

Dinamičko ponašanje speleoloških (statičkih) užeta

Svjetlan Hudec

Uvod

Užeta koja se koriste za spuštanje i penjanje u speleologiji su takozvana statička užeta. Proizvođači opreme ih deklariraju kao užeta kod kojih izduženje pri opterećenju od 0,8 kN (težina speleologa mase 80 kg) iznosi 2-3 %, dakle koja se relativno malo rastežu pri uobičajenom opterećenju. Već je iz samog naziva jasno da nisu predviđena za penjanje (alpinizam) ili, bolje reći, za dinamičko opterećivanje. Ipak i kod normalne upotrebe speleološke tehnike, dinamičko opterećivanje nije moguće izbjeći. Ne samo to, statičko opterećivanje je moguće postići jedino u laboratorijskim uvjetima, gdje se opterećenje povećava polagano. Statička i dinamička užeta su napravljena od istog materijala, a razlikuju se samo po tehnološkoj obradi i dobivenim svojstvima (relativno produljenje); osnovno izlagane je isto za oba tipa užeta.

Dinamičko opterećenje užeta je svako opterećenje pri kojemu se postiže da sila u užetu bude veća od nominalne (primjerice, opteretite uže teretom od 1kN, a sila u užetu iznosi 1,5 kN). Na njemačkom se ta dinamička sila naziva fangštos. Svako »naglo« opterećivanje užeta izaziva dinamičku silu koja je veća od statičke. Kod svakog naglijeg zaustavljanja pri spuštanju primjetne su oscilacije užeta, a speleolog ide gore dolje neko vrijeme dok se oscilacije ne priguše. Penjanje po užetu ded-tehnikom, ili bilo kojom drugom tehnikom, također dinamički opterećuje uže. Taj se utjecaj koristi kod spašavanja metodom protutega, kada jedan spašavatelj penjanjem podiže unesrećenoga koji se nalazi na drugom kraju istog užeta koje je provedeno kroz fiksni kolotur. Bitno je uvažiti činjenicu da se i pri normalnoj upotrebi speleološke tehnike postižu dinamički efekti.

Prema specifikacijama koje daju proizvođači speleološke opreme za trbušnu penjalicu, spuštalicu i slične naprave, njihova nosivost

iznosi od 400 do 450 daN (kp) (4,0-4,5 kN), što je vrlo često označeno i na samoj opremi. Nosivost statičkih užeta koja se koriste u speleologiji veća je i iznosi prema deklaraciji proizvođača od 15 do 30 kN, a prema ispitivanjima Božića i Posarića od 6 kN do 15 kN, ovisno o kvaliteti (proizvođaču), promjeru užeta, starosti, prethodnom opterećivanju itd. a i o načinu na koji se preuzima statičko opterećenje. Ispitivanja na kidalici su pokazala da najprije pukne košuljica užeta, a da jezgra pri tome još uvijek nije oštećena. Teoretski gledano, takvom užetu nije dostignuta nosivost, ali je praktički neupotrebljivo. Na sličan način, na koji se preuzima opterećenje kod kidalice, opterećenje (težina speleologa) preuzima kod penjalica uobičajenih konstrukcija (Croll, bloker i sl.), jer stišću uže. Maksimalna nosivost užeta prije trganja košuljice opterećene na taj način, bez obzira na tip užeta i nosivost (bila statička ili dinamička, a i promjer nije toliko bitan), iznosi oko 6 kN. Drugi tip naprava kojima se koristimo jesu spuštalice, koje rade na principu trenja i gdje se može približno iskoristiti puna nosivost užeta.

Teorija dinamike

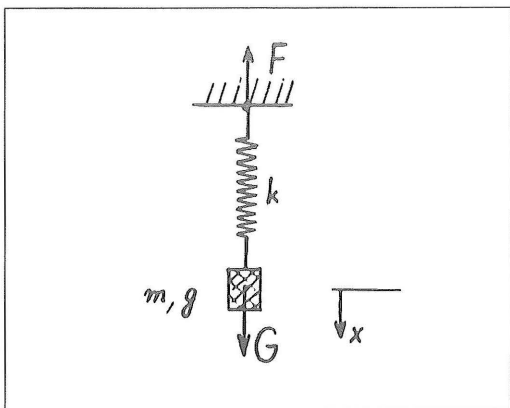
Da bismo na primjerima koji se pojavljuju pri normalnoj i uobičajenoj upotrebi speleološke tehnike odredili veličinu dinamičkih sila i izvukli potrebne zaključke, potrebno je malo zaviriti u teoriju dinamike.

