

# Lastnosti različnih vrvi za sidranje jeklenih konstrukcij

## Characteristics of Various Wire Ropes for Guying Steel Structures

Vojvodič Gvardjančič J<sup>1</sup>, IMT Ljubljana

*Vrv je konstrukcijski element, za katerega je značilno, da je sposoben prenašati velike natezne obremenitve v smeri osi, zaradi neznatne upogibne odpornosti pa je obenem zelo gibljiv. Statične nosilne vrvi so obremenjene samo z nategom, sila v vrvi pa je v direktni zvezi z deformacijo vrvi. Ta zveza pa ni niti linearna, niti enolična. V sistemu je potrebno upoštevati geometrijsko nelinearnost sistema, na silo v vrvi pa med drugim vpliva tudi oblika preseka in sestava vrvi, način vitja vrvi in zgodovina obremenjevanja. Z našimi raziskavami smo želeli obdelati vrvi z vidika bolj natančnega upoštevanja geometrijskih karakteristik pri računu vrvnih sistemov. Eksperimentalno pa smo določali mehanske lastnosti jeklene vrvi s konopljinim jedrom, jeklene vrvi s polipropilenskim jedrom in vrvi phillystran.*

*Ključne besede: jeklena vrv, jeklena vrv s konopljinim jedrom, vrv phillystran, sidranje antenskih stolpov, geometrijska in materialna nelinearnost*

*The wire rope is a construction element capable to carry high axial tensile loads, and is also very flexible due to insignificant bending strength. The static supporting ropes are loaded only by tensile loads, and the stress in the rope directly depends on its strain. This dependence is neither linear nor unique. Namely, the geometric nonlinearity of the system must be considered, and besides, the force is also affected by the rope cross section and composition, mode of rope winding, and the history of loading. In this article the geometric characteristics of ropes will be investigated in detail with the aim of more accurate calculation of rope systems. The mechanical properties of wire rope with a hemp core, wire rope with polypropylene core and phillystran rope were determined experimentally.*

*Key words: wire rope, wire rope with a hemp core, wire rope with a polypropylene core, phillystran rope, guying antenna tower, geometric and material nonlinearity.*

### 1. Uvod

Sidrani antenski stolpi se uporabljajo kot antene radijskih oddajnih centrov, lahko so namenjeni za namestitvev antenskih sistemov za potrebe televizije in PTT ali pa so kombinacija obojega, torej kot antena in hkrati stolp za namestitev TV in PTT antenskih sistemov. Navadno je sidranje stolpa izvedeno s tremi vrvmi v razmiku 120° za vsako sidrno ravnino. Sidrani antenski stolpi so vitke jeklene konstrukcije, pri katerih stabilnost stolpov zagotavljajo sidrne vrvi, zato je število sidrnih ravnin odvisno od višine antenskega stolpa in izvedbe konstrukcije.

Antenski stolpi, ki rabijo kot radijske antene oddajnih centrov, so napajani z električnim tokom visoke napetosti, zato morajo biti takšni stolpi popol-

noma izolirani od tal. Pri sidranju z jeklenimi vrvmi je potrebno prav tako izolirati te vrvi, zato so vanje vgrajeni sistemi izolatorskih verig. Uporabo jeklenih sidrnih vrvi včasih nadomestimo s sintetičnimi vrvmi phillystran, katerih prednost je v tem, da ta vrv ni električno prevodna in zato sistemi izolatorskih verig, ki imajo običajno trajnost 10 let, niso potrebni.

Nosilnost vrvi phillystran je kar precejšnja; vrv premera 24 mm z dolžinsko maso 0,44 kg/m ima porušno silo 259 kN, prav tako ima jeklena vrv premera 17 mm z dolžinsko maso 1,52 kg/m.

