

Izboljšanje določitve močno vezane vode v postopku umerjanja merilnika vode v tleh, ki temelji na zaznavanju nevtronov

Improving the determination of lattice water in the calibration process of cosmic ray neutron sensor

Nejc Golob, Špela Srdoč, Žiga Švegelj, Vesna Zupanc, Rozalija Cvejič

UDK: 551.579:543.613.2
Klasifikacija prispevka po COBISS.SI: 1.01
Prispelo: 13. 3. 2025
Sprejeto: 29. 8. 2025

DOI: doi.org/10.15292/geodetski-vestnik.2025.04.538-553
SCIENTIFIC ARTICLE
Received: 13. 3. 2025
Accepted: 29. 8. 2025

IZVLEČEK

V prispevku obravnavamo bližinsko zaznavanje količine vode v tleh z merilnikom vode v tleh, ki temelji na zaznavanju nevtronov (MVN). MVN omogoča merjenje količine vode v tleh na območju, velikem približno 25 hektarjev. Za pridobivanje kakovostnih podatkov je potrebno zahtevno umerjanje, ki upošteva heterogenost območja in razčlenjuje vire vode v prostoru. Osredotočamo se na postopek za določanje močno vezane vode v tleh, ki je del umerjanja MVN. Primerjali smo dve različici metode sežiga vzorcev za določanje količine močno vezane vode. Prva temelji na sežigu in tehtanju vzorcev pri različnih temperaturah, druga vključuje predhodno obdelavo vzorcev z 10-odstotno raztopino klorovodikove kisline (HCl), ki odstrani karbonate ter omogoči natančnejšo oceno vode, sproščene med 400 in 1000 °C. Razlika med metodama je statistično značilna, s povprečno razliko 0,00140 cm³/cm³. Povprečna količina močno vezane vode je višja pri metodi brez obdelave s HCl. Najvišje vrednosti močno vezane vode so bile izmerjene v globljih slojih (20–25 cm, 30–35 cm), kar je povezano z večjo gostoto tal. Na karbonatnih tleh priporočamo uporabo metode s predhodno obdelavo s HCl, saj zagotavlja zanesljivejše podatke o močno vezani vodi v tleh.

ABSTRACT

In this paper, we discuss continuous proximity sensing of soil water content using cosmic ray neutron sensors for area of about 25 hectares. Acquiring reliable soil moisture data requires a demanding calibration process, which accounts for the area's heterogeneity and identifies various water sources in the environment. We focus on a calibration procedure to determine lattice water in soils. We compared two variations of a sample combustion method to quantify lattice water. The first approach involves combusting and weighing samples at different temperatures; the second includes a pretreatment of samples with a 10% hydrochloric acid solution (HCl), which removes carbonates and enables more accurate determination of water content between 400 and 1000 °C. The difference between the two methods is statistically significant, with an average difference of 0.00140 cm³/cm³. The average measured lattice water content is higher when no HCl pretreatment is used. The highest values of lattice water were measured in deeper soil layers (20–25 cm, 30–35 cm), associated with higher bulk density. On carbonate soils, we recommend the method with HCl pretreatment, as it provides more reliable data on lattice water in the soil.

KLJUČNE BESEDE

merilnik, količina vode, zaznavanje nevtronov, močno vezana voda

KEY WORDS

sensor, soil water content, neutron detection, lattice water

1 Uvod

Razvoj različnih metod zaznavanja količine vode v tleh je za Evropo izjemnega pomena, saj je celina z najhitrejšim naraščanjem temperature zraka na svetu (EEA, 2024), kar povzroča vse pogostejše in intenzivnejše suše (EIA, 2024). Za učinkovito sledenje in obvladovanje suše je v evropskem prostoru sprejetih več strategij in zakonodajnih okvirov. Med njimi izstopata Direktiva o spremljanju in odpornosti tal, ki obravnava tudi upravljanje vode v tleh, ter Okvirna direktiva o vodah (2000/60/ES), osredotočena na varstvo in kakovost vodnih virov, pri čemer imajo zdrava tla ključno vlogo pri zadrževanju in filtraciji vode.

S trajnostnimi praksami, ki izboljšujejo zadrževanje vode, razpoložljivost hranil, biotsko pestrost, shranjevanje ogljika v tleh in strukturo tal, krepimo sposobnost tal, da rastline v njih lažje prenesejo ekstremne razmere ter se hitreje obnovijo po izrednih dogodkih. V raziskavah učinkovitosti na naravi temelječih rešitev, ki povečujejo zadrževanje vode in razpoložljivost hranil v tleh (Magnier et al., 2024), so ključne sprotne meritve količine vode v tleh (Tuure et al., 2021). Te so prav tako pomembne pri spremljanju razvoja suše, ki je eden najzahtevnejših globalnih izzivov pri upravljanju voda in tal (Zhang et al., 2025; Scheffele et al., 2025) in namakanja kmetijskih površin, kjer nam pomagajo zmanjšati porabo vode in energije ter nastajanje toplogrednih plinov (Wenzel et al., 2025).

Meritve vode v tleh ločimo na neposredne (gravimetrična določitev vode v tleh) in posredne. Med posrednimi ločimo med daljinskim in bližinskim zaznavanjem ter zaznavanjem na kraju samem. Raziskave so usmerjene v optimizacijo merilnih naprav, kombiniranje merilnih naprav glede na kompleksnost krajine, v kateri spremljamo vodo v tleh, ter strojno učenje, pri čemer se osredotočamo na napoved količine vode v tleh (Li et al., 2021; Akash et al., 2024; Zhang et al., 2023).

Tradicionalne metode merjenja količine vode v tleh, kot je na primer gravimetrično vzorčenje in merjenje sile vezave vode na talne delce s točkovnimi merilniki, so delovno intenzivne, prostorsko omejene in težko izvedljive na večjih območjih (Cvejić et al., 2020; Žvokelj et al., 2024; Pečan et al., 2021). Poleg tega so v kmetijski krajini, kjer je sprotno spremljanje razvoja suše še posebej pomembno, pogoste poškodbe talnih merilnikov zaradi obdelave tal, dodatno pa tudi zaradi divjih živali. Na drugi strani niti satelitski posnetki pogosto ne omogočajo dovolj visoke prostorske (>1 km) in globinske ločljivosti (dosežejo le zgornjih 0–5 cm tal) za zanesljivo oceno dejanske količine vode v zgornjih plasteh tal, zlasti na heterogenih kmetijskih površinah, kjer vegetacija, topografija in raba tal močno vplivajo na natančnost zaznavanja (Entekhabi et al., 2010; Gruber et al., 2013; Colliander et al., 2017).

Točkovno gravimetrično določanje količine vode v tleh je mogoče nadgraditi z meritvami daljinskega zaznavanja, ki omogočajo sprotno spremljanje količine vode v tleh na večjih območjih (Pintar in Skudnik, 2024). Z njimi lahko spremljamo in kartiramo različne procese in lastnosti zemeljskega površja, pri čemer natančnost pridobljenih podatkov določa prostorska ločljivost (Oštir, 2006; Veljanovski et al., 2012). Z razvojem in vse pogostejšo uporabo daljinskega zaznavanja (van der Velden et al., 2025) so se izboljšale in razširile možnosti merjenja količine vode v tleh, vendar so v kompleksnih krajinah omejeno uporabne. Poleg tega je globina meritve vode v tleh omejena na zgornjih 0–5 centimetrov, medtem ko je glavna koreninska masa kmetijskih rastlin praviloma globlja.

Zato so se v izrazito heterogenih krajinah za spremljanje kmetijske suše začele uporabljati metode bližinskega zaznavanja (angl. *proximity ali proximal sensing*) (Zhang in sod., 2023; Babaeian in sod., 2019), kamor umeščamo metode za merjenje vode v tleh, ki niso niti daljinsko zaznavanje niti zaznavanje na mestu, ampak zaznavajo v bližini tal, do nekaj deset metrov nad tlemi. V tem prispevku se osredotočamo na uvedbo meritev vode v tleh, ki temeljijo na zaznavanju nevtronov. Bližinsko zaznavanje vsebnosti vode v tleh z MVN ponuja tudi delno rešitev izziva pogostih poškodb talnih merilnikov. Merilnik je namreč nadzemen in ni vkopan v tla, zaradi česar je manj izpostavljen poškodbam, povezanim z obdelavo tal in aktivnostjo živali. Omogoča nam zvezno merjenje vsebnosti vode v tleh v srednjem merilu (do 25 hektarjev) (Iwema et al., 2021).

