

## STATIČKI PRORAČUN KANALIZACIONIH CEVI

Dejan LJUBISAVLJEVIĆ, Milan JOKSIMOVIĆ  
Građevinski fakultet u Beogradu

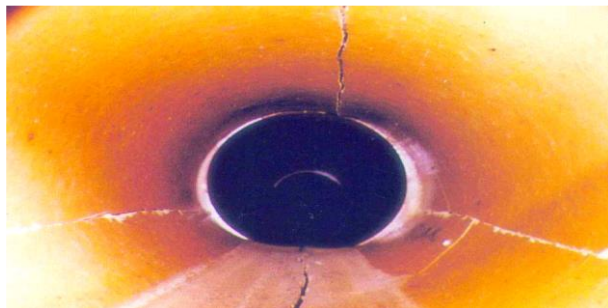
### REZIME

Ovaj rad bavi se statičkim proračunom ukopanih kanalizacionih cevi preko nemačkog standarda, radnog lista ATV-DVWK-A 127. Za statički proračun uzete su cevi od četiri različita materijala: betona, armiranog betona, polietilena HDPE i od poliestera ojačanog staklenim vlaknima UP-GF. Proračunom je izvršena provera napona, dilatacija, deformacija i stabilnosti zida cevi nominalnih prečnika DN 500 a za izabranu klasu cevi. Osim opterećenja od tla u statički proračun su ušla i dinamička opterećenja od drumskog saobraćaja a računalo se sa uticajem podzemne vode i bez tog uticaja.

**Ključne reči:** statički proračun, napon, dilatacija, deformacija, stabilnost

### 1. UVOD

Projektovanje i izgradnja kanalizacione mreže spada u jedne od najvažnijih oblasti javnih radova kojima se inženjeri bave. Međutim, ukopani cevni sistemi koji su neadekvatno projektovani ili loše izvedeni mogu dovesti do otežanog funkcionisanja ili čak do potpunog prekida funkcije odvođenja upotrebljenih i atmosferskih voda.



Slika 1. Oštećenja ukopane kanalizacione cevi

Najkompletniji i najdetaljniji računski metod koji se koristi za statičke proračune kanalizacionih cevi u Evropi je nemački metod i nosi naziv: "ATV-DVWK-A 127, Statički proračun kanala i cevovoda za otpadne vode". Ovaj metod uključuje sve tipove instalacija, efekte krutosti cevi, varijacije modula tla itd.

Materijali su izabrani tako da se računске provere vrše za krute: betonska i armirano betonska i za fleksibilne cevi: cev od polietilena visoke gustine HDPE i cev od nezasićene poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima UP-GF a zbog njihovih razlika u ponašanju i načinu provere. Poliestar je nominalne krutosti SN 5000. Sve cevi su glatke cevi nominalnog prečnika DN 500, kružnog poprečnog preseka, a različite debljine punog zida,  $s=85$  mm za betonsku cev;  $s=75$  mm za armirano-betonsku;  $s=21,6$  mm za polietilensku i  $s=10$  mm za cev od poliestera.

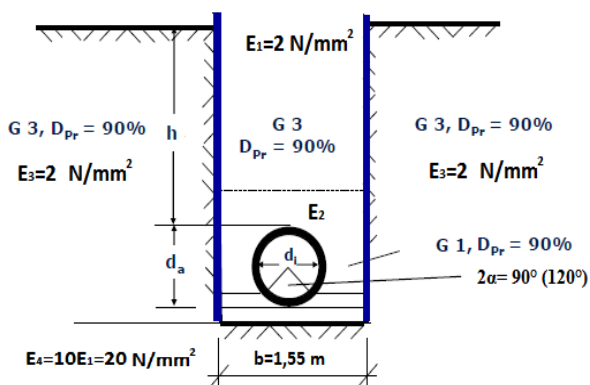
Proračun je rađen za vrednosti nadsloja tla od  $h=0,5$  do  $h=5$  m u intervalu od 0,5 m a sa uticajem podzemne vode (visine  $h_w=2$  m iznad dna cevi) kao i bez uticaja podzemne vode. Usvojen je oblik rova sa paralelnim zidovima, minimalne širine  $b=1,55$  m (slika 2) sa vertikalnom podgradom koja se izvlači tek nakon nasipanja i sabijanja (uslovi zatrpavanja i ugradnje A2 i B2).

