Slovensko geotehnično društvo • Slovenian geotechnical society •

8.

POSVETOVANJE SLOVENSKIH GEOTEHNIKOV

ZBORNIK PREDAVANJ

Rogaška Slatina, 1.–3. oktober 2025

SIMSG ISSMGE

ISRM

EN AIGI IAEG GEOL

igs

Timotej JURČEK[1], Barbara Fortuna[1], Janko LOGAR[1], Jasna SMOLAR[1], Barbara ČENČUR CURK[2], Primož MIKLAVC[2], Timotej VERBOVŠEK[2], Tanja DIMITRIJEVIĆ[3], Mojca MAVRIČ ŠTRUKELJ[4], Anka POŽENEL[4]

[1]Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamova cesta 2, 1000 Ljubljana;
[2]Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta, Oddelek za geologijo, Aškerčeva cesta 12, 1000 Ljubljana
[3]Občina Ajdovščina, Cesta 5. maja 6a, 5270 Ajdovščina
[4]Kmetijsko gozdarska zbornica Slovenije, Kmetijsko gozdarski zavod Nova Gorica, Pri hrastu 18, 5000 Nova Gorica

VODOPREPUSTNOST TAL: TERENSKE MERITVE IN EMPIRIČNE METODE

Povzetek

Vodoprepustnost zemljin določa sposobnost infiltracije vode v tla in ima ključno vlogo pri analizah površinske erozije, saj neposredno vpliva na količino površinskega odtoka padavin ter s tem na intenzivnost erozijskih procesov. V okviru projekta Ero-STOP (program Interreg Italija–Slovenija), usmerjenega v zmanjševanje erozijske ogroženosti kmetijskih območij, so bile v vinogradih na območju občine Ajdovščina izvedene terenske meritve vodoprepustnosti površinskega sloja tal z infiltrometrom SATURO, hkrati pa so bili odvzeti tudi vzorci zemljin za laboratorijske preiskave.

Rezultati laboratorijskih preiskav so omogočili oceno koeficienta vodoprepustnosti (k) z uporabo empiričnih enačb ter tabelaričnih vrednosti, ki so določene za površinski sloj tal na podlagi obsežnih podatkovnih zbirk in so povezane z USDA klasifikacijo zemljin. Vrednosti k, ocenjene iz tabel, praviloma izkazujejo višje vodoprepustnosti kot tiste, izračunane z enačbo Kozeny–Carman. Primerjava ocenjenih in na terenu izmerjene vrednosti k je pokazala dobro ujemanje na lokaciji ZA3*, medtem ko je bila na lokacijah ZA1* in ZA2* izmerjena vrednost tudi za več kot dekado višja od ocenjenih. Dobljeni rezultati bodo uporabljeni kot vhodni podatki za modeliranje erozijskih procesov po metodi SIMWE, hkrati pa poudarjajo pomen validacije podatkov z različnimi metodami ter njihove skrbne interpretacije, saj je zanesljive rezultate modelnih izračunov mogoče pridobiti le na podlagi ustreznih vhodnih podatkov.

Ključne besede:
koeficient vodoprepustnosti, laboratorijske preiskave, terenske preiskave, površinska erozija

SOIL WATER PERMEABILITY: FIELD TESTS AND EMPIRICAL METHODS

Abstract

Soil permeability determines the ability of soils to absorb water and plays a key role in analysing surface erosion, as it has a direct impact on the amount of surface runoff during rainfall and thus on the intensity of erosion processes. As part of the Ero-STOP project (Interreg Italy-Slovenia programme), which aims to reduce the risk of erosion in agricultural areas, field measurements of the permeability coefficient of the top soil layer were carried out in vineyards in the municipality of Ajdovščina using a SATURO infiltrometer and soil samples were taken for laboratory testing.

The laboratory results enabled the estimation of the permeability coefficient (k) using empirical equations and tabulated values derived from extensive data sets associated with the USDA soil classification. In general, the k values obtained from tables showed higher permeability than the values calculated using the Kozeny-Carman equation. The comparison between the estimated and the in situ measured values of k showed a good agreement at site ZA3*, while at the other sites ZA1* and ZA2* the measured values were more than one order of magnitude higher than the estimated values. The results were used as input parameters for erosion modelling using the SIMWE method and illustrate the importance of validating data through multiple approaches and interpreting them carefully, as reliable modelling results can only be achieved with appropriate input data.

Keywords:
coefficient of permeability, laboratory tests, field tests, surface erosion

1 UVOD

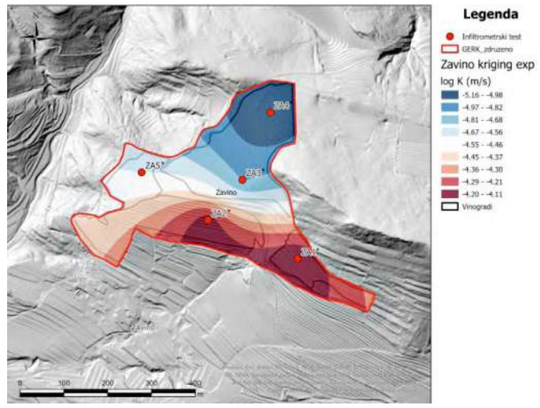
Intenzivnost površinskih erozijskih procesov lahko modeliramo z različnimi metodami, kot sta SIMWE (SIMulation of Water Erosion) in RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation). Eden ključnih vhodnih parametrov obeh modelov je koeficient vodoprepustnosti tal k, ki določa njihovo infiltracijsko sposobnost. Koeficient vodoprepustnosti lahko določimo z meritvami na terenu ali v laboratoriju, ocenimo pa ga lahko tudi s pomočjo različnih empiričnih metod, od katerih so nekatere podrobneje predstavljene v nadaljevanju prispevka.

V okviru projekta Ero-STOP z naslovom Napredni in trajnostni pristopi k preprečevanju erozije tal, smo v sodelovanju z Občino Ajdovščina ter vodilnim partnerjem, Kmetijsko gozdarskim zavodom Nova Gorica, izbrali tri pilotne vinograde, kjer smo izvedli terenske meritve vodoprepustnosti površinskega sloja tal in odvzeli vzorce zemljin za laboratorijske preiskave. Rezultate terenskih meritev, izvedenih z infiltrometrom SATURO, so podrobneje opisali Verbovšek in sodelavci [1]. V tem prispevku pa povzemamo le ključne rezultate, ki so prikazani v Preglednici 1 in na Sliki 1. Poleg vodoprepustnosti oziroma infiltracijske sposobnosti tal je pri vrednotenju dovzetnosti za erozijo pomembna tudi njihova klasifikacija, zato smo v laboratoriju na odvzetih vzorcih izvedli preiskave naravne vlage, zrnavostne sestave ter Atterbergovih meja plastičnosti finih zrn (< 0,063 mm). Na osnovi rezultatov laboratorijskih preiskav smo koeficient vodoprepustnosti ocenili z izbranimi empiričnimi enačbami ter tabelaričnimi vrednostmi, določenimi za površinski sloj tal na podlagi obsežnih podatkovnih zbirk v povezavi z USDA [2] klasifikacijo. To je omogočilo primerjavo med neposrednimi terenskimi meritvami in posredno določenimi vrednostmi ter oceno vpliva uporabljene metode določanja k na variabilnost dobljenih rezultatov.

