

Sveučilište u Zagrebu

Građevinski fakultet

Marko Perjan, Mihovil Rajković, Filip Štos

Mogućnosti primjene ekspandirajuće poliuretanske smole u sprječavanju hidrauličkog  
sloma tla hidrotehničkih nasipa

Zagreb, 2017.

Ovaj rad je izrađen na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu, Zavod za hidrotehniku pod vodstvom prof.dr.sc. Gorana Gjetvaja i predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2016./2017.

## POPIS FIZIKALNIH VELIČINA:

$L$  – duljina, [mm], [cm], [m]

$A$  – površina, [m<sup>2</sup>]

$V, \mathcal{V}$  – volumen, [m<sup>3</sup>], [ml]

$v$  – brzina [m/s]

$g$  – gravitacijsko ubrzanje, [m/s<sup>2</sup>]

$\mu$  – dinamička viskoznost, [m<sup>2</sup>/s]

$\nu$  – kinematička viskoznost, [Ns/m<sup>2</sup>]

$Q$  – protok, [m<sup>3</sup>/s]

$\rho$  – gustoća, [kg/m<sup>3</sup>], [kg/cm<sup>3</sup>]

$P$  – tlak bujanja, [MPa]

$\tau_f$  – posmična čvrstoća, [MPa]

$\sigma_c$  – jednoosna tlačna čvrstoća, [MPa]

$E$  – modul elastičnosti, [MPa]

$T$  – temperatura, [°C]

$K$  – koeficijent filtracije, [m/s]

$q$  – specifični protok, [m/s]

$h$  – visina, [m]

$V$  – magnituda brzine fluida, [m/s]

$\beta$  – koeficijent uprosječivanja, [1]

$k$  – propusnost [cm<sup>2</sup>], [m<sup>2</sup>]

$Re$  – Reynoldsov broj [1]

$D$  – promjer zrna materijala, [mm]

$R$  – radijus uzorka, [m]

$r$  – radijus cijevi, [m]

$t$  – vrijeme [s]

$\gamma_{ff}$  – zapreminska težina ekspanzirane smole [kN/m<sup>3</sup>]

$\gamma_w$  – zapreminska težina vode [kN/m<sup>3</sup>]

# SADRŽAJ

|        |                                                                          |    |
|--------|--------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.     | UVOD .....                                                               | 1  |
| 1.1.   | HIDROTEHNIČKI NASIPI .....                                               | 2  |
| 1.1.1. | TEHNIČKA RJEŠENJA PROBLEMA NARUŠAVANJA STABILNOSTI NASIPA .....          | 3  |
| 1.1.2. | NEDOSTACI POSTOJEĆIH TEHNIČKIH RJEŠENJA OSIGURAVANJA NASIPA .....        | 6  |
| 1.2.   | DARCYJEV ZAKON .....                                                     | 7  |
| 1.2.1. | DARCYJEV EMPIRIJSKI IZRAZ .....                                          | 7  |
| 1.2.2. | KOEFICIJENT FILTRACIJE .....                                             | 10 |
| 1.2.3. | GRANICE VAŽENJA DARCYJEVOG ZAKONA FILTRACIJE .....                       | 11 |
| 1.2.4. | PRIJEDLOG LABORATORIJSKOG MJERENJA KOEFICIJENTA FILTRACIJE .....         | 13 |
| 1.3.   | EKSPANDIRAJUĆA POLIURETANSKA SMOLA .....                                 | 14 |
| 1.3.1. | FIZIČKA I MEHANIČKA SVOJSTVA EKSPANDIRAJUĆE SMOLE .....                  | 14 |
| 1.3.2. | HIDRAULIČKA I MEHANIČKA SVOJSTVA POLIURETANSKE SMOLE .....               | 18 |
| 1.3.3. | SMANJENJE PROPUSNOSTI TLA .....                                          | 20 |
| 1.4.   | PRIMJENA EKSPANDIRAJUĆE POLIURETANSKE SMOLE .....                        | 22 |
| 2.     | CILJ RADA I HIPOTEZA .....                                               | 24 |
| 2.1.   | HIPOTEZA .....                                                           | 24 |
| 2.2.   | CILJ RADA .....                                                          | 24 |
| 3.     | MATERIJALI I METODE ISPITIVANJA EKSPANDIRAJUĆE POLIURETANSKE SMOLE ..... | 25 |
| 3.1.   | MATERIJALI KORIŠTENI PRI ISPITIVANJU .....                               | 25 |
| 3.2.   | RAZMATRANI MODELI ZA ISPITIVANJE .....                                   | 29 |
| 3.3.   | PRIPREMA UZORAKA ZA ISPITIVANJE .....                                    | 34 |
| 3.4.   | INJEKTIRANJE EKSPANDIRAJUĆE POLIURETANSKE SMOLE .....                    | 36 |
| 3.5.   | LABORATORIJSKA ISPITIVANJA .....                                         | 39 |
| 4.     | REZULTATI ISPITIVANJA .....                                              | 42 |
| 4.1.   | PRIJEDLOG ZA DALJNJA ISPITIVANJA .....                                   | 49 |
| 5.     | RASPRAVA .....                                                           | 53 |
| 6.     | ZAKLJUČAK .....                                                          | 54 |
| 7.     | LITERATURA .....                                                         | 56 |
| 8.     | SAŽETAK .....                                                            | 59 |
| 8.1.   | ABSTRACT .....                                                           | 60 |

## 1. UVOD

Korištenje injekcijske ekspandirajuće smole dosad je svoju primjenu nalazilo uglavnom u geotehničkom području na problemima povećanja nosivosti tla, s obzirom na svoje povoljne učinke u vezanju s raznim sitnozrnatim i krupnozrnatim materijalima.

Injekcijska ekspandirajuća smola pogodna je za sanaciju tla ispod svih tipova plitkih temelja, u vidu popunjavanja podzemnih šupljina te ojačanja i zbijanja tla. Pouzdana je zamjena tradicionalnim tehnikama u svrhu poboljšanja mehaničkih karakteristika tla te sanacije nakon sloma tla i slijeganja temelja. Također, koristi se i za povećanje nosivosti podloge, kao i za relaksaciju jako stišljivih slojeva tla.

Sama ekspandirajuća smola prilikom injektiranja prodire u pore materijala, u vrlo kratkom roku nakon injektiranja stvrdnjava, te time uzrokuje smanjenje propusnosti materijala, a posljedično i smanjenje stišljivosti tla i smanjenje udjela pora u tlu. S obzirom na zapreminsku težinu manju od vode, injektiranjem ekspandirajuće smole omogućuje se i olakšavanje nekoherentnih slojeva tla iznad koherentnih, čime se smanjuje opterećenje na koherentne slojeve, a time i slijeganje.

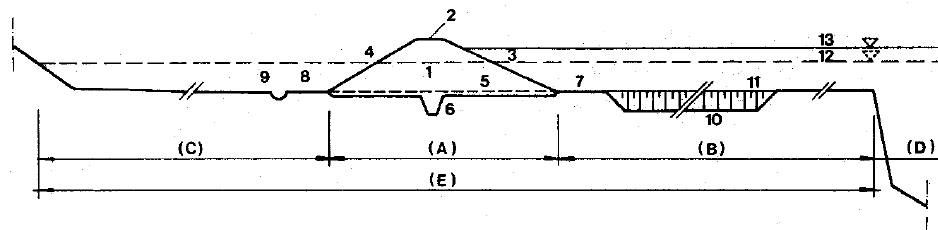
Osim potrebe za izgradnjom novih nasipa, danas u Republici Hrvatskoj postoji veliki broj nasipa kojima je potrebna sanacija.

Iz gore navedenih razloga izveden je zaključak da bi se navedena tehnologija mogla koristiti i u hidrotehničkoj struci, i to upravo za sanaciju hidrotehničkih nasipa.

U ovom će se radu prikazati terenska i laboratorijska ispitivanja raznih materijala tla, kao i sam učinak upotrebe ekspandirajuće smole u raznim materijalima na smanjenje vodopropusnosti, izraženo pripadajućim koeficijentom filtracije.

## 1.1. HIDROTEHNIČKI NASIPI

Hidrotehnički nasipi su niske brane velike duljine koje omeđuju i određuju vodene tokove rijeka i kanala raznih namjena. Grade se iz zemljanih materijala. Najčešća svrha im je obrana od poplava, regulacija vodotoka te formiranje akumulacija i retencija. [1]



(A) tijelo i posteljica nasipa; (B) inundacija; (C) područje branjeno od poplava;

(D) riječno korito; (E) poplavno područje prije izvedbe nasipa

- 1 - tijelo nasipa; 2 - kruna nasipa; 3 - vanjski pokos nasipa; 4 - unutarnji pokos nasipa; 5 - posteljica nasipa;  
6 - temeljni rov nasipa; 7 - vanjska bankina (berma) nasipa; 8 - unutarnja bankina nasipa; 9 - procjedni jarak;  
10 - pozajmište materijala; 11 - traverza između pozajmišta materijala;  
12 -  $VV_n$  prije izvedbe nasipa; 13 -  $VV_n$  nakon izvedbe nasipa

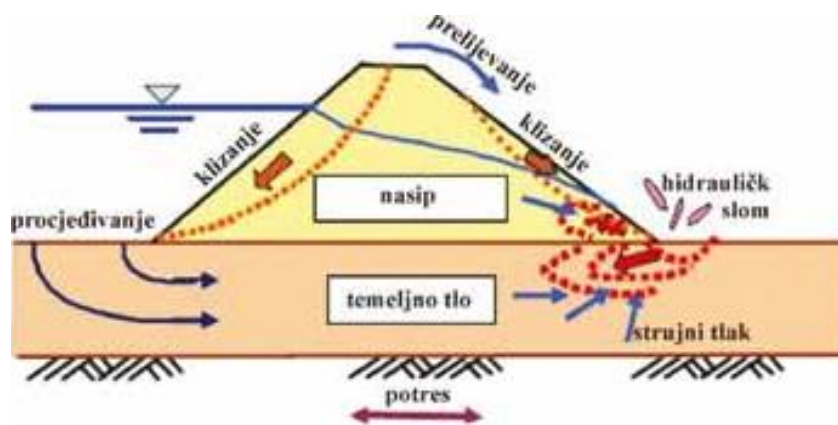
Slika 1.1. Shema poprečnog presjeka nasipa [2]

Stabilnost nasipa je pod utjecajem hidrostatskih i hidrodinamičkih djelovanja (sila) vode, kojima konstrukcija treba odolijevati. Kao najčešće posljedice, nastale hidrostatskim djelovanjem vode, mogu se navesti nastajanje kliznih ploha, slijeganje nasipa, procjeđivanje vode kroz tijelo nasipa i temeljno tlo (ispiranje sitnih čestica), uzdizanje i pucanje nasipa ako je temeljen na tlu koje mijenja volumen s promjenom vlažnosti. Uslijed hidrodinamičkih djelovanja može pak nastati oštećenje fluvijalnom erozijom, uslijed valova, isto tako i valova nastalih generiranjem brodskih vijaka (propelera), te uslijed udara santi leda i kao oštećenje uslijed prelijevanja. [3]

Hidrotehnički nasipi iziskuju relativno velike količine materijala za izgradnju. Iz tog razloga, cjelokupan materijal korišten u izgradnji se najčešće pribavlja iz takozvanih pozajmišta (mjesto iz kojih se trajno iskopava i odvozi materijal). Pozajmišta su obično mjesta u blizini samoga nasipa, najčešće u području inundacija (privremeno plavljeno područje između korita vodotoka i novog nasipa). Problematika

u tome rješenju se odražava na lošu kvalitetu ugrađenog materijala u same nasipe, te je često potrebno izvoditi dodatne tehničke i konstruktivne intervencije.

Iz gore navedenih razloga može se zaključiti da voda nepovoljno djeluje na nasip te da ju je poželjno preventivno konstruktivnim detaljima što više eliminirati. No, ukoliko dođe do natapanja tijela nasipa vodom, tada postoji niz potencijalnih problema koje ta voda uzrokuje. Primjerice, u slučaju kada nakon povlačenja velike vode u trupu nasipa postoji zaostala voda, dolazi do povećanja poreznih tlakova i vrlo često do pojave kliznih ploha na uzvodnim pokosima. Isto tako, za trajanja velikih voda može doći do procjeđivanja kroz tijelo nasipa i do pojave vrelna plohe na nizvodnom pokosu. To je također nedopustivo stanje zbog opasnosti da voda ne počne ispirati pokos, odnosno pojave hidrauličkog sloma i ugrožavanja stabilnosti nasipa.



Slika 1.2. Mogući povodi oštećenja nasipa [4]

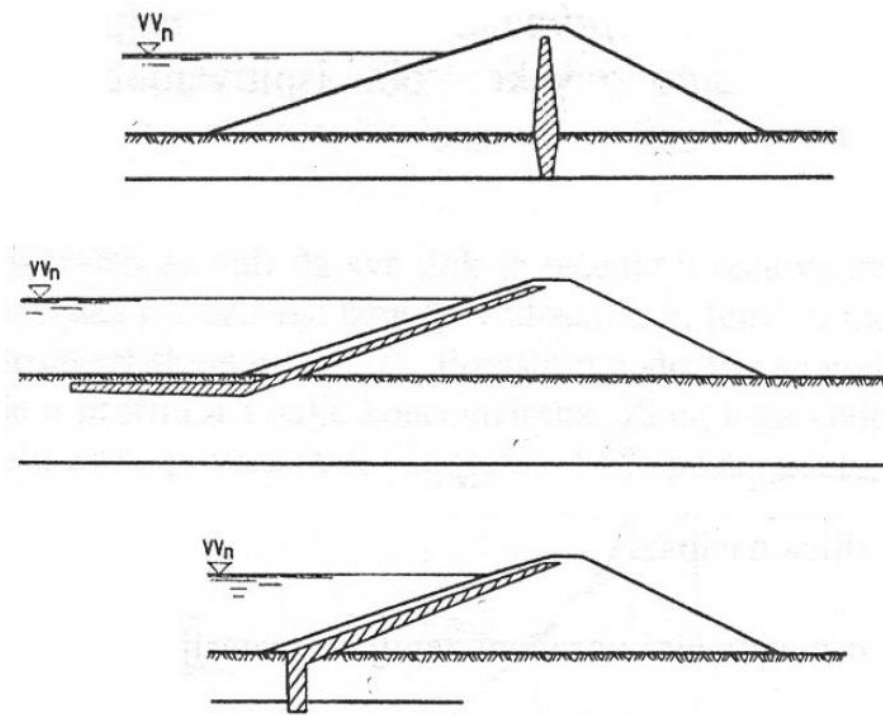
### 1.1.1. TEHNIČKA RJEŠENJA PROBLEMA NARUŠAVANJA STABILNOSTI NASIPA

U slučaju procjeđivanja vode kroz nasip izvedenog od homogenog materijala, položaj procjedne linije određen je jedino geometrijom nasipa. Međutim, o vrsti materijala i načinu ugradnje bitno ovisi brzina procjeđivanja kroz tijelo nasipa, a time i količina procjednih voda. [2]

Ako je brzina procjeđivanja, s obzirom na vrstu i način ugradnje materijala od kojeg je izveden nasip, veća od dopuštene, dolazi do deformacija tijela nasipa i ugrožavanja

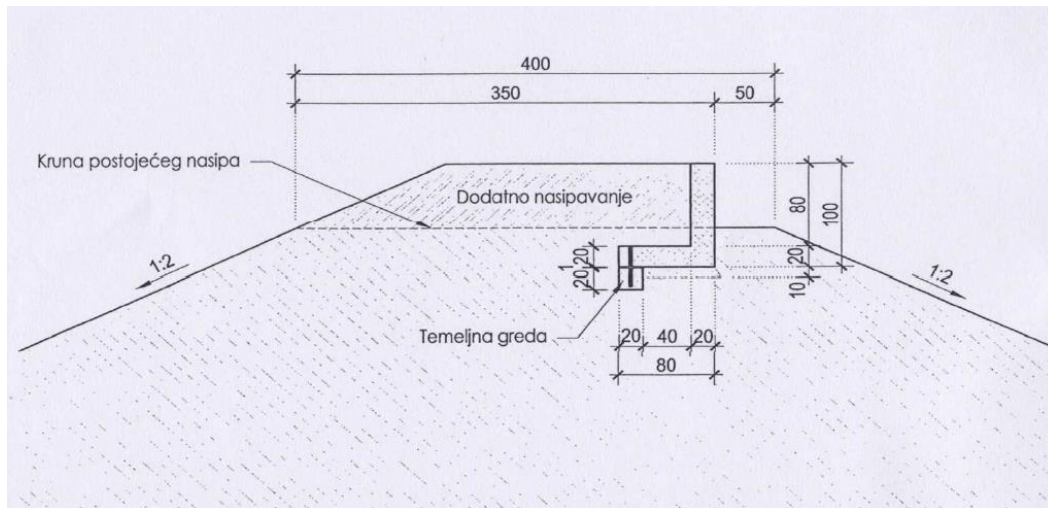
njegove stabilnosti. Smanjenje brzine procjeđivanja, odnosno smanjenje količine procjednih voda, može se postići na jedan od sljedećih načina ili u njihovoj kombinaciji:

- povećanjem dimenzija nasipa,
- boljom zbijenošću nasipa,
- izradom dijela nasipa od materijala manje vodopropusnosti ili vodonepropusnog materijala
- izradom vodonepropusne obloge,
- izradom jezgre od materijala manje vodopropusnosti ili vodonepropusnog materijala,
- izradom krute vodonepropusne obloge ili jezgre,
- izradom slabo vodopropusne jezgre ili obloge i dreniranjem stope zaobalnog pokosa s odgovarajućim filtrom.