Ugao naleganja je  $2\alpha=90^\circ$  za krute odnosno  $2\alpha=120^\circ$  za savitljive cevi. Usvojen je I slučaj postavljanja cevi (oslonac na tlu). Usvojeno je da je postojeće tlo iz grupe G3 sa kojim se vrši i zatrpavanje dok se zona cevovoda ispunjava peskom (grupa G1). Usvojeni moduli deformacije tla su takođe dati na slici 2, dok modul  $E_2$  za drugu zonu, zonu cevi, se računa preko osnovnog modula  $E_{2,0}=6$  N/mm<sup>2</sup> za usvojenu grupu tla i uslove ugradnje i nasipanja a koji se redukuje za faktore puzanja, uticaja podzemne vode i relativne širine iskopa. Vrednosti iz tabele 1 crnom bojom se usvajaju prema [1] dok se one crvenom bojom računaju. Vrednosti reprezentativne dilatacije  $\epsilon_R$  (kratkotrajne i dugotrajne) za poliestar, sa kojom će se

uporediti dobijene vrednosti dilatacije cevi, se računaju preko relativne deformacije loma.

$$\epsilon_R = \pm 4,28 \cdot \frac{s}{d_m} \cdot \frac{\Delta d_{Loma}}{d_m} \quad [\%]$$

Na slikama 4-11 dati su dijagrami zavisnosti koeficijenta sigurnosti  $\gamma$  od visine nadsloja  $h$  za teme, bočne strane i dno cevi, kratkotrajni i dugotrajni za slike 8,9,10 i 11. Na slikama 12 i 13 data je zavisnost relativne vertikalne deformacije  $\delta_v$  od visine nadsloja  $h$  sa i bez uticaja podzemne vode.



Slika 2. Rov sa paralelnim zidovima i podgradom sa usvojenim grupama tla po zonama, stepenima zbijenosti  $D_{pr}$  i modulima deformacije tla

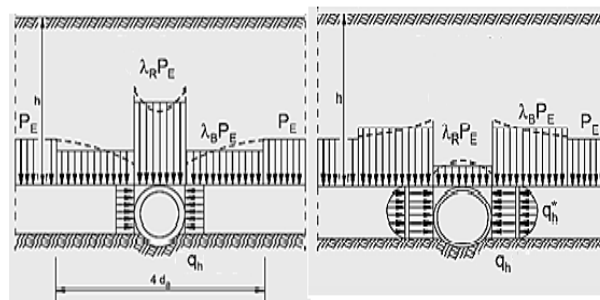
Tabela 1. Karakterisitike ispitivanih cevni materijala [1]

Materijal	Reprezentativna vrednost modula elastičnosti $E_R$		Specifična težina $\gamma_R$	Reprezentativna vrednost zatezne čvrstoće pri savijanju $\sigma_R$	
	kratkotrajno $E_{R,K}$	dugotrajno $E_{R,L}$		kratkotrajno $\sigma_{R,K}$	dugotrajno $\sigma_{R,L}$
jedinica	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	kN/m <sup>3</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>
Beton	30 000		24	6,4	
Armirani beton	30 000		25	6	
PolietilenH DPE	800	160	9,4	21	14
Poliester UP-GF	8436	5416	17,5	-	-

## 2. OPTEREĆENJA KOJA DELUJU NA CEV

### 1) Opterećenje od tla - $p_E$

Na slici 3 date su šeme opterećenja krute i savitljive cevi. Vertikalno opterećenje od tla je dato preko koeficijenta zbijenosti,  $\lambda_R$  iznad cevi i  $\lambda_B$  pored cevi, i tek na rastojanju od 1,5 spoljašnjih prečnika  $d_a$  opterećenje od tla dobija vrednost  $p_E$ .



Slika 3. Šema opterećenja od tla krute (levo) i savitljive (desno) cevi

$$p_E = \kappa \cdot \gamma_B \cdot h$$

$$\kappa = \frac{1 - e^{-2 \frac{h}{b} K_1 \cdot tg \delta}}{2 \frac{h}{b} K_1 \cdot tg \delta} \quad [-]$$

gde je  $\kappa$  koeficijent smanjenja za opterećenje rova prema teoriji silosa,  $K_1$  odnos pritiska tla,  $\delta$  ugao trenja zida rova,  $\gamma_B = 20 \text{ KN/m}^3$  specifična težina tla.

### 2) Opterećenje od saobraćaja - $p_V$

$$p_V = \varphi \cdot p,$$

$$p = p(h, d_m, F_A, F_E, r_A, r_E)$$

gde je  $\varphi$  koeficijent udara,  $F_A, F_E, r_A, r_E$  pomoćne sile i opterećenja, i zavise od merodavnog tipa drumskog vozila koje je teško drumsko vozilo SLW 60.

