

Ocena koeficientov vodoprepustnosti zasičenih glin na osnovi njihovih fizikalnih lastnosti

Evaluation of permeability of saturated clays based on their physical properties

Mojca ŽNIDARŠIČ¹ & Bojana DOLINAR²

¹Institut Jožef Stefan, Jamova cesta 39, 1000 Ljubljana, Slovenija
e-pošta: mojca.znidarsic@ijs.si

²Univerza Maribor, Fakulteta za gradbeništvo, Smetanova ul. 17, 2000 Maribor, Slovenija
e-pošta: bojana.dolinar@uni-mb.si

Ključne besede: gline, prepustnost, poroznost, specifična površina
Key words: clays, permeability, porosity, specific surface

Kratka vsebina

Prispevek podaja ugotovitve študije, ki je obsegala laboratorijske preiskave vodoprepustnosti glin, primerjavo izmerjenih koeficientov vodoprepustnosti z ocenjenimi po postopkih različnih raziskovalcev in analizo vpliva posameznih fizikalnih lastnosti preiskovanih materialov na njihovo vodoprepustnost. Rezultati so pokazali, da obstoječi obrazci za oceno vodoprepustnosti glin niso splošno uporabni, saj v primeru preiskovanih vzorcev ne zagotavljajo zadovoljivih rezultatov. Na osnovi ugotovitve, da so merjeni koeficienti vodoprepustnosti odvisni predvsem od poroznost in velikosti glinenih zrn, so predlagani novi empirični izrazi za oceno te lastnosti.

Abstract

This article presents the findings of a study that comprised laboratory investigations of hydraulic permeability of clays, comparison of measured coefficients of hydraulic permeability with the predicted coefficients obtained according to procedures proposed by different researchers, and the analysis of the influence of individual physical properties of researched materials on their hydraulic permeability. The results showed that the existing expressions for predicting hydraulic permeability of clays cannot be generally applied because they do not yield satisfactory results. Therefore, a new empirical expression for predicting this characteristic is proposed based on the finding that measured coefficients of hydraulic permeability basically depend on porosity and the size of clay grains.

Uvod

Prepustnost predstavlja pomembno fizikalno lastnost, uporabno v modelih, ki simulirajo pronicanje tekočine skozi različne materiale. V geotehniki se ti podatki uporabljajo za izračun časovnega poteka konsolidacije zemljin (nevezanih klastičnih sedimentov), za potrebe dimenzioniranja drenaž, izgradnje tesnilnih slojev, zaščite iz-

kopov gradbenih jam in zaščite okolja pred onesnaženjem.

Meritve prepustnosti zemljin, ki se izvajajo na terenu ali v laboratoriju, so razmeroma zahtevne in dolgotrajne. Želja raziskovalcev je zato razviti postopek, ki bi omogočal oceno te lastnosti zemljin na osnovi drugih, lažje merljivih lastnosti. V literaturi tako zasledimo različne obrazce, ki so zasnovani bodisi empirično ali teoretično na osnovi

znanih fizikalnih zakonov. Doslej predlagani postopki omogočajo zelo dobro oceno prepustnosti peskov in prodov, medtem ko za glino to ne velja. Cilj raziskave, opisane v prispevku, je bil zato poiskati model, ki bi omogočal boljše napovedovanje te lastnosti vezljivih zemljin.

Vodoprepustnost zemljin je odvisna predvsem od velikosti, oblike in vijugavosti kanalov, skozi katere pronica voda. Direktna opredelitev omenjenih lastnosti ni mogoča, pričakovati pa je, da se lahko izrazijo posredno s poroznostjo, velikostjo, obliko in razporejenostjo zrn ter vrsto mineralov. Na vodoprepustnost zemljin pa razen naštetih vplivajo še drugi dejavniki kot so stopnja zasičenosti, kemična sestava vode, organske in druge primesi ter temperatura.

Določitev tistih fizikalnih lastnosti zemljin, ki v največji meri pogojujejo njihovo vodoprepustnost in opredelitev razmerij med prepustnostjo in izbranimi lastnostmi je kompleksna in zahtevna naloga, ki zahteva sistematičen pristop z upoštevanjem določenih omejitev. V obravnavani študiji prepustnosti smo tako izločili ali poenotili vse tiste dejavnike, ki razen fizikalno kemičnih lastnosti mineralov vplivajo na to lastnost. V ta namen smo uporabili monomineralne glin in njihove zmesi brez organskih in drugih primesi. Vsi vzorci so bili med preiskavami povsem zasičeni, konstantna je bila kemična sestava uporabljene vode, prav tako pa upoštevane tudi korekcije zaradi sprememb temperature. Zaradi osne konsolidacije vzorcev in ploščate oblike glinenih delcev so bila pri vseh meritvah zrna razporejena paralelno, pravokotno na smer toka vode. Spremenljivke pri preiskavah so bile poroznost vzorcev, vrsta preiskovanih glin in s tem specifična gravitacija, specifična površina zrn in ionska izmenjalna kapaciteta. Tak pristop je zahteval skrbno izbiro preiskovanih vzorcev tako zaradi izbranih pogojev kot dejstva, da so morale biti njihove mineraloške lastnosti tako raznolike, kot jih najdemo v naravi (različna velikost glinenih zrn, nabreklije in nenabreklije glin).

