

Janko LOGAR

doc.dr., univ.dipl.inž.grad., Univerza v Ljubljani, FGG, Katedra za mehaniko tal z laboratorijem

Vanja SELAN

univ.dipl.inž.grad., Univerza v Ljubljani, FGG, Katedra za mehaniko tal z laboratorijem

Boštjan PULKO

asist.dr., univ.dipl.inž.grad., Univerza v Ljubljani, FGG, Katedra za mehaniko tal z laboratorijem

Bojan MAJES

izr.prof.dr., univ.dipl.inž.grad., Univerza v Ljubljani, FGG, Katedra za mehaniko tal z laboratorijem

## **STATISTIČNA ANALIZA REZULTATOV NAPENJALNIH PREIZKUSOV GEOTEHNIČNIH SIDER V MEHKIH KAMNINAH**

**POVZETEK:** Nosilnost sidra zagotavlja trenje ob plašču veznega dela sidra. Večjo silo naj bi torej dobili z daljšim veznim delom. Pa je res tako? Analiza preko 1000 meritev količnika lezenja  $k$  pri napenjanju sider govori drugače.

## **STATISTICAL ANALYSIS OF THE LOAD TEST RESULTS PERFORMED ON GEOTECHNICAL ANCHORS IN SOFT ROCKS**

**SUMMARY:** The bearing capacity of anchor depends on the shear strength between anchor fixed length and ground. The larger the anchor fixed length, the larger the capacity. But do anchors really behave like that? The analysis of more than 1000 measurements of creep parameter  $k$  on installed anchors reveals another story.

## UVOD

V zadnjih letih smo v Sloveniji naredili velik napredek pri zagotavljanju trajnosti in kakovosti vgradnje geotehničnih sider. Tema pomembnima vidikoma posvečamo toliko pozornosti, da smo morda celo nekoliko zanemarili primarno nalogo sider – zagotavljanje ustrezne nosilnosti ali pa vsaj razvoj na področju zagotavljanja čim večje nosilnosti posameznega sidra. Zato smo se teoretično (Logar, Majes, Ceket, 2002), kasneje pa tudi s statistično analizo rezultatov enostavnih in popolnih napenjalnih preizkusov sider posvetili ugotavljanju možnosti doseganja večjih nosilnosti sider.

## NOSILNOST SIDER

Računsko skušamo nosilnost sidra oceniti na osnovi enačbe

$$T \propto \tau_s \cdot D \cdot \pi \cdot l_v \quad (1)$$

kjer je:

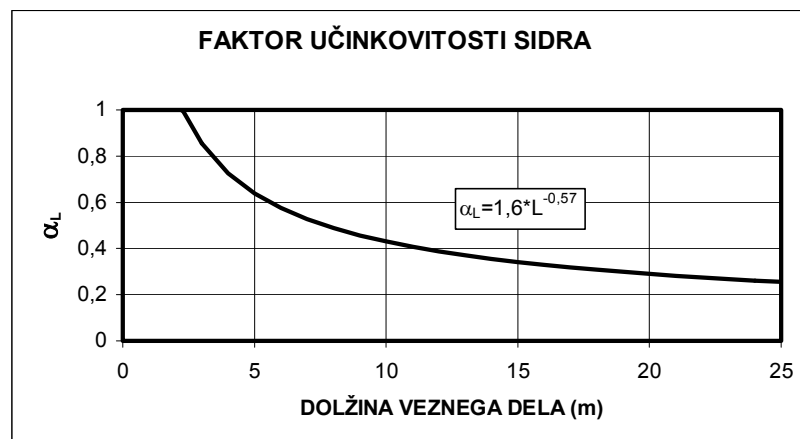
$\tau_s$	strižna trdnost stika med tlemi in sidrom ob veznem delu,
$D$	premer vrtine in
$l_v$	dolžina veznega dela sidra.