Slika 1.3. Tipovi presjeka nasipa sa nepropusnim jezgrama i ekranima

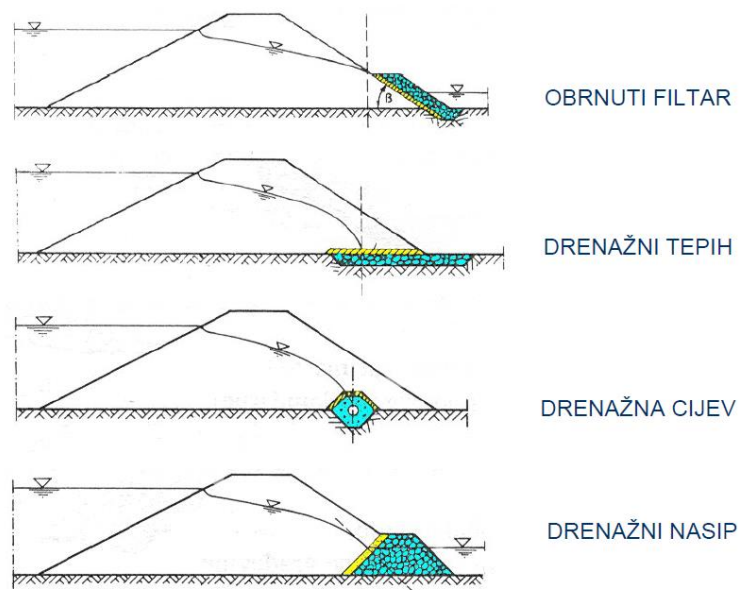




Slika 1.4. Primjer izvedbe nadvišenja krune postojećeg nasipa [5]

Dreniranje stope zaobalnog pokosa provodi se radi: [2]

- onemogućavanja ispiranja sitnih čestica materijala iz nasipa,
- sprječavanja vlaženja pokosa,
- onemogućavanja nastajanja vrelne plohe na pokosu,
- povećanja stabilnosti pokosa,
- zahvaćanja, sabiranja i odvođenja procjednih voda sistemom drenova i odvodnih kanala.



Slika 1.5. Principi dreniranja nasipa [3]

Također, jedna od mogućih metoda sprječavanja hidrauličkog sloma nasipa je izvođenje injekcijske zavjese. U nasip se pod tlakom injektira smjesa za povećanje vododrživosti, čime se ostvaruje produljenje puta procjeđivanja vode. Time voda na duljem putu mora savladati veći otpor i gubi energiju. Uobičajeni materijali korišteni za izvođenje injekcijskih zavjesa su suspenzije gline, cementa i bentonita.

#### 1.1.2. NEDOSTACI POSTOJEĆIH TEHNIČKIH RJEŠENJA OSIGURAVANJA NASIPA

Brtvljenje nasipa korištenjem gline kao vodonepropusnog, odnosno slabopropusnog materijala, najčešće sprječava relativno velika cijena. Glina, iako je materijal male granulacije, a samim time i smanjene vodopropusnosti, u kontaktu s vodom upija vodu i bubri. S obzirom da je uobičajeno glineni sloj postavljati na uzvodnom dijelu nasipa, tako je ona u izravnom kontaktu s vodom. Prilikom povlačenja velike vode, može doći do popuštanja gline, odnosno pucanja, smanjenja volumena, dodatnih slijeganja i sl. Te pojave treba imati na umu prilikom postavljanja glinenog sloja i iz tog razloga je predviđeno ugrađivanje u tankim slojevima, što zahtijeva korištenje mehanizacije.

Kao što je već spomenuto, osiguranje vrelna plohe od erozije uslijed hidrauličkog sloma je moguće raznim vrstama drenaža unutar tijela i u nožici nasipa. No, isto tako, put vode ispod nasipa moguće je produljiti različitim zahvatima, kao što su temeljni rov ili razni tipovi zavjesa koje uz današnje tehnologije pružaju niz mogućnosti. Kao novije rješenje može se navesti i korištenje čeličnih talpi (žmurja), koje se utiskuju u tlo i svojim nepropusnim materijalom stvaraju barijeru u tlu i produljuju put vode ispod nasipa. Međutim, ugradnja talpi može iziskivati velike financijske troškove, ali i upotrebu teške mehanizacije, što na nekim terenima nije moguće ostvariti. Upravo se iz tih, ali i mnogih drugih razloga, koji će biti spomenuti kasnije, kao alternativno rješenje može primijeniti ekspandirajuća poliuretanska smola.



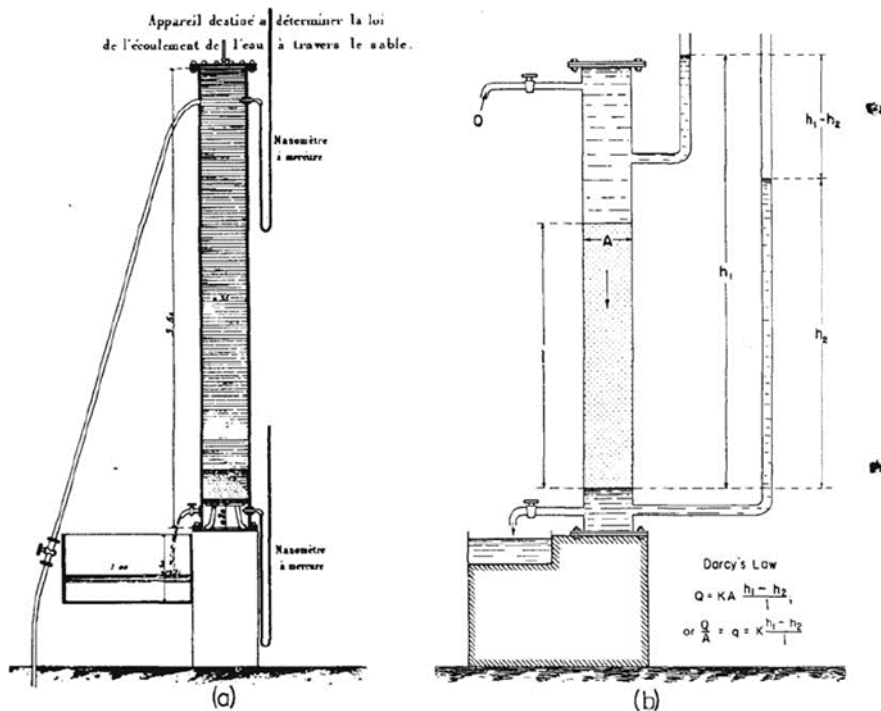
Slika 1.6. Metalne talpe kod nasipa u Račinovcima [5]

Međutim, i samo dreniranje ima svojih nedostataka, kao što su poskupljenje izvedbe nasipa, smanjenje duljine toka procjednih voda kod određenih načina dreniranja smanjenje, povećavanje gradijenta tlaka, odnosno brzina procjeđivanja i protoka procjednih voda, otežana obrana nasipa za vrijeme velikih voda (jer se gubi uvid u djelovanje procjednih voda).

## **1.2. DARCYJEV ZAKON**

### **1.2.1. DARCYJEV EMPIRIJSKI IZRAZ**

Henry Darcy, hidrotehničar iz Dijona, grada u južnom dijelu Francuske, ispitivao je protok vode kroz vertikalne, saturirane, homogene pješčane stupce, koji su služili kao filter za vodu gradskih fontana. Slika 1.7. prikazuje shemu originalnog eksperimenta korištenog u donošenju empirijskog zakona.



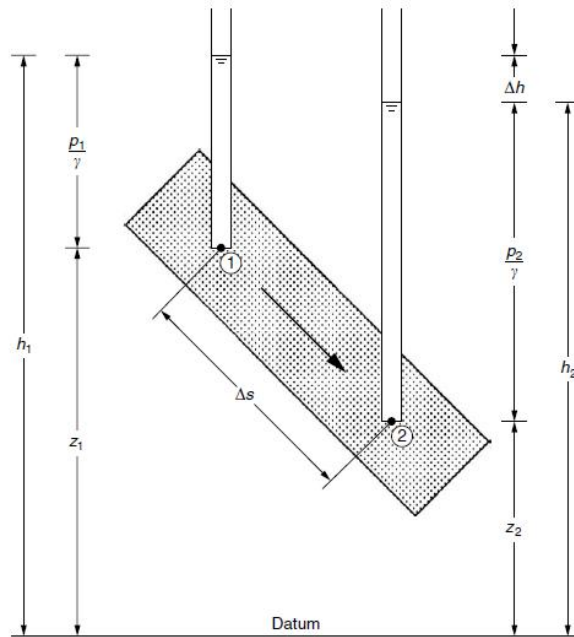
Slika 1.7. (a) Darcy-ev originalni eksperimentalni aparat sa živinim manometrom, (b) jednaki aparat sa vodom [6]

Eksperimentom Darcy zaključuje da je protok (promjena volumena vode u jedinici vremena),  $Q$ , kroz homogeni pješčani stupac konstantnog poprečnog presjeka:

- Proporcionalan površini poprečnog presjeka stupca,  $A$
- Proporcionalan razlici visina voda,  $h_1$  i  $h_2$ , na ulazu i izlazu stupca
- Obrnuto proporcionalan duljini stupca,  $\Delta s$

Uzevši u obzir spomenute zaključke, kao rezultat nastaje Darcyjeva formula (ili zakon):

|                              |       |
|------------------------------|-------|
| $Q = KA \frac{h_1 - h_2}{L}$ | (1.1) |
|------------------------------|-------|



Slika 1.8. Shematska ilustracija Darcyjevog eksperimenta [7]

, gdje je koeficijent proporcionalnosti,  $K$ , zvan koeficijent filtracije. Specifični protok,  $q$ , predstavlja volumen vode koji prođe kroz površinu poroznog dijela materijala poprečnog presjeka, po jedinici vremena:

|                   |       |
|-------------------|-------|
| $q = \frac{Q}{A}$ | (1.2) |
|-------------------|-------|

Izraz (1.2) se može prikazati u obliku:

|                                        |       |
|----------------------------------------|-------|
| $q = K \frac{h_{ulaz} - h_{izlaz}}{L}$ | (1.3) |
|----------------------------------------|-------|

Iako je Darcyjev zakon izveden iz eksperimenata na vertikalnim stupcima, njegova osnovna načela se mogu primijeniti na jednodimenzionalnim protocima kroz nagnuti stupac, koji je saturiran, homogen i poroznog medija, kao što je prikazano na Slici 1.8. Na Slici 1.8  $h_1$  i  $h_2$  predstavljaju piezometarsku visinu u dotičnim rezervoarima, definiranih kao:

|                                                   |       |
|---------------------------------------------------|-------|
| $h = z + \frac{p}{\rho g}, \quad \rho g = \gamma$ | (1.4) |
|---------------------------------------------------|-------|

, gdje je  $z$  geodetska visina od koje se mjeri piezometarska visina, odnosno visina od neke ishodišne razine,  $p$ ,  $\rho$  i  $\gamma$  su tlak fluida, gustoća, te je  $g$  gravitacijsko ubrzanje. Ukupna energija po jedinici težine fluida na mjestu unutar poroznog medija,  $h_{ukup}$ , često navedena kao tlačna visina, prikazana je kao:

|                                                   |       |
|---------------------------------------------------|-------|
| $h = z + \frac{p}{\rho g} + \beta \frac{V^2}{2g}$ | (1.5) |
| (a)   (b)   (c)                                   |       |

, gdje je  $V$  magnituda brzine fluida, a  $\beta$  koeficijent uprosječivanja. Prema tome, ukupna energija (po jedinici težine fluida) sačinjena je od tri dijela: [8]

- (a) **Potencijalna energija** po jedinici težine, zvana još i geodetska visina, odnosno visina u odnosu na neku vodoravnu ravninu;
- (b) **Tlačna energija** po jedinici težine, odnosno piezometarska ili tlačna visina,  $p/\rho g$ , kao posljedica tlaka u fluidu;
- (c) **Kinetička energija** po jedinici težine,  $\beta V^2/2g$ , povezana sa brzinom fluida (brzinska visina). U većini slučajeva protoka kroz porozni medij, brzinska visina je puno manja od tlačne visine, obzirom na vrlo malu brzinu fluida.

### 1.2.2. KOEFICIJENT FILTRACIJE

Koeficijent proporcionalnosti,  $K$ , koji se pojavljuje u Darcyjevom zakonu, naziva se još i koeficijentom filtracije poroznog materijala. Kod izotropnih poroznih materijala, ova jednačba se može koristiti za definiranje specifičnog protoka po jedinici hidrauličkog gradijenta. To je skalar koji izražava lakoću s kojom fluid prolazi kroz krivudavu putanju pora. Koeficijent filtracije ovisi o karakteristikama porozne sredine i fluida. Relevantne karakteristike fluida su gustoća,  $\rho$  i dinamička viskoznost,  $\mu$  (ili u kombinaciji sa kinematičkom viskoznosti,  $\nu (= \mu/\rho)$ ). Za vodu pri temperaturi od 15 [°C],  $\mu = 1.139 \times 10^{-6}$  [m<sup>2</sup>/s]. Odgovarajuće karakteristike porozne sredine su distribucija veličina zrna ili pora, oblik zrna ili pora, problematika prolaza, specifična površina i poroznost. U

saturiranom protoku hidraulički radijus pora ispunjenih fluidom je karakteristična duljina koja određuje koeficijent filtracije. Ovisno o poroznoj sredini u kombinaciji je uključen i koeficijent propusnosti. [8]

Koeficijent filtracije,  $K$ , se može prikazati kao:

|                                            |       |
|--------------------------------------------|-------|
| $K = k \frac{\rho g}{\mu} = \frac{k g}{v}$ | (1.6) |
|--------------------------------------------|-------|

, gdje je  $g$  gravitacijsko ubrzanje,  $\mu$  i  $v$  su dinamička i kinematička viskoznost fluida, a  $k$  propusnost ili čista propusnost poroznog medija. To je koeficijent koji ovisi isključivo o karakteristikama konfiguracije prostora pora.

Propusnost,  $k$ , je mjerena u  $[\text{cm}^2]$  ili  $[\text{m}^2]$ . Naftni inženjeri koriste mjernu jedinicu *darcy*, definiranu kao  $1 [\text{darcy}] = 9.87 \times 10^{-9} [\text{cm}^2]$ . Prema SI sustavu mjerna jedinica za koeficijent filtracije je  $[\text{m/s}]$ .

### 1.2.3. GRANICE VAŽENJA DARCYJEVOG ZAKONA FILTRACIJE

Darcyjev zakon podrazumijeva da je režim tečenja laminaran, generalno vezan za slučaj poroznog medija. Granica važenja može biti iskazana preko Reynoldsovog broja,  $Re$ :

|                         |       |
|-------------------------|-------|
| $Re = \frac{\rho D}{v}$ | (1.7) |
|-------------------------|-------|

U poroznoj sredini kritična vrijednost Reynoldsovog broja  $Re$  je reda veličine 1 do 10, što ovisi od oblika zrna i poroznosti. Ova se razlika javlja uslijed toga što je oblik zrna i šupljina vrlo nepravilan pa kod filtracije dolazi do ranijeg prelaska iz laminarnog u turbulentni režim, tj. do pojave turbulencije. Darcyjev zakon vrijedi u slučajevima kada je  $Re < 10$  [9].