Pregled dosedanjih ugotovitev

Pregled dostopne literature je pokazal majhno število raziskav, namenjenih ugotavljanju postopkov za oceno vodoprepustnosti vezljivih zemljin. Prav gotovo je največkrat omenjena enačba (1), ki jo je predlagal Ko-

zeny (1927) in kasneje modificiral Carman (1937).

$$k = \frac{\gamma}{\mu} \cdot \frac{1}{k_0 \cdot T^2 \cdot S_0^2} \cdot \frac{e^3}{1+e} \quad (1)$$

V izrazu je k koeficient prepustnosti, k_0 koeficient oblike, T koeficient vijugavosti kanalov, e količnik por, γ specifična teža tekočine, μ dinamična viskoznost tekočine in S_0 omočena površina na enoto volumna trdnine. Omočena površina je običajno manjša od celotne površine delcev v enakem volumnu trdnine, določata jo velikost in razporejenost zrn ali agregatov. Kozeny–Carmanova (KC) enačba je bila kasneje velikokrat modificirana (Freeze & Cherry, 1979; Domenico & Schwartz, 1998). Danes se najpogosteje uporablja v naslednji obliki (Chapuis & Aubertin, 2003),

$$k = C \cdot \frac{g}{\mu_w \cdot \rho_w} \cdot \frac{e^3}{A_s^2 \cdot D_R^2 \cdot (1+e)} \quad (2)$$

kjer je C faktor, ki opisuje obliko in vijugavost kanalov ($C = 0,2-0,5$), g gravitacijska konstanta, μ_w dinamična viskoznost vode, ρ_w gostota vode, ρ_s gostota trdnine, D_R specifična gravitacija ($D_R = \rho_s/\rho_w$), e količnik por in A_s specifična površina podana kot površina zrn na utežno enoto zemljine.

Kasnejše raziskave Carman-a (1939) so pokazale, da je enačba (1) primerna za oceno vodoprepustnosti prodov in peskov, medtem ko je za melje in glin neuporabna. Takšen zaključek je Carman postavil na osnovi raziskav naravnih glin, za katere je ugotovil, da razmerje med k in $n^3/(1-n)^2$ oziroma $e^3/(1+e)$ ni konstanta, ampak padajoča funkcija poroznosti. Eksperimentalne preiskave Taylor-ja (1948) so potrdile to trditev, prav tako pa tudi meritve vodoprepustnosti drobno zrnatih naravnih materialov, ki sta jih izvajala Michaels in Lin (1954). Al-Tabbaa in Wood (1987) sta dokazala, da koeficient prepustnosti za preiskani kaolinit ni linearno odvisen od razmerja $e^3/(1+e)$, kar pomeni, da KC enačba ne velja. Prav nasprotno pa sta Chapuis in Aubertin (2003) na osnovi številnih že obstoječih podatkov pokazala, da je razmerje $\log k - \log[e^3 / D_R^2 \cdot A_s^2 \cdot (1+e)]$ linearno in tako KC enačba veljavna. Kot najpomembnejši razlog predhodnih mnenj, da KC enačba ne velja za drobno zrnate zemljine, sta navedla nepoznavanje dejanske specifične površine preiskovanih materialov.

Singh in Wallender (2006) sta predlagala, da se v KC enačbi namesto merjene

poroznosti uporabi korigirano vrednost, ki v primeru glinenih zemljin upošteva zmanjšanje volumna kanalov za delež adsorbirane vode. Privzela sta, da se na površino zrn vežejo tri molekule vode. Na tak način ocenjena vodoprepustnost glin je sicer pokazala boljše rezultate kot klasična KC enačba, vendar pa so odstopanja od merjenih vrednosti še vedno velika. Razlog je lahko tudi dejstvo, da debelina filma adsorbirane vode ni konstantna, ampak se spreminja v odvisnosti od vrste mineralov in napetostnega stanja v zemljini.

Upoštevanje efektivne poroznosti v poenostavljeni KC enačbi so predlagali tudi Ahuja et al. (1984) in tako podali koeficient prepustnosti v obliki (3),

$$k = B \cdot n_e^m \quad (3)$$

kjer je B konstanta, ki nadomešča relativno gostoto trdnine in lastnosti tekočine (μ_w, ρ_w), m (4–5) parameter, odvisen od vrste zemljin, ter n_e efektivna poroznost, izračunana kot razlika med vsebnostjo vode v zasičenem materialu in vsebnostjo vode v nezasičenem materialu pri matričnem potencialu 33 kPa. Matrični potencial podaja silo, s katero so molekule vode vezane na površino delcev. Efektivna poroznost v enačbi (3) nadomešča poroznost in specifično površino v KC enačbi.