Pri metodi MVN detektiramo nevtrone in število zaznanih nevtronov uporabimo v izračunu količine vode v tleh. Primarne kozmične žarke, ki izvirajo iz Sonca, zvezd v naši galaksiji in iz oddaljenih galaksij, sestavljajo predvsem protoni (jedra vodika), katerih delež znaša 89 %. Preostanek so jedra helija (približno 10 %) in v manjšem deležu (okoli 1 %) tudi težja jedra. Ob vstopu v Zemljino atmosfero delci z visoko energijo trkajo z jedri atomov v zraku. Iz jedrskih reakcij izidejo različni sekundarni delci, med njimi hitri nevtroni. Slednji v interakciji z lahkimi jedri (predvsem vodikom) v tleh postopoma izgubljajo energijo in prehajajo v epitermično oziroma termično energijsko območje (moderacija). Ker sta masi jedra vodika in nevtrona zelo podobni, je učinkovitost upočasnjevanja (moderacije) hitrih nevtronov odvisna predvsem od vsebnosti vodika v tleh. Večja kot je količina vode v tleh, več hitrih nevtronov se upočasni do termičnih energij, zato izide iz tal in doseže detektor nad površjem manj epitermičnih nevtronov. Število epitermičnih nevtronov, zaznanih nad površjem, je torej negativno korelirano s količino vode v tleh (Weimar, 2022).

V primerjavi s termičnimi nevtroni so epitermični nevtroni podvrženi predvsem moderaciji in veliko manj absorpciji. Ker na število termičnih nevtronov ne vpliva samo proces moderacije, ampak tudi absorpcija, za meritve količine vode v tleh niso zanimivi. Zaradi velikega prostorskega dometa nevtronov (od nekaj deset do več sto metrov, odvisno od količine vode v tleh in tipa tal) lahko merilniki, ki temeljijo na zaznavanju nevtronov, v primerjavi s klasičnimi točkovnimi merilniki izmerijo povprečno količino vode v tleh na širšem območju. Na kakovost meritev vplivajo lastnosti tal in raba tal ter prostora, energijski spekter nevtronov in sama postavitev detektorja (vpadni kot), vlažnost zraka ter zračni tlak (Rosolem et al., 2013; Iwema et al., 2021; Heidbüchel et al., 2016), geografski parametri (geografska širina in nadmorska višina) in Sončeva aktivnost ter tehnološke lastnosti merilnika. Rezultat meritev predstavlja povprečno količino vode v tleh na opazovanem območju in je pogojen z enakomerno razporeditvijo vode v tleh (ter matično podlago – odvisno od globine tal) v prostoru. Če je porazdelitev vode v prostoru neenakomerna, meritve ne odražajo količine vode v tleh v posameznih točkah na opazovanem območju. Metoda ne omogoča razlikovanja med vodikom v organski snovi in v molekuli vode. Ločevanje je mogoče le na podlagi večparametrskje umeritve merilnika.

MVN imajo v primerjavi s talnimi merilniki zahtevnejši umeritveni postopek, pri katerem vire vode v prostoru za izboljšanje točnosti meritve poskušamo čim bolj razčleniti (Iwema et al., 2021; Baroni et al., 2018). Pri tem ločimo med vodo v vodnih telesih, do določene globine vodo v tleh ter vodo v in na rastlinskem pokrovu.

Vodo v tleh ločimo na prosto dostopno vodo (voda v makroporah in del kapilarne vode) ter na močno vezano vodo, ki je rastlinam nedostopna. To je na primer voda, močno vezana med strukturne plasti glinenih mineralov in na površino oziroma v kristalno rešetko karbonatov ter ostalih mineralov. Boga et al. (2013) ugotavljajo, da lahko živa biomasa, močno vezana voda in organska snov v suhih razmerah zmanjšujejo merilno območje MVN v globino za 50 %. Delež močno vezane vode v tleh je odvisen tudi od mineralogije in teksture tal. V glinenih tleh je pričakovana vrednost močno vezane vode med 0,05 in 0,15 cm³/cm³ (5–15 vol. %), v peščenih in meljastih tleh (z manjšim deležem gline) pa je pričakovana količina vode pod 0,02 cm³/cm³ (manj kot 2 vol. %) (Barbosa et al., 2021; Wu et al., 2023; Wang et al., 2024). Opredelitev močno vezane vode je torej ključna za izboljšanje kakovosti meritev MVN (Wu et al., 2023; Boga et al., 2013; Baroni et al., 2018; Heidbuechel et al., 2016; Franz et al., 2012; Zhang et al., 2023; Avery et al., 2016; Wang et al., 2024), na kar se osredotočamo v pričujočem prispevku.

V prispevku primerjamo dve različici metode s popolnim sežigom (angl. *LOI – loss on ignition*) vzorca za določanje količine močno vezane vode v tleh. Prva metoda temelji na postopnem segrevanju in tehtanju vzorcev pri različnih temperaturah (do 1000 °C). Druga metoda vključuje predhodno obdelavo vzorcev z 10-odstotno klorovodikovo kislino (HCl) za odstranitev karbonatov (primarno apnenca CaCO₃ in dolomita CaMg(CO₃)₂). Slednja omogoča natančnejšo določitev količine močno vezane vode, sproščene med 400 in 1000 °C, saj sprememba mase zaradi razgradnje karbonatov ne vpliva na končni rezultat. Hipoteza je bila, da metoda LOI z odstranitvijo karbonatov s predhodno obdelavo vzorcev s HCl zagotavlja zanesljivejše rezultate pri določanju močno vezane vode v tleh v primerjavi s standardnim postopkom brez predhodne obdelave, saj zmanjšuje vpliv karbonatov na določitev močno vezane vode.

2 Materiali in metode

2.1 Opis območja

Umerjanje merilnika je potekalo na poskusnem polju Biotehniške fakultete v Ljubljani (46°02'58.4"N 14°28'15.7"E). Za ravninsko območje je značilna mozaična kmetijska raba (njivska raba, travinje, gozd, poljske poti) z urbanimi elementi (stavbe, lope, asfaltirane površine). Na severnem robu polja teče regulirana struga Glinščice. Tla v merilnem območju so heterogena. Glede na World Reference Base for Soil Resources (WRB klasifikacija; IUSS, 2014) spadajo v skupino eutric oziroma mollic gleysol, po slovenski klasifikaciji tal bi jih opisali kot psevdoglejena oziroma hipoglejena evtrična rjava tla, kar pomeni, da je za območje značilno zastajanje večinoma padavinske (posledica težje teksture ter večje gostote tal) ter ponekod tudi podzemne vode. Območje je bilo v preteklosti hidromeliorirano zaradi izgradnje osuševalnega sistema. Gladina nasičenega območja v tleh je na 1,2–1,5 metra (gladina Glinščice). Povprečna dolgoletna temperatura zraka v obdobju 1981–2010 je bila 10,9 °C, povprečna letna višina padavin je 1362 mm (ARSO, 2024). V času izvajanja meritev v obdobju od maja do septembra 2024 je bilo polje v mešani rabi. Prevladovala so poljedelske kulture (pšenica, koruza) in trajni travniki. V 200-metrskem radiju merilnika so delno zajete tudi stavbe (slika 1).



Slika 1: Umeritvena mreža merilnika, ki temelji na zaznavanju nevtronov (vir podatkov o rabi tal: MKGP, 2024).

2.2 Analiza tal

Za standardno pedološko analizo tal (SPA), namenjeno celostni kemijski analizi lastnosti tal, smo za globino 0–20 centimetrov izbrali dve reprezentativni točki – eno na njivi in eno na travniku. Ker je osrednji namen prispevka primerjava dveh različic metod določanja močno vezane vode, SPA ni bila potrebna za vse vzorčne točke, saj za to zadostuje analiza organske snovi in karbonatov. Predpostavili smo, da so druge lastnosti tal na preostalih vzorčnih točkah na območju primerljive z lastnostmi reprezentativnih točk, ločeno za vsako rabo. SPA zajema merjenje vsebnosti organske snovi (O.S.) po SIST ISO 10694 ter SIST ISO 10693, kjer z analizo O.S. hkrati dobimo podatke o vsebnosti karbonatov (%) skupnega C in N (%) ter C_{org} (%); analizo vsebnosti celokupnega dušika ter ogljika (SIST ISO 10694); vsebnosti rastlinam dostopnega fosforja ter kalija z ekstrakcijo v amonlaktatu (interna metoda, Biotehniška fakulteta, Katedra za pedologijo in varstvo okolja); vsebnosti bazičnih kationov (ISO/TS 22171); analizo pH v $CaCl_2$ (SIST ISO 10390) in določitev teksturnega razreda (SIST ISO 11277). Gostoto tal (ρ_p) smo določili z odvzemom neporušenih vzorcev tal po metodi ISO 11272.

