

Ta članek je objavljen pod licenco Creative Commons [Priznanje avtorstva-Deljenje pod enakimi pogoji 4.0 Mednarodna](#).

UPORABA GEORADARJA ZA NEINVAZIVNO DOLOČANJE GLOBINE TAL, DELEŽA SKELETA IN PROSTORSKE VARIABILNOSTI

Jure FERLIN¹, Matej KNAPIČ², Vesna ZUPANC³ in Marjana ZAJC⁴

Tipologija / Article type: Pregledni članek / Review article

Prispelo / Arrived: 24. 10. 2025

Sprejeto / Accepted: 11. 12. 2025

Objavljeno / Published: December 2025

Izvleček

Produktivnost zemljišča je močno odvisna od globine tal. Ta podatek je nujno potreben pri izračunu količine hranil in vodo-zadrževalnih lastnosti tal. Za natančno oceno volumna tal, ki lahko zadrži hranila in vodo, potrebujemo tudi podatek o deležu skeleta v tleh. Ta dva podatka (globina in delež skeleta) sicer lahko pridobimo z uveljavljenimi metodami vzorčenja tal, a sta zaradi heterogenosti zemljišč pravilna le v točki vzorčenja. Za pridobitev bolj reprezentativnih podatkov bi morali na heterogenem zemljišču točkovno vzorčenje večkrat ponoviti, kar pa je drago, časovno zamudno in obenem tudi destruktivno. Alternativno predstavlja georadar, s katerim lahko hitro, neprekinjeno, neinvazivno in ponovljivo zaznavamo večje površine in znotraj njih opredelimo območja z različnimi talnimi značilnostmi. Princip georadarske metode temelji na zakonih prodiranja elektromagnetnih valov, ki jih v impulzih pošiljamo z oddajno anteno v tla. Ko elektromagnetno valovanje doseže mejo med različnimi materiali, se del vpadnega valovanja odbije in ga na površju zazna sprejemna antena. V članku smo poleg principov delovanja georadarja predstavili problematiko skeletnih tal in uveljavljenih metod vzorčenja. V pregledu literature smo navedli raziskave, s katerimi so avtorji uspešno določili globino (skeletnih) tal, prepoznali mejo med horizonti tal, napovedali delež skeleta in gline. V članku je predstavljen naš vidik, da se lahko georadar uspešno vključi v ustaljene metode dela in nam poleg bolj natančnih podatkov tudi prihrani nekaj časa. Vseeno je na tem področju, v primerjavi z uporabo georadarja na drugih področjih, še veliko neraziskanega.

Ključne besede: pedologija, georadar, skeletna tla, delež skeleta.

USE OF GROUND-PENETRATING RADAR FOR NON-INVASIVE DETERMINATION OF SOIL DEPTH, SKELETON CONTENT, AND SPATIAL VARIABILITY

Abstract

Site productivity is often regulated by soil depth, which is essential for calculating nutrient quantities and soil water-holding capacity. To accurately estimate soil volume, information on the proportion of coarse fragments is also required. Traditional soil-sampling methods, are destructive, time-consuming, expensive, and provide only point data. Due to soil heterogeneity, such data are accurate only at the sampling point and cannot be considered representative of the entire site. Ground-penetrating radar (GPR) is an on-site, non-destructive, easily replicable measurement technique. It enables the identification of zones with different production characteristics across large areas. The principle of the GPR method is based on the penetration of electromagnetic waves, which are transmitted into the soil in pulses by the transmitting antenna. When the electromagnetic waves encounter a boundary between different materials, part of the wave is reflected and detected at the surface by the receiving antenna. The literature contains several studies that have successfully determined the depth of (skeletal) soils, identified boundaries between soil horizons, and predicted the proportion of coarse material and clay. Nevertheless, compared with the use of GPR for determining other properties, there is still considerable room for further development in this area.

Key words: soil science, ground-penetrating radar, skeletal soils, skeleton content.

¹ Mag. inž. agr., Inštitut za hmeljarstvo in pivovarstvo Slovenije (IHPS), e-pošta: jure.ferlin@ihps.si

² Mag., IHPS, e-pošta: matej.knapic@ihps.si

³ Doc. dr., Biotehniška fakulteta, Oddelek za agronomijo (BF UL), e-pošta: vesna.zupanc@bf.uni-lj.si