Ukupno vertikalno opterećenje od saobraćaja i tla je:

$$q_V = \lambda_{RG} \cdot p_V + p_E$$

gde koeficijent zbijenosti  $\lambda_{RG}$  zavisi od više faktora: relativne širine rova, krutosti cevi, relativne projekcije cevi itd.

### 3) Opterećenje od spoljašnjeg pritiska podzemne vode - $p_a$

### 4) Sopstveno opterećenje od težine cevi - $\gamma_R$ s i težine vode u cevi - $\gamma_w$

## 3. PROVERA NAPONA I DILATACIJA

Naponi i dilatacije se proračunavaju sa sračunatim silama u preseku za teme cevi, bočne strane i dno cevi preko formula koje su u sledećem obliku:

$$N = n \cdot q \cdot r_m$$

$$M = m \cdot q \cdot r_m^2$$

gde su  $m$  i  $n$  koeficijenti momenata savijanja i normalnih sila koji zavise od ugla naleganja  $2\alpha$  i mesta

preseka. Sa  $r_m$  je označen poluprečnik težišne ose poprečnog preseka cevi,  $q$  je opterećenje koje se računa za:

- ukupno vertikalno opterećenje  $q_v$ ,
- bočno usled vertikalnog opterećenja od tla  $q_h$  (slika 3)

$$q_h = K_2 (\lambda_B p_E + \lambda_B \cdot d_a / 2)$$

- bočno usled deformacije savitljivih cevi  $q_h^*$ , i
- bočno usled natopljenosti posteljice  $q_{hw}^*$  takođe kod savitljivih cevi:

$$q_h^* = f(q_v, q_h, c)$$

gde su  $c$  koeficijenti deformacije koji zavise od naležućeg ugla  $2\alpha$

$$q_{hw}^* = f(\gamma_w, c, geometrija\ cevi)$$

zatim  $\gamma_R$  s za težinu cevi i  $\gamma_w r_m$  za težinu vode u cevi.

Suma svih normalnih sila i momenata savijanja ubacuju se u formulu za napon kod provere napona:

$$\sigma = \frac{\sum N}{A} \pm \frac{\sum M}{W} \alpha_k$$

$$\alpha_k = 1 \pm \frac{s}{3 \cdot r_m} \quad [-]$$

gde je:  $A = s \times 1mm$ ,  $W$  otporni moment,  $\alpha_k$  faktor korekcije kojim se uzimaju u obzir krivine unutrašnjeg i spoljašnjeg ivičnog vlakna. Naponi se proveravaju za krute cevi i savitljive cevi sa modulom elastičnosti, dok se za plastične cevi sa nominalnom krutošću (poliester) proveravaju dilatacije:

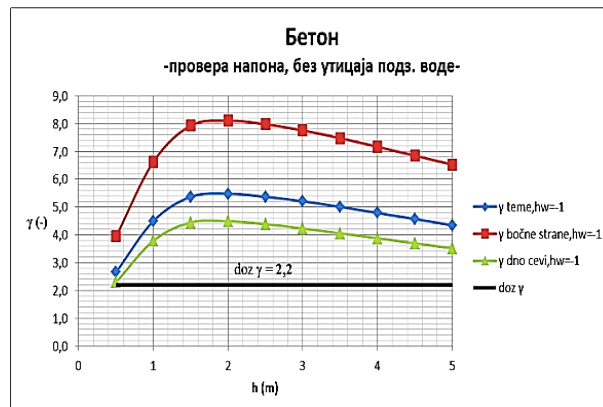
$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{s}{2 \cdot r_m^3 \cdot 8S_0} \cdot \left( \frac{s \cdot \sum N}{6} \pm \sum M \cdot \alpha_k \right) \quad [\%]$$

Cilj proračuna je da se tako dobijeni naponi i dilatacije uporede sa reprezentativnim vrednostima napona odnosno dilatacija i tako dobiju raspoloživi koeficijenti sigurnosti.

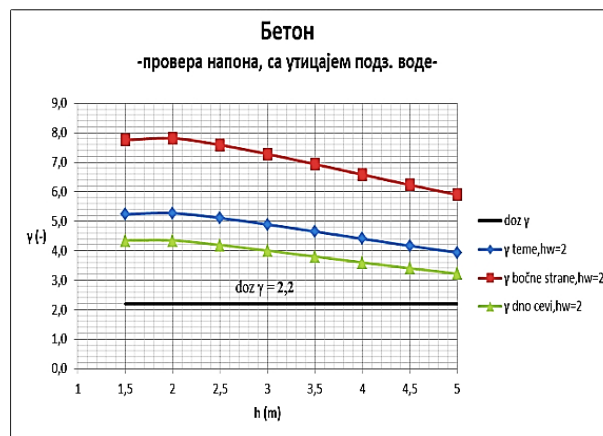
$$\gamma = \frac{\sigma_R}{\sigma} = \frac{\varepsilon_R}{\varepsilon} \geq doz \ \gamma$$

$$\gamma = \frac{\bar{\sigma}_R}{\sigma} = \frac{\bar{\varepsilon}_R}{\varepsilon} \geq doz \ \gamma$$

