

Metode za merjenje vsebnosti vode v tleh

Urša PEČAN^{1,*}, Vesna ZUPANC¹, Marina PINTAR¹

Received April 16, 2020; accepted March 26, 2021.
Delo je prispelo 16. aprila 2020, sprejeto 26. marca 2021.

Methods for measuring soil water content

Abstract: Water has a significant influence on fundamental biophysical processes in the soil. It is one of the limiting factors for plant growth, which is why monitoring the water content in the field is particularly important in agriculture. In this article we present the methods currently used to measure the soil water content. We have described their functional principles, advantages, disadvantages and possible applications. Due to their widespread use in agriculture, we have focused on dielectric sensors, which are classified as electromagnetic methods. We have investigated the influence of soil properties on measurements with dielectric sensors and described possible methods for soil-specific calibration. In agriculture and environmental sciences, measurements of soil water content are particularly important for irrigation management. Irrigation based on measurements enables us to optimize the use of water resources and reduce the negative impact on the environment. For the correct functioning of such sensors it is necessary to check the suitability of the factory calibration function. Special attention is required when installing the sensors, as the presence of air gaps causes errors in the measurements.

Key words: measurement; water content; soil; precision irrigation; dielectric sensors; calibration; TDR; FD

Metode za merjenje vsebnosti vode v tleh

Izvleček: Voda ima pomemben učinek na temeljne biofizikalne procese v tleh. Je eden izmed omejitvenih dejavnikov rasti rastlin, zato je spremljanje vsebnosti vode v tleh posebej pomembno v kmetijstvu. V prispevku predstavljamo trenutno uporabljane metode za meritve vsebnosti vode v tleh, njihove principe delovanja, prednosti, slabosti in načine uporabe. Zaradi razširjenosti uporabe v kmetijstvu in okoljskih znanostih smo se osredotočili predvsem na merilnike, ki merijo dielektričnost tal in jih uvrščamo v skupino elektromagnetnih metod. Raziskali smo vpliv talnih lastnosti na meritve z merilniki, ki merijo dielektričnost tal in opisali možne načine talno specifične kalibracije. Meritve vsebnosti vode v tleh so v kmetijstvu pomembne predvsem za uravnavanje obrokov namakanja. Z namakanjem na podlagi meritev lahko optimiziramo izrabo vodnih virov in zmanjšamo negativne učinke na okolje. Za pravilno delovanje tovrstnih merilnikov je potrebno preveriti ustreznost tovarniške kalibracijske funkcije. Posebno pozornost je potrebno posvetiti vgrajevanju merilnikov, saj prisotnost zračnih prostorov povzroča napake v meritvah.

Ključne besede: meritve; vsebnost vode; tla; natančno namakanje; merilniki; kalibracija; TDR; FD

¹ Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za agronomijo, Ljubljana, Slovenija

* ursa.pecan@bf.uni-lj.si

1 UVOD

Vsebnost vode v tleh je ključni člen hidrološkega cikla, ki nadzira izmenjavo vode med atmosfero in podzemno vodo ter vpliva na večino fizikalnih, kemijskih in bioloških procesov, ki se pojavljajo v tleh (Zupanc in sod., 2020). Voda v tleh deluje kot mazivo in vezivo med talnimi delci, zato ima učinek na njihovo strukturno stabilnost. Velika toplotna prevodnost vode omogoča zmerrost v dnevni in sezonski nihanji temperature na površju tal. Kemijsko voda omogoča transport raztopljenih anorganskih snovi in suspendiranih organskih delcev, ki so vključeni v procese razvoja in degradacije tal. Količina vode ima pomemben vpliv na mnogo biofizikalnih procesov v tleh, vpliva na kaljenje semen, rast in mineralno prehrano rastlin ter mikrobnost razgradnje organske snovi (Topp & Ferré, 2002; Bittelli, 2011). Poznavanje variabilnosti vsebnosti vode na ravni parcele, je pomembno pri upravljanju kmetijskih površin v smislu maksimalnega povečanja pridelka ter zmanjševanja negativnih učinkov uporabe gnojil in fitofarmaceutskih sredstev na kakovost podzemne vode. Razumevanje in nadzorovanje variabilnosti vsebnosti vode v tleh je ključno pri izboljševanju strategij upravljanja namakanja z obzirom na rastlinsko pridelavo in optimalno izkoriščanje vodnih virov (Verecken in sod., 2014). Upravljanje namakanja na podlagi meritev vsebnosti vode v tleh postaja v kmetijstvu vedno bolj razširjeno (Fares & Alva, 2000; Nemali & van Iersel, 2006; Zotarelli in sod., 2011; Sharma in sod., 2017; Li in sod., 2018; Souza in sod., 2019).

Namen prispevka je pregled relevantne svetovne literature s področja merilnih metod vsebnosti vode v tleh, pregled njihove uporabnosti za namakanje ter strnjena predstavitev teme v slovenskem jeziku. Prispevek je namenjen vsem, ki se pri svojem raziskovalnem ali strokovnem delu soočajo s potrebo po spremljanju stanja vode v tleh.

2 METODE IN MATERIALI

2.1 METODE ANALIZE VIROV

Prispevek je nastal na podlagi pregleda literature 95 znanstvenih prispevkov, pridobljenih iz podatkovnih zbirk Web of Science in Google Scholar. Zbiranje literature je bilo sestavljeno iz treh vsebinskih delov, iz pregleda merilnih metod, kalibracije merilnikov, ki merijo dielektričnost tal in praktične uporabnosti meritev pri upravljanju namakanja. Najprej bomo predstavili različne metode meritev vsebnosti vode v tleh. Raziskali bomo njihovo zgodovinsko ozadje, pojasnili princip delovanja, prednosti in slabosti delovanja merilne metode in izpostavili tržno dostopne ter v raziskavah pogosto upora-

bljene modele merilnikov. V rezultatih bomo strnjeno, v obliki preglednice, povzeli glavne značilnosti različnih merilnih metod. V diskusiji se bomo, zaradi največje razširjenosti uporabe, osredotočili na merilnike, ki merijo dielektričnost tal in jih uvrščamo med elektromagnetne metode. Raziskali bomo vpliv spremenljivih talnih lastnosti na točnost meritev in opisali postopke talno specifične kalibracije tovrstnih merilnikov. Pregledali bomo njihovo uporabnost pri upravljanju namakanja.

2.2 NEPOSREDNE METODE MERITEV VSEBNOSTI VODE V TLEH

Neposredne metode določanja vsebnosti vode v vzorcu tal temeljijo na odstranitvi in meritvah količine iz vzorca odstranjene vode, ki jo lahko odstranimo s segrevanjem, ekstrakcijo in nadomestitvijo s topilom ali s kvantitativnimi meritvami reakcijskih produktov. Gravimetrično količino vode v tleh določamo po standardu (ISO 11465, 1993), kjer je vsebnost vode opredeljena kot razmerje med maso vode v vzorcu in maso suhega vzorca. Za gravimetrično določitev vsebnosti vode vzorec mineralnih tal sušimo na 105 °C do konstantne mase (v praksi je ta dosežena po vsaj 24 urah sušenja). Volumsko vsebnost vode v vzorcu tal, izračunamo z enačbama 1 in 2 (Topp & Ferré, 2002). Določanje vsebnosti vode po gravimetrični metodi je enostavno z vidika uporabe in potrebne opreme, vendar je tudi destruktivno, časovno zamudno in ne omogoča časovne vrste dinamičnih meritev (Dobriyal in sod., 2012).

$$\rho_{\text{tal}} = \frac{m_{\text{ss}}}{V_{\text{tal}}} \quad (1)$$

$$\theta (\%) = \left(\frac{m_{\text{sv}} - m_{\text{ss}}}{m_{\text{ss}}} \right) \times \frac{\rho_{\text{tal}}}{\rho_{\text{vode}}} \times 100 \% \quad (2)$$

ρ_{tal} je gostota tal (g cm^{-3}), m_{ss} je masa suhih tal (g), V_{tal} je volumen tal (cm^3), θ je volumski odstotek vode v tleh (vol. %), m_{sv} je masa svežega vzorca tal (g) in ρ_{vode} je gostota vode (g cm^{-3}).

2.3 POSREDNE METODE MERITEV VSEBNOSTI VODE V TLEH

S posrednimi metodami ne merimo dejanske vsebnosti vode v tleh, temveč neko drugo talno spremenljivko, ki se spreminja v odvisnosti od vsebnosti vode. Zato je potrebno med merjeno talno spremenljivko in vsebnostjo vode v tleh vzpostaviti razmerje, ki je opisano s kalibracijsko enačbo. Glavna prednost posrednih meritev vsebnosti vode v tleh je v tem, da niso destruktivne, mnoge izmed njih omogočajo avtomatično beleženje in shranjevanje izmerjenih podatkov (Muñoz-Carpena, 2004; Hignett & Evett, 2008). Med najpogosteje uporabljene posredne metode merjenja vsebnosti vode v tleh

uvrščamo: metodo nevtronskega sipanja, daljinsko zaznavanje pod površinske vsebnosti vode v tleh in elektromagnetne metode.

