



**Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet**

Preddiplomski studij

GEOTEHNIČKO INŽENJERSTVO

Predavanje 12.

Ojačanje stijenske mase štapnim sidrima



1. Uvod

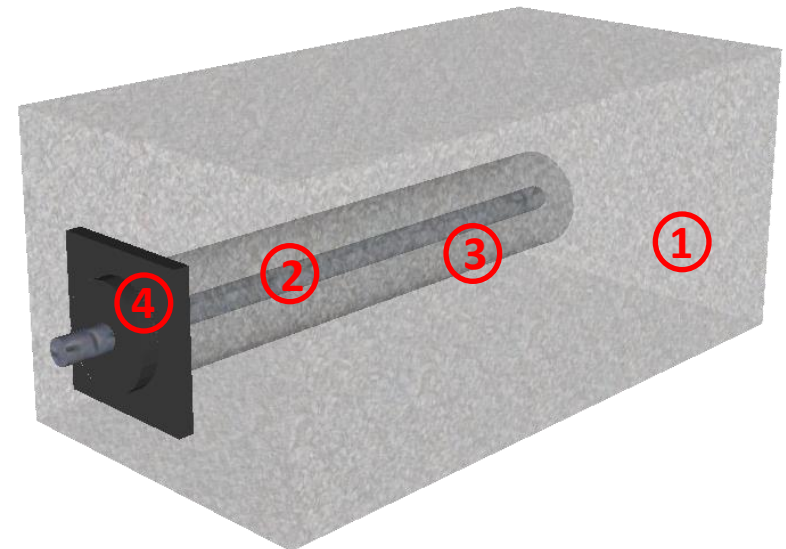
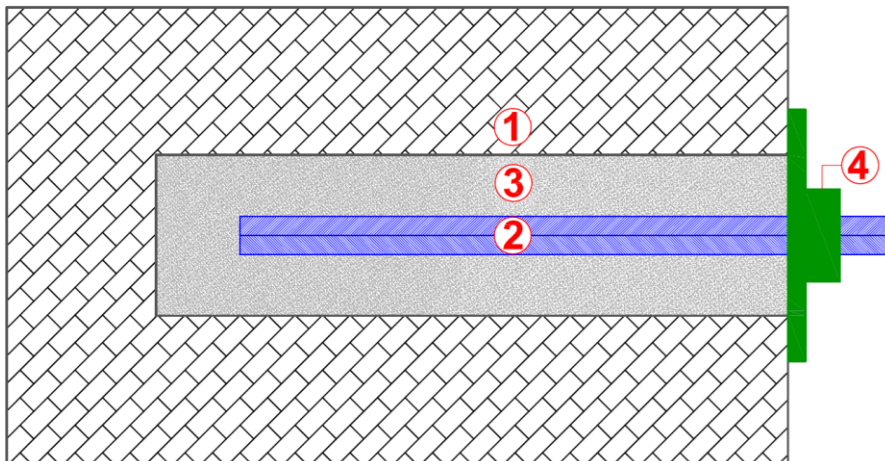
2. Tipovi štapnih sidara

3. Modeliranje ponašanja štapnih sidara

4. Ispitivanje štapnih sidara

➤ štapna sidra predstavljaju jedan od osnovnih sustava **ojačanja stijenskih masa**, pri čemu se sustav ojačanja sastoji od četiri osnovna elementa:

- ① Stijenska masa
- ② Element sustava ojačanja
- ③ Unutarnja veza elementa ojačanja i stijenske mase – injekcijska smjesa
- ④ Vanjska veza elementa ojačanja i stijenske mase





- Korištenje štapnih sidara kao elemenata ojačanja stijenske mase u podzemnim, ali i otvorenim iskopima započelo je krajem 19. stoljeća, a šira primjena štapnih sidra započela je tek četrdesetih i pedesetih godina 20. stoljeća.
- Prva istraživanja ponašanja stijenske mase ojačane štapnim sidrima zasnivala su se na principima prijenosa opterećenja s podgrade, kao grednog sustava, na stijensku masu ne uzimajući u obzir stvarno ojačanje stijenske mase štapnim sidrima.