Za sidranje konstrukcij uporabljamo različne vrste vrvi. Statične nosilne vrvi so obremenjene samo z nategom (obremenjene so lahko tudi s prečno silo, posledica te je ošna sila), sila v vrvi pa je v direktni zvezi z deformacijo vrvi. V primeru tankih vrvi se praktično upošteva, da prevzema vrv samo natezne sile. Zaradi majhnega premera in majhne lastne teže

<sup>1</sup> Dr. Jelena VOJVODIČ GWARDJANČIČ, dipl. inž. gradb.  
Inštitut za kovinske materiale in tehnologije  
61000 Ljubljana, Lepi pot 11

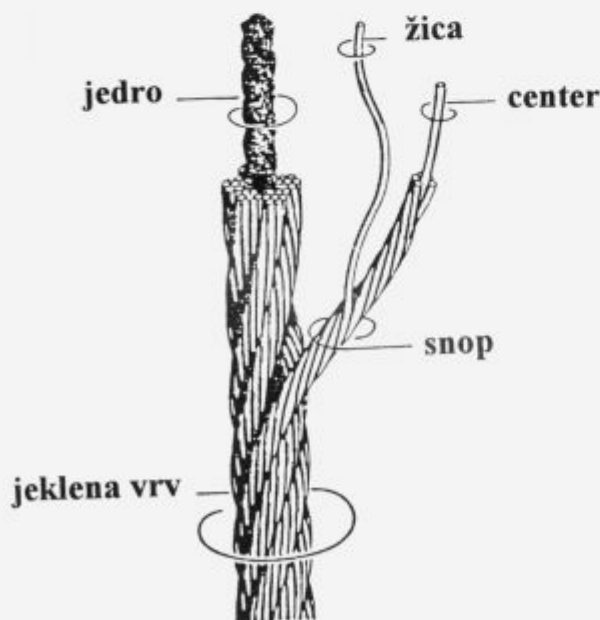
se upogibni momenti zanemarijo. Sila v vrvi je v direktni zvezi z deformacijo vrvi. Ta zveza pa ni niti linearna, niti enolična. Statično se vrv v nosilnem sistemu obravnava dokaj enostavno, dejansko pa so razmere pri obremenjeni vrvi bolj zapletene. V sistemu je potrebno upoštevati geometrijsko nelinearnost sistema, na napetostne razmere v vrvi pa vpliva tudi oblika preseka in sestava vrvi, način vitja in zgodovina obremenjevanja.

V prispevku bodo podane mehanske lastnosti jeklene vrvi  $\varnothing 18$  mm s konopljinim jedrom, jeklene vrvi  $\varnothing 13$  mm s polipropilenskim jedrom in vrvi phillystran HPTG 2700. Te omogočajo medsebojno primerjavo ter tudi primerjavo s podatki, ki jih navaja proizvajalec. Tako obdelani podatki naj bi rabili za oceno ustreznosti posameznih vrst vrvi za sidranje antenskih stolpov, obenem pa omogočajo boljši vpogled v obnašanje vrvi med uporabo.

## 2. Teoretični del

Vrvi so sposobne prenašati velike natezne obremenitve v smeri osi, njihova upogibna in torzijska nosilnost pa je precej manjša, dočim osnih obremenitev vrv ne more prevzeti. Osnovni element jeklene vrvi je tanka kovinska žica. Sestava jeklene vrvi je prikazana na **sliki 1**. Jedro je lahko sestavljeno iz kovinskih žic, naravnih ali polipropilenskih vlaken. Vsak snop ima center, ki je osni element, okrog katerega so spiralno ovite posamezne žice. Pri jeklenih vrveh žice neprekinjeno potekajo po celi dolžini vrvi in prenašajo obremenitve predvsem s svojo natezno sposobnostjo, delno pa tudi z medsebojnim sodelovanjem, torej s trenjem.

