

**RELATIONSHIP BETWEEN GRAVIMETRIC AND VOLUMETRIC WATER
CONTENT OF SOIL IN CONDITIONS OF EAST SLOVAKIAN LOWLAND**

Andrej Tall, Dana Pavelková

The aim of this contribution was to study dependence between gravimetric and volumetric water content of soil which resulted into pedotransfer function. This function would facilitate the calculation of volumetric water content of soil based on more easily calculated gravimetric water content of soil. Regarding the samples, 325 undisturbed soil samples were taken from 15 different locations of East-Slovakian lowland. Further, the samples underwent grain-size analysis and 2 759 measurements of gravimetric and volumetric water contents of soil were performed. The dependence between gravimetric and volumetric water content of soil is linear in soils with low content of clay fraction. When clay content was increasing, the linearity of dependency was vanishing and it started to copy the curve. This fact was caused by the volume changes of soil emerging due to the presence of clay minerals in soil. Pedotransfer function was obtained in the form of eight polynomial functions of second degree for eight different intervals of clay fraction component (particles <0.002 mm). The degree of reliability of this function is confirmed by the value $r^2=0.9962$ as well as the value of mean absolute error: 0.7890 %.

KEY WORDS: volumetric water content of soil, gravimetric water content of soil, pedotransfer function, volume changes of soil

VZŤAH MEDZI HMOTNOSTNOU A OBJEMOVOU VLNKOSŤOU PŔDY V PODMIENKACH VÝCHODOSLOVENSKEJ NÍŽINY. Cieľom príspevku bolo skúmať závislosť medzi hmotnostnou a objemovou vlhkosťou pôdy, ktorá by viedla k vzniku pedotransferevej funkcie. Táto funkcia by umožnila výpočet objemovej vlhkosti pôdy na základe ľahšie zmerateľnej hmotnostnej vlhkosti. Odobratých bolo 325 neporušených vzoriek pôdy z 15-tich lokalít na Východoslovenskej nížine. Zo vzoriek boli urobené zrnitostné rozborý a bolo vykonaných 2 759 meraní hmotnostných a objemových vlhkostí pôd. Závislosť medzi objemovou a hmotnostnou vlhkosťou je pri pôdach s nízkym zastúpením ílovej zložky lineárna. Pri zvyšovaní podielu ílovej zložky v pôde, sa táto linearita stráca a závislosť začína kopírovať krivku. Spôsobené je to objemovými zmenami, ktoré prebiehajú pri prítomnosti ílových minerálov v týchto pôdach. Získaná bola pedotransferevá funkcia v podobe ôsmich polynomických funkcií druhého stupňa pre osem rôznych intervalov zastúpenia ílovej frakcie (častice < 0.002 mm). Stupeň spoľahlivosti tejto funkcie potvrdzuje hodnota $r^2=0.9962$ a hodnota priemernej absolútnej chyby: 0,7890 %.

KLÚČOVÉ SLOVÁ: objemová vlhkosť pôdy, hmotnostná vlhkosť pôdy, pedotransferevá funkcia, objemové zmeny pôdy

Introduction

When expressing soil moisture, it is important to distinguish between volumetric and gravimetric water content of soil. The equations are expressed as follows:

$$w = \frac{m_w}{m_s} \cdot 100 \quad (1)$$

where
 w – gravimetric water content of soil [%],

m_w – mass of water [kg],
 m_s – mass of dry soil [kg].

$$\Theta = \frac{V_w}{V_t} \cdot 100 \quad (2)$$

where
 Θ – volumetric water content of soil [%],
 V_w – volume of water [m³],
 V_t – volume of soil [m³].

Relationship between w and Θ is expressed as follows:

$$\Theta = w \cdot \frac{\rho_s}{\rho_w} \quad (3)$$

where

ρ_s – density of soil solid phase [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$],

ρ_w – density of water [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$].

