

**Iztok KLEMENC**

Zavod za gradbeništvo Slovenije, Dimičeva 12, Ljubljana  
e-naslov: iztok.klemenc@zag.si

**Janko LOGAR**

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamova 2, Ljubljana  
e-naslov: janko.logar@fgg.uni-lj.si

**Branko PROKOP**

GEOT, d.o.o., Dimičeva 12, Ljubljana  
e-naslov: branko.prokop@geot.si

**IZVEDBA PREISKAV TRAJNIH PREDNAPETIH GEOTEHNIČNIH SIDER  
Z MODIFICIRANIMI VEZNIMI DELI NA TESTNEM POLJU  
S PODROBNEJŠO ANALIZO DOBLJENIH REZULTATOV**

**POVZETEK:** V prispevku je podan opis izvedbe in analize rezultatov preiskav sider na testnem polju opornega zidu OZ-05, kjer so bila poleg referenčnih trajnih prednapetih geotehničnih sider (tip RCP/D) vgrajena tudi sidra s tremi različnimi koncepti modificiranih veznih delov v skupnem polietilenskem ovoju (sidra povečane togosti - tip RCP/D-K, večkratna sidra - tip RCP/D-Z in sidra spremenljive togosti - tip RCP/D-I). Za vodenje preiskav sider ter zajem in analizo podatkov smo izdelali namensko računalniško orodje odprte zasnove, ki omogoča sprotno beleženje odčitkov in vrednotenje parametrov obnašanja sider, s katerim lahko analiziramo obnašanje sidra kot celote, podsider in posameznih pramen sidra.

Za osnovno predstavitev rezultatov preiskav sider smo in-situ izmerjene vrednosti sprva analizirali na način, kot se to izvaja v gradbeni praksi, nato pa smo izvedli podrobnejšo analizo, v sklopu katere smo preverili vpliv štirih različnih metod določitve merodajnih mer lezenja na odpornosti sider na izvlek. V nadaljevanju smo po več različnih pristopih določili skupne karakteristične odpornosti na izvlek vseh preiskav sider, izvedenih na sidranem objektu, s čimer smo poskušali zapolniti vrzeli določil za vrednotenje in analizo rezultatov preiskav sider v veljavnih predpisih.

Čeprav so preskušanja in vrednotenja preiskav sider z različnimi dolžinami prostih in/ali veznih delov pramen relativno zapletena, so v praksi izvedljiva, pri čemer razvito računalniško orodje omogoča nadaljnji razvoj, vgradnjo in preskušanja modificiranih tipov sider v praksi. Na podlagi analize pridobljenih rezultatov smo opredelili razloge za specifično obnašanje veznih delov modificiranih sider, na podlagi katerih bo možna tehnološka nadgradnja detajlov oblikovanja njihovih veznih delov.

**INVESTIGATION TESTS OF PERMANENT PRESTRESSED GROUND  
ANCHORS WITH MODIFIED BOND LENGTHS ON THE TESTING FIELD  
WITH DETAILED ANALYSIS OF OBTAINED DATA**

**ABSTRACT:** The paper gives a description of the implementation of investigation tests of anchors at the OZ-05 retaining wall testing field and analysis of obtained results, where comparative permanent prestressed strand ground anchors (type RCP/D) and similar anchors with three different types of modified bond lengths within joint polyethylene cover (anchors with increased stiffness of bond length – type RCP/D-K, multiple anchors – type RCP/D-Z and anchors with variable stiffness of bond lengths – type RCP/D-I) have been investigated. For the conduct of investigation tests, data acquisition and analysis, a specifically prepared software tool of open design has been used that enables simultaneous recording of readings and performance evaluation of behavior parameters of anchors. The software tool allows behaviour analysis of anchors on the level of the whole anchor, on the level of anchor units as well as on the level of individual strands.

In-situ measured values were initially analyzed in the way this is done in building practice. In a further detailed analysis the influence of four different methods of determining competent interval creep displacement rates on the pull-out resistance of the anchor has been investigated. As an attempt to bridge the gaps of provisions in the valid regulations relating to evaluation and analysis of the investigation tests results, several different approaches have been used to determine a common characteristic pull-out resistance of all investigation tests of the anchored structure.

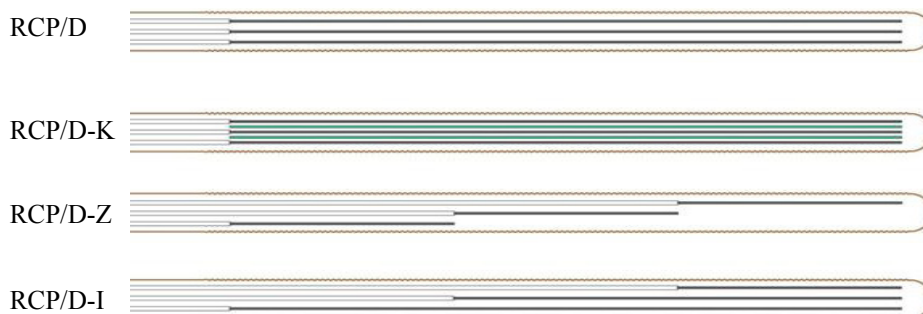
Although the implementation and evaluation of investigation tests of anchors with different free and/or bond lengths of strands are relatively complicated, they are practically feasible. Further development, installation and testing of modified types of anchors in practice are facilitated by the developed software tool. Based on the analysis of the obtained results, reasons for the specific behavior of bond lengths of modified anchors have been identified on which upgrading of technological design details of their bond lengths will be possible.

## UVOD

Ta prispevek predstavlja nadaljevanje prispevka Logarja et al. *Analiza obnašanja trajnih prednapetih geotehničnih sider in možnosti racionalizacije*, objavljenega v istem zborniku, v sklopu katerega je predstavljeno ozadje in koncept oblikovanja modificiranih tipov trajnih prednapetih geotehničnih sider s celovito protikorozijsko zaščito. Kot izhodišče za oblikovanje modificiranih sider s tremi različnimi pristopi oblikovanja pramen v veznem delu sider smo vzeli referenčna trajna prednapeta električno izolirana pramenska sidra CATI-ZRMK tip RCP/D, kot so že bila vgrajena v objekt testnega polja opornega zidu OZ-05 AC Slivnica-Pesnica: skupna dolžina vseh vgrajenih sider je bila  $l = 35$  m, medtem ko je dolžina veznega dela sider znašala  $l_v = 7$  m. Kabel sidra je bil sestavljen iz šestih pramen  $\varnothing 15,2$  mm iz jekla  $f_{p0,1k}/f_{pk} = 1670/1860$  MPa z nizko relaksacijo.

Pripravili smo tri različne zasnove oblikovanja veznih delov modificiranih sider (Sl. 1), pri katerih smo s spremembami dolžin in lege veznega dela pramen znotraj rebraste polietilenske (PE) cevi želeli doseči ugodnejši potek napetosti vzdolž veznega dela kabla sidra, s čimer smo pričakovali ugoden vpliv na povečanje odpornosti na izvlek sider kot celote:

- *Sidro s povečano togostjo veznega dela* (tip **RCP/D-K**) je bilo opremljeno z dodatnimi jeklenimi žicami  $\varnothing 5$  mm, vstavljenimi v prazne prostore med pramena veznega dela sidra, pri čemer je dolžina prostega dela pramen znašala 28,0 m, veznega dela pa 7,0 m.
- *Večkratna sidra* (tip **RCP/D-Z**) so bila izvedena tako, da posamezna podsidera, sestavljena iz po dveh pramen, v isto vrtno niso bila vgrajena kot samostojni sklopi (Barley, 1990, 1995 in 1997), pač pa smo vsa tri podsidera, z dolžinami veznega dela po 2,2 m, medsebojno zamaknjeno namestili v skupno rebrasto PE cev veznega dela sidra dolžine 7,0 m, tako da je sidro izpolnjevalo zahteve celovite protikorozijske zaščite. Dolžine prostih delov podsider so znašale 28,0 m, 30,4 m in 32,8 m.
- *Sidro spremenljive togosti* (tip **RCP/D-I**) po patentu Škrabla (2004) izkorišča prednosti sider tipov RCP/D-K in RCP/D-Z. Zasnovano je bilo tako, da je kabel sidra bil prav tako razdeljen v tri podsidera, sestavljena iz po dveh pramen, pri čemer so dolžine veznega dela podsider znašale 7,0 m, 4,6 m in 2,2 m, prostega dela podsider pa 28,0 m, 30,4 m in 32,8 m.



Slika 1. Koncept zasnove veznih delov trajnih prednapetih električno izoliranih pramenskih sider: zgoraj referenčni tip sidra RCP/D, spodaj modificirani tipi sider: RCP/D-K (sidro povečane togosti), RCP/D-Z (večkratno sidro) in RCP/D-I (sidro spremenljive togosti).

Pomembna prednost konceptov sider tipov RCP/D-Z in RCP/D-I, katerih vezni deli pramen podsider so porazdeljeni vzdolž veznega dela sidra, je v tem, da ob popustitvi enega pramena ali podsidera (bodisi zaradi lokalno bistveno slabših tal ali oslabiljene vezi pramena z injekcijsko maso bodisi zaradi pretrga pramena) to še ne pomeni porušitve sidra kot takega, saj preostala pramena drugih podsider pogosto še vedno prevzemajo svoj delež sidrne sile (torej sidro ne popusti, pač pa se sidrna sila v sidru le zmanjša na račun popustitve pramena oziroma pramen podsidera).