Izkaže se, da nosilnost ne narašča premo sorazmerno z dolžino veznega dela sidra kot nakazuje enačba (1). Barley je uvedel t.i. faktor učinkovitosti sidra  $f_{eff}$ , ki je odvisen od dolžine veznega dela sidra  $l_v$ . Faktor učinkovitosti pove, da z daljšanjem veznega dela ne pridobivamo linearno na nosilnosti sidra (enačba 2), saj je za sidra z daljšim veznim delom faktor učinkovitosti manjši (enačba 3).

$$T = f_{eff} \cdot \tau_s \cdot D \cdot \pi \cdot l_v \quad (2)$$

Faktor učinkovitosti  $f_{eff}$  je Barley na osnovi meritev obnašanja sider različnih veznih dolžin, vgrajenih v trdnih glinah in mehkih kamninah, zapisal v obliki enačbe (3), ki je grafično prikazana na sliki 1.

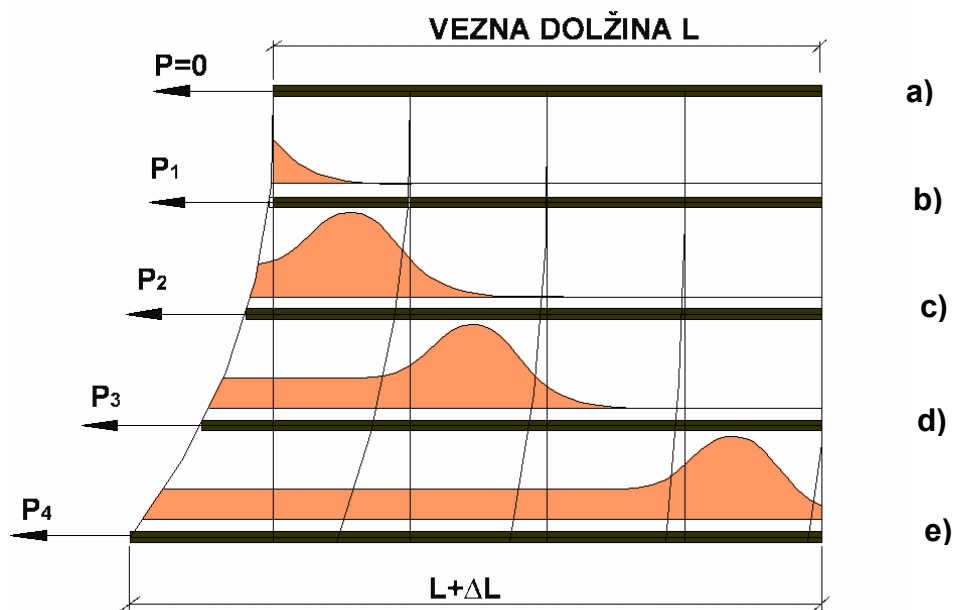
$$f_{eff} = 1,6 \cdot l_v^{-0,57} \quad (3)$$



Slika 1: Faktor učinkovitosti sidra

S slike vidimo, da je uporaba daljših veznih dolžin zelo malo učinkovita. Kljub temu večinoma vgrajujemo sidra z veznimi dolžinami med 7 in 8 m, kar so skrajne še smiselne vezne dolžine.

Faktor učinkovitosti sidra z dolžino pada pretežno zaradi učinka podajnosti sidra (pri majhnih obremenitvah se deformira in s tem aktivira strižna trdnost le na kratkem odseku) in zaradi morebitnega zmanjšanja strižnega odpora na rezidualno vrednost, kar je grafično prikazano na sliki 2.