⁴ Doc. dr., Geološki zavod Slovenije, e-pošta: Marjana.Zajc@GEO-ZS.SI

1 UVOD

Uveljavljene metode za pridobivanje podatkov o lastnostih tal so običajno invazivne, časovno zamudne in drage (Schoenholtz in sod., 2000; Smith in sod., 2022). Zaradi heterogenosti zemljišč, zlasti pri skeletnih tleh, so rezultati pravilni le na mestu meritve, za realno oceno posamezne talne lastnosti na večji površini pa je potrebno veliko število meritev. Velik delež skeleta v tleh (delci večji od 2 mm) povzroča precejšnje težave pri natančnem določanju fizikalnih lastnosti tal, kot sta globina in volumen. Produktivnost kmetijskega zemljišča je odvisna od globine tal, ki je nujen podatek za izračun količine hranil in vodozadrževalnih sposobnosti tal (Sucre in sod., 2011). Za pravilno oceno volumna tal, ki lahko zadrži hranila in vodo, moramo oceniti tudi delež skeleta po posameznih globinah tal. Zato smo se nekoliko bolj posvetili skeletnim tlom in v članku predstavili problematiko uveljavljenih metod pri vzorčenju takih tal.

Za premagovanje omejitve točkovnih podatkov, kot so podatki iz pedoloških profilov tal, sond za merjenje vsebnosti vode v tleh, piezometrov, ipd., ter za pripravo podatkov o območjih s podobnimi lastnostmi znotraj obravnavanih površin oziroma za mapiranje območij znotraj njiv, trajnih nasadov, travinja ipd., je na voljo več senzorjev in tehnologij. Izbira senzorja ali tehnologije je odvisna predvsem od talnih lastnosti, ki jih želimo določiti, ter od velikosti obravnavanega območja. Čeprav se uporaba georadarja v agronomskih raziskavah v zadnjem času vse bolj uveljavlja, je na voljo sorazmerno malo rezultatov raziskav in zato s člankom želimo predvsem osvetliti glavne možnosti uporabe georadarja pri raziskavah tal. Ker georadar (GPR) na primer omogoča hitro, neprekinjeno ter neinvazivno zaznavanje hidrogeološke in pedološke pestrosti raziskovanega območja, smo v članku predstavili osnovne principe georadarske metode. Ta omogoča digitalizacijo kmetijskih zemljišč in opredelitev območij z različnimi pridelovalnimi značilnostmi znotraj posameznega zemljišča (vsebnost vode, hidravlične lastnosti, globina, tekstura, struktura, zbitost ...). Skupaj s podatki daljinskega zaznavanja predstavljajo osnovo za optimizacijo agrotehničnih ukrepov (gnojenje, setev, namakanje ...) glede na dejanske potrebe rastlin (Lombardi in sod., 2022). Poleg večje stroškovne in časovne učinkovitosti georadarska metoda zaradi neinvazivnosti omogoča tudi ponovljivost meritev (Zajícová in Chuman, 2019).

V članku smo želeli s pregledom literature poročati, katere lastnosti tal so drugi avtorji že določali z georadarjem in kje je še potreba po nadaljnjih raziskavah.

2 PROBLEMATIKA SKELETNIH TAL

Skeletnost tal izražamo kot relativni volumski delež proda, kamenja in/ali skal v tleh oziroma delcev, večjih od 2 mm, kar je zgornja meja velikosti teksturnih delcev (peska, melja in gline) v tleh. Prisotnost skeleta ter njegova oblika, velikost, delež in mineralna sestava močno spreminjajo premikanje vode in snovi v tleh. Ker se skelet med seboj ne prilega dovolj tesno, se v talnem matriksu oblikujejo makropore, s čimer se poveča dreniranost tal in posledično zmanjša količina rastlinam razpoložljive vode. Skelet povzroči, da se premikanje vode preusmeri na vmesni finejši material, kar vodi do hitrejšega preperevanja in spremembe kemičnih procesov v tleh. Skelet vpliva tudi na temperaturo tal (Eriksson in Holmgren, 1996; Lal in Shukla, 2004; Wu in sod., 2021).

Predvidevamo, da bo določanje globine tal v neskeletnih tleh dokaj enostavno, saj je kontrast med matično podlago in tlemi velik. V skeletnih tleh je meja med tlemi in matično podlago zabrisana, saj so delci matične podlage pomešani s tlemi. Določitev skeleta predstavlja precejšnji izziv in je njegova določitev najbrž odvisna tudi od vrste matične podlage. Na sliki 1 sta prikazana dva pedološka profila tal, ki prikazujeta dve različni obliki skeleta.

2.1 Vzorčenje in meritve skeletnih tal

Hranila v rezultatih analiz tal so običajno podana v masnih koncentracijah fine frakcije tal. Mnoge raziskave pa želijo oceniti količino hranil do določene globine tal na območju znane površine. Za pretvorbo koncentracij v količino moramo poznati volumsko gostoto tal in relativni volumski delež fine frakcije (torej odšteti relativni volumski delež skeleta). Te talne lastnosti so prav tako zelo pomembne pri različnih raziskavah onesnažil v okolju in ocenjevanju usode fitofarmacevtskih sredstev v okolju.

