

Determinácia členov vodnej bilancie pôdy pomocou lyzimetra

Determination of soil water balance members using lysimeter

Andrej Tall¹, Dana Pavelková¹

Ústav hydrológie SAV Bratislava, Výskumná hydrologická základňa Michalovce

Abstrakt

Vážiteľné lyzimetre predstavujú cenný nástroj pre štúdium vodnej bilancie v systéme pôda-podzemná voda-rastlinný kryt-atmosféra (PPVRAT). Precíznym meraním hmotnosti pôdneho monolitu za jednotku času dokážu zachytiť zmenu obsahu vody v pôde, t.j. jeden zo základných prvkov vodnej bilancie. Lyzimetre v lyzimetrickej stanici v Petrovciach nad Laborcom na východe Slovenska sú vybavené systémom regulácie hladiny podzemnej vody. Tento systém umožňuje presne kvantifikovať toky vody aj na dolnej hranici nenasýtenej zóny pôdy. Tento príspevok sa zaoberá kvantifikáciou a analyzovaním jednotlivých členov vodnej bilancie systému PPVRAT. Vďaka údajom z meteo stanice, ktorá je súčasťou lyzimetrickej stanice, boli zároveň vypočítané hodnoty referenčnej evapotranspirácie, s ktorými boli konfrontované hodnoty ET_a získané z lyzimetra

Kľúčová slova: vážiteľný lyzimeter, regulácia hladiny podzemnej vody, evapotranspirácia

Abstract

Weighing lysimeters represent a valuable tool for studying the water balance in the soil-groundwater-plant-atmosphere-atmosphere system. By accurately measuring the mass of the soil monolith per unit of time, it is possible to capture the change in water content in the soil - one of the basic elements of the water balance. The lysimeters in the lysimeter station in Petrovce nad Laborcom in the east of Slovakia are equipped with a groundwater level control system. This system makes it possible to precisely quantify water flows at the lower boundary of the unsaturated zone of the soil. This paper deals with the quantification and analysis of individual members of the water balance of the soil-groundwater-plant-atmosphere-atmosphere system. Due to the meteorological data from nearby meteo station, the reference evapotranspiration values were calculated and then mutually compared with the ET_a values obtained from the lysimeters.

Keywords: weighing lysimeter, groundwater level control, evapotranspiration

Úvod

Vážiteľné lyzimetre predstavujú cenný nástroj pre štúdium vodnej bilancie v systéme pôda-podzemná voda-rastlinný kryt-atmosféra (PPVRAT). Precíznym meraním hmotnosti pôdneho monolitu za jednotku času dokážu zachytiť zmenu obsahu vody v pôde, t.j. jeden zo základných prvkov vodnej bilancie. Zmena obsahu vody (ΔW) v známom objeme pôdy za známy čas, je rovná tokom na jeho hornom a dolnom okraji. Všeobecne môže mať bilančná rovnica nasledovný tvar (Nolz, 2014; 2016):

$$\Delta W = P + I - ET_a - SW + CR \quad (1)$$

Na hornej hranici, medzi povrchom pôdy, rastlinným krytom a atmosférou, infiltruje voda zo zrážok (P - precipitation), prípadne aj zo závlahy (I - irrigation) a zároveň sa vyparuje do atmosféry v podobe aktuálnej evapotranspirácie (ET_a). Na dolnej hranici sa vplyvom gravitácie voda dostáva do podzemnej vody (SW – seepage water), prípadne vplyvom kapilárnych síl vzliana z podzemnej vody smerom hore do nenasýtenej zóny (CR – capillary rise).

Lyzimetre v lyzimetrickej stanici v Petrovciah nad Laborcom na východe Slovenska sú vybavené systémom regulácie hladiny podzemnej vody. Tento systém umožňuje presne kvantifikovať toky vody aj na dolnej hranici nenasýtenej zóny pôdy. Pri známom úhrne zrážok (resp. závlahy) predstavuje aktuálna evapotranspirácia (ET_a) jediný neznámy prvok v bilančnej rovnici – a teda je ju možno jednoducho vyrátať.