Natančen statični odziv žične vrvi je dokaj težko določljiv, zato v računih upoštevamo nekatere pred-



**Slika 1:** Sestava jeklene vrvi  
**Figure 1:** The composition of wire rope

postavke (zanemarimo trenje med žicami, vse obtežbe na vrv so enako razporejene med posamezne snope, vse obtežbe na snop so enako razdeljene na posamezne žice...) <sup>1-5</sup>. Statično obnašanje jeklene vrvi je odvisno od začetne konfiguracije posameznih žic, obnašanje vrvi pa je odvisno od spreminjanja vitja žic. Teoretične in eksperimentalne raziskave vrvi so opravili različni avtorji <sup>6-12</sup>. Enačbe statičnega obnašanja jeklene vrvi ali snopa pri velikih deformacijah so obdelane v literaturi <sup>13-16</sup>, problem končnega raztezka vrvi s središčnim jedrom pri obremenitvi z osnimi silami in torzijskimi momenti pa v literaturi <sup>17</sup>.

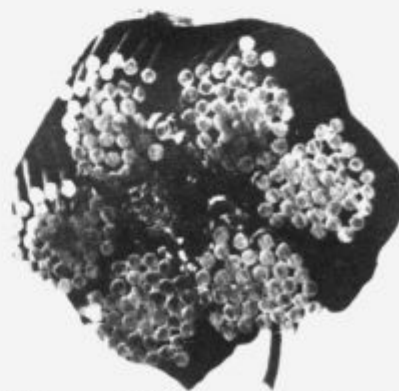
Nelinearna analiza vrvi z enim snopom je podrobneje obdelana v lit. <sup>18</sup>, izdelan je tudi računalniški program za numerično reševanje enačb.

## 3. Eksperimentalni del

Obdelane so bile tri različne vrste vrvi: jeklena vrv  $\varnothing 18$  mm s konopljinim jedrom (**slika 2**), jeklena vrv  $\varnothing 13$  mm s polipropilenskim jedrom (**sliki 3, 4**) in phillystran vrv HPTG 2700 (**sliki 5, 6**). Oprema za preizkušanje je bila pri vseh meritvah enaka. Meritve so potekale na napenjalni stezi z razmikom 435 cm med fiksnima oporoma.



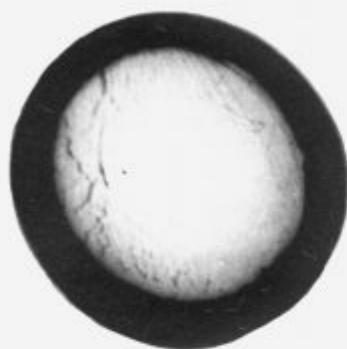
**Slika 2:** Jeklena vrv  $\varnothing 18$  mm s konopljinim jedrom - prečni preiz  
**Figure 2:** Wire rope  $\varnothing 18$  mm with a hemp core



**Slika 3:** Jeklena vrv  $\varnothing 13$  mm s polipropilenskim jedrom - prečni preiz  
**Figure 3:** Wire rope  $\varnothing 13$  mm with a polypropylene core - cross section



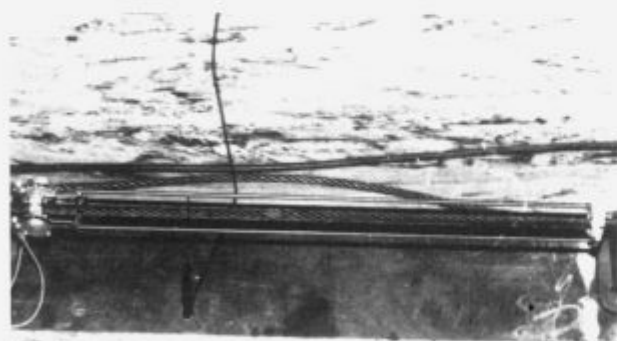
Slika 4: Jeklena vrv  $\varnothing$  13 mm s polipropilenskim jedrom  
Figure 4: Wire rope  $\varnothing$  13 mm with a polypropylene core



Slika 5: Vrv Phillystran HPTG 2700 - prečni prerez  
Figure 5: Phillystran rope HPTG 2700 - cross section



Slika 6: Phillystran vrv HPTG 2700  
Figure 6: Phillystran rope HPTG 2700



Slika 7: Deformameter na jekleni vrv  $\varnothing$  18 mm  
Figure 7: Deformameter on wire rope  $\varnothing$  18 mm