V prispevku podrobneje predstavljamo rezultate terenskih meritev koeficienta vodoprepustnosti površinskega sloja tal v vinogradu na lokaciji Zavino ter pristop k ocenjevanju koeficienta vodoprepustnosti z uporabo empiričnih metod, pri katerih je osnovni vhodni parameter zrnavostna sestava zemljine. Zrnavostno sestavo finih zrn smo v laboratoriju preiskali po treh metodah: (i) standardna – areometrska preiskava; (ii) meritve z napravo PARIO in (iii) preiskave z laserskim granulometrom. Poleg analize vpliva vrste preiskave na zrnavostno sestavo finih zrn, smo tako ovrednotili tudi vpliv preiskovalne metode na ocenjeno vrednost koeficienta vodoprepustnosti.

Oznaka lokacije	k [m/s]
ZA1*	$1{,}0 \cdot 10^{-4}$
ZA2*	$1{,}1 \cdot 10^{-4}$
ZA3*	$1{,}1 \cdot 10^{-5}$
ZA4*	$5{,}0 \cdot 10^{-6}$
ZA5*	$2{,}6 \cdot 10^{-5}$

Preglednica 1: Izmerjene vrednosti koeficientov vodoprepustnosti k z infiltrometrom SATURO [1] – oznake lokacij so skladne z oznakami na Sliki 1.



Slika 1: Prostorsko interpolirane vrednosti koeficientov vodoprepustnosti k, izmerjenih v vinogradu Zavino, kot podlaga za analizo erozijskih procesov z metodo SIMWE [1].

1.1 Teoretično ozadje

Prepustnost je fizikalna lastnost zemljin ali kamnin, ki opisuje njihovo sposobnost prepuščanja tekočin ali plinov skozi pore med zrni ali skozi razpoke. V geotehniki se najpogosteje obravnava tok vode v tleh, ki se izraža s koeficientom vodoprepustnosti k. Njegova vrednost je odvisna od lastnosti zemljine (zrnavostna sestava, zgoščenost…) kot tudi od fizikalnih lastnosti vode (viskoznost, gostota, prisotnost raztopljenih in suspendiranih primesi…).

Koeficient vodoprepustnosti zemljin lahko izmerimo na terenu in/ali v laboratoriju. Pri terenskih preiskavah sta praviloma ohranjeni naravna gostota in struktura tal, medtem ko je v laboratoriju skladno s standardom SIST EN ISO 17892-11:2019 [3] mogoče preizkušati intaktne, pregnetene, nabite ali rekonstruirane vzorce. Na terenu se vodoprepustnost zgornjih slojev tal najpogosteje meri z infiltrometri [4].

Koeficient vodoprepustnosti lahko poleg neposrednih laboratorijskih in terenskih meritev ocenjujemo tudi posredno – z empiričnimi metodami, ki temeljijo predvsem na zrnavostni sestavi zemljine. Takšni pristopi so praviloma razviti na podlagi statistične obdelave obsežnih podatkovnih zbirk in se v geotehniki pogosto uporabljajo, zlasti pri debelozrnatih zemljinah, kjer je odvzem intaktnih vzorcev za izvedbo laboratorijskih preiskav težaven ali celo ni možen.

V Preglednici 2 so predstavljene izbrane empirične enačbe, ki smo jih uporabili za oceno koeficienta vodoprepustnosti preiskanih zemljin. Med njimi se v slovenski geotehnični praksi najpogosteje uporabljata preprosti enačbi Hazen [5] in USBR [6], medtem ko sta bili zahtevnejši enačbi Kozeny-Carman [7] in Chapuis in sod. [8] uporabljeni na primer pri ocenjevanju koeficienta vodoprepustnosti lokalnih materialov za vgradnjo v nasipe za zaščito gradbene jame HE Brežice [9]. Prednost empiričnih enačb je predvsem enostavna in hitra uporaba, saj za izračun zadošča poznavanje zrnavostne sestave ter osnovnih fizikalnih lastnosti tal. Slabost pa je omejena veljavnost posameznih enačb, ki so razvite na podlagi specifičnih eksperimentalnih podatkov in zato delujejo le v določenem razponu zrnavosti, poroznosti ali oblike zrn. V Preglednici 2 so zato v ločenem stolpcu za vsako empirično relacijo podani tudi pogoji uporabe, ki smo jih v sklopu te raziskave upoštevali.

Avtor	Enačba	Pogoji uporabe/opombe
Hazen [5]	$k = C \cdot \left(\frac{D_{10}}{1000}\right)^2$	$0{,}1\ mm \leq D_{10} \leq 3\ mm$ $C_U < 5$
Kozeny-Carman* [7]	$k = 1{,}99 \cdot 10^2 \cdot \left(\frac{100\%}{\sum \frac{f_i}{D_{i-1}^{0{,}404} \cdot D_i^{0{,}595}}}\right)^2 \cdot \frac{1}{SF^2} \cdot \frac{e^3}{1+e}$	Enakomerno zrnate zemljine z majhnim deležem finih zrn
USBR** [6]	$k = 0{,}36 \cdot 10^{-2} \cdot (D_{20})^{2{,}32}$	Srednje zrnati peski $C_U < 5$
Chapuis in sod. [8]	$k = 2{,}4622 \cdot 10^{-2} \cdot \left(\frac{D_{10}^2 \cdot e^3}{1+e}\right)^{0{,}7825}$	$0{,}031\ mm \leq D_{10} \leq 3\ mm$
kjer je k koeficient vodoprepustnosti [m/s], C empirični koeficient (predpostavljena povprečna vrednost je 10^3 [$m^{-1}s^{-1}$]), D_{10} efektivni premer zrn pri 10 % presejku [mm], D_{20} efektivni premer zrn pri 20 % presejku [mm], f_i frakcija med dvema zaporednima sitoma [%], D_i in D_{i-1} premer zrn [mm] pri čemer indeks i teče od največjega do najmanjšega sita [/], SF faktor oblike zrn [/] (v izračunih je privzeta vrednost 7) in e količnik por [/].		