2.1.1 Volumska gostota skeletnih tal

V skeletnih tleh je skupna volumska gostota odvisna od mase oziroma volumna skeleta in fine frakcije tal v skupnem volumnu tal. Za meritve gostote se vzorči z zabijanjem kovinskih valjev znanega volumna v tla, kar je v skeletnih tleh skoraj vedno težava ali celo nemogoče. Valji se namreč ob stiku s skeletom ukrivijo ali pa skelet v vzorcu povzroči zračne žepe, kar vodi do napačnih meritev. V tleh brez skeleta je običajno 100 cm^3 dovolj velik volumen za oceno volumske gostote tal (ISO 11272, 2017).

V skeletnih tleh lahko volumsko gostoto določamo z metodo izkopa in določanjem izkopanega volumna tal z nasipanjem peska ali dolivanja vode v izkopano jamo ter merjenjem dodanega volumna peska ali vode. Izkopani vzorec (talna frakcija in skelet) sušimo 24 ur pri 105 °C. Maso posušenega vzorca delimo z volumnom izkopanega vzorca, ki je enak volumnu peska ali vode. Tako dobimo volumsko gostoto tal (ISO 11272, 2017).

Zaradi velike heterogenosti tal, ki je zaradi neenakomerne porazdelitve skeleta še izrazitejša, je pomembno, da merjenje določene lastnosti opravimo v dovolj velikem volumnu tal, v osnovnem reprezentativnem volumnu tal (REV). REV je pravilno določen, ko volumen tal ne povzroča dodatne variabilnosti merjene lastnosti. V skeletnih tleh to lahko pomeni volumen, večji od 2000 cm³, odvisno od velikosti skeleta (Buchter in sod., 1994).



Slika 1: Dva primera skeletnih tal. Na levi je prevladujoča ploščata oblika skeleta, na desni pa zaobljena (Foto: J. Ferlin).

2.1.2 Volumski delež skeleta v tleh

Ker so se objektivne in natančne meritve deleža skeleta ter heterogenosti tal izkazale za zelo zahtevne, se za določanje volumskega deleža skeleta v tleh običajno uporablja subjektivna ocena na terenu, kar povzroči manjšo napako, kot če deleža skeleta sploh ne upoštevamo. Vendar subjektivna ocena pomeni neprecizne izračune količin hranil ali vode v tleh. V literaturi priporočajo, da znaša REV vzorca za merjenje volumskega deleža skeleta v tleh 2100 cm³ za rendzino (Buchter in sod., 1994), do 4000 cm³ za skeletna tla s 35 % do 40 % skeleta oziroma tudi več kot 5000 cm³ za tla z več kot 54 % skeleta (Vincent in Chadwick, 1994), pri čemer so REV povezani z velikostjo skeleta.

Vzorec tal za določanje volumskega deleža skeleta najprej mokro presejemo čez 2 mm sito, s čimer od skeleta odstranimo delce, manjše od 2 mm, ki predstavljajo fino frakcijo tal. Skelet nato potopimo v merilni valj ali čašo z vodo, pri čemer mora biti vode dovolj, da se skelet v celoti potopi. Dvig nivoja vode predstavlja volumen skeleta, saj ta izpodrine enak volumen vode. Metoda je povzeta po Knapič (2014). Za pridobitev reprezentativnih vzorcev potrebujemo večje število pedoloških profilov tal. V primeru večjih skal je potreben tudi večji izkop profila tal. Poleg tega moramo za to metodo v celotni globini profila tal določiti horizonte z različnimi deleži skeleta in iz vsakega odvzeti vzorec. Ta metoda izkopa je sicer zanesljiva, vendar časovno zelo potratna, fizično zahtevna in destruktivna. Ker je skeletnost praviloma zelo variabilna lastnost, je zaželeno, da za večje površine te lastnosti opredelimo z uporabo senzorja na neinvaziven način.

3 GEORADARSKA METODA

Princip georadarja temelji na zakonih širjenja elektromagnetnih valov, ki jih v kratkih časovnih presledkih (impulzih) pošiljamo z oddajno anteno v tla. Elektromagnetno valovanje se od oddajne antene širi v obliki konusnega stožca z vrhom v središču oddajne antene. Amplituda se zaradi sferičnega razširjanja z oddaljevanjem od antene zmanjšuje (Reynolds, 2011), zato se ločljivost z globino spreminja. Ko elektromagnetno valovanje doseže mejo med različnimi materiali, se zaradi različnih električnih lastnosti del vpadnega valovanja odbije in ga na površju zazna sprejemna antena. Pri tem se meri dvojni čas potovanja valov, torej od oddajne antene do meje med različnimi materiali in od meje do sprejemne antene. Preostali del elektromagnetnega valovanja se na mestu odboja lomi in potuje naprej v globino (Knödel in sod., 2007).