Sila je bila dobljena hidravlično, izmerjena pa je bila z 200 kN dinamometrom. Deformacije so bile merjene na sredini razponov vrvi z objemnim deformometrom z mersko bazo 1000 mm (slika 7), dveh induktivnih ekstenzometrov ter ojačevalnika. Pro-

grami preizkušanja so bili izbrani za posamezne vrvi tako, da bi lahko določili osnovne mehanske lastnosti ter njihovo obnašanje v odvisnosti od časa in od zgodovine obremenjevanja. Osnovni podatki za vrvi so:

1 jeklena vrv  $\varnothing=18$  mm s konopljinim jedrom 6(1+6+12+18), JUS C.H1.074

nominalni premer:	18 mm
število snopov:	6
sestava snopa:	1+6+12+18 žic
korak spirale snopa:	11,0 cm
premer posameznih žic v snopu:	0,8 mm
nominalni presek vrvi:	111,0 mm <sup>2</sup>
nominalna natezna trdnost:	1600 MPa
pretržna sila vrvi:	177,60 kN

2 jeklena vrv  $\varnothing=13$  mm s polipropilenskim jedrom 6(1+6+12+18), JUS C.H1.074

nominalni premer:	13 mm
število snopov:	6
sestava snopa:	1+6+12+18 žic
korak spirale snopa:	8,5 cm
premer posameznih žic v snopu:	0,6 mm
nominalni presek vrvi:	62,7 mm <sup>2</sup>
nominalna natezna trdnost:	1800 MPa
pretržna sila vrvi:	112,86 kN

3 vrv phillystran HPTG (High Performance Tower Guy) 2700

nominalni premer brez srajčke:	12,7 mm
nosilni presek vrvi:	66,45 mm <sup>2</sup>
nominalna natezna trdnost:	1935 MPa
minimalna pretržna sila vrvi:	122,58 kN
elastični modul (proizvajalec):	96,6-124 kN/mm <sup>2</sup>

Preizkušanje jeklene vrvi  $\varnothing$  18 mm je potekalo tako, da je bila trikrat obremenjena do sile 100 kN. Vsak preizkus je bil razdeljen na 10 intervalov po 10 kN. Na koncu vsakega intervala je bila sila vzdrževana toliko časa, dokler se tečenje ni popolnoma ustavilo, šele nato se je preizkušanje nadaljevalo z naslednjim intervalom. Po zadnjem intervalu je bila vrv razbremenjena, pri razbremenitvi pa so bile registrirane sile in deformacije v omenjenih intervalih.

Preizkušanje jeklene vrvi  $\varnothing$  13 mm je potekalo podobno kot pri vrv  $\varnothing$  18 mm. Vrv je bila trikrat preizkušena do sile 60 kN, kar predstavlja 53 % porušne sile. Vsak preizkus je bil razdeljen na 6 intervalov po 10 kN. V vsakem intervalu smo vrv obremenili do predpisane sile, nato pa smo silo vzdrževali toliko časa, da se je tečenje praktično ustavilo, šele nato smo vrv obremenili za prirastek do naslednjega intervala. Po zadnjem intervalu, pri katerem je bilo tudi upoštevano tečenje vrvi, smo vrv razbremenili, pri čemer pa so bile opazovane količine v enakih intervalih tudi registrirane.

Vrv phillystran HPTG 2700 je bila preizkušena trikrat do sile 80 kN, kar predstavlja 65% porušne sile. Obremenjevanje je potekalo v fazah po 10 kN. Pri vsaki fazi je bila sila v vrvi vzdrževana toliko časa, da so se deformacije zaradi tečenja umirile.