Preglednica 2: Pregled izbranih empiričnih enačb za oceno koeficienta vodoprepustnosti k.
* Premer najmanjšega zrna je določen po Chapuis in Aubertin [10].
** Bolj kompleksna oblika USBR enačbe je predstavljena v članku Urumović in sod. [6].

V Preglednici 3 so prikazane izbrane vrednosti koeficienta vodoprepustnosti, povzete po različnih avtorjih. Vrednosti k so povezane z USDA klasifikacijo in določene na podlagi obsežnih podatkovnih zbirk, ki veljajo za površinski sloj tal. USDA klasifikacija temelji na zrnavostni sestavi tal, kjer deleži peska, melja in gline določajo teksturni razred zemljine. Pri tem zastopanost gramoza ni upoštevana, zato se deleži peska, melja in gline preračunajo na 100 %. Razvrstitev zemljin poteka znotraj USDA teksturnega trikotnika, medtem ko se vsebnost zrn, večjih od 2,0 mm označi z dodatnim opisom: *gramozna*, kadar je volumski delež gramoza med 15 % do 35 %, *zelo gramozna*, kadar je volumski delež med 35 % in 60 %, ter *izrazito gramozna*, kadar je volumski delež večji od 60 %.

USDA teksturni razred	Koeficient vodoprepustnosti – k [m/s]			
	Clapp in Hornberger [11]	Rawls in sodelavci [12]	Carsel in Parrish [13]	Zhang in Schaap [14]
glina	$1{,}3 \cdot 10^{-6}$	$1{,}7 \cdot 10^{-7}$	$5{,}6 \cdot 10^{-7}$	$1{,}7 \cdot 10^{-6}$
meljasta glina	$1{,}0 \cdot 10^{-6}$	$2{,}5 \cdot 10^{-7}$	$5{,}6 \cdot 10^{-8}$	$1{,}1 \cdot 10^{-6}$
peščena glina	$2{,}2 \cdot 10^{-6}$	$3{,}3 \cdot 10^{-7}$	$3{,}3 \cdot 10^{-7}$	$1{,}3 \cdot 10^{-6}$
glinasta ilovica	$2{,}5 \cdot 10^{-6}$	$6{,}4 \cdot 10^{-7}$	$7{,}2 \cdot 10^{-7}$	$8{,}2 \cdot 10^{-7}$
meljasto-glinasta ilovica	$1{,}7 \cdot 10^{-6}$	$4{,}2 \cdot 10^{-7}$	$1{,}9 \cdot 10^{-7}$	$1{,}3 \cdot 10^{-6}$
peščeno-glinasta ilovica	$6{,}3 \cdot 10^{-6}$	$1{,}2 \cdot 10^{-6}$	$3{,}6 \cdot 10^{-6}$	$1{,}5 \cdot 10^{-6}$
ilovica	$7{,}0 \cdot 10^{-6}$	$3{,}7 \cdot 10^{-6}$	$2{,}9 \cdot 10^{-6}$	$1{,}5 \cdot 10^{-6}$
meljasta ilovica	$7{,}2 \cdot 10^{-6}$	$1{,}9 \cdot 10^{-6}$	$1{,}3 \cdot 10^{-6}$	$2{,}1 \cdot 10^{-6}$
peščena ilovica	$3{,}5 \cdot 10^{-5}$	$7{,}2 \cdot 10^{-6}$	$1{,}2 \cdot 10^{-5}$	$4{,}3 \cdot 10^{-6}$
melj	/	/	$6{,}9 \cdot 10^{-7}$	$5{,}1 \cdot 10^{-6}$
ilovnat pesek	$1{,}6 \cdot 10^{-4}$	$1{,}7 \cdot 10^{-5}$	$4{,}1 \cdot 10^{-5}$	$1{,}3 \cdot 10^{-5}$
pesek	$1{,}8 \cdot 10^{-4}$	$5{,}8 \cdot 10^{-5}$	$8{,}3 \cdot 10^{-5}$	$7{,}4 \cdot 10^{-5}$

Preglednica 3: Izbrane tabelarične vrednosti koeficienta vodoprepustnosti k glede na klasifikacijo USDA.

V primerjavi z meritvami koeficienta vodoprepustnosti zemljin v raščenem oziroma intaktnem stanju empirične metode praviloma ne omogočajo upoštevanja strukture tal, njihove zgoščenosti ter drugih dejavnikov, ki lahko pomembno vplivajo na rezultat. Zato so primerne predvsem za okvirno oziroma prvo oceno koeficienta vodoprepustnosti, medtem ko je za potrebe projektiranja rezultate, pridobljene z empiričnimi metodami, nujno preveriti in potrditi z laboratorijskimi in/ali terenskimi meritvami. Tako smo tudi v naši raziskavi rezultate, pridobljene z empiričnimi metodami, primerjali z rezultati terenskih meritev.

2 MATERIALI IN METODE

2.1 Materiali

Na izbrani lokaciji smo na vzorčnih mestih, označenih na Sliki 2 z rjavimi simboli, najprej odstranili travno rušo in drugo rastje ter odrinili približno 10 cm debel sloj preperelega fliša. Nato smo odvzeli 20 vzorcev zemljin iz površinskega sloja tal do globine ca. 0,40 m. Vzorce smo odvzeli iz sloja tal, v katerem so bile predhodno že izvedene meritve infiltracije (Slika 2 modri simboli, Preglednica 1 in Slika 1). Ker gre za razmeroma nov vinograd, kjer je bilo terasiranje izvedeno v letih 2022/2023, je na površini tal viden preperel fliš, medtem ko sloja humusa v talnem profilu nismo prepoznali.



Slika 2: Lokacije odvzema vzorcev iz površinskega sloja tal v vinogradu Zavino (rjavi simboli) in lokacije izvedenih meritev z infiltrometrom SATURO (modri simboli) [15].

2.2 Postopki izvedbe laboratorijskih preiskav

V laboratoriju smo preiskave izvajali po standardnih postopkih oziroma skladno z navodili proizvajalcev naprav. V Preglednici 4 so predstavljene uporabljene standardne metode, ter navedene prilagoditve, ki izhajajo iz posebnosti preiskanih vzorcev in jih je skladno s standardi treba posebej dokumentirati. V nadaljevanju pa so podrobneje opisani postopki preiskav ugotavljanja zrnavostne sestave finih zrn (< 0,063 mm), ki smo jih izvedli po navodilih proizvajalcev naprav.

Preiskava	Standard	Prilagoditev postopka / opomba
Ugotavljanje vlage	SIST EN ISO 17892-1:2015 [16]	Vsebnost organske snovi → sušenje pri T = 45 °C
Ugotavljanje meje židkosti in meje plastičnosti	SIST EN ISO 17892-12:2018 [17]	Preiskava na odsejanih finih zrnih (< 0,063 m)
Ugotavljanje zrnavostne sestave	SIST EN ISO 17892-4:2016 [18]	Izvedena mokra in suha sejalna analiza

Preglednica 4: Pregled uporabljenih standardnih laboratorijskih postopkov.