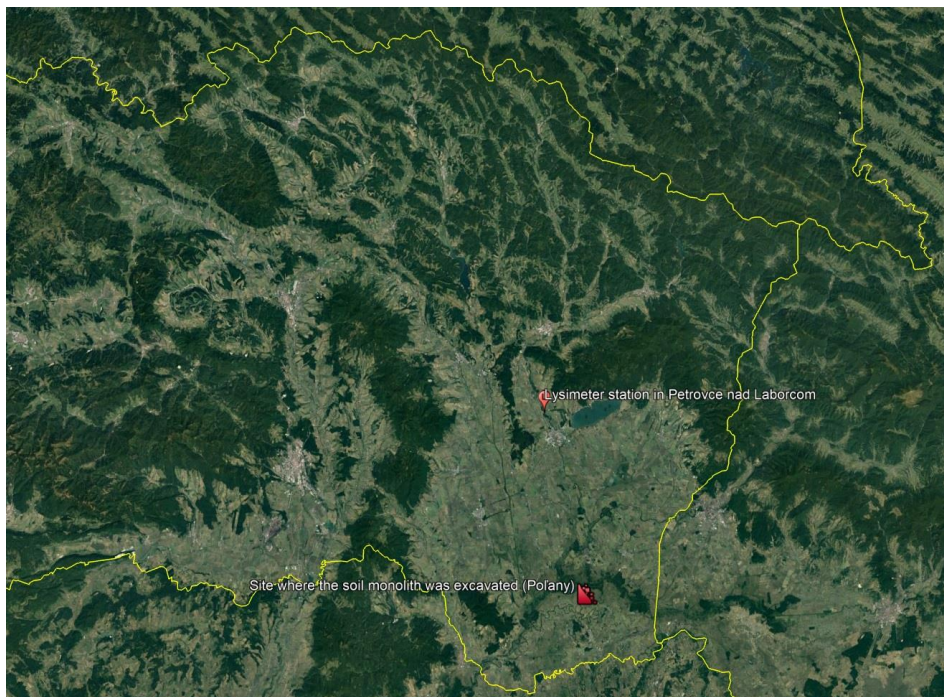
Potenciálne zdroje nepresností lyzimetrických meraní vyplývajú z faktu, že meranie hmotnosti lyzimetra je vystavené vonkajším vplyvom (sila vetra, trenie na okrajoch lyzimetrov spôsobené snehom, prechod zvierat po povrchu a pod). Nepresnosti pri výpočte ET_a môžu mať príčinu aj v meraní zrážok zrážkomermi. Aj keď je zrážkometer umiestnený v bezprostrednej blízkosti lyzimetra, vplyvom turbulencií zapríčinených vetrom, rozdielnym výškam merania, prípadne rôznymi plochami merania a pod., bývajú údaje zo zrážkomeru často nepresné (Nolz, 2014).

Tento príspevok sa zaoberá kvantifikáciou a analyzovaním jednotlivých členov vodnej bilancie systému PPVRAT. Použitím údajov z meteo stanice, ktorá je súčasťou lyzimetrickej stanice, boli zároveň vypočítané hodnoty referenčnej evapotranspirácie (ET_{ref}), s ktorými boli konfrontované hodnoty ET_a získané z lyzimetra.

Materiál a metódy

Experimentálne miesto a časové obdobie experimentu

Lyzimetrická stanica bola vybudovaná v roku 2014 a je situovaná vo východnej časti územia Slovenska (N48° 47,540'; E21° 53,175'; 117 m n.m.), (obr. 1). Podľa Klimatického atlasu Slovenska (2015) je to oblasť teplá, mierne vlhká, s miernou zimou (priemerná ročná teplota vzduchu 10 °C; priemerný ročný úhrn zrážok 600 – 700 mm). Stanica je napájaná solárnymi panelmi a pozostáva z piatich vážiteľných lyzimetrov, meteorologickej stanice a hydrologického vrtu. Vo všetkých piatich lyzimetroch je možnosť automatického udržiavania zvolenej hladiny podzemnej vody (HPV). Hydrologický vrt slúži ako zásobník vody pri regulácii hladiny podzemnej vody. Výška všetkých lyzimetrov je 2,5 m a plocha povrchu je 1 m². Hmotnosti lyzimetrov sa pohybujú od cca 5 000 kg do cca 5 300 kg. Lyzimetre sú naplnené neporušenými blokmi pôdy, dovezenými z piatich rozličných miest Východoslovenskej nížiny (VSN). Vegetačný kryt tvorí trávnatý porast, zastrihávaním udržiavaný na výšku cca. 12 cm.