Eksperimentalni del

Laboratorijske preiskave vodoprepustnosti so potekale na umetno pripravljenih vzorcih monomineralnih glin in njihovih zmesi. Uporabljene gline pripadajo dobro kristaliziranemu kaolinitu (KGa-1), slabo kristaliziranemu kaolinitu (KGa-2) in montmorillonitu s Ca izmenljivim kationom (SAz-1). Izhajajo iz nahajališč v državah Georgia in

Arizona, njihovo pridobivanje in pripravo vodi združenje Clay Mineral Society v okviru projekta Source Clays. Pri izkopavanju in pripravi glin se uporabljajo takšni postopki, ki zagotavljajo nespremenjene lastnosti teh materialov. Ker se sestava naravnih glin na različnih delih nahajališč nekoliko spreminja, so gline za raziskovalne namene pripravljene tako, da se velike količine materiala predhodno homogenizirajo in shranijo. Tak način omogoča dolgoletne različne raziskave popolnoma enakega materiala in s tem primerjanje in dopolnjevanje rezultatov predhodnih študij. Podatki o kemični sestavi, mineralni sestavi, strukturni zgradbi, kationski izmenjalni kapaciteti, specifični površini in drugih lastnostih so za omenjene gline objavljeni v literaturi (Constanzo & Gugenheim, 2001; Van Olphen & Fripiat, 1979) in prikazani v preglednici 1. Vzorca z oznakama K-1 in K-2 sta zmesi kaolinita in montmorillonita. Njuna sestava je prikazana v preglednici 1, prav tako pa tudi specifična površina A_s in kationska izmenjalna kapaciteta CEC (količina kationov, ki so adsorbirani na površine glinenih zrn elektrostatično in se lahko izmenjujejo). A_s in CEC sta za zmesi izračunani na osnovi masnih deležev posameznih glin.

Preiskave vodoprepustnosti smo izvajali v edometru po metodi s spremenljivim hidravličnim padcem vode skladno s standardom SIST-TS CEN ISO/TS 17892-11:2004. Začetna količina vode je bila v glinah blizu meje židkosti. V preglednici 2 je prikazana kot relativna vlažnost, ki je opredeljena kot razmerje med težo vode in težo trdnine in podana v odstotkih. Meritve smo na vsakem posameznem vzorcu vršili pri petih različnih količnikih por, doseženih po konsolidaciji pri obremenitvah $\sigma' = 20 \text{ kPa}$, 50 kPa , 100 kPa , 150 kPa in 200 kPa . Prikazani rezultati v preglednici 3 predstavljajo sred-

Preglednica 1. Mineralna sestava, specifična površina A_s in kationska izmenjalna kapaciteta CEC

Table 1. Mineral composition, specific surface area A_s and cation exchange capacity CEC .

Vzorec	Mineralna sestava	A_s (m ² /g)	CEC (meq/100g)
KGa-1	dobro kristaliziran kaolinit	10,05	2,0
KGa-2	slabo kristaliziran kaolinit	23,50	3,3
SAz-1	Ca-montmorillonit	97,42	120,0
K-1	(70% KGa-1 + 30% SAz-1)	36,26	37,4
K-2	(50% KGa-2 + 50% SAz-1)	60,46	61,6

nje vrednosti dveh do treh ponovitev vsake meritve vodoprepustnosti. Vsi vzorci so bili med preiskavami prepustnosti povsem zasičeni z vodo, kar je v preglednici 2 razvidno iz podane stopnje zasičenosti S_r (razmerje med volumnom z vodo zasičenih por in celotnim volumnom por).

Pri preiskavah je bila uporabljena voda iz vodovodnega omrežja. Predpostavili smo, da je njena kemična sestava konstantna. Razlog uporabe te vode namesto destilirane (kot predpisuje standard) je bil preprečitev formiranja sataste strukture, ki se prav pri kaolinitnih glinah najraje pojavlja, kadar je pH vode < 7 . Pri izračunih koeficientov vodoprepustnosti je bil upoštevan vpliv temperature vode med preiskavami in s tem njene dinamične viskoznosti. Vse vrednosti k so podane za temperaturo 20°C , kar označuje simbol k_{20} (preglednica 3).