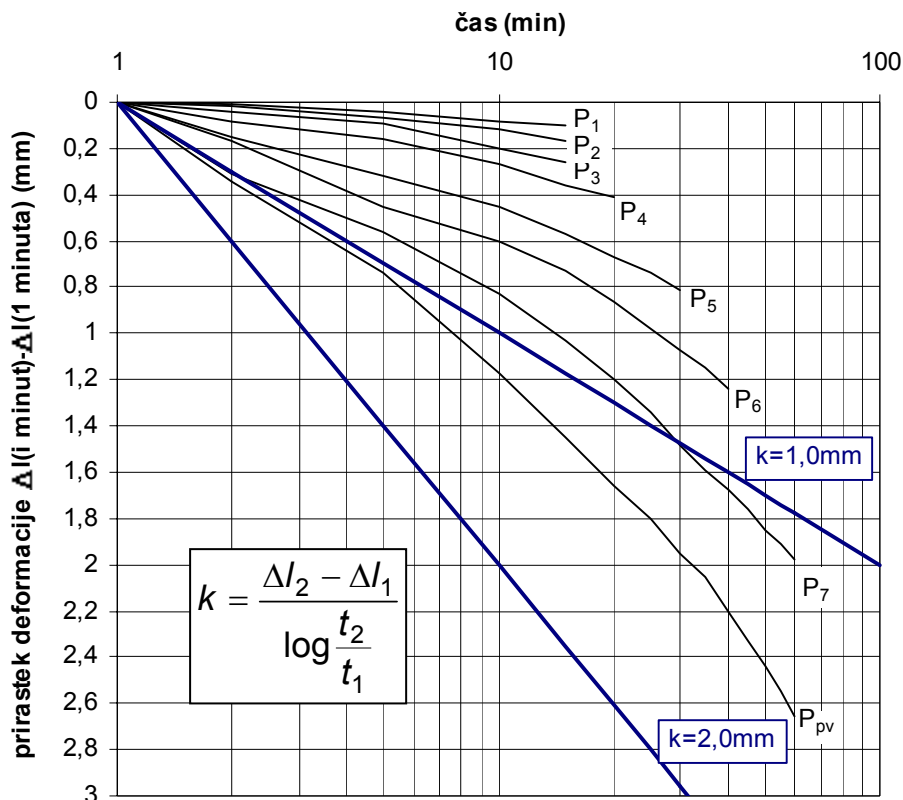
Slika 2: Shematski prikaz prenosa sile iz sidra na hribino preko trenja ob veznem delu

## TESTIRANJE SIDER

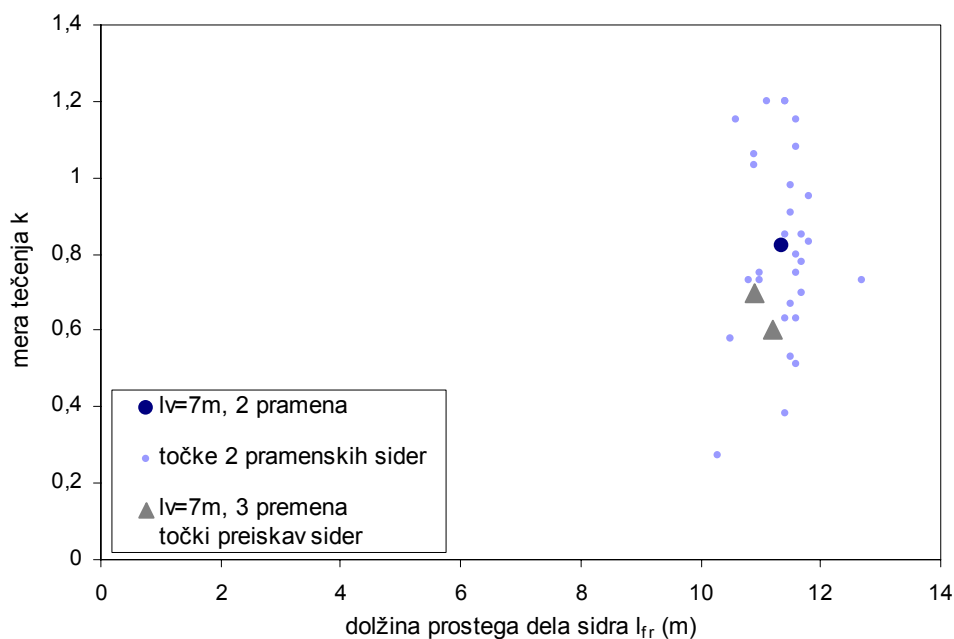
Pri testiranju sider skladno s predpisi SIA V 191 ali EN 1537 se nosilnost sider določa posredno, pri čemer je glavni parameter količnik lezenja  $k$ , katerega definicijo prikazuje slika 3. Sidro uspešno prestane preizkus v primeru, da je pri 125% delovne obtežbe (sile, pri kateri se sidro zaklini) izmerjeni količnik lezenja  $k$  pri enostavnem ali celovitem napenjalnem preizkusu manjši od količnika  $k_{adm}$ , dobljenega s preiskavo sidra na testnih sidrih na isti lokaciji.