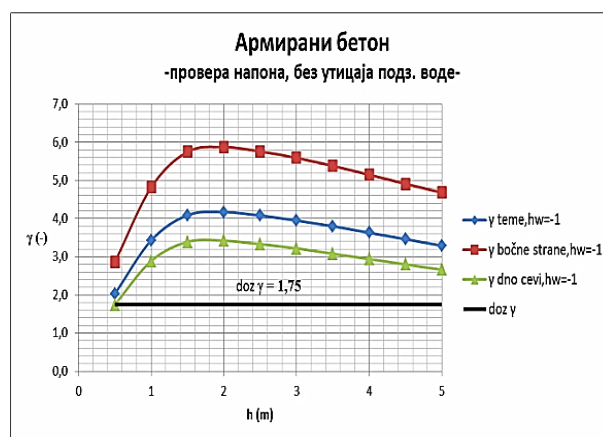
Ponderisane vrednosti zateznog napona  $\bar{\sigma}_R$  i dilatacije  $\bar{\varepsilon}_R$  se koriste kod dugotrajnog postupka provere sigurnosti za savitljive cevi.



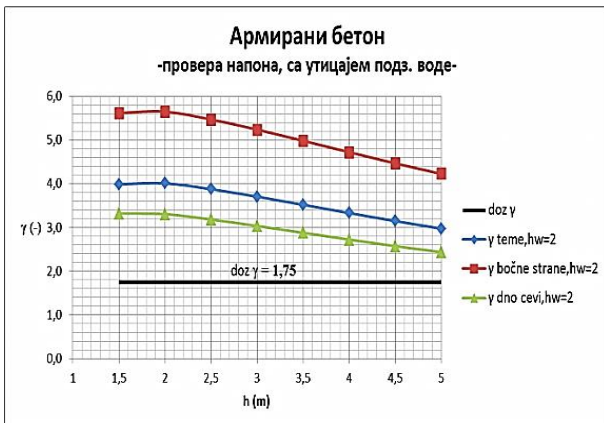
Slika 4. Dijagram koef. sigurnosti kod provere napona za beton bez uticaja podzemne vode, doz  $\gamma = 2,2$



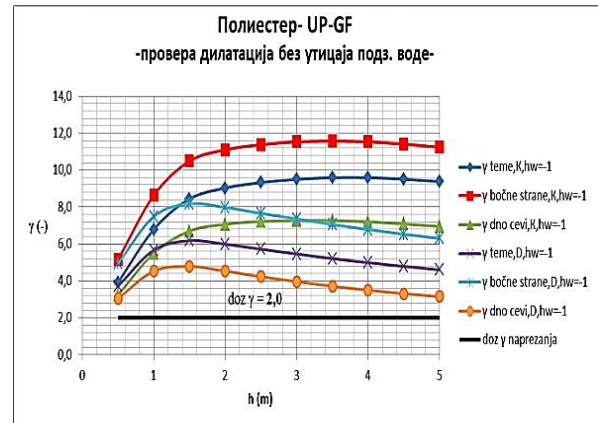
Slika 5. Dijagram koef. sigurnosti kod provere napona za beton sa uticajem podzemne vode, doz  $\gamma = 2,2$



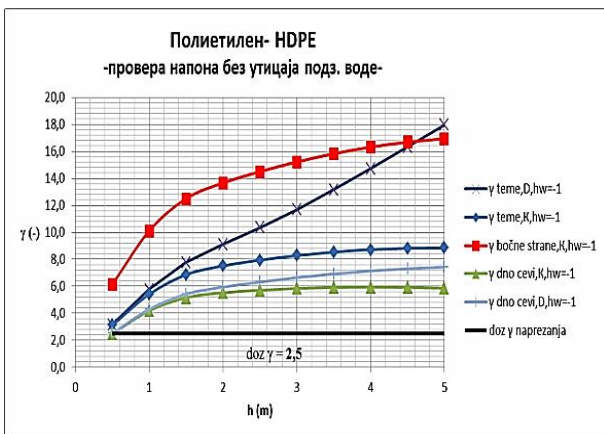
Slika 6. Dijagram provere napona za armirani beton bez uticaja podzemne vode, doz  $\gamma = 1,75$