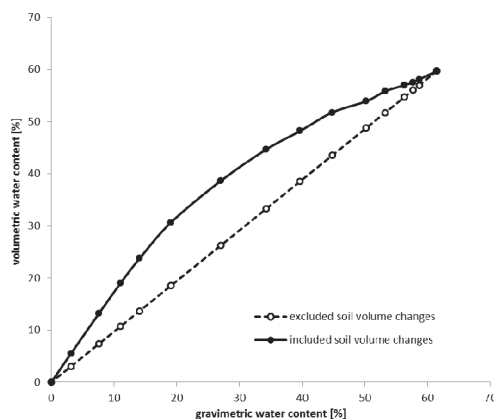
In case of rigid (non-deforming) soils, the dependency (3) is linear since ρ_s is a constant (ρ_s is in this case equal to the density of dry soil – ρ_d). While monitoring moisture of rigid soil, it is sufficient to take once an undisturbed soil sample for determining ρ_s at the beginning. For next samplings, it is sufficient to measure the parameter w , based on which the parameter Θ is calculated according to relationship (3). Determining the value of w is simple in practise, as it only requires taking disturbed soil sample (Gomboš et al., 2001). In case of soils affected by volume changes during moisture change (so called heavy soils), the equation (3) is not linear. It is related to the fact, that ρ_s for these soils is not constant along with change of moisture. Non-linear relationship between Θ and w in heavy soil sample taken from Senné, (location of ESL), is demonstrated in Fig 1. The full line is an experimentally measured relationship between Θ and w . On the other hand, dashed line presents such dependency under conditions that soil volume changes are excluded (i.e., sample volume is considered a constant during experiment). Volume changes in heavy soils are caused by the presence of clay minerals which can change their volume during the change of soil moisture. It is true that the higher presence of clay content in the soil, the higher potential of volume changes in such soils. The theory of mechanisms and quantification of volume changes in heavy soils was examined relatively in great detail in the past (Bronswijk, 1988; Bronswijk et al. 1990; Gomboš, 2012; Tall, Gomboš, 2013).

It thus follows that the direct measurement of volumetric water content in heavy soils is conditioned by the collection of undisturbed soil samples. Moreover, it is also necessary to measure volume of sample during each measurement of volumetric water content.

The aim of this contribution is to propose a computational model for obtaining volumetric water content of soil which is based on the value of gravimetric water content of soil and grain-size analysis defined by pedotransfer function (PTF). Its usage should not be limited to ESL conditions only.

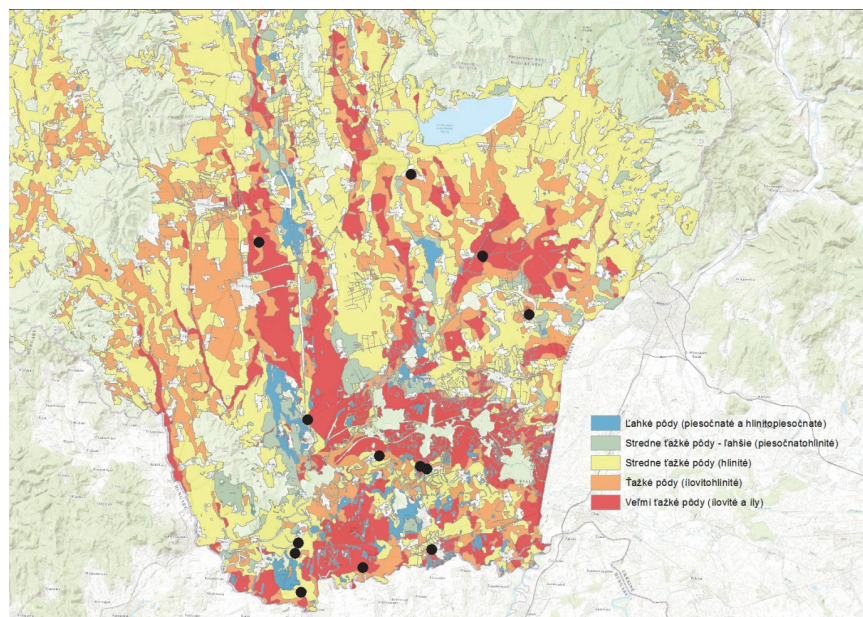
Material and methods

A large database set was used for the analysis of relationship between gravimetric and volumetric water content of soil, collected during the time span 2000 – 2016 at the Hydrological Research Base in Michalovce. The analysis consisted of 2 750 measurements of volumetric and gravimetric water content of soil. In total, 325 soil samples from 15 different locations of ESL were processed (Fig 2, Tab 1). A grain-size analysis was performed on each sample by hydrometer method. Measurements were performed on undisturbed soil samples extracted into Kopecký cylinders. After extraction, each soil sample was saturated to reach a full water capacity and, subsequently, slowly being dried at 20 °C under laboratory conditions. During drying process, mass of samples was measured on laboratory scales in irregular intervals. In case that soil sample underwent a shrinkage, the volume of soil was measured, as well. Determination of sample volume was based on the calculation of geometric parameters of soil cylinder, i.e. its diameter in two mutually orthogonal direction and its height. Before submitting final measurements, the samples were dried out at 105 °C in lab dryer. As a result, the outcomes of gravimetric as well as volumetric water content of soil were obtained based on the equations (1) and (2).