Lezenje je torej poglobitni kriterij nosilnosti sider. Namen testnih sider je predvsem ugotoviti nosilnost stika med veznim delom sidra in tlemi. Zaradi posrednosti meritve pa se moramo vprašati ali s preiskavami res merimo trenjsko nosilnost tega stika ali je izmerjeno lezenje posledica drugih učinkov.

Našo pozornost so pritegnila sidra v razmeroma dobro nosilnem flišu. Zaradi majhne statično potrebne sidrne sile so bila s projektom predvidena dvovrвна sidra. Da bi pri preiskavi sider lahko vezni del obremenili do ustrezno večjih sil, so bila testna sidra trivrvna. Pri izvedbi dvovrvnih sider so imeli izvajalci izjemno velike težave, da bi zagotovili ustrezno majhne količnike lezenja. Ali torej flišna hribina ob 7 m dolgem veznem delu sidra pri premeru vrtine 145 mm ni sposobna zagotoviti odpora 320 kN, kolikor je znašala testna sila pri napenjanju dvovrvnih sider? Na istem objektu so testna trivrvna sidra s sicer popolnoma enako geometrijo in izvedbo kazala ugodnejše rezultate (slika 4). Iz povedanega sledi, da z meritvami lezenja ne testiramo nosilnosti hribine vzdolž veznega dela sidra, ampak merimo obnašanje celotnega sistema, pri čemer je lezenje očitno pogojeno tudi s konstrukcijo sidra in ne nujno s popuščanjem hribine ali stika.



**Slika 3:** Rezultati preiskave sidra in definicija količnika lezenja  $k$



**Slika 4:** Zbrani rezultati napenjalnih preizkusov 2 in 3 vrstnih sider na opornem zidu Varda.

## BAZA PODATKOV IN STATISTIČNA ANALIZA REZULTATOV NAPENJALNIH PREIZKUSOV

Za potrebe študije smo zbrali rezultate napenjalnih preizkusov na 902 sidrih iz različnih lokacij in objektov izvedenih v sklopu programa izgradnje avtocest v Republiki Sloveniji. Skupno je bilo na teh

902 sidrih izmerjenih 1210 količnikov lezenja (pri celovitih napenjalnih preizkusih ali preiskavah sider se meritve izvajajo pri več bremenskih stopnjah (slika 2)). Zbrani podatki so iz naslednjih avtocestnih odsekov:

- AC Vransko – Blagovica (mehke karbonske skrilave kamnine),
- AC Blagovica – Kopolje (mehke karbonske skrilave kamnine, dolomit),
- AC Klanec – Srmin (fliš).

Vsa sidra so vgrajena v vrtine premera med 144 in 150 mm (večina 145 mm). Podatki, ki tudi vplivajo na obnašanje sider, pa niso bili vedno dostopni ali pa jih je težko kvantificirati, so:

- podatki o hribini v okolici veznega dela sidra,
- vodocementni faktor injekcijske mase (običajno 0,44),
- čas od vgradnje do testa.

Na zbranih podatkih smo ugotavljali, ali je količnik tečenja  $k$  statistično značilno odvisen od:

- vezne dolžine sidra ( $L_v$ ),
- proste dolžine sidra ( $L_{fr}$ ),
- števila jeklenih pramen ( $n$ ),
- sile prednapetja sidra ( $P$ ).

Odločili smo se, da z regresijsko analizo **preizkusimo domnevo, da našeti parametri ne vplivajo na nosilnost hribine, ki jo predstavlja količnik lezenja  $k$ .**

V bazi podatkov smo imeli merjene količnike lezenja po 5, 15 in 30 minutah. Za vseh 1210 testov smo imeli na voljo podatke po 5 minutah, za 1055 testov podatke po 15 minutah in za 385 testov tudi podatke po 30 minutah. Analizirali smo podatke po 15 in 30 minutah, ker pa so rezultati zelo podobni, tu prikazujemo rezultate po 15 minutah, ker temeljijo na številčnejših meritvah.