Najpomembnejši lastnosti, ki vplivata na odbojnost na meji med različnimi materiali in na globinski doseg elektromagnetnega valovanja, sta dielektričnost (ϵ) in električna prevodnost (σ) (Kirsch, 2009). Kontrast dielektričnih lastnosti med različnimi snovmi in s tem sprememba hitrosti elektromagnetnega valovanja, povzročita odboj na meji, kar omogoča razlikovanje med različnimi objekti ali plastmi. Večji kot je kontrast med dielektričnimi lastnostmi mejnih materialov, večji delež vpadnega valovanja se odbije, večja in jasnejša je amplituda odboja. Če je kontrast v dielektričnih lastnostih premajhen, so odboji šibki. Na električne lastnosti tal v največji meri vpliva volumna vsebnost vode. Večji kot je delež vode v preučevanem mediju, večji je odboj vpadnega elektromagnetnega valovanja. Razlike v električnih lastnostih materialov vplivajo tudi na hitrost in dušenje elektromagnetnega valovanja (Knödel in sod., 2007).

3.1 Širjenje in dušenje elektromagnetnega valovanja ter dielektričnost in ločljivost georadarskih podatkov

Lastnosti širjenja elektromagnetnega valovanja so odvisne od električnih lastnosti snovi, frekvence in jakosti valovanja. Najpomembnejša dejavnika, s katerima opisujemo širjenje valovanja, sta hitrost in dušenje elektromagnetnih valov. Med najpomembnejšimi dejavniki, ki vplivajo na elektromagnetne lastnosti snovi, so kemična in mineralna sestava, poroznost, prevodnost tekočin v porah, vsebnost vode, temperatura in delež gline (Reynolds, 2011). Vsebnost vode in prisotnost glinenih mineralov vplivata na višjo električno prevodnost snovi ter posledično na večje dušenje elektromagnetnega valovanja. To se z globino hitro zmanjšuje zaradi sferičnega razširjanja in absorpcije, ki je odvisna od prevodnosti preiskanega materiala in frekvence radarskega valovanja (Jol, 2009; Reynolds, 2011).

Hitrost valovanja je odvisna predvsem od dielektrične konstante. Dielektričnost (ϵ) je sposobnost snovi za skladiščenje električnega naboja. Dielektrične snovi omogočajo širjenje elektromagnetnega valovanja brez znatnega dušenja. Večja kot je dielektričnost, nižja je hitrost valovanja. Na dielektrične lastnosti vplivata tudi poroznost tal in vsebnost vode. Večji kot je delež por, zapolnjenih z zrakom, višja je hitrost valovanja. Višja kot je vsebnost vode v tleh, nižja je hitrost valovanja. Iz preglednice 1 je razvidno, da je relativna dielektričnost vode veliko večja kot pri suhi kamnini, zato lahko že majhna vsebnost vode v snoveh zmanjša hitrost širjenja elektromagnetnega valovanja (Jol, 2009; Reynolds, 2011).

S poznavanjem hitrosti potovanja v materialu ali njegove dielektrične lastnosti lahko časovno skalo potovanja signala pretvorimo v globinsko.

Preglednica 1: Vrednosti relativne dielektrične konstante, hitrosti elektromagnetnega valovanja in električne prevodnosti za različne snovi (Jol, 2009; Lombardi in sod., 2022; Zajčová in Chuman, 2019)

Snov	Relativna dielektričnost ϵ_r [-]	Hitrost elektromagnetnega valovanja [mm/ns]	Električna prevodnost σ [mS/m]
Zrak	1,00054	300	0
Voda (pri 18°C)	81,1	33	0,1 – 10 (sladka voda)
Pesek (suh)	3 – 6	120 – 170	0,0001 – 1
Pesek (moker)	25 – 30	55 – 60	0,1 – 10
Melj (moker)	10	95	/
Glina (mokra)	15 (možno tudi do 40)	86 – 110	100 – 1000
Prod	5	134	/

Hitrost širjenja elektromagnetnega valovanja se zmanjšuje z večanjem vsebnosti vode v snovi. Posledično je ločljivost georadarskih podatkov boljša v mokrih kot v suhih snoveh. Vendar je v mokrih snoveh z dobro električno prevodnostjo, dušenje večje, zato je globinski doseg georadarja manjši. Elektromagnetno

valovanje se ugodno širi v snoveh z visoko relativno dielektrično konstanto in nizko električno prevodnostjo (Jol, 2009).