Rezultati in diskusija

Rezultati meritev vodoprepustnosti preiskovanih glin se skladajo z ugotovitvami predhodnih eksperimentalnih in teoretičnih študij drugih raziskovalcev, da za posa-

mežno zemljino obstaja soodvisnost med vodoprepustnostjo k_o in količniki por e oziroma poroznostjo n . Iz slike 1 je razvidno, da lahko vrednosti k (m/s) in e za vsako glino aproksimiramo s funkcijo (4), v kateri sta α ind β parametra, odvisna od vrste gline.

$$k = \alpha e^{\beta}$$

(4)

Pogoji preiskav prepustnosti so bili za vse gline enaki, edina spremenljivka je bila velikost glinenih zrn, podana kot specifična površina A_s (m^2/g). Po pričakovanju se ta lastnost jasno odraža na vrednostih α in β (sliki 2 in 3), kar je razumljivo, saj v izbranih pogojih preiskav prav velikost zrn določa vijugavost in velikost vodnih kanalov. Razmerja med obema parametroma in specifično površino lahko dobro opišemo z enačbama (5) in (6).

$$\alpha = 5,18 \cdot 10^{-6} \cdot A_s^{3,1}$$

(5)

$$\beta = 5,21 \cdot A_s^{0,25}$$

(6)

S kombinacijo izrazov (4), (5) in (6) dobimo enačbo (7), ki omogoča izračun koeficienta vodoprepustnosti pri izbranem količi-

Preglednica 2. Relativna vlažnost w pred in po preiskavah, začetni količnik por e in stopnja zasičenosti S_r .

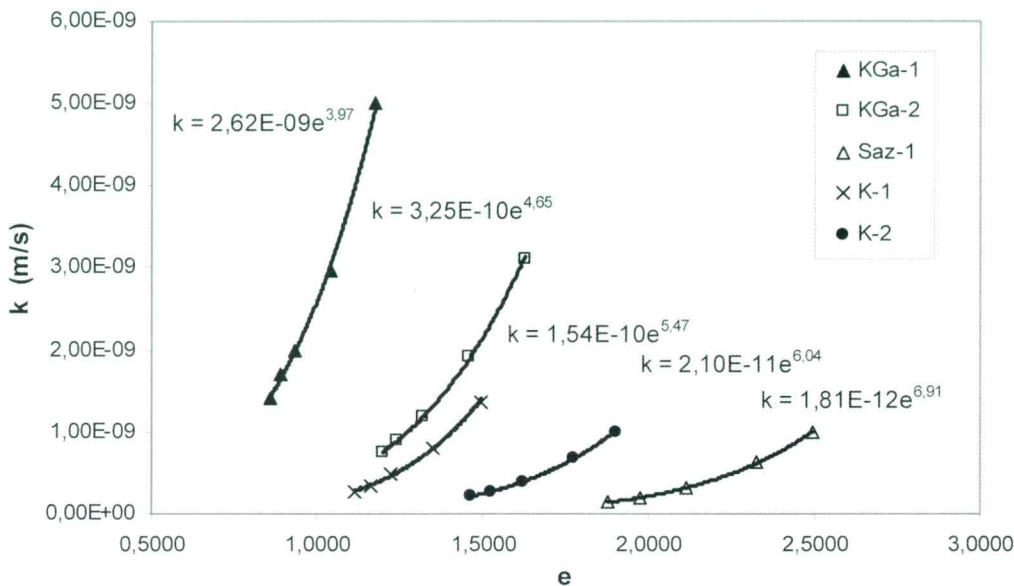
Table 2. Water content w before and after the test, initial void ratio e and degree of saturation S_r .

Vzorec	KGa-1	KGa-2	SAz-1	K-1	K-2
Relativna vlažnost pred preiskavo w (%)	55,02	71,82	124,60	62,33	85,67
Količnik por e	1,3660	1,7890	3,1026	1,6226	2,1666
Stopnja zasičenosti S_r (%)	100	100	100	100	100
Relativna vlažnost po preiskavi w (%)	36,37	48,75	94,52	48,26	63,37

Preglednica 3. Količniki por e in koeficienti vodoprepustnosti k_{20} pri različnih osnih napetostih.

Table 3. Void ratios e and coefficients of permeability k_{20} at different axial stresses.

Vzorec	KGa-1		KGa-2		SAz-1		K-1		K-2	
	e	k_{20} (m / s)	e	k_{20} (m / s)	e	k_{20} (m / s)	e	k_{20} (m / s)	e	k_{20} (m / s)
Obtežba (kPa)										
20	1,172	$5,00 \cdot 10^{-9}$	1,6266	$3,10 \cdot 10^{-9}$	2,4952	$9,90 \cdot 10^{-10}$	1,4960	$1,37 \cdot 10^{-9}$	1,9000	$1,00 \cdot 10^{-9}$
50	1,0415	$2,97 \cdot 10^{-9}$	1,4596	$1,91 \cdot 10^{-9}$	2,3291	$6,34 \cdot 10^{-10}$	1,3500	$8,00 \cdot 10^{-10}$	1,7714	$6,70 \cdot 10^{-10}$
100	0,9332	$1,99 \cdot 10^{-9}$	1,322	$1,20 \cdot 10^{-9}$	2,1149	$3,20 \cdot 10^{-10}$	1,2221	$4,94 \cdot 10^{-10}$	1,6214	$3,96 \cdot 10^{-10}$
150	0,8896	$1,69 \cdot 10^{-9}$	1,2433	$8,90 \cdot 10^{-10}$	1,9773	$1,99 \cdot 10^{-10}$	1,1635	$3,49 \cdot 10^{-10}$	1,5263	$2,65 \cdot 10^{-10}$
200	0,8600	$1,42 \cdot 10^{-9}$	1,1973	$7,50 \cdot 10^{-10}$	1,8758	$1,40 \cdot 10^{-10}$	1,1146	$2,70 \cdot 10^{-10}$	1,4644	$2,10 \cdot 10^{-10}$