Območje posameznih parametrov (najmanjše in največje vrednosti proste in vezne dolžine, števila jeklenih pletenic in sile pri preizkusu napenjanja) so prikazane v preglednici 1.

**Preglednica 1:** Območja vrednosti parametrov pri statistični analizi

	$N$	$L_{fr}$	$L_v$	$P$	$k$
Najmanj	2	4	5	138	0
Največ	7	32	10	1450	4,443

Predpostavljena regresijska enačba se glasi:

$$k = \beta_0 + \beta_1 n + \beta_2 L_{fr} + \beta_3 L_v + \beta_4 P \quad (4)$$

Rezultati regresijske analize so v spodnji preglednici (Preglednica 2):

**Preglednica 2:** Rezultati regresijske analize –  $k$  po 15 minutah

	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	<i>Regression Statistics</i>	
Intercept	-0,15473	0,072731	-2,12746	0,033615	Multiple R	0,497666
N	-0,07259	0,011495	-6,31526	3,97E-10	R Square	0,247672
$L_{fr}$	-0,00681	0,002327	-2,92661	0,003501	Adjusted R Square	0,244806
$L_v$	0,062812	0,013334	4,710837	2,8E-06	Standard Error	0,338367
P	0,001083	6,47E-05	16,74265	5,97E-56	Observations	1055

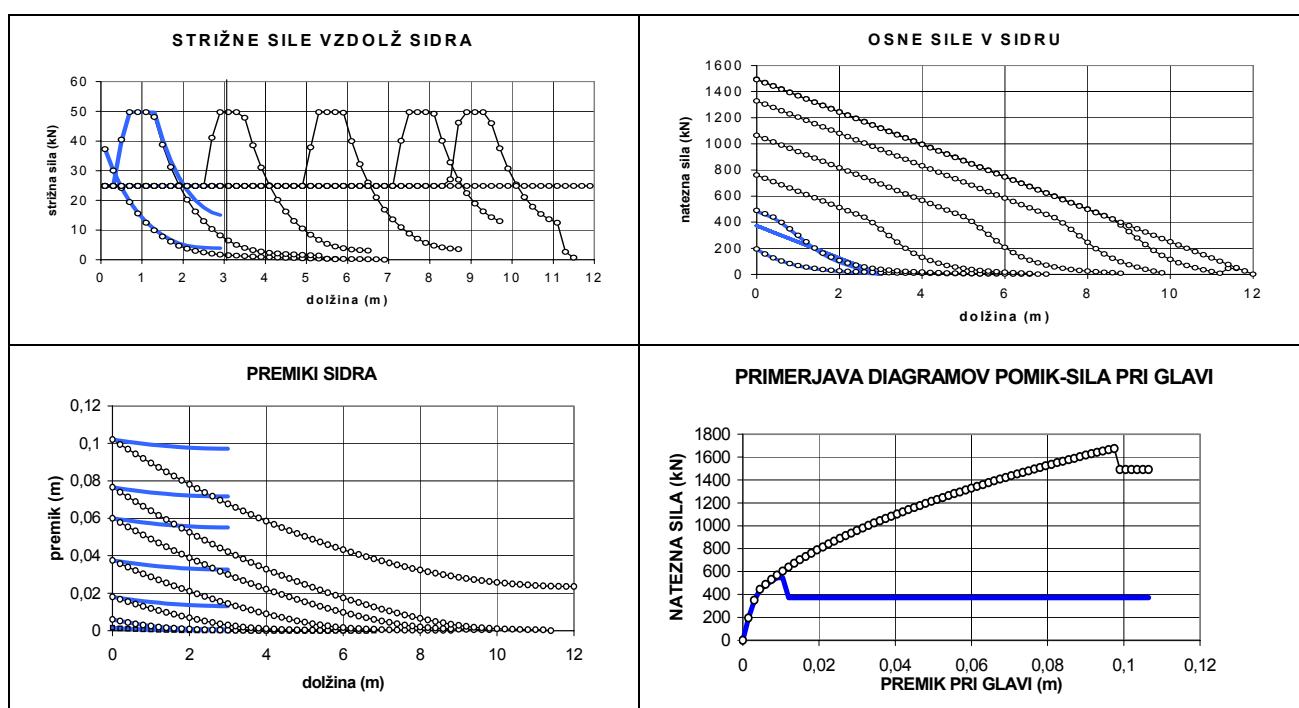
Signifikantnost relacije (4) je statistično značilna, kar potrjujejo majhne  $P$ -vrednosti. Analiza podatkov pove (glej koeficiente  $\beta$ ), da:

- z naraščanjem števila pramen količnik lezenja  $k$  pada,
- z naraščanjem vezne dolžine količnik lezenja  $k$  narašča,
- z naraščanjem proste dolžine količnik lezenja  $k$  pada in
- z naraščanjem sile količnik lezenja  $k$  narašča.

Vsi vplivi so statistično značilni, kar kažejo majhne  $P$  vrednosti. Vpliv sile na količnik lezenja je jasen, saj prav ta odnos merimo pri vsakem napenjalnem poizkusu. Morda najbolj presenetljiva je ugodna odvisnost količnika lezenja  $k$  od proste dolžine.

Preostala dva vpliva pa lahko združimo v enega samega. Večje število jeklenih pletenic in krajša dolžina veznega dela namreč pomenita večjo togost veznega dela sidra. Z večjo togostjo veznega dela pa očitno lahko zagotovimo nižje količnike lezenja  $k$ .

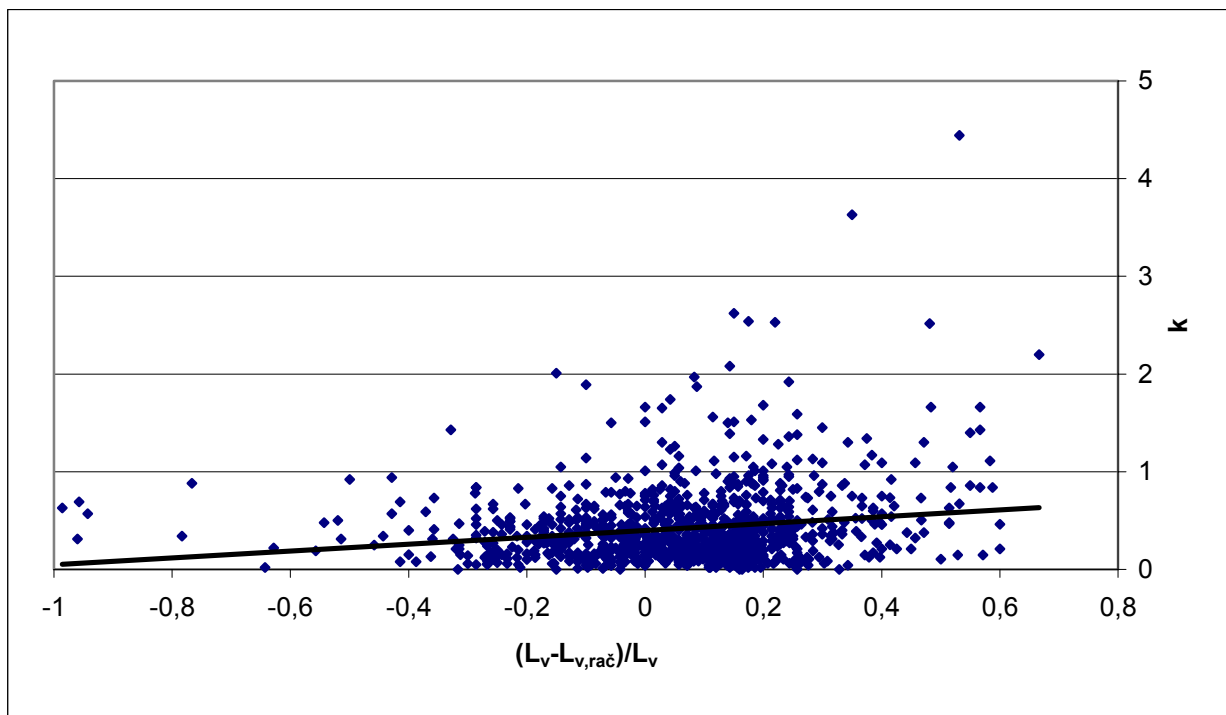
Za razlago tega fenomena se lahko zatečemo k numerični analizi obnašanja veznega dela sidra z dvema različnima dolžinama ob enakih ostalih parametrih (slika 5). Spodaj levo vidimo, da se kratko sidro le malo deformira, dolgo sidro pa na prvih 3 metrih mnogo bolj, saj mu bolj enakomerno deformiranje preprečuje daljši vezni del. Spodaj desno je jasno videti, da daljši vezni del sicer zagotavlja večjo končno nosilnost, vendar pri deformacijah ki niso sprejemljive. V območju linearnega obnašanja se obe sidri pri glavi obnašata enako. Vendar bomo pri krajšem sidru izmerili manjši količnik lezenja  $k$  zaradi bolj togega obnašanja, ki zagotovi manjše natezne obremenitve injekcijske mase in s tem manjše reološke učinke.