Model

Za naš slučaj možemo uže predstaviti kao oprugu na kojoj slobodno visi neki teret (G) kao što je prikazano na slici 1.

Tada dinamička sila (F) u užetu iznosi:

$$F = G + k \cdot x \quad (1)$$



Model

pri čemu težina tereta (G) iznosi:

$$G = m \cdot g \quad (2)$$

oznake su:

k - koeficijent opruge (N/m)

x - pomak (m)

m - masa tereta (kg)

g - ubrzanje sile teže (m/s^2)

jednadžba gibanja tada glasi:

$$m \cdot \ddot{x} = G - (G + kx) \quad (3)$$

rješenje jednadžbe (3) kao harmonijske funkcije:

$$x = x_0 \cdot \cos(\omega \cdot t) + \frac{\dot{x}_0}{\omega} \sin(\omega \cdot t) \quad (4)$$

a amplituda (A) oscilacije iznosi:

$$A = \sqrt{x_0^2 + \left(\frac{\dot{x}_0}{\omega}\right)^2} \quad (5)$$

gdje je:

x_0 - početni pomak (m)

\ddot{x} - akceleracija (ubrzanje) (m/s^2)

$\dot{x}_0 = v_0$ - početna brzina (m/s)

t - vrijeme (s)

ω - oznaka (kutna brzina) sa značenjem:

$$\omega^2 = \frac{G}{\Delta_{st}} \quad (6)$$

Δ_{st} - deformacija od statičke sile (m)

$$\Delta_{st} = \frac{G}{k} \quad (7)$$

za oprugu.

Drugi pojmovi, kao što su frekvencija oscilacije, prigušenje itd. nisu za promatrani problem toliko bitni. Važna je sa speleološkog gledišta, maksimalna dinamička sila, a njeno kretanje u vremenu nakon toga nije toliko zanimljivo.

Uvedemo li oznake koje se koriste u otpornosti materijala, tada deformaciju možemo pisati u ovom obliku:

$$\Delta_{st} = \frac{G \cdot l}{E \cdot P} \quad (8)$$

pri čemu je:

l - duljina užeta (m)

E - modul elastičnosti (N/m^2)

P - površina presjeka (m^2)

a relativna deformacija (ε_g) za teret G bezdimenzionalno, iznosi:

$$\varepsilon_g = \frac{\Delta_{st}}{l} = \frac{G}{E \cdot P} \quad (9)$$

Za svaki pojedini slučaj (za razne početne uvjete x_0 i v_0) i za razna svojstva materijala (iskazana pomoću relativnog produljenja) može se iz gore navedenih jednadžbi izračunati veličina dinamičke sile. Ipak, da ne bi bilo zabune, dobivena vrijednost ima teoretski karakter, jer ovdje navedene jednadžbe vrijede pod određenim uvjetima, kao što je pretpostavka da se uže ponaša kao linearno elastična opruga što, naravno, nije sasvim točno. S obzirom na svojstvo poliamidnih užeta da se pri optere-

ćivanju velikim silama modul elastičnosti povećava, potrebno bi bilo uvesti nekakvu prosječnu vrijednost za cijelo područje, odnosno veličinu relativnog produljenja smanjiti. Također, zanemaren je utjecaj proklizavanja čvorova, elastičnosti pojasa (u našem slučaju na strani sigurnosti) itd. Račun je uz navedene ograde ipak dovoljno točan da nam omogući uvid u karakter ponašanja užeta i korištenih naprava pri uvjetima normalnog bavljenja speleologijom.

Iz navedene jednadžbe (1) slijedi da je veličina dinamičke sile uvijek najmanje jednaka statičkoj, a da drugi dio ovisi o svojstvima užeta (k) i veličini pomaka (x). Najveći pomak naziva se i amplituda i za nju se može izračunati i maksimalna dinamička sila. Veličina amplitude ovisi o početnom pomaku iz ravnotežnog položaja (x_0), početnoj brzini tereta (v_0), te odnosu ubrzanja sile teže (g) i veličine statičke deformacije za određeni teret, primijenjen na uže određene duljine i karakteristika. Ravnotežni slučaj oko kojega oscilira teret obješen na uže je položaj koji bi zauzeo teret pri statičkom opterećenju (duljinu užeta + produljenje zbog statičkog opterećenja (st)). Stoga je i za isto uže veličina dinamičkog utjecaja za različite duljine užeta, drugačija.