2.3.1 Metoda nevtronskega sipanja

Gardner & Kirkham (1952) sta za meritve vsebnosti vode v tleh opisala metodo nevtronskega sipanja. Naprava oddaja hitre nevtrone iz razpadajočega radioaktivnega vira in zaznava gostoto upočasnjenih nevtronov okoli merilnika. Voda je glavni vir vodika v večini tal, zato je zaznana gostota nevtronov proporcionalna volumnu vsebnosti vode v tleh. Uporaba se opušta zaradi varnostnih razlogov, prisotnosti nizko radioaktivnega sevanja in s tem povezane kompleksne administracije, ki jo je potrebno zagotoviti za upravljanje merilnega instrumenta (Evelt, 2000; Muñoz-Carpena, 2004). V preteklosti so metodo pogosto uporabljali kot referenčno pri kalibraciji takrat novih metod, ki temeljijo na meritvah dielektričnosti (Sheets & Hendrickx, 1995; Gaskin & Miller, 1996; Hanson & Peters, 2000).

2.3.2 Daljinsko zaznavanje pod površinske vsebnosti vode

Od leta 1972 različne misije Landsat satelitov zagotavljajo pregledne in ponavljajoče multispektralne podatke o površju Zemlje (Lauer in sod., 1997). Prednost daljinskega zaznavanja je v meritvah na velikih površinah z enim merilnim instrumentom iz premične platforme (letalo ali satelit), kar je cenovno ugodno in izključuje napake, povzročene z variabilnostjo med merilniki. Pri daljinskemu zaznavanju vsebnosti vode pod površjem gre za optično zaznavanje, kamor uvrščamo metode, ki temeljijo na odbojnosti ali toplotne infrardeče metode ter metode mikrovalovnega zaznavanja vsebnosti vode pod površjem, t. i. pasivno ali aktivno zaznavanje. Nizke mikrovalovne frekvence so najprimernejše za daljinsko zaznavanje pod površinske vsebnosti vode v tleh, saj se učinek vegetacije in hrapavosti površine zmanjša, poveča pa se globina prodora. Pri omenjenih frekvencah so oblaki in padavine praktično prosojni (Robinson in sod., 2008; Petropoulos in sod., 2015). Daljinsko pridobljene podatke je potrebno kalibrirati in ovrednotiti z *in-situ* meritvami vsebnosti vode pod površino (Rowlandson in sod., 2013; Gherboudj in sod., 2017).

2.3.3 Elektromagnetne metode

Njihova uporaba se je začela v 70. letih prejšnjega stoletja, z razvojem merilne tehnike TDR (Fellner-Feldegg, 1969). Elektromagnetne oziroma dielektrične metode so v praksi najpogosteje uporabljene posredne metode za določitev vsebnosti vode v tleh. Temeljijo na meritvah relativne dielektričnosti (ϵ_r), ki je sestavljena iz realnega (ϵ_r') in navideznega dela (ϵ_r''). Relativna dielektričnost

določa hitrost potovanja elektromagnetnega vala ali impulza skozi tla. V združenem, poroznem mediju, kot so tla, ki jih sestavljajo trdna faza tal, zrak in voda, je dielektričnost določena na podlagi relativnega prispevka vsake izmed komponent. Relativna dielektričnost tekoče vode pri 20 °C ($\epsilon_r = 80$) je mnogo večja od ostalih komponent, trdna faza tal ($\epsilon_r = 2 - 5$) in zrak ($\epsilon_r = 1$), zato je skupna dielektričnost primarno povzročena zaradi prisotnosti vode v tekočem agregatnem stanju (Topp & Ferré, 2002; Muñoz-Carpena, 2004). Relativna dielektričnost vode je sicer temperaturno pogojena in je za območje od 0,1 do 99 °C opisana z enačbo (Malmberg & Maryott, 1956):

$$\epsilon_{r(\text{vode})} = 87,740 - 0,40008 T + 9,398 (10^{-4}) T^2 - 1,410 (10^{-6}) T^3 \quad (3)$$

Topp in sod. (1980) so razvili empirično enačbo, ki opisuje razmerje med očitno relativno dielektričnostjo (ϵ_r) izmerjeno s TDR merilnim sistemom in vsebnostjo vode v tleh, ki je veljavna za večino mineralnih tal pri vsebnostih vode na območju med 0,1 in 0,5 m³ m⁻³:

$$\theta_{\text{vode}} = -5,3 \times 10^{-2} + 2,92 \times 10^{-2} \epsilon_r - 5,5 \times 10^{-4} \epsilon_r^2 + 4,3 \times 10^{-6} \epsilon_r^3 \quad (4)$$

Kasnejše izboljšave kalibracijskega razmerja na osnovi podatka o dielektričnosti zahtevajo predhodno poznavanje lastnosti tal, kot so tekstura, organska snov in gostota tal (Malicki in sod., 1996). Topp & Reynolds (1998) sta predlagala enačbo, ki predstavlja linearno razmerje med korenomo realne dielektričnosti in volumsko vsebnostjo vode v tleh.

$$\theta_{\text{vode}} = 0,115 \sqrt{\epsilon_r'} - 0,176 \quad (5)$$

Linearno kalibracijsko razmerje ima pred polinomskim določene prednosti. Omogoča neposredno povezavo z dielektričnim mešanim modelom, ki omogoča fizično interpretacijo merjene lastnosti tal. Omogoča razvoj preproste, dvotočkovne kalibracije za izbran medij ter vodi do manj potencialnih napak ob ekstrapolaciji vsebnosti vode izven meja določenega polinomskega razmerja (Topp & Reynolds, 1998). Kljub razvitim splošnim kalibracijskim enačbam je potrebno izpostaviti, da metode, ki merijo relativno dielektričnost, merijo le približek. Zato imajo spremenljive lastnosti tal, kot so električna prevodnost, tekstura in gostota, v večji ali manjši meri vedno vpliv na meritve (Topp & Ferré, 2002). Spodaj opisane elektromagnetne metode uporabljajo empirično kalibrirano razmerje med volumsko vsebnostjo vode in signalom merilnika (čas, frekvenca, električna upornost oziroma impedanca, valovna faza) (Muñoz-Carpena, 2004).

2.3.3.1 Merjenje odboja v časovnem prostoru (Time Domain Reflectometry - TDR)

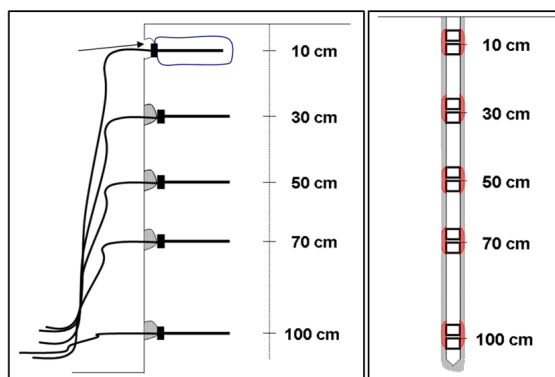
Metoda z meritvami odboja v časovnem prostoru je bila prvotno uporabljena v telekomunikacijski industriji, za identifikacijo lokacij prekinitev v kablju. Hitrost širjenja signala s tipičnim odbojem na točki prekinitve kabla omogoča določitev lokacije poškodbe z uporabo analize časa potovanja (Noborio, 2001; Jones in sod., 2002). Feller-Feldegg, (1969) je prvi opisal uporabo TDR tehnike za meritve električnih lastnosti materialov. Topp in sod. (1980) so prvi ugotovili empirično razmerje med relativno dielektričnostjo in volumsko vsebnostjo vode v tleh z različnimi teksturami in jo opisali s t. i. "Topp-ovo enačbo", prikazano v enačbi 4. Večina trenutno uporabljenih TDR merilnih sistemov po transmisijski liniji pošilja hitro rastoče, natančno časovno določene elektromagnetne impulze. Časovni zamik med odbojem impulza od začetka do konca transmisijske linije je uporabljen za določitev hitrosti širitve signala po tleh. Relativna dielektričnost tal v odvisnosti od vsebnosti vode nadzira hitrost širjenja signala. TDR merilni sistem potrebuje napravo, ki za potovanje po transmisijski liniji generira impulze visokih frekvenc, običajno 1 GHz. Visoke frekvence omogočajo odziv, ki je manj odvisen od talno značilnih lastnosti, kot so tekstura, gostota in temperatura. Merilnik je običajno sestavljen iz dveh do treh paralelnih kovinskih vilic, ki se jih vstavi v tla, kjer služijo kot valovodi. Sočasno TDR sistem uporablja tudi napravo, ki meri in digitalizira energijo transmisijske linije v intervalih običajno pod 300 pikosekund. Glavna slabost TDR merilnih sistemov je visoka cena zaradi kompleksne elektronike in izguba odboja v zelo slanih tleh (Noborio, 2001; Topp & Ferré, 2002; Muñoz-Carpena, 2004; Lekshmi in sod., 2014). Proizvajalec IMKO (Micromodultechnik GmbH,

Ettlingen, Germany), je razvil alternativni instrument, ki uporablja hitro naraščajoči časovni impulz, kot konvencionalni TDR sistem, vendar ne zajame in interpretira valovne oblike, da bi določili čas potovanja po merilniku. Naprava izračuna psevdo potovalni čas (t_p), ki ga je potrebno povezati z ϵ_r , kalibracijsko razmerje zagotovi proizvajalec. Merilna naprava se imenuje TRIME® - Time Domain Reflectometry with Intelligent Micromodule Elements (Evelt & Parkin, 2005; IMKO, 1996, cit. po Detmann & Bechtold, 2018).