Obr. 1. Experimentálne zmeraná závislosť medzi objemovou a hmotnostnou vlhkosťou na príklade ťažkej pôdy (lokality Senné, horizont 70-80 cm).

Fig. 1. Measured relationship between volumetric and gravimetric water content of heavy soil (locality Senné, horizon 70-80 cm).



Obr. 2. Situovanie odberných miest na Východoslovenskej nížine.
Fig. 2. Situation of sampling sites on East Slovakian Lowland.

Tabuľka 1. Odborné miesta
Table 1. Sampling sites

Locality	Coordinates	Sampling depth [cm]	Number of samples	Number of measurements
Michalovce	N48° 44,255 E21° 56,664	0 – 80	24	154
Milhostov	N48° 40,185 E21° 44,248	0 – 160	32	263
Poľany 1	N48° 28,094 E21° 58,878	0 – 250	50	500
Poľany 2	N48° 28,237 E21° 58,326	0 – 250	50	450
Pribeník	N48° 23,688 E21° 59,547	0 – 100	6	72
Senné 1	N48° 39,900 E21° 02,859	0 – 250	24	216
Senné 2	N48° 39,802 E21° 02,892	0 – 80	45	372
Sírník	N48° 30,538 E21° 48,830	0 – 80	16	175
Somotor 1	N48° 23,748 E21° 48,471	0 – 80	24	108
Somotor 2	N48° 23,173 E21° 48,237	0 – 100	2	24
Veľký Horeš	N48° 22,540 E21° 53,907	0 – 100	8	93
Veľký Kamenec	N48° 21,048 E21° 48,877	0 – 100	4	45
Vysoká n/Uhom 1	N48° 36,792 E22° 06,912	0 – 100	20	160
Vysoká n/Uhom 2	N48° 36,796 E22° 06,898	0 – 60	18	105
Zatín	N48° 28,725 E21° 54,918	0 – 100	2	22
Σ			325	2 759

Results and discussion

A diversity of soil samples with respect to soil types is presented in Fig. 3. As depicted by texture triangle, the samples cover most of the soil types what confirms a high variability of soil types on ESL.

A rate of volumetric changes in soil is directly related to the content of clay fraction (particles < 0.002 mm). With respect to examined samples, a content of clay fraction ranged from 0.73 to 84.35 %. Examined data were divided into 8 intervals, based on the percentage increase of clay content in soil. Figure 4 shows a measu-

red relationship between Θ and w and its division into 8 intervals. Relationships between Θ and w were expressed in form of 8 polynomials of second degree. Firstly, the measurements performed on samples with lowest content of clay fraction (0 – 10 %) depict linear relationship. This outcome is related to a minor or insignificant content of clay fraction since no, or negligible, volumetric changes occur in such soils. Further, linear relationship between Θ and w is gradually transformed into curve in relation to increasing content of clay fraction.

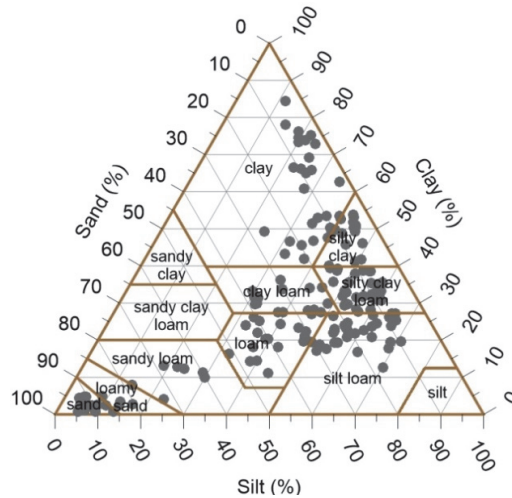


Fig. 3. Soil samples classification according to soil types.

Obr. 3. Zatriedenie odobratých vzoriek podľa pôdnych druhov do klasifikačného diagramu.