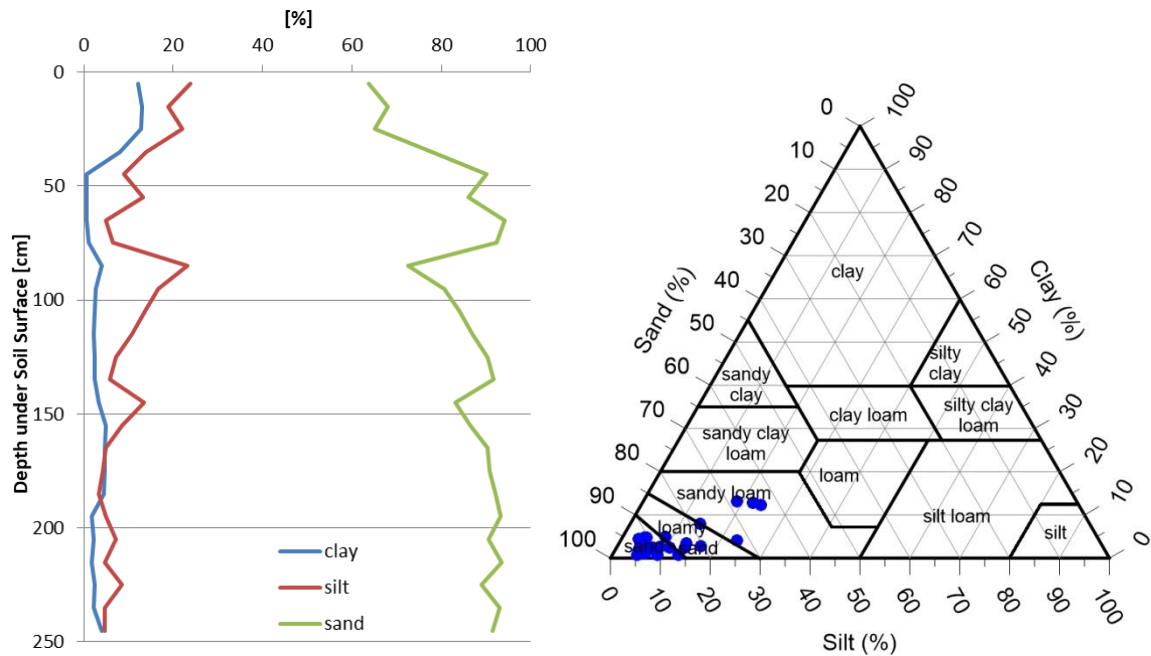


Obrázok 1. Lokalizácia lyzimetrickej stanice v Petrovciach nad Laborcom a miesto odberu pôdneho monolitu v skúmanom lyzimetri v obci Poľany.

V tomto príspevku sú spracované dáta z jedného lyzimetra. Skúmaný lyzimeter je naplnený hlinitým pieskom až pieskom, ktorý v najvrchnejšej časti pôdneho profilu prechádza do pieskovitej hliny (obr. 2). Pôdny profil v tomto lyzimetri pochádza z juhovýchodného cípu VSN, pri obci Poľany. Analyzované je kontinuálne obdobie od 27. 05. 2017 do 22. 10. 2017 – t.j. 148 dní. Hladina podzemnej vody bola počas celého obdobia udržiavaná na úrovni -1m pod terénom. Závlaha nebola aplikovaná.

Použité údaje z lyzimetrickej stanice

Najdôležitejším výstupom z lyzimetra je údaj o hmotnosti pôdneho monolitu. Meranie hmotnosti prebieha v hodinových intervaloch s presnosťou $\pm 0,01$ kg. Keďže povrchová plocha lyzimetra je 1 m^2 , každá zmena hmotnosti lyzimetra o 1 kg, predstavuje zmenu obsahu vody (ΔW) o 1 mm (vyjadrenú v jednotkách dĺžky).



Obrázok 2. Zrnitostné zloženie pôdy v skúmanom lyzimetri vyjadrené po výške pôdneho profilu (vľavo) a v trojuholníkovom klasifikačnom trojuholníku (vpravo).

Ďalším údajom z lyzimetra sú toky vody na jeho spodnej časti (BF – bottom fluxes). V prípade, že voda prúdi do lyzimetra, majú kladnú hodnotu, pri výtoky z lyzimetra zápornú hodnotu. Keďže HPV bola udržiavaná na konštantnej úrovni (-1 m pod terénom), kladné BF kompenzujú kapilárne straty a záporné BF predstavujú gravitačné toky do HPV. Hodnoty BF boli spracované v hodinových intervaloch.

V príspevku sú použité aj údaje o priebehu objemovej vlhkosti pôdy v hĺbke -20 cm (θ_{-20}), ktoré slúžili ako kontrola, či je v pôdnom profile dostatok vody pre maximálny možný výpar. Pre výpočet ET_{ref} slúžili údaje z meteorologickej stanice v bezprostrednej vzdialenosti od lyzimetra: priemerná hodinová teplota vzduchu vo výške 2 m (T_{hr}), priemerná hodinová rýchlosť vetra vo výške 2 m (u_2), priemerná hodinová relatívna vlhkosť vzduchu vo výške 2 m (RH) a priemerné hodinové globálne žiarenie (R_s). Z meteorologickej stanice boli použité hodinové úhrny zrážok (P_m).

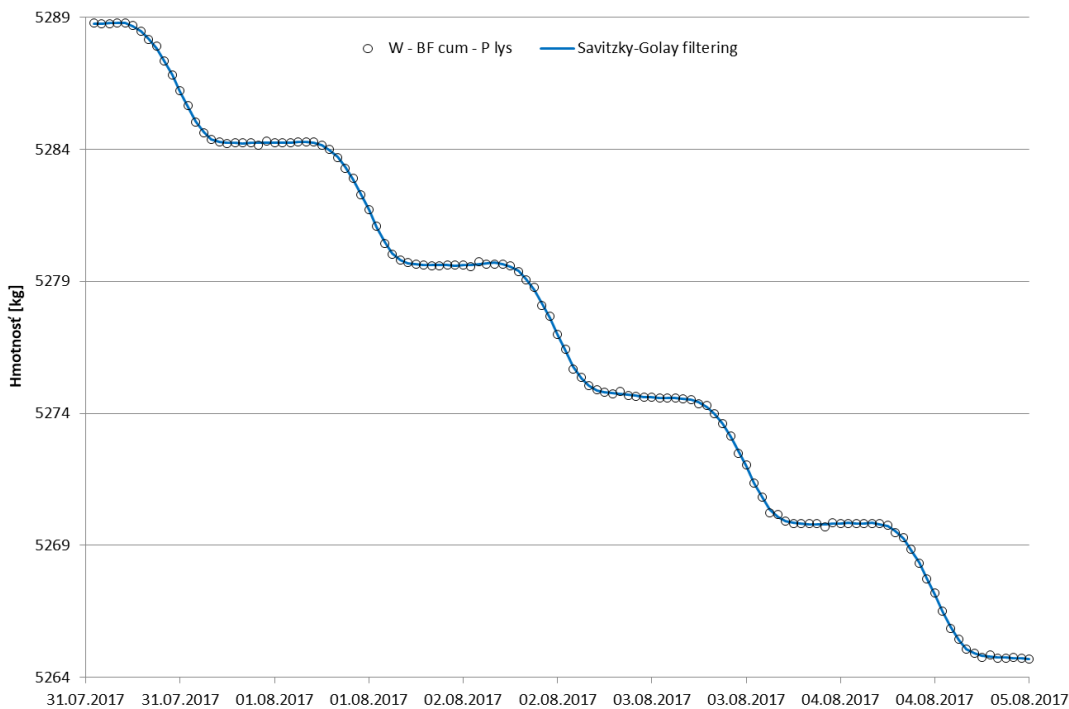
Príprava a spracovanie údajov z lyzimetra