Primjer 1. Teret pada slobodnim padom na neopterećeno uže

Ovaj primjer predstavlja klasičan pad na užetu i često ga ljudi zamjenjuju za ukupno dinamičko djelovanje, no to je samo poseban, ali i čest slučaj dinamičkog opterećivanja užeta.

Brzina v (m/s) kojom tijelo mase m (kg) pada s visine h (m) iznosi:

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad (10)$$

gdje je:

g - ubrzanje sile teže (m/s²).

Može se uvesti oznaka K nazvan koeficijent pada, a koja predstavlja odnos između visine pada i duljine užeta (od mjesta pričvršćenja do unosa tereta):

$$K = \frac{h}{l} \quad (11)$$

gdje je:

l - neopterećena duljina užeta od mjesta pričvršćenja do tereta (m).

Promatramo li osciliranje tereta G na užetu duljine l i primijenimo početne uvjete:

početni pomak (prema ravnotežnom stanju) $x_0 = -\Delta_{st}$, a početna brzina pada s visine h je izražena u jednadžbi (10), tada je amplituda oscilacije prema jednadžbi (5) i uz primjenu jednadžbe (6):

$$\begin{aligned} A &= \sqrt{x_0^2 + \left(\frac{v_0}{\omega}\right)^2} = \sqrt{\Delta_{st}^2 + \frac{2 \cdot g \cdot h}{g}} = \\ &= \sqrt{\Delta_{st}^2 + 2 \cdot \Delta_{st} \cdot h} \end{aligned} \quad (12)$$

Ako to uvrstimo u jednadžbu (1) za veličinu dinamičke sile dobivamo:

$$\begin{aligned} F &= G + k \cdot A = G + \frac{g}{\Delta_{st}} \cdot \sqrt{\Delta_{st}^2 + 2 \cdot \Delta_{st} \cdot h} = \\ &= G \cdot \left(1 + \sqrt{1 + \frac{2 \cdot h}{\Delta_{st}}}\right) = G \cdot \left(1 + \sqrt{1 + \frac{2 \cdot h}{\varepsilon_g \cdot l}}\right) = \\ &= G \cdot \left(1 + \sqrt{1 + \frac{2 \cdot K}{\varepsilon_g}}\right) \end{aligned} \quad (13)$$

gdje je: ε_g - relativna deformacija užeta za teret G , bezdimenzionalno

Pomoću gornjeg izraza (13), za razna užeta i za razne koeficijente pada K može se napraviti tablica 1. gdje je osnovni podatak deklarirano produženje užeta za teret mase 80 kg, odnosno 0,8 kN (statička od 2% i 3%, te dinamička 5% i 8%). U tablici su dana tri osnovna tereta i to 0,8 kN koji se može koristiti za alpinizam i slobodno penjanje, 1,0 kN za speleologiju (speleolog + oprema + transportna vreća) i 2,0 kN koji se može primijeniti na gorsko spašavanje. S obzirom na zanemarene utjecaje, ove se veličine mogu uzeti kao približno točne.

Iz tablice se može zaključiti da za vrlo male veličine koeficijenta pada za statička užeta, veličina dinamičke sile koja se pojavljuje pri tome vrlo brzo dostiže granične vrijednosti nosivosti naprava koje se upotrebljavaju ili užeta za slom košuljice. Pri tome su naročito opasni padovi na malim duljinama užeta, gdje taj koeficijent za mali pad po apsolutnoj vrijednosti, može izazvati pojavu opasnih dinamičkih sila (npr. pad speleologa od samo 15 cm na duljinu užeta od 1 m podiže koeficijent pada K na 0,15 što izaziva dinamičku silu u penjalici $F = 4,61$ kN za statičko uže s produljenjem 2%, a to je veće od deklarirane nosivosti penjalice 4,5 kN !!!) No, mali pad (pad niske kinetičke energije) može se vrlo dobro apsorbirati pomoću dodatnog čvora, recimo »leptira« ili slično.