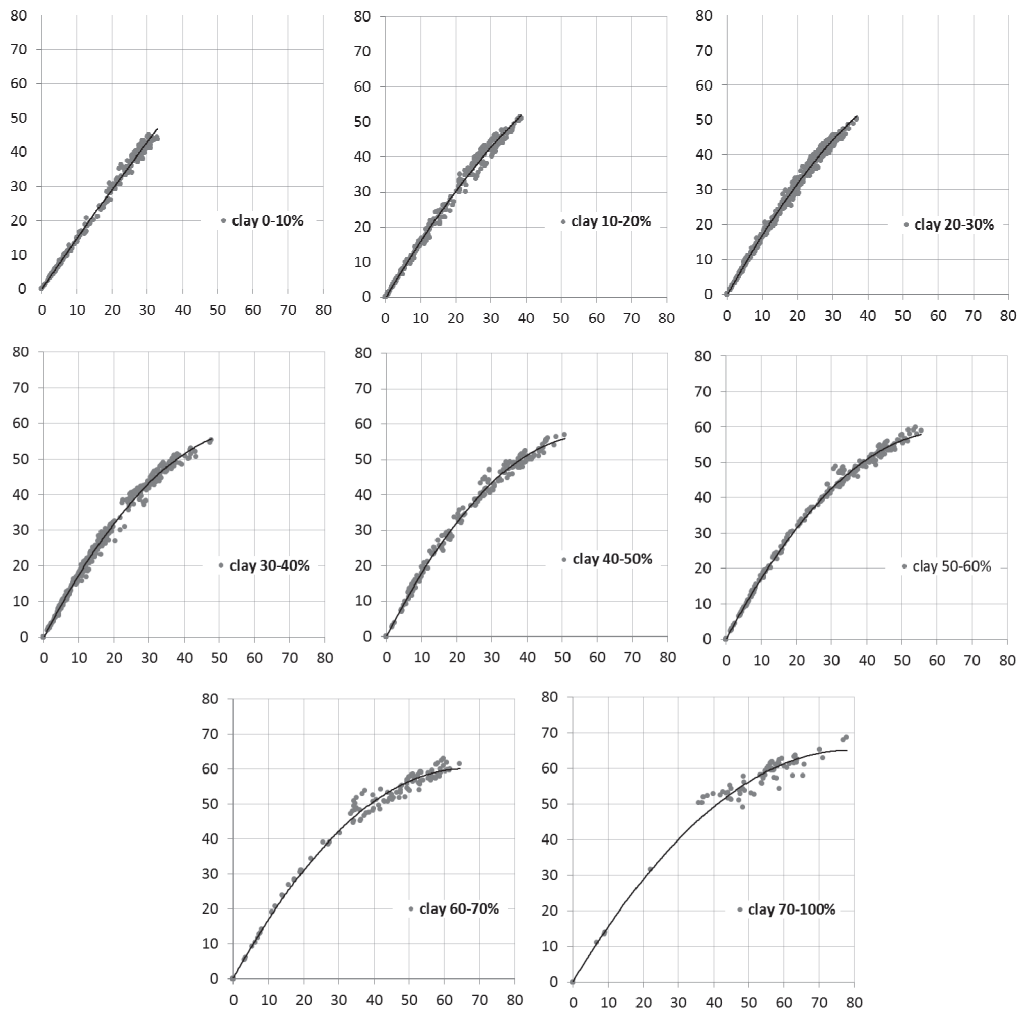


Fig. 4. Measured relationships between volumetric and gravimetric water content of soils (x-axis – gravimetric water content of soil [%]; y-axis – volumetric water content of soil [%]).

Obr. 4. Zmerané závislosti medzi objemovými a hmotnostnými vlhkosťami pôd (x-ová os – hmotnostná vlhkosť pôdy [%]; y-ová os – objemová vlhkosť pôdy [%]).

Table 2. Parameters of pedotransfer function
Tabuľka 2. Parametre pedotrasfernej funkcie

Clay content (<0.002 mm) [%]	Number of measur.:	Pedotransfer function ($\Theta = a \cdot w^2 + b \cdot w + c$)			r^2	Mean absolute error [%]
		a	b	c		
0 – 10	464	-0.0026	1.5113	-0.1763	0.9972	0.4614
10 – 20	373	-0.0093	1.7120	-0.2901	0.9945	0.9023
20 – 30	720	-0.0123	1.8499	-0.2462	0.9961	0.7100
30 – 40	475	-0.0155	1.9134	-0.2625	0.9958	0.7894
40 – 50	220	-0.0165	1.9388	0.0472	0.9947	1.0377
50 – 60	287	-0.0147	1.8572	-0.0123	0.9973	0.6967
60 – 70	132	-0.0137	1.8089	0.3485	0.9923	1.3389
70 – 100	88	-0.0103	1.6386	0.2334	0.9908	1.5339
Σ:	2 759	Weighted average value:			0.9962	0.7890

As a result, we obtained PTF in the form of second degree polynomials for eight intervals of clay fraction in soil (particles < 0.002 mm). Parameters of PTF are presented in Tab. 2. A very high level of reliability of PTF is confirmed by a high value of coefficient of determination ($r^2 = 0.9962$) and relatively low value of mean absolute error (0.7890 %) respectively.