Kvôli vyhladeniu údajov o hmotnosti lyzimetra (W) bol použitý Savitzky-Golay filter s využitím kvadratickej aproximácie v nasledovnej forme (Savitzky, 1964):

$$W_{(t)} = \frac{1}{21}(-2 W_{(t-3)} + 3 W_{(t-2)} + 6 W_{(t-1)} + 7 W_{(t)} + 6 W_{(t+1)} + 3 W_{(t+2)} - 2 W_{(t+3)}) \quad (2)$$

kde t je jednotka času (v tomto prípade 1 hod).

Pred samotným vyhladením boli od surových údajov o hmotnosti najprv odčítané kumulatívne hodnoty tokov na spodnom okraji lyzimetra (BF_{cum}) a kumulatívne hodnoty zrážok ($P_{lys\ cum}$). Výsledok aplikácie Savitzky-Golay filtra je znázornený na príklade piatich dní z augusta 2017 na obr. 3. Bodovo sú znázornené namerané hmotnosti (očistené od kumulatívnych tokov na dolnom okraji (BF_{cum}) a kumulatívnych zrážok ($P_{lys\ cum}$) a plnou čiarou ich vyhladený priebeh.



Obrázok 3. Ukážka priebehu merania hmotnosti lyzimetra (očistené od tokov na spodnom okraji a zrážok) a jej vyhladenia použitím Savitzky-Golay filtra (na príklade piatich dní zo začiatku augusta 2017).

Použitie údajov o zrážkach z preklápacieho zrážkomeru v meteostanici viedlo pri výpočte často k nezmyselným hodnotám ET_a (výrazne záporné hodnoty ET_a). Bolo zistené, že preklápací zrážkomer podhodnocoval skutočne spadnuté zrážky. Podhodnocovanie zrážok preklápacím zrážkomerom v literatúre potvrdil aj Nolz (2014). Nepresnosti merania vertikálnych zrážok zrážkomerom boli eliminované ich nahradením zrážkami získanými

priamo z lyzimetra nasledovným spôsobom: V prípade, že zrážkomerom bola zachytená zrážková udalosť ($P_m > 0$), tak táto zapríčinila nárast hmotnosti lyzimetra za jednotku času. Každý takýto nárast hmotnosti za jednotku času o 1 kg predstavuje zrážkovú udalosť o veľkosti 1 mm za rovnakú časovú jednotku. Pre výpočet P_{lys} platí:

$$IF P_m(t) > 0 THEN P_{lys}(t) = (W - BF_{cum})(t) - (W - BF_{cum})(t-1) ELSE P_{lys}(t) = 0 \quad (3)$$

kde P_m je úhrn zrážok nameraný preklápacím zrážkomerom, P_{lys} je úhrn zrážok získaný z lyzimetra a W je hmotnosť lyzimetra, od ktorej sú odrátané kumulatívne toky na spodnej hranici lyzimetra BF .

Na základe uvedeného, bola bilančná rovnica (1) upravená do nasledovného tvaru:

$$\Delta W = P_{lys} - ET_a \pm BF \quad (4)$$

kde ΔW je zmena obsahu vody v lyzimetri (je totožná so zmenou hmotnosti lyzimetra), P_{lys} je úhrn zrážok z lyzimetra, ET_a je aktuálna evapotranspirácia a BF sú toky na spodnej hranici lyzimetra (kladné sú prítoky, záporné sú odtoky). Všetky členy rovnice sú vyjadrené v jednotkách dĺžky [mm].

Výpočet referenčnej evapotranspirácie

Postup výpočtu štandardizovanej referenčnej evapotranspirácie ET_{ref} je popísaný v práci (Allen, 2005). Rovnica má nasledovný tvar:

$$ET_{ref} = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{C_n}{T_{hr} + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + C_d u_2)} \quad (5)$$