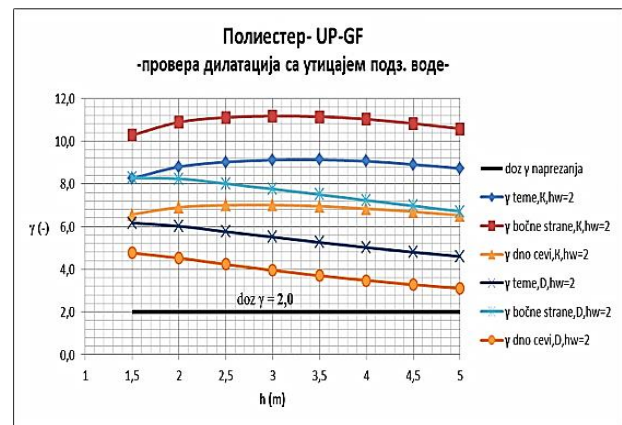
Slika 7. Dijagram provere napona za armirani beton sa uticajem podzemne vode, doz  $\gamma = 1,75$



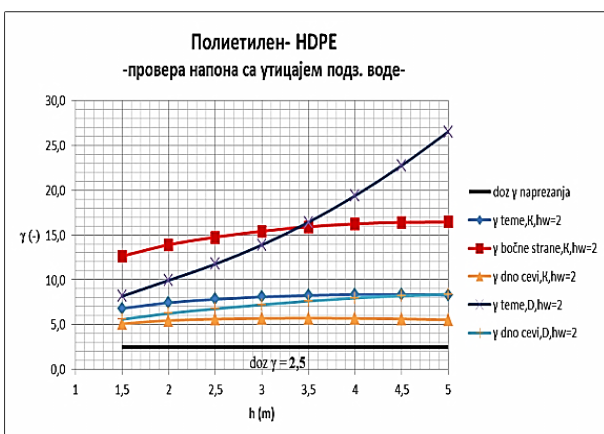
Slika 10 - Dijagram provere napona za poliester UP-GF bez uticaja podzemne vode, doz  $\gamma = 2,0$



Slika 8. Dijagram provere napona za polietilen HDPE bez uticaja podzemne vode, doz  $\gamma = 2,5$



Slika 11. Dijagram provere napona za poliester UP-GF sa uticajem podzemne vode, doz  $\gamma = 2,0$



Slika 9. Dijagram provere napona za polietilen HDPE sa uticajem podzemne vode, doz  $\gamma = 2,5$

#### 4. PROVERA DEFORMACIJA

Deformacija cevi je tradicionalno glavni fokus u dizajnu plastičnih. Vrednosti deformacija krutih cevi su zanemarljive ili minimalne pre loma pa se stoga provera deformacija vrši samo za fleksibilne cevi. Vertikalno opterećenje na cev uzrokuje njenu deformaciju tj. smanjenje njene vertikalne visine a cev poprima elipsast oblik. Razlika početne vrednosti prečnika i vrednosti nakon opterećenja, kratkotrajnog ili dugotrajnog, je negativna i izražava se u milimetrima. Linearna deformacija cevi tj. vertikalna promena prečnika  $\Delta d_v$ , nastala usled spoljašnjeg opterećenja se računa za fleksibilne cevi sa koeficijentima deformacije  $c$  preko sledeće formule:

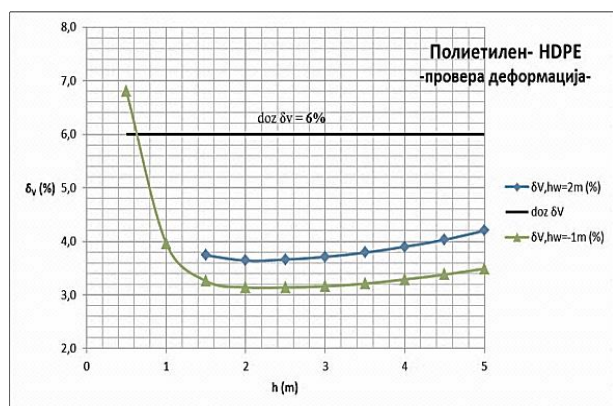
$$\Delta d_v = \frac{c_{v,qv} \cdot q_v + c_{v,qh} \cdot q_h + c_{v,qh^*} \cdot q_h^*}{S_R} \cdot 2r_m \quad [\text{mm}]$$