Ločljivost je mera sposobnosti razločevanja med dvema signaloma od dveh blizu ležečih objektov in je odvisna od frekvence georadarskega sistema (središčne frekvence in razpona sosednjih mej frekvenc), kontrasta električnih lastnosti materiala ter geometrijskih značilnosti (oblika, velikost, orientacija) ciljne tarče (Kirsch, 2009). Poznamo horizontalno in vertikalno ločljivost. Pomemben dejavnik horizontalne ločljivosti je širina georadarskega snopa, saj vpliva na hitrost signala in s tem na globinski doseg georadarskih meritev. Vertikalna ločljivost je mera sposobnosti ločevanja dveh georadarskih signalov v času in je predvsem odvisna od frekvence. Višja kot je frekvenca radarskega sistema, večje je dušenje in manjši globinski doseg (Kirsch, 2009).

3.2 Delovanje georadarja v tleh

V heterogenem in kompleksnem mediju, kot so tla, je pomembno razumeti posamezne komponente tal (sediment ali preperina, voda, kamnina, zrak), ki vplivajo na georadarsko valovanje in njegov globinski doseg. Bolj kot je medij heterogen, več energije se razprši na objektih pod površjem. V heterogenem okolju, kjer so prisotni različni elementi manjših dimenzij (fragmenti kamnin, razpoke, manjše praznine), prihaja do sipanja elektromagnetnega valovanja, pri čemer prvotno oddani signal izgubi precej energije, saj se razprši na vse strani. Objekti manjših velikosti navadno ne povzročajo močnejših refleksov, kljub temu pa vplivajo na signal, ki potuje skozi tak medij (Jol, 2009).

V tleh ne smemo zanemariti prisotnosti večjih debelin sedimentov, ki povzročajo povečano dušenje signala. Tla imajo kompleksno sestavo in v naravi variirajo ne le v bioloških, kemijskih, fizikalnih in mineraloških značilnostih, temveč tudi v elektromagnetnih. Vse te lastnosti vplivajo na hitrost elektromagnetnega valovanja, dušenje in globinski doseg. Osnovni dejavniki, ki vplivajo na prevodnost tal, so poroznost in delež vode, količina in vrsta soli v raztopini, količina in vrsta glinenih mineralov ter sipanje energije. V tleh so največje izgube energije posledica ionskega izmenjevalnega transporta v raztopini in elektrokemijskih procesov kationov v glinenih mineralih (Doolittle in Collins, 1995).

Na trgu obstaja veliko število različnih dobaviteljev georadarskih naprav. Za lažjo predstavbo, kako izgleda, je georadar prikazan na sliki 2.



Slika 2: Georadarska naprava v hmeljišču (Foto: J. Ferlin)

4 DOLOČANJE LASTNOSTI TAL Z GEORADARJEM

Pomembne prednosti georadarja, ki so pripomogle k uveljavitvi metode na različnih področjih, so (Lombardi in sod., 2022):

- neinvazivnost (meritve se izvajajo brez posega v preiskovani medij), kar omogoča relativno hitro preiskavo večjih območij;
- visoka ločljivost in natančen vpogled pod površje;
- zvezno zajemanje podatkov (merski podatki so dvodimenzionalni časovni profili poljubne dolžine), kar omogoča, da z mrežo vzporednih in prečnih profilov ter nadaljnjo obdelavo dobimo preglednejše tridimenzionalne modele,
- ponovljivost meritev, saj jih je mogoče večkrat izvesti na istem območju in s časovnim ponavljanjem opazovati spremembe lastnosti materiala;
- cenovno ugodna metoda.

4.1 Določanje globine tal

Z georadarjem lahko načeloma zaznamo mejo med tlemi in matično podlago, če je ta meja nenadna in dovolj kontrastna. Običajno je prepoznavna kot visokoamplitudni reflektor, ki je zvezen (Jol, 2009). V študiji so Sucre in sod. (2011) želeli oceniti globino tal do trde matične podlage z georadarsko metodo ter rezultate primerjati z uveljavljeno metodo – vrtanjem z ročnim Edelmanovim svedrom. Raziskava je potekala na različnih tleh ilovnate teksture, delež skeleta je znašal od 15 % do 60 %. Na vseh tipih tal so izvedli kalibracijo georadarja (na znano globino so zakopali kovinsko ploščo). Z georadarjem (200 in 400 MHz anteni) so na vsakem obravnavanju izvedli dve 20-meterski liniji v smeri sever - jug in vzhod - zahod. Na posameznih točkah teh linij so opravili številne izkope pedoloških profilov tal, da so preverili nekatera dvoumna opažanja na radargramih in validirali globino do matične podlage. Podatke so obdelali s programsko opremo. S svedrom so na vsakem obravnavanju opravili pet meritev globine tal. Posamezno vrtanje so zaključili, ko so naleteli na oviro – trdo matično podlago ali večji skelet. Za primerjavo rezultatov obeh metod so uporabili t-test. Med antenama ni bilo razlik. Na vseh obravnavanjih so bile ocenjene globine tal s svedrom (povprečje 53 cm) plitvejšje kot pri georadarskih meritvah (povprečje 88 cm). To pomeni, da metoda s svedrom podceni globino tal za 40 %, kar znaša približno 3500 m³ neupoštevanih tal na hektar (večinoma gre za B in BC horizont) in posledično slabšo oceno zemljišča. Metoda določanja globine skeletnih tal z georadarjem se je izkazala za zelo učinkovito. Podobno so ugotovili tudi Smith in sod. (2022), razen v zelo mokrih ali glinenih tleh.