#### 4. Rezultati preiskav

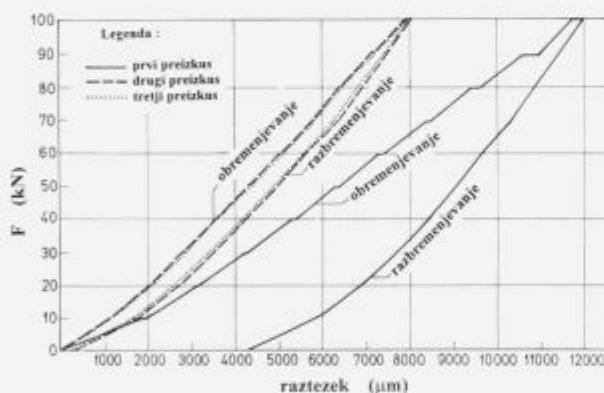
*Jeklana vrv Ø 18 mm s konopljinim jedrom 6 (1+6+12+18)*

Rezultati vseh treh preizkušanj so prikazani v diagramu na **sliki 8**. Na absciso so naneseni raztezki v mikrometrih, na ordinato pa sile v vrvi. Horizontalni odseki pri posameznih intervalih predstavljajo tečenje vrvi pri vzdrževani sili. V **tabeli 1** so zbrani elastični moduli v odvisnosti od intervala, upoštevanja tečenja in interpretacija rezultatov. Tako prvi stolpec v tabeli predstavlja elastični modul vrvi v obravnavanem intervalu brez tečenja, to je z upoštevanjem odčitka takoj po povečanju sile za 10 kN. V drugem stolpcu je naveden elastični modul vrvi v obravnavanem intervalu z upoštevanjem tečenja na koncu tega intervala, tretji stolpec predstavlja kumulativno vrednost elastičnega modula pri dani sili, v četrtem je naveden elastični modul vrvi pri razbremenjevanju v obravnavanem intervalu, peti stolpec v tabeli pa predstavlja kumulativni elastični modul pri popuščanju vrvi. Elastični moduli v posameznih kolonah so izračunani po enačbah:

$$E = Ds / De \quad (\text{stolpec 1,2,4}) \quad (1)$$

$$E = s / e \quad (\text{stolpec 3,5}) \quad (2)$$

kjer pomeni Ds prirastek napetosti (10000/111 = 90.09 N/mm<sup>2</sup>), De je prirastek specifične deformacije (s tečenjem ali brez njega), s je napetost na koncu meritvenega intervala, e pa specifična deformacija pri dani napetosti.



**Slika 8:** Natezni preizkus jeklene vrvi Ø 18 mm s konopljinim jedrom

**Figure 8:** The tensile test of wire rope Ø 18 mm with a hemp core

**Tabela 1:** Elastični modul jeklene vrvi Ø 18 mm s konopljinim jedrom pri prvem, drugem in tretjem preizkusu

Interval (kN)	P <sub>porušna</sub> (%)	E (N/mm <sup>2</sup> )				
		brez tečenja	s tečenjem	kumulativno s tečenjem	razbre-razbremenitev	kumulativno
<b>prvi preizkus vrvi</b>						
0 - 10	5.6	47000	46000	46000	58000	58000
10 - 20	11.3	75000	72000	56000	97000	70000
20 - 30	16.9	86000	82000	59000	116000	80000
30 - 40	22.5	90000	82000	67000	124000	88000