2.3 Opis delovanja merilnika

Merilnik, ki temelji na detekciji nevtronov, je bil nameščen na nenamakanem območju poskusnega polja. Za detekcijo delcev se pogosto uporabljajo naprave, ki izkoriščajo lastnosti scintilatorjev. Scintilator je snov, ki luminiscira, kar pomeni, da energijo, prejeto iz različnih vrst sevanja (alfa, beta, gama, nevtron-

sko sevanje ipd.), ponovno odda v obliki svetlobe. Če scintilator povežemo s fotopomnoževalko, lahko izsevane fotone oziroma scintilacije pretvorimo v električne signale, ki jih analiziramo, in tako pridobimo informacije o prejetem sevanju.

Merilnik Finapp 3, ki je bil uporabljen v študiji, temelji na uporabi scintilatorja, izdelanega iz cinkovega sulfida in litijevega fluorida. Cinkovemu sulfidu je za večjo učinkovitost dodano srebro (ZnS:Ag), litij pa nastopa v spojini LiF predvsem v obliki izotopa ^6Li . Kot vezivo za povezovanje obeh spojin je uporabljen silikon. Tanka plast scintilatorja je obdana s 15 milimetrov debelim slojem polietilena visoke gostote (HDPE), ki izboljša občutljivost detektorja nevtronov, saj epitermične nevtrone, katerih število je korelirano s količino vode v opazovanem mediju, dodatno moderira (upočasni). Detektor lahko poleg nevtronov zazna tudi mione.

Nevtron, ki ga zajame jedro izotopa litija ^6Li , povzroči jedrsko reakcijo, iz katere izideta delec alfa (^4He) in tritij (^3H), sprost pa se tudi približno 5 MeV energije. Alfa delec in tritij v nadaljevanju interagirata s kristali cinkovega sulfida, pri čemer se tvorijo fotoni. Izsevani fotoni so vodeni na fotopomnoževalko, ki jih pretvori v električni signal. V končnem koraku z analizo meritev in dodatnimi izračuni pridobimo podatke o količini vode v opazovanem mediju.

Vse gradnike merilnika krmili tiskano vezje, ki skrbi tudi za zajem in osnovno obdelavo podatkov. Podatki se hranijo v oblaku (oddaljenem strežniku), kjer se izvedejo končni izračuni spremenljivk. Vsi procesi se izvajajo v realnem času. Merilni princip omogoča majhno porabo električne energije, ki znaša 0,4 W (tok 35mA pri napetosti 12 V). Za napajanje naprave skrbi solarni modul z močjo 20 W. Dimenzije merilnika Finapp so $40 \times 30 \times 20$ centimetrov, tehta pa 8 kilogramov (Gianessi et al., 2024).

Za izračun določitev količine vode v tleh (cm^3/cm^3) na podlagi štetja nevtronov je uveljavljena funkcija Desilets et al., 2010. Horizontalni domet merilnika je območje, s katerega merilnik prejme 86 % prešteti nevtronov (Zreda et al., 2008). MCNPX (Monte Carlo N-Particle eXtended; računalniški program za Monte Carlo simulacije jedrskih in drugih delcev) simulacije so pokazale, da je premer dometa merilnika v suhem zraku (redko v praksi) približno 600 metrov in je obratno sorazmeren zračnemu pritisku (Desilets in Zreda, 2013).

2.4 Vloga močno vezane vode v tleh v postopku umerjanja

Za določitev deleža močno vezane vode, ki je potreben za umeritev merilnika, se najpogosteje uporablja metoda s popolnim sežigom (LOI). Pri oblikovanju lastne metode smo upoštevali priporočila avtorjev, ki navajajo, da je vzorce tal treba segrevati do vsaj $550\text{ }^\circ\text{C}$ (Jackson, 1958; Grim, 1968; Mackenzie, 1957; Nayak in Singh, 2007; Brown in Brindley, 1980). Barbosa et al. (2021), ki jih v povezavi z umerjanjem merilnikov, ki temeljijo na zaznavanju nevtronov, povzemajo tudi nekateri drugi avtorji (npr. Gianessi et al., 2024), opisujejo uporabo LOI metode za določitev močno vezane vode s sežigom pri $500\text{ }^\circ\text{C}$ (24 ur) in pri $1000\text{ }^\circ\text{C}$ (12 ur). Nekateri avtorji, npr. Heidbüchel et al. (2016), uporabljajo podobno metodo, kot so jo Ball (1964) in Davies (1974) opisali z enačbo (1).

Enačba (1) ...

$$\theta_{LW} = \frac{m_{400} - m_{1000}}{m_{105}} \rho_{bd} \quad (1)$$

kjer je θ_{LW} močno vezana voda (cm^3/cm^3), m_{105} je masa vzorca tal po sušenju pri 105°C (g), m_{400} je masa vzorca tal po sežigu pri 400°C (g) in m_{1000} je masa vzorca tal po sežigu pri 1000°C (g). Volumska gostota tal (ρ_p) je bila določena kot povprečje vseh vzorcev na globini (g/cm^3), gostota vode (ρ_w) pa je bila privzeta kot $1 \text{ g}/\text{cm}^3$.

2.5 Vzorčenje tal za namen umerjanja

Za določitev močno vezane vode v tleh v merilnem območju merilnika za zaznavanje nevtronov je bila po uveljavljenemu protokolu za umeritev (Zreda et al., 2012; Rosolem et al., 2013) določena vzorčna mreža 18 točk na razdaljah 3, 35, 75 in 120 metrov od merilnika (slika 1). Na vzorcih tal, pridobljenih iz vzorčne mreže, smo za dve globini (0–10 in 10–20 centimetrov) analizirali vsebnost organske snovi in karbonatov. V treh kampanjah vzorčenja smo na globinah 0–5, 10–15, 20–25 in 30–35 centimetrov odvzeli vzorce za določitev količine močno vezane vode. Ker pri metodi LOI ti snovi med segrevanjem oziroma sežigom izhlapiata, vplivata na končno maso vzorca in s tem na izmerjeno količino močno vezane vode v tleh. Ostale talne lastnosti, ki lahko vplivajo na močno vezano vodo, kot je tekstura, smo določili s SPA na reprezentativnih točkah (poglavje 2.2). Vzorčne točke znotraj območja zajemajo dve različni vrsti rabe tal, in sicer njivsko (točke 1–6; 8–11; 14–15, 17–18) ter travinje (točke 7, 12–13, 16). Točka 18 je po dejanski rabi (MKGP) travinje, vendar smo jo obravnavali kot njivsko površino, saj so bila tla zaradi nedavne gradnje okoliških objektov in kasnejšega urejanja okolice večkrat premešana. Vzorčenje je potekalo z nabijalno sondo (neporušeni vzorci, $V = 100 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$).

2.6 Izvedene analize in postopek dela

Za določanje količine močno vezane vode smo uporabili dve metodi, ki temeljita na enakem principu – segrevanju oziroma sežigu vzorcev pri različnih temperaturah ter tehtanju vzorcev na analitski tehtnici (natančnost $0,001 \text{ g}$) po vsakem segrevanju oziroma sežigu. Prva metoda temelji na postopku, ki so ga opisali Heidebüchel et al. (2016). Postopek vključuje postopno segrevanje vzorca: najprej pri 105°C (24 ur), nato pri 400°C (24 ur) in nazadnje pri 1000°C (24 ur). Izguba mase pri teh temperaturah se interpretira kot izhlapevanje proste vode (105°C), izguba organske snovi in dela močno vezane vode (400°C) ter izguba preostale organske snovi, karbonatov ter dela močno vezane vode (1000°C) (Heiri et al., 2001; Hoogsteen et al., 2015; Ball, 1964).

Druga metoda je modifikacija prve in se razlikuje v predpripravi vzorca. Pri drugi metodi smo vzorce pred sušenjem pri 105°C obdelali z 10-odstotno raztopino klorovodikove kisline (HCl), kar je povzročilo raztapljanje in posledično odstranitev karbonatov, na katere je vezan manjši delež vode. Teoretično s tem zmanjšamo napako, ki se pojavi pri prvi metodi zaradi razgradnje karbonatov med segrevanjem na temperaturi med 400 in 1000°C . Razgradnja karbonatov namreč povzroča večjo izgubo mase in lahko vodi v precenitev deleža močno vezane vode, kar je pomembno predvsem v teksturno težjih in karbonatih tleh. Modificirana metoda je tako teoretično natančnejša, saj je razlika v masi med 400 in 1000°C posledica izgorovanja preostanka organske snovi in močno vezane vode, ne pa tudi razgradnje karbonatov kot pri prvi metodi.