Slika 1. Koeficienti vodoprepustnosti k v odvisnosti od količnikov por e .
Fig. 1. Relationship between coefficients of permeability k and void ratios e .

niku por s pomočjo znane specifične površine gline.

$$k = 5,18 \cdot 10^{-6} \cdot A_s^{-3,1} \cdot e^{2,21 A_s^{0,25}} \quad (7)$$

Ker je količnik por $e = n / 1 - n$, se lahko koeficient vodoprepustnosti izrazi tudi v odvisnosti od deleža por n z enačbo (8).

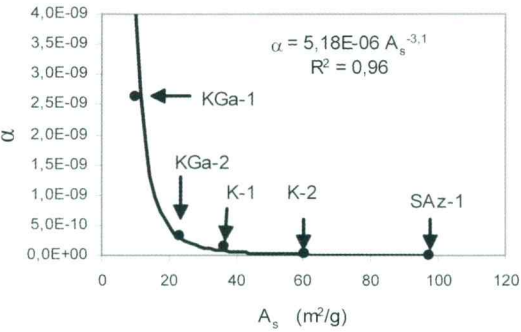
$$k = (1,02 \cdot 10^{-8} \cdot A_s + 4,55 \cdot 10^{-7}) \cdot n^{(0,154 \cdot A_s + 6,9)} \quad (8)$$

Razmerje $k - e - A_s$ lahko prikažemo še z enačbo (9), ki jo dobimo, če koeficiente vodoprepustnosti in količnike por podamo v razmerju s specifično površino (slika 4).

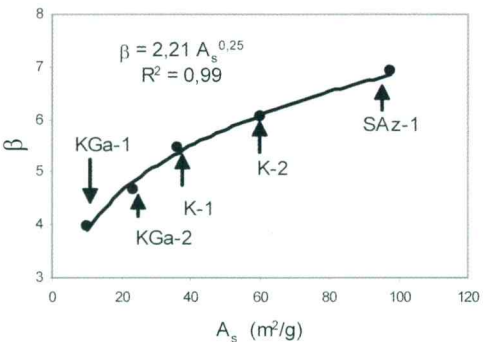
$$k = 5,29 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{e^{4,27}}{A_s^{2,27}} \quad (9)$$

Enačba (9) ima v tem primeru enako obliko kot (3), ki so jo za oceno prepustnosti vezljivih zemljin predlagali Ahuja et al. (1984). Ker smo efektivno poroznost v (3) nadomestili s količnikom por, je razumljivo, da je potrebno to vrednost korigirati s specifično površino. Ahuja et al. (1984) so predlagali za parameter m vrednosti 4–5, kar dobro sovпада z vrednostjo v našem primeru, ki je 4,27.

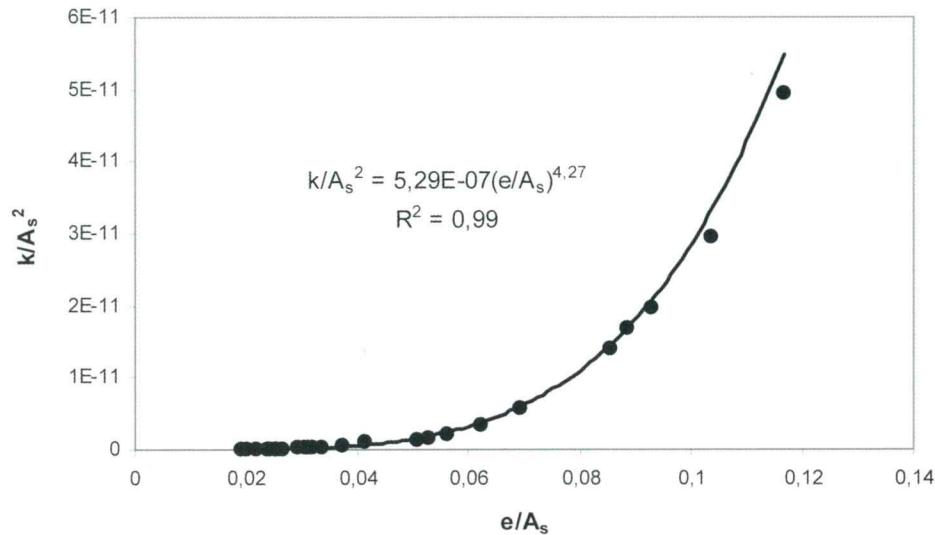
Slika 5 prikazuje razmerje med koeficienti vodoprepustnosti in količniki por v obliki



