

USPOREDBA RAZLIČITIH METODA ODREĐIVANJA KOEFIČIJENTA PROPUSNOSTI NEKOHERENTNOG TLA

COMPARISON OF DIFFERENT METHODS FOR DETERMINING THE COEFFICIENT OF PERMEABILITY OF NON-COHESIVE SOIL

Ivana Petrinjak¹, Damir Štuhec¹, Goran Jeftić¹, Stjepan Strelec¹

¹ Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet, Hallerova aleja 7, 42000 Varaždin, Hrvatska

*E-mail adresa osobe za kontakt / e-mail of corresponding author: pi2510@gfv.hr

Sažetak: Tečenje vode kroz tlo moguće je zbog postojanja povezanih šupljina koje se nalaze između čvrstih čestica tla. Mjera sposobnosti propusnog medija (tla) da propušta vodu definira se preko koeficijenta propusnosti. Sam pojam propusnosti se odnosi na lakoću kojom se bilo koji fluid kreće kroz određeni sloj. Kod ispitivanja vodopropusnosti tla obično se uzima da je voda taj fluid koji teče kroz tlo. Određivanje koeficijenta vodopropusnosti zahtijeva poznavanje odgovarajućih svojstava tla. Ona se određuju pomoću laboratorijskih ispitivanja koja obuhvaćaju granulometrijski sastav, oblik i veličina zrna, specifičnu gustoću čestica tla te poroznost i saturiranost. Koeficijent vodopropusnosti se u laboratoriju određuje ispitivanjem u permeamtru, metodom stalnog ili promjenjivog potencijala i metodom zadanog protoka. U skladu s vrstom tla odabire se metoda i uređaj za ispitivanje vrijednosti koeficijenta vodopropusnosti. U radu se uspoređuju rezultati određivanja koeficijenta vodopropusnosti pijeska korištenjem izravne metode mjerenja u permeamtru sa stalnim potencijalom, s rezultatima dobivenim primjenom različitih empirijskih metoda koje se temelje na svojstvima granulometrijske krivulje ispitivanog materijala.

Cljučne riječi: propusnost tla, koeficijent vodopropusnosti, CHP (permeametar sa stalnim potencijalom), metode određivanja koeficijenta vodopropusnosti.

Abstract : Cavities between solid particles of soil allow water flow through the soil. These cavities are interconnected, allowing the water to flow through them. The permeability of the permeable medium (soil) to leakage of water is defined by the permeability coefficient. The term permeability itself refers to the ease with which any fluid moves through a certain layer. When testing the water permeability of the soil, it is commonly assumed that water is the fluid flowing through the ground. Determination of the water permeability coefficient requires knowledge of soil properties. They are determined by laboratory tests that include granulometric composition, grain shape and size, specific soil particle density and porosity and saturation. The water permeability coefficient is determined by testing in the Constant Head Permeameter (CHP), Falling Head Permeameters (FHP) and flow-pump method. In accordance with the type of soil, a type of test method for water permeability coefficient is selected. In this final work, the results of the determination of the sand permeability coefficient are to be compared using the direct metering method in the constant permeameter, with the results obtained by applying different empirical methods based on the granulometric curve properties of the tested material.

Keywords: permeability, water permeability coefficient, CHP (Constant Head Permeameter), methods for determining the water permeability coefficient.

Received: 29.11.2018. / Accepted: 09.12.2018.

Published online: 17.12.2018.

Stručni rad / Technical paper

1. UVOD

Fizikalna svojstva tla su važna za njegovu propusnost. O složenosti građe tla i potrebne točnosti određivanja koeficijenta propusnosti zavisi i odabir ispitnih metoda. Ispitivanja se mogu izvoditi na terenu i u laboratoriju. S vremenom su razvijene posebne metode i uređaji za pripremu i ispitivanje hidrauličke vodljivosti na uzorcima tla u laboratoriju. Općenito, postoje tri metode ispitivanja koeficijenta propusnosti u laboratoriju – sa stalnom razlikom potencijala, s promjenjivom razlikom potencijala te zadanim protokom. Uređaji koji se koriste za ispitivanje zovu se permeametri. U ovom radu je posebno istaknuto ispitivanje koeficijenta propusnosti nekoherentnog tla pomoću permeametra sa stalnom razlikom potencijala. U slučaju nedostatka odgovarajućih ispitnih uzoraka tla, za procjenu koeficijenta propusnosti koriste se i neizravne, empirijske metode koje se temelje na karakteristikama granulometrijske krivulje nekoherentnog tla.

2. VODA U TLU

U trodijelnom sastavu tla voda ima značajan utjecaj na njegovo fizičko-mehaničko ponašanje. Počevši od kapilarnog dizanja i bubrenja, do tečenja vode niz kosine, kroz brane i ispod građevina, pa do dodatnih slijeganja građevina izazvanih promjenom razine podzemne vode, stabilnosti pijeska pri potresu i pojavi likvefakcije.