Po vzorčenjih smo vzorce takoj prenesli v zapečatenе plastične vrečke (skupno 216 vzorcev). V laboratoriju smo jih stehali, sušili 24 ur v sušilni peči pri temperaturi 105°C , jih ponovno stehali ter določili njihovo volumetrično količino vode (θ_{LW}) in volumsko gostoto (ρ_p). Nato smo vzorce iz vsakega umeritvenega

poskusa združili po globini in jih homogenizirali. Od vsakega od 12 vzorcev na globino smo odvzeli 2 g in jih združili, da smo ustvarili en združen vzorec na globino. Skupaj smo analizirali 36 vzorcev z začetno težo 8 g; en vzorec na globino; štiri globine; tri tehnične ponovitve na globino; trije umeritveni poskusi. Združene vzorce smo zaradi njihove navlažitve na sobno temperaturo še enkrat sušili na 105 °C, jih ohladili v eksikatorju in stehali. Nato smo jih dali v sušilno peč za 24 ur pri temperaturi 400 °C, jih ponovno ohladili v eksikatorju in stehali. Po tem smo vzorce znova dali v peč za 24 ur, tokrat pri temperaturi 1000 °C. Vzorce smo ponovno ohladili v eksikatorju, jih stehali in izračunali količino močno vezane vode (enačba 1).

Podatke smo analizirali v programskem okolju R (R Core Team, 2024) s paketi tidyrr, ggplot2, dplyr in rstatix. Normalnost podatkov smo ocenili s Shapiro-Wilkovim testom, pri čemer smo v primeru odstopanj uporabili log-transformacijo za kasneje uporabljeno ANOVO. Razlike med metodama smo preverili z Wilcoxonovim testom za odvisne vzorce, razlike med metodama glede na globino pa smo ocenili s ponovljeno enosmerno analizo variance (Repeated Measures ANOVA). Za ugotavljanje povezanosti metod smo uporabili Spearmanov korelacijski koeficient. Vpliv globine in gostote (neodvisna spremenljivka) na količino močno vezane vode (odvisna spremenljivka) smo ocenili z linearno regresijo. Statistično značilne razlike smo sprejeli pri p-vrednosti, manjši od 0,05.

3 Rezultati

3.1 Standardna pedološka analiza

Rezultati SPA zgornjih 20 centimetrov tal (preglednici 1 in 2) kažejo, da travniška tla vsebujejo več melja (57,0 %) in manj gline (22,1 %), medtem ko so njivska tla bolj glinena (29,9 %) z nižjo vsebnostjo melja (51,7 %). Teksturni razred tal je pri travniku meljasta ilovica (MI), pri njivi pa meljasto-glinasta ilovica (MGI), kar pomeni, da so tla na njivi teksturno težja. Travniška tla vsebujejo več organskega ogljika (2,9 %) kot njivska (2,3 %) ter imajo večjo vsebnost karbonatov (1,9 %) kot na njivi (1,0 %).

Preglednica 1: Povzetek rezultatov standardne pedološke analize za obravnavano območje na laboratorijskem polju BF.
Opombe: C_{skupni} – celokupni ogljik, Karb. – vsebnost karbonatov, C_{org} – vsebnost organskega ogljika, N_{skupni} – celokupni dušik, TRZ – teksturni razred.

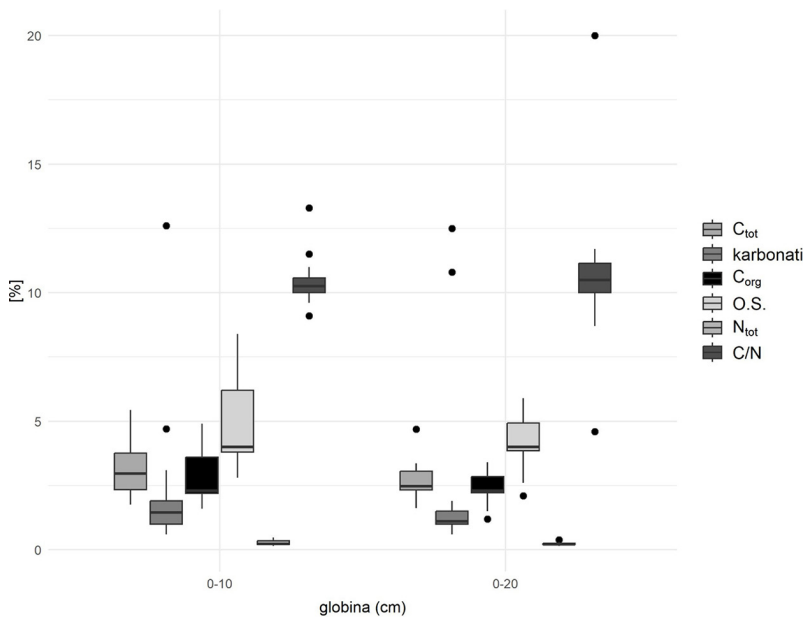
Raba	Globina [cm]	TRZ	pH v CaCl ₂	Pesek	Melj	Glina	C _{skupni}	Karb.	Corg	Org. snov	N _{skupni}
				[%]							
Travnik	0–20	MI	6,9	20,9	57,0	22,1	3,14	1,9	2,9	5,0	0,28
Njiva	0–20	MGI	7,1	18,4	51,7	29,9	2,39	1,0	2,3	4,0	0,22

Preglednica 2: Povzetek rezultatov standardne pedološke analize za obravnavano območje na laboratorijskem polju BF.
Opombe: KIK – kationska izmenjevalna kapaciteta, S – vsota bazičnih kationov, V – nasičenost talnega kompleksa z bazičnimi kationi.

Raba	Globina [cm]	C _{org} / N _{skupni}	P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca	Mg	K	Na	S	KIK	V
			[mg/100g]			[mmolc/100g]					[%]
Travnik	0–20	10,4	6,8	9,2	16,52	3,78	0,19	0,07	20,6	31,19	66
Njiva	0–20	10,5	9,3	16,9	15,66	4,10	0,42	0,05	20,2	34,33	59

3.2 Organska snov, karbonati, ogljik in dušik

Primerjava vsebnosti skupnega ogljika (C_{tot}), organskega ogljika (C_{org}), karbonatov, organske snovi (O.S.) in skupnega dušika (N_{tot}) po globini za tla laboratorijskega polja BF na izbranih lokacijah nakazuje, da imajo vsi parametri višje povprečne vrednosti na 0–10 centimetrih kot pri 10–20 centimetrih, prav tako je variabilnost vseh parametrov večja pri globini 0–10 centimetrov kot pri 10–20 centimetrih (slika 2).



Slika 2: Primerjava vsebnosti skupnega ogljika (C_{tot}), organskega ogljika (C_{org}), karbonatov, organske snovi (O.S.) in skupnega dušika (N_{tot}) po globini za tla laboratorijskega polja BF.

Glede na rezultate analiz tal sklepamo, da so tla humozna do močno humozna in točkovno karbonatna (preglednica 3).

Preglednica 3: Vsebnost organske snovi in karbonatov glede na rabo tal in globino

Raba	Globina [cm]	Org. snov [%]			Karbonati [%]		
		Max	Min	Povprečje	Max	Min	Povprečje
Njiva	0–10	8,4	2,8	5,2	4,7	0,6	1,7
Njiva	10–20	5,9	2,6	4,3	10,8	0,6	2
Travnik	0–10	4	3,4	3,7	12,6	1	4
Travnik	10–20	4	2,1	3,5	12,5	0,6	3,7

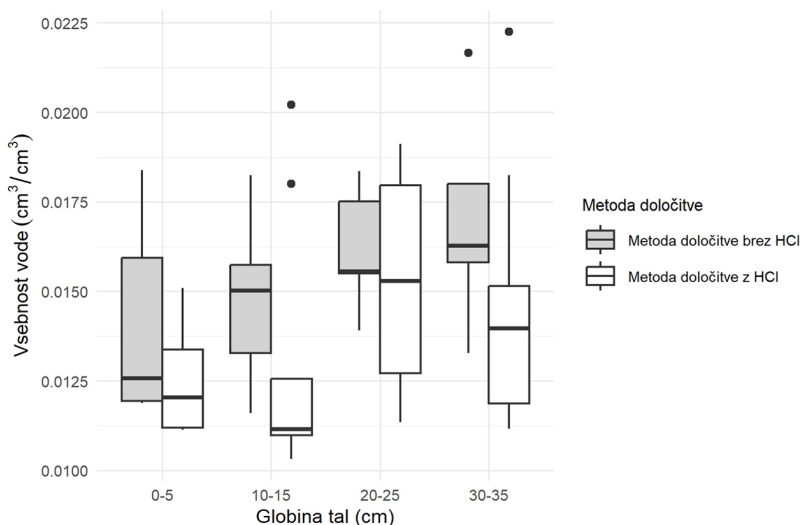
3.3 Močno vezana voda

Rezultati analize tal na laboratorijskem polju BF so pokazali, da je povprečna izmerjena količina močno vezane vode v vzorcih meljasto-ilovnatih do meljasto-glineno-ilovnatih tal, določena brez predhodne obdelave z 10-odstotno raztopino klorovodikove kisline (HCl), višja ($M = 0,01529 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$) kot pri vzorcih, ki so bili predhodno obdelani s HCl ($M = 0,01389 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$). Razlika med metodama je statistično značilna ($p <$