Tablica 1.1. Gustoća ( $\rho$ ), dinamička ( $\mu$ ) i kinematička ( $\nu$ ) viskoznost kao funkcija temperature [10]

| Temperatura,<br>T [°C] | Gustoća, $\rho$<br>[kg/cm <sup>3</sup> ] | Viskoznost, $\mu$<br>[10 <sup>6</sup> Ns/m <sup>2</sup> ] | Kinematski koef.<br>viskoznosti, $\nu$ [10 <sup>6</sup> m <sup>2</sup> /s] |
|------------------------|------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| 0                      | 999.8                                    | 1.781                                                     | 1.785                                                                      |
| 5                      | 1000.0                                   | 7.518                                                     | 1.519                                                                      |
| 10                     | 999.7                                    | 1.307                                                     | 1.306                                                                      |
| 15                     | 999.1                                    | 1.139                                                     | 1.139                                                                      |
| 20                     | 998.2                                    | 1.002                                                     | 1.003                                                                      |
| 25                     | 997.0                                    | 0.890                                                     | 0.893                                                                      |
| 30                     | 995.2                                    | 0.798                                                     | 0.800                                                                      |
| 40                     | 992.2                                    | 0.653                                                     | 0.658                                                                      |
| 50                     | 988.0                                    | 0.547                                                     | 0.553                                                                      |
| 60                     | 983.2                                    | 0.466                                                     | 0.474                                                                      |
| 70                     | 977.8                                    | 0.404                                                     | 0.413                                                                      |
| 80                     | 971.8                                    | 0.354                                                     | 0.364                                                                      |
| 90                     | 965.3                                    | 0.315                                                     | 0.326                                                                      |
| 100                    | 958.4                                    | 0.282                                                     | 0.294                                                                      |

Prema navedenoj tablici,  $q$  je brzina,  $\nu$  kinematička viskoznost, definirana kao pripadajuća dinamička viskoznost  $\mu$  podijeljena sa gustoćom  $\rho$  i reprezentativnom duljinom  $D$ . Za tok vode u poroznom mediju,  $q$  je uzet kao specifični protok, a reprezentativna duljina,  $D$ , često je uzimana kao veličina pora ili efektivni promjer zrna,  $d_{10}^1$ . Reynoldsov broj pokazuje odnos inercijskih sila u odnosu na viskozne sile. To ovisi o viskoznosti, koja varira u odnosu na temperaturu kao što je prikazano u Tablici 1.1. Kao rezultat, Reynoldsov broj također ovisi o temperaturi. Isto tako, koeficijent filtracije ovisi o temperaturi kroz  $\mu$ . [6]

Darcy-ev zakon se primjenjuje kod izotropnih medija, gdje je koeficijent filtracije ovisan o smjeru tečenja. Isto tako, primjenjuje se kod tečenja gdje se smjer filtracije slaže sa smjerom hidrauličkog gradijenta. U anizotropnim medijima, koeficijent filtracije ovisi o smjeru veličina. Tada koeficijent filtracije poprima vrijednost tenzora, te se za trodimenzionalnu anizotropnu sredinu vrijednost naziva tenzorom filtracije. [9]

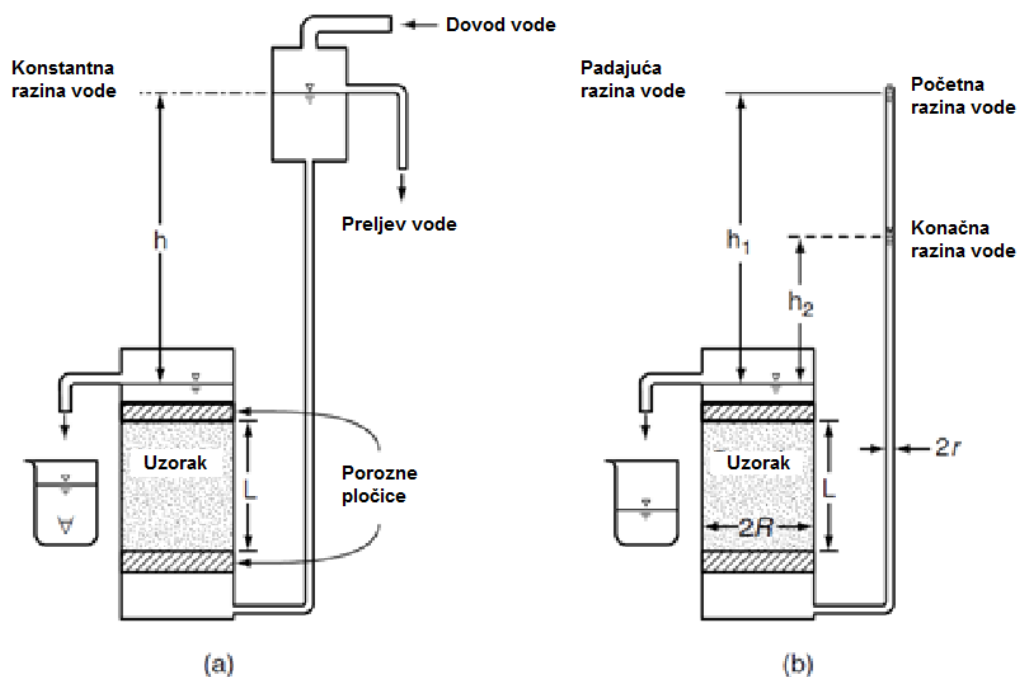
<sup>1</sup> Promjer otvora sita kroz koji prođe 10 % ukupne mase uzorka, tj. promjer 10 %-tnog zrna.



$$K = \begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xy} & k_{xz} \\ k_{yx} & k_{yy} & k_{yz} \\ k_{zx} & k_{zy} & k_{zz} \end{bmatrix} \quad (1.8)$$

#### 1.2.4. PRIJEDLOG LABORATORIJSKOG MJERENJA KOEFICIJENTA FILTRACIJE

Uzorci tla kojima se mjeri vodopropusnost moraju biti napravljeni i poslani u laboratorij u neoštećenom stanju. To je generalno moguće za konsolidirane materijale, no u pravilu nemoguće za nekonsolidirane materijale i rijetko izvedivo za vodonosnike sa pukotinskom poroznošću. Uzorak mora biti reprezentativan u odnosu na vodonosnik.



Slika 1.9. Metode mjerenja: (a) Konstantna razina vode i (b) padajuća razina vode

Postoje dvije metode mjerenja koeficijenta filtracije: metoda konstantne razine vode (eng. *Constant head test*), koja se koristi za materijale koji nisu kohezivni, kao što su pijesak i šljunak, te metoda padajuće razine vode (eng. *Falling head test*), koja

se koristi za materijale manjeg koeficijenta filtracije. Kod metode konstantne razine vode, formula za koeficijent filtracije dobiven iz Darcyjevog zakona glasi:

|                             |       |
|-----------------------------|-------|
| $K = \frac{\forall L}{Ath}$ | (1.9) |
|-----------------------------|-------|

, gdje je  $\forall$  volumen vode sakupljene u vremenu  $t$ ,  $A$  i  $L$  su površina poprečnog presjeka i duljina uzorka, dok je  $h$  konstantna razina vode. Kod metode padajuće razine vode, formula za koeficijent filtracije glasi:

|                                               |        |
|-----------------------------------------------|--------|
| $K = \frac{r^2 L}{R^2 t} \ln \frac{h_1}{h_2}$ | (1.10) |
|-----------------------------------------------|--------|

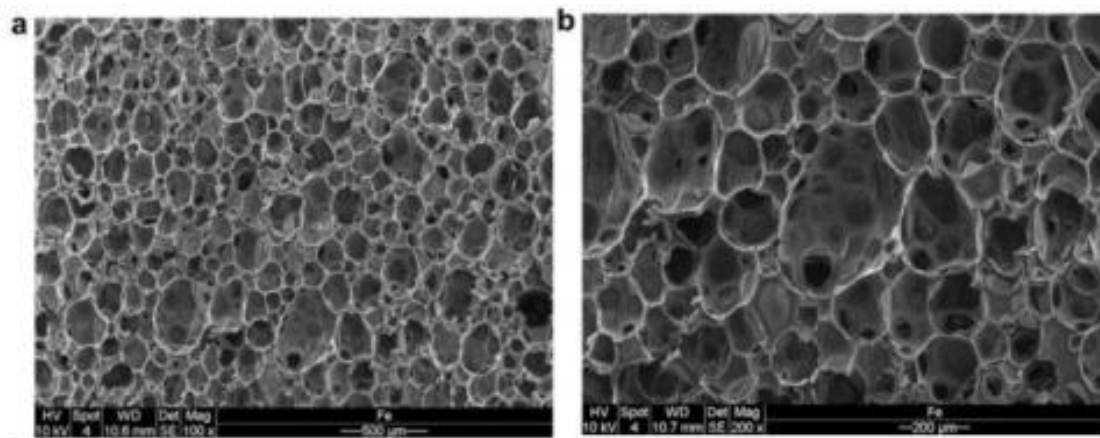
, gdje su  $R$  i  $r$  radijusi uzorka i cijevi,  $L$  predstavlja duljinu uzorka, dok  $h_1$  i  $h_2$  prikazuju razinu vode na početku i kasnije u trenutku  $t$ . (Slika 1.9.)

### 1.3. EKSPANDIRAJUĆA POLIURETANSKA SMOLA

#### 1.3.1. FIZIČKA I MEHANIČKA SVOJSTVA EKSPANDIRAJUĆE SMOLE

Poliuretani pripadaju velikoj skupini polimera koji se mogu okarakterizirati raznim fizikalnim svojstvima poput sposobnosti širenja tj. ekspandiranja. Pjenaste poliuretanske smole su produkti egzotermičke reakcije između poliola i izocijanata pomiješanih u stabilnim volumnim omjerima, sukladno željenim karakteristikama proizvoda. Tijekom reakcije nastaje velika količina ugljičnog dioksida, koja određuje volumen smjese formiranjem spužvaste strukture u kojoj ostaju interpolirani mjehuri plina. Za proizvodnju ugljičnog dioksida je neophodna prisutnost vode koja reagira s izocijanatnom skupinom; u odsutnosti vode koristi se tvar u tekućem obliku, kemijski inertna, s niskom temperaturom vrenja, koja isparava pomoću topline nastale polimerizacijom. U vrlo kratkom vremenskom periodu (od nekoliko sekundi do nekoliko minuta), smjesa se stvrdne, odnosno prijeđe iz tekućeg u kruto stanje. Vrijeme reakcije, koje ovisi o upotrijebljenoj smoli i vrsti katalizatora, je pod utjecajem temperature komponenata smjese. Stoga je kontrolirajući temperaturu komponenata moguće usporiti ili ubrzati reakciju.

Tlak koji se stvara tijekom bujanja i konačna gustoća smole ovisi o sposobnosti mješavine da zadrži mjehuriće zraka u svojoj strukturi prije otvrdnjavanja. Pjenasta struktura „zatvorenih ćelija“ je prikazana na Slici 1.10. na kojoj su prikazane fotografije napravljene pomoću elektronskog mikroskopa. [11] Na slikama se vidi mikroskopska struktura ekspandirajuće smole u terenskim geotehničkim uvjetima slobodnog bujanja, koja odgovara gustoći od 37 [kg/m<sup>3</sup>] (usporedbe radi, gustoća vode je 1000 [kg/m<sup>3</sup>]). [12] U ovim uvjetima je volumen ekspandirane smole 30 puta veći od početnog volumena mješavine. [12], [13], [14]



Slika 1.10. Fotografije napravljene elektronskim mikroskopom. Poliuretanska ekspandirajuća smola u uvjetima slobodnog širenja, gustoće 37 [kg/m<sup>3</sup>]; (a) Povećanje x100; (b) Povećanje x200 [11]

Gustoća mješavine u tekućem stanju iznosi 1070 [kg/m<sup>3</sup>], vrlo slično gustoći vode. Međutim, pjenastu strukturu smole u čvrstom stanju karakterizira znatno niža gustoća, ovisno o tlaku bujanja.

Odnos između tlaka bujanja i gustoće ispitivan je u edometarskim uvjetima koristeći posebnu opremu za ugradnju/injektiranje tekuće mješavine u kruti metalni prsten s pomičnim klipom. Odmah nakon injektiranja smola počinje bujati. Kako je ugrađena u kruti čelični prsten, širi se samo u vertikalnom smjeru. Bujajuća smola gura klip koji se nakon pomaka od nekoliko centimetara blokira pomoću mjerača tlaka. Tlak bujanja je određen kao tlak koji je potreban da se spriječi izdizanje klipa. Odnos tlaka bujanja i gustoće smole, tj. rezultat provedenih ispitivanja, prikazan je na Slici 1.12.



Slika 1.11. Prikaz injektiranja tekuće mješavine



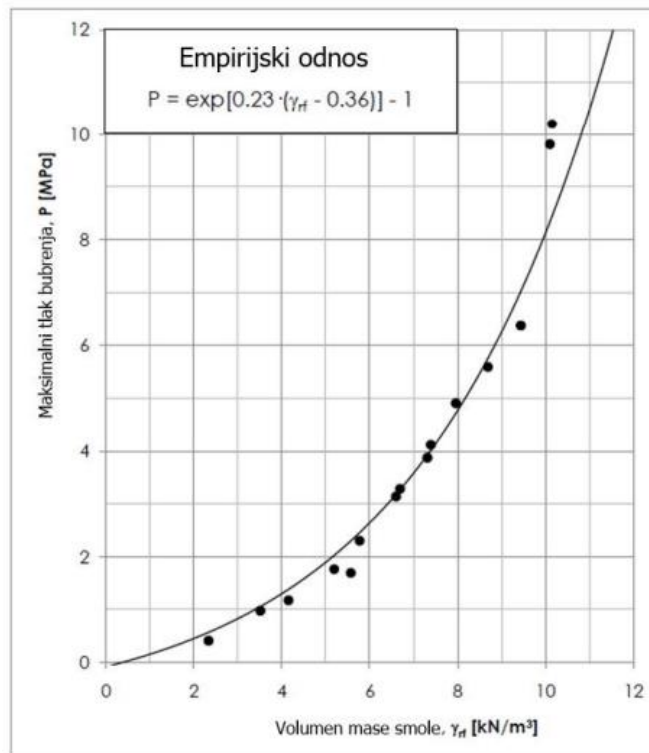
Slika 1.12. Prikaz uzorka 250 [ml] ekspandirajuće smole pri slobodnom širenju

Iz eksperimentalnih rezultata određen je sljedeći empirijski izraz:

$$P = \exp[0.23 \cdot (\gamma_{rf} - 0.36)] - 1 \quad (1.11)$$

, gdje je  $P$  tlak bujanja određen u edometarskim uvjetima [MPa], a  $\gamma_{rf}$  zapreminska težina ekspanzirane smole [kN/m<sup>3</sup>].

U provedenim ispitivanjima je izmjeren tlak bujanja,  $P$  od 0.4 do 10 000 [MPa], a zapreminska težina u rasponu  $\gamma_{rf} = 2.00 - 10.00$  [kN/m<sup>3</sup>]. Nadalje, pokazano je da je za uvjete slobodnog bujanja smole, tj. uvjeta  $P = 0$ ,  $\gamma_{rf} = 33$  [kg/m<sup>3</sup>] ·  $g = 0.36$  [kN/m<sup>3</sup>], gdje je:  $g = 9.81$  [m/s<sup>2</sup>] [11]. Empirijski izraz (1.11) je određen minimiziranjem pogreške prilikom procjene podataka i usvajanjem  $\gamma_{rf} = 0.36$  [kN/m<sup>3</sup>] za tlak  $P = 0$ . [15] Na temelju rezultata ispitivanja se zaključuje da se bujanjem, tj. povećanjem volumena smole smanjuje tlak. Ovo svojstvo je od velike važnosti za primjenu poliuretana u injektiranju tla, gdje otpor tla sprječava slobodno širenje. Iz jednadžbe (1.11) se može odrediti odnos volumena smole nakon ekspanzije ( $V_{rf}$  - konačan volumen smole) i početnog volumena mješavine injektirane u tlo u tekućem stanju ( $V_{ri}$  - inicijalni volumen smole).



Slika 1.13. Tlak bujanja ekspandirajuće smole u ovisnosti o zapremskoj težini (određeno pokusima, [15])

### 1.3.2. HIDRAULIČKA I MEHANIČKA SVOJSTVA POLIURETANSKE SMOLE

Poliuretanska smola, kao rezultat procesa bujanja i očvršćivanja, postiže vrlo dobra mehanička svojstva (kao npr. krutost i čvrstoću) u ovisnosti o konačnoj specifičnoj zapreminskoj težini  $\gamma_{ff}$ .

Za ekspandirajuće smole su eksperimentalno određeni ([14], [15], [16]):

1. Youngov modul elastičnosti (E), za deformaciju od 1% (Slika 1.13.)<sup>2</sup>
2. Jednoosna tlačna čvrstoća ( $\sigma_c$ ), prikazana na Slici 1.14.

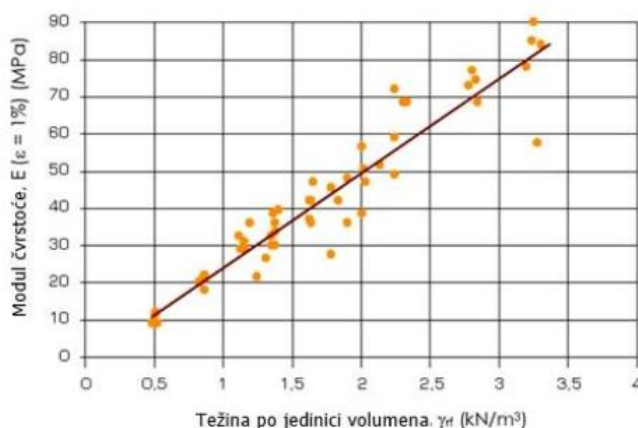
Oba parametra su procijenjena u ovisnosti o konačnoj specifičnoj težini, u rasponu vrijednosti 0.5 - 3.5 [kN/m<sup>3</sup>].

Eksperimentalno su određene vrijednosti modula elastičnosti između 10 i 80 [MPa], koje su usporedive s karakterističnim modulima pogušćenog tla.

Izmjerene tlačne čvrstoće su znatno povećane (0.25 - 6.50 [MPa]). Iz ovih vrijednosti možemo dobiti posmičnu čvrstoću, uzimajući u obzir isključivo kohezivnost smole, kao:

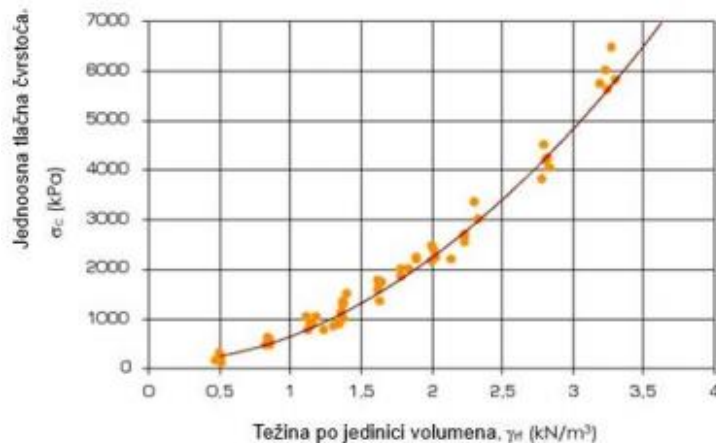
|                               |        |
|-------------------------------|--------|
| $\tau_f = \frac{\sigma_c}{2}$ | (1.12) |
|-------------------------------|--------|

Proizlazi da posmična čvrstoća varira između 0.125 - 3.25 [MPa], ovisno o konačnoj gustoći ili stupnju bujanja smole.