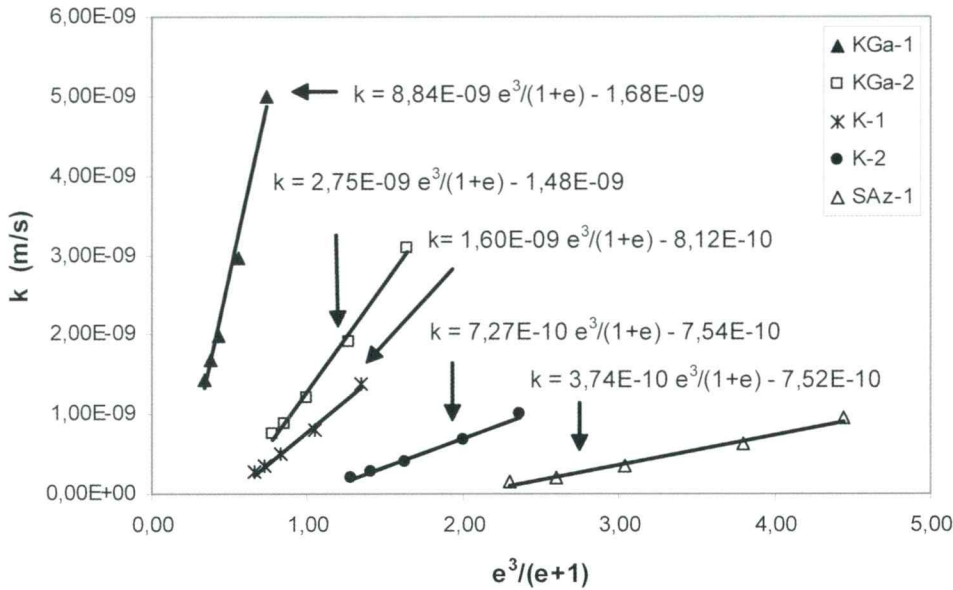
Slika 2. Parameter α v odvisnosti od specifične površine glin A_s .
Fig. 2. Parameter α versus specific surface A_s .



Slika 3. Parameter β v odvisnosti od specifične površine glin A_s .
Fig. 3. Parameter β versus specific surface A_s .



Slika 4. k/A_s^2 v odvisnosti od e/A_s .
Fig. 4. Relationship between k/A_s^2 and e/A_s .

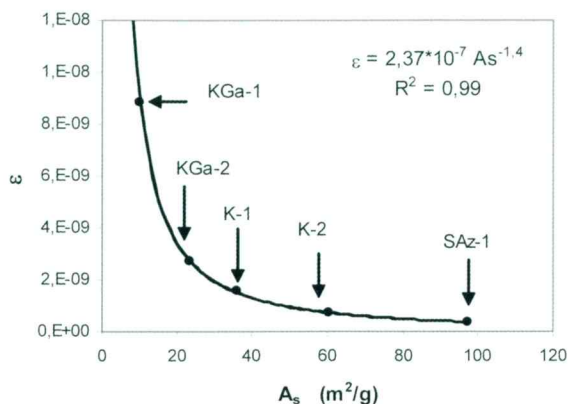
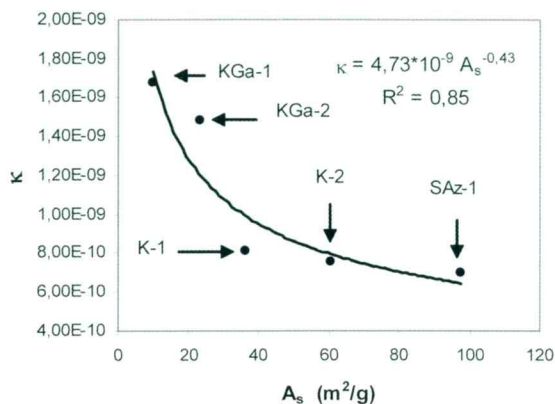


Slika 5. Koeficient vodoprepustnosti k v odvisnosti od $e^3/(1+e)$.
Fig.5. Relationship between k and $e^3/(1+e)$.

$e^3/(1+e)$, ki ustreza KC enačbi (2). Raziskovalca Al-Tabbaa in Wood (1987) sta na osnovi meritev zaključila, da to razmerje ni linearno, medtem ko so podatki naših preiskav pokazali nasprotno. Za vse glin je to razmerje linearno, za vsako posamezno vrsto pa se spremeni smerni koeficient premice ε in odsek na ordinati κ – enačba (10).

$$k = \varepsilon \cdot \frac{e^3}{1+e} - \kappa \tag{10}$$

Parametra ε in κ v izrazu (10) sta na slikah 6 in 7 prikazana v odvisnosti od specifične površine vzorcev. Parameter ε dobro opiše enačba (11), za parameter κ pa lahko z enačbo (12) dobimo le približne vrednosti.

Slika 6. Parameter ε v odvisnosti od specifične površine glin A_s .Fig. 6. Parameter ε versus specific surface A_s .Slika 7. Parameter κ v odvisnosti od specifične površine glin A_s .Fig. 7. Parameter κ versus specific surface A_s .