0,001), pri čemer je povprečna razlika ocenjena na $0,00140 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, s 95-odstotnim intervalom zaupanja od $0,00062$ do $0,00217 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. Najvišje vrednosti močno vezane vode so bile izmerjene v globljih slojih (20–25 in 30–35 centimetrov). Shapiro-Wilkov test je pokazal, da podatki za metodo brez HCl sledijo normalni porazdelitvi ($p = 0,132$), medtem ko podatki za metodo z HCl odstopajo od normalnosti ($p < 0,001$). Razlika v normalnosti razporeditve vzorcev je verjetno posledica neenakomerne porazdelitve karbonatov (vsebnost karbonatov v vzorcih je bila med 0,6 in 12,6 %), saj njihova odstranitev s HCl povzroči različno stopnjo masnih izgub in s tem večjo variabilnost med vzorci. Pri vzorcih z višjo vsebnostjo karbonatov je sprememba mase večja, kar vodi v odmik podatkov od normalne porazdelitve in asimetričnost razporeditve. Razlike med metodama so bile statistično značilne, kar potrjuje Wilcoxonov test ($V = 536$, $p = 0,00099$).

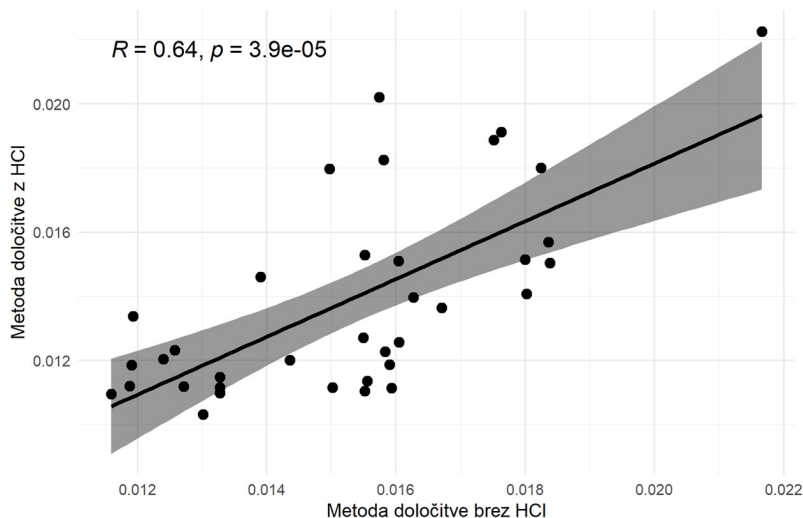
Ker je p -vrednost manjša od 0,05, hipoteze, da obstaja razlika v količini močno vezane vode med metodama, ne moremo zavrniti. Povprečna količina močno vezane vode je višja pri metodi brez predhodne obdelave s HCl, kar potrjuje hipotezo, da obdelava s HCl odstrani nekatere komponente, ki prispevajo k vezavi vode. Analiza variance (ponovljena enosmerna ANOVA, na log-transformiranih podatkih) je prav tako pokazala statistično značilno razliko med metodama ($F = 13,41$, $p = 0,00082$), kar potrjuje prejšnje ugotovitve. Povprečna izmerjena količina močno vezane vode je bila pri vseh globinah višja brez predhodne obdelave s HCl (slika 3). Post-hoc t-testi so pokazali, da je razlika med metodama statistično značilna le pri globini 30–35 centimetrov ($p = 0,028$).

Regresijska analiza vpliva globine na količino močno vezane vode kaže, da globina pojasni 13,3 % variance v podatkih ($R^2 = 0,133$, $p = 0,0016$). Na vsak centimeter globine se količina močno vezane vode poveča za $0,00009 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. Ko v regresijski model vključimo gostoto tal kot dodatni dejavnik, se pojasnjena varianca poveča na 33,6 %, pri čemer globina sama po sebi ni več statistično značilen dejavnik ($p = 0,454$), gostota tal pa ostane pomemben napovedni parameter ($p = 0,024$). To nakazuje, da je vpliv globine manj pomemben kot vpliv gostote tal in drugih dejavnikov, kot so vsebnost organske snovi in mineralna sestava tal, vendar je hkrati treba upoštevati, da se z večanjem globine tal povečuje tudi gostota tal (povprečna gostota tal za globino 0–5 centimetrov je enaka $1,58 \text{ g}/\text{cm}^3$, za globino 10–15 centimetrov je enaka $1,73 \text{ g}/\text{cm}^3$, za globino 20–25 centimetrov je enaka $1,80 \text{ g}/\text{cm}^3$ in za globino 30–35 centimetrov je enaka $1,85 \text{ g}/\text{cm}^3$).



Slika 3: Vpliv globine tal in metode določitve na količino močno vezane vode.

Spearmanov korelacijski koeficient med metodama ($\rho = 0,641$; $p < 0,001$) kaže na zmerno do močno pozitivno korelacijo med obema metodama. Grafična analiza razpršenosti podatkov potrjuje to povezanost, hkrati pa nakazuje, da metoda s HCl v določenih primerih bistveno zmanjša izmerjene vrednosti močno vezane vode (slika 4).



Slika 4: Korelacija med metodama določanja količine močno vezane z in brez HCl.

4 Razprava

Bližinsko zaznavanje se kaže kot izjemno pomembno pri spremljanju in upravljanju količine vode v tleh, saj omogoča prostorske in časovne analize, ki jih tradicionalne metode ne morejo zagotoviti. Metoda, ki temelji na zaznavanju nevtronov, je ena izmed obetavnih tehnik bližinskega zaznavanja, saj mogoča spremljanje količine vode v tleh na območjih velikosti okoli 25 hektarjev. Prednost te metode je, da zagotavlja meritve brez neposrednega stika s tlemi. Kljub temu se pri uporabi merilnika pojavljajo izzivi, povezani z umeritvijo in interpretacijo podatkov, saj ne loči med posameznim viri vodika v okolju, zaradi česar jih je treba v postopku umeritve čim bolj razčleniti in kvantificirati.

Med ključnimi dejavniki, ki vplivajo na natančnost in točnost štetja nevtronov, sta po ugotovitvah Iwema et al. (2021) predvsem zračni tlak in lahko dostopna voda v tleh. Vendar ima tudi močno vezana voda pomembno vlogo pri določanju celotne količine vode v tleh (Franz et al., 2012). Neupoštevanje njenega deleža lahko vodi v nepopolno umeritev merilnika in posledično v sistematično precenjevanje razpoložljive vode v tleh, kar vpliva na interpretacijo podatkov pri spremljanju sušnih razmer in hidrološkem modeliranju.

Močno vezana voda je strukturno vezana v kristalne mreže mineralov, ni podvržena evaporaciji in ni dostopna za rastlinsko transpiracijo, vendar kljub temu vpliva na meritve količine vode v tleh z merilnikom, ki temelji na zaznavanju nevtronov. V heterogenih krajinah, kot je poskusno polje BF, kjer se prepletajo urbani (stavbe), kmetijski (njive, travniki, gozd) in vodni elementi, je heterogenost tal dodaten izziv pri umeritvi merilnika. Za kakovostno umeritev je torej potrebna obsežna analiza tal, ki vključuje določitev virov vodika, kot so organska snov, lahko dostopna voda ter mineralna sestava tal, ki vpliva na delež

močno vezane vode. Neupoštevanje teh dejavnikov lahko povzroči neakovostne ocene količine vode v tleh, še posebej v okoljih, kjer močno vezana voda predstavlja pomemben delež celotne količine vode v tleh (Wu et al., 2023; Baroni et al., 2018). Opredelitev močno vezane vode je še posebej pomembna v suhih in heterogenih tleh, kjer je njen vpliv na število nevtronov izrazit (Bogena et al., 2013), ter v zelo mineralnih tleh (Baroni et al., 2018; Wu et al., 2023).