## RAČUNALNIŠKO ORODJE ZA IZVEDBO IN ANALIZO REZULTATOV PRESKUŠANJ NA TESTNEM POLJU

Za potrebe preskušanj na testnem polju smo izdelali računalniško orodje odprte zasnove, s katerim smo med izvedbo preskušanj beležili vse odčitke in sprotno nadzirali dogajanje v preskusnih sidrih. Še posebej pozorno smo spremljali aktiviranje njihovega prostega in veznega dela, kot tudi odpornostne karakteristike veznega dela sider, katerih najpomembnejši pokazatelj je mera lezenja  $k$ :

$$k = \frac{s_2 - s_1}{\log \frac{t_2}{t_1}} \quad (1)$$

kjer je  $s_1$  vrednost izvlečka na glavi sidra v času odčitka  $t_1$ ,  $s_2$  pa vrednost izvlečka na glavi sidra v času odčitka  $t_2$ . Kritična mera lezenja, ki opredeljuje popustitev veznega dela sidra, je  $k_{\text{krit}} = 2$  mm. Pri izvedbi preskusov nosilnosti sider smo med opazovanjem obnašanja njihovih veznih delov (na nivoju posamezne stopnje sile v vsakem časovnem intervalu) beležili veliko podatkov – izvlečkov posameznih pramen sidra  $s_i$  in pomike glave sidra  $d_g$ . Orodje smo pripravili tako, da je omogočalo tudi spremljanje padcev sile pred popravkom na izhodiščno raven  $P_i$ , čas potreben za popravek sile ter vmesne točke za opredelitev razbremenilnega dela krivulje pri razbremenitvi sidra s sile  $P_i$  na začetno silo  $P_a$ . Ves čas smo spremljali najpomembnejše parametre, ki so nam podajali vpogled v obnašanje sidra, ter jih sprotno obdelovali in analizirali. Med izvedbo preskušanj smo glede na ugotovitve in dosežene vrednosti izvlečkov  $s_i$ , mer lezenja  $k$ , efektivnih prostih dolžin  $l_f$ , kot tudi trajnih izvlečkov  $\Delta s_{bl}$  prilagajali postopek preskušanja oziroma presojali o podaljševanju opazovanja na posamezni stopnji sile  $P_i$  oziroma o prehodu na naslednjo stopnjo sile  $P_{i+1}$  preskusa nosilnosti sidra.

S posebno pozornostjo smo opazovali obnašanje večkratnih sider tipov RCP/D-Z in RCP/D-I z različnimi dolžinami veznih in/ali prostih delov pramen: pri teh dveh tipih sider smo morali ves čas izvajanja preskusov natančno spremljati obnašanje veznih delov posameznih pramen, podsider, kot tudi sidra kot celote. Računalniško orodje smo oblikovali tako, da smo lahko v poljubnem času iz sidra izločili posamezna pramena, katerih vezni deli so med preskusom popustili, tako da smo z ostalimi prameni sidra, ki so še lahko prevzemali sidrno silo, lahko nadaljevali s preskusom nosilnosti. Ob tem smo ves čas budno spremljali dogajanje v veznem delu sidra, da smo lahko preskus še pravočasno zaključili in preprečili popolno porušitev (uničenje) njegovega dela.

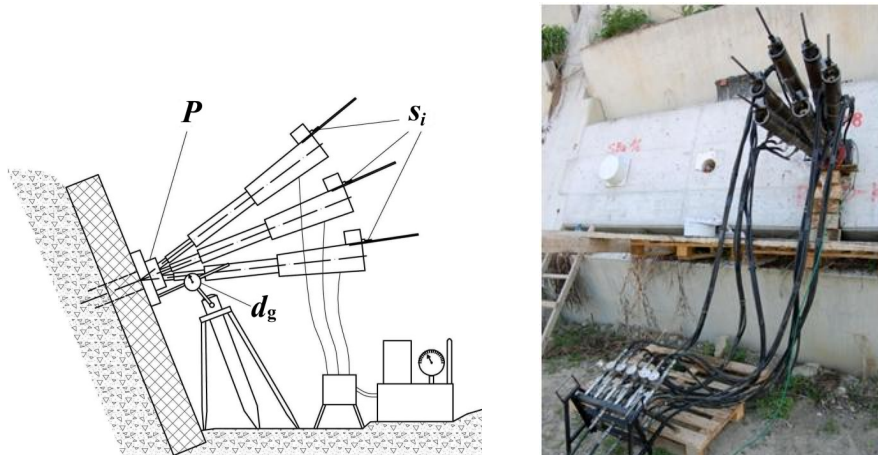
Isto računalniško orodje smo po končanem terenskem delu nadgradili in ga uporabili tudi za natančen pregled, ureditev, podrobno obdelavo in analizo podatkov, zajetih pri in-situ preskušanjih.

## VGRADNJA SIDER IN IZVEDBA PRESKUŠANJ NA TESTNEM POLJU OZ-05

V testno polje je izvajalec sidrskih del GEOT, d.o.o. vgradil skupno 18 sider: tri referenčna sidra RCP/D in po pet sider vsakega modificiranega tipa. Vrtine, od vodoravnice odklonjene  $15^\circ$  navzdol, so bile izvrtane z dletom  $\varnothing$  140 mm, izpihovanje navrtanine se je izvajalo z zrakom. Pretežni del vrtin je bil v območju veznega dela sider vlažen. Za vgradnjo sider v vrtine, kot tudi polnjenje notranjosti zaščitnega PE ovoja sider, je bila uporabljena cementna injekcijska masa z vodocementnim (v/c) faktorjem 0,42. Po podatkih izvajalca je pri vseh sidrih količina vgrajene injekcijske mase znašala približno  $17,3 \text{ dm}^3/\text{m}^1$ .

Pred začetkom preskusov nosilnosti sider je bila na vsak pramen sidra nameščena svoja mononapen-jalka, pri čemer so bile vse mononapenjalke vzporedno povezane v skupni hidravlični

sistem (Sl. 2), tako da je napenjanje vseh pramen potekalo hkrati preko skupne hidravlične črpalke. Za spremljanje sile v sidrih je bil med mononapenjalke in sidrani objekt nameščen elektronski dinamometer proizvajalca SISGEO S.r.l. tipa L216V150, nazivne kapacitete 1500 kN. Izvlečki pramen so bili izmerjeni na vsakem pramenu posebej kot vrednosti pomika bata glede na ohišje mononapenjalke, pri čemer je bil digitalni pretvornik pomikov ločljivosti 0,01 mm z magnetom pritrjen na ohišje mononapenjalke. Ker izvlečki pramen med preskusom nosilnosti sidra niso bili izmerjeni glede na nepomično referenčno točko, smo med preskusi z merilno urico na stojalu z ločljivostjo 0,01 mm spremljali tudi pomike glave sidra, pri čemer se je izkazalo, da so izmerjeni pomiki glav sider v okviru merilne negotovosti meritev.



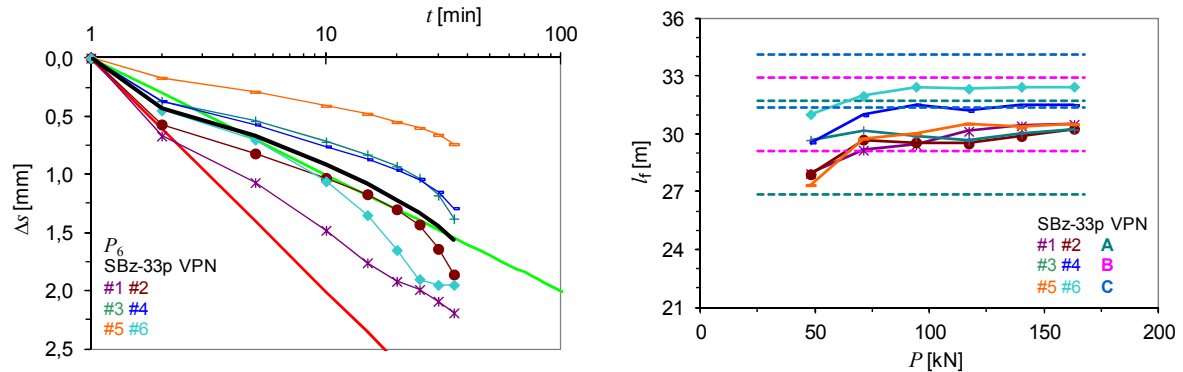
Slika 2. Sistem za preskus nosilnosti prednapetih pramenskih geotehničnih sider s posamičnimi napenjaljkami z odčitavanje izvlečkov pramen neposredno na mononapenjalkah.