Slika 1.14. Modul elastičnosti kao funkcija konačne zapreminske težine ekspandirajuće smole [15]

<sup>2</sup> Važno je napomenuti da se kod jednoosne kompresije Youngov modul elastičnosti može smatrati mjerom za krutost materijala



Slika 1.15. Jednoosna tlačna čvrstoća kao funkcija konačne zapreminske težine ekspandirajuće smole [15]

Provedeni su testovi apsorpcije vode ekspandirajuće smole, koji pokazuju varijacije specifične zapreminske težine između 2 i 3 %, pri sobnoj temperaturi od 23 [°C]. [17]

Glavne varijacije su zabilježene na temperaturama između 75 i 85 [°C], kojima se simulirao efekt dugoročne degradacije. U ovim slučajevima je varijacija specifične zapreminske težine dosegala 50 %. Treba naglasiti da su se ove promjene odvijale u umjetnim (laboratorijskim) uvjetima, koji se razlikuju od onih koji se mogu očekivati u tlu.

Također, provedeni su pokusi hidrauličke propusnosti na ekspandirajućoj smoli, kao i na uzorcima tla koji su bili tretirani smolom. [13] Za minimalnu gustoću (0.36 [kN/m³]), tj. maksimalno bujanje, izmjerene su vrijednosti koeficijenta filtracije između  $1 \cdot 10^{-9}$  i  $1 \cdot 10^{-8}$  [m/s] na uzorku čiste smole, što ukazuju na pojavu reducirane poroznosti.

Na osnovi ovih rezultata može se zaključiti da je smola gotovo u potpunosti građena od zatvorenih, vodonepropusnih pora. Niska vodopropusnost, izmjerena na uzorcima tla koji su tretirani smolom, je posljedica pojave slučajnih mikro-defekata. U prirodnim uvjetima, kod kojih dolazi do potapanja vodom, specifična zapreminska težina smole ne varira, osim kao rezultat umjetno nametnutog procesa razgradnje.

Može se zaključiti da su smole iznimno vodootporne i nepropusne.

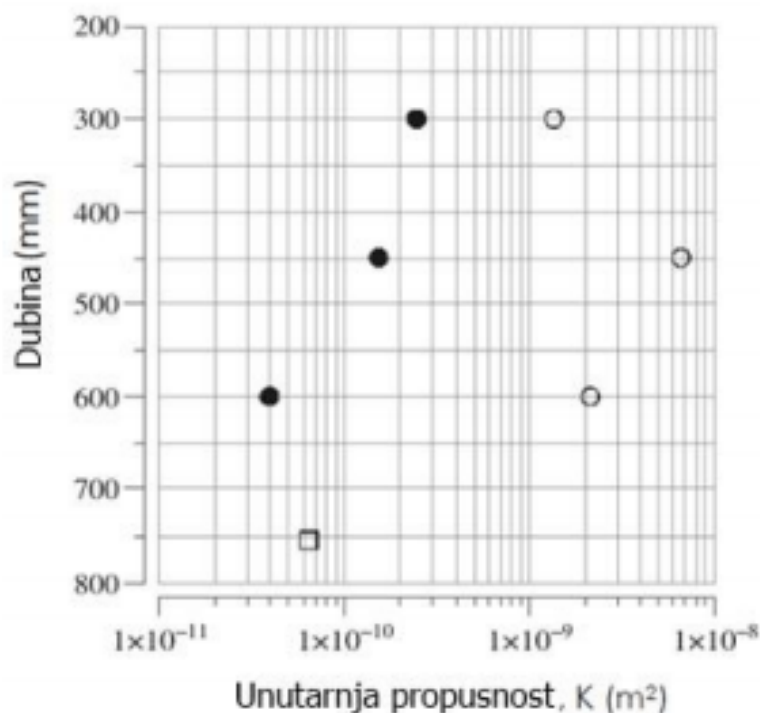
### 1.3.3. SMANJENJE PROPUSNOSTI TLA

Ekspandirajuća poliuretanska smola je građena od gotovo zatvorenih pora, što sugerira da je gotovo nepropusna na vodu. Injekcije pjenaste poliuretanske smole se mogu koristiti za istiskivanje vode iz tla, te samim time smanjiti hidrauličku propusnost tretiranog medija.

Prema rezultatima eksperimenta provedenog na pukotinama u glini, ekspandirajuća smola može prodrijeti u pukotine debljine 0.1 [mm], a kontakt gline i smole dostiže debljinu između 1 i 3 [mm]. [11]

Prodiranje smole u mikropore gline uzrokuje smanjenje propusnosti koje primarno ovisi o stanju pukotina (broj, duljina i otvorenost pukotina).

Također, uočeno je da injektiranje tla ekspandirajućom injekcijskom smjesom može smanjiti makro propusnost za do 50 puta (Slika 1.15.). [11] Također je pokazano da je propusnost gline s pukotinama, bez injektiranja smolom, veća 30 - 100 puta od propusnosti gline bez pukotina.



Slika 1.16. Propusnost je procijenjena preko testa propusnosti zraka. Otvoreni krugovi prezentiraju netretirano tlo, dok puni krugovi prezentiraju propusnost tla bez pukotina. Dubina pukotine: 700 [mm]; dubina injektiranja: 750 [mm] [13]



Injektiranje ekspandirajućim smolama je koristan alat za smanjenje vodopropusnosti i popunjavanje pukotina u tlima koja su podložna fenomenu isušivanja i rehidriranja.

Ispitivanjima je pokazano da porast gustoće ispucanih tala, uslijed ekspanzije smole u pukotine, smanjuje rizik od značajnih promjena budućeg volumena. Također, zamjenjujući vodu u tlu sa smolom dramatično smanjujemo potencijalni rizik od sloma koji je povezan s budućim smanjenjem prirodnog sadržaja vode. [18]

Tretman tla ekspandirajućom smolom uzrokuje smanjenje stišljivosti tla i saturaciju pora tla s posljedičnim porastom prirodnog sadržaja vode u tlu. Ovi efekti odgovaraju onima nakon perioda velike suše. Rezultat je znatno smanjenje vjerojatnosti potencijalnog skupljanja tla u slučaju nove suše.

U slučaju konsolidiranja temeljnog tla, injektiranje dozvoljava popunjavanje šupljina direktno ispod temelja i omogućava vodopropusnost kontakta.

Tretman tla s ekspandirajućom smolom stoga inducira:

- smanjenje propusnosti za do 50 puta, čime se regulira relacija „isušivanje – hidratizacija“ i „skupljanje – bubrenje“ glina
- povećanje gustoće tla i smanjenje prirodnog sadržaja vode, smanjujući tako rizik od budućih isušivanja
- znatnu redukciju potencijala pojave isušivanje/rehidracija te skupljanje/bubrenje

Ekspandirajuće injekcijske smole mogu biti posebno efikasne za relaksaciju jako stišljivih slojeva tla koji se nalaze ispod sloja koje ima veću težinu te djeluje na donje kao svojevrsan uteg.

Na primjeru stratigrafije sa Slike 1.16. se može uočiti prisutnost tla koje se sastoji od prahovitog pijeska, koji prekriva sloj jako stišljive, normalno konsolidirane gline, podložne puzanju. Razina podzemne vode je u sloju pijeska. Gline su izložene znatnom slijeganju od opterećenja koje se prenosi sa sloja pijeska.



Slika 1.17. Uslojenost tla

Ekspandirajuća smola se može koristiti kako bi se postiglo smanjenje opterećenja koje se prenosi na glinu i posljedično smanjiti progresivni slom tla.

Zbog karakteristike da im je zapreminska težina manja od vode, injektiranje poliuretanske smjese može olakšati pjeskoviti sloj, smanjujući tako opterećenje na sloj gline. Injekcijska smjesa se uvodi u tlo putem difuzije, širi se u pukotine, prodire subvertikalno u pore tla oko pukotina i istiskuje vodu.

Tretman dozvoljava:

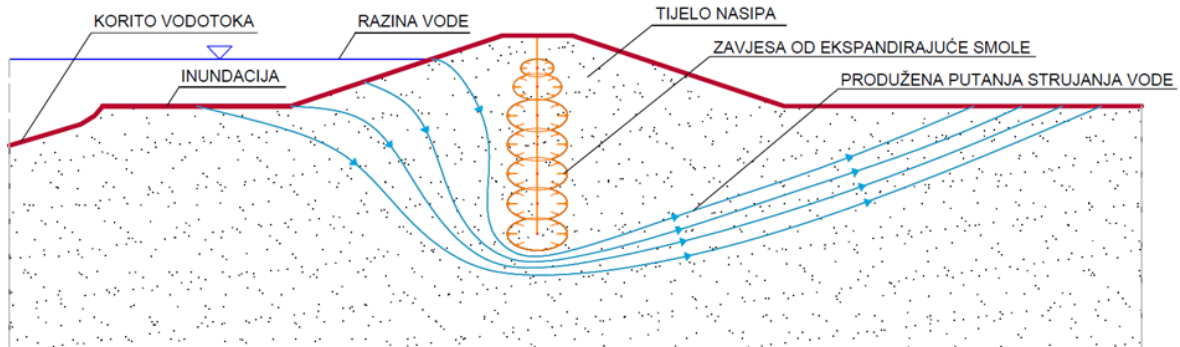
- Zamjenu vode iz pijeska, koju karakterizira zapreminska težina  $\gamma_w = 10$  [kN/m<sup>3</sup>], dok poliuretanska smola ima vrijednosti  $\gamma_{ff} = 1.2-1.5$  [kN/m<sup>3</sup>].
- Zamjenu tla (krutina i voda), što rezultira znatnim smanjenjem ukupne težine koja djeluje na temeljni sloj gline.

#### 1.4. PRIMJENA EKSPANDIRAJUĆE POLIURETANSKE SMOLE

Sprječavanje hidrauličkog sloma tla hidrotehničkih nasipa korištenjem ekspandirajuće poliuretanske smole provodi se metodom izvođenja injekcijske zavjese (opisane u Poglavlju 1.1.1). U tijelo nasipa ugrađuje se ekspandirajuća smola u

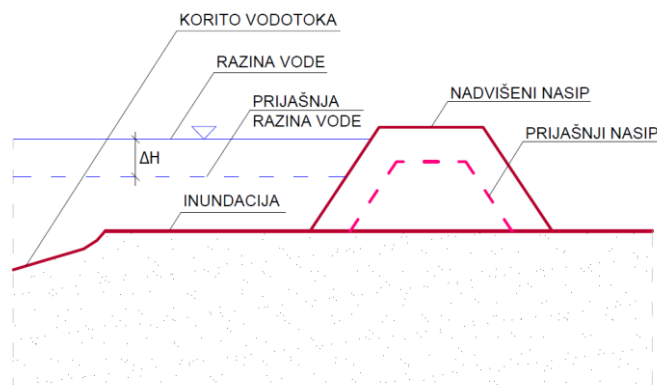
različitim razinama, krenuvši od dna prema vrhu. Slobodnim širenjem ekspandirajuće smole u svim smjerovima popunjavaju se pore u tlu, formirajući vertikalnu zavjesu.

Prednost ove tehnologije spram konvencionalnih je izbjegavanje teške mehanizacije, smanjen obim radova, gotovo trenutno stvrdnjavanje te minimalan utjecaj na okoliš. Na Slici 1.18. prikazana je shema izvedbe injekcijske zavjese korištenjem ekspandirajuće poliuretanske smole.



Slika 1.18. Shema izvedbe injekcijske zavjese korištenjem ekspandirajuće poliuretanske smole

Izvedba injekcijske zavjese od ekspandirajuće smole potrebna je prilikom svakog nadvišenja postojećih nasipa. Nadvišenjem nasipa, uslijed povećanja razine vode, dolazi do povećanja hidrauličkog gradijenta, a time i do povećanja rizika od hidrauličkog sloma tla. Stoga se prilikom svakog budućeg zahvata nadvišenja nasipa preporučuje izvedba injekcijske zavjese (od ekspandirajuće poliuretanske smole).



Slika 1.19. Shematski prikaz nadvišenja nasipa

## **2. CILJ RADA I HIPOTEZA**

### **2.1. Hipoteza**

Osnovna hipoteza rada je da je moguće primijeniti poliuretansku ekspandirajuću smolu, kao novu, alternativnu tehnologiju za sanaciju i/ili poboljšanje svojstava nasipa.

### **2.2. Cilj rada**

Glavni cilj ovog rada bio je istražiti svojstva ekspandirajuće poliuretanske smole u pojedinim materijalima tla, sa svrhom smanjenja njihove vodopropusnosti. Da bi se to postiglo, bitno je definirati fizikalni model koji bi omogućio samo ispitivanje. Usporedbom uzoraka prije i nakon ugrađivanja ekspandirajuće smole želi se potvrditi njena učinkovitost u smanjenju vodopropusnosti primjenom Darcyjevog zakona.

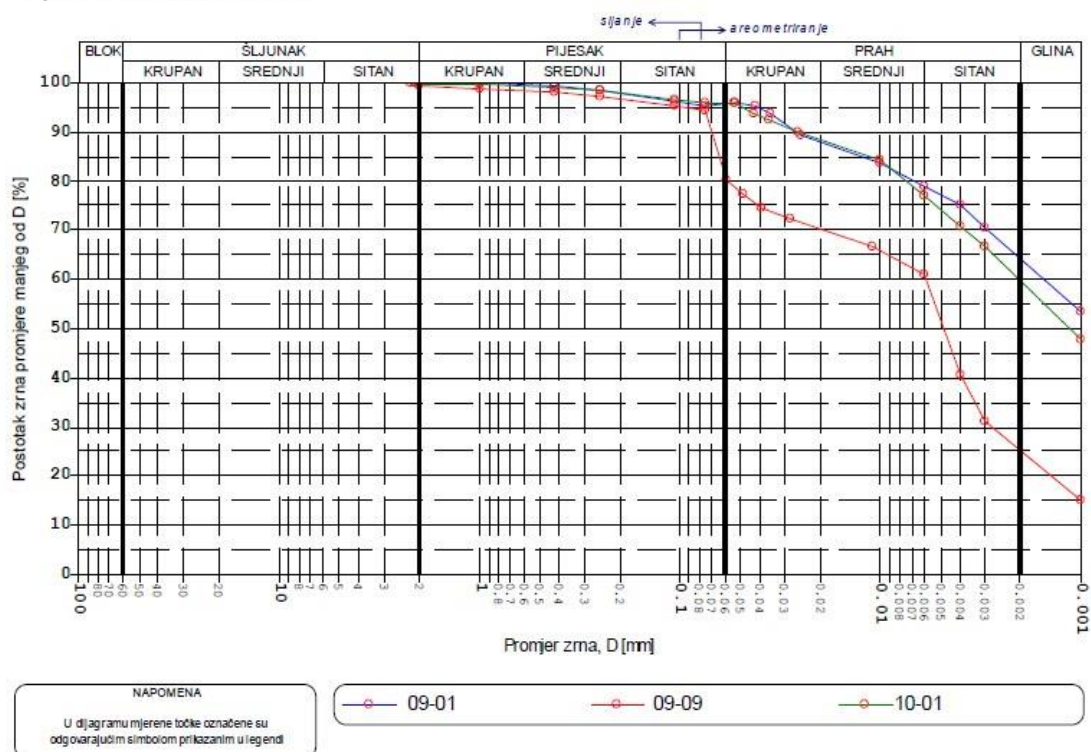
### **3. MATERIJALI I METODE ISPITIVANJA EKSPANDIRAJUĆE POLIURETANSKE SMOLE**

#### **3.1. MATERIJALI KORIŠTENI PRI ISPITIVANJU**

Za ispitivanje smanjenja vodopropusnosti injektiranjem ekspandirajuće poliuretanske smole u uzorke s pojedinim materijalom tla korišten je vertikalni model koji se sastoji od samog uzorka s materijalom tla i vertikalne PVC cijevi koja predstavljala vodeni stupac (model je detaljno opisan u sljedećem poglavlju). Uzorak se sastoji se od PVC cijevi u koju je ugrađen materijal s cjevčicom za injektiranje ekspandirajuće smole. U tu svrhu korišteni su sljedeći materijali:

- Šljunak
- Pijesak
- Uzorci mješavine šljunka i pijeska s područja savskih nasipa (Sava – Odra)
- Ekspandirajuća smola

U modelu za ispitivanje vodopropusnosti korištene su tri različite vrste mješavine pijeska i šljunka, čiji su uzorci dobiveni s područja savskog nasipa (Sava – Odra). Time je omogućeno ispitivanje upravo za tla u okolini izgrađenih nasipa, u kojima se javlja potreba za smanjenjem vodopropusnosti, a gdje bi spomenuta tehnologija s ekspandirajućom smolom mogla naći svoju primjenu. Granulometrijski sastav za sve tri vrste mješavine prikazan je granulometrijskom krivuljom na Slikama 3.1, 3.2, 3.3.