Relativna vertikalna deformacija, koja predstavlja odnos apsolutne vertikalne deformacije i srednjeg prečnika cevi, izražava se u procentima i iznosi:

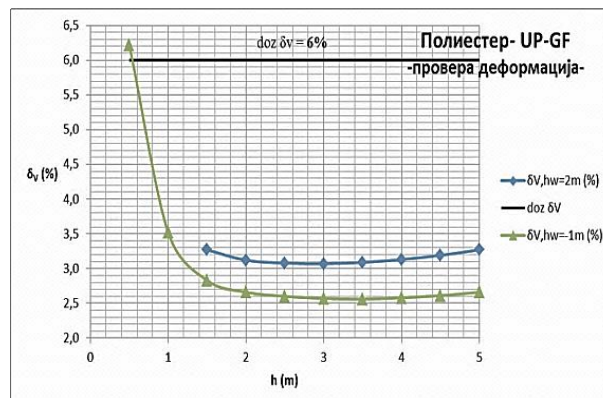
$$\delta_v = \frac{\Delta d_v}{d_m} \cdot 100 \leq \text{dop} \delta_v = 6 \quad [\%]$$

Cilj proračuna je da provjeri da li je dugotrajna elastična deformacija manja od dopuštenih propisanih  $\text{dop} \delta_v = 6\%$ . Ukoliko je deformacija veća od 6 % treba dokazati da je postojeća vrednost koeficijenta sigurnosti  $\gamma$  (iz superpozicije) veće ili jednako petostrukoj vrednosti zahtevanog koeficijenta sigurnosti postojeće  $\gamma \geq 5$  puta dozvoljeno  $\gamma$ . Ukoliko to nije ispunjeno mora se deformacija računati nelinearnim postupkom tj. stanje će se odrediti na deformisanoj geometriji cevi i tada se dopuštena granica deformacije povećava na 9%.

Na slikama 12 i 13 dati su rezultati provere dugotrajnih deformacija za slučaj uticaja podzemne vode (plavom bojom za nadsloj  $h=1,5-5\text{m}$ ) i bez uticaja podzemne vode (zelenom bojom  $h=0,5-5\text{m}$ ). Sa dijagrama se uočava da za nadsloj tla od  $h=0,5\text{m}$  kada je opterećenje od saobraćaja najveće a od tla najmanje, relativna deformacija cevi je veća od dopuštene granice od 6%. Nakon sprovedenog nelinearnog proračuna (uprošćenom metodom) obe cevi imaju vrednosti relativne deformacije ispod dozvoljenih 9% za nelinearni postupak provere.



Slika 12. Dijagram provere deformacija za polietilen sa i bez uticaja podzemne vode,  $\text{dop} \delta_v = 6\%$



Slika 13. Dijagram provere deformacija za poliester sa i bez uticaja podzemne vode,  $\text{dop} \delta_v = 6\%$

## 5. PROVERA STABILNOSTI

Proračun provere stabilnosti na izvijanje cevi služi da se odredi odnos između kritičnog opterećenja i stvarnog opterećenja tj. koeficijenta sigurnosti  $\gamma$ , koji treba da se uporedi sa dozvoljenim koeficijentom sigurnosti,  $\text{dop} \gamma$ , a koji zavisi od materijala cevi i klase sigurnosti.

### 5.1 Provera stabilnosti za opterećenje od tla i saobraćaja

Provera stabilnosti od izvijanja za ukupno vertikalno opterećenje  $q_v$  se vrši preko sledećih formula za kritično opterećenje:

$$\text{krit } q_v = 2 \cdot \kappa_{v2} \cdot \sqrt{8S_0 \cdot S_{Bh}}, \text{ za } V_{RB} \leq 0,1$$

$$\text{krit } q_v = \kappa_{v2} \cdot \left( 3 + \frac{1}{3V_{RB}} \right) \cdot 8S_0, \text{ za } V_{RB} > 0,1$$

gde je  $\kappa_{v2}$  faktor redukcije koji uzima u obzir elasto-plastične osobine tla i prethodne deformacije koje iznose 1%;  $S_0$  je krutost cevi a  $S_{Bh}$  horiz. krutost posteljice;  $V_{RB}$  krutost sistema tlo-cev koja definiše da li je cev kruta ili savitljiva:

$$V_{RB} = \frac{8S_0}{S_{Bh}} > 1 \rightarrow \text{kruta cev}$$

$$V_{RB} < 1 \rightarrow \text{savitljiva cev}$$

Koeficijent sigurnosti na izvijanje dat je kao odnos kritičnog ukupnog vertikalnog opterećenja od izvijanja i vertikalnog opterećenja:

$$\gamma = \frac{krit\ q_V}{q_V} \geq doz\ \gamma = 2,0$$

### 5.2 Provera stabilnosti za spoljašnji pritisak od vode

Proračun stabilnosti je važniji u slučaju spoljašnjeg pritiska vode. Provera stabilnosti na izvijanje usled udarnog opterećenja spoljašnjeg pritiska vode se izvodi zanemarujući pritisak zemlje u odnosu na pritisak vode. Kritično opterećenje od spoljašnjeg pritiska vode se računa preko sledeće formule:

$$krit\ p_a = \kappa_a \cdot a_D \cdot S_R$$

gde je  $a_D$  koeficijent udara. Spoljašnji pritisak vode  $p_a$  predstavlja vrednost hidrostatičkog pritiska za dno cevi, tj. proizvoda specifične težine vode  $\gamma_w = 10\text{ KN/m}^3$  i visine nivoa vode iznad dna cevi  $h_w = 2\text{ m}$ :

$$p_a = \gamma_w \cdot h_w = 20\text{ KN/m}^2$$

Koeficijent sigurnosti na izvijanje se dobija kao odnos kritičnog pritiska i dostignutog spoljašnjeg pritiska  $p_a$ :

$$\gamma = \frac{krit\ p_a}{p_a} \geq doz\ \gamma = 2,0$$

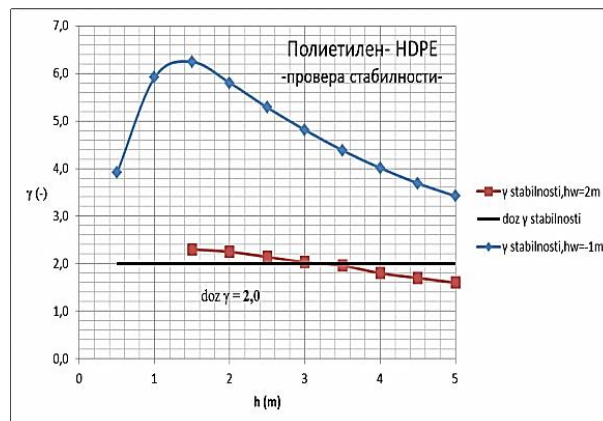
### 5.3 Superpozicija ukupnog vertikalnog opterećenja i spoljašnjeg pritiska od vode

Superpozicijom oba uticaja dobija se merodavni koeficijent sigurnosti za stabilnost na izvijanje ali sada sa  $q_{V,A}$  vertikalnim opterećenjem sa računatom silom uzgona. Formula za koeficijent sigurnosti za međusobno dejstvo ukupnog vertikalnog opterećenja i spoljašnjeg pritiska vode:

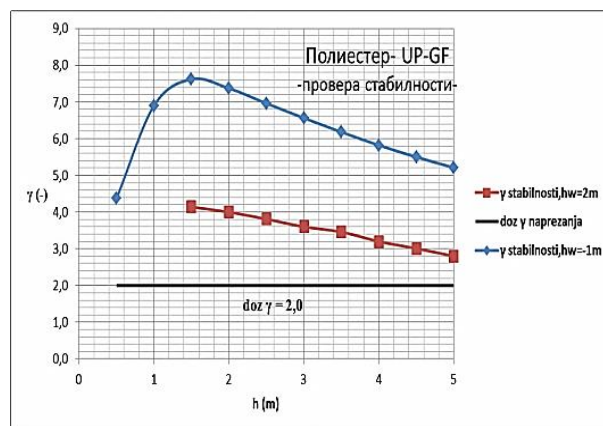
$$\gamma = \frac{1}{\frac{q_{V,A}}{krit\ q_V} + \frac{p_a}{krit\ p_a}} \geq doz\ \gamma = 2,0$$

## 6. ZAKLJUČAK

Prilikom statičkog proračuna cevi javljaju se određeni problemi. Kako bi se proračun uspešno izveo potrebno je unapred znati karakteristike zemljišta u kome će se ugrađivati cevi (zapreminsku težinu, modul elastičnosti,



Slika 14. Dijagram provere stabilnosti za polietilen, doz  $\gamma = 2,0$



Slika 15. Dijagram provere stabilnosti za poliester, doz  $\gamma = 2,0$

ugao unutrašnjeg trenja, stepen sabijenosti...). Kako u praksi to često nije slučaj tj. ne znaju se podaci o tlu i uslovima ugradnje, izbor tih elemenata proračuna je profesionalana odluka inženjera. U praksi nisu apsolutno neophodni da se znaju svi detalji proračuna ali zbog složene prorode interakcije cevi i tla česte su greške u procenama.