2.2.1 Avtomatizirana sedimentacijska metoda (PARIO)

Za določitev krivulje zrnavosti drobnozrnate frakcije vzorcev zemljin je bila uporabljena avtomatizirana sedimentacijska metoda z napravo PARIO (METER Group) (Slika 3). Metoda temelji na Stokesovem zakonu, ki povezuje hitrost posedanja delcev v tekočini z njihovo velikostjo, gostoto, viskoznostjo medija ter razliko v gostoti med delci in tekočino.

Naprava PARIO meri spremembo tlaka na določeni globini v suspenziji, ki nastane zaradi zmanjševanja gostote suspenzije nad merilnikom, kar omogoča izračun hitrosti posedanja delcev. Gostota suspenzije nad merilnikom ni konstantna niti po globini niti skozi čas, zato se na podlagi predpostavljene zrnavostne sestave določi profil gostote suspenzije, z numeričnim integriranjem pa se izračuna tlak. Izračunane vrednosti se nato primerjajo z izmerjenimi in s pomočjo optimizacijskega postopka se prilagodi krivulja porazdelitve delcev, dokler ne dosežemo zadovoljivega ujemanja. Pomembno je poudariti, da rezultat metode ne predstavlja neposredne meritve, temveč izhaja iz računske optimizacije.

Postopek izvedbe preiskave ter princip delovanja naprave PARIO sta podrobneje predstavljena na spletni strani proizvajalca METER Group [19] in v diplomski nalogi Dedić [20]. V okviru navedene naloge je bilo pri preiskavah različnih tipov zemljin ugotovljeno, da so rezultati preiskav ugotavljanja zrnavostne sestave z napravo PARIO v splošnem primerljivi rezultatom, dobljenim s standardno areometrsko metodo.



Slika 3: Naprava PARIO med preiskavo ugotavljanja zrnavostne sestave finih zrn.

2.2.2 Laserska difrakcija

Za preiskave z napravo FRITSCH Analysette 22–28, ki združuje laserski granulometer in dinamično analizo slike, je bil vzorec odsejanih finih zrn (< 0,063 mm) najprej četrtinjen z nerjavečim delilnikom, da je bila pridobljena primerna količina za analizo (približno 1 g). Vzorcu so bili nato v PVC posodici dodani 3 ml destilirane vode, nakar je bil 5 minut homogeniziran s frekvenco 25 Hz s stresalnikom MillMix 20. Na tako pripravljenem preizkušancu je bila izvedena analiza velikosti delcev z napravo FRITSCH Analysette 22–28, ki omogoča meritve v razponu velikosti zrn od 10 nm do 2 mm.

3 REZULTATI IN DISKUSIJA

3.1 Vlaga in klasifikacija zemljin

Preglednica 5 prikazuje naravno vlago in klasifikacijo preiskanih zemljin po sistemih USCS [21] in USDA. Najvišjo naravno vlago 19,9 % izkazuje vzorec ZA16, ki je po USCS klasifikaciji drobnozrnata zemljina – gramozna mastna glina. Ostali preiskani vzorci so po USCS klasifikaciji zaglinjeni gramozi s peskom (GC), ki imajo naravno vlago med 8,3 % in 17,1 %. Medtem ko klasifikacija USCS razlikuje zgolj dva tipa zemljin, se na podlagi enakih rezultatov preiskav zrnavostne sestave po USDA vzorci razvrstijo v pet (5) različnih teksturnih razredov (Preglednica 5). Glede na ocenjeni volumski delež zrn premera med 2,0 mm in 63 mm, je treba teksturnim razredom v Preglednici 5 pripisati tudi oznako gramozna oz. zelo gramozna.

Z makroskopskim pregledom v preiskanih vzorcih nismo zaznali ostankov organske snovi. Laboratorijskih preiskav za kvantitativno ovrednotenje morebitne prisotnosti razpršene organske snovi v tej fazi nismo izvedli, saj gre za razmeroma mlada flišna nasutja, kjer večje vsebnosti organske snovi tudi ne pričakujemo.

Oznaka lokacije	Vlaga [%]	Klasifikacija zemljin (USCS)	Klasifikacija zemljin (USDA)*
ZA1	13,5	GC, zaglinjen gramoz s peskom	ilovica
ZA2	13,5		ilovica
ZA3	10,7		ilovica
ZA4	15,2		glinasta ilovica
ZA5	17,1		glinasta ilovica
ZA6	16,6		ilovica
ZA7	14,5		ilovica
ZA8	11,7		peščeno-glinasta ilovica
ZA9	11,6		ilovica
ZA10	13,2		peščeno-glinasta ilovica
ZA11	15,1		ilovica
ZA12	10,3		peščena ilovica
ZA13	16,8		glina
ZA14	8,3		peščena ilovica
ZA15	13,9		ilovica
ZA16	19,9	CH, gramozna mastna glina	glina
ZA17	13,7	GC, zaglinjen gramoz s peskom	peščena ilovica
ZA18	12,8		ilovica
ZA19	13,7		ilovica
ZA20	11,3		ilovica

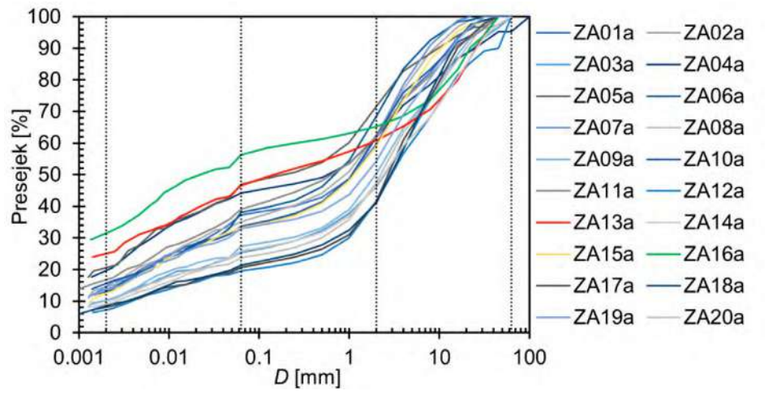
*frakcija 0–2,0 mm.