4.2 Prepoznavanje meje med horizonti tal

Zhang in sod. (2014) so v študiji želeli raziskati vpliv sezonske dinamike vode v tleh na spremembe v georadarskem signalu ter določiti optimalen čas uporabe georadarja za določanje meje med horizonti. Raziskavo so izvedli na pobočju, na dveh tipih tal. Globoka tla (2 m), MI-MGI teksture, so bila na nagibu 15 %, plitva tla (0,5 m), MI teksture, pa na nagibu 30 %. Pravokotno na smer pobočja so v linijah opravili GPR meritve z anteno 400 MHz. Obe mreži georadarskih meritev sta bili v neposredni bližini vgrajenih senzorjev za vsebnost vode v tleh. Meritve so izvajali dvakrat jeseni in dvakrat spomladi. Na radargramih so poiskali »vrhove« odbojev, da so identificirali meje med sloji. Iz vsebnosti vode v tleh so izračunali dielektrično konstanto tal in ocenili hitrost širjenja elektromagnetnega valovanja, iz česar so določili globino do meje med dvema slojema. To so primerjali in validirali z izkopi profilov tal. Ugotovili so, da je v globokih tleh več odbojev na radargramu ob večji vsebnosti vode v tleh, vendar ne takoj po padavinah, saj korenine dreves in nepravilna oblika skeleta povzročata manjši preferenčni tok. Jasno se vidi meja med B in BC ter med BC in C horizontom. To pripisujejo predvsem neprepustnemu sloju BC, ki zadržuje vodo nad njim, povečanju vode v C horizontu zaradi podpovršinskega lateralnega toka po pobočju. V plitvih tleh so bili jasni odboji na radargramu ob manjši vsebnosti vode v tleh. Infiltrirana voda med koreninami in močno skeletnimi tlemi lahko povzroči uklon georadarskega vala. Najbolj jasna je bila meja z matično podlago.

Ryazantsev in sod. (2022) opozarjajo, da je za uspešno razlikovanje med horizonti z georadarjem potrebno:

- kontrast v elektro-fizikalnih lastnostih med horizonti,
- dovolj velika debelina horizontov zaradi vertikalne ločljivosti georadarja,
- razmeroma majhno slabljenje signala.

4.3 Napovedovanje deleža skeleta in gline v tleh

Smith in sod. (2022) so v študiji želeli ugotoviti povezavo med amplitudo georadarskih podatkov in lastnostmi tal ter možnosti za njihovo napovedovanje. Na terenu so izvedli šest linij georadarskih posnetkov z anteno 200 MHz v tleh s teksturo meljaste ilovice. Za preverjanje podatkov so izkopali šest profilov tal in opravili sondiranje na 24 točkah. Podatke so obdelali v programski opremi R, z uporabo paketa »RGPR« jih kalibrirali z merjenjem dvojnega potovalnega časa do kovinske plošče in pretvorili čas v razdaljo. Z analizo surovih amplitudnih atributov so pripravili GPR podatke za napovedno modeliranje ter iz njih izračunali teksturne attribute z uporabo paketa »glcm«. Ti so bili nato uporabljeni za učenje regresijskega modela »random forest« (paket »caret«) za napoved deleža skeleta in gline na podlagi podatkov iz profilov tal. Ugotovili so, da je model precenjeval nižje vrednosti in podcenjeval višje vrednosti deleža skeleta. RMSE vrednosti (koren povprečne kvadratne napake) so bile v zadovoljivih mejah, R^2 vrednosti (v kolikšni meri regresijski model ustreza dejanskim podatkom) pa so bile razmeroma visoke, kar nakazuje na dobro napovedovanje in da je regresija »random forest« primerna metoda za raziskovanje povezav med GPR signalom in fizikalnimi lastnostmi tal. Predlagajo uporabo višje frekvence, na primer 400 MHz.