Interval (kN)	P <sub>porušna</sub> (%)	E (N/mm <sup>2</sup> )				
		brez tečenja	s tečenjem	kumulativno s tečenjem	razbre-razbremenitev	kumulativno
40 - 50	28.2	100000	90000	70000	139000	95000
50 - 60	33.8	100000	88000	73000	157000	102000
60 - 70	39.4	92000	84000	74000	134000	105000
70 - 80	45.1	97000	82000	75000	150000	109000
80 - 90	50.7	90000	64000	74000	180000	114000
90 - 100	56.3	120000	90000	75000	150000	117000
<b>drugi preizkus vrvi</b>						
0 - 10	5.6	77000	75000	75000	59000	59000
10 - 20	11.3	106000	100000	86000	92000	72000
20 - 30	16.9	116000	109000	92000	113000	82000
30 - 40	22.5	124000	116000	97000	124000	90000
40 - 50	28.2	133000	124000	102000	124000	95000
50 - 60	33.8	129000	120000	104000	133000	100000
60 - 70	39.4	129000	120000	106000	120000	102000
70 - 80	45.1	150000	139000	110000	157000	107000
80 - 90	50.7	129000	116000	110000	157000	111000
90 - 100	56.3	133000	113000	111000	180000	115000
<b>tretji preizkus vrvi</b>						
0 - 10	5.6	75000	-	75000	62000	62000
10 - 20	11.3	95000	-	84000	92000	74000
20 - 30	16.9	116000	-	92000	113000	84000
30 - 40	22.5	133000	-	100000	120000	91000
40 - 50	28.2	109000	-	102000	133000	97000
50 - 60	33.8	129000	-	105000	129000	101000
60 - 70	39.4	124000	-	108000	129000	104000
70 - 80	45.1	144000	-	111000	164000	109000
80 - 90	50.7	116000	-	112000	144000	112000
90 - 100	56.3	129000	-	113000	190000	117000

*Jeklana vrv Ø 13 mm s polipropilenskim jedrom 6 (1+6+12+18)*

Analogno so obdelani rezultati tudi za to vrsto vrvi, elastični modul pri tretjem preizkusu vrvi je podan v **tabeli 2**.

**Tabela 2:** Elastični modul jeklene vrvi Ø 13 mm s polipropilenskim jedrom pri tretjem preizkusu

Interval (kN)	P <sub>porušna</sub> (%)	E (N/mm <sup>2</sup> )				
		brez tečenja	s tečenjem	kumulativno s tečenjem	razbre-razbremenitev	kumulativno
0 - 10	8.9	78000	74000	74000	61000	61000
10 - 20	17.7	113000	107000	87000	113000	79000
20 - 30	26.6	121000	114000	95000	109000	87000
30 - 40	35.4	126000	121000	100000	129000	95000
40 - 50	44.3	125000	114000	103000	132000	101000
50 - 60	53.2	124000	112000	104000	154000	107000

*Vrv Phyllystran HPTG 2700*

Za razliko od vitih vrvi se pri vrvi phyllystran HPTG ne kažejo znaki utrjevanja vrvi. Iz meritev je razvidno, da pri vrveh HPTG ni tečenja v klasičnem smislu kot pri vitih vrveh, temveč so nepovratne deformacije posledica prestrukturiranja vlaken v samem snopu in zdrsov v konektorskih glavah. Pri izračunu elastičnega modula smo poleg rezultatov preizkusov upoštevali tudi geometrijske podatke proizvajalca. V

tabeli 3 so zbrani elastični moduli za prvi preizkus vrvi.

**Tabela 3:** Elastični modul vrvi phillystran HPTG 2700 pri prvem preizkusu

Interval (kN)	P <sub>porušna</sub> (%)	brez tečenja		E (N/mm <sup>2</sup> )	
		s tečenjem	s tečenjem	kumulativno	razbre-razbremenitev
0 - 10	8.2	126000	123000	123000	87000 87000
10 - 20	16.3	134000	127000	125000	122000 102000
20 - 30	24.5	139000	126000	125000	134000 110000
30 - 40	32.6	148000	126000	126000	142000 117000
40 - 50	40.8	151000	123000	125000	148000 122000
50 - 60	48.9	161000	127000	125000	155000 126000
60 - 70	57.1	169000	136000	127000	162000 130000
70 - 80	65.3	177000	146000	129000	193000 135000

## 5. Diskusija

Iz meritev *jeklene vrvi*  $\varnothing 18$  mm s konopljinim jedrom je razvidno, da so deformacije zaradi tečenja večje pri višjih silah obremenjevanja, pri vsakem kasnejšem obremenjevanju vrvi do 100 kN pa se deformacije zaradi tečenja manjšajo. Pri vsaki fazi obremenjevanja in razbremenjevanja se pojavlja nepovratna deformacija, ki pa se s ponovnimi obremenitvami manjša. Podajnost vrvi se z večanjem sile v njej manjša, prav tako pa se manjša tudi podajnost vrvi z vsakim naslednjim obremenjevanjem.