Kod baratanja s veličinama iz tablice 1. nužan je oprez zato što je potrebno poznavati i historiju opterećivanja užeta (užeta imaju memoriju opterećivanja), tako da bi se za upotrebu rabljenih dinamičkih užeta bez mnogo padova mogla koristiti kolona za relativno produljenje od

5%, a za užeta s većim brojem padova ($n=3-5$) velikih koeficijenata pada ($K=1,5-2$), glatko se mogu koristiti kolone za statička užeta. Proizvođači užeta i UIAA su toga svjesni i zato ograničavaju broj dozvoljenih padova za svako uže.

Za spašavanje nikakvi padovi nisu dopustivi na statičkim užetima, pa čak i trenutno opterećivanje rasterećenog užeta (koeficijent pada $K=0$) izaziva dinamičku silu koja je dvostruko veća od sile težine tereta bez obzira na vrstu užeta (isto vrijedi i za sajlu i za dinamičko uže) ili duljinu užeta koja apsorbira pad. Pojava dinamičke sile od 4,0 kN može se smatrati vrlo opasnom u odnosu prema nosivosti naprava koje se koriste.

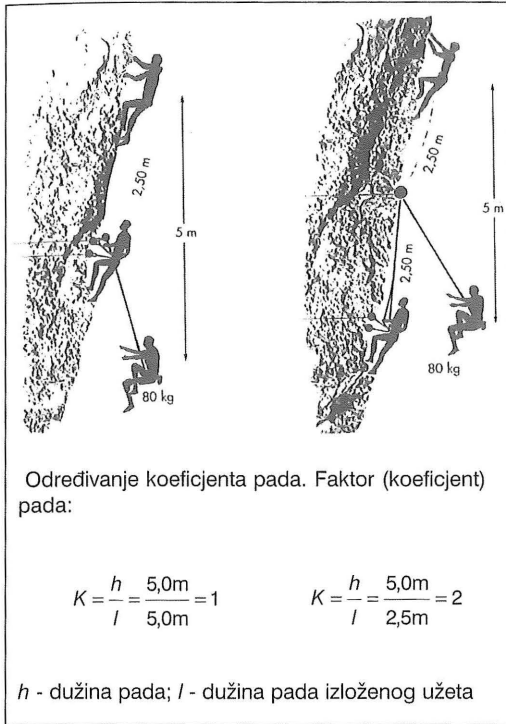
Za slobodno penjanje (padanje) preporuka je da se postavljaju međuosiguranja između šandova i da se ne upotrebljavaju spravice koje u principu služe za penjanje po užetu, dakle klasika: karabiner, čvor, dinamička gurta i svakako dinamičko uže. Osiguranje je poželjno kroz naprave koje propuštaju uže trenjem (kruške

koef. pada $K=h/l$	STATIČKO UŽE			STATIČKO UŽE			DINAMIČKO UŽE			DINAMIČKO UŽE		
	Produljenje 2%			Produljenje 3%			Produljenje 5%			Produljenje 8%		
	G(kN)			G(kN)			G(kN)			G(kN)		
	0,8	1	2	0,8	1	2	0,8	1	2	0,8	1	2
	ϵ_G			ϵ_G			ϵ_G			ϵ_G		
0	0,02	0,025	0,05	0,03	0,038	0,075	0,05	0,063	0,125	0,08	0,1	0,2
0,05	1,60	2,00	4,00	1,60	2,00	4,00	1,60	2,00	4,00	1,60	2,00	4,00
0,1	2,76	3,24	5,46	2,47	2,91	5,06	2,19	2,61	4,68	2,00	2,41	4,45
0,15	3,45	4,00	6,47	3,02	3,52	5,83	2,59	3,05	5,22	2,30	2,73	4,83
0,2	4,00	4,61	7,29	3,45	4,00	6,47	2,92	3,41	5,69	2,54	3,00	5,16
0,25	4,47	5,12	8,00	3,83	4,42	7,03	3,20	3,72	6,10	2,76	3,24	5,46
0,3	4,88	5,58	8,63	4,16	4,79	7,54	3,45	4,00	6,47	2,95	3,45	5,74
0,4	5,25	6,00	9,21	4,47	5,12	8,00	3,68	4,26	6,82	3,13	3,65	6,00
0,5	5,92	6,74	10,25	5,01	5,73	8,83	4,10	4,71	7,44	3,45	4,00	6,47
0,6	6,51	7,40	11,17	5,49	6,26	9,57	4,47	5,12	8,00	3,74	4,32	6,90
0,7	7,05	8,00	12,00	5,92	6,74	10,25	4,80	5,49	8,51	4,00	4,61	7,29
0,8	7,54	8,55	12,77	6,32	7,19	10,87	5,11	5,84	8,99	4,24	4,87	7,66
0,9	8,00	9,06	13,49	6,70	7,61	11,45	5,40	6,16	9,43	4,47	5,12	8,00
1	8,43	9,54	14,17	7,05	8,00	12,00	5,67	6,46	9,85	4,68	5,36	8,32
1,5	8,84	10,00	14,81	7,38	8,37	12,52	5,92	6,74	10,25	4,88	5,58	8,63
2	10,63	12,00	17,62	8,84	10,00	14,81	7,05	8,00	12,00	5,76	6,57	10,00
	12,14	13,69	20,00	10,07	11,38	16,74	8,00	9,06	13,49	6,51	7,40	11,17

