

Stanje vlažnosti tal v odvisnosti od predhodnih padavin – primerjava meritev v parkih v Sloveniji in na Madžarskem

Katarina Zabret*, Zoltan Gribovszki**, Peter Kalicz**, Lana Radulović*,
Mojca Šraj*, Nejc Bezak*

Povzetek

Stanje vlažnosti tal je pomembna okoljska spremenljivka, ki vpliva na hidrološke in ekološke procese. V primeru pomanjkanja merjenih ali modeliranih vrednosti lahko vlažnost v tleh posredno ocenimo s predhodnim padavinskim indeksom (API), ki podaja uteženo vsoto padavin v določenem obdobju pred tem. Na raziskovalnih ploskvah v parkih v Ljubljani in v Šopronu (Madžarska) smo analizirali kako dolgo predhodno obdobje padavin najbolj oceni stanje vlažnosti tal na odprtem in pod borovci. V primeru parka v Šopronu so za oceno stanja vlažnosti tal bolj primerna daljša obdobja med 20 in 40 dni v obeh primerih, med tem ko v Ljubljani na odprtem zadostuje med 5 in 10 dni, pod borovci pa 10 do 20 dni. Ob upoštevanju prepuščenih padavin se predhodno obdobje padavin, ki podaja najboljše ujemanje s stanjem vlažnosti tal pod borovci, na splošno podaljša.

Ključne besede: padavine, prepuščene padavine, vlažnost tal, predhodni padavinski indeks (API), mestni park

Key words: rainfall, throughfall, soil moisture, antecedent precipitation index (API), urban park

Uvod

Vlažnost tal je pomemben element hidroloških in ekoloških procesov, saj vpliva na razpoložljivost vode, evapotranspiracijo, dinamiko odtekanja ter izmenjavo energije med zemeljskim površjem in ozračjem. Deluje kot povezava med padavinami, površinskimi in podzemnimi vodami, zato je njeno spremljanje ključno za razumevanje vodne bilance (Brocca in sod., 2010; Zhao in sod., 2019). Meritve vlažnosti tal so bistvene pri upravljanju vodnih virov, stabilnosti ekosistemov in napovedovanju naravnih nesreč.

Padavinski dogodki pomembno vplivajo na vlažnost tal, pri čemer se odzivi razlikujejo glede na njihovo globino in rabo (Dai in sod., 2022). Padavine vplivajo predvsem na površinske plasti tal, medtem ko se globlje plasti zaradi dinamike infiltracije, črpanja vode in porabe preko koreninskih sistemov odzivajo z zamikom (Dai in sod., 2022). Intenzivnost padavin, trajanje in predhodna vlažnost tal dodatno močno vplivajo na te vzorce (Zhang in sod., 2022).

Vegetacija ima pomembno vlogo pri uravnavanju vlažnosti tal. Prestrežanje padavin zmanjša količino padavin, ki dosežejo tla pod vegetacijo, in je eden izmed procesov, ki uravnavajo vodno bilanco (Zabret in sod., 2023). Lebar in drugi (2023) so pokazali, kako padavine in lokacija pod različnimi drevesnimi vrstami vplivajo na časovni odziv prostorninske vsebnosti vode v tleh (PVV), pri čemer so sezonska nihanja tesno povezana z vegetacijskimi obdobji (fenofazami).

Za merjenje in ocenjevanje vlažnosti tal so bile razvite različne metode. In-situ tehnike, kot so senzorji vlage v tleh, zagotavljajo natančne točkovne podatke, vendar imajo omejeno

* Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamova 2, Ljubljana

** University of Sopron, Geomatics and Civil Engineering, Hydrology, Sopron, Hungary

prostorsko pokritost (Zhao in sod., 2019). Tehnologije daljinskega zaznavanja omogočajo pregledovanje vrednosti na večjih območjih, vendar te zaradi omejene ločljivosti niso nujno najbolj točne (Edokossi in sod., 2020). Hidrološki modeli združujejo meritve z okoljskimi parametri, vendar zahtevajo obsežne vhodne podatke in so za velika območja računsko intenzivni (Zhao in sod., 2019). Ocenjevanje vrednosti vlažnosti tal pa je mogoče tudi preko drugih spremenljivk, na primer z upoštevanjem padavin. Predhodni padavinski indeks (ang. *Antecedent Precipitation Index, API*) je preprost kazalnik za ocenjevanje vlažnosti tal na podlagi kumulativnih podatkov o predhodnih padavinah (De Moraes in sod., 2024).