Na sidrih RCP/D in po enem modificiranem sidru vsakega tipa so bile izvedene *preiskave sidra* (PS), pri čemer so bila ta sidra preskušena do predvidene preskusne sile  $P_{pv} = 1254$  kN (80 % natezne trdnosti jekla  $R_m$ ) oziroma do dosežene porušitve veznega dela sidra. Ostala modificirana sidra so bila preskušena po enakem postopku, le da smo preskus prekinili že ob prvih znakih popuščenja veznega dela sidra, torej čim je bila dosežena kritična mera lezenja  $k_{krit} = 2$  mm (*večstopenjski preskusi napenjanja* - VPN). Vsa sidra testnega polja smo obremenjevali po obremenilnih stopnjah in metodologiji za preiskavo sidra, kot ga podaja SIA 267/1:2003, ki so zelo podobne postopku preskušanja po metodi 1 standarda SIST EN 1537:2002. Napenjanje preskusnih sider z ravni začetne sile  $P_a = 150$  kN (10 %  $R_m$ ) smo izvajali v osmih ciklično naraščajočih stopnjah sile, pri čemer smo pred izvedbo odčitkov izvlečkov pramen v posameznih časovnih trenutkih najprej popravili silo na predpisano raven sile te stopnje. Nato smo odčitali izvlečke pramen  $s_i$ , na podlagi katerih smo iz vrednotili pripadajoče mere lezenja  $k$  posameznih pramen, na podlagi povprečja izvlečkov vseh pramen pa še mere lezenja  $k$  za sidro kot celoto, pri sidrih RCP/D-Z in RCP/D-I pa tudi mere lezenja  $k$  po podsidih – parih pramen istih dolžin  $l_v$  in  $l_{fr}$  (podsidro A sta vedno sestavljala pramena #1 in #2 z najkrajšim prostim delom, medtem ko je bilo na drugi strani podsidro C sestavljeno iz obeh pramen #5 in #6 z najdaljšim prostim delom). Na (Sl. 3) so prikazane odčitane vrednosti izvlečkov posameznih pramen in povprečja izvlečkov vseh pramen za sidro kot celoto na šesti stopnji VPN sidra SBz-33 tipa RCP/D-I (levi diagram), pri čemer nakloni odsekoma ravnih krivulj predstavljajo mere lezenja  $k$ . Na desnem diagramu so podane efektivne proste dolžine pramen sidra  $l_f$  pri istem preskusu, ki se na podlagi izmerjenega elastičnega skrčka  $\Delta s_{el}$  pri razbremenitvi pramen iz sile posamezne stopnje  $P_i$  na začetno silo  $P_a$ , ter znanih karakteristik pramen (površine prečnega prereza kabla sidra  $A_p$  in modula elastičnosti  $E_p$ ) iz vrednotijo po izrazu:

$$l_f(P_i) = \frac{\Delta s_{el}}{P_i - P_a} A_p E_p \quad (2)$$

Na vsaki stopnji sile  $P_i$  za vse časovne intervale opazovanja dobimo nabor različnih vrednosti  $k$ . V nadaljevanju analize moramo na podlagi teh vrednosti  $k$  določiti merodajne intervalne mere lezenja

$k_{int}$ , ki bodo na vsaki stopnji sile  $P_i$  reprezentativno opisovale obnašanje pramen, podsider kot tudi sidra kot celote. Način določitve vrednosti  $k_{int}$  v večini izvedbenih predpisov ni jasno opredeljen, zato smo v prvi fazi analize vrednosti  $k_{int}$  določili na podlagi zadnjih izvedenih odčitkov izvlečkov na posamezni stopnji sile  $P_i$ , pri čemer smo število zajetih intervalov po inženirski presoji prilagajali dejanskemu obnašanju sidra pri preskusu nosilnosti.



Slika 3. Rezultati večstopenjskega preskusa sidra SBz-33 tipa RCP/D-I: vrednosti izvlečkov pramen sidra na stopnji sile  $P_6 = 978$  kN (levo), razvoj efektivnih prostih dolžin pramen  $l_f$  med preskusom na isti stopnji sile z podanimi zgornjimi in spodnjimi mejami po podsiderih (desno).

Pri preskusih nosilnosti prednapetih geotehničnih sider, pri katerih pramena sidra napenjamo s mononapenjalkami, povezanimi v hidravlično sinhroniziran sistem, o obnašanju veznih delov sider sklepamo le na podlagi vrednosti izvlečkov pramen, odčitanih na pretvornikih pomikov, pritrjenih na posameznih mononapenjalkah. Obseg razpoložljivih podatkov je zato omejen, prav tako nimamo fizičnega vpogleda v dejansko dogajanje v območje veznega dela sidra globoko v tleh zaledja, zato se pri končni presoji obnašanja prednapetega sidra pri preskusu nosilnosti ne opiramo izključno le na mere lezenja  $k$ . Vrednosti  $k$  so nedvomno ključni kazalniki obnašanja prednapetega sidra med preskusom nosilnosti, vendar pa ni nujno, da je vsak izvleček pramena, izmerjen na glavi sidra, tudi dejansko posledica popuščanja veznega dela sidra. Zato smo pri analizi rezultatov PS in VPN vrednosti mer lezenja  $k$  posameznega pramena, iz vrednotene na stopnji sile  $P_i$ , vedno primerjali z rezultati ostalih pramen, kot tudi neposredno izmerjenimi vrednostmi trajnih izvlečkov  $\Delta s_{pl}$  in efektivnih prostih dolžin  $l_f$ , na katerih so se pramena, pri spuščanju s trenutne stopnje sile  $P_i$  na raven začetne sile  $P_a$ , krčila. Vse navedene vrednosti smo opazovali za vsak pramen kabla sidra posebej, poleg tega pa smo iste vrednosti spremljali tudi na ravni posameznih podsider (sidra RCP/D-Z in RCP/D-I), kot tudi sidra kot celote.

## REZULTATI PRESKUŠANJ SIDER (PS IN VPN) NA TESTNEM POLJU OZ-05

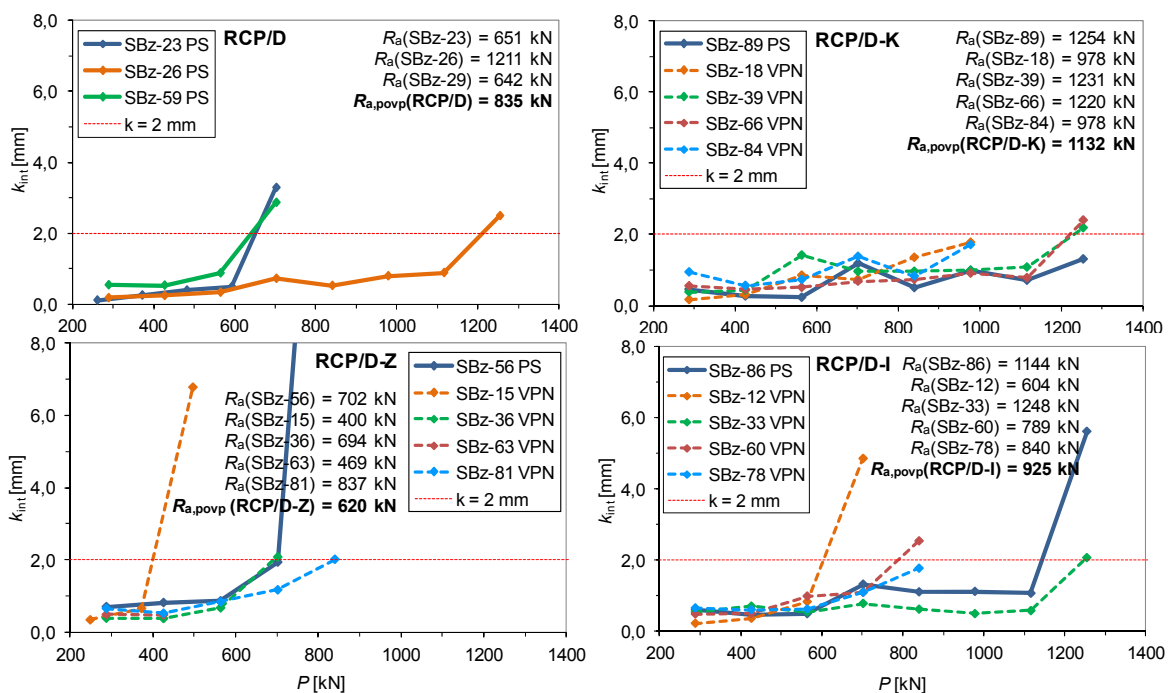
Obnašanje veznih delov sider se odraža v najpomembnejšem rezultatu preiskave sidra – **odpornosti sidra na izvlek**  $R_a$ , ki jo določimo tako, da vrednosti intervalnih mer lezenja  $k_{int}(P_i)$  vrišemo v diagram  $k_{int} - P_i$ , pri čemer vrednost  $R_a$  določimo kot presečišče odsekoma ravne krivulje točk  $k_{int}(P_i)$  z mejo porušitve sidra  $k_{krit} = 2$  mm. V primerih, ko tako presečišče ne obstaja, potem pri preskusu nosilnosti sidra ni prišlo do porušitve veznega dela sidra – v teh primerih standard SIA 267/1:2003 dopušča oceno vrednosti  $R_a$  kot ekstrapolacijo preskusne sile  $P_{pv}$  do največ za 10 %. Problem pri tem ostaja ocena, v katerih primerih je upravičeno pričakovanje, da bo vezni del sidra sposoben prevzeti za 10 % povečano silo  $P_{pv}$ . Po analizi rezultatov preskusov nosilnosti sider testnega polja smo kot primerno podlago za upravičenost takega pričakovanja ugotovili naslednje kriterije:

- **aproximacija linearne trenda** točk v diagramu  $k_{int} - P_i$  vsakega pramena posebej in povprečja vseh pramen za sidro kot celoto ne sme izkazovati opaznega naraščanja mer lezenja  $k$  s časom,
- **največja mera lezenja**  $k_{max}$  v posameznem časovnem intervalu po drugi minuti (2') opazovanja (tako pramen kot tudi sidra kot celote) ne sme preseči kriterija porušitve ( $k_{max} < k_{krit}$ ),
- **merodajna intervalna mera lezenja**  $k_{int}$  naj ne preseže vrednosti 1,35 mm.