Tablica 1. Veličina dinamičke sile F (kN)

i sl.). Kod penjanja na umjetnim stijenama u dvorani, s osiguranjem sa zemlje, teoretski najveći koeficijent pada iznosi jedan i to samo do drugog međuosiguranja. Ako se u obzir uzmu čvorovi, pojas itd., stvarni maksimalni koeficijent pada iznosi oko 0,8. Kod penjanja uz

se izračunati uz sljedeće početne uvjete: početni pomak $x_0=0$, a početna brzina jednaka je brzini spuštanja $v_0=vs$. To se može uvrstiti u izvedene jednačbe od (1) do (9) za izračunavanje amplitude (maksimalni pomak) i sile. Bitno je reći da se zaustavljanjem i nejednolikim spuštanjem izaziva osciliranje užeta. Trebalo bi pokušati spuštanje jednolikom brzinom, i to ne previše brzo, kako bi se oscilacije svele na minimum.



samoosiguranje, uz fiksna užeta, koeficijent pada se izračunava iz maksimalno mogućeg pada s obzirom na duljinu samoosiguranja l_0 i duljinu užeta iznad do sidrišta $K_{max} = 2l_0/l$. U ovom slučaju imamo još jednu oprugu u nizu (samoosiguranje). Tu se teorija dodatno komplicira. Zbirni koeficijent opruge se drugačije računa ($1/k = 1/k_1 + 1/k_2$). Preporuka bi bila postaviti sidrište što više iznad mogućeg mjesta pada; po mogućnosti, samoosiguranje bi trebalo biti trajno napeto.

Spuštanje po užetu

Pri spuštanju po užetu nekom od naprava, uže se istovremeno s pomakom tereta isteže za Δst . Ako se naglo zaustavimo, dinamičko opterećujemo uže. Veličina dinamičke sile može

Penjanje po užetu ded tehnikom

Za razmatranje dinamičkog opterećivanja kod penjanja, bilo bi potrebno proširiti izvedenu teoriju na slučaj prisilnih vibracija pod djelovanjem impulsa sile. U ovom slučaju će se izvod preskočiti kao nebitan. Impuls sile jednak je razlici količine gibanja (odnosno umnošku mase i brzine) prije i nakon djelovanja impulsa.

Za ilustraciju toga što se događa kod penjanja dovoljna je obična vaga za mjerenje težine. Ako čovjek stane na vagu i sporo se spusti u čučanj, veličina sile koju kazaljka pokazuje jednaka je njegovoj težini. Ako se čovjek tada naglo podigne, u jednom vrlo kratkom vremenu generira se sila odraza koja približno iznosi do 1,5 puta njegove težine. Kada se počne izdizati, tada veličina sile naglo pada ovisno o brzini podizanja. U krajnjem slučaju skoka vaga je potpuno rasterećena. Rezultat toga je da kazaljka koja pokazuje veličinu sile podivlja i potrebno je neko vrijeme da se smiri. Dakle, kod penjanja u speleologiji uže prvo dodatno opteretimo impulsom sile, zatim rasteretimo, pa ga ponovno opteretimo statički. Izazvali smo osciliranje užeta zbog toga što uže, ako ga dodatno opteretimo, ima tendenciju rastezanja, a podizanjem ima tendenciju stezanja. Točnije bi bilo reći da se teret ne nalazi u ravnotežnom položaju ($l+Dst$) i da zbog toga počinju oscilacije. Veličina toga početnog pomaka iznosi do Dst , pri čemu je početna brzina kojom se kreće teret jednaka nuli. Uz primjenu prije izvedenih formula, kratkotrajna maksimalna sila iznosila bi do $2G$.