Uporaba indeksa API je razširjena predvsem za območja, kjer neposredne meritve niso na voljo (De Moraes in sod., 2024). Poleg izračuna približne ocene vlažnosti tal ter napovedovanja odtoka, se API uporablja tudi za napovedovanje zemeljskih plazov in drugih hidroloških odzivov. Nedavne spremembe formulacij API, kot je vključitev temperaturno odvisnih koeficientov in največje zmogljivosti zadrževanja vode, so izboljšale njegovo natančnost in razširile njegovo uporabo (Zhao in sod., 2019; De Moraes in sod., 2024). Zhao in drugi (2019) so na primer dokazali, da spremenjena enačba za izračun API dobro korelira z opazovano vlažnostjo tal in izboljšuje pragove za napovedovanje zemeljskih plazov.

V okviru mednarodnega slovensko-madžarskega projekta smo v manjšem parku v Ljubljani in v botaničnem vrtu v Šopronu vzpostavili raziskovalni območji s parnimi ploskvami. Na obeh lokacijah se ena ploskev nahaja na odprtem in omogoča meritve padavin na prostem, druga pa pod borovci, kjer spremljamo prepuščene padavine. Vzpostavljene meritve na parnih ploskvah omogočajo analizo prestrezanja padavin ter vpogled v to, kako spremembe vegetacije in rabe tal vplivajo na vlažnost tal (Orosz in sod., 2024).

Opis raziskovalnih ploskev in merilnih metod

Raziskava temelji na primerjavi meritev v mestnih parkih na dveh lokacijah, v Ljubljani in v Šopronu na Madžarskem (slika 1). Obe mesti se po Köppen-Geigerjevi klasifikaciji uvrščata v kategorijo Cfb (zmerno toplo vlažno podnebje s toplim poletjem). Vsaka lokacija obsega dve ploskvi, eno na odprtem, kjer potekajo meritve padavin, in eno pod borovci, kjer potekajo meritve prepuščenih padavin. Na vseh štirih ploskvah pa potekajo tudi meritve vlažnosti tal.

V Ljubljani meritve potekajo na raziskovalni ploskvi, ki obsega 600 m² in se nahaja v manjšem parku ob stavbi Oddelka za okoljsko gradbeništvo UL FGG. Na zahodnem delu ploskve rasteta dve skupini dreves, navadni brezi (*Betula pendula* Roth.) in črna borovca (*Pinus nigra* Arnold), katerih krošnje se med seboj ne prekrivajo, vzhodni del ploskve pa obsega čistina, prekrita s travnato površino.

Padavine na prostem merimo z dvema avtomatskima dežemeroma Onset RG2-M z zbirno površino 186 cm², ki sta postavljena na čistini. Prepuščene padavine, ki predstavljajo padavine, ki dosežejo tla pod drevesi, merimo z dvema ostrorobima koritom površine 0,75 m², enim z avtomatskim merilnikom in enim z ročnim odčitavanjem.

Meritve vlažnosti tal (PVV) se izvajajo s senzorji TEROS 10, ki so nameščeni na odprtem in pod borovci v treh globinah (16, 51 in 74 cm). Senzorji so s kabli povezani na zapisovalnika podatkov ZL6, ki meritve s senzorjev zabeležijo vsakih 20 minut (Lebar in sod., 2022).