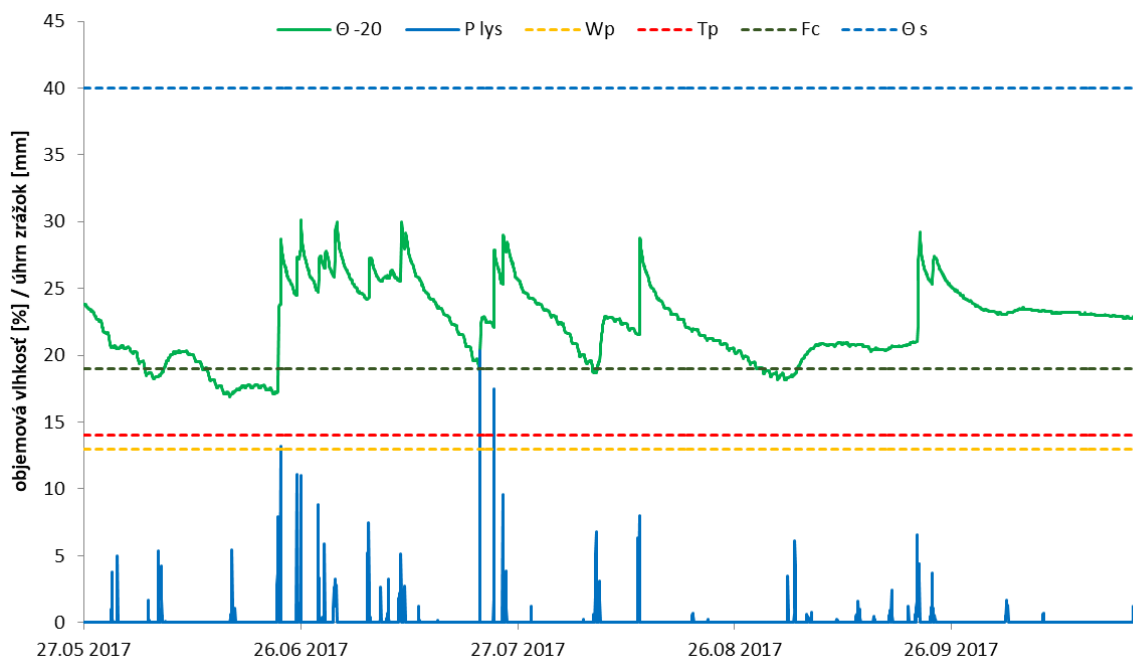
(R_n = radiačná bilancia povrchu plodiny [$\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$], G = tok tepla v pôde [$\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$], T_{hr} = priemerná hodinová teplota vzduchu vo výške od 1,5 do 2,5 m [$^{\circ}\text{C}$], u_2 = priemerná hodinová rýchlosť vetra vo výške 2 m [m s^{-1}], e_s = tlak nasýtenej vodnej pary vo výške od 1,5 do 2,5 m [kPa], e_a = priemerný aktuálny tlak vodnej pary vo výške od 1,5 do 2,5 m [kPa], Δ = derivácia tlaku nasýtenej vodnej pary pri teplote vzduchu T_{hr} [$\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$], γ = psychrometrická konštanta [$\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$], C_n a C_d sú konštanty ktoré sa menia podľa referenčného typu).

Rovnica (5) bola použitá pre výpočet štandardizovanej referenčnej evapotranspirácie pre tzv. „nízku plodinu“, ktorá je podobná kosením udržiavanej tráve na výšku 12 cm. Hodnoty ET_{ref} boli počítané s hodinovým krokom.

Výsledky a diskusia

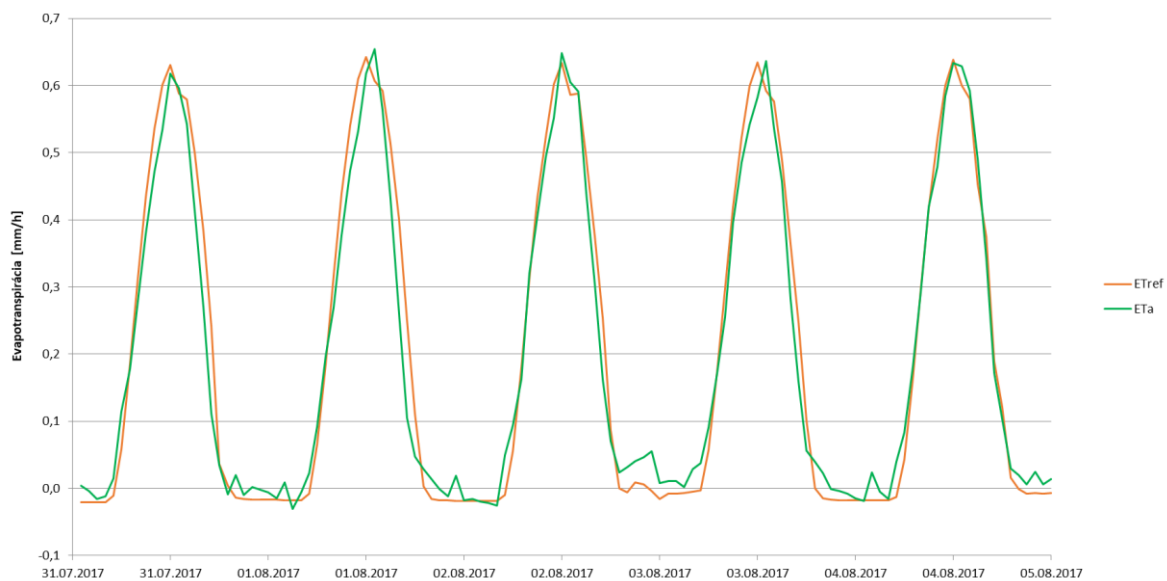
Na obr. 4 je vyneseny merany priebeh objemovej vlhkosti pôdy v hĺbke -20 cm (θ_{-20}) spolu s hodinovými úhrnmi zrážok získaných z lyzimetra (P_{lys}). Vyznačené sú aj hodnoty pôdnych hydrolimitov pre skúmanú pôdu (W_p – bod vädnutia, T_p – bod zníženej dostupnosti, F_c –