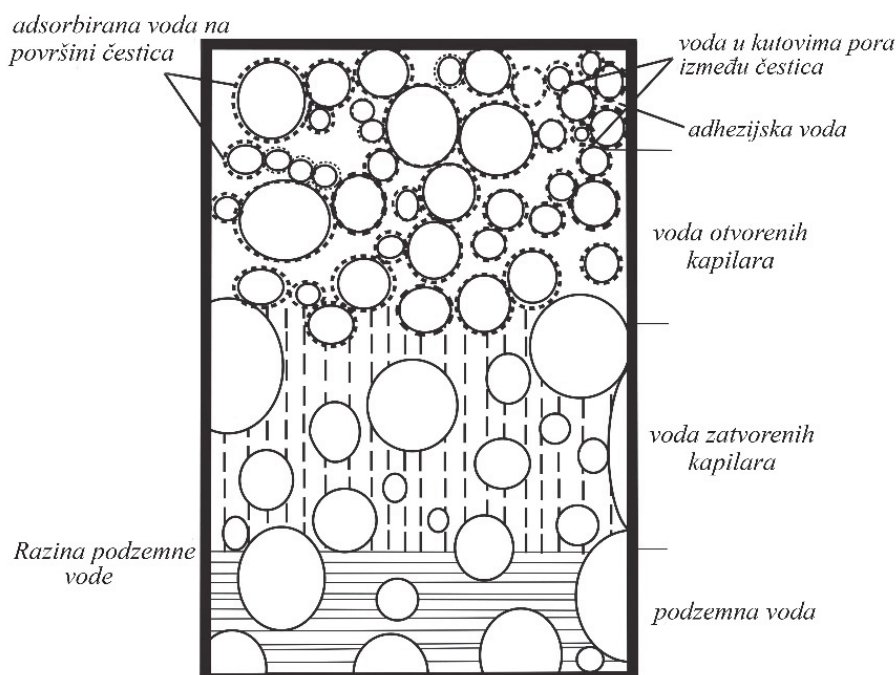
2.1. Oblici pojave vode u tlu

Promatrajući pore u tlu može se uočiti da one mogu biti djelomično ili potpuno ispunjene vodom. Kada je u tlu sav cjelokupni prostor šupljina, odnosno pora ispunjen vodom, u njemu djeluje hidrostatski tlak. Ovaj je prostor omeđen plohom koja se naziva razina podzemne vode (RPV). Na njoj je tlak jednak atmosferskom tlaku. U podzemnoj vodi tlak je veći od atmosferskog. Iznad RPV nalazi se zona tla potpuno zasićenog vodom, u kojoj vlada negativni porni tlak (manji od atmosferskog), nastao pojavom kapilarnih sila između pora tla i vode. To je zona zatvorene kapilarne vode. Iznad zatvorene kapilarne vode nalazi se zona tla djelomično zasićena vodom u kojoj i dalje vladaju kapilarne sile. To je područje u kojem se nalazi otvorena kapilarna voda. Ako razina otvorene kapilarne vode ne seže do površine terena, u tom slučaju se iznad nje nalazi adhezijska voda. Područja pojave vode u tlu prikazana su u **Tablici 1**.

Tablica 1. Područja pojave vode u tlu

Adhezijska voda	Voda obavija minerale tla u vrlo tankom sloju koji je vezan na mineral elektrokemijskim silama, nema kapilarnih učinaka.
Otvorena kapilarna voda	Na dodirima čestica postoje kapilarni meniskusi koji drže čestice zajedno, stupanj zasićenosti je bitno ispod 100%.
Zatvorena kapilarna voda	Porni tlak je negativan, stupanj zasićenosti blizu 100%.
Podzemna voda	Porni tlak je jednak hidrostatskom, a na razini podzemne vode jednak atmosferskom, stupanj zasićenosti je približno jednak 100%.

Na **Slici 1** dan je shematski prikaz pojave vode u tlu.



Slika 1. Shematski prikaz vode u tlu

2.2. Linearni zakon filtracije

Temeljni zakon koji opisuje laminarni tok vode u poroznoj sredini ustanovljen je empirijski (Darcy 1865.) i naziva se Darcyjev zakon. Francuski inženjer Henry Darcy ustanovio je da je strujanje vode kroz tlo analogno strujanju vode u cijevima. On je obavio niz ispitivanja na vertikalnoj cijevi koja je bila ispunjena pijeskom. Utvrdio je da je brzina toka kroz stupac zasićenog pijeska proporcionalna razlici hidrauličkog potencijala na krajevima stupca tj. obrnuto proporcionalna dužini stupca (**Slika 2**). **Izraz (1)** prikazuje Darcyjevu brzinu:

$$v = k \cdot \frac{h_1 - h_2}{L} \quad (1)$$

gdje v predstavlja Darcyjevu brzinu toka, $(h_1 - h_2)$ je razlika u hidrauličkom potencijalu, L je dužina linije toka od točaka na kojima su izmjerene vrijednosti h_1 i h_2 , a k je koeficijent propusnosti. Vrijednost v naziva se Darcyjevom brzinom toka zato što se pretpostavlja da do strujanja dolazi po čitavom materijalnom presjeku iako zapravo veliki dio tog presjeka zauzimaju krute čestice. Darcyjev eksperiment pokazuje da tok u zasićenom pijesku izravno ovisi o hidrauličkom gradijentu. Treba naglasiti da taj odnos vrijedi samo za laminarno strujanje. U slučaju turbulentnog strujanja, brzina strujanja ne mijenja se proporcionalno s hidrauličkim gradijentom. Razlika hidrauličkih potencijala $(h_1 - h_2)$ podijeljena sa dužinom L tj. linijom tečenja, prikazanog **izrazom (2)** naziva se hidraulički gradijent i .

$$\frac{h_1 - h_2}{L} = i \tag{2}$$

Tako i specifičan protok q možemo izraziti (3):

$$\frac{Q}{A} = q = v = k \cdot i \tag{3}$$

Poznato je da je protok Q jednak umnošku brzine toka v i površine presjeka A , ili:

$$Q = v \cdot A \tag{4}$$

Protok Q je količina istjecanja (volumena V) u jedinici vremena t , a obično se izražava u kubnim metrima u sekundi [m³/s].