2.3.3.2 Meritve v frekvenčnem prostoru (Frequency Domain - FD)

1) Kapacitivnost

Merilne elektrode merilnikov, ki temeljijo na principu kapacitivnosti, delujejo na način, da tla na njih delujejo kot dielektrik v kondenzatorju v kapacitivno-induktivnem resonančnem vezju. Induktivnost v vezju je fiksna, nato iz izmerjene resonančne frekvence določimo relativno dielektričnost tal. Podobno kot pri TDR, se relativna dielektričnost uporabi za določitev vsebnosti vode v tleh (Topp & Ferré, 2002). Elektrode kapacitivnostnih merilnikov so lahko v obliki para vzporednega vilic za izvajanje točkovnih meritev. Drug tip merilnih naprav je cevaste oblike, na kateri so vertikalno nameščene merilne elektrode, napravo se na terenu vstavi v tla zakopano cev in omogoča hkratne meritve na več globinah. Ob nameščanju cevi lahko pride do motenj v tleh okoli cevi, nastanejo lahko zračni žepi, ki povzročajo napake v meritvah. Merilniki običajno delujejo z delovno frekvenco pod 100 MHz. Pri tako nizkih frekvencah se dielektričnost tal spreminja in je ocena vsebnosti vode bolj podvržena spremenljivim lastnostim tal (Starr & Paltineanu, 1998; Muñoz-Carpena, 2004; Evelt in sod., 2006; Matula



Slika 1: Primerjava vgradnje točkovnih merilnikov (levo) in več globinskih merilnikov, ki se jih vstavi v dostopno cev (desno) (Zupanc in sod., 2009)

Figure 1: Comparison of the installation of point sensors (left) and multilevel sensors inserted into the access tube (right) (Zupanc et al., 2009)

in sod., 2016; Roberti in sod., 2018). Slika 1 prikazuje v tla vgrajene točkovne merilnike (levo) in več globinski merilnik, vstavljen v dostopno cev (desno).

2) Merjenje odboja v frekvenčnem prostoru (Frequency Domain Reflectometry - FDR)

Pri meritvah odboja v frekvenčnem prostoru je frekvenca oscilatorja nadzorovana v določenem območju za določitev resonančne frekvence, pri kateri je amplituda največja, kar se uporablja za določitev vsebnosti vode v tleh. Kljub podobnemu principu delovanja metodi kapacitivnosti, FDR metoda zbira podatke iz širokega nabora frekvenc (Dean in sod., 1987; Lekshmi in sod., 2014).

2.3.3.3 Merjenje odboja v amplitudnem prostoru (Amplitude Domain Reflectometry - ADR)

1) Kompleksna upornost - Impedanca

Signal oscilatorja se širi po transmisijski liniji vilic merilnika. Če se impedanca vilic razlikuje od tiste v transmisijski liniji, se del naključnega signala odbije nazaj po liniji proti izvoru signala. Odbiti del ovira vpadni signal in povzroči napetostni stoječi val na transmisijski liniji, kar predstavlja spremembo amplitude vzdolž linije (Gaskin & Miller, 1996). Impedančni merilniki uporabljajo oscilator za generacijo sinusnega signala v obliki elektromagnetnega vala fiksne frekvence (npr. 100 MHz), ki se uporablja pri koaksialni transmisijski liniji. Merilniki so običajno sestavljeni iz več paralelnih kovinskih vilic (Muñoz-Carpena, 2004). V literaturi pogosto uporabljena impedančna merilnika sta ThetaProbe (Delta-T Devices Ltd., Cambridge, GB) in HydraProbe (Stevens Water Monitoring System Inc., Portland, USA) slednji ločeno meri realni (ϵ_r') in navidezni (ϵ_r'') del relativne dielektričnosti (Seyfried in sod., 2005; Vaz in sod., 2013; Ojo in sod., 2015; Matula in sod., 2016). Nemali in sod. (2007) so primerjali delovanje ECH₂O (Decagon Devices Inc., Pullman, WA, USA) merilnika, ki deluje na podlagi kapacitivnosti in ThetaProbe ML2X (Delta-T Devices), ki deluje po principu impedance. Ugotovili so, da imata električna prevodnost in temperatura tal velik vpliv na meritve z ECH₂O, medtem ko vpliva na meritve s ThetaProbe niso zaznali. Podobno Fares in sod. (2011) poročajo večjo natančnost meritev s ThetaProbe ML2X v primerjavi s kapacitivnostnimi EC-10 (Decagon Devices). Tudi rezultati Sharma in sod. (2017), ki so primerjali delovanje impedančnih HydraProbe merilnikov in 5TM (Decagon devices), ki delujejo po metodi kapacitivnosti, govorijo v prid impedančnim merilnikom.

Merilniki, ki delujejo po principu meritev v frekvenčnem prostoru ter kompleksne upornosti, so v primerjavi s TDR merilnimi sistemi cenejši zaradi uporabe nižje frekvenčnega standardnega vezja. Lahko jih povežemo s konvencionalnimi shranjevalniki podatkov (DC izhodni signal) in jih uporabljamo v slanah tleh z veli-

ko električno prevodnostjo. Slabost FD metod je večja občutljivost na temperaturo in spremenljive lastnosti tal, zaradi česar je potrebna talno specifična kalibracija. Tudi pri uporabi ADR impedančnih merilnikov je za zanesljive meritve talno specifična kalibracija priporočljiva (Muñoz-Carpena, 2004; Rowlandson in sod., 2013). V primerjavi s TDR merilnim sistemom, Evett in sod. (2006) poročajo veliko temperaturno občutljivost pri proučevanih kapacitivnostnih merilnikih, ki je večja pri večjih vsebnostih vode.

2.3.3.4 Časovni odziv (Time Domain Transmission - TDT)

Metoda meri čas širjenja elektromagnetnega impulsa, enosmerno po transmisijski liniji. Kljub temu, da je metoda podobna TDR, potrebuje električno povezavo na začetku in na koncu transmisijske linije. Ne glede na to je vezje enostavnejše od tistega, ki je uporabljen pri TDR merilnih sistemih, zato so TDT merilniki cenejši (Muñoz-Carpena, 2004; Blonquist in sod., 2005).

2.3.3.5 Fazni prenos

Po potovanju po fiksni razdalji sinusni val izkaže fazni zamik, ki je relativen fazi izvora. Fazni zamik je odvisen od dolžine potovanja po transmisijski liniji, frekvence in hitrosti širjenja, ki je odvisna od vsebnosti vode v tleh. Zato lahko vsebnost vode določimo s faznim zamikom za dano frekvenco in razdaljo potovanja (Muñoz-Carpena, 2004).

2.3.3.6 Zemeljski radar (Ground Penetrating Radar - GPR)

Zemeljski radar je geofizikalna metoda, ki omogoča visoko ločljive, tridimenzionalne posnetke pod površjem (Knight, 2001). Kljub temu, da so znanstveniki že na začetku prejšnjega stoletja začeli proučevati širjenje radijskih valov nad in vzdolž površine Zemlje, sta Waite & Schmidt (1962) prva poročala o ponovljivem radiofrekvenčnem prodoru v podzemno površino skozi naravni material, ledeno ploskev na Grenlandiji (Annan, 2002). Zemeljski radar generira in oddaja radijske frekvence iz širokega nabora kotov iz antene v tla. Ločena antena prejema tako prenešene, kot tudi odbite signale. Za meritve iz površine tal, signali prihajajo do sprejemne antene po treh primarnih poteh: 1) neposredno preko zraka med oddajno in sprejemno anteno, 2) neposredno skozi bližnjo površino tal in anteno ter 3) posredno po oddajanju iz objektov ali meja plasti pod površjem tal. Iz znanih signalov je mogoče določiti tako hitrost signala, ki potuje skozi tla, kot tudi slabitev signala. Nato lahko z analizo, podobno kot se uporablja pri TDR, sklepamo na vsebnost vode in električno prevodnost tal, po katerih je radijska frekvenca potovala do antene (Topp & Ferré,

2002). Za razliko od TDR merilnih naprav, GPR antene ne potrebujejo direktnega kontakta s tlemi in so lahko premične. Prednost metode je v ne invazivni sposobnosti prostorske zaznave vsebnosti vode. Merilno območje je na vmesni skali med točkovnimi meritvami in daljinskim zaznavanjem vsebnosti vode pod površjem. Slabost GPR je v količini zahtevanega znanja, ki ga upravljalec potrebuje za pridobitev kakovostnih podatkov in ustrezno interpretacijo (Huisman in sod., 2001; Davis & Annan, 2002; Robinson in sod., 2008). Zemeljski radar je ob primerni kalibraciji z gravimetričnim standardom primeren za zaznavo vsebnosti vode v koreninskem območju tudi za namene upravljanja namakanja (Shamir in sod., 2018).