Preglednica 5: Vsebnost vlage in klasifikacija zemljin po sistemih USCS in USDA

3.2 Krivulje zrnavosti

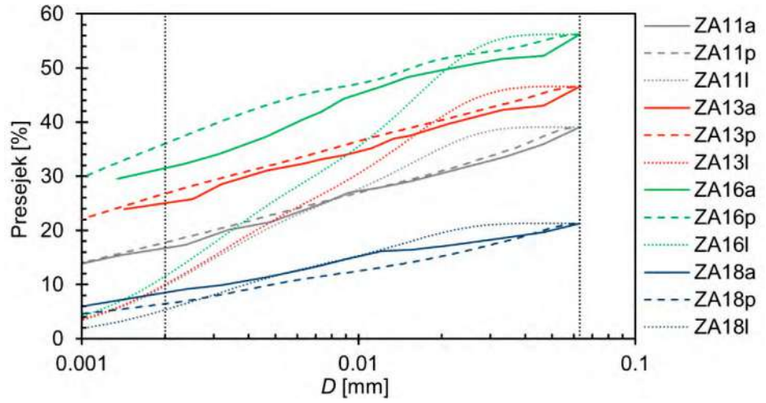
Na Sliki 4 so prikazane krivulje zrnavosti preiskanih vzorcev zemljin, pri čemer je zrnavostna sestava finih zrn izvrednotena iz standardne areometrske preiskave. V legendi je zato poleg oznake vzorčnega mesta dodana črka a (npr. ZA01a). Poleg vzorca ZA16 (Slika 5, zelena krivulja), ki je drobnozrnata zemljina, se od krivulj zrnavosti debelozrnatih zemljin nekoliko razlikuje tudi potek krivulje zrnavosti vzorca ZA13 (Slika 4, rdeča krivulja). Odstopanje od ostalih vzorcev potrjuje tudi USDA klasifikacija, ki zrna premera do 2,0 mm v vzorcih ZA16 in ZA13 uvršča med gline, medtem ko preostali preiskani vzorci vsebujejo večinoma ilovico, v manjšem deležu pa peščeno, glinasto oziroma peščeno-glinasto ilovico (Preglednica 5).

Oba vzorca sta bila odvzeta na delu vinograda (Slika 2), kjer smo pri kartiranju na skrajnem severnem robu prepoznali izdanke Planinske breče – eno izmed debelih karbonatnih megaplasti znotraj fliša [1]. Prisotnost karbonatnih kamnin je potrdila tudi analiza mineralne sestave, ki je v omenjenih vzorcih pokazala višjo vsebnost kalcita kot v ostalih. Na podlagi izvedenih preiskav in terenskega kartiranja ugotavljamo, da kamninsko podlago na območju lokacij odvzema vzorcev ZA13 in ZA16 gradijo apnenci Planinske breče, medtem ko je na preostalem delu vinograda podlaga iz fliša.



Slika 4: Krivulje zrnavosti površinskega sloja zemljin v vinogradu v Zavino. Krivulje zrnavosti finih zrn (< 0,063 mm) so izvrednotene iz standardne areometrske preiskave.

Primerjalne preiskave zrnavostne sestave finih zrn smo izvedli na vseh preiskanih vzorcih. Zaradi preglednosti je na Sliki 5 prikazana le primerjava krivulj zrnavosti finih zrn v vzorcih ZA13 in ZA16, odvzetih na kamninski podlagi iz apnenca, ter v vzorcih ZA11 in ZA18, ki po zrnavostni sestavi predstavljata »spodnjo« in »zgornjo« mejo razpona krivulj zrnavosti, značilnih za vzorce z območja flišnih kamnin. Za vsakega od navedenih vzorcev so prikazane po tri krivulje: oznaka a v legendi (npr. ZA13a) pomeni areometrsko preiskavo, oznaka p (npr. ZA13p) preiskavo z napravo PARIO in oznaka l (npr. ZA13l) preiskavo z laserskim granulometrom. Razen v primeru vzorca ZA18, ki vsebuje najmanjši delež finih zrn (<0,063 mm) in pri katerem vse tri metode dajejo primerljive rezultate, so pri ostalih vzorcih rezultati, izvrednoteni iz areometrske preiskave in iz preiskave z napravo PARIO primerljivi, medtem ko rezultati preiskav z laserskim ganulometrom bistveno odstopajo. Glede na to, da je upad krivulj, izmerjenih z laserskim granulometrom bolj strm, kot upad krivulj izvrednotenih iz areometrskih preiskav in preiskav z napravo PARIO, gre pri preiskavah z laserskim granulometrom verjetno za slabše dispergirana fina zrna v suspenziji.



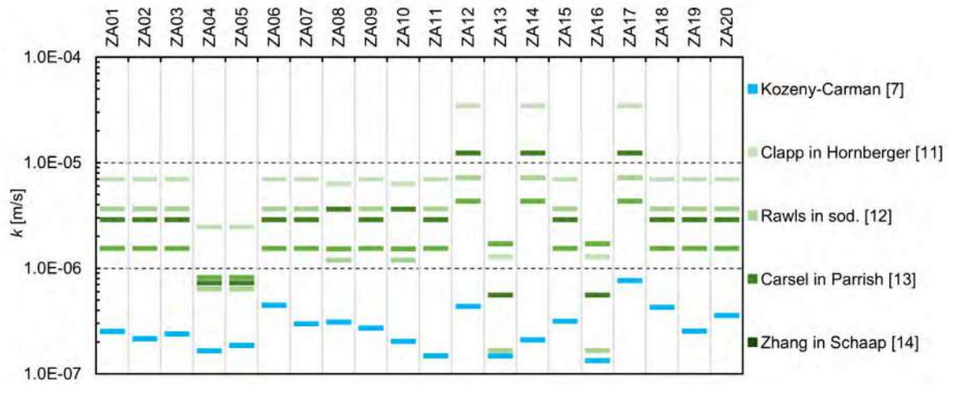
Slika 5: Primerjava rezultatov ugotavljanja zrnavostne sestave finih zrn po različnih metodah.

3.3 Koeficient vodoprepustnosti *k*

Koeficient vodoprepustnosti smo ocenili z uporabo empiričnih enačb in tabelaričnih vrednosti, predstavljenih v poglavju 1.1. Na podlagi zrnavostne sestave se je pokazalo, da enačbe avtorjev Hazen [5], USBR [6] in Chapuis in sod. [8] niso primerne za oceno *k* preiskanih zemljin, saj te ne izpolnjujejo pogojev glede veljavnosti enačb, navedenih v Preglednici 2.