$$Q = \frac{V}{t} \tag{5}$$

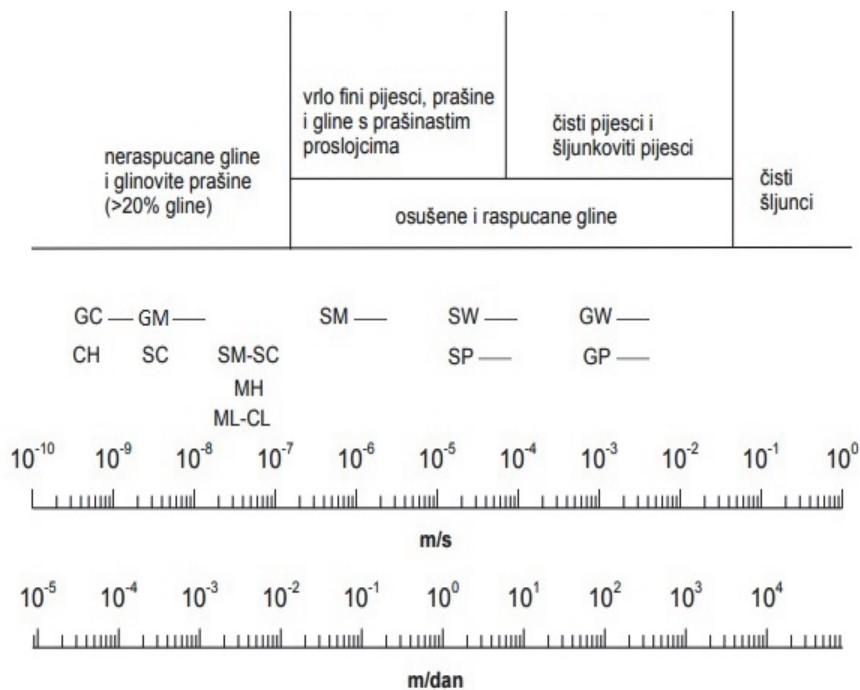
Kako je hidraulički gradijent bezdimenzionalna veličina, iz **izraza (2)** slijedi da koeficijent propusnosti ima dimenziju brzine, odnosno kada je hidraulički gradijent jednak jedinici, koeficijent propusnosti je jednak brzini filtracije.

2.3. Koeficijent propusnosti

Prema Darcyjevom zakonu, brzina strujanja vode kroz tlo v odnosno specifični protok q je proporcionalan hidrauličkom gradijentu, a konstantom proporcionalnosti se definira koeficijent propusnosti k . Navedeni izraz je prikazan **izrazom (6)**.

$$k = \frac{v}{i} \tag{6}$$

Koeficijent propusnosti ima dimenziju brzine, a najčešće se iskazuje u cm/s ili m/s. To je osnovni parametar za strujanje vode kroz tlo, a zavisno o vrsti tla varira u rasponu od preko 10 redova veličina. Niti za određenu vrstu tla koeficijent propusnosti nije konstantan, već zavisi o svojstvima poroznog medija.



Slika 2. Prikaz okvirnih vrijednosti koeficijenta propusnosti k (prema Craig 1997; Mayne i dr. 2001)

Koeficijent propusnosti k zavisi o:

- veličini zrna
- koeficijentu pora
- obliku zrna, njihovoj raspodjeli i povezanosti, tj. o strukturi tla
- količini zraka u porama
- mineraloškom sastavu

Prema stupnju propusnosti određenom kroz vrijednosti koeficijenta propusnosti, tlo se može klasificirati na način prikazan u **Tablici 3**.

Tablica 3. Klasifikacija tla prema propusnosti

Stupanj propusnosti	Vrijednosti koeficijenta propusnosti k [m/s]
Visoki	$> 10^{-3}$
Srednji	$10^{-3} - 10^{-5}$
Niski	$10^{-5} - 10^{-7}$
Vrlo niski	$10^{-7} - 10^{-9}$
Praktički nepropustan	$< 10^{-9}$

3. METODE ODREĐIVANJA KOEFICIJENTA VODOPROPUSNOSTI

U geotehničkom inženjerstvu se kao tekući medij pojavljuje podzemna voda pa se dalje razmatra koeficijent vodopropusnosti. Postoji više vrsta metoda za određivanje njegove vrijednosti, a najčešće korištene su:

1. terenske metode pokusnog crpljenja, gdje se određuje transmisivnost, a dijeljenjem s debljinom sloja određuje koeficijent propusnosti k ,
2. laboratorijske metode – pomoću raznih tipova permeametera,
3. metode koje se temelje na empirijskim izrazima uz korištenje podataka iz granulometrijskog sastava porozne sredine.