V kolikor so vsi ti kriteriji na zadnji doseženi stopnji sile  $P_{i,max}$  izpolnjeni, potem lahko odpornost sidra na izvlek ocenimo kot  $R_a = 1,10 P_{i,max}$ .

Pri preiskavi sidro obremenjujemo do porušitve njegovega veznega dela, do katere lahko pride v notranjosti rebraste PE cevi (v obliki izpuljenja posameznih pramen ali vseh pramen kabla sidra kot celote), poruši se lahko rebrasta PE cev, možna pa je tudi porušitev izven rebraste PE cevi (porušitev injekcijske mase, zdrs injekcijske mase ob steni vrtine oziroma porušitev tal neposredno ob veznem delu vgrajenega sidra). Vrste in pojavnost posameznih mehanizmov so odvisne tako od zasnove veznega dela pramen in sider, morebitne kontaminacije (nečistosti) površine golih pramen v veznem delu, dimenzij sestavnih komponent sider, njihovega oblikovanja in razporeditve, kot tudi od globine vgradnje veznih delov sider, detajlov izvedbe in čiščenja vrtine ter predvsem faze injektiranja. Po principu najšibkejšega člena verige sprva nastopi tisti mehanizem, ki se pojavi pri najnižji sili, pri čemer se v nadaljevanju preskusa nosilnosti (ob nadaljevanju opazovanja na ravni iste stopnje sile  $P_i$  ali pa celo pri višji stopnji sile  $P_{i+1}$ ) poleg tega mehanizma lahko pojavi še kakšen mehanizem, tako da je končna popustitev veznega dela sidra pogosto kombinacija več mehanizmov.

Na (Sl. 4) za vsa sidra testnega polja podajamo rezultate PS in VPN sider – odsekoma ravne krivulje intervalnih mer lezenja  $k_{int}(P_i)$ , pri čemer smo dolžine intervalov določali po inženirski presoji tako, da so čim boljše opisovali dejansko obnašanje sidra pri PS/VPN. V diagramih so podane tudi dosežene odpornosti na izvlek  $R_a$  posameznih sider, kot tudi povprečne odpornosti  $R_a$  preskušanih sider posameznega tipa. Splošni vtis v razmerja odpornosti na izvlek med posameznimi tipi sider lahko pridobimo že na podlagi vizualne ocene oblike krivulj v diagramih: najboljše karakteristike odpornosti veznih delov sider (torej visoke sile  $P_i$  ob čim nižjih vrednostih  $k_{int}$ ) so bile dosežene pri sidrih RCP/D-K s povečano togostjo veznega dela sider, ki so nekoliko presegle karakteristike odpornosti na izvlek veznih delov referenčnih sider RCP/D. Na drugi strani so večkratna sidra z zamaknjenimi veznimi deli RCP/D-Z že na prvi pogled izkazovala najslabše karakteristike nosilnosti veznih delov sider.



Slika 4. Dosežene odpornosti na izvlek  $R_a$  in razvoj intervalnih mer lezenja  $k_{int}(P_i)$  v referenčnih sidrih RCP/D in modificiranih sidrih RCP/D-K, RCP/D-Z in RCP/D-I, na katerih so bile izvedene PS in VPN.

Razmerja med nosilnostmi tipov sider so razvidna iz povprečnih odpornosti  $R_{a,povp}$  posameznih tipov sider: največja vrednost  $R_{a,povp}$  je bila dosežena z modificiranimi sidri RCP/D-K s povečano togostjo veznega dela sidra, ki za 16 % presega povprečno odpornost referenčnih sider RCP/D. Visoka odpornost sider RCP/D-K je bila dosežena kljub temu, da je bila notranjost rebraste PE cevi veznega

dela sider RCP/D-K močno zapolnjena in za povečanje togosti nismo mogli namestiti v osnovi predvidenih pramen  $\varnothing 12,5$  mm, pač pa le žice  $\varnothing 5$  mm. Kot nenavadno lahko ocenimo nepričakovano hitro odpoved dveh referenčnih sider RCP/D, kar je posledica težav pri vgradnji (sidro SBz-23) in izrazitega zdrsa dveh pramen (sidro SBz-59), s čimer je bilo njuno obnašanje slabše od vseh sedem preskusnih sider RCP/D, na katerih so bile v sklopu gradnje objekta izvedene PS.

Na testnem polju so se najslabše obnesla sidra RCP/D-Z, katerih vezni deli so popustili pri nižjih stopnjah sile PS in VPN, pri čemer je v vseh primerih prišlo do popuščanja vezi pramen s cementno injekcijsko maso. Ob tem se pojavlja vprašanje, ali je bil pri tem odločilen vpliv kratkih veznih delov pramen (podsider)? Za izvedbo preskušanj sider na testnem polju smo dolžino najkrajših veznih delov pramen podsider ( $l_v = 2,2$  m) sider tipa RCP/D-Z in RCP/D-I določili glede na razpoložljivo skupno dolžino veznega dela sidra 7,0 m in glede na izkušnje iz literature (Barley in Windsor, 2000, Bruce in sod., 2007). Pri vseh sidrih testnega polja smo gole vezne dele pramen spiralno zasukali okoli vzdolžne osi, pri čemer smo pri sidrih RCP/D, deloma pa tudi pri sidrih RCP/D-K, snop golih pramen veznega dela izmenično prostorsko širili in stiskali (žagast potek snopa pramen), medtem ko so bili vezni deli pramen sider RCP/D-Z in RCP/D-I ravni. Čeprav smo dolžine veznih delov izbrali skladno s priporočili smo na podlagi analize in medsebojne primerjave rezultatov preskusov nosilnosti sider testnega polja ugotovili, da je pri sidrih tipa RCP/D-Z in RCP/D-I z najkrajšimi veznimi deli pramen prevladoval mehanizem izpuljenja posameznih pramen iz injekcijske mase v notranjosti rebraste PE cevi. Na takšen mehanizem je po vsej verjetnosti vplivalo tudi dejstvo, da je v času izdelave sider za testno polje proizvajalec sider ravno uvajal novo avtomatizirano linijo za krojenje in namaščevanje pramen sider, pri čemer je zaradi specifičnosti tehnološkega procesa namaščevanja pri nekaterih pramenih prišlo do lokalnih nanosov madežev vazelina na gol pramen veznega dela sidra. Ti madeži so bili pred sestavljanjem sider sicer v grobem odstranjeni, a površine žic pramen niso bile popolnoma razmaščene, zato so ti vezni deli ostali lokalno površinsko kontaminirani, tako da je bila v teh primerih pričakovati zmanjšano adhezijo cementne injekcijske mase na gola pramena vgrajenih sider.

Ocenjujemo, da sta pri sidrih RCP/D-Z in RCP/D-I na obnašanje sider ključno vplivala kontaminacija površine pramen in potek pramen v veznem delu, dodatno pa so razmere v notranjosti rebraste PE cevi poslabšali mehki in relativno veliki tesnilni stiki prostega in veznega dela pramen podsider. S kontaminacijo veznih delov pramen, deloma pa tudi z nezadostno oblitostjo golih spodnjih pramen s cementno injekcijsko maso, ki so zaradi specifičnosti oblikovanja veznega dela sider nalegala neposredno na rebrasto PE cev, povezujemo izvlečenje posameznih pramen tudi pri sidrih RCP/D in RCP/D-K z enako dolžino veznega dela vseh pramen sidra. V nasprotju s pričakovanji se je le v posameznih primerih sider RCP/D in RCP/D-K pojavljal mehanizem izpuljenja celotne skupine pramen v notranjosti PE ovoja sider.

V kolikor s primernimi ukrepi oblikovanja veznega dela pramen uspemo preprečiti izvlečenje pramen iz injekcijske mase v notranjosti rebraste PE cevi, potem bi morali s sidri tipa RCP/D-Z po izkušnjah Barleya doseči najmanj takšne odpornosti sider na izvlek, kot pri referenčnih sidrih RCP/D. Večje odpornosti na izvlek bi dosegli tudi, v kolikor bi:

- s centrirniki v območju veznega dela pramen zagotavljali zadostno oblitost pramen veznega dela, ki naj bi znašala vsaj 5 mm (Hanna, 1982, Littlejohn, 1993, SIST EN 1537:2002),
- bi imeli na razpolago rebraste PE cevi večjega premera, saj bi lahko v tem primeru učinkovitost veznega dela sider izboljšali z dodatnim armiranjem območja okoli golih pramen znotraj rebraste PE cevi (spiralna mikro armatura, z vlakni armirana cementna injekcijska masa ipd.), pri sidrih RCP/D-K bi v tem primeru namesto ravnih žic  $\varnothing 5$  mm za povečanje togosti veznega dela sidra vgradili pramena  $\varnothing 12,5$  ali celo  $\varnothing 15,2$  oziroma  $\varnothing 15,7$  mm,
- pri sidrih tipa RCP/D-Z in RCP/D-I izvedli manjše (oziroma bolj učinkovite) tesnilne stike podsider z daljšimi prostimi deli, ki se nahajajo ob veznih delih podsider s krajšimi prostimi deli, s čimer bi zagotovili večjo učinkovitost objetja injekcijske mase ob veznih delih pramen podsider s krajšimi prostimi deli.