2.3.4 Meritve matričnega potenciala vode v tleh

Merilne naprave, ki merijo matrični potencial vode v tleh, nam podajo informacijo o sili, s katero je voda vezana na talne delce. Vsi t. i. tenziometrični instrumenti vsebujejo porozni material, ki je v stiku s tlemi in skozi katerega voda lahko prehaja. Med njih uvrščamo tenziometre, avtomatske merilnike za meritve vodnega potenciala in metodo upornostnih blokov (mavčni bloki ali granulirani matrični merilniki). Tenziometri natančno merijo potencial vode v tleh v območju rastlinam dostopne vode, kar je zelo uporabno v hortikulturi. Temperatura in raztopljene soli v talni raztopini na meritve nimajo vpliva. Glavna slabost tenziometričnih merilnikov je pojav kavitacije v suhih tleh. Navadni tenziometri delujejo le do tenzije 80 do 85 kPa, zato je za nemoteno delovanje potrebno vzdrževanje ustrezne tenzije oziroma vsebnosti vode v tleh (Muñoz-Carpena, 2004; Zupanc & Pintar, 2007; Heng & Evett, 2008; Pardossi in sod., 2009).

2.4 NEGOTOVOSTI IN POMANJKLJIVOSTI ANALIZE METOD

V prispevku uporabljena znanstvena literatura je bila, za vsak vsebinski sklop, izbrana na podlagi prebranih izvlečkov. Pomanjkljivost analize je v tem, da smo količino literature morali omejiti in preglednega prispevka nismo izvedli na podlagi vse obstoječe literature. Zato je negotovost analize lahko povzročena zaradi subjektivnosti izbire obravnavanih znanstvenih prispevkov.

3 REZULTATI IN RAZPRAVA

3.1 PRIMERJAVA IN UPORABA METOD MERITEV

Za večjo preglednost obravnavanih metod smo pripravili preglednico 1, ki prikazuje najpogosteje upora-

bljene metode za določevanje vsebnosti vode v tleh. Metode meritev smo primerjali glede na merjene parametre, način vzorčenja, obliko merilnika, prostorsko skalo zaznave, frekvenco meritev, kakovost podatkov in zahtevnost obdelave podatkov. Pri elektromagnetnih metodah smo dodali še ceno posameznega merilnega instrumenta, ki ne vključuje shranjevalnika podatkov. Določeni merilniki, poleg meritev vsebnosti vode v tleh, omogočajo sočasne meritve temperature in električne prevodnosti. Z daljinskim zaznavanjem lahko dobimo zgolj informacijo o vsebnosti vode neposredno pod površjem. Glavne značilnosti, ki vplivajo na izbiro posamezne merilne metode, vsekakor vključujejo časovno frekvenco meritev, težavnost obdelave podatkov in ceno. Zvezno časovno serijo meritev omogočajo le merilniki, ki merijo dielektričnost tal, a hkrati omogočajo le točkovne meritve. Z zemeljskim radarjem ali daljinskim zaznavanjem lahko z istim merilnim instrumentom meritve izvedemo na večjih površinah, a za interpretacijo podatkov potrebujemo usposobljeno osebje s specifičnim znanjem, medtem ko pri ostalih metodah uporabnik ne potrebuje predhodnega znanja. Podatki o vsebnosti vode v tleh so običajno izraženi z volumskimi odstotki.

Preglednica 1: Pregled najpogostejše uporabljenih metod za določevanje vsebnosti vode v tleh (povzeto po Teixeira in sod., 2003; Muñoz-Carpena, 2004; Robinson in sod., 2008; Pardossi in sod., 2009; Petropoulos in sod., 2015)

Table 1: An overview of the most commonly used methods for determination of soil water content (summarized by Teixeira et al., 2003; Muñoz-Carpena, 2004; Robinson et al., 2008; Pardossi et al., 2009; Petropoulos et al., 2015)

Gravimetrično	Merjeni parametri	Način vzorčenja	Oblika merilnika	Prostorska skala	Frekvenca meritvev	Kakovost podatkov	Obdelava podatkov	Cena (€)
TDR	θ (vol. %)	vzorčenje tal znanega volumna	/	točkovna (običajno $V = 100 \text{ cm}^3$)	kampanjska, ni zvezna	visoka	preprosta	
	θ (vol. %), EC (dS m^{-1})	vgradnja v posamezno plast talnega profila	2 ali 3 vzporedne kovinske vilice TRIME (vilice prevlečene s PVC)	točkovna, po dolžini vilic (10 - 30 cm) in 1 cm okoli vilic na vse strani	zvezna, izmerjeni podatki se samodejno vpisujejo v shranjevalnik podatkov, v željenih časovnih intervalih (npr. urnih)	visoka	preprosta	1500 - 5000
	θ (vol. %), EC (dS m^{-1}), T ($^{\circ}\text{C}$)	vgradnja v posamezno plast talnega profila	zunanja kovinska elektroda je ukrivljena in sklenjena			po talno specifični kalibraciji, visoka	preprosta	150 - 500
FD	θ (vol. %), EC (dS m^{-1}), T ($^{\circ}\text{C}$)	vgradnja v posamezno plast talnega profila več globinske vstavimo v dostopno cev	v mnogo različnih oblikah, 2 ali 3 vzporedne kovinske vilice več globinski imajo elektrode nameščene koncentrično vzdolž plastične cevi	točkovna, običajno 90 % zaznave pride od 2 cm v stran od merilnih elektrod, vilice so običajno dolge 5 - 10 cm več globinski merijo po profilu v dostopni cevi, z radijem 5 - 10 cm			preprosta	50 - 1000
	ADR: Impedanca	vgradnja v posamezno plast talnega profila	centralna kovinska vilica, s tremi kovinskimi vilicami, ki jo obkrožajo	točkovna, volumen zaznave znotraj zunanjih vilic (dolge 5 - 10 cm)			preprosta	450 - 500
GPR	θ (vol. %)	premična zaznava po površini	običajno na premični platformi v obliki vozička	med točkovnimi meritvam in daljinsko zaznavo	kampanjska, ni zvezna	visoka	zahtevna	12000 - 15000
	θ pod površjem	snemanje	na premični platformi (letalo, satelit)	lokalna, globalna	kampanjska ali zvezna v več dnevih intervalih	nizka	zahtevna	

3.2 VPLIV LASTNOSTI TAL NA MERITVE Z ELEKTROMAGNETNIMI METODAMI

Zaradi kompleksnih interakcij med elektromagnetnimi valovi in talnimi komponentami ni mogoče vzpostaviti edinstvenega kalibracijskega razmerja za določanje vsebnosti vode v tleh (Topp & Ferré, 2002). Dejavniki, ki vplivajo na dielektričnost tal, so tekstura in mineralna sestava tal (Gong in sod., 2003; Vaz in sod., 2013; Provenzano in sod., 2015; Iwata in sod., 2017; Hajdu in sod., 2019), delež in vrsta organske snovi (Fares in sod., 2016; Kassaye in sod., 2019), gostota (Zettl in sod., 2015; Matula in sod., 2016; Parvin & Degre, 2016), električna prevodnost tal (Varble & Chávez, 2011; Sevostianova in sod., 2015; Matula in sod., 2016) in temperatura (Bogena in sod., 2007; Chanzy in sod., 2012; Mittelbach in sod., 2012; Bogena in sod., 2017; Walthert & Schleppei, 2018; González-Teruel in sod., 2019). Interakcija elektromagnetnih valov in glinenih mineralov z veliko kationsko izmenjevalno kapaciteto in površino delcev še ni popolnoma jasna (Evelt & Parkin, 2005). Gostejša kot so tla, večje je volumsko razmerje trdnih delcev v primerjavi z zrakom in večja je dielektričnost suhih tal. Točnost meritev se izboljša z naraščajočo gostoto substrata, kar poudarja pomembnost dobrega stika med merilnikom in substratom (Gong in sod., 2003; Matula in sod., 2016). V splošnem merilniki izkazujejo velike razlike med organskimi tlemi ter tlemi z veliko prevodnostjo, v primerjavi z mineralnimi. Pri organskih tleh so surovi izhodni podatki merilnika v splošnem manjši kot pri mineralnih tleh, kar je pričakovano zaradi manjše gostote in večje poroznosti organskih materialov (Vaz in sod., 2013).

3.3 TALNO SPECIFIČNA KALIBRACIJA MERILNIKOV

Napake pri meritvah vsebnosti vode v tleh imajo lahko močne negativne posledice pri upravljanju namakanja (Soulis in sod., 2015). Zato je za ustrezno delovanje merilnikov potrebna točnost meritev, ki ob uporabi zgolj proizvajalčeve kalibracijske funkcije ni vedno zagotovljena (Seyfried in sod., 2005; Spelman in sod., 2013; Matula in sod., 2016; Parvin & Degre, 2016; Lima in sod., 2018; Roberti in sod., 2018; Domínguez-Niño in sod., 2019).