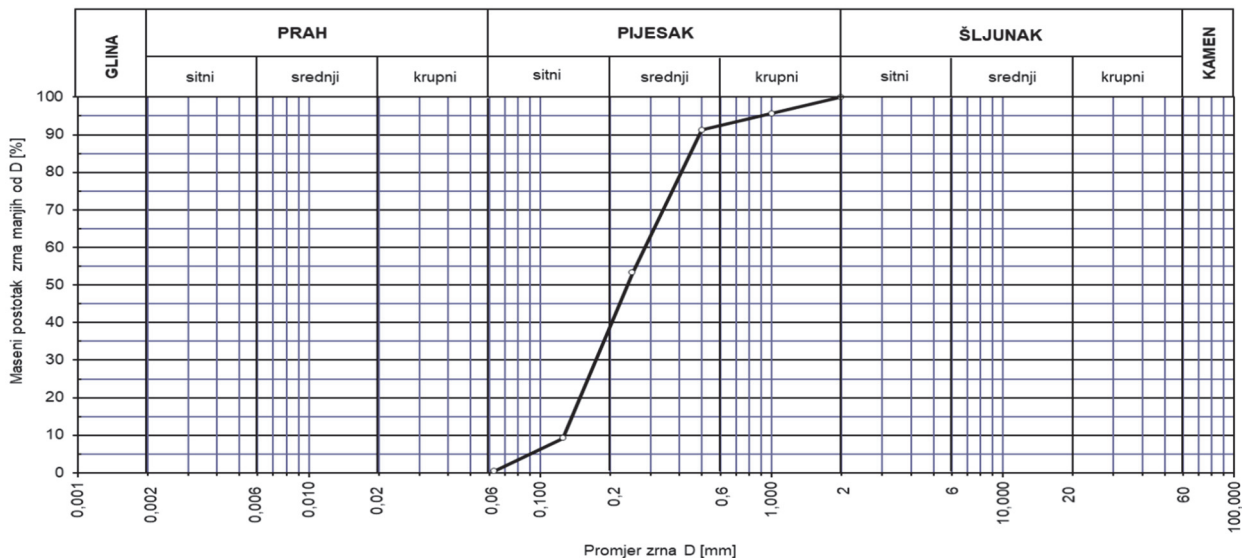
3.1. Laboratorijske metode

Laboratorijskim metodama koeficijent vodopropusnosti se određuje pomoću permeametera, za što se koriste neporemećeni ili poremećeni (najčešće kompaktirani) uzorci tla. Pri određivanju koeficijenta propusnosti uzorci se podvrgavaju toku koji se može odvijati pri stalnoj razlici potencijala (permeametar sa stalnim potencijalom) ili toku s promjenjivom razlikom potencijala (permeametar s promjenjivim potencijalom). Za dobro propusne materijale ($k > 10^{-5}$ m/s) koristi se permeametar sa stalnim potencijalom dok se za slabo propusne materijale ($k < 10^{-5}$ m/s) koristi permeametar s promjenjivim potencijalom. U oba slučaja voda se može dodavati bilo na vrh, bilo na dno uzorka, pa tok može biti silazni ili uzlazni. Uzorak obično ima oblik pravilnoga kružnog cilindra, a smješten je između dviju poroznih ploča. Prije ispitivanja, uzorak mora biti potpuno saturiran vodom i ne smije sadržavati mjehuriće zraka, kako bi se minimizirali njegovi negativni učinci na rezultate mjerenja. Pri laboratorijskome određivanju koeficijenta propusnosti pomoću permeametera, pojavljuju se brojne zadaće u dobivanju pouzdanih rezultata pa treba voditi računa o sljedećim ograničenjima:

- Tla su u prirodi obično uslojena pa je u laboratoriju zahtjevno simulirati stvarne terenske uvjete.
- U pijesku su k_v i k_h međusobno različiti vrijednosti, reda veličine $k_h = (10 - 1000) k_v$. Pri uzimanju uzoraka nepovratno se gube prirodni uvjeti, u ovom slučaju navedeni odnosi vrijednosti koeficijenta u dva smjera.
- Male dimenzije terenskih uzoraka dovode do djelovanja rubnih uvjeta, poput tečenja uz glatke strane cilindra i stvaranja mjehurića zraka u vodi ili u obliku zamki zraka u uzorku, što može imati zamjetan učinak na rezultate.
- Metode mjerenja permeametrom odvijaju se samo u saturiranim uvjetima.
- Kada je k malen, reda veličine 10^{-7} do 10^{-11} m/s, vrijeme potrebno za testiranje lako može uzrokovati evaporaciju i procurivanje opreme, što dovodi do pogreške u veličini hidrauličke vodljivosti k za nekoliko redova veličine.
- Zbog trajanja testa, obično se primjenjuje puno veći hidraulički gradijent nego što je u prirodi.
- U pijesku nerealno visok hidraulički gradijent može stvarati turbulencije, dakle okolnosti toka različite od terenskih pod kojima se odvija laminarni tok. Nerealno visok hidraulički gradijent može dovesti do konsolidacije i poroznosti koja je različita od prirodne poroznosti uzorka.

4. ODREĐIVANJE KOEFICIJENTA VODOPROPUSNOSTI U LABORATORIJU

Uzorak pijeska za laboratorijsko ispitivanje osušen je do stalne mase i prema normi HRN EN ISO 17892-4 određen mu je granulometrijski sastav prikazan na **Slici 3**. Iz granulometrijske krivulje očitani su karakteristični promjeri zrna i izračunati koeficijent jednoličnosti i koeficijent zakrivljenosti. Granulometrijski sastav i karakteristična svojstva uzorka prikazana su u **Tablici 4**.



Slika 3. Granulometrijska krivulja ispitivanog uzorka pijeska

Tablica 4. Granulometrijski sastav i karakteristična svojstva uzorka

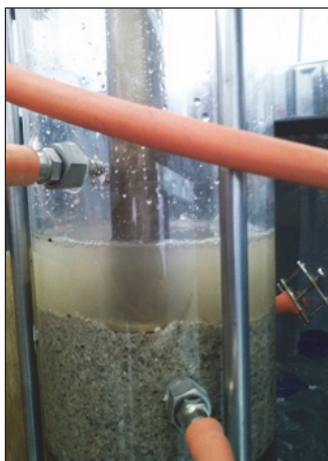
Granulometrijski sastav	
Veličina zrna [mm]	Udio u ukupnoj masi materijala [%]
2 – 1	4,37
1 – 0,5	4,40
0,5 – 0,25	38,00
0,25 – 0,125	44,03
0,125 – 0,063	8,77
< 0,063	0,43
Karakteristični promjeri zrna	
D_{10}	0,1266 mm
D_{17}	0,1391 mm
D_{30}	0,1734 mm
D_{50}	0,2376 mm
D_{60}	0,2828 mm
Oblik zrna	
Zaobljen do poluzaobljen	
Svojstva granulometrijske krivulje za ocjenu graduiranosti	
C_U	2,23
C_C	0,84
USC klasifikacija	SP

