol, Lithic Leptosol, Ferric Acrisol, Plinthic Acrisol, Dystric Plinthosol, Eutric Plinthosol, Eutric Gleysol und Dystric Gleysol) und fünf Bodentypen in Ejura (Ferralic Cambisol, Ferric Acrisol, Haplic Acrisol, Gleyic Acrisol, und Gleyic Fluvisol) klassifiziert. Der nicht-parametrische Mediantest deutet auf Unterschiede in Sand- und Schluffgehalt, pH-Wert und Lagerungsdichte für die Bodentypen beider Standorte und beider Bodentiefen hin und kann hauptsächlich als Ergebnis einer unterschiedlichen Bodenverlagerung und Versickerung an verschiedenen Stellen im Gelände gesehen werden. Eine Beziehung zwischen Bodentyp und Landnutzungstyp konnte durch die Dominanz bestimmter Anbaupflanzen auf bestimmten Bodentypen nachgewiesen werden (z.B. Reis auf Eutric und Dystric Gleysol).

Ein Vergleich zwischen elf PTFs zur Bestimmung von K_s zeigt, dass die Modelle von Campbell, Brutsaert, Ajuja und Rawls besser geeignet sind als die anderen Modelle, was auch durch ihre verbreitete Anwendung zum Ausdruck kommt. Die Modelle von Campbell ($R^2=0.38$) und Brutsaert ($R^2=0.35$) sind hervorragend hinsichtlich der Korrelierung und weisen die geringsten Abweichungen von der gemessenen K_s auf der Grundlage von GMER auf.

Mit ausreichend sensitiven Daten kann ANN zur Vorhersage von K_s mit bodenphysikalischen Eigenschaften genutzt werden, wobei eine Einbeziehung der Geländeeigenschaften die Ergebnisse verbessert. Durch ANN wird gezeigt, dass der Einsatz von Geländeparametern allein nicht zu einer akzeptablen Vorhersage der K_s führen kann. Während die K_s im Oberboden significant durch die Trainingsdaten beeinflusst wird, trifft dies nicht auf die K_s im Unterbodens zu.

Durch den Einsatz von SMR und GLM wird deutlich, dass Standort, Bodentiefe, Korngrößenverteilung (Sand-, Schluff-, Lehmgehalt) die wichtigsten Daten für die Modellierung von K_s und Lagerungsdichte darstellen. Zwar können Parameter wie Geländeeigenschaft, Bodentyp und Landnutzungstyp zur Verbesserung der Modelleistung eingesetzt werden, sollten aber nicht als Basis für die K_s -Modellierung genutzt werden.

Im Allgemeinen kann festgestellt werden, dass die bodenphysikalischen Eigenschaften räumlich stark variieren und, dass es durch Bodenkartierung möglich ist, Böden hinsichtlich einheitlicher Struktur (Sand-, Schluff-, Lehmgehalt) und pH-Wert zu gruppieren, da diese Eigenschaften entlang der Catena im Ober- bzw. Unterboden variieren. Unter den bewerteten PTFs waren für beide Standorte die Modelle von Campbell und Brutseart am besten für die Vorhersage von K_s geeignet. Die ANN-Methode kann zur Modellierung von K_s eingesetzt werden; dabei sind die Ergebnisse besser als die Ergebnisse mit PTF. Die für die Modellierung von K_s wichtigsten Bodenparameter sind Sand-, Schluff- und Lehmgehalt sowie Lagerungsdichte.