Slika 3.1. Granulometrijska krivulja dobivena postupkom areometriranja

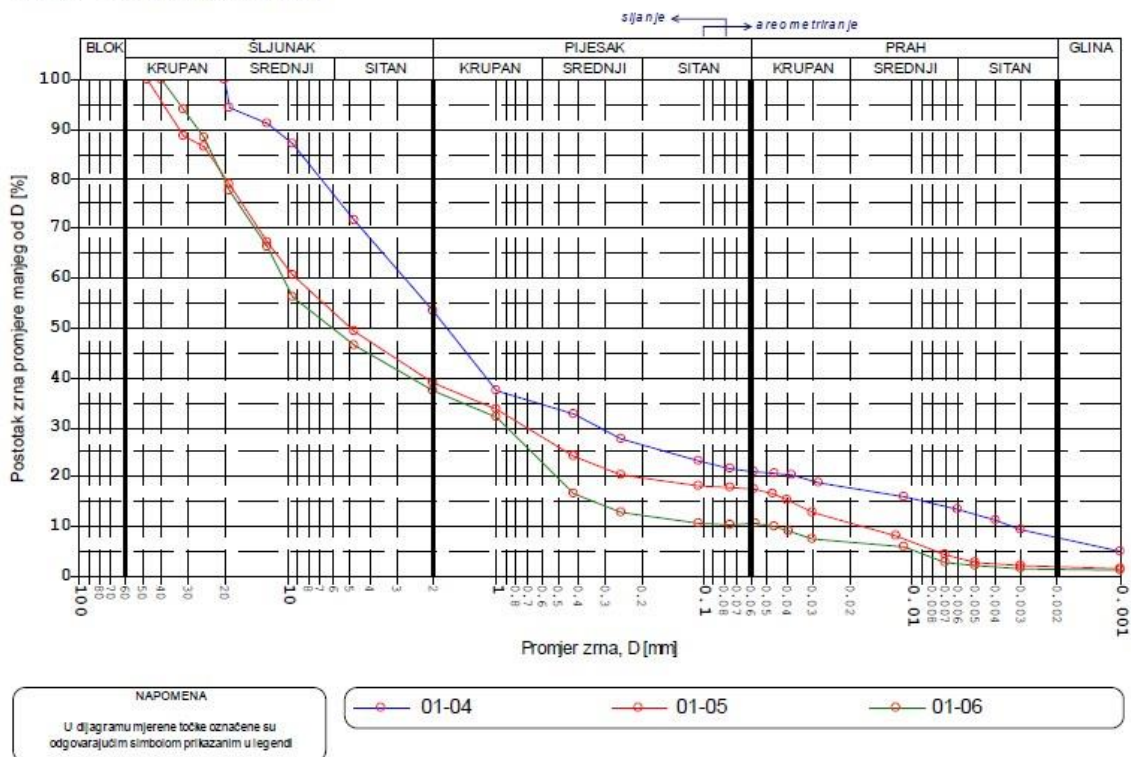
Postupkom areometriranja dobiveni su sljedeći podaci prikazani na Tablicama 3.1 i 3.2.

Tablica 3.1. Udio pojedine granulacije materijala u uzorku

| Naziv    | D <sub>60</sub> | D <sub>30</sub> | D <sub>10</sub> | C <sub>c</sub> | C <sub>u</sub> | G (%) | S (%) | M (%) | C (%) |
|----------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|----------------|-------|-------|-------|-------|
| Uzorak 1 | 0.002           | -               | -               | -              | -              | 0.1   | 4.2   | 33.8  | 62    |
| Uzorak 2 | 0.006           | 0.003           | -               | -              | -              | 0.7   | 18.3  | 57.8  | 23.2  |
| Uzorak 3 | 0.002           | -               | -               | -              | -              | 0.2   | 4     | 38.6  | 57.3  |

Tablica 3.2. Karakteristike zrna materijala u uzorku

| Naziv    | Dubina/kota | D <sub>max</sub> | Oblik zrna | Tvrdoća zrna     | G <sub>s</sub> | Uređaj za dispaciju | Trajanje disp.(min) |
|----------|-------------|------------------|------------|------------------|----------------|---------------------|---------------------|
|          | (m)         | (m)              |            |                  |                |                     |                     |
| Uzorak 1 | 0.80 - 0.90 | 2.1              | oštro      | tvrd i postojano | 2.8            | mješalica           | 15                  |
| Uzorak 2 | 7.00 - 7.10 | 2.2              | oštro      | mekano           | 2.7            | mješalica           | 15                  |
| Uzorak 3 | 1.50 - 1.60 | 2.1              | oštro      | tvrd i postojano | 2.7            | mješalica           | 15                  |



Slika 3.2. Granulometrijska krivulja dobivena kombiniranim postupkom

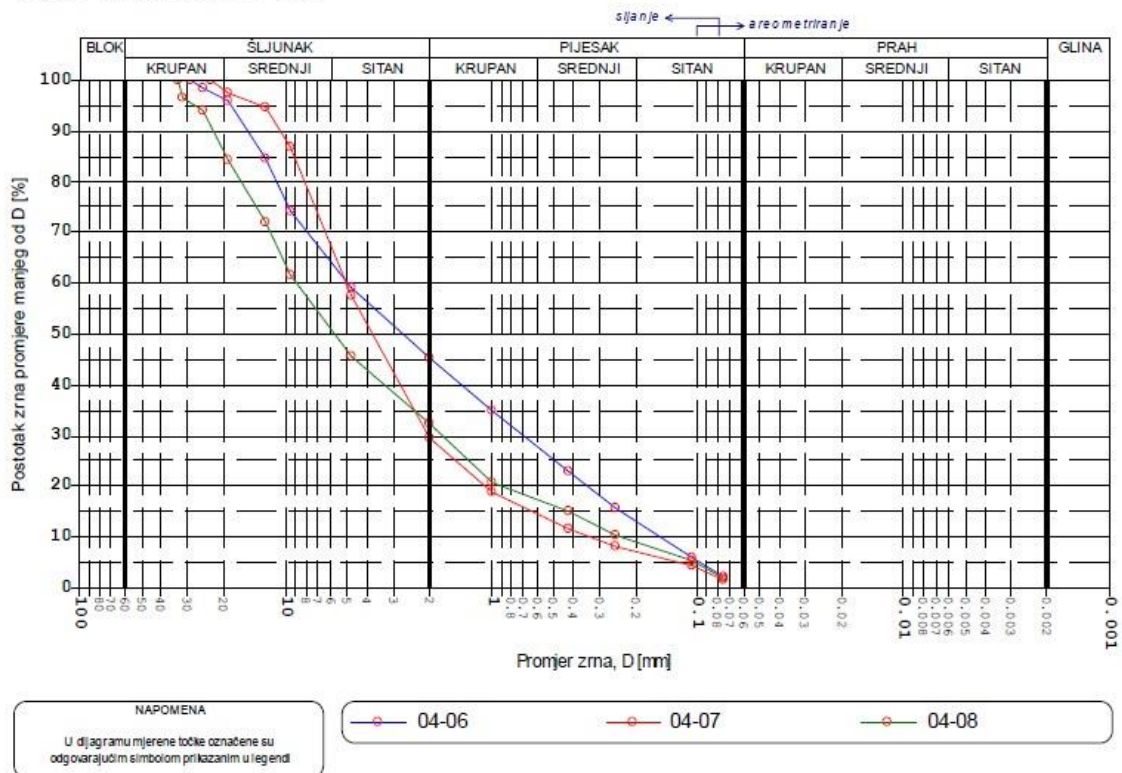
Postupkom kombiniranog ispitivanja dobiveni su sljedeći podaci:

Tablica 3.3. Udio pojedine granulacije materijala u uzorku

| Naziv    | D <sub>60</sub> | D <sub>30</sub> | D <sub>10</sub> | C <sub>c</sub> | C <sub>u</sub> | G (%) | S (%) | M (%) | C (%) |
|----------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|----------------|-------|-------|-------|-------|
| Uzorak 1 | 2.718           | 0.317           | 0               | 819.012        | 11             | 46.5  | 32.2  | 14.1  | 7.2   |
| Uzorak 2 | 9.136           | 0.718           | 0.02            | 541.653        | 3.3            | 60.9  | 21.4  | 15.8  | 1.9   |
| Uzorak 3 | 10.52           | 0.898           | 0.05            | 235.233        | 1.7            | 62.5  | 26.9  | 9.3   | 1.3   |

Tablica 3.4. Karakteristike zrna materijala u uzorku

| Naziv    | Dubina/kota | D <sub>max</sub> | Oblik zrna | Tvrdća zrna       | G <sub>s</sub> | Uređaj za dispaciju | Trajanje disp.(min) |
|----------|-------------|------------------|------------|-------------------|----------------|---------------------|---------------------|
|          | (m)         |                  |            |                   |                |                     |                     |
| Uzorak 1 | 2.30 - 2.40 | 20               | oštro      | tvrdi i postojano | 2.78           | nepoznato           | 0                   |
| Uzorak 2 | 3.70 – 3.80 | 47               | oštro      | tvrdi i postojano | 2.79           | nepoznato           | 10                  |
| Uzorak 3 | 4.00 – 4.20 | 40               | oštro      | tvrdi i postojano | 2.78           | nepoznato           | 0                   |



Slika 3.3. Granulometrijska krivulja dobivena kombiniranim postupkom

Postupkom sisanja dobiveni su sljedeći podaci:

Tablica 3.5. Udio pojedine granulacije materijala u uzorku

| Naziv    | D <sub>60</sub> | D <sub>30</sub> | D <sub>10</sub> | C <sub>u</sub> | C <sub>c</sub> | G (%) | S (%) | M (%)             | C (%) |
|----------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|----------------|-------|-------|-------------------|-------|
| Uzorak 1 | 4.943           | 0.705           | 0.151           | 32.778         | 0.667          | 54.8  | 43.1  | M(%) + C(%) = 2.1 |       |
| Uzorak 2 | 5.024           | 2.025           | 0.332           | 15.125         | 2.456          | 70.4  | 27.9  | M(%) + C(%) = 1.7 |       |
| Uzorak 3 | 8.857           | 1.73            | 0.234           | 37.872         | 1.445          | 67.6  | 30.6  | M(%) + C(%) = 1.8 |       |

Tablica 3.6. Karakteristike zrna materijala u uzorku

| Naziv    | Dubina/kota | D <sub>max</sub><br>(m) | Oblik<br>zrna | Tvrdća<br>zrna       | G <sub>s</sub> | Uređaj za<br>dispaciju | Trajanje<br>disp.(min) |
|----------|-------------|-------------------------|---------------|----------------------|----------------|------------------------|------------------------|
|          | (m)         |                         |               |                      |                |                        |                        |
| Uzorak 1 | 4.20 – 4.30 | 29                      | oblo          | tvrdi i<br>postojano | 2.81           | -                      | -                      |
| Uzorak 2 | 5.40 – 5.50 | 23                      | oblo          | tvrdi i<br>postojano | 2.8            | -                      | -                      |
| Uzorak 3 | 6.20 – 6.30 | 33                      | oblo          | tvrdi i<br>postojano | 2.81           | -                      | -                      |

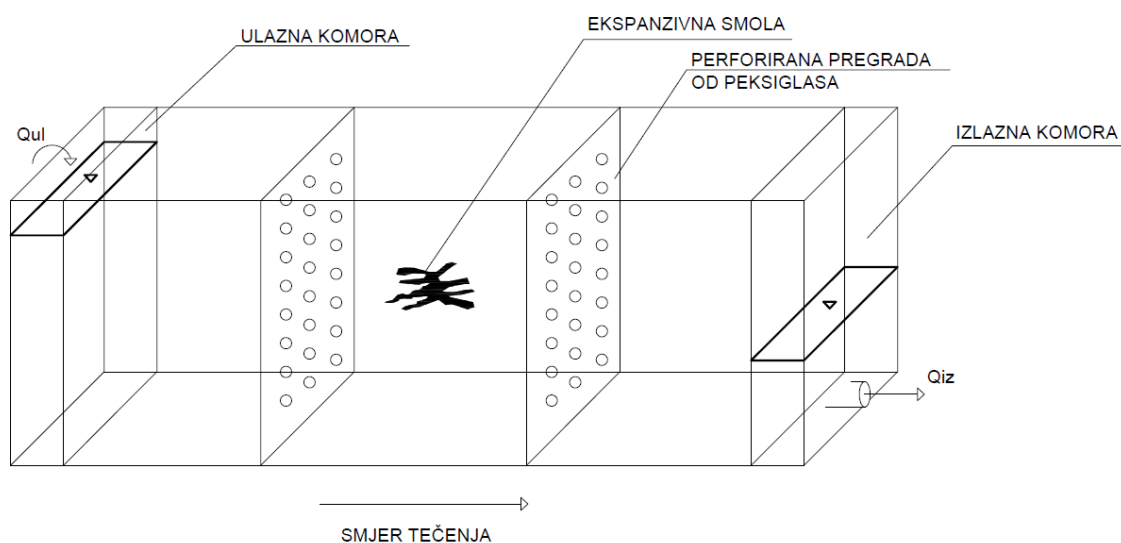


### 3.2. RAZMATRANI MODELI ZA ISPITIVANJE

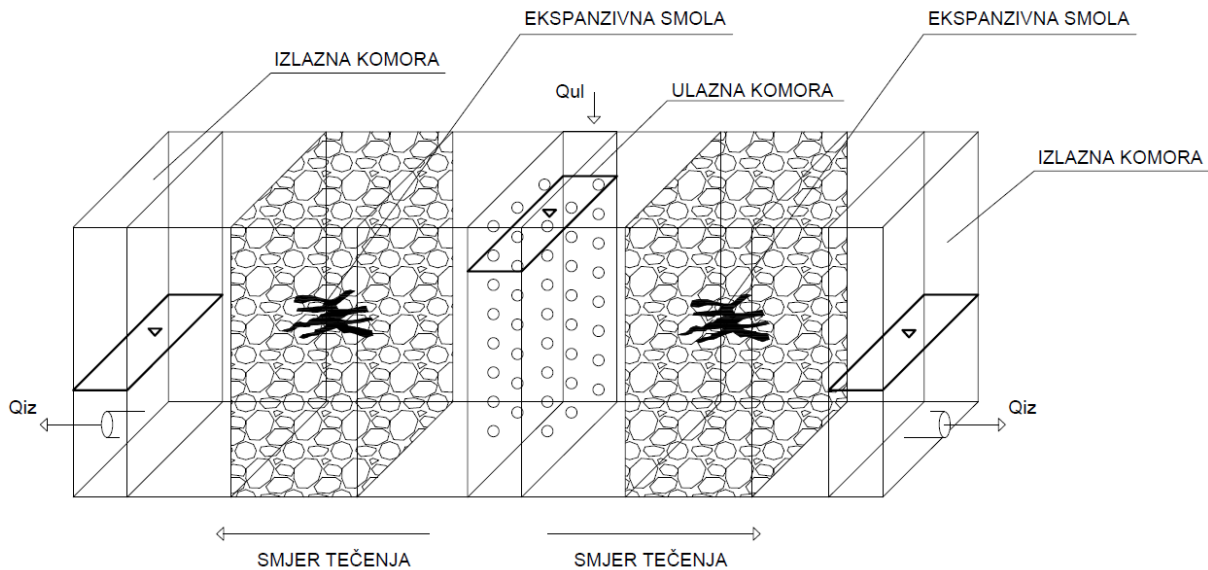
Prilikom planiranja izrade modela za laboratorijsko ispitivanje, razmatrano je više varijantnih rješenja. U obzir su uzete razne prednosti i mane svakog modela pojedinačno, a na temelju kojih je u konačnici donešena i krajnja odluka. Razmatrani modeli su:

- Horizontalni model od pleksiglasa sa tečenjem u jednom smjeru
- Horizontalni model od pleksiglasa sa dva smjera tečenja
- Vertikalni model od lexana
- Vertikalni model od kanalizacijskih cijevi

Horizontalni model od pleksiglasa se sastoji od prozirne duge prizme kroz koju bi se jasno vidio put vode kroz sam materijal. Isto tako, horizontalni model je dostupan u hidrotehničkom laboratoriju Građevinskog fakulteta, što znači da su ulaganja u izradu modela svedena na minimum. No, problem korištenja horizontalnog modela je u velikoj količini materijala koja se mora ugraditi u sam model, mogućnosti ispitivanja samo jednog uzorka, odnosno dva uzorka u modelu sa dva smjera tečenja, te je zbog nepoznavanja tehnologije, u smislu razmjera širenja ekspandirajuće smole, postojao strah od mogućeg pucanja stranica modela.

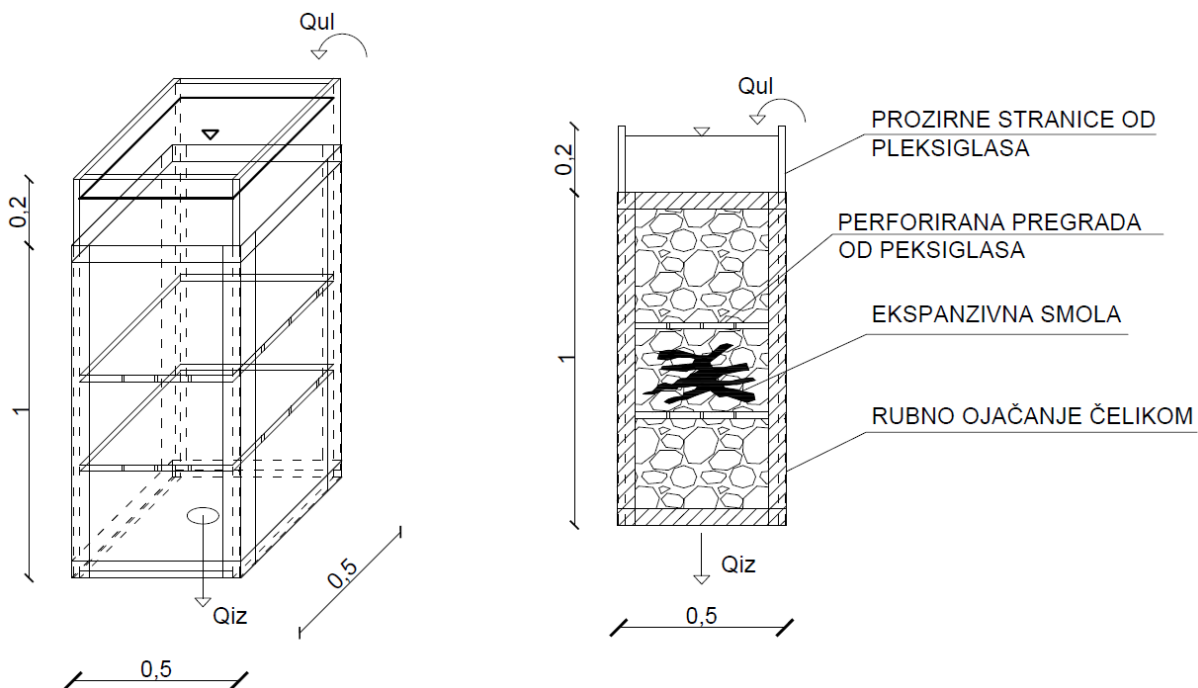


Slika 3.4. Shema horizontalnog modela od pleksiglasa sa smjerom tečenja u jednom smjeru



Slika 3.5. Horizontalni model od peksiglasa sa dva smjera tečenja

Vertikalni model bi zahtijevao izradu, a sama konstrukcija bi se sastojala od stranica napravljenih od lexana, jer je kao materijal čvršći od pleksiglasa, a jednako proziran, te bi se na rubovima dodatno osiguralo čeličnim okvirom.