Slika 5: Primerjava numeričnih rezultatov za vezna dela sider dolžine 3 m (debelejša črta) in 12 m (črta s krožci)

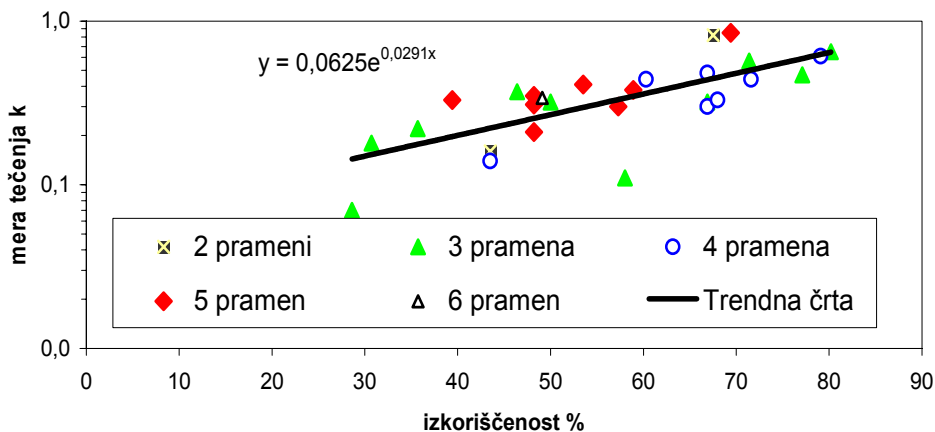
### Količnik lezenja in sprememba vezne dolžine

Pri preizkusu napenjanja se na osnovi raztezka prostega dela sidra pri znani sili izvednoti računska prosta dolžina, ki bolj ali manj odstopa od izvedene proste dolžine sidra. Podaljšanje proste dolžine lahko tolmačimo kot da se del veznega dela obnaša kot prosti del, to pa pomeni precejšnje razpokanje prereza injekcijske mase. Izračunali smo spremembo vezne dolžine sidra  $(L_v - L_{v,rač})/L_v$  in jo prikazali s pripadajočim izmerjenim količnikom lezenja  $k$ . Izkaže se, da izmerimo količnike lezenja preko 1 mm (z redkimi izjemami) le v primeru »skrajšanja« veznega dela (pozitivne vrednosti abscise na spodnjem grafu), torej v primeru razpokanja injekcijske mase. To posredno dokazuje, da je za visoke izmerjene količnike lezenja  $k$  v znatni meri »odgovorna« injekcijska masa in ne toliko hribina.



**Slika 6:** Odvisnost količnika lezenja od spremembe dolžine veznega dela

#### Mera tečenja $k$ in izkoriščenost nosilnosti pletenic



**Slika 7:** Meja tečenja  $k$  kot funkcija izkoriščenosti sidra.

Pri analizi podatkov smo ugotovili, da so sidra, napeta na relativno manjšo silo, izkazovala nižjo mero tečenja  $k$ , relativno bolj izkoriščena sidra pa večji  $k$ . Pri tem smo izkoriščenost sidra računali kot:  
*Izkoriščenost = sila v sidru / nosilnost jeklenih pletenic*

Posredno je podatek o izkoriščenosti povezan tudi s togostjo sidra, saj ima malo izkoriščeno sidro vgrajenih več jeklenih pletenic kot bi jih zgolj za prevzem projektirane sile nujno potrebovalo. S tem je sidro bolj togo, pri čemer je za merjeno obnašanje sidra posebej pomembno, da je bolj tog vezni del sidra.