Elastični modul vrvi je funkcija sile. Ne glede na to, ali primerjamo rezultate odsekov s tečenjem ali brez tečenja elastični modul raste z večanjem sile v vrvi. Če primerjamo prvi in zadnji interval brez upoštevanja tečenja, dobimo pri prvem preizkusu vrvi 2,55-kratno povečanje elastičnega modula, pri drugem 1,73-kratno in pri tretjem 1,72-kratno. To pomeni, da bi bilo pri izračunih poleg geometrijske nelinearnosti, ki pri naših meritvah zaradi majhne dolžine preizkušane vrvi praktično nima vpliva, potrebno upoštevati tudi nelinearnost elastičnega modula.

Omenimo naj tudi, da je področje, ki je zanimivo za antenske stolpe, območje prednapenjanja vrvi. Iz **tabele 1** je razvidno, da so vrednosti elastičnega modula v območju sile od 5,6 % do 11,3 % porušne sile bistveno nižje od računskih vrednosti. Razlika je še posebej očitna pri prvem preizkušanju vrvi, medtem ko je pri drugem, potem ko je vrv do neke mere popustila, elastični modul bistveno višji. Pri tretjem preizkusu je elastični modul nekoliko nižji kot pri drugem, kar pomeni, da se z nadaljnjimi obremenjevanji več ne spreminja. Poleg elastičnega modula pri obremenjevanju je zanimivo primerjati tudi tistega pri razbremenjevanju. Elastični moduli so pri višjih silah v območju preizkušanja večji kot pri naslednjem preizkusu, medtem ko velja za spodnje območje ravno obratno.

Pri meritvah *jeklene vrvi*  $\varnothing 13$  mm s polipropilenskim jedrom so pri tretjem preizkusu opazne deformacije zaradi tečenja, medtem ko jih pri vrvi  $\varnothing 18$  mm ni. Možen vzrok za to razliko je v številu stopenj, v katerem je opazovano tečenje. Pri vrvi

$\varnothing 18$  mm je bilo 10 stopenj, pri  $\varnothing 13$  mm pa le 6. Elastični moduli so pri vrvi  $\varnothing 13$  mm v vseh območjih nižji kot pri vrvi  $\varnothing 18$  mm. Možni razlog za tako obnašanje je v geometrijskih karakteristikah: vrv  $\varnothing 18$  mm ima hod vitja 110 mm, vrv  $\varnothing 13$  mm pa le 85 mm, možen pa je tudi vpliv stržena na elastični modul ravno tako kot na karakteristike tečenja.

Meritve vrvi *phillystran HPTG* dokazujejo, da elastični modul raste z večanjem sile v vrvi. Izračunani elastični moduli so višji od podatkov proizvajalca za sestavljeno vrv HPTG in tudi višji od deklariranega elastičnega modula kevlarških vlaken (12400 N/mm<sup>2</sup>), predvsem v višjih območjih sile. Vzrok je v tem, da proizvajalčevi podatki za vrv HPTG upoštevajo zdrse v zalitju konektorjev. Odvisnost vrednosti elastičnega modula od območja obremenjevanja je pri vrveh HPTG manjša kot pri jeklenih.

## 6. Sklep

Mehanske lastnosti jeklenih vrvi so tako kot geometrijske karakteristike vrvi (število žic, razvrstitev snopov, hod...) odvisne tudi od predhodnega obremenjevanja in njegovega časovnega poteka, kot tudi od območja, v katerem je vrv obremenjena. Mehanske lastnosti se bistveno izboljšajo, če je vrv pred uporabo obremenjena z višjo silo, kot je obremenitev pri eksploataciji, pri tem pa mora biti sila vzdrževana toliko časa, da so nepovratne deformacije umirijo. Vzrok je v prilagoditvi posameznih žic v snopu in prilagoditvi snopov.