## PRIMERJAVA DOSEŽENIH ODPORNOSTI NA IZVLEK SIDER Z RAZLIČNIMI TIPI VEZNIH DELOV S PRESKUŠANJEM DOMNEVE O PRIČAKOVANI VREDNOSTI

Na podlagi vizualne presoje diagramov na (Sl. 4) lahko ocenimo, da so nosilnostne karakteristike sider RCP/D-K najboljše, nekoliko slabše so pri referenčnih sidrih RCP/D, najslabše so pri sidrih RCP/D-Z, medtem ko je bilo obnašanje sider RCP/D-I nekako primerljivo z referenčnimi sidri RCP/D.

Za bolj objektivno oceno in potrditev doseženih odpornosti med tipi sider smo s preskušanjem domneve o pričakovani vrednosti preverili, ali izračunane vrednosti  $R_{a,povp}$  posameznih tipov sider statistično značilno odstopajo med seboj. Vedno smo medsebojno primerjali po dva tipa sider, pri čemer za vsak tip sidra poznamo srednjo vrednost vzorca  $\bar{X}_i$ , varianco vzorca  $S_{X_i}^{*2}$  ter velikost vzorca  $n_i$ . Postavili smo *ničelno domnevo*  $H_0$  (pričakovani vrednosti populacij, iz katerih sta odvzeta vzorca, sta enaki:  $m_{X_1} = m_{X_2}$ ) in *alternativno domnevo*  $H_1$  (pričakovani vrednosti populacij nista enaki:  $m_{X_1} \neq m_{X_2}$ ). Ob tem smo privzeli 5 % tveganje, da storimo napako I. vrste in zavrnemo ničelno domnevo, čeprav ta velja. V primerih, ko so slučajne spremenljivke  $X_i$  porazdeljene normalno  $N(m_{X_i}, \sigma_{X_i})$ , z neznanima in neenakima standardnima deviacijama  $\sigma_{X_i}$ , se statistika

$$T = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{S_{X_1}^{*2}}{n_1} + \frac{S_{X_2}^{*2}}{n_2}}} \quad (3)$$

porazdeljuje približno po porazdelitvi  $t$  z  $\nu$  prostostnimi stopnjami:

$$\nu = \frac{\left(\frac{S_{X_1}^{*2}}{n_1} + \frac{S_{X_2}^{*2}}{n_2}\right)^2}{\frac{(S_{X_1}^{*2}/n_1)^2}{n_1 - 1} + \frac{(S_{X_2}^{*2}/n_2)^2}{n_2 - 1}} \quad (4)$$

Kritično območje (t.j. območje zavrnitve ničelne domneve) je v tem primeru  $(-\infty, -t_{0,975,\nu}] \cup [t_{0,975,\nu}, \infty)$ .

Za vse vrednosti  $R_{a,povp}$  smo za različne kombinacije tipov sider izrednotili statistike  $T$  in prostostne stopnje  $\nu$ , kot tudi mejne vrednosti  $t_{0,975,\nu}$ , ki za vsak primer posebej določajo meji kritičnega območja. Če je vrednost statistike  $T$  bodisi manjša od  $-t_{0,975,\nu}$  bodisi večja od  $t_{0,975,\nu}$ , ničelno domnevo  $H_0$  zavrnemo in s 5 % tveganjem trdimo, da sta pričakovani vrednosti statistično značilno različni: v našem primeru smo ugotovili, da je povprečna odpornost na izvlek sider RCP/D-Z statistično značilno manjša od povprečne odpornosti na izvlek referenčnih sider RCP/D in sider RCP/D-K. V ostalih primerih pa statistika  $T$  ne leži v območju zavrnitve ničelne domneve, torej domneve  $H_0$  s 5 % tveganjem ne moremo zavrniti, zaradi česar ne moremo trditi, da  $R_{a,povp}$  dveh primerjanih tipov sider nista enaki. Nekoliko presenetljivo s preskušanjem domneve o pričakovani vrednosti torej nismo uspeli potrditi statistično značilne različnosti povprečne odpornosti na izvlek sider RCP/D-I v primerjavi s sidri tipa RCP/D-Z, kot bi lahko sklepali le na podlagi vizualne primerjave krivulj v diagramih (Sl. 4).

## VPLIV METODE DOLOČITVE MERODAJNIH MER LEZENJA $k_{int}$ NA ODPORNOSTI NA IZVLEK SIDER Z RAZLIČNIMI KONCEPTI VEZNIH DELOV

Dosedanje ugotovitve so bile dobljene na podlagi vrednotenja mer lezenja pramen v vseh fazah PS in VPN po metodi inženirske presoje (IP), ki se v praksi izkazuje kot operativno učinkovita. Pri tej metodi merodajno intervalno vrednost lezenja  $k_{int}(P_i)$  določimo na podlagi inženirske izkustvene ocene, kolikšno število zadnjih odčitkov prirastkov izvlečkov pramena sidra  $s_i$  odraža obnašanje njegovega veznega dela na tej stopnji sile  $P_i$ . Pri tej metodi strokovnjak, ki obdeluje rezultate PS/VPN, na podlagi izkušenj določi dolžino končnega intervala, na podlagi katere na posamezni stopnji sile izrednoti merodajno intervalno mero lezenja  $k_{int}(P_i)$ . V literaturi nismo zasledili

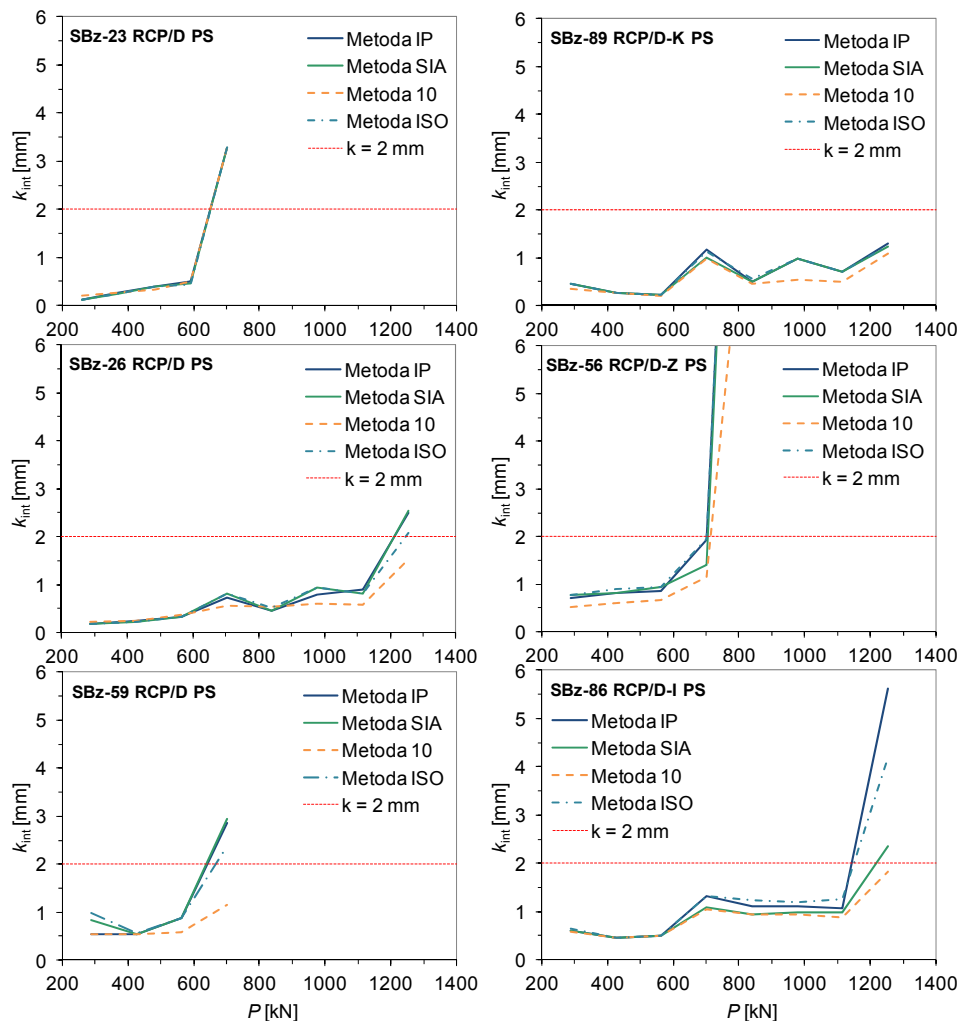


primerjave, koliko na končno vrednost odpornosti na izvlek sidra  $R_a$  (seveda pri istih odčitkih izvlečkov pramen) vpliva število izbranih zadnjih odčitkov izvlečkov  $s_i(P_i)$ , ki preko merodajnih intervalnih vrednosti lezenja  $k_{int}(P_i)$  v diagramu  $k_{int} - P_i$  tvorijo odsekoma ravno krivuljo, iz katere se v presečišču z vodoravnico  $k_{krit} = 2$  mm odčita vrednost odpornosti sidra na izvlek  $R_a$ . Glede tega vprašanja so sedaj veljavni predpisi (z izjemo oSIST prEN ISO 22477-5:2010) nedorečeni, zato smo primerjali rezultate dobljene po naslednjih, nam znanih metodah (od najstarejše metode zadnjih desetih odčitkov – metoda 10 iz DIN 4125-2:1976, do najnovejših zahtev osnutka standarda oSIST prEN ISO 22477-5:2010):