Zanimivo pa je, da se lahko κ zelo točno izrazi v odvisnosti od ionske izmenjalne kapacitete CEC preiskovanih glin z enačbo (13) – slika 8.

$$\varepsilon = 2,05 \cdot 10^{-7} \cdot A_s^{-1,38} \quad (11)$$

$$\kappa = 4,38 \cdot 10^{-9} \cdot A_s^{-0,41} \quad (12)$$

$$\kappa = 1,93 \cdot 10^{-9} \cdot CEC^{-0,22} \quad (13)$$

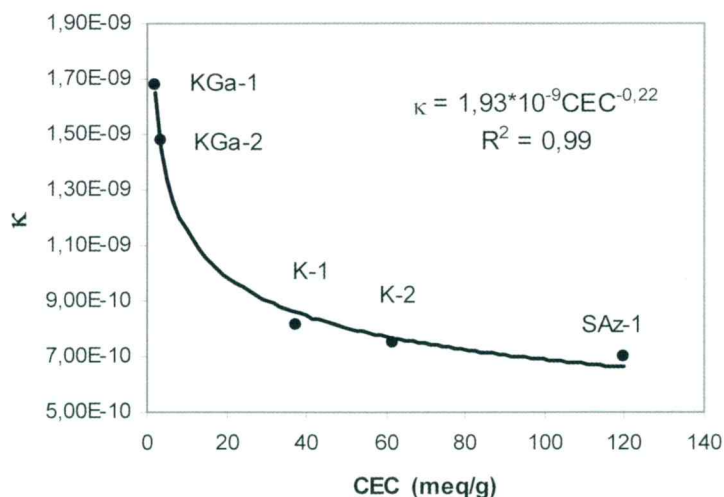
Ob upoštevanju izrazov (11) in (13) dobi enačba (10) obliko (14),

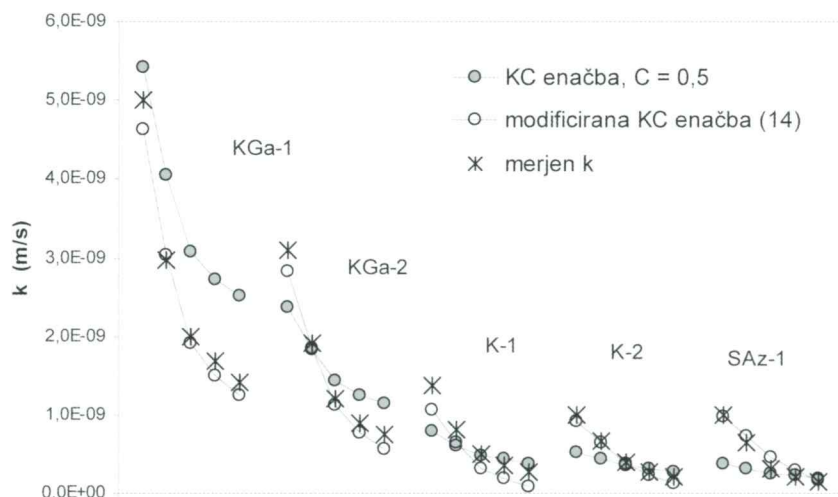
$$k = (2,05 \cdot 10^{-7} \cdot A_s^{-1,38}) \cdot \frac{e^3}{(1 + e)} - (1,93 \cdot 10^{-9} \cdot CEC^{-0,22}) \quad (14)$$

ki predstavlja, če zanemarimo parameter κ , Kozeny-Carmanovo enačbo. Parameter ε v

tem primeru odraža fizikalne lastnosti vode, specifično težo glin in velikost, obliko ter vijugavost kanalov. Pri vseh naših preiskavah so bile fizikalne lastnosti vode enake, podobna pa je bila tudi specifična teža trdnine ter oblika in struktura površine glinenih zrn. Edina spremenljivka, to je velikost zrn, tako opredeljuje značilnosti vodnih kanalov. Pojav parametra κ v izrazu (14) opozarja, da KC enačba v obliki (2) ni povsem ustrezna za oceno vodoprepustnosti vezljivih zemljin.

Slika 9 kaže primerjavo med merjenimi koeficienti prepustnosti in ocenjenimi z enačbama (2) in (14). Medtem, ko kažejo vrednosti k , izračunane s Kozeny-Carmanovo enačbo velika odstopanja, so koeficienti prepustnosti, ocenjeni z modificirano KC enačbo (14), precej bolj primerljivi z merjenimi.

Slika 8. Parameter κ v odvisnosti od kationske izmenjalne kapacitete CEC.Fig. 8. Parameter κ versus CEC.



Slika 9.
Merjeni in ocenjeni
koeficienti
prepustnosti.

Fig. 9.
Measured and
predicted
coefficients
of permeability.