Po dosednji literaturi se delež močno vezane vode v tleh določa z metodo LOI (Barbosa et al., 2021; Heidebüchel et al., 2016; Ball, 1964; Davies, 1974). Postopek določitve močno vezane vode je v literaturi opisan razmeroma skromno (Baroni et al., 2018; Bogena et al., 2013) in ne vključuje upoštevanja vsebnosti karbonatov v tleh (Wu et al., 2023; Giannesi et al., 2024; Li et al., 2023). Čeprav je vpliv teksture tal na količino močno vezane vode razmeroma dobro raziskan – večjo količino pričakujemo v glinenih tleh (med 0,05 in 0,15 cm³/cm³), naše izmerjene količine so nekoliko manjše zaradi večje vsebnosti gline v naših vzorcih kot v peščenih in meljastih tleh (pod 0,02 cm³/cm³) (Wu et al., 2023; Barbosa et al., 2021; Wang et al., 2024) – ostajajo nejasnosti glede vpliva karbonatov na rezultate določanja močno vezane vode z metodo LOI.

Naša raziskava se osredotoča na izboljšanje metode merjenja močno vezane vode v tleh z izničenjem vpliva spremembe mase zaradi hlapenja karbonatov, ki lahko vodi v manj zanesljive rezultate. Glede na rezultate analize potrjujemo, da je modifikirana metoda s predhodno obdelavo vzorcev z 10-odstotno raztopino klorovodikove kisline (HCl) zanesljivejša pri določanju močno vezane vode v tleh. Določevanje močno vezane vode je zaradi postopka homogenizacije, mletja, sušenja, ohlajanja in predvsem zamudnega tehtanja na analitski tehtnici razmeroma dolgotrajno – mi smo za postopek potrebovali približno dvajset dni. Ob vzpostavitvi mreže merilnih mest za spremljanje količine vode v tleh z merilniki, ki temeljijo na zaznavanje nevtronov, v heterogeni krajini, bi ta del laboratorijskega postopka zahteval največji delež časa, potrebnega za analize.

Glede na prosto dostopne podatke Pedološke karte Slovenije (MKGP, 2023) ter arhivske podatke pedoloških profilov, uporabljenih pri njeni izdelavi (nabor se nenehno dopolnjuje), ki med drugim vsebujejo podatke o teksturi tal, vsebnosti karbonatov, organski snovi in ponekod tudi gostoti tal, bi bilo smiselno razmisliti o njihovi uporabi v postopku umeritve. S tem bi pridobili širši nabor podatkov za izbrano območje in morda zmanjšali potrebo po dodatnih analizah, še posebej, če so tla na obravnavanem območju homogena. Podoben pristop so uporabili Avery et al. (2016) v raziskavi, v kateri so razvili prostorski sloj z ločljivostjo 1 km za območje celinskih ZDA, ki omogoča oceno o količini močno vezane vode v tleh. Njihov sloj temelji na podatkih o teksturi ter gostoti tal in organskem ogljiku 61 vzorcev tal. Ugotovili so, da lahko takšni podatki zagotovijo zadovoljivo natančnost pri ocenjevanju močno vezane vode v tleh, vendar so omenili omejitve te metode zaradi naravne variabilnosti tal. Na ravni Slovenije obstaja možnost uporabe pedokartografskih enot za določitev splošnega nabora podatkov, medtem ko bi zanesljivejše rezultate omogočilo terensko rekognosciranje in razmejevanje pedosistematskih enot, kjer pričakujemo tla s primerljivimi lastnostmi in posledično podobno količino močno vezane vode.

Na primeru laboratorijskega polja je razvidno, da območje polja BF spada v pedokartografsko enoto 1292, ki vključuje tri pedosistematske enote: 580 (evtričen amfiglej), 540 (evtričen psevdoglej) in 488 (evtrična obrečna tla) (MKGP, 2023). Na podlagi analize območja ugotavljamo, da so tla laboratorijskega polja najbolj primerljiva s pedosistematsko enoto 540. Prihodnje raziskave bi lahko vključevale analizo arhivskih podatkov izkopanih profilov v pedosistematski enoti 540 na tem območju ter uporabo že

dostopnih podatkov za oceno količine močno vezane vode po podobnem postopku, kot sta to izvedla (Dong in Ochsner, 2018), ki sta potrdila povezanost (linearna regresija) med teksturo tal in količino močno vezane vode. Pristop z uporabo pedološke karte za določanje močno vezane vode v tleh je najbolj uporaben na območjih brez karbonatnih tal, kjer predhodna obdelava vzorcev z 10 % HCl verjetno ni potrebna. Vendar pa je na (točkovno ali homogeno) karbonatnih tleh uporaba metode s predhodno obdelavo s HCl močno priporočljiva, saj po naših rezultatih zagotavlja zanesljivejše podatke.

Menimo, da so v prihodnje potrebne dodatne raziskave za natančnejše ugotavljanje vpliva gostote tal, organske snovi in predvsem vsebnosti karbonatov na količino močno vezane vode, določene z modificirano metodo LOI. Pri tem je smiselno razmisliti o potencialu uporabe obstoječih pedoloških baz podatkov, ki vsebujejo informacije o teksturi tal, vsebnosti organske snovi in karbonatov. Tako bi lahko izboljšali umerjanje metod bližinskega zaznavanja z manj neposrednimi laboratorijskimi analizami.

Naše ugotovitve poudarjajo pomen nadgradnje metodologij bližinskega zaznavanja za spremljanje količine vode v tleh v heterogenih krajinah. Z uporabo izboljšanih umeritvenih tehnik in kombinacijo metod daljinskega zaznavanja količine vode v tleh bi lahko dodatno izboljšali prostorsko ločljivost in natančnost določitve količine vode v tleh. Integracija teh tehnik s strojnim učenjem bi lahko omogočila boljše napovedi količine vode v tleh in natančnejše spremljanje sušnih razmer v realnem času. Tako lahko precej izboljšamo zanesljivost in uporabnost meritev količine vode v tleh v kmetijstvu. Nadaljnje raziskave bi morale vključevati razvoj modelov, ki bi omogočili prilagajanje merilnikov specifičnim pedološkim razmeram, kar bi prispevalo k boljšemu razumevanju kroženja vode v tleh in njene dostopnosti za rastline.

5 Sklep

Močno vezana voda vpliva na natančnost določanja količine vode v tleh, saj je del vse razpoložljive vode v tleh, ki vpliva na meritve z merilnikom, temelječe na zaznavanju nevtronov. Njena količina je odvisna od lastnosti tal, napačno ovrednotenje količine močno vezane vode pa lahko vodi v precenjevanje dostopne vode v tleh, zato je njena vključitev v umerjanje nujna. Rezultati naše analize potrjujejo, da modificirana metoda LOI z odstranitvijo karbonatov s predhodno obdelavo vzorcev z 10-odstotno raztopino klorovodikove kisline (HCl) zagotavlja zanesljivejšo določitev močno vezane vode v meljasto-ilovnatih do meljasto-glineno-ilovnatih karbonatnih tleh. Metodi imata močno pozitivno povezanost (Spearmanov $\rho = 0,641$, $p < 0,001$), vendar metoda brez predhodne obdelave s HCl kaže višje vrednosti močno vezane vode, kar pomeni, da precenjuje njeno količino in potrjuje vpliv vsebnosti karbonatov na končni rezultat. Razlike med metodama so statistično značilne, pri čemer so največje razlike opazne na globini 30–35 centimetrov, kjer so tla na našem območju tudi najbolj gosta. Rezultati regresijske analize kažejo, da je imela tudi gostota tal statistično pomemben vpliv na količino močno vezane vode, pri čemer se z večanjem gostote tal veča tudi izmerjena količina močno vezane vode. Zaradi dolgotrajnosti laboratorijskega postopka bi bilo v prihodnje smiselno uporabiti pedološke arhivske podatke (baza podatkov pedoloških profilov in pedološka karta) za optimizacijo metodologije.

Zahvala

Avtorji se zahvaljujemo za finančno podporo raziskavi. Raziskavo so finančno omogočili Javna agencija za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije v okviru programa usposabljanja

mladih raziskovalcev Golob in Srdoč, P4- 0085 Agroekosistemi, CRP V4-2406, IC RRG-AG (IO-0022-0481-001), Evropska unija v okviru projekta Alpine Space Drought Prediction (101147797) programa Interreg Alpine Space, LIFE23- IPC-SI-LIFE4ADAPT, OPTAIN Horizon 2020 (862756) in intervencija IRP38 Konzorciji institucij znanja v podporo prehodu kmetijstva v zeleno, digitalno in podnebno nevtrarno iz Strateškega načrta Skupne kmetijske politike 2023–2027, iz operacij CLIMAGROW, ODEON, KEKS, AKIS partnerstvo za uvedbo digitalnih in robotskih tehnologij v rastlinsko pridelavo in STRIP.