Koeficient vodoprepustnosti smo zato izračunali le po metodi Kozeny–Carman [7] ter ga ocenili na podlagi tabelaričnih vrednosti različnih avtorjev, povzetih v Preglednici 3. Čeprav glede na vsebnost finih zrn v preiskanih vzorcih tudi enačba Kozeny–Carman ni povsem primerna za zanesljivo oceno *k*, smo jo uporabili kot orientacijsko metodo. V primerjavi z ostalimi enačbami iz Preglednice 2 je namreč bistveno kompleksnejša in ima širše območje veljavnosti [22]. Poleg celotne zrnavostne sestave vključuje tudi količnik por *e*, ki smo ga določili na podlagi izmerjene naravne vlage w_0 in stopnje zasičenja preiskanih zemljin. Enačba Kozeny–Carman se je že izkazala kot zanesljiva pri ocenjevanju vodoprepustnosti zemljin S_r za vgradnjo v nasipe pri zaščiti gradbene jame HE Brežice, kjer je bila največja dovoljena vsebnost finih zrn v mešanici lokalnih materialov približno 20 % [9]. Podobno tudi nekateri vzorci v tej raziskavi (npr. ZA12, ZA14, ZA18 in ZA20) vsebujejo okoli 20 % finih zrn, kar dodatno utemeljuje uporabo enačbe Kozeny–Carman v naši analizi.

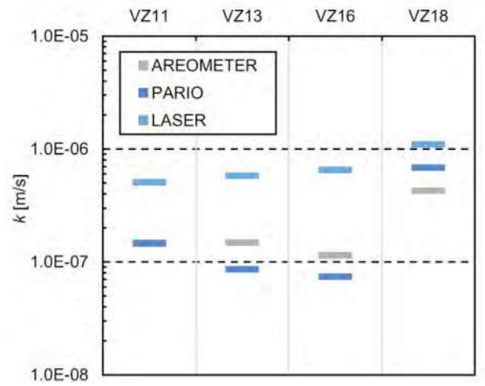
Primerjava koeficientov vodoprepustnosti, ocenjenih na podlagi enačbe Kozeny–Carman in tabelaričnih vrednosti (Preglednica 3), je prikazana na Sliki 6. Vrednosti *k*, izračunane po enačbi Kozeny–Carman se gibljejo med $1{,}3 \cdot 10^{-7}$ in $7{,}7 \cdot 10^{-7}$ m/s ter so najnižje med vsemi. Koeficienti vodoprepustnosti, ocenjeni na podlagi tabelaričnih vrednosti različnih avtorjev v povezavi z USDA klasifikacijo površinskega sloja tal, pa so višji in zavzemajo vrednosti od $1{,}7 \cdot 10^{-7}$ in $3{,}5 \cdot 10^{-5}$ m/s. Vrednosti *k* ocenjene na podlagi tabelaričnih vrednosti, se najbolj približajo izračunanim vrednostim po enačbi Kozeny-Carman pri vzorcih ZA13 in ZA16, odvzetih na območju kamninske podlage iz apnenca.



Slika 6: Primerjava koeficientov vodoprepustnosti *k*, ocenjenih po različnih metodah.

Izračun *k* po enačbi Kozeny-Carman temelji na celotni zrnavostni sestavi zemljine, vključno z D_0, pri čemer pa tudi manjša odstopanja v zrnavostni sestavi finih zrn (< 0,063 mm) pomembno vplivajo na izračunane vrednosti. Ker zrnavostna sestava finih zrn, preiskana z različnimi metodami, ni povsem primerljiva (Slika 5), smo za vzorca ZA13 in ZA16, odvzeta na karbonatni kamninski podlagi, ter vzorca ZA11 in ZA18, ki po zrnavostni sestavi predstavljata »spodnjo« in »zgornjo« mejo razpona krivulj zrnavosti ostalih vzorcev, ovrednotili vpliv preiskovalne metode na ocenjeno vrednost *k*.

Rezultati na Sliki 7 potrjujejo občutljivost enačbe Kozeny-Carman na obliko krivulje zrnavosti. Kadar krivulja zrnavosti finih zrn, izmerjena z laserskim granulometrom, bistveno odstopa od krivulj, izvrednotenih iz areometrske preiskave in preiskave z napravo PARIO, se temu ustrezno razlikujejo tudi ocenjene vrednosti. Te ugotovitve poudarjajo ključno vlogo vhodnih podatkov, saj kakovost rezultatov vseh uporabljenih metod in modelov v veliki meri odraža njihovo veljavnost. Obenem izpostavljajo pomen validacije podatkov z različnimi metodami, kar predvideva tudi tehnična smernica TSPI GEO P.14.101 [23].



Slika 7: Primerjava koeficientov vodoprepustnosti *k*, izračunanih po metodi Kozeny-Carman za zrnavostno sestavo finih zrn, prikazano na Sliki 5.

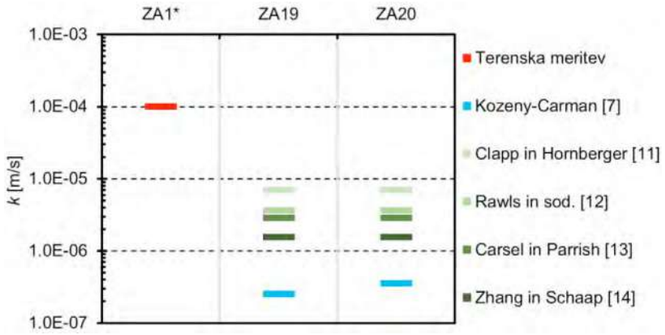
Vrednosti k, izračunane z enačbo Kozeny-Carman ter določene na podlagi tabelaričnih vrednosti v povezavi z USDA klasifikacijo, smo primerjali z rezultati terenskih meritev, predstavljenih v poglavju 1 in v Verbovšek in sod. [1], pri čemer smo za vsako od izvedenih terenskih meritev poiskali bližnje lokacije odvzema vzorcev (Slika 2, Preglednica 6).

Oznaka lokacije terenske meritve	Oznaka lokacije odvzema vzorca	Klasifikacija zemljin (USDA)*
ZA1*	ZA19 in ZA20	ilovica
ZA2*	ZA01 do ZA05	ilovica in glinasta ilovica
ZA3*	ZA14 in ZA15	ilovica in peščena ilovica
ZA4*	ZA13 in ZA16	glina
ZA5*	ZA8 do ZA11	ilovica in peščeno-glinasta ilovica

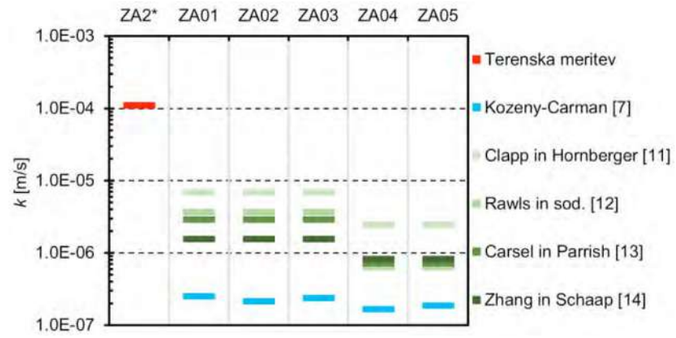
*frakcija 0–2,0 mm

Preglednica 6: Oznaka lokacije izvedene terenske meritve vodoprepustnosti in bližnjih lokacij odvzetih vzorcev z USDA klasifikacijo zemljin.