Slika 1 – Lokaciji raziskovalnih ploskev

Na Madžarskem je raziskovalna ploskev vzpostavljena v botaničnem vrtu Univerze v Šopronu, v neposredni bližini univerzitetnih stavb. Ploskev na odprtem se nahaja na lokaciji nekdanje meteorološke postaje državne merilne mreže, kjer še danes potekajo meteorološke meritve. Ploskev pod drevesi pa je postavljena približno 100 m jugozahodno od čistine.

Meritve padavin na prostem potekajo ob meteorološki postaji in se izvajajo s Hellmannovim aluminijastim dežemerom z z zbirno površino 200 cm². Prepuščene padavine pod borovci (*Pinus nigra* Arnold) pa se zbirajo s tremi zbirnimi koriti, vsako s površino zajema 0,2 m² (0,2 m x 1,0 m). Zbrane padavine so merjene ročno, dnevno po vsakem padavinskem dogodku.

Vlažnost v tleh je merjena dnevno v petih točkah na vsaki ploskvi z uporabo prenosnega sistema Fieldscout TDR (Time Domain Reflectometry) 300. Globina meritev je odvisna od dolžine merilne palice inštrumenta in znaša 7,6 cm. Merilnik določa navidezno dielektrično konstanto tal z merjenjem časa med oddajanjem visokofrekvenčnih signalov, ki vstopajo v elektrodo, in odbojem od konca elektrode. Na podlagi izmerjenega časa potovanja je PVV določena po kalibracijski enačbi merilnega instrumenta.

Analiza obsega podatke, zbrane v obdobju enega leta, od 1. 8. 2023 do 31. 7. 2024 na obeh raziskovalnih ploskvah, in je razdeljena na štiri sezone (pomlad, poletje, jesen in zima). Z upoštevanjem dnevnih vrednosti padavin in prepuščenih padavin smo izračunali vrednost indeksa API za $n = 5, 10, 20, 30$ in 40 dni. Uporabili smo osnovno enačbo (Orosz in sod., 2024):

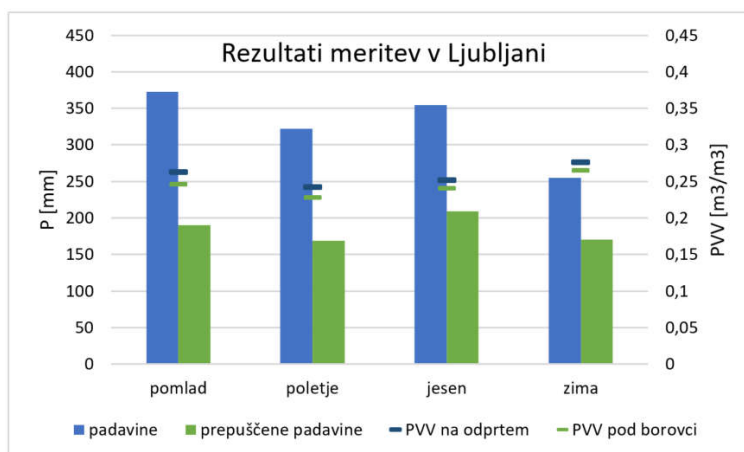
$$API_n = \sum_{i=1}^n p_i \cdot h_i$$

kjer je h_i količina padavin i -ti dan pred opazovanim dnem in p_i linearno padajoč utežni faktor, pri čemer je vrednost p_1 enaka 1, p_n pa 0.