poľná vodná kapacita a Θ_s – plná vodná kapacita). Z obrázku vidieť ako priebeh vlhkosti koreluje so spadnutými zrážkami. Počas celého skúmaného obdobia sa vlhkosť pôdneho profilu nedostala pod bod zníženej dostupnosti, dokonca sa až na malé časové úseky pohybovala nad bodom poľnej vodnej kapacity. Priemerná hodnota Θ_{-20} bola 22,4%, min 16,9% a max 30,2%. Z uvedeného vyplýva, že počas skúmaného obdobia mal pôdny profil dostatok vlahy na maximálny možný výpar, čiže aktuálna evapotranspirácia by mala byť totožná s potenciálnou. Strata vody výparom bola v tomto piesočnatom profile dostatočne kompenzovaná zrážkami a kapilárnymi prítokmi z konštantne udržiavanej HPV.

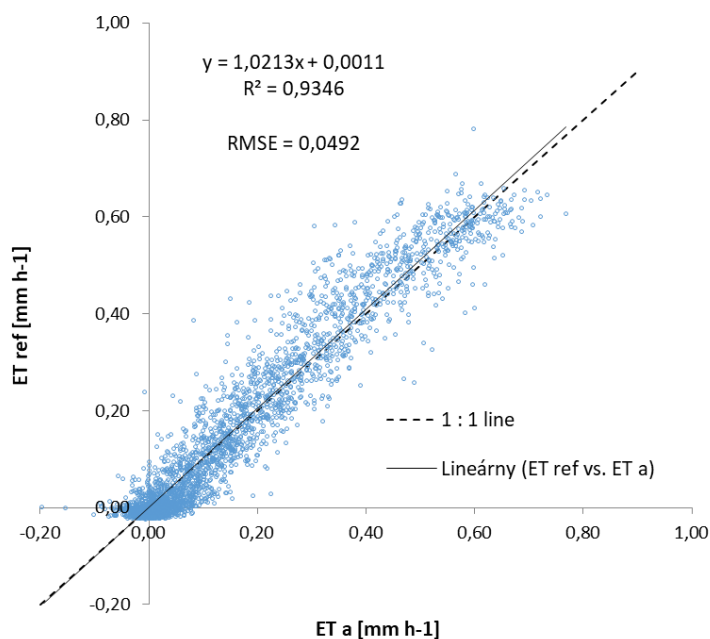


Obrázok 4. Priebeh meranej objemovej vlhkosti v hĺbke -20 cm spolu s hodinovými úhrnmi zrážok a vyznačenými pôdnymi hydrolimitmi.

Vizuálne porovnanie vypočítaných hodnôt ET_{ref} so zmeranými hodnotami ET_a na príklade piatich dní zo začiatku augusta 2017 je na obr. 5. Badateľná je pomerne vysoká zhoda medzi priebehmi ET_a a ET_{ref} . Celkové porovnanie nameranej ET_a a vypočítanej ET_{ref} na základe hodinových údajov z obdobia od 27.05.2017 do 22.10.2017 (148 dní) je na obr. 6. Koefficient determinácie $R^2 = 0,935$ poukazuje na veľmi vysoký stupeň korelácie a hodnota strednej kvadratickej chyby $RMSE = 0,049$ znamená, že hodnoty oboch porovnávaných súborov sa číselne odlišujú minimálne. V porovnaní s inými lyzimetrami vo svete, vyzerajú parametre uvedeného porovnania veľmi priaznivo (tab. 1). Uvedené porovnanie je možné posudzovať len orientačne, nakoľko boli porovnávané rozdielne obdobia s rozličnou dĺžkou.



Obrázok 5. Porovnanie priebehu vypočítanej referenčnej evapotranspirácie s priebehom zmeranej aktuálnej evapotranspirácie na príklade piatich dní zo začiatku augusta 2017.