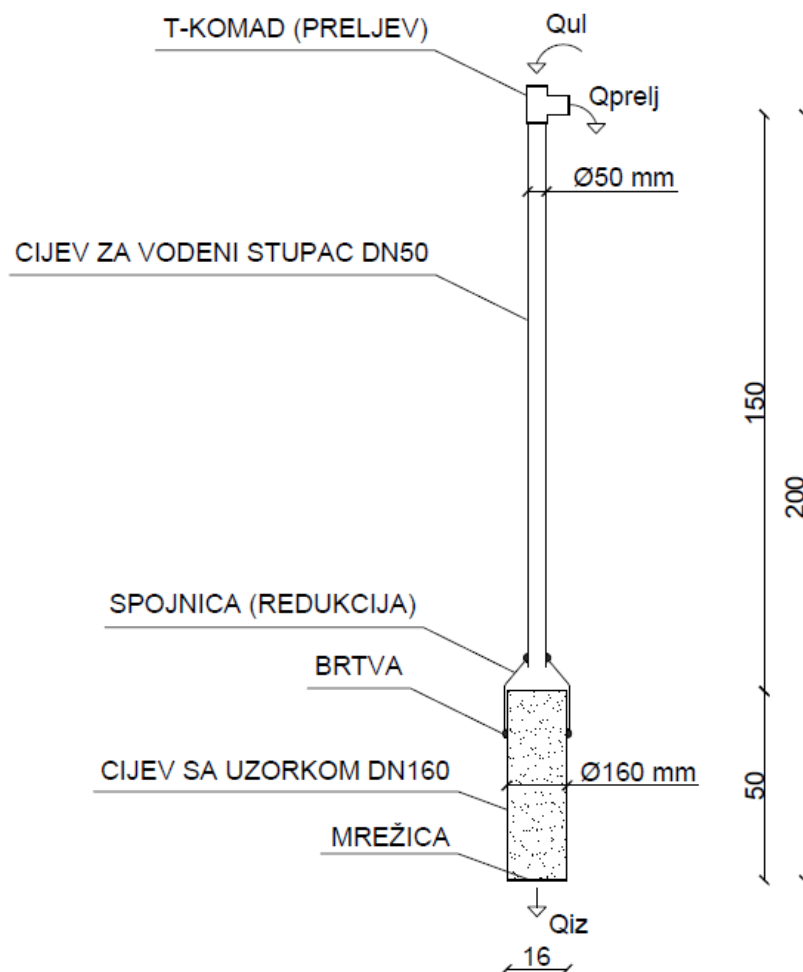


Slika 3.6. Shema vertikalni model od lexana

Problematika vezana za vertikalni model od lexana je već u samoj izradi modela, koja zahtijeva puno vremena, materijala, ali i financijskih troškova. Isto tako, jedan od problema je mogućnost ispitivanja samo jednog uzorka, ali i postizanje saturiranosti, koje u takvome modelu može predstavljati težak poduhvat.

No, najveći problem horizontalnog i vertikalnog modela je u njihovoj težini i veličini. Kako uzorak smole nije bilo moguće injektirati u laboratoriju, uporaba takvih modela bila je nemoguća, jer zahtijeva transport na teren, gdje bi se vršilo injektiranje ekspandirajuće smole. Iz navedenih razloga modeli su odbačeni i pristup izradi modela se morao drastično promijeniti.

Novo rješenje, koje je u konačnici i usvojeno, temelji se na jednostavnijoj izradi vertikalnog modela od više kanalizacionih cijevi ispunjenih pješčanim i šljunčanim materijalom, te mješavinom materijala tla. Prednost ovog modela je jeftinija izvedba, što omogućava i izradu većeg broja uzoraka standardnih dimenzija pogodnih za transport.



Slika 3.7. Shema kolone vertikalnog modela od kanalizacionih cijevi

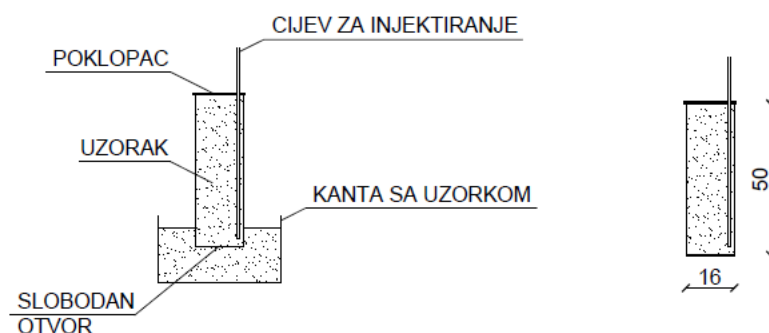
Izvedba kolone je predviđena u dva dijela: od gornje cijevi promjera DN 50 [mm] koja služi kao vodeni stupac sa T – komadom na vrhu koji ima funkciju preljeva, te donje cijevi promjera DN 160 [mm] u kojoj se nalazi uzorak, spojenu kliznom spojnicom i redukcijom na gornju cijev, te pričvršćenom propusnom mrežicom na dnu kako materijal ne bi izlazio van.

Izvedba kolone u dva dijela je povoljna upravo iz razloga što je moguće pomoću klizne spojnice jednostavno mijenjati cijevi sa uzorcima. Izvedba cijevi za uzorke je zahtijevala rezanje cijevi na jednake komade i njihovu obradu. Za potrebe ispitivanja, predviđena je izrada triju cijevi za uzorke materijala tla u prirodnom stanju (bez ekspanzirajuće poliuretanske smole) za potrebe određivanja koeficijenta filtracije samog materijala (pijesak, šljunak, mješavina), te izrada jedanaest cijevi za uzorke sa injektiranom ekspanzirajućom smolom.

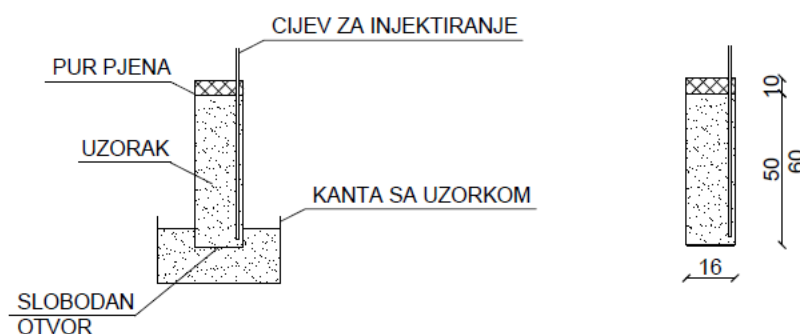
Kod izrade cijevi za uzorke u koje se planira injektirati ekspanzirajuća smola, potrebno je osigurati opterećenje sa gornje strane radi što boljeg širenja smole kroz pore uzorka, a da se pritom ne dogodi pojava izbacivanja materijala iz cijevi. Iz tog razloga, razmatrana su dva rješenja začepjenja. Prva opcija je postavljanje poklopca za kanalizacijske cijevi, što se nije pokazalo kao najbolje rješenje zbog preslabe mogućnosti začepjenja. Međutim, druga opcija podrazumijevala je postavljanje montažne (pur) pjene na vrhu kanalizacijske cijevi, što se pokazalo kao puno bolje rješenje.

Sve cijevi za uzorke su ukupne duljine od 60 [cm], dok je sam uzorak u cijevi visine 50 [cm]. Prazan prostor od 10 [cm] je predviđen upravo za postavljanje montažne (pur) pjene, kako bi imala dovoljno mjesta za vezanje i širenje. Cijevi su za vrijeme ubrizgavanja predviđene da budu uronjene sa otvorenim dnom u kante ispunjene istim materijalom, kako bi se višak ekspanzirajuće smole mogao slobodno širiti, nakon čeka bi stvrdnuti višak sa dna cijevi bio uklonjen, a dno zatim osigurano propusnom mrežicom.

HEMA S POKLOPCEM



HEMA S PUR PJENOM



Slika 3.8. Sheme cijevi sa uzorcima

Cijevi za injektiranje ekspandirajuće smole morale su biti specifičnih dimenzija, promjera DN 12 [mm] radi pištolja za injektiranje. Kod postavljanja cijevi za injektiranje unutar cijevi sa uzorkom pazilo se na poziciju, odnosno dubinu postavljanja dna cijevi za injektiranje, zbog sigurnosnih razloga. Tako je određeni broj cijevi postavljen na poziciji 1/2 visine i 1/3 visine od dna uzorka.

Tablica 3.7. Pozicija cijevi za injektiranje ovisno o uzorku

| UZORAK BR. | MATERIJAL | POZICIJA CIJEVI ZA INJEKTIRANJE |
|------------|-----------|---------------------------------|
| 1          | Pijesak   | 1/3 od dna                      |
| 2          | Pijesak   | 1/2 od dna                      |
| 3          | Šljunak   | 1/3 od dna                      |
| 4          | Šljunak   | 1/2 od dna                      |
| 5          | Pijesak   | 1/3 od dna                      |
| 6          | Pijesak   | 1/3 od dna                      |
| 7          | Šljunak   | 1/3 od dna                      |
| 8          | Šljunak   | 1/3 od dna                      |
| 9          | Mješavina | 1/3 od dna                      |
| 10         | Mješavina | 1/3 od dna                      |
| 11         | Mješavina | 1/2 od dna                      |

### 3.3. PRIPREMA UZORAKA ZA ISPITIVANJE

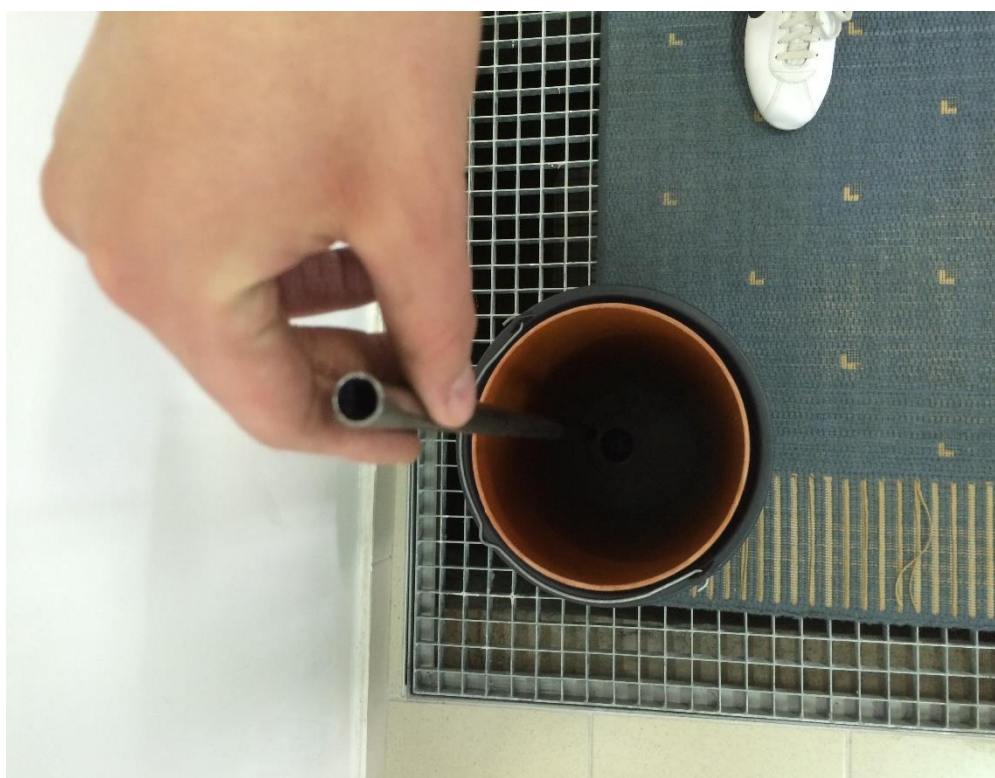
Kako je već prikazano u prethodnom poglavlju, uzorak se sastoji od PVC cijevi, materijala tla za ispitivanje i cjevčice za injektiranje ekspandirajuće smole. Dvije PVC cijevi, promjera DN 160 [mm] i duljine 6 [m], bilo je potrebno prerezati na četrnaest komada duljine 60 [cm], a višak je služio kao rezerva. Svaki komad cijevi je obrađen s jedne strane kako bi se osiguralo što bolje brtvljenje između cijevi s uzorkom i redukcije na koju se spaja vertikalna cijev sa stupcem vode, promjera DN 50 [mm]. U četrnaest komada cijevi nasuto je prethodno navedenih pet vrsta materijala.



Slika 3.9. PVC cijevi korištene za ispitivanja



Slika 3.10. PVC cijevi postavljene u kante



Slika 3.11. Postavljanje cjevčice za injektiranje na predviđeni položaj



Slika 3.12. Primjer pripremljenog uzorka šljunka za injektiranje

### 3.4. INJEKTIRANJE EKSPANDIRAJUĆE POLIURETANSKE SMOLE

Injektiranje ekspandirajuće smole u uzorke zahtijevao je izlazak na teren, konkretno odlazak do postojećeg gradilišta u Kloštar Ivaniću. Prilikom transporta, od iznimne važnosti bilo je što bolje osigurati uzorke od pomicanja, kako cijevi sa uzorcima ne bi bile izbačene iz svog predviđenog položaja.



Slika 3.13. Priprema uzoraka za transport





Slika 3.14. Osigurani uzorci za transport

Dolaskom na teren, uzorci su ostali netaknuti i u istom stanju kao prilikom polaska. Uzorci su poredani i pripremljeni za injektiranje, a samo injektiranje se vrši pomoću injekcijskog pištolja, koji je povezan sa spremnikom smole pomoću dugog fleksibilnog cjevovoda. Na taj način je sam proces injektiranja vrlo jednostavan i dovoljna je samo jedna osoba za izvedbu. Količina injektirane ekspandirajuće smole u sve uzorke je iznosila 250 [ml], odnosno približno 250 [g], što je ujedno i najmanja moguća količina koju kompresor svojim cilindrom može dozirati u injekcijskom pištolju.



Slika 3.15. Poredani uzorci na terenu



Slika 3.16. Injektiranje ekspandirajuće smole pomoću injekcijskog pištolja

### 3.5. LABORATORIJSKA ISPITIVANJA

Za svaki pojedini uzorak pristupljeno je laboratorijskim ispitivanjima koeficijenta filtracije. Ispitivanja su rađena na prethodno spomenutim uzorcima pijeska, šljunka te mješavine pijeska i šljunka, u prirodnom stanju te nakon što je u njih ugrađena ekspanzirajuća poliuretanska smola. S obzirom da se ispitivanja propusnosti provode na potpuno saturiranim uzorcima (jer zrak koji popunjava pore može znatno utjecati na rezultate koeficijenta filtracije), prethodno je svaki uzorak saturiran puštanjem toka vode s donje strane uzorka, kako bi zrak koji je popunjavao pore mogao slobodno izaći prema gore.

Za ispitivanje uzoraka pijeska, šljunka te mješavine pijeska i šljunka korištena je metoda s konstantnom razinom vode (eng. *Constant head test*). Mjerenje je ostvareno na način da je cijev s uzorkom fiksirana. Na gornji dio cijevi s uzorkom, promjera DN 160 [mm], spojena je preko klizne spojnice redukcija na cijev promjera DN 50 [mm]. Na drugi dio redukcije spojen je T- komad, čiji je vertikalni dio služio za ulaz konstantnog toka vode, a horizontalni dio kao preliv za višak vode. S donje strane uzorka postavljena je i fiksirana propusna mrežica, kako materijal uzorka ne bi ispadao iz cijevi. Nakon što je, kao što je prije spomenuto, uzorak potpuno saturiran, pristupljeno je mjerenju volumena vode koji u određenom vremenu prolazi kroz uzorak.