Literatura in viri:

- Agencija Republike Slovenije za okolje (2024). <https://meteo.arslo.gov.si/met/sl/climate/diagrams/ljubljana/>, pridobljeno 23. 12. 2024.
- Akash, M., Mohan Kumar, P., Bhaskar, P., Deepthi, P. R., Sukhdev, A. (2024). Review of estimation of soil moisture using active microwave remote sensing technique. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 33, 101118. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2023.101118>
- Avery, W. A., Finkenbinder, C., Franz, T. E., Wang, T., Nguy-Robertson, A. L., Suyker, A., Arkebauer, T., Muñoz-Arriola, F. (2016). Incorporation of globally available datasets into the roving cosmic-ray neutron probe method for estimating field-scale soil water content. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20, 3859–3872. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-20-3859-2016>
- Ball, D. F. (1964). Loss-on-Ignition as an Estimate of Organic Matter and Organic Carbon in Non-Calcareous Soils. *Journal of Soil Science*, 15, 84–92. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1964.tb00247.x>
- Babaeian, E., Sadeghi, M., Jones, S. B., Montzka, C., Vereecken, H., Tuller, M. (2019). Ground, proximal, and satellite remote sensing of soil moisture. *Reviews of Geophysics*, 57 (2), 530–616. DOI: <https://doi.org/10.1029/2018RG000618>
- Barbosa, L. R., Coelho R. H. V., Scheffele M. L., Baroni G., Filho R. M. G., Montenegro L. G. M. S., Almeida N. C., Oswald E. S. (2021). Dynamic groundwater recharge simulations based on cosmic-ray neutron sensing in a tropical wet experimental basin. *Vadose Zone Journal*, 20 (4), 1–22. DOI: <https://doi.org/10.1002/vzj2.20145>
- Baroni, G., Scheffele, L. M., Schrön, M., Ingwersen, J., Oswald, S. E. (2018). Uncertainty, sensitivity and improvements in soil moisture estimation with cosmic-ray neutron sensing. *Journal of Hydrology*, 564, 873–887. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.07.053>
- Bogena, H. R., Huisman, J. A., Baatz, R., Hendricks Franssen, H.-J., Vereecken, H. (2013). Accuracy of the cosmic-ray soil water content probe in humid forest ecosystems: The worst case scenario. *Water Resources Research*, 49, 5778–5791. DOI: <https://doi.org/10.1002/wrcr.20463>
- Brown, G., Brindley, G. W. (1980). *Crystal Structures of Clay Minerals and Their X-Ray Identification*, Mineralogical Society Monograph.
- Colliander, A., Jackson, T. J., Bindlish, R., Chan, S., Das, N., Kim, S. B., Cosh, M. H., Dunbar, R. S., Dang, L., Pashaian, L., Asanuma, J., Aida, K., Berg, A., Rowlandson, T., Bosch, D., Caldwell, T., Caylor, K., Goodrich, D., al Jassar, H., Lopez-Baeza, E., Martínez-Fernández, J., González-Zamora, A., Livingston, S., McNairn, H., Pacheco, A., Moghaddam, M., Montzka, C., Notarnicola, C., Niedrist, G., Pellarin, T., Prueger, J., Pulliainen, J., Rautiainen, K., Ramos, J., Seyfried, M., Starks, P., Su, Z., Zeng, Y., van der Velde, R., Thibeault, M., Dorigo, W., Vreugdenhil, M., Walker, J. P., Wu, X., Moneris, A., O'Neill, P. E., Entekhabi, D., Njoku, E. G., Yueh, S. (2017). Validation of SMAP surface soil moisture products with core validation sites. *Remote Sensing of Environment*, 191, 215–231. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.01.021>
- Cvejič, R., Černič-Istenič, M., Honzak, L., Pečan, U., Železnikar, Š., Pintar, M. (2020). Farmers Try to Improve Their Irrigation Practices by Using Daily Irrigation Recommendations – The Vipava Valley Case, Slovenia. *Agronomy*, 10, 1238. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy10091238>
- Davies, B. E. (1974). Loss-on-ignition as an estimate of soil organic matter. *Soil Science Society of America Journal*, 38 (1), 150–151.
- Desilets, D., Zreda, M. (2013). Footprint diameter for a cosmic-ray soil moisture probe: Theory and Monte Carlo Simulations. *Water Resources Research*, 49, 3566–3575. DOI: <https://doi.org/10.1002/wrcr.20187>
- Desilets, D., Zreda, M., Ferré, T. P. A. (2010). Nature's neutron probe: Land surface hydrology at an elusive scale with cosmic rays. *Water Resources Research*, 46, W11505. DOI: <https://doi.org/10.1029/2009WR008726>
- Dong, J., Ochsner, T. E. (2018). Soil Texture Often Exerts a Stronger Influence Than Precipitation on Mesoscale Soil Moisture Patterns. *Water Resources Research*, 54, 2199–2211. DOI: <https://doi.org/10.1002/2017WR021692>
- Entekhabi D., Njoku G. E., O'Neill E. P., Kellogg H. K., Crow T. W., Edelstein B. W. (2010). The Soil Moisture Active Passive (SMAP) Mission. *Proceedings of the IEEE*, 98:5, 704–716. DOI: <https://doi.org/10.1109/JPROC.2010.2043918>
- European Environment Agency. (2024). *Trends and projections in Europe 2024*. Publications Office of the European Union, 2024.
- Franz, T. E., Zreda, M., Ferre, T. P. A., Rosolem, R., Zweck, C., Stillman, S., Zeng, X., Shuttleworth, W. J. (2012). Measurement depth of the cosmic ray soil moisture probe affected by hydrogen from various sources. *Water Resources Research*, 48, W08515. DOI: <https://doi.org/10.1029/2012WR011871>
- Gianessi, S., Polo, M., Stevanato, L., Lunardon, M., Francke, T., Oswald, S. E., Said Ahmed, H., Toloza, A., Weltin, G., Dercon, G., Fulajtar, E., Heng, L., Baroni, G. (2024). Testing a novel sensor design to jointly measure cosmic-ray neutrons, muons and gamma rays for non-invasive soil moisture estimation. *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*, 13, 9–25. DOI: <https://doi.org/10.5194/gi-13-9-2024>
- Grim, R. E. (1968). *Clay Mineralogy*, 2nd Edition. McGraw-Hill, New York.
- Gruber A., Dorigo W. A., Zwieback S., Xaver A., Wagner W. (2013). Characterizing Coarse-Scale Representativeness of in situ Soil Moisture Measurements from the International Soil Moisture Network. *Vadose Zone Journal*, 12 (2), 1–16. DOI: <https://doi.org/10.2136/vzj2012.0170>