Conclusion

On the basis of 375 soil cylinder samples collected from 15 different locations of ESL, 2 759 measurements of volumetric and gravimetric water content of soil were performed. Further, a grain-size analysis was performed on all the soil samples. It resulted into determination of PTF used for calculation of volumetric water content of soil which was based on the value of gravimetric water content of soil and the value of clay content in soil (particles < 0.002 mm). A very high level of reliability is demonstrated in PTF as displayed in values of coefficient of determination $r^2=0.9962$ and mean absolute error 0.7890% respectively. In practice, a significance of PTF is useful, for example, during regular monitoring of soil moisture. Measurement of volumetric content of soil (especially in case of heavy soils) is conditioned by obtaining only undisturbed soil samples. Given PTF enables to determine with high precision the volumetric content of soil based on the gravimetric content of soil in case, that clay content in soil is known. The measurement of gravimetric content

of soil is considerably easier and faster in comparison to the one of volumetric content of soil. On the other hand, the methodology of PTF has not yet been verified in soils outside of ESL, therefore, its applicability cannot be extended to areas outside of ESL so far.

Acknowledgement

The authors hereby thank for the support of the VEGA 2/0062/16 project.

Literature

- Bronswijk, J.J.B. (1988): Modeling of water balance, cracking and subsidence of clay soils. In *J. Hydrol.*, vol. 97, 199 – 212.
- Bronswijk, J.J.B., Evers-Vermees, J. J. (1990): Shrinkage of Dutch clay soil aggregates. In *Netherlands Journal of Agricultural Science*, vol. 38, 175 – 194.
- Gomboš, M. (2012): *The Impact of Clay Minerals on Soil Hydrological Processes, Clay Minerals in Nature - Their Characterization, Modification and Application*. InTech, ISBN 978-953-51-0738-5. 1 – 30.
- Gomboš, M., Šútor, J., Matil, R., Tall, A. (2001): Vzťah medzi objemovou a hmotnostnou vlhkosťou ťažkých pôd Východoslovenskej nížiny. In *Fyzika vody v pôde: 14. slovensko-česko-poľský seminár, Zemľinska šírava, May 2001*. Michalovce: ÚH SAV, ISBN 80-968480-3-8. 27 – 31.
- Tall, A., Gomboš, M. (2013): Rajonizácia oblasti na VSN podľa potenciálu objemových zmien pôd. In *Acta Hydrologica Slovaca*, vol. 14, no. 1, 66 – 74.

VZŤAH MEDZI HMOTNOSTNOU A OBJEMOVOU VLHKOSŤOU PÔDY V PODMIENKACH VÝCHODOSLOVENSKEJ NÍŽINY

Pri vyjadrovaní vlhkosti pôdy je veľmi dôležité rozlišovať hmotnostnú (w) a objemovú (Θ) vlhkosť pôdy. Pre rigidne (nedeformujúce sa) pôdy je závislosť medzi

Θ a w lineárna. Pri monitoringu vlhkosti rigidnej pôdy teda postačuje na jeho začiatku odobrať jednorazovo neporušenú vzorku pôdy na stanovenie ρ_s (objemová

hmotnosť pevnej fázy pôdy). Pri následných odberoch je potrebné už len merať hodnotu w , z ktorej sa vypočíta hodnota θ . Stanovenie hodnoty w je v praxi jednoduché, pričom stačí vŕtaním odobrať porušenú vzorku pôdy.

Pre pôdy, ktoré vykazujú pri zmene vlhkosti zmenu objemu (nazývaných aj ťažké pôdy), prestáva byť vzťah medzi θ a w lineárny. Je to dané tým, že pre tieto pôdy sa so zmenou vlhkosti mení aj hodnota ρ_s . Objemové zmeny v ťažkých pôdach sú spôsobené prítomnosťou ílových minerálov, ktoré pri zmene vlhkosti menia aj svoj objem. Platí, že čím vyššie zastúpenie ílovej zložky v pôde, tým vyšší potenciál objemových zmien týchto pôd. Z uvedeného vyplýva, že v prípade ťažkých pôd je priame zmeranie objemovej vlhkosti podmienené odberom neporušenej vzorky pôdy. Taktiež je nevyhnutné meranie objemu vzorky pri každom meraní objemovej vlhkosti.