4.1. Određivanje koeficijenta vodopropusnosti u permeamtru sa stalnim potencijalom

Ispitivanje je provedeno prema ispitnoj normi *BS 1377:1990: Part 5-clause 5*. Norma nalaže da se iz uzorka moraju ukloniti sva zrna veća od 1/12 promjera ćelije permeamtra i da u uzorku ne mije biti više od 10% čestica manjih od 63 μ m. Korišten je permeametar standardiziranih dimenzija, opremljen manometarskim cijevima koje tijekom ispitivanja omogućuju kontrolu ujednačenosti protjecanja vode kroz uzorak i mjerenje piezometarske visine stupca vode, kao i sustavom za mijenjanje hidrauličkog gradijenta. Osim mjerenja razlika piezometarske visine za svaku promjenu hidrauličkog gradijenta i duljine uzorka, mjerilo se i vrijeme potrebno da kroz uzorak prođe voda odabranog volumena.

4.2. Ugradnja, priprema i ispitivanje uzorka

Prije ugradnje u ćeliju permeamtra, potrebna masa suhog uzorka najprije je dobro homogenizirana. Kako bi se prilikom saturacije izbjegli mjehurići zraka u uzorku i dobila podjednaka gustoća saturiranog uzorka u rahlom stanju, ugradnja uzorka izvedena je pod vodom (**Slika 4**). Ugrađeni uzorak pijeska je normiranim postupkom saturiran, a preljivni spremnik s vodom podignut na visinu potrebnu za postizanje željenog hidrauličkog gradijenta. Nakon toga izvedena su mjerenja koeficijenta vodopropusnosti sa silaznim tokom vode, pod različitim vrijednostima hidrauličkog gradijenta (**Slika 5**). Tijekom ispitivanja vodilo se računa da je hidraulički gradijent pokrivaio područje laminarnog tečenja vode kroz uzorak, koje vlada sve dok je omjer između protoka i hidrauličkog gradijenta linearan.



Slika 4. Ugradnja uzorka pod vodom



Slika 5. Mjerenje koeficijenta vodopropusnosti u ćeliji permeamtra

4.3 Obrada rezultata mjerenja i računanje koeficijenta vodopropusnosti

Kod pripreme i ugradnje uzorka u ćeliju permeamtra izvedena su mjerenja pomoću kojih se mogu izračunati određena fizikalna svojstva uzorka i dimenzije same ćelije potrebne za računanje koeficijenta vodopropusnosti. Obradeni rezultati mjerenja prikazani su u **Tablici 5**.

Tablica 5. Dimenzije ćelije permeamtra i fizikalna svojstva ugrađenog uzorka

Promjer ćelije permeamtra	11,4 cm
Površina poprečnog presjeka ćelije permeamtra	102,07 cm ²
Visina uzorka u ćeliji permeamtra	33,3 cm
Suha masa ugrađenog uzorka	5250 g
Volumen ugrađenog uzorka	3398,94 cm ³
Suha gustoća uzorka	1,55 g/cm ³
Gustoća čvrstih čestica uzorka (ispitana)	2,7 g/cm ³
Porozitet ugrađenog uzorka	42,6 %

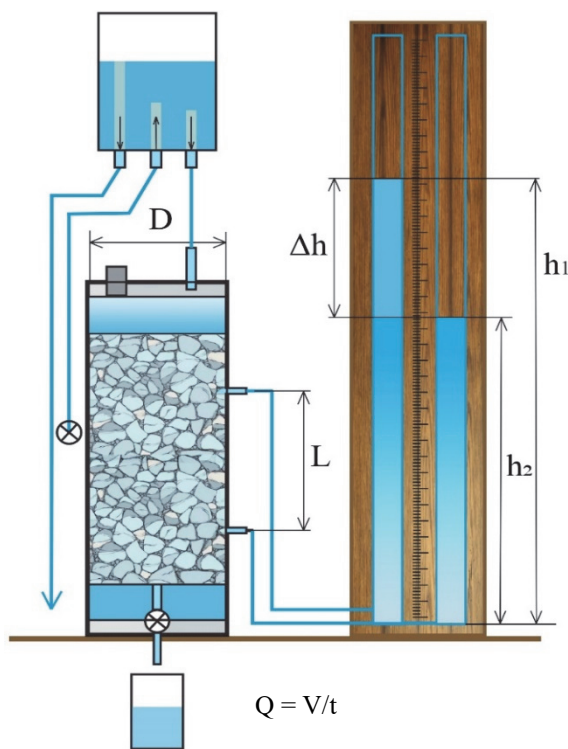
Vrijednost koeficijenta vodopropusnosti k određuje se u laboratorijskim uvjetima za temperaturu vode 20°C prema **izrazu (7)** gdje je Q protok vode odnosno volumen vode protekle kroz uzorak u nekom vremenu, i je hidraulički gradijent, R_T faktor temperaturne korekcije zbog dinamičke viskoznosti vode za korekciju k na referentnu temperaturu od 20°C , A je površina poprečnog presjeka uzorka.

$$k = \frac{Q}{i} \cdot \frac{R_T}{A} \tag{7}$$

Hidraulički gradijent i kao i duljina uzorka L računati su između najvišeg i najnižeg manometarskog priključka prema **izrazu (8)**, a temperaturna korekcija R_T može se procijeniti iz odgovarajućeg grafičkog prikaza ili se računa prema **izrazu (10)** gdje je μ_T dinamička viskoznost vode na temperaturi mjerenja, te $\mu_{20^{\circ}\text{C}}$ dinamička viskoznost vode na 20°C . Shema permeametra sa stalnim potencijalom i odgovarajućim oznakama prikazana je na **Slici 6**. Rezultati mjerenja koeficijenta vodopropusnosti u permeametri prikazani su u **Tablici 6**.