- Heidbüchel, I., Güntner, A., Blume, T. (2016). Use of cosmic-ray neutron sensors for soil moisture monitoring in forests. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20, 1269–1288. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-20-1269-2016>
- Heiri, O., Lotter, A. F., Lemcke, G. (2001). Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results. *Journal of Paleolimnology*, 25, 101–110. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1008119611481>
- Hoogsteen, M. J. J., Lantinga, E. A., Bakker, E. J., Groot, J. C. J., Titttonell, P. A. (2015). Estimating soil organic carbon through loss on ignition: effects of ignition conditions and structural water loss. *European Journal of Soil Science*, 66, 320–328. DOI: <https://doi.org/10.1111/ejss.12224>
- IUSS Working Group WRB. (2014). World Reference Base for Soil Resources 2014: International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. Rome: FAO, <https://www.fao.org/3/i3794en/i3794en.pdf>, pridobljeno 1. 3. 2025.
- Iwema, J., Schrön, M., Koltermann Da Silva, J., Schweiser De Paiva Lopes, R., Rosolem, R. (2021). Accuracy and precision of the cosmic-ray neutron sensor for soil moisture estimation at humid environments. *Hydrological Processes*, 35 (11), e14419. DOI: <https://doi.org/10.1002/hyp.14419>
- Jackson, M. L. (1958). *Soil Chemical Analysis: Advanced Course*. Published by the author, Department of Soils, University of Wisconsin, Madison, WI.
- Li, X., Long, D., Slater, J. L., Moulds, S., Shadid, M., Han, P., Zhao, F. (2023). Soil Moisture to Runoff (SM2R): A Data-Driven Model for Runoff Estimation Across Poorly Gauged Asian Water Towers Based on Soil Moisture Dynamics. *Water Resources Research*, 59 (3), 1–28. DOI: <https://doi.org/10.1029/2022WR033597>
- Li, Z.-L., Leng, P., Zhou, C., Chen, K.-S., Zhou, F.-C., Shang, G.-F. (2021). Soil moisture retrieval from remote sensing measurements: Current knowledge and directions for the future. *Earth-Science Reviews*, 218, 103673. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103673>
- Mackenzie, R. C. (1957). *The Differential Thermal Investigation of Clays*. Mineralogical Society, London.
- Magnier, J., Fribourg-Blanc, B., Lemann, T., Witing, F., Critchley, W., Volk, M. (2024). Natural/Small Water Retention Measures: Their Contribution to Ecosystem-Based Concepts. *Sustainability*, 16, 1308. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16031308>
- Ministrstvo za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano (MKGP). (2023). Pedološka karta Slovenije. https://podatki.gov.si/dataset/pedoloska-karta?resource_id=e567ca77-0794-42ba-a5c7-6abdcde444f1a, pridobljeno 1. 3. 2025.
- Ministrstvo za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano (MKGP). (2024). Dejanska raba tal. <https://rkg.gov.si/vstop/>, pridobljeno 1. 3. 2025.
- Nayak, P. S., Singh, B. K. (2007). Instrumental characterization of clay by XRF, XRD and FTIR. *Bull Mater Sci*, 30, 235–238. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12034-007-0042-5>
- Oštir, K. (2006). Daljinsko zaznavanje. Založba ZRC, Ljubljana.
- Pečan, U., Zupanc, V., Pintar, M. (2021). Methods for measuring soil water content. *Acta agriculturae Slovenica*, 117, 1–13. DOI: <https://doi.org/10.14720/aas.2021.117.2.1618>
- Pintar, A. M., Skudnik, M. (2024). Uporabnost nacionalnih podatkov laserskega skeniranja in cikličnega aerofotografiranja pri zaznavanju gozdnih vrzeli. *Geodetski vestnik*, 68 (2), 180–193. DOI: <https://doi.org/10.15292/geodetski-vestnik.2024.02.180-193>
- R Core Team. (2024). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>, dostop 25. 12. 2025.
- Rosolem, R., Shuttleworth, W. J., Zreda, M., Franz, T. E., Zeng, X., Kurc, S. A. (2013). The Effect of Atmospheric Water Vapor on Neutron Count in the Cosmic-Ray Soil Moisture Observing System. *Journal of Hydrometeorology*, 14, 1659–1671. DOI: <https://doi.org/10.1175/JHM-D-12-0120.1>
- Scheffele, L. M., Munz, M., Francke, T., Baroni, G., Oswald, S. E. (2025). Enhancing Hectare-Scale Groundwater Recharge Estimation by Integrating Data From Cosmic-Ray Neutron Sensing Into Soil Hydrological Modeling. *Water Resources Research*, 61, e2024WR037641. DOI: <https://doi.org/10.1029/2024WR037641>
- Schrön, M., Rosolem, R., Köhli, M., Piussi, L., Schröter, I., Iwema, J., Kögler, S., Oswald, S. E., Wollschläger, U., Samaniego, L., Dietrich, P., Zacharias, S. (2018). Cosmic-ray Neutron Rover Surveys of Field Soil Moisture and the Influence of Roads. *Water Resources Research*, 54, 6441–6459. DOI: <https://doi.org/10.1029/2017WR021719>
- Tuure, J., Räsänen, M., Hautala, M., Pelliikka, P., Mäkelä, P. S. A., Alakukku, L. (2021). Plant residue mulch increases measured and modelled soil moisture content in the effective root zone of maize in semi-arid Kenya. *Soil and Tillage Research*, 209, 104945. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.104945>
- EIA (2024). Drought conditions reduce hydropower generation, particularly in the Pacific Northwest. <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=63664>, dostop 1. 3. 2025.
- Van der Velden, D., Klerkx, L., Dessein, J., Debruyne, L. (2025). Governance by satellite: Remote sensing, bureaucrats and agency in the Common Agricultural Policy of the European Union. *Journal of Rural Studies*, 114, 1–10. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2024.103558>
- Veljanovski, T., Pehani, P., Lamovec, P., Oštir, K. (2012). Uporabnost podatkov satelitskega in letalskega daljinskega zaznavanja za opazovanje in kartiranje vodnih površin. I. Usefulness of satellite and aerial remote sensing data for monitoring and mapping of surface waters. *Geodetski vestnik* 56 (4), 786–801. DOI: <https://doi.org/10.15292/geodetski-vestnik.2012.04.786-801>
- Wang, S., Zhang, Y., Kang, W., Wu, S. (2024). Variability of hydrogen sources within nominally anhydrous soil across a desert-oasis ecoregion, Northwest China. *CATENA* 243, 108187. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108187>
- Wenzel, J. L., Pöhlitz, J., Usman, M., Piernicke, T., Conrad, C. (2025). Enhancing irrigation scheduling by application efficiency estimations and soil moisture simulations. *European Journal of Agronomy* 164, 127487. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2024.127487>
- Weimar, O. J. (2022). *Advances in Cosmic-Ray Neutron Sensing by Monte Carlo simulations and neutron detector development*. PhD Dissertation, Heidelberg. DOI: <https://doi.org/10.11588/heidok.00032046>
- Wu, S., Zhang, Y., Kang, W., Zhao, W. (2023). Mesoscale soil moisture survey by mobile cosmic-ray neutron sensor across various landscapes in the Heihe River Basin. *Research in Cold and Arid Regions* 15, 211–218. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rcar.2024.01.001>
- Zhang, H., Loaiciga, H. A., Okujeni, A., Liu, J., Tan, M., Sauter, T. (2025). Assessing the impact of extreme climate events on European gross primary production. *Agricultural and Forest Meteorology* 362, 110374. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrfor.2025.110374>

org/10.1016/j.agrformet.2024.110374

Zhang, Z., Ou, H., Shi, Y., Ye, Y., Sang, Y., Zhang, S., Zhang, J. (2023). Application of cosmic-ray neutron probes for measuring soil moisture in rocky areas of the Taihang Mountains, North China. *Vadose Zone Journal*, 22, e20291. DOI: <https://doi.org/10.1002/vzj2.20291>

Zreda, M., Desilets, D., Ferré, T. P. A., Scott, R. L. (2008). Measuring soil moisture content non-invasively at intermediate spatial scale using cosmic-ray neutrons. *Geophysical Research Letters*, 35 (21), 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1029/2008GL035655>

Zreda, M., Shuttleworth, W. J., Zeng, X., Zweck, C., Desilets, D., Franz, T., Rosolem, R. (2012). COSMOS: the COsmic-ray Soil Moisture Observing System. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16, 4079–4099. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-16-4079-2012>

Žvokelj, L., Noč, M., Zupanc, V., Zatler, P., Glavan, M. (2024) Ocenjevanje vpliva namakanja na zadrževanje vode v tleh in izpiranje nitratov. *Zbornik, Mišičev vodarski dan*: 219–226.



N. Golob, Srdoč Š., Švegelj Ž., Zupanc V., Cvejić R.. (2025). Izboljšanje določitve močno vezane vode v postopku umerjanja merilnika vode v tleh, ki temelji na zaznavanju nevtronov. *Geodetski vestnik*, 69 (4), 538–553.

DOI: <https://doi.org/geodetski-vestnik.2025.04.538-553>

Nejc Golob, mag. inž. agr.

Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta,
Oddelek za agronomijo
Jamnikarjeva 101, 1000 Ljubljana
e-naslov: nejc.golob@bf.uni-lj.si

doc. dr. Vesna Zupanc, univ. dipl. inž. agr.

Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta,
Oddelek za agronomijo
Jamnikarjeva 101, 1000 Ljubljana
e-naslov: vesna.zupanc@bf.uni-lj.si

Špela Srdoč, mag. inž. agr.

Znanstveno-raziskovalno središče Koper
Inštitut za oljkarstvo
Garibaldijska 1, 6000 Koper
e-naslov: spela.srdoc@zrs-kp.si

doc. dr. Rozalija Cvejić, univ. dipl. inž. agr.

Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta,
Oddelek za agronomijo
Jamnikarjeva 101, 1000 Ljubljana
e-naslov: rozalija.cvejic@bf.uni-lj.si

Žiga Švegelj, univ. dipl. meteorol.

Atmosferix d.o.o., Stegne 23, 1000 Ljubljana
e-naslov: ziga.svegelj@atmosferix.com