- **Metoda IP:** pri vsakem pramenu na vsaki stopnji sile glede na odčitane izvlečke pramena izberemo tiste zadnje intervale v diagramu  $\Delta s - \log t$ , ki se nahajajo na daljci med prvo in zadnjo točko intervala, katere naklon določa vrednost  $k_{int}(P_i)$ .
- **Metoda SIA:** v kolikor je zadnji odčitek na stopnji sile  $P_i$  opravljen v 15', potem vrednost  $k_{int}(P_i)$  določa časovni interval 5'-15', kasneje pa za vrednosti  $k_{int}(P_i)$  do 1,0 mm upoštevamo zadnje štiri točke, nad to vrednostjo pa zadnjih osem točk, če se nahajajo na daljci med prvo in zadnjo točko intervala; v kolikor pa sidro popusti ( $k > k_{krit}$ ), potem v tem primeru vzamemo samo tistih nekaj zadnjih točk, ki ponazarjajo popustitev veznega dela sidra.
- **Metoda 10:** pri tej metodi vedno vzamemo merodajni časovni interval za določitev  $k_{int}(P_i)$  tako, da je druga točka intervala za faktor deset večja od prve točke ( $t_2 = 10 t_1$ ); v primerih, ko zaradi prekratkega opazovanja na posamezni stopnji sile  $P_i$  to ni bilo možno, smo to zahtevo upoštevali v največji možni meri (vzeli smo prvo in zadnjo točko opazovanega intervala).
- **Metoda ISO:** za določitev  $k_{int}(P_i)$  merodajni interval vedno določajo zadnji trije odčitki na posamezni stopnji sile  $P_i$ , pri čemer pa so časovni trenutki, v katerih se izvajajo odčitki (1'-2'-3'-4'-5'-7'-10'-15'-20'-30'-45'-60'), drugačni kot po SIA 267/1:2003, po kateri smo izvajali preskušanja na testnem polju (odčitki v 1'-2'-5'-10'-15'-20'...vsak nadaljnji odčitek na 5'); tudi v tem primeru nismo mogli v popolnosti upoštevati zahteve zadnjih treh točk po oSIST prEN ISO 22477-5:2010, saj zaradi različnih zahtevanih trenutkov odčitkov nismo imeli vseh vrednosti (nismo imeli odčitkov v 3', 4' in 7'), smo se pa tej zahtevi v največji možni meri približali.

Na (Sl. 5) za vsa sidra testnega polja, na katerih so bile izvedene PS do porušitve veznih delov sider, podajamo diagrame z vrisanimi merodajnimi intervalnimi merami lezenja  $k_{int}$ , določenimi po vseh štirih naštetih metodah. Primerjavo smo omejili le na PS, saj so bila le v teh primerih vsa sidra preskušena res do dosežene porušitve njihovega veznega dela, zato so dobljeni rezultati medsebojno primerljivi. Na ostalih sidrih testnega polja so bili izvedeni le VPN, pri katerih so bile vrednosti  $R_a$  le približno ocenjene.

Kot je razvidno iz (Sl. 5) z izbiro metode vrednotenja pri istih odčitkih izvlečkov pramen sidra vplivamo na končno vrednost odpornosti posameznega sidra na izvlek  $R_a$ . Vpliv je velik pri metodi 10, pri kateri je interval zajema  $k_{int}(P_i)$  tako velik, da se končne visoke vrednosti  $k$  povprečijo z relativno nizkimi  $k$  začetnih odčitkov, kar je še posebej nevarno pri sidrih, pri katerih pri daljših opazovalnih časih pride do hipne porušitve veznega dela sidra. Po metodi 10 dobimo rezultate na nevarni strani, zato po naši oceni ni primerna za uporabo v praksi, medtem ko ostale metode (IP, SIA in ISO) dajejo podobne rezultate, ki se gibljejo v okviru območja pričakovanega raztrosa rezultatov. V kolikor rezultate PS obdeluje izkušeni strokovnjak, lahko z metodo IP za vsak primer posebej najbolj natančno posname dejansko obnašanje pramen veznega dela sidra, vendar pa na drugi strani ta metoda manj izkušenemu strokovnjaku ne preprečuje napačnega (zavajajočega) vrednotenja rezultatov. V takih primerih uporaba metode ISO ali metode SIA zagotavlja zanesljivejše vrednotenje rezultatov PS in manjše možnosti napačne presoje pri določitvi odpornosti na izvlek  $R_a$ .



Slika 5. Intervalne mere lezenja  $k_{int}(P_i)$  določene po metodi inženirske presoje (IP), po SIA 267/1 (SIA), po DIN 4125 (10) in po oSIST prEN ISO 22477-5 (ISO) za vse PS, opravljene na testnem polju.

## DOLOČITEV SKUPNE ODPORNOSTI NA IZVLEK VSEH PREISKAV SIDER OBJEKTA

Po končanem vrednotenju PS in VPN za vsako preskusno sidro poznamo njegovo odpornost na izvlek ( $R_{a,i}$ ). V praksi moramo nato na podlagi rezultatov vseh preskusnih sider določiti skupno karakteristično odpornost na izvlek  $R_{ak}$  za sidrani objekt kot celoto, na osnovi katere se za izvedbo sider objekta določita tako preskusna sila  $P_p$  za preskuse napenjanj, kot tudi sila zaklinjenja  $P_0$ . Naloga ni enolično rešljiva, saj zahteve veljavnih predpisov za določitev  $R_{ak}$  niso jasno opredeljene, možnih pristopov in metod vrednotenja vrednosti  $R_{a,i}$  pa je več.

### Vrednotenje po TSC 07.202

Po Tehnični specifikaciji za ceste (TSC 07.202:1998) se karakteristično odpornost sidra na izvlek  $R_{ak}$  določi kot manjša od povprečne  $R_{ak,povp}$  in minimalne  $R_{ak,min}$  dosežene karakteristične odpornosti na izvlek pri PS, ki se izvednotita iz dejansko doseženih vrednosti  $R_{a,i}$ , reduciranih s korelacijskim faktorjem  $\xi$ , katerega vrednost je odvisna od števila izvedenih PS/VPN:

$$R_{ak} = \min(R_{ak,povp}, R_{ak,min}), \text{ kjer sta:} \quad (5)$$

$$R_{ak,povp} = \frac{(\sum_i R_{a,i})/n}{\xi_{povp}}, \quad i = 1, \dots, n, \quad (6)$$

$$R_{ak,min} = \frac{\min(R_{a,i})}{\xi_{min}}, \quad i = 1, \dots, n, \quad (7)$$

pri čemer so:  $n$       število PS, opravljenih na objektu,  
 $\xi_{povp}$       vrednosti 1,50 ( $n = 1$ ), 1,35 ( $n = 2$ ) in 1,30 ( $n > 2$ ) ter  
 $\xi_{min}$       vrednosti 1,50 ( $n = 1$ ), 1,25 ( $n = 2$ ) in 1,10 ( $n > 2$ ).

### Vrednotenje po EN 1997-1

Po standardu SIST EN 1997-1:2005 se karakteristično vrednost odpornosti sider na izvlek  $R_{ak}$  praviloma določi na podlagi izvedenih najmanj treh ustreznostnih preskusov za vsako vrsto tal in konstrukcije, pri čemer se uporabi izraze (5) do (7). Ob tem se upošteva korelacijski faktor  $\xi_a$  (Pogačnik in Beg, 2009), pri čemer so vrednosti  $\xi_a$ , v primerjavi z vrednostmi po TSC 07.202:1998, bistveno nižje:

- $\xi_{povp}$       vrednosti 1,20 ( $n = 1$ ), 1,15 ( $n = 2$ ) in 1,10 ( $n \geq 3$ ) ter
- $\xi_{min}$       vrednosti 1,20 ( $n = 1$ ), 1,10 ( $n = 2$ ) in 1,05 ( $n \geq 3$ ).

### Uporaba statističnih metod

Projektiranje prednapetih geotehničnih sider se opira na izvedbo PS do porušitve na lokaciji sidranega objekta, ki jih obravnavamo kot statistično reprezentativen vzorec razpoložljivih odpornosti na izvlek. Na podlagi vseh vrednosti  $R_{a,i}$ , dobljenih na enem objektu, moramo določiti takšno nepristransko karakteristično vrednost  $R_{ak}$ , ki bo predstavljala previdno oceno odpornosti veznih delov preskusnih sider obravnavanega objekta. V kolikor želimo rezultate PS v sklopu izbire karakteristične vrednosti  $R_{ak}$  vrednotiti po statističnih metodah, morajo vrednosti  $R_a$  izvirati iz dovolj homogenih populacij, obenem pa mora biti na voljo zadostno število rezultatov PS, saj na podlagi le nekaj izvedenih PS (kot se izvedejo na posameznem sidranem objektu) statistično podajanje rezultatov ni mogoče.