UVOD

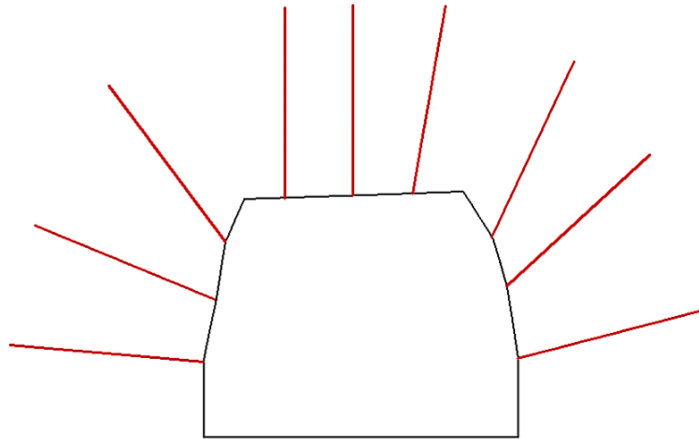
ZAVOD ZA
GEOTEHNIKU

- Posljednjih godina primjena štapnih sidara u ojačanju stijenske mase znatno se proširuje uslijed razvoja saznanja u mehanici stijena, kao i primjene štapnih sidra u otvorenim i podzemnim iskopima, a kao alternativa tradicionalnim oblicima podgrađivanja.
- Danas se štapna sidra standardno primjenjuju u osiguranju stabilnosti iskopa u rudarstvu i građevinarstvu širom svijeta uz ugradnju stotina milijuna štapnih sidara godišnje.

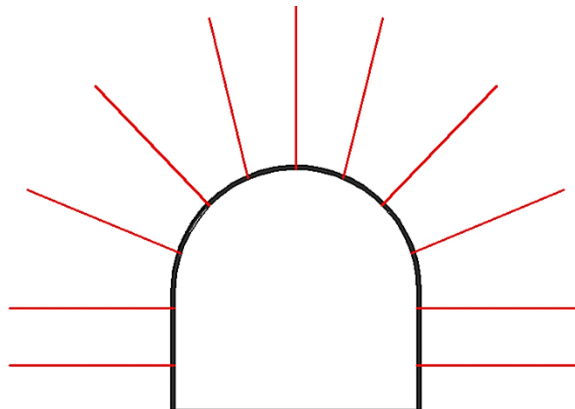
- Sidra se općenito dijele na **aktivna** i **pasivna**.
- Kod **aktivnih** sidara se unosi sila prednapinjanja, dok se kod **pasivnih** sidara ne provodi prednapinjanje nego se ona aktiviraju tek pomacima stijenske mase.
- Iako je u stijenskim masama najčešća upotreba štapnih sidara koji se aktiviraju pomakom stijenske mase, koriste se i prednapeta sidra u koja se unosi vlačna sila čime se dodatno povećava sila otpora na plohu sloma.
- U ovom predavanju će naglasak biti na pasivnim sidrima, koja se često nazivaju i štapnim sidrima.

- primjena štapnih sidara:

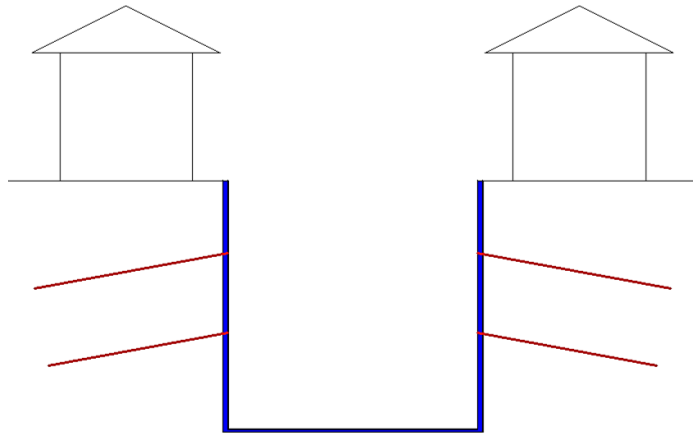
➤ rudarstvo



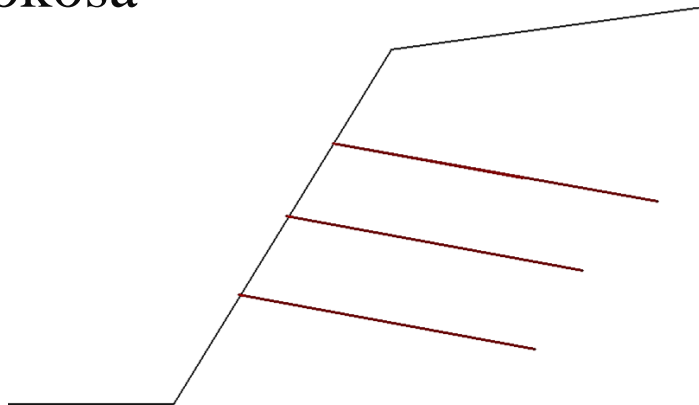
➤ tunelogradnja



- zaštita građevnih jama



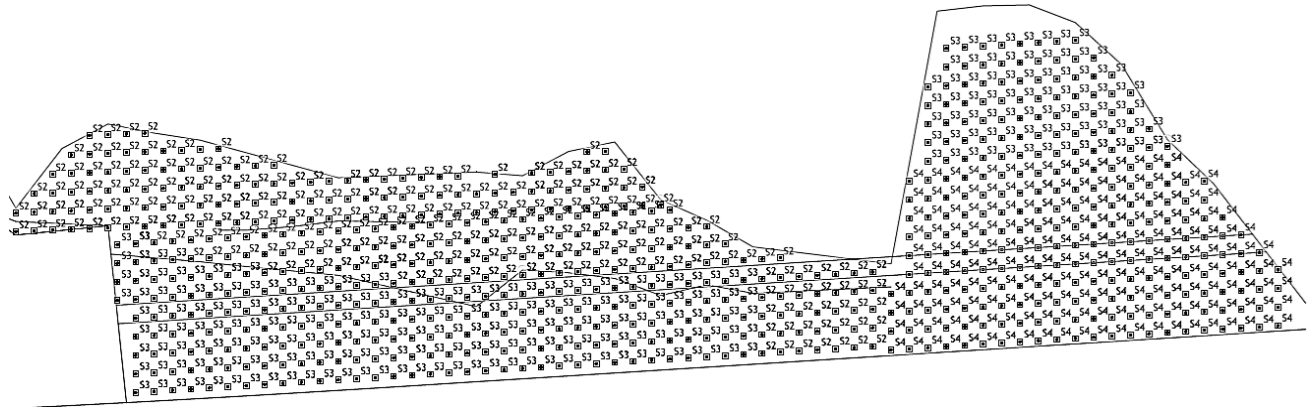
- zaštita pokosa



Predusjeci tunela 'Stupica', D512 Vrgorac-Makarska

Ukupno sidara: 806, Ukupna duljina sidara: cca 10.5 km

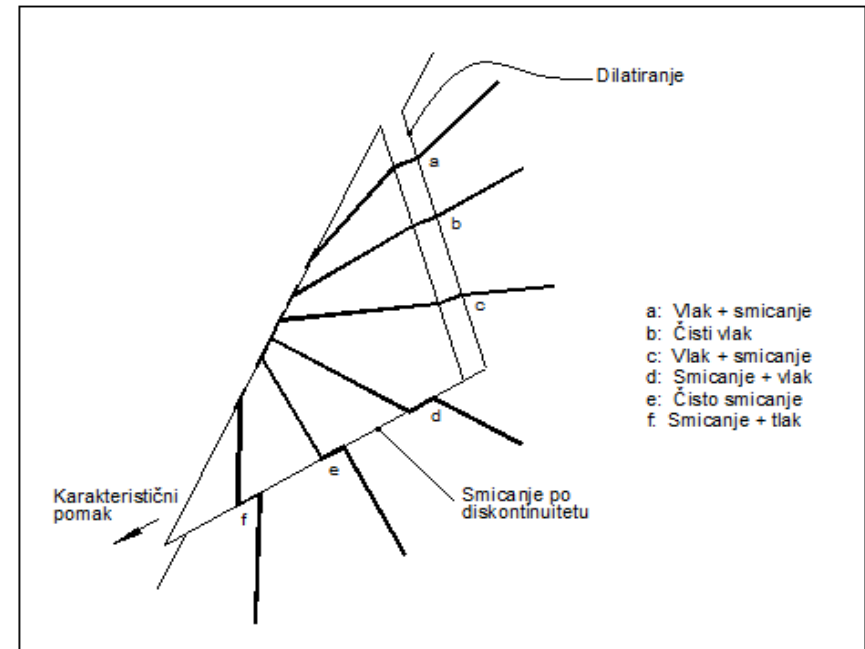
**POGLED NA
SJEVNI PREDUSJEK**



IZVEDENO STANJE



- Termin **reakcije sustava ojačanja stijenske mase** podrazumijeva mehaničko ponašanje sustava ojačanja kao odgovor na pobudu uslijed ponašanja stijenske mase.
- Priroda reakcije bit će ovisna o nastalim odnosima sila i pomaka kao i o obliku uspostavljenog podgradnog sustava u promatranom području. Reakcija sustava stoga može biti u vidu pojave osnih sila, posmičnih sila, torzije ili promjenjiva, kao i u većini slučajeva, kombinacija pojave različitih opterećenja.
- Ponašanje sustava ojačanja određeno je pojedinačnim ponašanjem osnovnih elemenata sustava i njihovim međusobnim interakcijama.
- Pri tom je moguća pojava neograničenog broja različitih reakcija sustava ojačanja stijenske mase.





UVOD