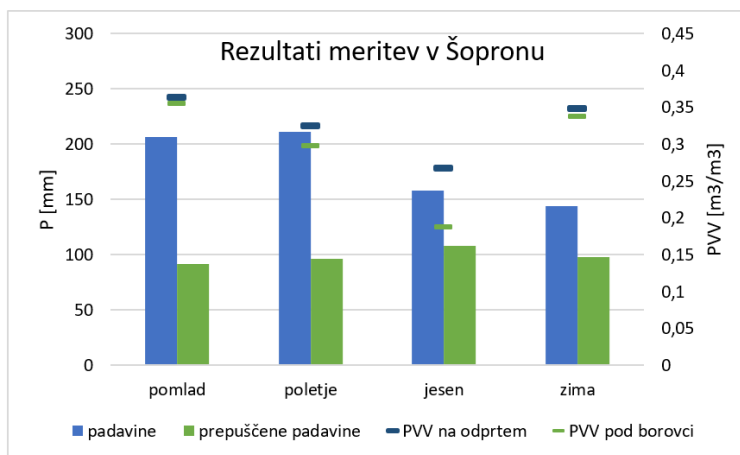
Za vsak dan smo določili tudi vrednost PVV na vsaki ploskvi. V primeru ploskev v Ljubljani, kjer meritve potekajo avtomatično na treh globinah, smo upoštevali vrednosti izmerjene na globini 16 cm ob 8. uri zjutraj. V tem času so namreč običajno potekale meritve na ploskvah v Šopronu, izbrana globina meritev PVV pa je najbližja globini meritev v Šopronu (7,6 cm). Vpliv predhodnih padavin na stanje vlažnosti tal smo določili glede na koeficient korelacije med posamezno vrednostjo API_n in PVV.

Rezultati in diskusija

V obdobju med 1. 8. 2023 in 31. 7. 2024 smo na raziskovalni ploskvi v Ljubljani izmerili 1304 mm padavin na odprtem in 738,2 mm prepuščenih padavin pod borovci. Borovci so tako v tem obdobju prepustili 56,6 % padavin. Količina padavin v posameznih sezonah je bila podobna, le v zimskem obdobju je bilo zabeleženih nekaj manj padavin. Delež prepuščenih padavin je bil najvišji jeseni (28 %), vendar prav tako ni bistveno odstopal glede na posamezne sezone (slika 2). PVV je na odprtem v opazovanem obdobju v povprečju znašal 0,258 m³/m³ in je bil najnižji poleti, enak 0,242 m³/m³. Vlažnost tal pod borovci je bila v povprečju za 0,013 m³/m³ nižja kot na prostem, razlika pa je bila najvišja spomladi (slika 2).



Slika 2 – Izmerjene vrednosti padavin, prepuščenih padavin in povprečne prostorninske vsebnosti vode (PVV) v tleh v obravnavanem obdobju na ploskvah v Ljubljani

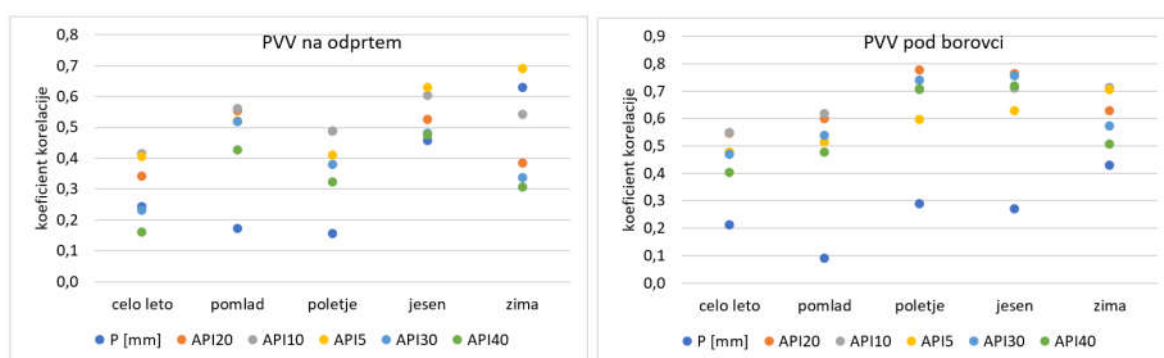


Slika 3 – Izmerjene vrednosti padavin, prepuščenih padavin in povprečne prostorninske vsebnosti vode (PVV) v tleh v obravnavanem obdobju na ploskvah v Šopronu