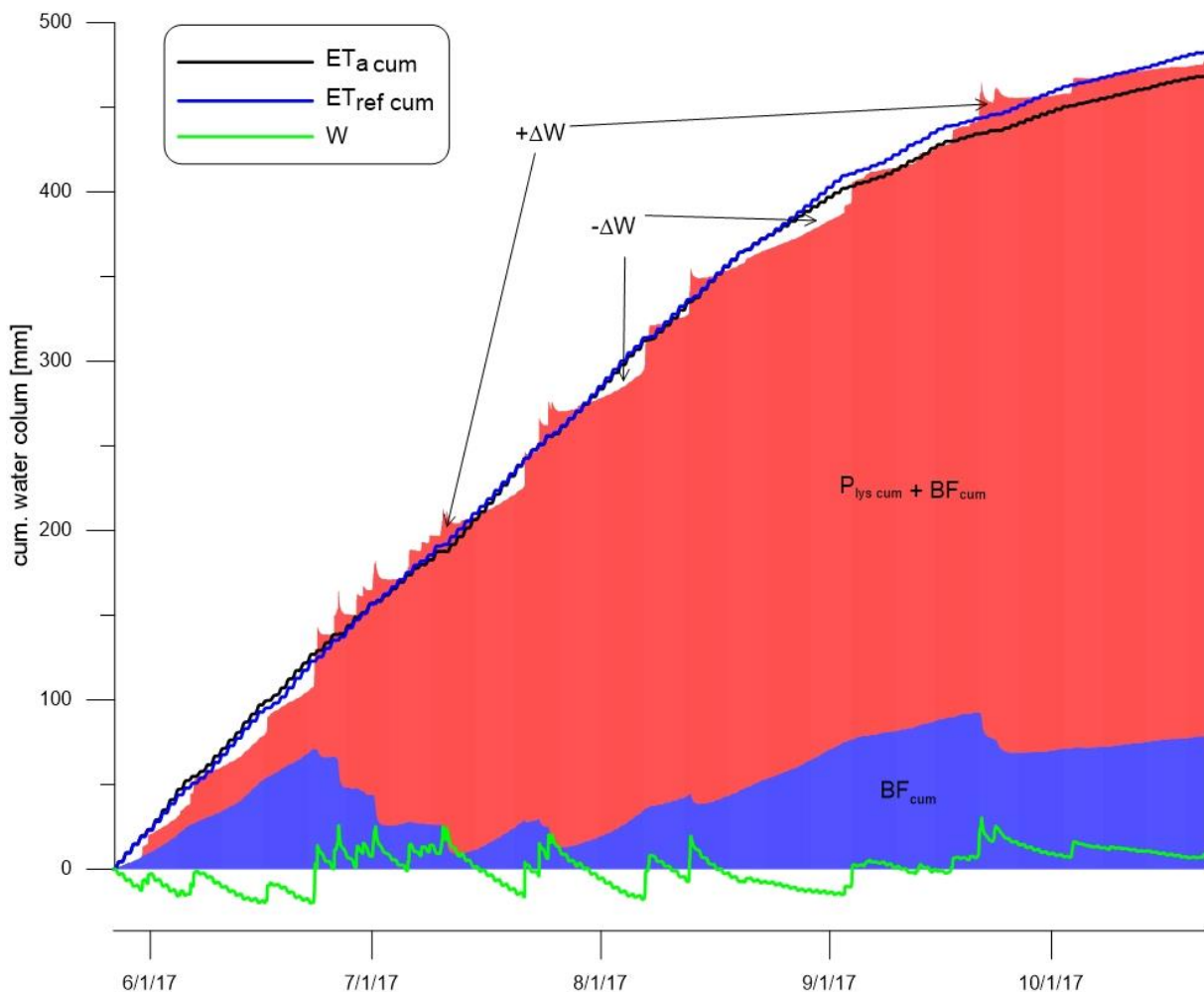
Obrázok 6. Vypočítané hodnoty ET_{ref} vs. lyzimetrom namerané hodnoty ET_a .

Tabuľka 1. Porovnanie lyzimetricky meranej ET_a s vypočítanou ET_{ref} s výsledkami vo svete.

Locality	Days	Slope	Intercept	R^2	RMSE
Five Points, California, USA (Vaughan, 2007)	448	1.02	0.004	0.92	0.062
Gross-Enzersdorf, Austria (Nolz, 2016)	1 185	0.82	0.560	0.92	0.550
Petrovce nad Laborcom (This study)	148	1.02	0.001	0.93	0.049

Vývoj jednotlivých členov vodnej bilancie počas skúmaného obdobia je zachytený na obr. 7 a v tab. 2. Od začiatku bilancovaného obdobia do cca druhej polovice júna bol prísun zrážkovej vody na udržanie konštantnej HPV výrazne nedostatočný a preto bol deficit vody v profile kompenzovaný prísunom vody cez dolný okraj lyzimetra (kladné BF). V ďalšom období (do cca druhej polovice júla) vďaka nadpriemerným zrážkam v júli nastal opačný proces, kedy musela byť voda z lyzimetra odčerpávaná (záporné BF). Ďalej sa situácia opakovala (kladné BF), keď podpriemerné zrážky v auguste a septembri nedokázali kompenzovať deficit vody v profile. Ku koncu sledovaného obdobia, ktorý bol zrážkovo podpriemerný, stačili na udržanie konštantnej HPV už len malé prítoky BF , nakoľko spotreba vody na evapotranspiráciu už bola v jeseni značne nižšia ako v letných mesiacoch.

Udržiavanie konštantnej hladiny HPV pomocou tokov BF malo za následok, že bol relatívne vyrovnaný aj priebeh hmotnosti lyzimetra W (zelená čiara). Výkyvy hmotnosti predstavujú zmeny obsahu vody v nenasýtenej zóne ΔW .



Obrázok 7. Schematické znázornenie vývoja členov bilančnej rovnice počas bilancovaného obdobia (od 27.05.2017 do 22.10.2017).