Slika 3.17. Postupak ispitivanja uzorka u prirodnom stanju (bez ekspanzirajuće smole)

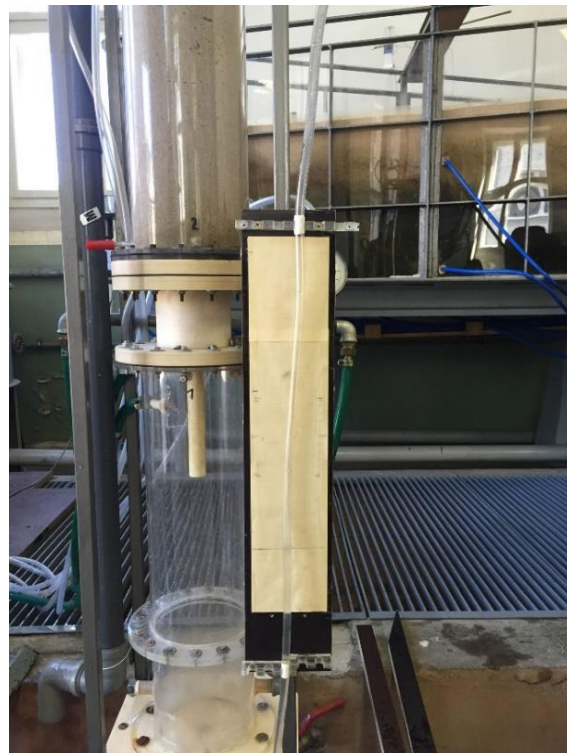


Slika 3.18. Ispitivanje propusnosti uzorka bez ekspandirajuće smole

Za ispitivanje uzoraka pijeska, šljunka te mješavine pijeska i šljunka u koje je ugrađena ekspandirajuća smola korištena je metoda s promjenjivom razinom vode (eng. *Falling head test*). Mjerenje je ostvareno na način da je svaka pojedina cijev s uzorkom postavljena u vertikalnu kolonu te fiksirana. Na gornji kraj cijevi s uzorkom, promjera DN 160 [mm], koji je prethodno obrađen radi lakšeg spoja, spojena je preko klizne spojnice redukcija na promjer od DN 50 [mm]. Na drugi kraj redukcije vertikalno je spojena cijev promjera DN 50 [mm], visine 170 [cm] radi ostvarenja većeg stupca vode, a posljedično i većeg tlaka vode na sam uzorak. Na donji kraj cijevi s uzorkom spojena je preko još jedne klizne spojnice redukcija, na koju je spojena mjerna cjevčica promjera 7.5 [mm]. U cjevčici je u konačnici mjeren porast razine vode u određenom vremenskom periodu. S obzirom na vrlo malu propusnost ispitivanih uzoraka s ugrađenom ekspandirajućom smolom, na taj je način izmjeren tako vrlo mali volumen, te izračunat protok vode.



Slika 3.19. Ispitivanje uzorka s ekspandirajućom smolom



Slika 3.20. Mjerna cjevčica na mjernom papiru

## 4. REZULTATI ISPITIVANJA

Prilikom ispitivanja, prvo su ispitani uzorci pijeska, šljunka te mješavine pijeska i šljunka bez ekspandirajuće poliuretanske smole, a nakon njih uzorci sa ekspandirajućom poliuretanskom smolom. Cilj samog mjerenja bio je određivanje protoka na izlazu iz cijevi s uzorkom kako bi se odredila brzina tečenja. S obzirom da je protok u funkciji volumena i vremena, potrebno je bilo izmjeriti volumen vode koji je prošao kroz uzorak u vremenu od 5 minuta u posudu ispod uzorka. Mjerenje volumena ponavljalo se 3 do 4 puta, ovisno o uzorku, te je iz dobivenih vrijednosti izračunata prosječna vrijednost volumena. Uz poznatu vrijednost volumena i pripadajućeg vremena dobiven je protok vode kroz ispitani uzorak. Pomoću dobivenog protoka i poznate proticajne površine izračunata je brzina tečenja. Vrijednost brzine tečenja kroz uzorak je potrebna kako bi se pomoću Darcyjevog zakona mogla izračunati vrijednost koeficijenta filtracije, uz poznati tlak vode i duljinu uzorka kroz koju se javlja tečenje.

Vrijeme saturacije prije mjerenja razlikovalo se ovisno o uzorku, a između svakog mjerenja vrijeme saturacije je iznosilo 15 minuta, kako bi se nakon prethodnog mjerenja uzorak ponovo saturirao. Za uzorak s pijeskom bez ekspandirajuće poliuretanske smole rezultati mjerenja prikazani su u Tablici 4.1.

Tablica 4.1. Rezultati za uzorak pijeska bez ekspandirajuće poliuretanske smole

| PIJESAK                     |              |           |                     |
|-----------------------------|--------------|-----------|---------------------|
| Vrijeme mjerenja            | $T_{mjer} =$ | 300       | [s]                 |
|                             |              | 5         | [min]               |
|                             |              | 0.0833    | [h]                 |
| Srednji volumen             | $V_{sr} =$   | 845.00    | [ml]                |
|                             |              | 0.845     | [l]                 |
|                             |              | 0.00085   | [m <sup>3</sup> ]   |
| Protok                      | $Q =$        | 2.817E-06 | [m <sup>3</sup> /s] |
| Površina poprečnog presjeka | $A =$        | 0.0201    | [m <sup>2</sup> ]   |
| Promjer cijevi              | $D =$        | 160       | [mm]                |
|                             |              | 0.16      | [m]                 |
| Visina stupca vode          | $\Delta h =$ | 0.90      | [m]                 |
| Duljina uzorka              | $\Delta l =$ | 0.50      | [m]                 |
| Brzina                      | $v =$        | 1.40E-04  | [m/s]               |
| Koeficijent filtracije      | $K =$        | 7.783E-05 | [m/s]               |



Slika 4.1. Mjerenje uzorka s pijeskom

Za uzorak sa šljunkom bez ekspandirajuće poliuretanske smole rezultati mjerenja prikazani su u Tablici 4.2.

Tablica 4.2. Rezultati za uzorak šljunka bez ekspandirajuće poliuretanske smole

| ŠLJUNAK                            |              |           |                     |
|------------------------------------|--------------|-----------|---------------------|
| <b>Vrijeme mjerenja</b>            | $T_{mjer} =$ | 300       | [s]                 |
|                                    |              | 5         | [min]               |
|                                    |              | 0.0833    | [h]                 |
| <b>Srednji volumen</b>             | $V_{sr} =$   | 8033.33   | [ml]                |
|                                    |              | 8.033     | [l]                 |
|                                    |              | 0.00803   | [m <sup>3</sup> ]   |
| <b>Protok</b>                      | $Q =$        | 2.678E-05 | [m <sup>3</sup> /s] |
| <b>Površina poprečnog presjeka</b> | $A =$        | 0.0201    | [m <sup>2</sup> ]   |
| <b>Promjer cijevi</b>              | $D =$        | 160       | [mm]                |
|                                    |              | 0.16      | [m]                 |
| <b>Visina stupca vode</b>          | $\Delta h =$ | 0.90      | [m]                 |
| <b>Duljina uzorka</b>              | $\Delta l =$ | 0.50      | [m]                 |
| <b>Brzina</b>                      | $v =$        | 1.33E-03  | [m/s]               |
| <b>Koeficijent filtracije</b>      | $K =$        | 7.399E-04 | [m/s]               |



Slika 4.2. Mjerenje volumena za uzorak sa šljunkom

Za uzorak s mješavinom pijeska i šljunka bez ekspandirajuće poliuretanske smole rezultati mjerenja prikazani su u Tablici 4.3.

Tablica 4.3. Rezultati za uzorak mješavine bez ekspandirajuće poliuretanske smole

| MJEŠAVINA                   |              |           |                     |
|-----------------------------|--------------|-----------|---------------------|
| Vrijeme mjerenja            | $T_{mjer} =$ | 300       | [s]                 |
|                             |              | 5         | [min]               |
|                             |              | 0.0833    | [h]                 |
| Srednji volumen             | $V_{sr} =$   | 8681.25   | [ml]                |
|                             |              | 8.681     | [l]                 |
|                             |              | 0.00868   | [m <sup>3</sup> ]   |
| Protok                      | $Q =$        | 2.894E-05 | [m <sup>3</sup> /s] |
| Površina poprečnog presjeka | $A =$        | 0.0201    | [m <sup>2</sup> ]   |
| Promjer cijevi              | $D =$        | 160       | [mm]                |
|                             |              | 0.16      | [m]                 |
| Visina stupca vode          | $\Delta h =$ | 0.90      | [m]                 |
| Duljina uzorka              | $\Delta l =$ | 0.50      | [m]                 |
| Brzina                      | $v =$        | 1.44E-03  | [m/s]               |
| Koeficijent filtracije      | $K =$        | 7.996E-04 | [m/s]               |





Slika 4.3. Mjerenje volumena za uzorak s mješavinom pijeska i šljunka



Slika 4.4. Menzure za mjerenje volumena vode

Tablica 4.4. Usporedba koeficijenata filtracije pojedinih materijala

| Materijal        | Koeficijent filtracije, $K$<br>[m/s] |
|------------------|--------------------------------------|
| <i>Pijesak</i>   | <b>7.783E-05</b>                     |
| <i>Šljunak</i>   | <b>7.399E-04</b>                     |
| <i>Mješavina</i> | <b>7.996E-04</b>                     |

Koeficijent filtracije kod uzoraka s ekspandirajućom smolom računa se po istoj jednadžbi kao uzorci bez smole. Razlika postoji samo u načinu mjerenja i u drugačije koncipiranom modelu, koji je opisan u prethodnom poglavlju.

Uzorci s pijeskom nisu bili pogodni za ispitivanje iz razloga što je ekspandirajuća smola tijekom injektiranja istisnula montažnu (pur) pjenu (koja je služila kao zaštita da čestice pijeska ne izađu iz cijevi), a time i čestice pijeska te popunila poprečni presjek cijevi samo na gornjoj strani uzorka. Prema tome, rezultati dobiveni ispitivanjem ne bi bili reprezentativni.

Također, uzorci sa šljunkom nisu bili pogodni za ispitivanje iz razloga što se prilikom injektiranja ekspandirajuće smole u uzorak ona nije u potpunosti zahvatila cijeli poprečni presjek (Slika 4.5).



Slika 4.5. Dio poprečnog presjeka uzorka šljunka nezahvaćen ekspanzirajućom poliuretanskom smolom

Injektiranje ekspanzirajuće smole u uzorke s mješavinom pijeska i šljunka bilo je uspješno, stoga su uzorci bili pogodni za ispitivanje. Kao i kod uzoraka bez smole, uzorci su prvo potopljeni u vodu kako bi se saturirali. Nakon višednevnog saturiranja uzoraka, postavljena je vertikalna kolona s uzorkom za ispitivanje, kako bi se mogao izračunati koeficijent filtracije.

Prije samog mjerenja označena je početna razina vode u cjevčici. Nakon 3.5 [h] zabilježen je porast razine vode u cjevčici u iznosu od 6.7 [cm]. Uz poznatu površinu poprečnog presjeka cjevčice i poznatu veličinu promjene razine vode u cjevčici, određena je promjena volumena. Na temelju odnosa izmjerenog volumena i pripadajućeg vremenskog inkrementa određen je protok vode kroz uzorak. Koeficijent filtracije izračunat je prema Darcyjevom zakonu.



Slika 4.5. Saturacija uzorka s mješavinom pijeska i šljunka

S obzirom na dugo vrijeme potrebno za saturaciju uzorka mješavine pijeska i šljunka s ekspandirajućom poliuretanskom smolom, provedena su ispitivanja na samo jednom uzorku. Za ispitani uzorak uz sve navedene uvjete, dobiveni rezultati prikazani su Tablicom 4.5.

Tablica 4.5. Rezultati za uzorak mješavine sa ekspandirajućom poliuretanskom smolom

| <b>MJEŠAVINA</b>                            |                  |                  |                     |
|---------------------------------------------|------------------|------------------|---------------------|
| <b>Vremenski inkrement</b>                  | $\Delta t =$     | 3.5              | [h]                 |
| <b>Promjena razine vode u cjevčici</b>      | $\Delta h =$     | 0.067            | [m]                 |
| <b>Promjer cjevčice</b>                     | $D =$            | 7.5              | [mm]                |
|                                             |                  | 0.0075           | [m]                 |
| <b>Površina poprečnog presjeka cjevčice</b> | $A_{cjevčice} =$ | 4.418E-05        | [m <sup>2</sup> ]   |
| <b>Volumen</b>                              | $V =$            | 2.95997E-06      | [m <sup>3</sup> ]   |
| <b>Protok</b>                               | $Q =$            | 2.273E-10        | [m <sup>3</sup> /s] |
| <b>Površina poprečnog presjeka uzorka</b>   | $A_{uzorka} =$   | 0.0201           | [m <sup>2</sup> ]   |
| <b>Brzina</b>                               | $v =$            | 1.131E-08        | [m/s]               |
| <b>Razlika tlaka</b>                        | $\Delta h =$     | 1.473            | [m]                 |
| <b>Duljina uzorka</b>                       | $\Delta l =$     | 0.5              | [m]                 |
| <b>Koeficijent filtracije</b>               | $K =$            | <b>3.838E-09</b> | <b>[m/s]</b>        |

Usporedbom rezultata ispitivanja uzoraka mješavine prije i nakon ugrađivanja ekspandirajuće smole može se zaključiti da je ekspandirajuća smola u uzorku mješavine pijeska i šljunka uzrokovala jako veliko smanjenje vodopropusnosti.

Tablica 4.6. Usporedba koeficijenta filtracije uzoraka mješavine pijeska i šljunka prije i nakon ugrađivanja ekspandirajuće poliuretanske smole

| Materijal                                           | Mješavina pijeska i šljunka <b>bez</b> ekspandirajuće poliuretanske smole | Mješavina pijeska i šljunka <b>sa</b> ekspandirajućom poliuretanskom smolom |
|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| <b>Koeficijent filtracije, <math>K</math> [m/s]</b> | <b>7.996E-04</b>                                                          | <b>3.838E-09</b>                                                            |

#### 4.1. PRIJEDLOG ZA DALJNJA ISPITIVANJA

Utvrđivanjem jako velikog smanjenja koeficijenta filtracije kod uzoraka mješavine pijeska i šljunka nakon ugrađivanja ekspandirajuće poliuretanske smole, ispitanih u laboratoriju, potvrđuje se svojstvo smanjenja vodopropusnosti. Međutim, mjerenje tako jako nepropusnih materijala predstavlja problem kod metoda mjerenja po prijedlogu iz Poglavlja 1.2.4. Osnovni je problem takvih ispitivanja vrijeme mjerenja, koje je obično jako dugo. Javljanju se i drugi problemi, poput isparavanja, a time i nemogućnosti točnog određivanja količine vode koja je stvarno prošla kroz uzorak. Također, uz rubove stijenki cilindra teško je osigurati nepropusni kontakt.

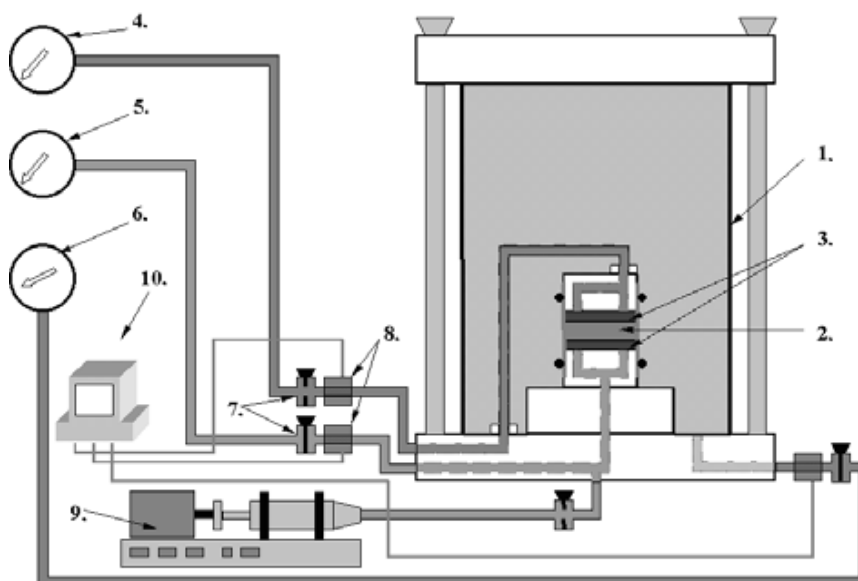
Iz gore navedenih razloga, za kvalitetniji i bolji način ispitivanja vodopropusnosti materijala, odnosno koeficijenta filtracije, preporuča se korištenje metode zadanog protoka uz mjerenje u modificiranoj troosnoj ćeliji.

Metoda zadanog protoka (eng. *Flow pump test*) je modificirana metoda mjerenja koeficijenta filtracije s konstantnom razlikom tlaka. Modifikacija je u tome što se tekućina utiskuje u ili izvlači iz uzorka konstantnom brzinom, odnosno zadanim protokom, tijekom čega se prati promjena razlike tlaka na kapi i bazi uzorka.