Najosetljiviji parametri proračuna su: grupa tla, stepen zbijenosti tla i prisutnost saobraćaja iznad ili u blizini cevi, uticaj podzemne vode.

Potrebne su potvrde kvaliteta cevni materijala, sa specifikacijama izvršenih testova, iako su vrdnosti koje se usvajaju iz Tabele 3: Karakteristike materijala, predložene od ATV-a, na strani sigurnosti.

U svim naporima dostizanja "savršenstva" standarda, jasnoću i razumljivost ne bi trebalo ostaviti iza sebe, u cilju pravilnog izvođenja radova na gradilištu.

Nakon obavljenog statičkog proračuna dobijeni su rezultati u vidu tabela i dijagrama za četiri cevna materijala koja su ispitivana: beton, armirani beton, polietilen visoke gustine HDPE i nezasićena poliesterska smola ojačana staklenim vlaknima UP-GF. Sve ispitivane cevi su nominalnih prečnika DN 500.

Cevi od betona i armiranog betona uspešno prolaze provere napona, za nadsloj tla od 0,5-5 metara i prolazak teških kamiona neposredno iznad njih, sa koeficijentima sigurnosti na naprezanje iznad dozvoljenih minimalnih granica.

Međutim, cevi od plastičnih materijala, od polietilena visoke gustine i od nezasićenog poliestera ojačanog staklenim vlaknima, ne prolaze proveru deformacije za pola metara nadsloja tla kada je dinamičko opterećenje od saobraćaja dominantno ali zato prolaze nelinearnu proveru deformacije. Zato se njihova upotreba za plitko ukopavanje ispod saobraćajnica (ispod jednog metra nadsloja) preporučuje sa dodatnim oprezom.

Takođe cevi od polietilena ne prolaze proveru stabilnosti na izvijanje zidova cevi za slučaj uticaja podzemne vode u nivou od 2 metara iznad dna cevi a za nadslojeve tla od 3,5 -5 metara što se može videti sa priloženih grafika. Zbog toga se preporučuje oprez i obavezan statički proračun prilikom ugradnje cevi od polietilena visoke gustine za veće nadslojeve tla ako

postoji opasnost od uticaja podzemne vode. Za razliku od njih cevi od ojačanog poliestera izabrane klase u potpunosti prolaze proveru stabilnosti na izvijanje zida cevi kako za slučaj bez uticaja podzemne vode tako i za slučaj sa pomenutim uticajem. Sa tog aspekta bolje su se pokazale od polietilenskih cevi.

Alternativa ovom proračunu je kompjuterska metoda konačnih elemenata sa grafičkim prikazima ali zahteva poznavanje posebnih aplikacija rađenih u tu svrhu.

#### LITERATURA

- [1] Radni list ATV-DVWK-A 127 Statički proračun kanala i cevovoda za otpadne vode 3. korigovano izdanje, Udruženje za tenologiju vode i sanitarno inženjerstvo, 2013, Beograd, str. 11-52.
- [2] Falter, В.: Статички прорачун канала и цевовода преко ATV DVWK-A 127, Schriftenreihe Institut für Rohrleitungsbau FH Oldenburg, Bd. 24, Vulkan Verlag Essen (2001) str. 366-380.
- [3] Leonhardt, G.: Einfluß der Bettungssteifigkeit auf die tragfähigkeit und die Verformungen von flexiblen Rohren [Uticaj krutosti uležištenja na nosivost i deformacije savitljivih cevi]. Straße-Brücke-Tunnel 24, Vol. 4 (1972) str. 63-68.
- [4] Technical manual (2010), Polieco, Corrugated pipes for non-pressure sewer and drainage systems [Korugovane cevi za kanalizacione i drenažne sisteme koji nisu pod pritiskom]

## STATIC CALCULATION OF SEWER PIPES

by

Dejan LJUBISAVLJEVIĆ and Milan JOKSIMOVIĆ  
Faculty of Civil Engineering, University of Belgrade

### Summary

This work deals with static calculation of buried sewer pipes via german standard, worksheet ATV-DVWK-A 127. For static analysis were taken pipes for the four different materials: concrete, reinforced concrete, high density polyethylene HDPE and glass fiber reinforced polyester resin UP-GF. The calculation tested stresses, strains, deformations and stability of the pipe wall with a nominal diameter of DN 500 and for chosen class of

the pipe. Besides loads of soil in static analysis were entered dynamic loads from road traffic and computed with the influence of underground water and also without that influence.

Keywords: static calculation, stress, strain, deflection, stability

Redigovano 20.11.2015.