V opazovanem obdobju enega leta smo na raziskovalni ploskvi v Šopronu skupaj izmerili 720,9 mm padavin in 394,4 mm prepuščenih padavin. Borovci na Madžarskem so prepustili podobno količino padavin kot v Ljubljani, 54,7 %. Največ padavin je padlo spomladi in poleti, najmanj pa pozimi, med tem ko je bil delež prepuščenih padavin (27 %) prav tako najvišji v jeseni (slika 3). Vlažnost tal je bila v povprečju višja kot na ploskvah v Ljubljani, kar je lahko posledica različnih globin meritev (7,6 cm v Šopronu in 16 cm v Ljubljani). Na

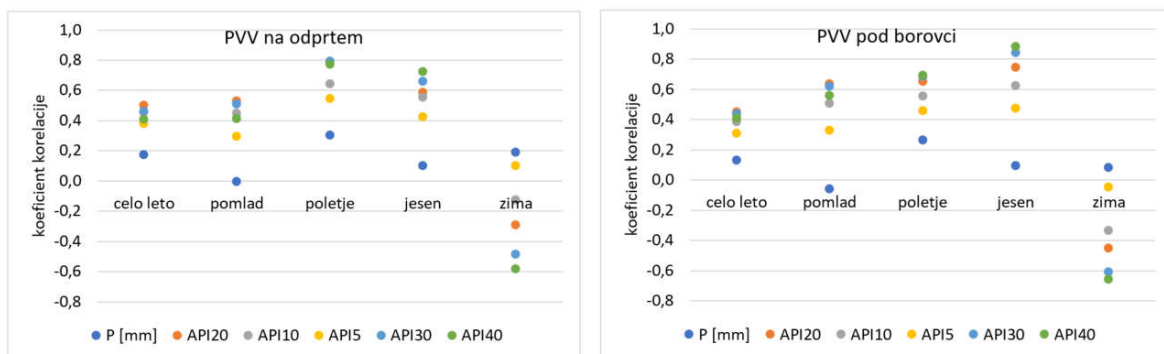
odprtem je PVV v povprečju znašala $0,326 \text{ m}^3/\text{m}^3$, pod drevesi pa $0,295 \text{ m}^3/\text{m}^3$. Tudi v tem primeru je bila vlažnost tal nižja pod drevesi v povprečju za $0,025 \text{ m}^3/\text{m}^3$, najnižje vrednosti pa so bile na obeh ploskvah izmerjene v jeseni (slika 3).

Za posamezne ploskve na obeh lokacijah smo preverili odvisnost stanja vlažnosti tal glede na indeks API ob upoštevanju različno dolgega obdobja predhodnih dni. V primeru ploskve na odprtem v Ljubljani stanje vlažnosti tal v obdobju celega leta najbolje opiše API_{10} (predhodne padavine v obdobju 10 dni pred izmerjeno vrednostjo PVV) s koeficientom korelacije 0,415 (slika 4). Ob upoštevanju posameznih sezon je ujemanje med indeksi in PVV višje, spomladi in poleti najboljše rezultate dobimo ob upoštevanju API_{10} , jeseni in pozimi pa ob upoštevanju API_5 . Stanje vlažnosti tal pod borovci ob upoštevanju padavin, izmerjenih na prostem, v obdobju celega leta prav tako z najvišjo vrednostjo koeficienta korelacije 0,548 opiše API_{10} , ki izkazuje najboljšo korelacijo tudi z vlažnostjo tal spomladi in pozimi (slika 4). Poleti in jeseni pa najboljše rezultate dobimo ob upoštevanju daljšega obdobja predhodnih padavin (API_{20}).