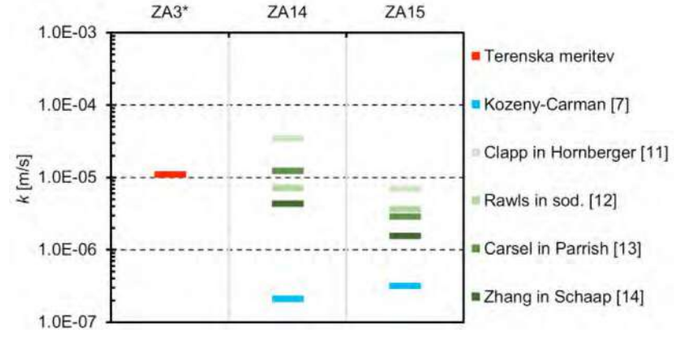
Na Slikah 8 do 12 je prikazana primerjava rezultatov terenskih meritev koeficienta vodoprepustnosti z vrednostmi, ocenjenimi na podlagi zrnavostne sestave bližnjih vzorcev. Rezultati kažejo zadovoljivo ujemanje izmerjenih in na podlagi tabel ocenjenih vrednosti k na lokaciji ZA3*, medtem ko je na lokacijah ZA1*, ZA2*, na terenu izmerjena vrednost k v splošnem tudi za več kot dekado višja od ocenjenih z empiričnimi metodami. Najnižje vrednosti koeficienta vodoprepustnosti so bile, skladno s pričakovanji, izmerjene na območju, kjer so zemljine po USDA klasificirane kot gline (ZA4*). Nasprotno pa najvišjih vrednosti k ni bilo zaznati na območjih, kjer se v površinskem sloju pojavlja peščena ilovica in ilovica (ZA3*). Primerjava rezultatov meritev in ocenjenih vrednosti tudi kaže, da so tabelarične vrednosti, razvite za površinski sloj tal bolj primerne za oceno koeficienta vodoprepustnosti kot v geotehniki bolj poznana enačba Kozeny-Carman.



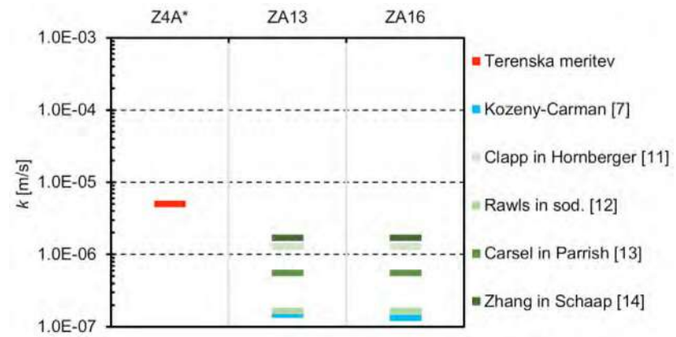
Slika 8: Primerjava koeficienta vodoprepustnosti k, izmerjenega na lokaciji ZA1*, z vrednostmi, ocenjenimi na podlagi empiričnih enačb in tabelaričnih vrednosti.



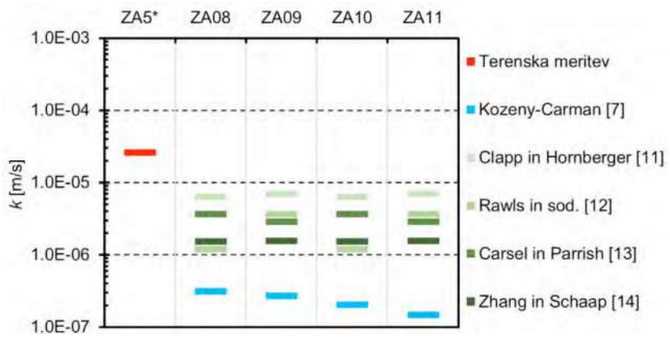
Slika 9: Primerjava koeficienta vodoprepustnosti k, izmerjenega na lokaciji ZA2*, z vrednostmi, ocenjenimi na podlagi empiričnih enačb in tabelaričnih vrednosti.



Slika 10: Primerjava koeficienta vodoprepustnosti k, izmerjenega na lokaciji ZA3*, z vrednostmi, ocenjenimi na podlagi empiričnih enačb in tabelaričnih vrednosti.



Slika 11: Primerjava koeficienta vodoprepustnosti k, izmerjenega na lokaciji ZA4*, z vrednostmi, ocenjenimi na podlagi empiričnih enačb in tabelaričnih vrednosti.



Slika 12: Primerjava koeficienta vodoprepustnosti k, izmerjenega na lokaciji ZA5*, z vrednostmi, ocenjenimi na podlagi empiričnih enačb in tabelaričnih vrednosti.

4 ZAKLJUČKI

Rezultati laboratorijskih preiskav vzorcev zemljin, odvzetih v okviru projekta Ero-STOP iz površinskega sloja tal v vinogradu Zavino, so omogočili oceno koeficienta vodoprepustnosti z uporabo empiričnih enačb ter tabelaričnih vrednosti, ki so v povezavi z USDA klasifikacijo, določene na podlagi obsežnih podatkovnih zbirk in veljajo za površinski sloj tal. Po USCS klasifikaciji, ki je v geotehniki splošno uveljavljena, so bili vsi vzorci, z izjemo enega drobnozrnatega (ZA16), uvrščeni med zaglinjene gramoze s peskom, medtem ko jih USDA klasifikacija razvršča v pet teksturnih razredov: ilovica, glinasta ilovica, peščena ilovica, peščeno glinasta ilovica in glina. Glede na ocenjeni volumski delež zrn premera med 2,0 mm in 63 mm, je treba teksturnim razredom pripisati tudi oznako gramozna oz. zelo gramozna.

Rezultati kažejo, da uporaba empiričnih enačb za oceno koeficienta vodoprepustnosti preiskanih zemljin ni povsem zanesljiva, saj predpostavke in pogoji veljavnosti pogosto niso izpolnjeni. Poleg tega je pri njihovi uporabi potrebna previdnost glede enot, ki v literaturi niso vedno dosledno navedene. Tabelarične vrednosti so se, kljub temu da ne upoštevajo zrn > 2,0 mm v vzorcih, izkazale kot primernejše za oceno vodoprepustnosti površinskega sloja tal v vinogradu. Na območju ZA3* namreč dajejo rezultate, primerljive z izmerjenimi na terenu.