Standardna referenčna metoda kalibracije elektromagnetnih merilnikov je gravimetrična. Poznamo laboratorijsko in terensko kalibracijo merilnikov. Laboratorijsko kalibracijo lahko izvedemo na porušenem in neporušenem vzorcu tal. Pri laboratorijski kalibraciji na porušenem vzorcu pridobimo vzorec tal, ga posušimo na zraku, presejemo skozi 2 ali 5 mm sito, zmešamo z znano količino vode ter ga v primerno veliki posodi, zgostimo

na naravno gostoto tal. Z merilnikom, vstavljenim v tako pripravljen vzorec, naredimo odčitek in takoj vzorčimo z manjšim cilindrom za gravimetrično določitev vode. Z vsako meritvijo dobimo le eno kalibracijsko točko, zato moramo postopek ponavljati pri različnih dodanih količinah vode (Starr & Paltineanu, 2002). V primerjavi s tradicionalno presejanimi tlemi je kalibracija v neporušenem vzorcu tal po mnenju mnogih avtorjev, naprednejša zaradi ohranitve naravne strukture tal in skeleta (Weitz in sod., 1997; Provenzano in sod., 2015; Holzman in sod., 2017). Neporušen vzorec tal nasičimo z vodo, vanj vstavimo merilnik ter ob sušenju vzorca na zraku tehtamo celoten vzorec znanega in ustreznega volumna za kasnejšo gravimetrično določitev vsebnosti vode ter sočasno odčitamo surove izhodne podatke merilnika. Ob prisotnosti skeleta, čigar dielektrične lastnosti se od fine frakcije značilno razlikujejo, lahko prihaja do občutnega odklona v primerjavi s kalibracijskim razmerjem fine frakcije (Coppola in sod., 2013). Weitz in sod. (1997) so med prvimi laboratorijsko kalibracijo TDR merilnega sistema izvedli v neporušenih talnih monolitih tropskih tal vulkanskega izvora. TDR je ob uporabi Topp-ove enačbe podcenjeval dejansko vsebnost vode. Holzman in sod. (2017) so impedančne merilnike ThetaProbe ML2X (Delta-T Devices), ki so v merilnem omrežju za validacijo satelitskih ocen vsebnosti vode, kalibrirali v neporušenem vzorcu tal. Prav tako so Roberti in sod. (2018) iz 33 lokacij v ZDA kalibrirali kapacitivnostne merilnike EnviroSCAN (Sentek Environmental Technologies, Kent Town, Australia), na preko 150 neporušenih vzorcev tal. Ugotovili so, da se proizvajalčeve kalibracijske enačbe slabo prilagajajo podatkom pri skoraj vseh tipih tal. Poudarili so pomembnost kalibracije merilnikov, še posebej, če se vsebnost vode meri na različnih talnih tipih.

V primeru terenske kalibracije merilnike vgradimo v tla ter ob različnih okoljskih razmerah (suho, vlažno, mokro) vzorčimo tla v bližini merilnika za gravimetrično določitev vsebnosti vode ter meritve povežemo z odčitki merilnika (Geesing in sod., 2004). Terenska kalibracija je bolj delovno in časovno zahtevna od laboratorijske, vzorčne točke so lahko zelo blizu in pokrivajo majhen razpon vsebnosti vode v primerjavi z laboratorijsko kalibracijo (Kinzli in sod., 2012). Kassaye in sod. (2019) navajajo, da je kljub izboljšani točnosti meritev po laboratorijski kalibraciji pridobljena kalibracijska funkcija še vedno podcenjevala vsebnost vode v tleh. Preprost postopek kalibracije na terenu pri naravni gostoti tal je zagotovil najbolj točno oceno volumske vsebnosti vode. Visconti in sod. (2014) so ocenjevali laboratorijsko in terensko kalibracijo kapacitivnostnih merilnikov 10HS in 5TE (Decagon Devices). Opisali so določene dejavnike, ki v laboratorijskih razmerah niso prisotni: 1) variabilnost med merilniki, 2) lastnosti tal, kot so raztezanje in

krčenje med namakalnimi cikli, prisotnosti skeleta, korenin, talne favne, temperature spremembe in 3) dejanska razlika med različnimi vsebnostmi vode vzorčnih mest, ki je posledica prostorske variabilnosti. Zato priporočajo metodološki pristop, ki temelji na kalibraciji v laboratoriju in kasnejši validaciji na terenu.

3.4 UPORABNOST MERITEV

Merjenje vsebnosti vode v tleh uporabljamo za izračun vodne bilance v hidrološkem krogu, npr. za merjenje bogatenja podzemnih voda (Šerjak in sod., 2019; Zupanc in sod., 2020). Sicer so tehnološke inovacije, ki lahko izboljšajo trajnost namakanja v kmetijstvu, pomembne za optimalno izrabo vodnih virov in energije (Adeyemi in sod., 2017; Cvejčić in sod., 2020). Učinkovitejšo izrabo vode v kmetijstvu lahko dosežemo z dodajanjem vode v točno določenih količinah, na določeno mesto ob določenem času (Lozoya in sod., 2016). Svetovno najbolj razširjena strategija upravljanja namakanja temelji na modelih vodne bilance (Zupanc in sod., 2012), vendar je zaradi naglega tehnološkega napredka povečano zanimanje za upravljanje namakanja, ki temelji na meritvah vsebnosti vode v tleh (Millan in sod., 2019). Zvezne meritve vsebnosti vode v tleh omogočajo delovanje avtomatiziranih namakalnih sistemov (Raine in sod., 2007). Napake v podatkih lahko sprožijo napačne odločitve, kar vodi do neučinkovite izrabe virov, povečanja stroškov in okoljskih tveganj. Zato mora biti pri avtomatiziranih sistemih z majhno intervencijo človeka posebna skrb namenjena kakovosti podatkov (Thessler in sod., 2011).

Zotarelli in sod. (2011) poročajo znatno zmanjšanje porabljenega vode za namakanje zelene paprike ob namakanju na podlagi meritev, v primerjavi z namakanjem ob fiksnem času. Papanikolaou & Sakellariou-Makrantonaki (2013) sta preučevala dva pristopa namakanja sirka: 1) količina dodane vode do 100 % dnevne evapotranspiracije, dodane na dva dni in 2) avtomatsko namakanje do 100 % dnevne evapotranspiracije, na podlagi meritev vsebnosti vode v tleh. V drugem primeru sta ugotovila manjšo porabo vode, večjo učinkovitost izrabe vode in prihranke energije. Blonquist in sod. (2006) poročajo za 16 % manjšo porabo vode ob namakanju trate na podlagi meritev vsebnosti vode v tleh s TDT merilniki, v primerjavi z namakanjem na ocenah evapotranspiracije, pridobljenih iz vremenske postaje. Millan in sod. (2019) so testirali avtomatski namakalni sistem, ki deluje na podlagi meritev kapacitivnih merilnikov in omogoča vzpostavitev reguliranega deficitnega namakanja. Avtomatizirano namakanje je uspešno vzpostavilo strategijo deficitnega namakanja, ki ni povzročilo sušnega stresa med občutljivejšimi razvojnimi fazami japonske slive.

Natančno namakanje na podlagi meritev vsebnosti vode v tleh se pogosto uporablja pri vzgoji sadik, kjer rastline rastejo v loncih omejenega volumna, zaradi česar je privzem vode omejen in so rastline hitreje izpostavljene sušnem stresu (Bayer in sod., 2013; Incrocci in sod., 2019; Kaptein in sod., 2019).

Skeletna tla lahko ovirajo nameščanje merilnikov (Spittlehouse, 2000). Prisotnost talnih por ozioroma zračnih prostorov med merilnikom in tlemi rezultira v merilnih napakah (Cosh in sod., 2005), zato je potrebna posebna pozornost ob nameščanju merilnikov. V praksi na meritve na dolgi rok vplivajo obdelava tal, gnojenje in namakanje - pri majhnih vsebnostih vode se v določenih tleh lahko pojavijo razpoke, ki vodijo do merilnih napak zaradi prisotnosti zraka. Vse omenjene učinke je potrebno ustrezno nasloviti in primerno vzdrževati tla okoli merilnika (Chen in sod., 2013). Za avtomatizacijo in izboljšanje namakalnih praks so trenutno najbolj v uporabi merilni sistemi, ki uporabljajo avtonomne merilnike, ki podatke prenašajo na bazno postajo brezžično, preko nekakšnega radijskega oddajnika. Privlačnost tovrstnih merilnih sistemov je v možnosti delovanja na velikih površinah, meritvah na mnogih točkah in možnosti namestitve na odročnih lokacijah, kar preferenčno vodi do merilnikov, ki imajo majhno porabo energije, so poceni in imajo primerno tovarniško kalibracijo (Robinson in sod., 2008; Vellidis in sod., 2008).