Slika 4 – Koeficienti korelacije za API_n in PVV na ploskvah v Ljubljani

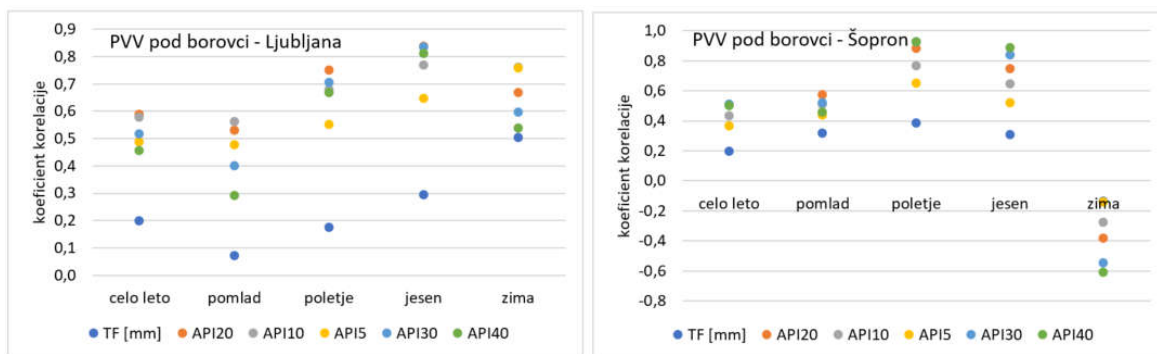
Na odprti ploskvi v Šopronu je v obdobju celega leta stanje vlažnosti tal najbolj opisano z vrednostjo API_{20} , pri kateri je dosežen koeficient korelacije 0,503 (slika 5). Obdobje 20 dni je najbolj primerno tudi za oceno PVV v spomladanskem obdobju, med tem ko poleti in jeseni najvišje vrednosti korelacijskih koeficientov dobimo ob upoštevanju daljšega niza dni, 30 dni poleti in 40 dni jeseni. Zelo podobne rezultate dobimo tudi za vrednosti PVV pod borovci, saj so najvišji koeficienti korelacije v obdobju celega leta in spomladi doseženi ob upoštevanju API_{20} , poleti in jeseni pa ob upoštevanju API_{40} . V zimskem času so koeficienti korelacije med indeksom API in PVV na obeh ploskvah tudi negativni, kar je povezano z nizko količino padavin v večjem delu obdobja in kljub temu visoko vlažnostjo tal (slika 3).



Slika 5 – Koeficienti korelacije za API_n in PVV na ploskvah v Šopronu

Za ploskvi pod borovci smo vrednosti predhodnega padavinskega indeksa izračunali še ob upoštevanju prepuščenih padavin. V primeru ploskve v Ljubljani smo med posameznimi

vrednostmi API_n in PVV pod borovci opazili višje vrednosti koeficientov korelacije, ki pa so v večini primerov doseženi za daljša obdobja predhodnih padavin (API_{20}). Pri primerjavi rezultatov za ploskev v Šopronu pa bistvenih razlik nismo opazili (slika 6).



Slika 6 – Koeficienti korelacije za API_n izračunan na podlagi prepuščenih padavin (TF) in PVV na ploskvah pod borovci

Zaključki

Vlažnost tal je pomemben element hidrološkega kroga in vpliva na številne naravne procese. Odvisna je od raznih spremenljivk, ki so vezane na podnebje, lastnosti tal, rabo tal in prisotnost vegetacije. Vlažnost tal lahko posredno ocenimo z upoštevanjem stanja predhodnih padavin glede na izbrano časovno obdobje. Čas trajanja izbranega časovnega obdobja je ključni dejavnik pri tem načinu ocenjevanja vlažnosti tal.

V predstavljeni analizi smo primerjali učinkovitost ocenjevanja vlažnosti tal glede na trajanje obdobja predhodnih padavin. Upoštevali smo podatke z dveh lokacij, ki se sicer nahajata v območju s podobnim podnebjem, vendar izkazujeta veliko razliko v letni količini padavin. Ploskvi v Ljubljani in v Šopronu se razlikujeta tudi glede na vrsto tal, med tem ko sta raba tal in vegetacija na obeh raziskovalnih ploskvah podobni. Vpliv različnih padavinskih vzorcev in lastnosti tal se kaže predvsem v tem, da v Ljubljani stanje vlažnosti tal v večini primerov bolje ocenimo s krajšimi predhodnimi obdobji padavin (API_5 ali API_{10}), med tem ko so za Šopron rezultati boljši ob upoštevanju daljšega predhodnega obdobja padavin (API_{20} , API_{30} in API_{40}).