$$i = \frac{\Delta h}{L} \tag{8}$$

$$R_T = \frac{\mu_T}{\mu_{20^{\circ}\text{C}}} \tag{9}$$



Slika 6. Shema permeametra sa stalnim potencijalom

Tablica 6. Rezultati mjerenja koeficijenta vodopropusnosti

Visina vode u manometru [cm]		Δh [cm]	L [cm]	i [1]	V [cm ³]	t [s]	Q [cm ³ /s]	T [°C]	R_T [1]	$k_{20^{\circ}\text{C}}$ [cm/s]
h_1	h_2									
11,4	22,6	11,2	9	1,24	153	60	2,55	23	0,9307	$1,88 \times 10^{-2}$
11,2	22,2	11,0	9	1,22	152	60	2,53	23	0,9307	$1,89 \times 10^{-2}$
10,1	20,5	10,4	9	1,16	143	60	2,38	22	0,9505	$1,91 \times 10^{-2}$
10,6	21,4	10,8	9	1,20	144	60	2,40	22	0,9505	$1,86 \times 10^{-2}$
11,1	21,8	10,7	9	1,19	145	60	2,42	22	0,9505	$1,89 \times 10^{-2}$
11,4	22,0	10,6	9	1,18	143	60	2,38	21	0,9703	$1,92 \times 10^{-2}$

Iz rezultata mjerenja vidljivo je da su protoci vode kroz uzorak kao i hidraulički gradijenti bili ujednačeni, a njihov odnos linearan, što potvrđuje da je tok vode kroz uzorak bio laminaran. Zamjetan je i učinak promjene temperature vode zbog utjecaja na smanjenje njezine dinamičke viskoznosti. Rezultati mjerenja svedeni na referentnu temperaturu od 20°C za laboratorijska ispitivanja dali su ujednačene i bliske vrijednosti koeficijenta vodopropusnosti, pa se kao konačni rezultat može usvojiti srednja vrijednost svih mjerenja koja iznosi $k_{20^{\circ}\text{C}} = 1,89 \pm 0,03 \times 10^{-2}$ cm/s.

5. PROCJENA KOEFICIJENATA VODOPROPUSNOSTI POMOĆU EMPIRIJSKIH IZRAZA

Za procjenu koeficijenta vodopropusnosti iz granulometrijskog sastava nekoherentnog tla (šljunak i pijesak), razvijeni su mnogobrojni empirijski postupci. Svi oni se temelje na svojstvima poroznog medija (tla) kroz koji teče neka tekućina ali i njenim fizikalnim svojstvima. U geotehničkoj praksi ta tekućina je voda. Mnogi autori razvili su empirijske metode samo za određene vrste nekoherentnih tala, uglavnom pijeske, za određeni raspon veličina efektivnih promjera zrna, njihovih oblika i poroznosti. Za relativno pouzdanu procjenu koeficijenta vodopropusnosti pomoću empirije, neophodno je pravilno odabrati onaj empirijski postupak koji najbolje odgovara svojstvima granulometrijske krivulje čija se propusnost procjenjuje. U praksi se obično koristi nekoliko odgovarajućih postupaka čiji se rezultati mogu uspoređivati pa i statistički obrađivati.

U ovom radu, za procjenu koeficijenta vodopropusnosti korišteni su empirijski izrazi čije su uvjete primjene zadovoljavala svojstva granulometrijskog sastava ispitivanog materijala. To su izrazi prema autorima: Hazen, Beyer, Sauerbrei, Terzaghi, Kozeny-Carman (modificirani) i Seelheim. Odabrane empirijske metode usklađene su u fizikalnim jedinicama i pri procjeni koeficijenta vodopropusnosti uzimaju u obzir svojstva tekućine odnosno vode na temperaturi 20°C.

Porozitet tla ima značajan utjecaj na njegovu propusnost, ali se sijanjem poremećenih uzoraka nekoherentnih tala ne može izravno odrediti. Da bi se ovaj parametar tla ipak mogao koristiti u nekim empirijskim izrazima, predlaže se (Vuković & Soro 1992) [10] računanje poroziteta prema izrazu (10):

$$n = 0,255(1 + 0,83^{C_U}) \quad (10)$$

gdje je C_U koeficijent jednoličnosti, izračunat iz svojstava granulometrijske krivulje.

Općenito se empirijske jednadžbe za procjenu koeficijenta vodopropusnosti mogu napisati u obliku (11):

$$k = \frac{g}{v} C[f(n)] d_e^2 \quad (11)$$

Autor	Vrijednost C	Funkcija poroznosti n	Efektivni promjer zrna d_e	Područje primjene
Hazen	6×10^{-4}	$[1 + 10(n - 0,26)]$	$d_e = d_{10}$	$0,1 \text{ mm} < d_e < 3 \text{ mm}$ $C_U < 5$
Beyer	$6 \times 10^{-4} \log \frac{500}{C_U}$	1	$d_e = d_{10}$	$0,06 \text{ mm} < d_e < 0,6 \text{ mm}$ $1 < C_U < 20$
Sauerbrei	$3,75 \times 10^{-3}$	$\frac{n^3}{(1 - n)^2}$	$d_e = d_{17}$	Pijesak i pjeskovita glina, $d < 0,5 \text{ mm}$
Terzaghi	$10,7 \times 10^{-3}^{(1)}$ $6,1 \times 10^{-3}^{(2)}$	$\left(\frac{n - 0,13}{\sqrt[3]{1 - n}}\right)^2$	$d_e = d_{10}$	Krupni pijesak zaobljenih ⁽¹⁾ do uglatih ⁽²⁾ zrna
Kozeny – Carman (modificirani)	$1,99 \times 10^{-4}$	$\frac{e^3}{1 + e}$	$\left(\frac{d_{10}^2}{180}\right)$	$d_e < 3 \text{ mm}$
Seelheim	$3,57 \times 10^{-3}$	1	$d_e = d_{50}$	Pijesak i glina