Preverili smo ničelno domnevo o porazdelitvi populacije tako povprečnih odpornosti na izvlek, kot tudi koeficientov variacije za vrednosti odpornosti na izvlek PS, v praksi izvedenih v zadnjem desetletju. Ugotovili smo, da ob izbranem tveganju (5 %) ne moremo trditi, da povprečne odpornosti sider na izvlek niso porazdeljene po normalni porazdelitvi, zato lahko za oceno karakteristične vrednosti  $R_{ak}$  uporabimo eno od naslednjih metod (Gulvanessian in sod., 2002):

- **Metoda napovedi**, ki se lahko uporabi v primerih, ko so pogoji tal relativno homogeni, odpornost na izvlek pa ne izkazuje pomembnega sistematičnega trenda glede na mikrolokacijo mesta vgradnje ali globine vgradnje veznega dela sider. Oceno karakteristične vrednosti  $R_{ak}$  izračunamo po enostavnem izrazu (Frank in sod., 2004):

$$R_{ak} = R_{a,povp}(1 - k_n \cdot V_{Ra}), \quad (8)$$

kjer so:  $R_{a,povp}$ .. povprečna vrednost doseženih odpornosti na izvlek iz vrednotenja iz odpornosti na izvlek  $R_{a,i}$  preskusnih sider obravnavanega objekta,

$k_n$ ..... statistični koeficient, ki zajema vpliv števila opravljenih PS, razsežnosti zajetega območja tal, tip vzorca populacije, zmožnost prerazporeditve sidrskih sil med sidri objekta ter raven statističnega zaupanja pri oceni karakteristične vrednosti,

$V_{Ra}$  ..... koeficient variacije izvedenih PS (bodisi kot koeficient  $V_{Ra,znan}$  – raztros vrednosti odpornosti na izvlek je določen na podlagi številnih v preteklosti izvedenih PS bodisi kot  $V_{Ra,neznan}$  – vrednost vnaprej ni znana in se določi na podlagi ocene standardne deviacije vzorca PS  $S_{Ra}$ , PS opravljenih le na obravnavanem objektu).

Pri vrednotenju smo vrednosti koeficientov  $k_n$  odčitali iz preglednice (Frank in sod., 2004). Vrednosti  $V_{Ra,neznan}$  smo ocenili le na podlagi dejansko opravljenih PS sider posameznega tipa na testnem polju OZ-05:

$$S_{Ra} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (R_{a,i} - R_{a,povp}), \quad (9)$$

$$V_{Ra} = \frac{S_{Ra}}{R_{a,povp}}. \quad (10)$$

Na osnovi obsežnega nabora odpornosti na izvlek v preteklosti izvedenih PS, smo po izrazu (10) izvednotili povprečni skupni koeficient variacije  $V_{Ra,znan} = 0,12$ , le da smo namesto ocene standardne deviacije  $s_{Ra}$ , (dobljene iz PS izvedenih na obravnavanem objektu) upoštevali standardno deviacijo  $\sigma_{Ra}$  vseh v preteklosti dobljenih odpornosti na izvlek  $R_a$ .

- Pri *Bayesovi metodi* številni predhodni podatki in domneva o povezavi teh podatkov z rezultati preskusa omogočajo podajanje takih rezultatov kot statističnih, pri čemer izkoriščamo prednost, da je dolgoročna variabilnost karakterističnih vrednosti običajno precej omejena (stabilna), zato je negotovost pri določitvi  $\sigma$  relativno majhna, kar vodi v povečanje karakteristične vrednosti (Gulvanessian in sod., 2002). Tudi po tej metodi lahko obravnavamo tako primere z znano, kot tudi neznano standardno deviacijo. Zaradi nepoznavanja predhodnih podatkov za sidra tipov RCP/D-K, RCP/D-Z in RCP/D-I smo Bayesovo metodo uporabili le v primeru referenčnih sider RCP/D:

### Vrednotenje po EN 1537 in SIA 267

Po standardih SIST EN 1537:2002 in SIA 267:2003, se karakteristična odpornost sidra na izvlek  $R_{ak}$  določi kot najmanjši od treh in-situ doseženih rezultatov PS/VPN:

$$R_{ak} = \min(R_{a,i}) \quad (11)$$

pri čemer naj bo vrednost  $R_{ak}$  večja od notranje odpornosti sidra po kablju sidra  $R_{ik}$ . Ne glede na to je dopuščena tudi možnost, da se odpornost sider po jeklu kabla sidra glede na nosilnost tal zaledja ne izkoristi v celoti, saj karakteristično odpornost sidra  $R_k$  določa kot manjšo od obeh vrednosti:

$$R_k = \min(R_{ik}, R_{ak}) \quad (12)$$

### Vrednotenje na podlagi sile kritičnega lezenja sidra določene iz bilinearnega diagrama po prEN ISO 22477-5

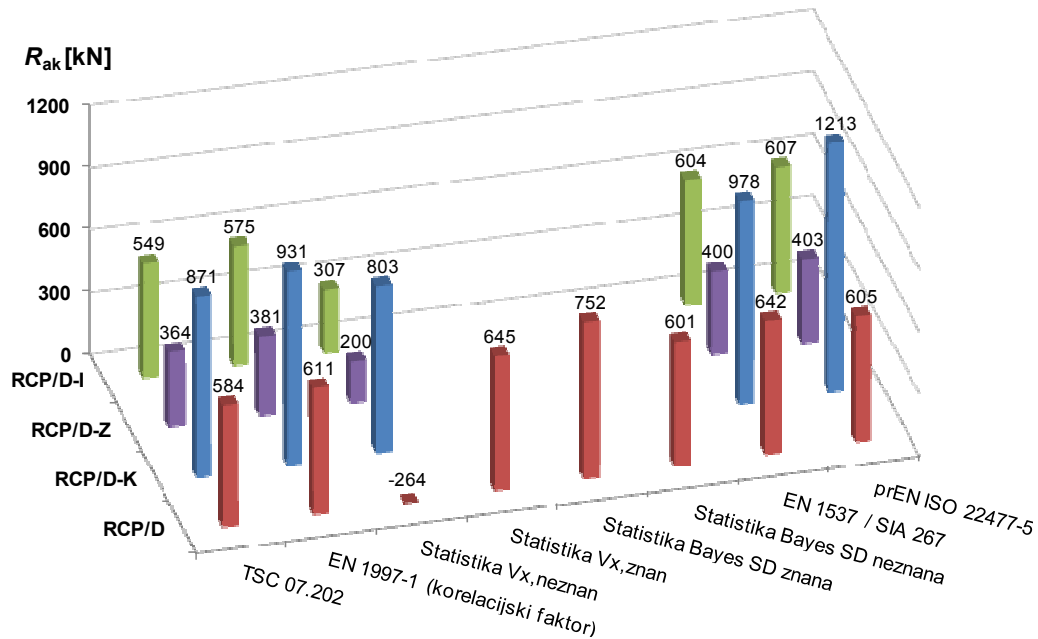
Med PS/VPN prednapetega sidra so vrednosti intervalnih mer lezenja  $k_{int}$  v območju nižjih stopenj sil  $P_i$  relativno nizke, s se povečevanjem stopnje sile  $P_i$  postopoma povečujejo, nato pa v nekem trenutku (z začetkom popuščanja veznega dela sidra) začno vrednosti  $k_{int}$  intenzivno naraščati. Takšno obnašanje sidra lahko ponazorimo z bilinearnim diagramom, pri čemer začetno območje nizkih vrednosti  $k_{int}$  opišemo z eno aproksimacijsko premico, medtem ko območje intenzivnega naraščanja visokih  $k_{int}$  ponazorimo z drugo aproksimacijsko premico. Po osnutku standarda oSIST prEN ISO 22477-5:2005 presečišče teh dveh premic določa silo kritičnega lezenja  $P_c$ , ki predstavlja začetno točko pospešenega naraščanja vrednosti  $k_{int}$ . Iz primerjave relacij med silami se izkaže, da sila  $P_c$  pravzaprav predstavlja spodnjo mejo preskusne sile  $P_b$ , torej lahko odpornost sidra na izvlek ocenimo kot:

$$R_a(P_c) \leq 1,35 \cdot R_d = 1,35 \cdot 0,8 \cdot P_c = \quad (13)$$

Glede na to, da se ta oSIST prEN ISO 22477-5:2005 navezuje na SIST EN 1537:2002 smo za tako dobljene odpornosti na izvlek posameznih sider  $R_{a,i}$  karakteristične odpornosti sider na izvlek  $R_{ak}$  izvednotili po izrazih (11) in (12).

### Primerjava rezultatov PS in VPN izvedenih leta 2008, vrednotenih po različnih predpisih in metodah

Za vrednotenje skupne karakteristične odpornost na izvlek vseh preiskav sider objekta  $R_{ak}$  smo uporabili vse zgoraj navedene pristope, pri čemer so dobljene vrednosti prikazane na sliki 6.



Slika 6. Primerjava karakterističnih odpornosti sider na izvlek  $R_{ak}$ , dobljenih iz rezultatov preskušanj sider na testnem polju, izvedenih po različnih metodah.