Taj kratkotrajni impuls sile dovoljan je da pokrene teret koji kao protuteg visi na drugom kraju užeta preko kolotura, što se koristi za spšavanje u sustavu protutega. Da bi sustav funkcionirao, potrebno je postojanje nekoga malog koeficijenta trenja u koloturu kako bi se pokrila razlika u težini tereta s jedne i druge strane, te uspostavila ravnoteža.

Zaključci

Teoretski, kad uže ne bi imalo svojstvo prigušenja osciliranja, ono bi se neprestano ponavljalo. Kolik je iznos prigušenja to trenutno nije bitno, pojedinačne oscilacije se relativno brzo smire, no kod penjanja svako podizanje potiče novo osciliranje, koje po iznosu nije veliko, ali je učestalo.

Iz cijelog ovog izlaganja bitno je uočiti činjenicu da se uobičajenim penjanjem, spuštanjem i padanjem izaziva pojava osciliranja užeta. Za speleologiju je to posebno važan zaključak. S obzirom na osjetljivost i krhkost pojedinih vlakana poliamida koja se lako prerežu oštrim predmetima (trenjem o stijenu), a koja sačinjavaju košuljicu i jezgru užeta i čine nosive elemente o kojima ovisi život speleologa, potrebno je uže tako zaštititi da se na mjestu gdje dotiče stijenu postavi novo sidrište. Sile koje se tom prilikom javljaju pri penjanju i spuštanju nisu toliko bitne, jer govoriti o nosivosti oštećenog užeta nema svrhe, ali je bitno zapamtiti da su sigurno veće od vlastite težine speleologa.

Kod penjanja su dinamičke sile, koje se tom prilikom javljaju, višestruko veće od težine penjača. Veličina sila koje se javljaju ovisi o

koeficijentu pada, težini tereta i mehaničkim svojstvima užeta. Užeta imaju memoriju opterećivanja, jednom oštećeno uže zauvijek je oštećeno. Mala oštećenja se sabiru tako da i sama užeta pri velikim opterećenjima mijenjaju mehanička svojstva i postaju sve nepovoljnija za padanje. Za eventualne padove potrebno je koristiti se adekvatnom opremom koja je za to i predviđena.

LITERATURA

- Čepelak, R. (1977): Uže u planinarstvu. Priručnik zagrebačke speleološke škole 77, Zagreb.
- Božić, V. (1984): Statičko ispitivanje speleoloških užeta. Zbornik radova, IX kongres speleologa Jugoslavije, Zagreb.
- Božić, V. & Posarić, J. (1988): Usporedba statičke čvrstoće raznih speleoloških užeta. Speleobih 1-2, Sarajevo.
- Božić, V. & Posarić, J. (1988): Simulacija starenja speleoloških užeta toplinskim opterećenjem. Speleobih 1-2, Sarajevo.
- Komercijalni katalozi tvrtki: Edelrid-Seilkunde, Beal i Petzl.

ABSTRACT

The dynamical behavior of speleological ropes

This paper presents the analysis of the dynamical behavior of speleological ropes and the dynamical forces that occur during normal use of these ropes. The complete derivation of the physical model for spring oscillation with one degree of freedom is presented. With the aid of the derived equation a table was generated, which contains the values of the calculated dynamical forces for various ropes and weights depending on the fall coefficients. The fall coefficient is defined as the relationship between the fall height and the rope length. Three types

of weights are presented as follows: a free climber (0.8 kN), a speleologist (1.0 kN) and a rescuer and the injured (2.0kN). The ropes are have static relative elongation for 80 kg (0.8kN). Static ropes are those which at the defined static load (0.8kN) have relative elongation of 2 or 3% while dynamic are elongated for 5% or more. This is the most common way of product presentation by manufacturers. From the table it is visible that at relatively small fall coefficients for static ropes large dynamical forces occur that are transported from the rope onto other equipment used.