Zahvala

Raziskava, predstavljena v prispevku, je bila finančno podprta s strani Javne agencije za raziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije (ARIS) iz državnega proračuna v okviru raziskovalnih projektov J2-4489, N2-0313 (SNN143972), J6-4628 in raziskovalnega programa P2-0180. Raziskava je finančno podprta tudi s strani programa Evropske unije za raziskave in inovacije Horizon Europe preko projekta SpongeScapes (Grant agreement ID 101112738). Dodatno je bila raziskava sofinancirana s strani Ministrstva za izobraževanje, znanost in šport, Medvladnega hidrološkega programa UNESCO IHP.

Reference

- Brocca, L., Melone, F., Moramarco, T., Morbidelli, R. (2010). Spatial-temporal variability of soil moisture and its estimation across scales. *Water Resources Research* 46, W02516. doi: 10.1029/2009WR008016
- Dai, L., Fu, R., Guo, X., Du, Y., Zhang, F., Cao, G. (2022). Soil Moisture Variations in Response to Precipitation Across Different Vegetation Types on the Northeastern Qinghai-Tibet Plateau. *Frontiers in Plant Science* 13m 854152. doi: 10.3389/fpls.2022.854152
- De Moraes, M., Filho, W., Mendes, R., Bortolozo, C., Metodiev, D., Andrade, M., Egas, H., Mendes, T., Pampuch, L. (2024). Antecedent precipitation index to estimate soil moisture and correlate as a triggering process in the occurrence of landslides. *International Journal of Geosciences* 15, 70–86. doi: 10.4236/ijg.2024.151006
- Edokossi, K., Calabria, A., Jin, S., Molina, I. (2020). GNSS-Reflectometry and Remote Sensing of Soil Moisture: A Review of Measurement Techniques, Methods, and Applications. *Remote Sensing* 12(4), 614. doi: 10.3390/rs12040614
- Lebar, K., Zabret, K., Bezak, N., Alivio, M.B., Šraj, M. (2023). Spremljanje vsebnosti vode v tleh v povezavi s padavinami in prepuščenimi padavinami. Raziskave s področja geodezije in geofizike 2022: zbornik del. 28. srečanje Slovenskega združenja za geodezijo in geofiziko, Ljubljana, 26. januar 2023.
- Orosz, K., Herceg, A., Kalicz, P., Zagyvai-Kiss, K.A., Lebar, K., Zabret, K., Bezak, N., Keve, G., Koch, D., Gribovszki, Z. (2024). Black pine-grass paired plot water balance experiment in the botanic garden of Sopron UNI. EGU General Assembly 2024, Vienna, Austria, 14–19 Apr 2024, EGU24-11762. doi: 10.5194/egusphere-egu24-11762.
- Zabret, K., Lebar, K., Šraj, M. (2023). Temporal response of urban soil water content in relation to the rainfall and throughfall dynamics in the open and below the trees. *Journal of Hydrology and Hydromechanics* 71, 210–220. doi: 10.2478/johh-2023-0007
- Zhang, J., Duan, L., Liu, T., Chen, Z., Wang, Y., Li, M., Zhou, Y. (2022). Experimental analysis of soil moisture response to rainfall in a typical grassland hillslope under different vegetation treatments. *Environmental Research* 213, 113608. doi: 10.1016/j.envres.2022.113608
- Zhao, B., Dai, Q., Han, D., Dai, H., Mao, J., Zhuo, L., Rong, G. (2019). Estimation of soil moisture using modified antecedent precipitation index with application in landslide predictions. *Landslides* 16, 2381–2393. doi: 10.1007/s10346-019-01255-y