4 SKLEPI

V preglednem prispevku smo, v slovenskem jeziku, povzeli za kmetijstvo relevantne metode meritev vsebnosti vode v tleh, ki se sicer uporabljajo tudi v drugih okoljskih znanostih. Bralcem smo omogočili možnost vpogleda v ozadje delovanja merilnih sistemov in njihovo primernost za različne načine uporabe. Ugotovili smo, da lahko informacijo o stanju vode v tleh pridobivamo na različne načine. S tenziometričnimi metodami izmerimo matrični potencial vode v tleh. Volumsko vsebnost vode lahko merimo neposredno z gravimetrično metodo ali posredno. Posredne metode temeljijo na meritvah neke druge lastnosti, ki je odvisna od vsebnosti vode v tleh. Med seboj se razlikujejo v prostorski skali meritev, kakovosti podatkov, zahtevnosti obdelave podatkov, zveznosti meritev in ceni. Za različne načine uporabe so primerne različne metode meritev, nobena ni univerzalno primerne za vse namene. Izmed nabora posrednih metod meritev se v kmetijstvu na prostorski skali njive ter v okoljskih znanostih, zaradi uporabniku vedno bolj prijazne rabe in prenosa podatkov, najpogosteje uporabljajo merilniki, ki merijo dielektričnost tal.

Upravljanje namakanja na podlagi meritev vsebnos-

ti vode v tleh postaja v kmetijstvu vedno bolj razširjeno, saj omogoča dovajanje vode le na določenem mestu, kjer vode primanjkuje. V luči podnebnih sprememb in vedno večjih pritiskov na vodne vire je zmanjšana poraba vode za namakanje zelo dobrodošla. Ocenjujemo, da bi bilo koristno spodbujati pridelovalce za privzem namakalnih praks, ki temeljijo na meritvah vsebnosti vode v tleh. Pomembno je tudi zavedanje o merilnih napakah, ki imajo lahko negativne posledice pri upravljanju namakanja, zato vsem uporabnikom svetujemo, da za večjo točnost meritev preverijo, če je potrebna talno specifična kalibracija merilnikov. Poleg tega je posebno skrb potrebno nameniti namestitvi merilnikov, ki mora biti izvedena pravilno in na reprezentativnem mestu.

ZAHVALA

Za razjasnitev elektrotehniških pojmov se prva avtorica zahvaljuje Andražu Žugljui dipl. inž. el.

Avtorji se zahvaljujemo Javni agenciji za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije (ARRS) za finančno podporo mladim raziskovalcem.

5 VIRI

- Adeyemi, O., Grove, I., Peets, S., & Norton, T. (2017). Advanced monitoring and management systems for improving sustainability in precision irrigation. *Sustainability*, 9(3), 353. <https://doi.org/10.3390/su9030353>
- Annan, A.P. (2002). GPR—History, trends, and future developments. *Subsurface Sensing Technologies and Applications*, 3(4), 253–270. <https://doi.org/10.1023/A:1020657129590>
- Bayer, A., Mahbub, I., Chappell, M., Ruter, J., & van Iersel, M.W. (2013). Water use and growth of *Hibiscus acetosella* 'Panama Red' grown with a soil moisture sensor-controlled irrigation system. *Hortscience*, 48(8), 980–987. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.48.8.980>
- Bittelli, M. (2011). Measuring soil water content: A review. *HortTechnology*, 3, 293–300. <https://doi.org/10.21273/HORTTECH.21.3.293>
- Blonquist Jr., J.M., Jones, S.B., & Robinson, D.A. (2005). A time domain transmission sensor with TDR performance characteristics. *Journal of Hydrology*, 314(1), 235–245. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.04.005>
- Blonquist, J.M., Jones, S.B., & Robinson, D.A. (2006). Precise irrigation scheduling for turfgrass using a subsurface electromagnetic soil moisture sensor. *Agricultural Water Management*, 84(1), 153–165. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2006.01.014>
- Bogena, H.R., Huisman, J.A., Oberdörster, C., & Vereecken, H. (2007). Evaluation of a low-cost soil water content sensor for wireless network applications. *Journal of Hydrology*, 344(1–2), 32–42. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.06.032>
- Bogena, H.R., Huisman, J.A., Schilling, B., Weuthen, A., & Vereecken, H. (2017). Effective calibration of low-cost soil water content sensors. *Sensors*, 17(1), 208. <https://doi.org/10.3390/s17010208>
- Chanzy, A., Gaudu, J.-C., & Marloie, O. (2012). Correcting the temperature influence on soil capacitance sensors using diurnal temperature and water content cycles. *Sensors*, 12(7), 9773–9790. <https://doi.org/10.3390/s120709773>
- Chen, H.B., Ye, L. M., & Shi, L. K. (2013). An analysis of the effects on calibration parameters of FDR for moisture sensor caused by different kinds of soils. *Applied Mechanics and Materials*, 401–403, 968–973. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.401-403.968>
- Coppola, A., Dragonetti, G., Comegna, A., Lamaddalena, N., Caushi, B., Haikal, M. A., & Basile, A. (2013). Measuring and modeling water content in stony soils. *Soil and Tillage Research*, 128, 9–22. <https://doi.org/10.1016/j.still.2012.10.006>
- Cosh, M.H., Jackson, T.J., Bindlish, R., Famiglietti, J.S., & Ryu, D. (2005). Calibration of an impedance probe for estimation of surface soil water content over large regions. *Journal of Hydrology*, 311(1–4), 49–58. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.01.003>
- Cvejić, R., Černič-Istencič, 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. <https://doi.org/10.3390/agronomy10091238>
- Davis, J.L., & Annan, A.P. (2002). Ground penetrating radar to measure soil water content. In J.H. Dane & Topp G.C. (Eds.) *Methods of Soil Analysis. Part 4 - Physical Methods* (pp. 446–462). SSSA Book Series. Madison, Wisconsin, USA, Soil Science Society of America Book Series
- Dean, T.J., Bell, J.P., & Baty, A.J.B. (1987). Soil moisture measurement by an improved capacitance technique, Part I. Sensor design and performance. *Journal of Hydrology*, 93(1), 67–78. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(87\)90194-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(87)90194-6)
- Dettmann, U., & Bechtold, M. (2018). Evaluating commercial moisture probes in reference solutions covering mineral to peat soil conditions. *Vadose Zone Journal*, 17. doi:10.2136/vzj2017.12.0208.
- Dobriyal, P., Qureshi, A., Badola, R., & Hussain, S.A. (2012). A review of the methods available for estimating soil moisture and its implications for water resource management. *Journal of Hydrology*, 458–459, 110–117. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.06.021>
- Domínguez-Niño, J.M., Bogena, H.R., Huisman, J.A., Schilling, B., & Casadesús, J. (2019). On the accuracy of factory-calibrated low-cost soil water content sensors. *Sensors*, 19(14). <https://doi.org/10.3390/s19143101>
- Evelt, S.R. (2000). Some aspects of time domain reflectometry, neutron scattering, and capacitance methods for soil water content measurement. *International Atomic Energy Agency (IAEA)*, 31(13), IAEA-TECDOC-1137.
- Evelt, S.R., & Parkin, G.W. (2005). Advances in soil water content sensing. *Vadose Zone Journal*, 4(4), 986. <https://doi.org/10.2136/vzj2005.0099>
- Evelt, Steven R., Tolk, J.A., & Howell, T.A. (2006). Soil profile water content determination. *Vadose Zone Journal*, 5(3), 894. <https://doi.org/10.2136/vzj2005.0149>