Primerjalne preiskave so pokazale tudi, da rezultati zrnavostne sestave finih zrn, dobljeni z različnimi metodami, niso vedno skladni. Pri večini vzorcev se areometrska preiskava in preiskava z napravo PARIO med seboj dobro ujemata, medtem ko rezultati preiskav z laserskim granulometrom odstopajo. Ta odstopanja v zrnavosti sestavi finih zrn se odražajo tudi v izračunanih koeficientih vodoprepustnosti.

Z izvedenimi preiskavami in interpretacijo rezultatov nismo pridobili le vhodnih podatkov za nadaljnje modeliranje erozijskih procesov po metodi SIMWE, temveč smo hkrati pokazali tudi, da se dobljeni rezultati lahko razlikujejo glede na uporabljeno metodo ter opozorili na omejitve uporabnosti empiričnih enačb. Ugotovitve potrjujejo tudi pomen validacije podatkov z različnimi metodami, saj le preverjeni in zanesljivi vhodni podatki vodijo do veljavnih rezultatov modelnih izračunov.

ZAHVALA

To raziskavo je sofinancirala Evropska unija v okviru programa Interreg Italija-Slovenija, in sicer v sklopu standardnega projekta Ero-STOP z naslovom Napredni in trajnostni pristopi k preprečevanju erozije tal. Sodelavci projekta se iskreno zahvaljujemo kmetovalcem, ki so omogočili izvedbo preiskav v vinogradih ter aktivno sodelovali pri projektnih aktivnostih.

LITERATURA IN REFERENCE

[1] Verbovšek, T., Čenčur Curk, B., Miklavc, P., Logar, J., Smolar, J., Jurček, T., Furlan, J., Dimitrijević, T., Bat, K., Juretič, V., Infiltracijske sposobnosti tal v vinogradih Plače, Velike Žablje in Zavino v Vipavskih gričih, 27. posvetovanje slovenskih geologov, Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta, Oddelek za geologijo, 2025.

[2] Soil Science Division Staff, Soil Survey Manual, United States Department of Agriculture Handbook No. 18., 2017.

[3] SIST EN ISO 17892-11:2019, Geotehnično preiskovanje in preskušanje – Laboratorijske preiskave zemljin – 11. del: Določevanje hitrostnih parametrov s preskušanjem resonančne kolone in torzijsko strižno napravo. Slovenski inštitut za standardizacijo, Ljubljana, 2019.

[4] SIST EN ISO 22282-5:2012, Geotehnično preiskovanje in preskušanje – Preiskave v vrtinah – 5. del: Preskus vodnoprepustnosti s preskušanjem v nizkem in visokem tlaku. Slovenski inštitut za standardizacijo, Ljubljana, 2012.

[5] ISO/TR 18228-4:2022, Geotechnical design – Application of EN 1997-1 – Part 4: Embankments. International Organization for Standardization, Geneva, 2022.

[6] Urumović, K., Borović, S., Urumović, K., Navratil, D., Validity range and reliability of the United States Bureau of Reclamation (USBR) method in hydrogeological investigations," Hydrogeol J, vol. 28, no. 2, 2020, doi: 10.1007/s10040-019-02080-2.

[7] Carrier, W. D., Goodbye, Hazen; Hello, Kozeny-Carman, J. Geotech. Geoenviron. Eng., vol. 129, no. 11, 2003. doi: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2003)129:11(1054).

[8] Chapuis, R. P., Dallaire, V., Marcotte, D., Chouteau, M. C., Acevedo, N., Gagnon, F., Evaluating the hydraulic conductivity at three different scales within an unconfined sand aquifer at Lachenaie, Québec," Canadian Geotechnical Journal, vol. 42, no. 4, 2005, doi: 10.1139/t05-045.

[9] Petkovšek, A., Maček, M., Smolar J., Testing methods for mechanically improved soils: reliability and validity, APP, vol. 10, 2017. doi: 10.14311/APP.2017.10.0016.

[10] Chapuis, R., Aubertin, M., Predicting the coefficient of permeability of soils using the Kozeny--Carman equation, 2003.

[11] Clapp, R. B., Hornberger, G. M., Empirical equations for some soil hydraulic properties, Water Resources Research, vol. 14, no. 4, 1978. doi: 10.1029/WR014i004p00601.

[12] Rawls, W. J.,. Brakensiek, D. L, Saxtonn, K. E., Estimation of Soil Water Properties, Transactions of the ASAE, vol. 25, no. 5, 1982. doi: 10.13031/2013.33720.

[13] Carsel, R. F., Parrish, R. S., Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics, Water Resources Research, vol. 24, no. 5, 1988. doi: 10.1029/WR024i005p00755.

[14] Zhang, Y., G. Schaap, M., Weighted recalibration of the Rosetta pedotransfer model with improved estimates of hydraulic parameter distributions and summary statistics (Rosetta3), Journal of Hydrology, vol. 547, 2017. doi: 10.1016/j.jhydrol.2017.01.004.

[15] Google Maps, 2025. Dostopno: https://maps.google.com

[16] SIST EN ISO 17892-1:2015. Geotehnično preiskovanje in preskušanje – Laboratorijske preiskave zemljin – 1. del: Določevanje vsebnosti vode. Slovenski inštitut za standardizacijo, Ljubljana, 2015.

[17] SIST EN ISO 17892-12:2018. Geotehnično preiskovanje in preskušanje – Laboratorijske preiskave zemljin – 12. del: Določevanje razmerja med vodno vsebnostjo in gostoto suhe zemljine (Proctorjev preskus). Slovenski inštitut za standardizacijo, Ljubljana, 2018.

[18] SIST EN ISO 17892-4:2016. Geotehnično preiskovanje in preskušanje – Laboratorijske preiskave zemljin – 4. del: Določevanje zrnavosti. Slovenski inštitut za standardizacijo, Ljubljana, 2016.

[19] Meter Group, PARIO user manuaL, METER Group AG, 2017.

[20] Dedić, S., Vpliv postopka sedimentacije na krivuljo zrnavosti zemljine: diplomska naloga, Ljubljana, 2024.

[21] ASTM D2487-17. Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). ASTM International, West Conshohocken, PA, 2023.

[22] Maček, M., Smolar, J., Petkovšek, A., Uporaba Kozeny-Carmanove enačbe za napovedovanje koeficienta vodoprepustnosti zemljin, Zbornik sedmega posvetovanja slovenskih geotehnikov, 16.-18. junij v Podčetrtku, V. Jovičić, Ed., Slovensko geotehniško društvo, 2016.

[23] TSPI – P.14.101:2025. Tehnični standardi za področje inženirstva (TSPI), 2025.