4.4 Hidravlične lastnosti tal

Status in dinamika vode v nenasičeni coni tal sta odvisna od vsebnosti vode in hidravličnih lastnosti tal. Uporaba georadarja za spremljanje in oceno vsebnosti vode v tleh je v zadnjih letih pritegnila veliko pozornosti, medtem ko so hidravlične lastnosti tal deležne precej manjše pozornosti. Fizikalne lastnosti tal (tekstura, struktura, volumska gostota, poroznost in razporeditev agregatov) neposredno vplivajo na procese, kot so infiltracija, pronicanje in površinski odtok. Posledično to vpliva na zalogo, tok in drenažo vode v tleh (Li in sod., 2019).

Hidravlične lastnosti tal (nasičena in nenasičena hidravlična prevodnost, vodozadrževalne lastnosti in kapaciteta razpoložljive vode ter infiltracijska sposobnost) omogočajo vpogled v trenutne razmere in dinamiko vode v tleh. Tesno so povezane z zgoraj navedenimi fizikalnimi lastnostmi ter zaskorjenostjo in vsebnostjo organske snovi v tleh (Indoria in sod., 2020).

Konvencionalne metode za določanje hidravličnih lastnosti tal (npr. infiltrometer, Guelph permeameter, tension infiltrometer) imajo alternativo v georadarski metodi, ki sicer ni neposredno povezana s hidravličnimi lastnostmi tal, temveč se zanaša na spremembe vsebnosti vode oziroma spremembe dielektrične konstante medija (Rossi idr., 2015).

Dahunsi in sod. (2023) so pripravili pregled študij, ki obravnavajo določanje hidravličnih lastnosti z georadarjem. Navajajo več raziskav, v katerih so avtorji primerjali georadarske rezultate z uveljavljenimi laboratorijskimi in terenskimi meritvami. Med rezultati ni bilo bistvenih razlik. Z uporabo časovno zaporednih georadarskih posnetkov, modelov ter inverznimi metodami so v raziskavah sledili globini omočenosti tal ter iz tega izpeljati nenasičeno hidravlično prevodnost, infiltracijo in parametre vodozadrževalne krivulje. Z georadarjem so tudi zaznali preferenčne tokove in histerezo (sušenje in navlaževanje tal ne potekata po isti krivulji).

5 ZAKLJUČKI

Natančna opredelitev časovnih ali prostorskih sprememb lastnosti tal je ključna za precizno kmetijstvo. Čeprav se je področje v zadnjih letih bistveno razvilo, ostaja temeljni izziv, ki še vedno ovira polno izkoriščenost interpretacije georadarskih podatkov, heterogenost tal v naravi ter omejitve, da se lahko vsak podpovršinski sloj odzove na več kot eno spremembo lastnosti tal.

V literaturi je precej objav s področja uporabe georadarske metode za določanje vsebnosti vode v tleh in koreninske biomase rastlin. Kljub nekaterim študijam o uporabi georadarske metode v pedologiji menimo, da je njena uporabna vrednost še veliko večja ter da je možen napredek in razvoj metode za uporabo v skeletnih tleh in z njimi povezanih talnih značilnostih. Pri pregledu podatkov v literaturi smo ugotovili, da so raziskave na temo določanja deleža skeleta v tleh redke, saj smo našli le eno raziskavo, ki je uporabljala georadar za določanje skeleta. Ker je uveljavljena metoda za ugotavljanje skeletnosti, ki je ključen podatek za oceno volumna tal in posledično kakovosti zemljišča, izredno fizično zahtevna in časovno potratna, načrtujemo, da bo ta tema v ospredju naših nadaljnjih raziskav.

Dostopnost raziskovalnih podatkov

Podatki so na voljo pri odgovornem avtorju na utemeljeno zahtevo.