Priebeh ET_a (čierna čiara) je pomerne vyrovnaný až do konca augusta, keď sú hodnoty ET_a najvyššie. Od konca augusta smerom k jesenným mesiacom sa výpar postupne znižoval. Denné priemery ET_a boli koncom mája 4,7 mm, v júni 4,5 mm, v júli 4,1 mm, v auguste 3,7 mm, v septembri 1,7 mm a v októbri 1,0 mm.

Rozdiel $ET_{ref} - ET_a$ predstavuje tzv. evapotranspiračný deficit. Ak je tento nulový, alebo zanedbateľný, znamená to, že v pôdnom profile je dostatok vody na maximálny možný výpar, ktorý je daný meteorologickými podmienkami (Šútor, 2014). Počas sledovaného obdobia 148 dní, dosiahol evapotranspiračný deficit hodnotu 14,1 mm. V percentuálnom vyjadrení, pri porovnaní s celkovo vyparenou vodou (ET_a) 468,2 mm, predstavuje evapotranspiračný deficit 3%.

Tabuľka 2. Mesačné sumy prvkov vodnej bilancie (v mm).

	P_{lys}	BF	W	ET_a	ET_{ref}	$ET_{ref} - ET_a$
Máj*	10,5	10,3	-2,7	23,5	22,9	-0,6
Jún	110,5	33,6	10,3	133,7	133,8	0,1
Júl	137,8	-24,7	-12,7	126,4	128,4	2,0
August	53,7	51,2	-8,4	113,4	117,7	4,3
September	74,2	-0,9	22,9	50,4	56,1	5,7
Október*	11,6	9,1	-0,2	20,8	23,4	2,6
Σ	398,3	79,0	9,2	468,2	482,3	14,1

* Máj od 27.05.; Október do 22.10.

Záver

Pomocou lyzimetra boli kvantifikované jednotlivé komponenty vodnej bilancie. Skúmané bolo obdobie od 27.05.2017 do 22.10.2017, čo predstavuje 148 dní. V lyzimetri naplnenom piesčitým pôdnym profilom bola udržiavaná konštantná HPV na úrovni -1 m. Priebeh nameranej ET_a bol konfrontovaný s vypočítaným priebehom ET_{ref} . Zistená bola tesná korelácia medzi oboma radmi ($R^2 = 0,93$; $RMSE = 0,049$). Celkovo sa odparilo 468 mm vody (ET_a). Zrážkami cez horný okraj lyzimetra infiltrovalo 398 mm vody. Z uvedeného vyplýva, že samotné zrážky neboli schopné pokryť potrebu výparu. Zrážkový deficit mal hodnotu 70 mm a bol kompenzovaný prítokmi cez spodný okraj lyzimetra $BF = 79$ mm. Zároveň sa navýšila zásoba vody v profile $\Delta W = 9$ mm. Evapotranspiračný deficit ($ET_{ref} - ET_a$) predstavoval za uvedené obdobie 3%.

Na skúmanej lokalite bolo preukázané, že piesčité pôdny profil so štandardným trávnatým porastom (12 cm), pri konštantne udržiavanej HPV na úrovni -1 m, dokáže pokryť maximálnu možnú potrebu výparu aj pri nedostatočnom zásobovaní zrážkami.

Literatúra

Allen, R.G.; Walter, I.A.; Elliot, R.L.; Howell, T.A.; Itenfisu, D.; Jensen, M.E.; Snyder, R.L. *The ASCE Standardized Reference Evapotranspiration Equation*. Reston : American Society of Civil Engineers, 2005, 216 p.

Klimatický atlas Slovenska • Climate atlas of Slovakia. Banská Bystrica : Slovenský hydrometeorologický ústav, 2015, 228 p.

Nolz, R.; Cepuder, P.; Eitzinger, J. Comparison of lysimeter based and calculated ASCE reference evapotranspiration in a subhumid climate. *Theor Appl Climatol*, **2016**, 124, 315-324.

Nolz, R.; Cepuder, P.; Kammerer, G. Determining soil water-balance components using an irrigated grass lysimeter in NE Austria. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, **2014**, 177, 237-244.

Savitzky, A.; Golay, M.L.E. Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures. *Anal. Chem.*, **1964**, 36, 1627-1639.

Šútor, J.; Vitková, J.; Reháč, Š.; Stradiot, P. Vplyv evapotranspiračného deficitu na dynamiku zásob vody v pôde v podmienkach Záhorskej nížiny. *Acta Hydrologica Slovaca*, **2014**, 15, 15-23.

Vaughan, P.J.; Trout, T.J.; Ayars, J.E. A processing method for weighing lysimeter data and comparison to micrometeorological ET₀ predictions. *Agricultural Water Management*, **2007**, 88, 141-146.

PodĎakovanie

Táto práca bola podporovaná grantovou agentúrou VEGA 2/0062/16, a tiež je výsledkom realizácie projektu: Dobudovanie infraštruktúry hydrologických výskumných staníc, ITMS kód 26210120009, podporovaný výskumným a vývojovým operačným programom financovaným z ERDF.

Kontakt:

RNDr. Andrej Tall, PhD.

Ing. Dana Pavelková, PhD.

Ústav hydrologie SAV, Výskumná hydrologická základňa

Hollého 42, 071 01 Michalovce

+421 (0)56 64 251 47, tall@uh.savba.sk