Prednosti ove metode pred konvencionalnim su višestruke. Izbjegava se uporaba visokih gradijenata, koji su kod konvencionalnih metoda korišteni radi ubrzanja

procesa mjerenja, ali su uzrokovali i odstupanje od uvjeta tečenja po Darcyjevom zakonu, te pojavu dodatne konsolidacije uzoraka. [19] Izbjegava se također i uporaba niskih gradijenata, koja kod konvencionalnih metoda nije praktična niti pouzdana zbog dugog vremena mjerenja, a količine procijeđene vode su male. Ubrzanim procesom mjerenja onemogućen je rast bakterija pa i eventualna promjena kemizma eksperimentalnog fluida. [20] Osim toga, ne dolazi do širenja opreme (birete) uslijed temperaturnih promjena što uzrokuje greške pri očitavanju i sl. [21]

Najistaknutija prednost metode zadanog protoka u odnosu na konvencionalne očituje se u činjenici da se protok može preciznije nametnuti nego mjeriti kao posljedica nametnute razlike tlaka na krajevima uzorka. [22] [23] Kako se stacionarno tečenje i kroz slabopropusni uzorak uspostavlja u relativno kratkom roku, za vrijeme trajanja jednog konvencionalnog ispitivanja moguće je obaviti i desetak ispitivanja sa zadanim protokom. Time se, ovisno o broju potrebnih ispitivanja, može isplatiti i nešto skuplja oprema potrebna za zadavanje protoka.

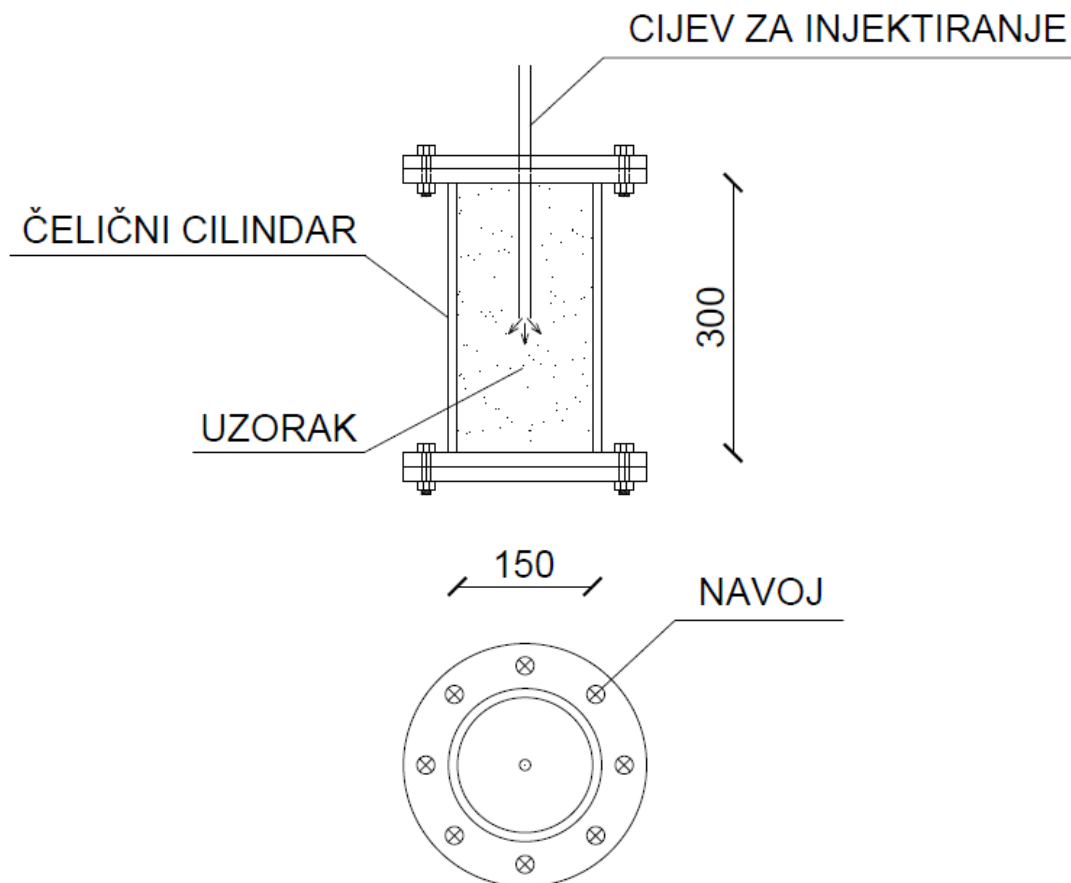


Slika 4.7. Shematski prikaz modificirane troosne ćelije [24]

#### LEGENDA:

1 - troosna ćelija; 2 - uzorak; 3 - porozne pločice; 4 - regulacija/održavanje pornog tlaka na kapi uzorka; 5 - regulacija/održavanje pornog tlaka na bazi uzorka; 6 - regulacija/održavanje ćelijskog tlaka; 7 - ventili; 8 - osjetila za tlak; 9 - pumpa za zadavanje protoka; 10 - bilježenje i obrada podataka.

Kod izrade uzorka za ispitivanje u modificiranoj troosnoj ćeliji, potrebno je izvesti posebnu čeličnu cilindričnu ćeliju sa navojima sa gornje i donje strane, u koju bi se mogla injektirati ekspandirajuća smola bez straha od pucanja. Takav cilindar bi trebao odgovarati gabaritima za uzorak u troosnoj ćeliji, te se preporučuju dimenzije širine uzorka 150 [mm] i visine uzorka 300 [mm], što su najveće moguće dimenzije uzoraka za ispitivanje u modificiranoj troosnoj ćeliji. Količina injektirane ekspandirajuće smole trebala bi biti puno veća od količine injektirane u model opisan ovim radom. Stečenim iskustvom, preporuka je injektiranje količine od minimalno 1 [l], odnosno približno 1 [kg], čime bi se zasigurno zapunile sve pore uzorka po cijelom profilu.



Slika 4.8. Shema čelične cilindrične ćelije za injektiranje ekspandirajuće poliuretanske smole

Uzorak se ugradi u troosnu ćeliju i konsolidira, a njegova zasićenost se osigurava povratnim tlakom (eng. *back pressure*). Kroz konsolidirani uzorak nameće se zadani protok - s donje strane uzorka, a na drugom kraju - gornjoj strani, početni porni tlak održava se stalnim. Kao reakcija na zadani protok, na donjoj strani uzorka dolazi do postupnog porasta purnog tlaka. Kada se tlak ustali, uspostavljeno je stacionarno tečenje kroz uzorak, pa se može pristupiti određivanju hidrauličkog gradijenta, te se uz poznati protok može izračunati koeficijent filtracije prema Darcyjevom zakonu kao odnos protoka i gradijenta.



Slika 4.9. Modificirana troosna ćelija [25]



## 5. RASPRAVA

Kako bismo dobili rezultate, u smislu smanjenja vodopropusnosti, nakon ugrađivanja ekspandirajuće smole u pojedine uzorke, bilo je potrebno odrediti koeficijent filtracije materijala tla u prirodnom stanju te materijala tla nakon ugradnje ekspandirajuće smole.

U tu svrhu bilo je potrebno odabrati odgovarajući model za ispitivanje. Razmatrano je više varijanti fizikalnih modela. Modeli od pleksiglasa i leksana nisu zadovoljavali u smislu otpornosti stijenki modela na tlak uzrokovan ekspanzijom smole. Također, postojeći horizontalni model u laboratoriju bio je nepovoljan u smislu ugradnje ekspandirajuće smole u uzorak. Odabran je model koji je naspram ostalih bio optimalan sa stajališta cijene, transporta i same provedbe ispitivanja te mogućnosti ispitivanja više uzoraka.

Dobivenim rezultatima za uzorke u prirodnom stanju (bez ekspandirajuće poliuretanske smole) potvrđeno je slaganje s rezultatima koeficijenata filtracije iz literature. To potvrđuje da je korištena metoda ispitivanja ispravna (slaganje s Darcyjevim zakonom), kao i da je model ispravno izveden.

Razlika između izračunatih koeficijenta filtracije uzoraka bez i sa ekspandirajućom poliuretanskom smolom ukazala je na smanjenje vodopropusnosti u uzorku materijala tla s ugrađenom ekspandirajućom smolom.

Zbog velikog potrebnog vremena saturacije pojedinih uzoraka mješavine pijeska i šljunka s ugrađenom ekspandirajućom smolom, ispitan je samo jedan od uzoraka. Uzorci pijeska i šljunka s ugrađenom ekspandirajućom smolom nisu bili pogodni za ispitivanje zbog premale ugrađene količine, i time nedovoljne popunjenosti svih pora. To potvrđuje spomenutu činjenicu da ekspandirajuća poliuretanska smola teže prodire u sve pore sitnozrnatih materijala, u odnosu na krupnozrnate.

Temeljem iskustava stečenih provedenim ispitivanjima, izveden je zaključak da je potrebna nova metoda pripremanja uzoraka, veća količina ugrađene smole u sitnozrnati materijale, kao i kvalitetnija i skuplja metoda ispitivanja, kojom bi se dobili točniji rezultati koeficijenta filtracije.

## 6. ZAKLJUČAK

Za potrebe ispitivanja učinka ekspandirajuće poliuretanske smole na smanjenje vodopropusnosti materijala pijeska, šljunka, te mješavine pijeska i šljunka pripremljeni su uzorci svih navedenih materijala u prirodnom stanju te je ispitana njihova vodopropusnost. U tako pripremljene uzorke ugrađena je ekspandirajuća poliuretanska smola. U laboratorijskim uvjetima, svaki pojedini uzorak postavljen je u model za ispitivanje, u kojem je ispitano smanjenje vodopropusnosti u usporedbi sa istovjetnim materijalima u prirodnom stanju mjerenjem koeficijenta filtracije. Usporedba izmjerenih veličina koeficijenta filtracije prije i nakon ugradnje ekspandirajuće smole ukazala je na smanjenje vodopropusnosti za pet redova veličine, što je premašilo sva početna očekivanja.

Radom su ostvarena očekivanja u vidu mogućnosti modela. Provedena ispitivanja potvrdila su početnu hipotezu i pokazala veliki potencijal za daljnja ispitivanja učinaka ekspandirajuće poliuretanske smole na smanjenje vodopropusnosti, koristeći kompleksnije, kvalitetnije i financijski zahtjevnije metode ispitivanja.

Ovim putem zahvaljujemo prof.dr.sc. Goranu Gjetvaju na svim prikupljenim i ustupljenim materijalima i stručnoj podršci, gospodinu Danku Seletkoviću i firmi URETEK na doniranoj ekspandirajućoj poliuretanskoj smoli, te laborantu Franji Živkoviću na pomoći pri izradi modela.

## 7. LITERATURA

- [1] Gjetvaj, G., Uzroci formiranja otvora u hidrotehničkim nasipima, Hrvatska vodoprivreda, 207, 74 – 80., 2014.
- [2] Ožanić, Regulacijske građevine, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka.
- [3] Kuspilić, N., Regulacije vodotoka, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb. 2009.
- [4] Roje-Bonacci, T., Što se može naučiti o nasipima nakon katastrofalnih poplava u istočnoj Slavoniji, Hrvatske vode, 23 (2015).
- [5] Kratofil, L., Turković, V., Sanacija vodnih građevina u Županjskoj Posavini, Hrvatske vode, 35 – 42., 2015.
- [6] W. Delleur, J., The handbook of groundwater engineering, 2ed ed., CRC Press, Boca Raton. 2007.
- [7] Batu, V., Aqifer Hydraulics: A Comprehensive Guide to Hydrogeologic Data Analysis, John Wiley & Sons. Inc., 1998.
- [8] Bear, J., H.-D. Cheng, A., Modeling Groundwater Flow and Contaminant Transport, Springer, Dordrecht Heidelberg London New York.
- [9] Gjetvaj, G., Rukopis predavanja iz predmeta Hidraulika. 2006.
- [10] Daugherty, L., Franzini, J.B., Finnemore, E.J., Fluid Mechanics with Engineering Applications, 8th ed., Mc. Graw – Hill Inc., New York. 1985.
- [11] Buzzi, O., Fityus, S., Sasaki, Y., e Sloan, S., Structure and properties of expanding polyurethane foam in the context of foundation remediation in expansive soil, Mechanics of Materials, 40,1012-1021., 2008.
- [12] Canteri, C., Method for increasing the bearing capacity of foundation soils for buildings. European Patent Specification, EP 0 851 064 B1., 1998.
- [13] Buzzi, O., Fityus, S., e Sloan, S., Use of expanding polyurethane resin to remediate expansive soil foundations, Canadian Geotechnical Journal, 47, 623-634., 2010.

- [14] Dei Svaldi, A., Favaretti, M., Pasquetto, A., e Vinco, G., Modellazione analitica del miglioramento del terreno attraverso iniezioni di resina ad alta pressione d'espansione, 6th International Conference on Ground Improvement Techniques, Coimbra, Portogallo, 18-19 Luglio 2005.
- [15] Favaretti, M., Germanino, G., Pasquetto, A., e Vinco, G., Interventi di consolidamento dei terreni di fondazione di una torre campanaria con iniezioni di resina ad alta pressione d'espansione, Atti del XXII Convegno Nazionale di Geotecnica, Palermo, Italy, 22-24 September 2004. Associazione Geotecnica Italiana, Roma, 1-19.
- [16] Foti, S., e Manassero, M., Rinforzo e adeguamento delle fondazioni per sollecitazioni statiche e dinamiche, Atti delle Conferenze di Geotecnica di Torino, XXII Ciclo, Torino, Italy, 18-19 Novembre 2009.
- [17] Gabassi, M., Pasquetto A., Vinco, G., e Masella, A. Consolidamento del terreno di fondazione del palazzo di Punta della Dogana in Venezia realizzato con iniezioni di resina poliuretanic. Atti del XXIV Convegno Nazionale di geotecnica, Napoli, Italy, 22-24 Giugno 2011, Edizioni AGI, Roma, 457-463.
- [18] Pasquetto, A., Gabassi, M., Vinco, G., e Guerra, C., Consolidamento del terreno mediante l'iniezione di resine poliuretatiche per l'attenuazione del rigonfiamento e del ritiro di terreni argillosi. Proceedings of SEC 2008 – Symposium International Sécheresse et Constructions, Parigi, France, 1-7 Settembre 2008.
- [19] Mitchell, J. K. & Younger, J. S.: Abnormalities in hydraulic flow through fine-grained soils, ASTM Spec. Tech. Publ., No 417, 106-139, Philadelphia. 1967.
- [20] Gupta, R. P. & Swartzendruber, D.: Flow-associated reduction in the hydraulic conductivity of quartz sand., Proc. Soil Sci. Soc. Am., 26, No 1, 6-10. 1962.
- [21] Olsen, H. W.: Deviations from Darcy's law in saturated clays, Proc. Soil Sci. Soc. Am., 29, No 2, 135-140. 1965.
- [22] Aiban, S.A., Znidarčić. D.: Evaluation of the flow pump measurements. Geotechnique 39 (4), 655-666. 1989.

[23] Kovačić, D., Kvasnička, P., Znidarčić, D.: Nepropusnost glinene barijere u sanitarnim odlagalištima, Gospodarenje otpadom, Zbornik radova s III. međunarodnog simpozija, ed. Zlatko Milanović, 296-305, Zagreb. 1994.

[24] Veinović, Ž., Kovačević Zelić, B., Kvasnička, P. Laboratorijsko mjerenje koeficijenta propusnosti tla – usporedba konvencionalnih i novih metoda, Rudarsko-geološko-naftni zbornik, Vol.15, 95-102, Zagreb, 2003.

[25] <http://www.geneq.com/en/material-testing/sector-market/soils-agregates/double-wall-triaxial-cells-for-unsaturated-tests-from-wykeham-farrance.html>, 20. Travanj 2017.

## 8. SAŽETAK

*Mogućnosti primjene ekspandirajuće poliuretanske smole u sprječavanju hidrauličkog sloma tla hidrotehničkih nasipa*

*Marko Perjan, Mihovil Rajković, Filip Štos*

Pozitivna iskustva u dosadašnjoj primjeni ekspandirajuće poliuretanske smole u geotehničkoj praksi pružila su osnovu za ispitivanje primjene iste tehnologije u hidrotehnici, za sanaciju, odnosno poboljšanje svojstava postojećih hidrotehničkih nasipa. Povoljna svojstva ekspandirajuće poliuretanske smole dokazana prethodnim ispitivanjima dala su poticaj za ispitivanje. Razmatranjem više različitih varijanti odabran je optimalan model za provedbu ispitivanja. Uspostavljanjem fizikalnog modela u laboratorijskim uvjetima omogućeno je ispitivanje smanjenja vodopropusnosti u uzorcima pijeska, šljunka te njihove mješavine. Usporedbom rezultata prije i nakon ugradnje ekspandirajuće poliuretanske smole u navedene materijale tla istražen njezin učinak na smanjenje vodopropusnosti navedenih materijala.

Temeljem znanja stečenih laboratorijskim ispitivanjima na spomenutim modelima, dane su preporuke za buduća znanstvena istraživanja ove teme.

***Ključne riječi:*** *nasip, vodopropusnost, ekspandirajuća poliuretanska smola, Darcyjev zakon, fizikalni model*

## 8.1. ABSTRACT

*Use of expansive polyurethane resin in prevention of hydraulic failure of flood protection levees*

*Marko Perjan, Mihovil Rajković, Filip Štos*

Positive experience in former use of expansive polyurethane resin in geotechnical practice has provided a basis in research of using the same technology in hydraulics, in terms of restoration and improvement of levees. Recent research showed great results of expansive polyurethane resin and gave rise for future research. Considering multiple variants, the chosen physical model was optimal for the research. Upon establishing a model in laboratory conditions, tests could be conducted, and thus water permeability reduction could be measured in sand, gravel and mixture of sand and gravel. The effect of expansive polyurethane resin could be tested by comparing the results of hydraulic conductivity coefficients before and after the injection of expansive polyurethane resin.

Based on all the knowledge and skills acquired within the laboratory research, future scientific research methods are proposed.

**Key words:** *levee, water permeability, expansive polyurethane resin, Darcy's law, physical model*