- Fares, A., & Alva, A.K. (2000). Evaluation of capacitance probes for optimal irrigation of citrus through soil moisture monitoring in an entisol profile. *Irrigation Science*, 19(2), 57–64. <https://doi.org/10.1007/s002710050001>
- Fares, A., Abbas, F., Maria, D., & Mair, A. (2011). Improved calibration functions of three capacitance probes for the measurement of soil moisture in tropical soils. *Sensors*, 11(5), 4858–4874. <https://doi.org/10.3390/s110504858>
- Fares, A., Awal, R., & Bayabil, H.K. (2016). Soil water content sensor response to organic matter content under laboratory conditions. *Sensors*, 16(8). <https://doi.org/10.3390/s16081239>
- Fellner-Feldegg, H. (1969). Measurement of dielectrics in the time domain. *The Journal of Physical Chemistry*, 73(3), 616–623. <https://doi.org/10.1021/j100723a023>
- Gardner, W., & Kirkham, D. (1952). Determination of soil moisture by neutron scattering. *Soil Science*, 73(5), 391–402. <https://doi.org/10.1097/00010694-195205000-00007>
- Gaskin, G.J., & Miller, J.D. (1996). Measurement of soil water content using a simplified impedance measuring technique. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 63(2), 153–159. <https://doi.org/10.1006/jaer.1996.0017>
- Geesing, D., Bachmaier, M., & Schmidhalter, U. (2004). Field calibration of a capacitance soil water probe in heterogeneous fields. *Australian Journal of Soil Research*, 42. <https://doi.org/10.1071/SR03051>
- Gherboudj, I., Magagi, R., Berg, A.A., & Toth, B. (2017). Characterization of the spatial variability of in-situ soil moisture measurements for upscaling at the spatial resolution of RADARSAT-2. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 10(5), 1813–1823. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2017.2649219>
- Gong, Y., Cao, Q., & Sun, Z. (2003). The effects of soil bulk density, clay content and temperature on soil water content measurement using time-domain reflectometry. *Hydrological Processes*, 17(18), 3601–3614. <https://doi.org/10.1002/hyp.1358>
- González-Teruel, J.D., Torres-Sanchez, R., Blaya-Ros, P.J., Toledo-Moreo, A.B., Jimenez-Buendia, M., & Soto-Valles, F. (2019). Design and calibration of a low-cost SDI-12 soil moisture sensor. *Sensors*, 19(3), 491. <https://doi.org/10.3390/s19030491>
- Hanson, B.R., & Peters, D., (2000) Soil type affects accuracy of dielectric moisture sensors. *California Agriculture*, 54(3), 43–47. <https://doi.org/10.3733/ca.v054n03p43>
- Hajdu, I., Yule, I., Bretherton, M., Singh, R., & Hedley, C. (2019). Field performance assessment and calibration of multi-depth AquaCheck capacitance-based soil moisture probes under permanent pasture for hill country soils. *Agricultural Water Management*, 217, 332–345. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.03.002>
- Heng, L.K., & Evett, S. (2008). Tensiometers. In: *Field estimation of soil water content. A practical guide to methods, instrumentation and sensor technology* (pp. 113–121). Training course series 30. Vienna, International Atomic Energy Agency.
- Hignett, C., & Evett, S. (2008). Direct and surrogate measures of soil water content. In: *Field estimation of soil water content. A practical guide to methods, instrumentation and sensor technology* (pp. 1–21). Training course series 30. Vienna, International Atomic Energy Agency.
- Holzman, M., Rivas, R., Carmona, F., & Niclos, R. (2017). A method for soil moisture probes calibration and validation of satellite estimates. *Methodsx*, 4, 243–249. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2017.07.004>
- Huisman, J.A., Sperl, C., Bouten, W., & Verstraten, J.M. (2001). Soil water content measurements at different scales: Accuracy of time domain reflectometry and ground-penetrating radar. *Journal of Hydrology*, 245(1–4), 48–58. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00336-5](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00336-5)
- IMKO. (1996). *Theoretical aspects on measuring moisture using TRIME®*. IMKO Micromodultechnik GmbH, Ettlingen, Germany.
- Incrocci, L., Marzialetti, P., Incrocci, G., Di Vita, A., Balendonck, J., Bibbiani, C., ... Pardossi, A. (2019). Sensor-based management of container nursery crops irrigated with fresh or saline water. *Agricultural Water Management*, 213, 49–61. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.09.054>
- International Organization for Standardization. (1993). *Soil quality - Determination of dry matter and water content on a mass basis - Gravimetric method* (ISO Standard No. 11465). Retrieved from <https://www.iso.org/standard/20886.html>
- Iwata, Y., Miyamoto, T., Kameyama, K., & Nishiya, M. (2017). Effect of sensor installation on the accurate measurement of soil water content. *European Journal of Soil Science*, 68(6), 817–828. <https://doi.org/10.1111/ejss.12493>
- Jones, S.B., Wraith, J.M., & Or, D. (2002). Time domain reflectometry measurement principles and applications. *Hydrological Processes*, 16(1), 141–153. <https://doi.org/10.1002/hyp.513>
- Kaptein, N.D., Light, M.E., & Savage, M.J. (2019). Sensors for the improvement of irrigation efficiency in nurseries. *Water*, 45(3), 527–535. <https://doi.org/10.17159/wsa/2019.v45.i3.6750>
- Kassaye, K.T., Boulange, J., Saito, H., & Watanabe, H. (2019). Calibration of capacitance sensor for Andosol under field and laboratory conditions in the temperate monsoon climate. *Soil and Tillage Research*, 189, 52–63. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.12.020>
- Kinzli, K.-D., Manana, N., & Oad, R. (2012). Comparison of laboratory and field calibration of a soil-moisture capacitance probe for various soils. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 138(4), 310–321. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000418](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000418)
- Knight, R. (2001). Ground penetrating radar for environmental applications. *Annual Review of Earth & Planetary Sciences*, 29(1), 229. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.29.1.229>
- Lauer, D.T., Morain S.A., & Salomonson V.V. (1997). The Landsat program: its origins, evolution, and impacts. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 63(7), 831–883
- Lekshmi, S.U.S., Singh, D.N., & Baghini, M.S. (2014). A critical review of soil moisture measurement. *Measurement*, 54, 92–105. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.04.007>
- Li, D., Franssen, H.-J. H., Han, X., Angel Jimenez-Bello, M., Martinez Alzamora, F., & Vereecken, H. (2018). Evaluation of an operational real-time irrigation scheduling scheme for drip irrigated citrus fields in Picassent, Spain.

- Agricultural Water Management*, 208, 465–477. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.06.022>
- Lima, J.G.A., Oliviera, A.S., de Souza, L., Silva, N.D., & da Vi-
ana, P.C. (2018). Calibration of a soil moisture sensors with
disturbed and undisturbed soil samples from Bahia. *Revista
Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 22, 696–701.
[doi:10.1590/1807-1929/agriambi.v22n10p696-701](https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v22n10p696-701).
- Lozoya, C., Mendoza, C., Aguilar, A., Roman, A., & Castello,
R. (2016). Sensor-based model driven control strategy for
precision irrigation. *Journal of Sensors*, 9784071. <https://doi.org/10.1155/2016/9784071>
- Malicki, M.A., Plagge, R., & Roth, C.H. (1996). Improv-
ing the calibration of dielectric TDR soil moisture deter-
mination taking into account the solid soil. *European
Journal of Soil Science*, 47(3), 357–366. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1996.tb01409.x>
- Malmberg, C.G., & Maryott, A.A. (1956). Dielectric constant of
water from 0 to 100°C. *Journal of Research of the National
Bureau of Standards*, 56(1), 1. <https://doi.org/10.6028/jres.056.001>
- Matula, S., Batkova, K., & Legese, W.L. (2016). Laboratory per-
formance of five selected soil moisture sensors applying
factory and own calibration equations for two soil media
of different bulk density and salinity levels. *Sensors*, 16(11),
1912. <https://doi.org/10.3390/s16111912>
- Millan, S., Casadesus, J., Campillo, C., Jose Monino, M., &
Henar Prieto, M. (2019). Using soil moisture sensors for
automated irrigation scheduling in a plum crop. *Water*,
11(10), 2061. <https://doi.org/10.3390/w11102061>
- Mittelbach, H., Lehner, I., & Seneviratne, S.I. (2012). Compari-
son of four soil moisture sensor types under field condi-
tions in Switzerland. *Journal of Hydrology*, 430–431, 39–49.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.01.041>
- Muñoz-Carpena, R. (2004). *Field devices for monitoring soil
water content*. Agricultural and Biological Engineering De-
partment, University of Florida. BUL343. Retrieved from
<https://edis.ifas.ufl.edu/ae266> (21. 6. 2019)
- Nemali, K.S., & van Iersel, M.W. (2006). An automated sys-
tem for controlling drought stress and irrigation in potted
plants. *Scientia Horticulturae*, 110(3), 292–297. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2006.07.009>
- Nemali, K.S., Montesano, F., Dove, S.K., & van Iersel, M.W.
(2007). Calibration and performance of moisture sensors in
soiless substrates: ECH₂O and Theta probes. *Scientia
Horticulturae*, 112(2), 227–234. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2006.12.013>
- Noborio, K. (2001). Measurement of soil water content and
electrical conductivity by time domain reflectometry: A
review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 31(3),
213–237. [https://doi.org/10.1016/S0168-1699\(00\)00184-8](https://doi.org/10.1016/S0168-1699(00)00184-8)
- Ojo, E.R., Bullock, P.R., & Fitzmaurice, J. (2015). Field per-
formance of five soil moisture instruments in heavy clay
soils. *Soil Science Society of America Journal*, 79(1), 20–29.
<https://doi.org/10.1016/j.ssa.2014.06.0250>
- Papanikolaou, C., & Sakellariou-Makrantonaki, M. (2013). The
effect of an intelligent surface drip irrigation method on
sorghum biomass, energy and water savings. *Irrigation Sci-
ence*, 31(4), 807–814. <https://doi.org/10.1007/s00271-012-0344-2>
- Pardossi, A., Incrocci, L., Incrocci, G., Malorgio, F., Battista, P.,
Bacci, L., ... Balendonck, J. (2009). Root zone sensors for ir-
rigation management in intensive agriculture. *Sensors*, 9(4),
2809–2835. <https://doi.org/10.3390/s90402809>
- Parvin, N., & Degre, A. (2016). Soil-specific calibration of ca-
pacitance sensors considering clay content and bulk den-
sity. *Soil Research*, 54. <https://doi.org/10.1071/SR15036>
- Petropoulos, G.P., Ireland, G., & Barrett, B. (2015). Surface soil
moisture retrievals from remote sensing: Current status,
products & future trends. *Physics and Chemistry of the Earth*,
83–84, 36–56. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2015.02.009>
- Provenzano, G., Rallo, G., & Ghazouani, H. (2015). Assessing
field and laboratory calibration protocols for the Diviner
2000 probe in a range of soils with different textures. *Journal
of Irrigation and Drainage Engineering*, 142, 04015040.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000950](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000950)
- Raine, S.R., Meyer, W.S., Rassam, D.W., Hutson, J.L., & Cook,
F.J. (2007). Soil–water and solute movement under preci-
sion irrigation: Knowledge gaps for managing sustainable
root zones. *Irrigation Science*, 26(1), 91–100. <https://doi.org/10.1007/s00271-007-0075-y>
- Roberti, J.A., Ayres, E., Loescher, H.W., Tang, J., Starr, G., Dur-
den, D.J., ... Zulueta, R.C. (2018). A robust calibration
method for continental-scale soil water content measure-
ments. *Vadose Zone Journal*, 17(1), UNSP 170177. <https://doi.org/10.2136/vzj2017.10.0177>
- Robinson, D.A., Campbell, C. S., Hopmans, J.W., Hornbuckle,
B.K., Jones, S.B., Knight, R., ... Wendroth, O. (2008). Soil
moisture measurement for ecological and hydrological wa-
tershed-scale observatories: A review. *Vadose Zone Journal*,
7(1), 358. <https://doi.org/10.2136/vzj2007.0143>
- Rowlandson, T.L., Berg, A.A., Bullock, P.R., Ojo, E.R., Mc-
Nairn, H., Wiseman, G., & Cosh, M.H. (2013). Evaluation
of several calibration procedures for a portable soil mois-
ture sensor. *Journal of Hydrology*, 498, 335–344. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.05.021>
- Sevostianova, E., Deb, S., Serena, M., VanLeeuwen, D., & Lein-
auer, B. (2015). Accuracy of two electromagnetic soil wa-
ter content sensors in saline soils. *Soil Science Society of
America Journal*, 79(6), 1752. <https://doi.org/10.2136/sssaj2015.07.0271>
- Seyfried, M.S., Grant, L.E., Du, E., & Humes, K. (2005). Di-
electric loss and calibration of the hydra probe soil water
sensor. *Vadose Zone Journal*, 4(4), 1070–1079. <https://doi.org/10.2136/vzj2004.0148>
- Shamir, O., Goldshleger, N., Basson, U., & Reshef, M. (2018).
Laboratory measurements of subsurface spatial moisture
content by ground-penetrating radar (GPR) diffraction
and reflection imaging of agricultural soils. *Remote Sensing*,
10(10), 1667. <https://doi.org/10.3390/rs10101667>
- Sharma, H., Shukla, M.K., Bosland, P.W., & Steiner, R. (2017).
Soil moisture sensor calibration, actual evapotranspira-
tion, and crop coefficients for drip irrigated greenhouse
chile peppers. *Agricultural Water Management*, 179, 81–91.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.07.001>
- Sheets, K.R., & Hendrickx, J.M.H. (1995). Noninvasive soil wa-
ter content measurement using electromagnetic induction.
Water Resources Research, 31(10), 2401–2409. <https://doi.org/10.1029/95WR01949>