Primerjava vrednosti  $R_{ak}$ , dobljenih po različnih metodah (Sl. 6), pokaže, da:

metoda TSC 07.202 v splošnem daje precej nizke (konservativne) vrednosti  $R_{ak}$ ,

- z bilinearnim diagramom po oSIST prEN ISO 22477-5:2005 in po statistični metodi napovedi za primer neznanega koeficienta variacije ne dobimo vedno uporabnih oziroma zanesljivih vrednosti  $R_{ak}$  (v enem primeru dobimo celo nesmiseln rezultat – negativno vrednost  $R_{ak}$ ),
- z uporabo statistične metode napovedi za primer znanega koeficienta variacije in Bayesove metode z znano standardno deviacijo lahko izkoristimo ugoden vpliv statistično bistveno večjega vzorca in poznanega raztrosa rezultatov v preteklosti opravljenih preiskav sider, le nekoliko manjše vrednosti pa dobimo po metodah SIST EN 1997-1:2005 z uporabo korelacijskega faktorja  $\xi$  in SIST EN 1537:2002 oziroma SIA 267:2003 (upoštevanje najmanjše dosežene odpornosti  $R_{a,i}$  kot karakteristične vrednosti  $R_{ak}$ ).

Takšen rezultat potrjuje splošno primernost uporabe evropskih standardov pri analizi rezultatov PS/VPN in določanju karakteristične vrednosti. Vrednosti dobljene po SIST EN 1537:2002 (oziroma SIA 267:2003) so za približno 5 % višje od vrednosti, dobljenih po SIST EN 1997-1:2005, kar pripisujemo dejstvu, da ocena SIA 267:2003, da za karakteristično vrednost privzamemo kar najnižjo vrednost  $R_{a,i}$ , doseženo na posameznem objektu, nima statistične podlage (možno je, da bi na istem objektu pri naslednji PS/VPN dosegli nižjo vrednost  $R_{a,i}$ ).

## ZAKLJUČEK

Zasnovali in vgradili smo prototipe modificiranih sider z različnimi zasnovami njihovih veznih delov. Na testnem polju smo uspešno izvedli relativno kompleksna preskušanja in vrednotenja PS z različnimi dolžinami prostih oziroma veznih delov pramen kabla istega sidra, razvito je bilo računalniško orodje, ki omogoča nadaljnji razvoj in uporabo modificiranih tipov trajnih prednapetih pramenskih geotehničnih sider s celovito protikorozijsko zaščito v praksi.

V prispevku smo na kratko podali dobljene rezultate preskušanj modificiranih tipov sider (sider povečane togosti – tip RCP/D-K, večkratnih sider – tip RCP/D-Z in sider spremenljive togosti – tip RCP/D-I), ki smo jih primerjali z rezultati referenčnih sider (tip RCP/D). Dobljene odpornosti na izvlek predvsem tipov sider RCP/D-Z in RCP/D-I so bile glede na teoretična izhodišča in izkušnje iz tujine nižje od pričakovanih, kar kaže na to, da v teh primerih nismo uspeli doseči ugodnejšega

poteka napetosti vzdolž veznega dela pramen kabla sidra. Na podlagi podrobne analize smo uspeli prepoznati razloge za pojav nepričakovanih mehanizmov popuščanja veznih delov pramen. Pričakujemo, da bodo odpornosti na izvlek modificiranih tipov sider višje, v kolikor bomo s tehnološko nadgradnjo specifičnih detajlov oblikovanja veznih delov modificiranih sider uspeli odpraviti pomanjkljivosti preskušanih prototipov sider.

Z opravljenimi raziskavami in podrobnimi analizami smo pokazali, da na podlagi istih izmerjenih vrednosti z različnimi pristopi določitve merodajnih mer lezenja PS/VPN dobimo različne odpornosti na izvlek posameznih sider  $R_{a,i}$ . Vrzeli določil veljavnih predpisov smo poskušali premostiti tako, da smo na podlagi vseh izvedenih PS/VPN na objektu po več različnih pristopih določili skupne karakteristične odpornosti na izvlek  $R_{ak}$ , pri čemer se je izkazal ugoden vpliv poznavanja in upoštevanja historičnih vrednosti v preteklosti opravljenih PS.

## ZAHVALA

Zahvaljujemo se Družbi za avtoceste v Republiki Sloveniji za financiranje razvojno-raziskovalne naloge, v sklopu katere smo izvedli preskušanja sider na testnem polju, kot tudi proizvajalcu sider CA.TI. Carnica Tiranti, S.r.l. iz Italije, ki je s svojimi izkušnjami pomagal pri realizaciji prototipov kot tudi za donacijo sider.

## Literatura

- Barley, A.D. 1990. Ground anchorage containing a multiple of ground anchorages : patent number EP 0 356 215 A2, date of publication of application 28.02.1990; application number 89308532.4. European Patent Office: 6 str.
- Barley, A.D. 1995. Theory and practice of the single bore multiple anchor system. V: Widmann, R. (ur.). Anchors in theory and practice. Salzburg, 9-10 October 1995. Rotterdam, Brookfield, A.A. Balkema: str. 293-301.  
<http://www.sbmashsystems.com/anchorman/pdfs/SBMATP2.pdf> (pridobljeno 01.10.2008).
- Barley, A.D. 1997. The single bore multiple anchor system. V: Littlejohn, G.S. (ur.). International conference on ground anchorages and anchored structures in service. ICE London, March 1997. London, Thomas Telford: str. 65-75.  
<http://www.sbmashsystems.com/anchorman/pdfs/SBMATP3.pdf> (pridobljeno 01.10.2008).
- Barley, A.D., Windsor, C.R. 2000. Recent advances in ground anchor and reinforcement technology with reference to the development of the art. V: International conference on geotechnical and geotechnical engineering, vol. 1. 19th – 24th November 2000, Melbourne, Australia. Basel, Lancaster: str. 1157-1252.  
<http://www.sbmashsystems.com/anchorman/pdfs/GATP12.pdf> (pridobljeno 01.10.2008).
- Bruce, M.E.C., Gómez, J., Traylor, R.P. 2007. Repeated lift-off testing of single bore multiple anchors for dam retaining wall over a 5-year period. V: Littlejohn, G.S. (ur.). International conference on ground anchorages and anchored structures in service. ICE London, November 2007. London, Thomas Telford: str. 111-119.  
<http://www.sbmashsystems.com/anchorman/pdfs/Paper34.pdf> (pridobljeno 01.10.2008).
- DIN 4125-2:1976 – Erd- und Felsanker – Verpressanker für dauernde Verankerungen (Daueranker) im Lockergestein. Bemessung, Ausführung und Prüfung.
- Frank, R., Bauduin, C., Driscoll, R., Kavvas, M., Krebs Ovesen, N., Orr, T., Schuppener, B. 2004. Designers' guide to EN 1997-1 : Eurocode 7 : Geotechnical design – General rules. London, Thomas Telford: 216 str.
- Gulvanessian, H., Calgaro, J.-A., Holický, M. 2002. Designers' guide to EN 1990 : Eurocode : basis of structural design. London, Thomas Telford: 192 str.
- Hanna, T.H. 1982. Foundations in tension : ground anchors. Trans Tech Publications. New York, McGraw Hill Book Co.: 573 str.
- Klemenc, I. 2011. Preiskave trajnih prednapetih pramenskih geotehničnih sider različnih zasnov veznega dela : doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, FGG: 211 str. [152] str. pril.
- Littlejohn, S. 1993. Overview of rock anchorages. V: Hudson, J.A. (ur.). Comprehensive rock engineering : excavation, support and monitoring, vol. 4. Oxford, Pergamon Press: str. 413-450.

- oSIST prEN ISO 22477-5:2005 – Geotehnično preiskovanje in preskušanje – Preskušanje geotehničnih konstrukcij. 5. del: Preskušanje sider (ISO/DIS 22477-5:2005) – Geotechnical investigation and testing – Testing of geotechnical structures – Part 5: Testing of anchorages (ISO/DIS 22477-5:2005).
- Pogačnik, A. (ur.), Beg, D. (ur.). 2009. Priročnik za projektiranje gradbenih konstrukcij po Evrokod standardih. Inženirska zbornica Slovenije, Ljubljana: 1077 str.
- SIA 267:2003 – Geotechnik.
- SIA 267/1:2003 – Geotechnik – Ergänzende Festlegungen.
- SIST EN 1537:2002/AC:2004 – Izvedba posebnih geotehničnih del – Geotehnična sidra : Execution of special geotechnical work – Ground anchors.
- SIST EN 1990:2004 – Evrokod: Osnove projektiranja konstrukcij – Eurocode – Basis of structural design.
- SIST EN 1997-1:2005 – Evrokod 7: Geotehnično projektiranje – 1. del: Splošna pravila – Eurocode 7 – Geotechnical design – Part 1: General rules.
- TSC 07.202:1998 – Geotehnična sidra. Ljubljana, Ministrstvo za promet in zveze: 18 str.
- Škrabl, S. 2004. Prednapeto geotehnično sidro spremenljive togosti : patent št. 21320, datum objave prijave 30.04.2004; št. prijave P-200200260. Ljubljana : Urad RS za intelektualno lastnino: 9 str.

Iztok Klemenc s soavtorji:

Izvedba preiskav trajnih prednapetih geotehničnih sider z modificiranimi veznimi deli na testnem...