Koristeći izraze navedenih autora, izračunati su koeficijenti vodopropusnosti. Odabrani izrazi bili su odgovarajući za procjenu koeficijenta vodopropusnosti ispitivanog pijeska jer su svojstva njegove granulometrijske krivulje zadovoljavala uvjete za primjenu pojedine metode u pogledu veličine efektivnog zrna i koeficijenta jednoličnosti. Radi usporedbe rezultata, svi su koeficijenti vodopropusnosti korigirani na laboratorijsku referentnu temperaturu vode od 20°C. Računski procijenjene vrijednosti koeficijenta

vodopropusnosti iskazane su brojačno s jednim cijelim i jednim decimalnim mjestom te pripadajućim eksponentom, a zbirno su prikazane u **Tablici 7**.

Tablica 7. Zbirni prikaz koeficijenata vodopropusnosti prema empirijskim izrazima

Autor	Koeficijent vodopropusnosti $k_{20^{\circ}\text{C}}$ [cm/s]
Hazen	$2,5 \times 10^{-2}$
Beyer	$2,2 \times 10^{-2}$
Sauerbrei	$1,7 \times 10^{-2}$
Terzaghi	$1,9 \times 10^{-2}$
Kozeny - Carman	$2,1 \times 10^{-2}$
Seelheim	$2,0 \times 10^{-2}$

Empirijski izrazi daju samo procjenu koeficijenta vodopropusnosti jer s u njima ne mogu simulirati svi uvjeti koji utječu na propusnost tla. Zato se u praktičnoj primjeni koristi više odgovarajućih izraza, a za konačnu procjenu obično se usvaja njihova srednja vrijednost. Iz **Tablice 7** je vidljivo da su procijenjene vrijednosti koeficijenta vodopropusnosti prilično konzistentne, a njihova srednja vrijednost iznosi $k_{20^{\circ}\text{C}} = 2,1 \pm 0,04 \times 10^{-2}$ cm/s.

6. USPOREDBA VRIJEDNOSTI KOEFICIJENATA VODOPROPUSNOSTI NEKOHERENTNOG TLA DOBIVENIH RAZLIČITIM METODAMA ODREĐIVANJA

Koeficijent vodopropusnosti kao vrlo važan parametar tla, može se odrediti izravnim i neizravnim postupcima. Kad god to okolnosti dozvoljavaju, treba u praksi koristiti izravne metode određivanja, pri čemu je prednost na strani terenskih metoda u odnosu na laboratorijske. Kad izravne metode određivanja iz nekog razloga nisu dostupne ili nisu primjenjive, kao zamjena za procjenu koeficijenta vodopropusnosti mogu se koristiti empirijske metode. Kod toga pažnju treba posvetiti odabiru empirijskih izraza koje moraju biti adekvatni za određeni granulometrijski sastav nekoherentnog tla. Usporedba rezultata između opisanih metoda prikazana je u **Tablici 8**.

Tablica 8. Usporedba koeficijenata vodopropusnosti

Koeficijent vodopropusnosti određen u permeamtru sa stalnim potencijalom	$k_{20^{\circ}\text{C}} = 1,9 \pm 0,03 \times 10^{-2}$ cm/s
Koeficijent vodopropusnosti procijenjen empirijskim metodama	$k_{20^{\circ}\text{C}} = 2,1 \pm 0,04 \times 10^{-2}$ cm/s

Međusobna usporedba koeficijenata vodopropusnosti odnosi se na njihove srednje vrijednosti, dobivene različitim metodama određivanja. Primjetno je dobro podudaranje rezultata, koje se međusobno razlikuje oko 10 % unutar istog reda veličine. Za praktičnu primjenu u većini geotehničkih zahvata, to je sasvim prihvatljivo odstupanje. Podudarnost rezultata ostvarena je pravilnim odabirom empirijskih metoda za procjenu koeficijenta vodopropusnosti ali i pažljivom ugradnjom uzorka u ćeliju permeamtra. Poznato je da porozitet značajno utječe na propusnost tla pa je mogao imati jak učinak na određivanje vrijednost koeficijenta vodopropusnosti. Da bi fizikalna svojstva pijeska ispitivanog u permeamtru bila što bliža procijenjenim svojstvima u empirijskim izrazima, uzorak se u ćeliju permeamtra uspio ugraditi s gotovo istom vrijednosti poroziteta koja je izračunata iz svojstava granulometrijske krivulje pijeska. Tako izračunati porozitet iznosi 42,3 %, dok porozitet ugrađenog pijeska iznosi 42,6 %. Analizirajući rezultate procjene koeficijenta vodopropusnosti empirijskim metodama, zanimljivo je da je izraz po Terzaghi-ju za krupni pijesak zaobljenog zrna dao vrijednost koeficijenta vodopropusnosti identičnu onoj iz eksperimentalnog određivanja u permeamtru, dok je izraz prema Hazen-u dao vrijednost koeficijenta vodopropusnosti s najvećim odstupanjem od vrijednosti dobivenoj u permeamtru.

7. ZAKLJUČAK

Na uzorku pijeska zaobljenih do poluzaobljenih zrna veličine 2 – 0,06 mm napravljena je granulometrijska analiza te izrađena kumulativna granulometrijska krivulja iz koje su iščitane vrijednosti efektivnih veličina koje služe kao ulazni parametri za određivanje koeficijenta vodopropusnosti. Također je izračunat koeficijent jednoličnosti pomoću kojeg se određuje pogodnost primjene pojedine empirijske metode za procjenu

vodopropusnosti nekoherentnog tla. Na ispitnom uzorku je laboratorijskim mjerenjem u permeamtru sa stalnim potencijalom određena vrijednost koeficijenta vodopropusnosti. U rezultate ispitivanja uključene su i empirijske metode, gdje se dobiveni rezultati značajno poklapaju s laboratorijskim ispitivanjima.