- Soulis, K.X., Elmaloglou, S., & Dercas, N. (2015). Investigating the effects of soil moisture sensors positioning and accuracy on soil moisture based drip irrigation scheduling systems. *Agricultural Water Management*, 148, 258–268. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.10.015>
- Souza, C.F., Conchesqui, M.E.S., & da Silva, M.B. (2019). Semi-automatic irrigation management in tomato. *Engenharia Agricola*, 39, 118–125. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v39nep118-125/2019>
- Spelman, D., Kinzli, K.-D., & Kunberger, T. (2013). Calibration of the 10HS soil moisture sensor for southwest Florida agricultural soils. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 139(12), 965–971. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000647](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000647)
- Spittlehouse, D.L. (2000). Using time domain reflectometry in stony forest soil. *Canadian Journal of Soil Science*, 80(1), 3–11. <https://doi.org/10.4141/S99-004>
- Starr, J.L., & Paltineanu, I.C. (1998). Real-time soil water dynamics over large areas using multisensor capacitance probes and monitoring system. *Soil & Tillage Research*, 47(1–2), 43–49. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(98\)00071-3](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(98)00071-3)
- Starr, J.L., & Paltineanu, I.C. (2002). Capacitance devices. In J.H. Dane & Topp G.C. (Eds.) *Methods of soil analysis. Part 4 - Physical Methods* (pp. 463–474). SSSA Book Series. Madison, Wisconsin, USA, Soil Science Society of America Book Series
- Šerjak, Š., Zupanc, V., & Curk, B.Č. (2019). Calculation of water balance of the weighing lysimeter for assessment of aquifer recharge. *Acta Agriculturae Slovenica*, 114(2), 259–267. <http://dx.doi.org/10.14720/aas.2019.114.2.11>
- Teixeira, W.G., Schroth, G., Marques, J.D., & Huwe, B. (2003). Sampling and TDR probe insertion in the determination of the volumetric soil water content. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, 27(4), 575–582. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832003000400001>
- Thessler, S., Kooistra, L., Teye, F., Huitu, H., & Bregt, A.K. (2011). Geosensors to support crop production: current applications and user requirements. *Sensors*, 11(7), 6656–6684. <https://doi.org/10.3390/s110706656>
- Topp, G.C., Davis, J.L., & Annan, A.P. (1980). Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. *Water Resources Research*, 16(3), 574–582. <https://doi.org/10.1029/WR016i003p00574>
- Topp, G.C., & Ferré, P.A. (2002). General information. Scope of methods and brief description. In J.H. Dane & Topp G.C. (Eds.), *Methods of Soil Analysis. Part 4 - Physical Methods* (pp. 417–420). SSSA Book Series. Madison, Wisconsin, USA, Soil Science Society of America Book Series
- Topp, G., & Reynolds, W.D. (1998). Time domain reflectometry: A seminal technique for measuring mass and energy in soil. *Soil and Tillage Research*, 47(1), 125–132. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(98\)00083-X](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(98)00083-X)
- Varble, J.L., & Chávez, J.L. (2011). Performance evaluation and calibration of soil water content and potential sensors for agricultural soils in eastern Colorado. *Agricultural Water Management*, 101(1), 93–106. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.09.007>
- Vaz, C., Jones, S., Meding, S., & Tuller, M. (2013). Evaluation of standard calibration functions for eight electromagnetic soil moisture sensors. *Vadose Zone Journal*, 12. <https://doi.org/10.2136/vzj2012.0160>
- Vellidis, G., Tucker, M., Perry, C., Kvien, C., & Bednarz, C. (2008). A real-time wireless smart sensor array for scheduling irrigation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 61(1), 44–50. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2007.05.009>
- Vereecken, H., Huisman, J.A., Pachepsky, Y., Montzka, C., van der Kruk, J., Bogen, H., ... Vanderborght, J. (2014). On the spatio-temporal dynamics of soil moisture at the field scale. *Journal of Hydrology*, 516, 76–96. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.11.061>
- Visconti, F., de Paz, J.M., Martínez, D., & Molina, M.J. (2014). Laboratory and field assessment of the capacitance sensors Decagon 10HS and 5TE for estimating the water content of irrigated soils. *Agricultural Water Management*, 132, 111–119. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.10.005>
- Waite, A., & Schmidt, S. (1962). Gross errors in height indication from pulsed radar altimeters operating over thick ice or snow. *Proceedings of the IRE*, 50(6), 1515–1520. <https://doi.org/10.1109/JRPROC.1962.288195>
- Walther, L., & Schleppe, P. (2018). Equations to compensate for the temperature effect on readings from dielectric Decagon MPS-2 and MPS-6 water potential sensors in soils. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 181(5), 749–759. <https://doi.org/10.1002/jpln.201700620>
- Weitz, A.M., Grauel, W.T., Keller, M., & Veldkamp, E. (1997). Calibration of time domain reflectometry technique using undisturbed soil samples from humid tropical soils of volcanic origin. *Water Resources Research*, 33(6), 1241–1249. <https://doi.org/10.1029/96WR03956>
- Zettl, J.D., Huang, M., Barbour, S.L., & Si, B.C. (2015). Density-dependent calibration of multisensor capacitance probes in coarse soil. *Canadian Journal of Soil Science*, 95(4), 331–336. <https://doi.org/10.4141/CJSS-2015-021>
- Zotarelli, L., Dukes, M.D., Scholberg, J.M.S., Femminella, K., & Muñoz-Carpena, R. (2011). Irrigation scheduling for green bell peppers using capacitance soil moisture sensors. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 137(2), 73–81. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000281](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000281)
- Zupanc, V., & Pintar, M. (2007). Metode za merjenje količine vode v tleh 1. Del: Tenziometer. *Acta agriculturae Slovenica*, 89(1), 279–287
- Zupanc, V., Pintar, M., Korpar, P., Železnik Bračič, B., Urbanc, J., Šturm, M., ... Knapič, M. (2009). Use of stable isotopes in Soil - Water - Plant studies. *IAEA Technical Meeting on innovative methods for maintenance and guidelines for modernization of nuclear instruments applied in the fields of food and agriculture and environmental quality management*. May 25–29, 2009. IAEA, Vienna
- Zupanc, V., Bračič Železnik, B., Pintar, M., & Čenčur Curk, B. (2020). Assessment of groundwater recharge for a coarse-gravel porous aquifer in Slovenia. *Hydrogeology Journal*, 28(5), 1773–1785. <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02152-8>
- Zupanc, V., Nolz, R., Cepuder, P., Bračič Železnik, B., & Pintar, M. (2012). Determination of water balance components with high precision weighing lysimeter Kleče. *Acta agriculturae Slovenica*, 99(2) 165–173. <https://doi.org/10.2478/v10014-012-0016-1>