6 VIRI

- Buchter, B., Hinz, C., Flühler, H., 1994. [Sample size for determination of coarse fragment content in a stony soil](https://doi.org/10.1016/0016-7061(94)90068-X). *Geoderma*, 63(3–4), 265–275. [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(94\)90068-X](https://doi.org/10.1016/0016-7061(94)90068-X)
- Dahunsi, J., Pathirana S., Cheema, M., Krishnapillai, M., Galagedara, L., 2023. [Advances in Ground Penetrating Radar application for estimating soil hydraulic properties: A mini review](https://doi.org/10.7451/CBE.2023.65.1.17). *Canadian Biosystems Engineering*, 65(1), 1.17-1.27. <https://doi.org/10.7451/CBE.2023.65.1.17>
- Doolittle, J. A., & Collins, M. E., 1995. [Use of soil information to determine application of ground penetrating radar](https://doi.org/10.1016/0926-9851(95)90033-0). *Journal of Applied Geophysics*, 33(1995), 101-108. [https://doi.org/10.1016/0926-9851\(95\)90033-0](https://doi.org/10.1016/0926-9851(95)90033-0)
- Eriksson, C. P., & Holmgren, P., 1996. [Estimating stone and boulder content in forest soils—Evaluating the potential of surface penetration methods](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(96)00031-8). *CATENA*, 28(1–2), 121–134. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(96\)00031-8](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(96)00031-8)
- Indoria, A. K., Sharma, K. L., Reddy, K. S. 2020. [Hydraulic properties of soil under warming climate](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-8180327.00018-7). In *Climate Change and Soil Interactions* 473–508. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-8180327.00018-7>
- ISO 11272:2017. Soil quality - Determination of dry bulk density. 2017
- Jol, H. M. (ur.), 2009. *Ground penetrating radar: Theory and applications*, 1st ed. Elsevier Science.
- Kirsch, R. (ur.), 2009. [Groundwater Geophysics: A Tool for Hydrogeology](https://doi.org/10.1007/978-3-540-88405-7), 2nd ed. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-88405-7>
- Knapič, M., 2014. *Opredelitev hidravličnih lastnosti izbranih aluvialnih skeletnih tal v Savinjski dolini*. Magistrsko delo. Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta.
- Knödel, K., Voigt, H.-J., Lange, G., (ur.), 2007. *Environmental geology: Handbook of field methods and case studies*, 1st ed. Springer.
- Lal, R., & Shukla, M. K. (ur.), 2004. *Principles of Soil Physics*, 1st ed. MARCEL DEKKER, INC.
- Li, H., Liao, X., Zhu, H., Wei, X., Shao, M., 2019. [Soil physical and hydraulic properties under different land uses in the black soil region of Northeast China](https://doi.org/10.1139/cjss-2019-0039). *Canadian Journal of Soil Science*, 99(4), 406–419. <https://doi.org/10.1139/cjss-2019-0039>
- Lombardi, F., Ortuni, B., Facchi, A., & Lualdi, M., 2022. [Assessing the Perspectives of Ground Penetrating Radar for Precision Farming. Remote Sensing](https://doi.org/10.3390/rs14236066), 14(23), 6066. <https://doi.org/10.3390/rs14236066>
- Reynolds, J. M. (ur.), 2011. *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*, 2nd ed. Wiley-Blackwell.
- Rossi, M., Manoli, G., Pasetto, D., Deiana, R., Ferraris, S., Strobbia, C., Putti, M., Cassiani, G., 2015. [Coupled inverse modeling of a controlled irrigation experiment using multiple hydro-geophysical data](https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2015.03.008). *Advances in Water Resources*, 82, 150–165. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2015.03.008>
- Ryazantsev, P. A., Hartemink, A. E., Bakhmet, O. N., 2022. [Delineation and description of soil horizons using ground-penetrating radar for soils under boreal forest in Central Karelia \(Russia\)](https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106285). *CATENA*, 214, 106285. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106285>
- Schoenholtz, S. H., Miegroet, H. V., Burger, J. A., 2000. [A review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality: Challenges and opportunities](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00423-0). *Forest Ecology and Management*, 138(1–3), 335–356. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00423-0](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00423-0)
- Smith, H. W., Owens, P. R., Ashworth, A. J., 2022. [Applications and Analytical Methods of Ground Penetrating Radar for Soil Characterization in a Silvopastoral System](https://doi.org/10.32389/JEEG22-001). *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 27(4), 167–179. <https://doi.org/10.32389/JEEG22-001>
- Sucre, E. B., Tuttle, J. W., Fox, T. R., 2011. [The Use of Ground-Penetrating Radar to Accurately Estimate Soil Depth in Rocky Forest Soils](https://doi.org/10.1093/forestscience/57.1.59). *Forest Science*, 57(1), 59–66. <https://doi.org/10.1093/forestscience/57.1.59>
- Vincent, K. R., & Chadwick, O. A., 2004. [Synthesizing Bulk Density for Soils with Abundant Rock Fragments](https://doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800020030x). *Soil Science Society of America Journal*, 58(2), 455-464. <https://doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800020030x>
- Wu, X., Meng, Z., Dang, X., Wang, J., 2021. [Effects of rock fragments on the water infiltration and hydraulic conductivity in the soils of the desert steppes of Inner Mongolia, China](https://doi.org/10.17221/107/2020-SWR). *Soil and Water Research*, 16(3), 151–163. <https://doi.org/10.17221/107/2020-SWR>
- Zajícová, K., & Chuman, T., 2019. [Application of ground penetrating radar methods in soil studies: A review](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.02.024). *Geoderma*, 343, 116–129. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.02.024>
- Zhang, J., Lin, H., & Doolittle, J., 2014. [Soil layering and preferential flow impacts on seasonal changes of GPR signals in two contrasting soils](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.08.035). *Geoderma*, 213, 560–569. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.08.035>