Slika 7 kaže zbrane vse podatke iz posameznih konstrukcij na diagramu mere tečenja  $k$  (v logaritmičnem merilu) v odvisnosti od izkoriščenosti nosilnosti jeklenih pletenic. Prikazane so le

povprečne vrednosti posamezne vrste sider iz vsakega objekta. Zelo jasno je izražena odvisnost mere tečenja  $k$  od stopnje izkoriščenosti nosilnosti jeklenega dela sidra.

Ker graf (slika 7) prikazuje vse rezultate v odvisnosti od normirane sile (izkoriščenost) in ne dejanske sile, moramo rezultate razumeti tako, da mera tečenja ni odvisna od nosilnosti hribine temveč od nosilnosti (konstrukcije) sidra. To je še toliko bolj res, ker so na grafu sidra z različnim številom pletenic zelo različno izkoriščena.

## ZAKLJUČEK

Podrobnejša analiza sicer rutinskih enostavnih in celovitih napenjalnih preizkusov, ki se izvajajo na vsakem vgrajenem sidru, je dala zanimive rezultate:

- Večja dolžina prostega dela sidra ugodno vpliva na obnašanje sidra in njegovo nosilnost.
- Z večanjem vezne dolžine sidra, se izmerjeni količnik lezenja  $k$  večja.
- Večje število jeklenih pletenic, zmanjša količnik lezenja  $k$ .

Zadnji dve alineji lahko združimo v zaključek: bolj tog vezni del sidra zagotavlja manjši količnik lezenja  $k$ .

Povedano pomeni, da s testnimi sidri, ki imajo običajno eno jekleno pletenico več kot redna sidra, ne testiramo samo nosilnosti hribine, ampak obnašanje celotnega sistema, ki je vitalno odvisno tudi od lastnosti in prereza jekla, injekcijske mase ter geometrije sidra. Na osnovi rezultatov lahko ugotovimo, da bi v isti hribini z drugačno zasnovo sidra dosegli višje nosilnosti sidra, kar lahko vodi k racionalizaciji.

## Zahvala

Članek predstavlja del rezultatov razvojno raziskovalne naloge, ki jo je finančno podprl DARS. Rezultate napenjalnih preizkusov sider so nam za potrebe te naloge posredovali kolegi iz podjetij DDC (Projekt 5) in GEOT. Predvsem kolegom iz GEOTa gre tudi zahvala za mnoge koristne razprave.

## LITERATURA

- (1) Petros P. Xanthakos, Ground Anchorages and Anchored structures, J. Wiley & Sons, 1991.
- (2) Littlejohn G.S., Ground Anchorages and Anchored structures, Thomas Telford, London, 1997.
- (3) Richard J. Fragaszy, Uplift testing of model anchors, Journal Of Geotechnical Engineering, September 1988.
- (4) Jean-Luis Briaud, Should grouted anchors have short tendon bond length?, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Februar 1998.
- (5) Barley A.D., The Single Bore Multiple Anchor System, ICE Conference on Ground Anchorages and Anchored Structures, London, March 1997.
- (6) Ceket A., Numerično modeliranje nosilnosti geotehničnega sidra, diplomska naloga, Ljubljana, 2002.
- (7) Tomc V., Večkratna geotehnična sidra, diplomska naloga, Ljubljana, 2003.
- (8) Logar, J., Majes, B., Ceket A., Numerični račun obnašanja geotehničnih sider, 6. slovenski kongres o cestah in prometu, Portorož 23.-25.10.2002, Zbornik referatov, 94-103.
- (9) Standard SIA V191, Prednapeta geotehnična sidra, izdaja 1995.
- (10) EN 1537 »Execution of Special Geotechnical Work – Ground Anchors«.