Srednja vrijednost koeficijenta vodopropusnosti procijenjena empirijskim izrazima za temperaturu vode od 20°C iznosila je $k_{sr} = 2,1 \times 10^{-2}$ cm/s, dok je kod mjerenja permeamtrom sa stalnim potencijalom, također srednja vrijednost koeficijenta vodopropusnosti, pri istoj temperaturi vode iznosila $k_{sr} = 1,9 \times 10^{-2}$ cm/s. Na podudarnost rezultata utjecala je pravilna ugradnja uzorka u čeliju permeamtra kao i odgovarajući odabir empirijskih izraza za procjenu koeficijenta vodopropusnosti. Obzirom da koeficijent vodopropusnosti zavisi o veličini i obliku zrna, koeficijentu pora i viskozitetu vode, poznavanjem i kontrolom navedenih čimbenika postignuti su ujednačeni uvjeti pri određivanju njegove vrijednosti različitim metodama ispitivanja. Određivanjem koeficijenta vodopropusnosti izravnim laboratorijskim metodama moguće je bolje simulirati uvjete tečenja vode „in situ“ (hidraulički gradijent, porozitet, vrstu tečenja, oblik zrna) u odnosu na empirijske metode pa im u praktičnoj primjeni treba dati prednost. Izravne metode određivanja koeficijenta vodopropusnosti na terenu daju najtočnije rezultate, ali traju dulje te zahtijevaju angažiranje značajnije opreme, ljudi i finansijskih sredstva. Kada to nije moguće osigurati, laboratorijske i empirijske metode predstavljaju prihvatljivu alternativu.

8. LITERATURA

Roje-Bonacci T., *Mehanika tla. 2. dopunjeno i izmijenjeno izdanje*. Građevinski fakultet Sveučilišta u Splitu, IGH d.d. Zagreb, Geotehnički fakultet: Varaždin; Split 2003.

Pollak Z., *Hidrogelologija za građevinare*. Poslovna knjiga – Zagreb, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Građevinski fakultet Sveučilišta u Osijeku; Zagreb 1995.

Percel B., *Mehanika Tla 1. dio*. Viša Geotehnička škola: Varaždin, RGN fakulteta Sveučilišta u Zagrebu; Varaždin, ožujka 1975.

Baćani, A., *Hidrogeologija I*. Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko – Geološko – Naftni fakultet; 2006.

Miletić P., Heinrich Miletić M., *Uvod u kvantitativnu hidrogeologiju*. RGN – fakultet Sveučilišta u Zagrebu – OOUR studija geotehnike Varaždin i Nišro Varaždin; Varaždin 1981.

Roje-Bonacci T., *Zemljani radovi*. Sveučilište u Splitu, fakultet Građevinarstva, Arhitekture i Geodezije; Split 2007.

Nonveiller E., *Mehanika tla i temeljenje građevina*. Školska knjiga; Zagreb 1979.

Žugaj R., *Hidrologija*. Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko – Geološko – Naftni fakultet; Zagreb 2000.

Strelec S., Štuhec D., *Geotehnički laboratorij i primjena u inženjerskoj praksi*, Interna skripta, Varaždin: Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet, 2011.

Michael Kasenov, Pd.D., *Determination of hydraulic conductivity from grain size analysis, Included Determination of Hydraulic Conductivity of Porous Media from Grain-Size Composition*, by Vuković, M., Soro A., Water Resources Publications, LLC, 2010.

Szavits-Nossan V., *Voda u tlu*. članak, dostupno na: https://www.grad.unizg.hr/download/repository/Voda_u_tlu.pdf

Kvasnička P., Domitrović D., *Mehanika tla*. Interna skripta, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko – Geološko – Naftni fakultet; Zagreb, 2007. dostupno na: http://rgn.hr/~pkvasnic/MehanikaTla_2007.pdf

Urumović. K., *Fizikalne osnove dinamike podzemnih voda*, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko – Geološko – Naftni fakultet; Zagreb, 2003.

Vienken, T., Dietrich, P., *Field evaluation of methods for determining hydraulic conductivity from grain size data*, *Journal of Hydrology* 400 (2011), pg. 58-71, Elsevier, dostupno na journal homepage: www.elsevier.com/locate/jhydrol

HRS CEN ISO/TS 17892-4:2008, *Geotehničko istraživanje i ispitivanje-Laboratorijsko ispitivanje tla – 4. dio: Određivanje granulometrijskog sastava (ISO/TS 17892-4:2004; CEN ISO/TS 17892-4:2004)*

BS 1377:1990-Part 5, *Method of test for soil for civil engineering purposes, compressibility, permeability and durability tests*

Kevrić K., *Određivanje hidrauličke vodljivosti metodom permeamtra sa stalnom razinom na vodocrpilištu Švarča*. diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko – Geološko – Naftni fakultet; Zagreb 2017.

Szavits-Nossan V., *Mehanika tla i stijena, strujanje vode kroz tlo*. članak, dostupno na: https://www.grad.unizg.hr/download/repository/5_Predavanje_MT.pdf

Veinović Ž., Kovačević-Zelić B., Kvasnička P., *Laboratorijsko mjerenje koeficijenta propusnosti tla – usporedba konvencionalnih i novih metoda*. članak, str. 95-102, Rudarsko-geološko-naftni zbornik, Vol.15 No.1; Prosinac 2003., dostupno na: <https://hrcak.srce.hr/13393>