Chapuis in Aubertin (2003) sta zaključila, da je pri drobno zrnatih zemljinah razmerje med $\log k$ in $\log[e^3/D_R^2 \cdot A_S^2 \cdot (1 + e)]$ linearno in podano z enačbo (15), v kateri je $C = 0,29 - 0,51$.

$$\log k = C + \log[e^3/D_R^2 \cdot A_S^2 \cdot (1 + e)] \quad (15)$$

Ugotovili smo, da je za preiskane gline podano razmerje res približno linearno, vendar pa posamezne meritve zelo odstopajo, prav tako pa tudi predlagana vrednost konstante C . S podano trditvijo obeh avtorjev se zato ne moremo strinjati.

Zaključek

V prikazani študiji smo ugotavljali, kako lahko na osnovi izbranih, lažje merljivih fizikalnih lastnosti glin ocenimo njihovo vodoprepustnost. Pri tem smo izhajali iz teoretičnih in praktičnih dognanj drugih raziskovalcev in rezultatov laboratorijskih meritev prepustnosti umetno pripravljenih vzorcev različnih glin. Rezultati preiskav so pokazali, da lahko koeficiente vodoprepustnosti glin najbolje izrazimo s količnikom ali deležem por in zunanjo specifično površino. Prikazana razmerja veljajo za zasičene gline brez organskih in drugih primesi, izbrano temperaturo in kemično sestavo uporabljene vode. Doslej znani postopki za oceno vodoprepustnosti zemljin pri preiskovanih vzorcih niso pokazali zadovoljivih rezultatov, saj omogočajo le njeno približno oceno.

Simboli

A_S	specifična površina
B	konstanta v izrazu (3)
C	faktor, ki opisuje obliko in vijugavost kanalov v izrazu (2)
CEC	kationska izmenjalna kapaciteta
D_R	specifična gravitacija
e	količnik por
g	gravitacijska konstanta
k	koeficient prepustnosti
k_0	koeficient oblike
k_{20}	koeficient prepustnosti pri temperaturi 20°C
m	materialni parameter
n	poroznost
n_e	efektivna poroznost
S_0	omočena površina na enoto volumna trdnine
S_r	stopnja zasičenosti
T	koeficient vijugavosti kanalov
w	relativna vlaga
α	materialni parameter
β	materialni parameter
γ	specifična teža tekočine
ε	materialni parameter
κ	materialni parameter
μ	dinamična viskoznost tekočine
μ_w	dinamična viskoznost vode
ρ_s	gostota trdnine
ρ_w	gostota vode
σ'	efektivna napetost

Reference

- AL-Tabbaa, A. & Wood, D. M. 1987: Some measurements of the permeability of kaolin. – *Geotechnique* 37, 4, 499–503, London.
- Ahuja, L. R., Naney, J. W., Green, R. E. & Nielsen, D. R. 1984: Macroporosity to characterize spatial variability of hydraulic conductivity and effects of land management. – *Soil Science Society of America Journal* 48, 4, 499–702.
- Carman, P. C. 1937: Fluid flow through granular beds. – *Transactions, Institution of Chemical Engineers* 15, 150–166, London.
- Carman, P. C. 1939: Permeability of saturated sands, soils and clays. – *Journal of Agricultural Science*, 29, 263–273.
- Chapuis, R. P. & Aubertin, M. 2003: On the use of the Kozeny-Carman equation to predict the hydraulic conductivity of soils. – *Can. Geotech. J.*, 40, 616–628.
- Costanzo, P. M. & Guggenheim, S. 2001: Baseline studies of The Clay Minerals Society source clays – *Clays and Clay Minerals*, 49, 5, 371–453, Aurora.
- Domenico, P. A. & Schwartz, F. W. 1998: *Physical and Chemical hydrogeology*. John Wiley & Sons, New York.
- Freeze, R. A. & Cherry, J. A. 1979: *Groundwater*. Englewood Cliffs, N.J. Prentice-hall.
- Geotehnično preiskovanje in preskušanje – Laboratorijsko preskušanje zemljin: Ugotavljanje prepustnosti s konstantnim in spremenljivim hidravličnim padcem – 11.del. SIST-TS CEN ISO/TS 17892–11:2004, Brussels.
- Kozeny, J. 1927: Ueber kapillare Leitung des Wassers im Boden. *Sitzungsberichte, Akademie der Wissensch* 136(2a), 271–306, Wien.
- Michaels, A. S. & Lin, C. S. 1954: The permeability of kaolinite. – *Industrial and Engineering Chemistry*, 46, 6, 1239–1246.
- Singh, P. N. & Wallender, W. W. 2006: Modifying Kozeny-Carman equation for evaluating saturated hydraulic conductivity in clay with adsorbed water layers – An ASABE Meeting Presentation, Paper no. 062224, Oregon.
- Taylor, D. W. 1948: *Fundamentals of soil mechanics*. John Wiley & Sons, New York.
- Van Olphen, H. & Fripiat, J. J. 1979: *Data handbook for clay minerals and other non-metallic materials*, Pergamon press, 346 pp., Oxford.