Cieľom tohto príspevku je navrhnúť výpočtový spôsob získavania objemovej vlhkosti pôdy na základe zmeranej hmotnostnej vlhkosti pôdy a zrnitosti prostredníctvom pedotransfernej funkcie (PTF), ktorý by bol použiteľný minimálne v podmienkach Východoslovenskej nížiny (VSN).

Pre analýzu vzťahu medzi hmotnostnou a objemovou vlhkosťou pôdy bol spracovaný rozsiahly súbor dát, ktorý vznikol postupne v rokoch 2000 až 2016 na pracovisku VHZ v Michalovciach. Jedná sa o súbor 2 759 meraní objemových vlhkostí pôd a im prislúchajúcich hmotnostných vlhkostí. Spolu bolo spracovaných 325 pôdnych vzoriek z 15 rôznych lokalít na VSN. Z každej pôdnej vzorky bol vykonaný zrnitostný rozbor hustoternou metódou. Merania boli vykonané na neporušených pôdnych vzorkách, odobratých do Kopeckého valčekov. Po odobratí boli vzorky pôdy zakaždým dosytené na plnú vodnú kapacitu a následne boli v laboratóriu pomaly vysušované pri teplote 20 °C. Počas vysušovania boli v nepravidelných intervaloch na laboratórnych váhach merané hmotnosti vzoriek. V prípade, že pri sušení pôdnej vzorky došlo aj k jej zmršteniu, tak

bol zmeraný jej objem. Stanovenie objemu vzorky spočívalo v zmeraní geometrických parametrov pôdneho valčeka – jeho priemeru v dvoch na seba kolmých smeroch a jeho výšky. Pred posledným meraním boli vzorky pôdy zakaždým dosušené v laboratórnej sušičke pri teplote 105 °C. Z takto získaných údajov boli stanovené hmotnostné, resp. objemové vlhkosti pôdy.

Miera objemových zmien v pôdach je priamo úmerná zastúpeniu ílovej frakcie (častočky < 0,002 mm). V skúmaných vzorkách pôdy sa obsah ílovej frakcie pohyboval v rozmedzí od 0,73 do 84,35 %. Podľa narastajúceho percentuálneho obsahu tejto frakcie vo vzorkách pôdy, bol celý skúmaný súbor dát rozdelený do ôsmich intervalov. Meraniami boli preložené trendové závislosti v podobe polynómov druhého stupňa. Merania na vzorkách s najnižším zastúpením ílovej frakcie (0 – 10 %) vykazujú približne lineárnu závislosť. Je to dané malým, resp. zanedbateľným obsahom ílovej frakcie, keď nedochádza k žiadnym (resp. zanedbateľným) objemovým zmenám. Táto lineárna závislosť s narastajúcim obsahom ílovej frakcie doznieva a dochádza k postupnému zakrivovaniu čiary vyjadrujúcej závislosť medzi θ a w . Získaná bola PTF v podobe ôsmich polynomických funkcií druhého stupňa pre osem rôznych intervalov zastúpenia ílovej frakcie (častice < 0,002 mm). O spoľahlivosť tejto funkcie vypovedá veľmi vysoký stupeň závislosti ($r^2 = 0,9962$) a relatívne nízka hodnota priemernej absolútnej chyby (0,7890 %).

Význam tejto PTF je v praxi využiteľný napr. pri pravidelnom monitoringu pôdnej vlhkosti. Meranie objemovej vlhkosti (hlavne pri ťažkých pôdach) je podmienené odberom neporušených pôdnych vzoriek pôdy. Uvedená PTF umožňuje s vysokou presnosťou určiť objemovú vlhkosť pôdy z hodnoty hmotnostnej vlhkosti pôdy, pri známom obsahu ílovej zložky pôdy. Hmotnostná vlhkosť pôdy je v porovnaní s objemovou vlhkosťou pôdy omnoho jednoduchšie a najmä rýchlejšie zmerateľná. Nakoľko nebola táto PTF zatiaľ verifikovaná pre pôdy mimo VSN, nemožno jej platnosť rozšíriť mimo územia VSN.

RNDr. Andrej Tall, PhD.
Ing. Dana Pavelková, PhD.
Ústav hydrológie SAV
Výskumná hydrologická základňa
Hollého 42
071 01 Michalovce
Tel.: +421 56 6425 147
E-mail: tall@uh.savba.sk