Mehanske lastnosti vitih jeklenih vrvi so tudi odvisne od območja, v katerem je vrv obremenjevana. Tu gre za razlike, ki niso zanemarljive. Pri izračunih objektov z vrvmi kot nosilnimi elementi je potrebno upoštevati, v katerem območju je vrv obremenjena in vrsto obtežbe, bodisi stalne ali pa občasne, kar glede nepovratnih deformacij vpliva na karakteristike vrvi.

Meritve vrvi *phillystran* so pokazale, da tudi pri teh vrveh nastopajo nepovratne deformacije, kar pa iz podatkov proizvajalca ni bilo razvidno. Za razliko od vitih vrvi pa se te deformacije s ponavljanjem meritev niso manjšale. Meritve vrvi HPTG so pokazale, da so elastične karakteristike boljše, kot jih navaja proizvajalec in tudi boljše od vitih jeklenih vrvi, ki smo jih preizkušali.

## Literatura

- 1 G. A. Costello, R. E. Miller, Lay Effect of Wire Rope, *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 105, 1979, 597-608
- 2 G. A. Costello, G. J. Butson, Simplified Bending Theory for Wire Rope, *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 108, 1982, 219-227
- 3 S. A. Velinsky, *Analysis of Wire Ropes with Complex Cross Section*, Ph. D. Thesis, Department of Theoretical and Applied Mechanics, University of Illinois at Urbana - Champaign, 1981
- 4 D. C. Drucker, H. Tachau, A New Design Criterion for Wire Rope, *Journal of the Engineering Mechanics, Transaction, American Society of Mechanical Engineers*, 67, Division, 67, 1985, 33-38

- <sup>5</sup> G. A. Costello, Analytical Investigation of Wire Rope, *Applied Mech. Rev.*, 31, 1978, No. 7
- <sup>6</sup> N. C. Huang, Finite Extension of an Elastic Strand with a Central Core, *Journal of Applied Mechanics*, 45, 1978
- <sup>7</sup> G. A. Costello, J. W. Philips, A More Exact Theory for Twisted Wire Cables, *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 100, 1974, 1096-1099
- <sup>8</sup> G. A. Costello, Stresses in Multilayered Cables, *Journal of Energy Research Tech.*, 105, 1983, 337-340
- <sup>9</sup> H. M. Hall, Stresses in Small Wire Ropes, *Wire and Wire Products*, 26, 1981, 257-259
- <sup>10</sup> F. H. Hruska, Tangential Forces in Wire Ropes, *Wire and Wire Products*, 28, 1983, 455-460
- <sup>11</sup> G. A. Costello, J. W. Philips, Contact Stresses in Twisted Wire Cables, *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 99, 1973, 331-341
- <sup>12</sup> G. A. Costello, Large Deflections of Helical Spring Due to Bending, *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 103, 1977, 479-487
- <sup>13</sup> G. A. Costello, S. A. Velinsky, Anderson, Wire with Complex Cross Sections, *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 110, 1984, 380-391
- <sup>14</sup> G. A. Costello, S. K. Sinha, Torsional Stiffness of Twisted Wire Cables, *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 103, 1977, 766-770
- <sup>15</sup> G. A. Costello, J. W. Philips, Effective Modulus of Twisted Wire Cables, *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 102, 1976, 171-181
- <sup>16</sup> G. A. Costello, S. K. Sinha, Static Behaviour of Wire Rope, Advances in Civil Engineering Through Engineering Mechanics, Proceedings, *Second Annual Engineering Mechanics Division Speciality Conference*, North Carolina State University, Raleigh, 1977, 475-478
- <sup>17</sup> N. C. Huang, Theories of Elastic Slender Curved Rods, *Journal of Applied Mathematics and Physics*, 24, 1973, 1-19
- <sup>18</sup> J. Vojvodič Gvardjančič, I. Kovše, Š. Strojnik, A. Kovačič, *URP/RP: 06-2685-218/88*, Sodobne metode in sistemi projektiranja, graditve, vzdrževanje in revitalizacija objektov, 1988, 1-205