- Postoji cijeli niz prednosti ojačanja stijenske mase štapnim sidrima, od kojih su najznačajniji slijedeći:
 - svestrana mogućnost uporabe, za bilo koju odabranu geometriju iskopa
 - jednostavnost i brza mogućnost uporabe
 - ugradnja je u potpunosti mehanizirana
 - relativno niska cijena

- Koristeći štapna sidra vrlo je jednostavno mijenjati gustoću ojačanja stijenske mase (razmaka između štapnih sidara i dužina štapnih sidara), u zavisnosti od utvrđene kvalitete stijenske mase u zasjeku. Značajna je prednost mogućnost uporabe štapnih sidara u kombinaciji s bilo kojim od vanjskih podgradnih sustava (mreže, mlazni beton, podgradne armiranobetonske konstrukcije).
- Nadalje, ključnu ulogu štapna sidra imaju u brznoj primjeni nakon izvršenog iskopa u održanju integriteta stijenske mase, a određeni sustavi štapnih sidara mogu i gotovo trenutno nakon ugradnje preuzeti opterećenja nastala rasterećenjem stijenske mase.



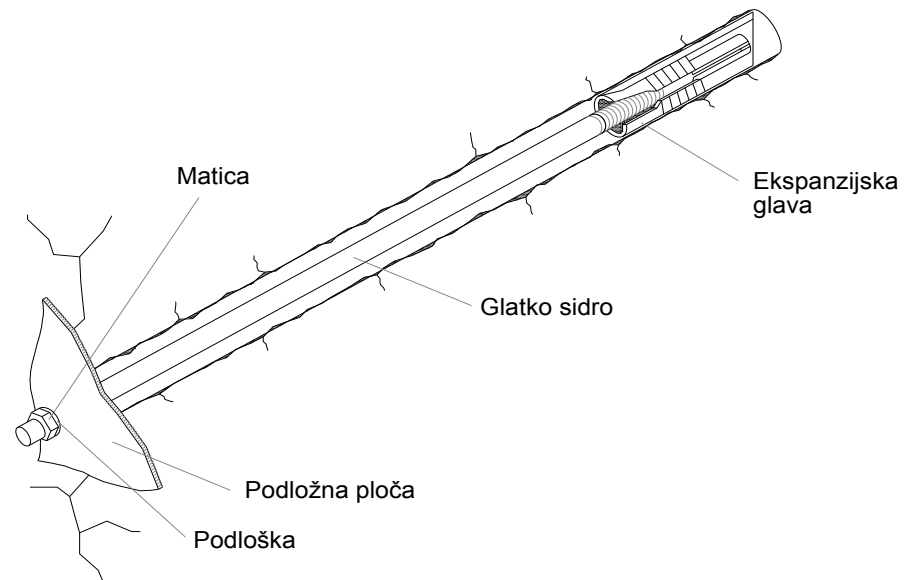
➤ Danas je u upotrebi veliki broj različitih tipova štapnih sidara, pri čemu se brojni tipovi sidara razlikuju u malim konstrukcijskim razlikama, a pri tome pripadaju istom konceptu u smislu prijenosa opterećenja. Podjela na grupe štapnih sidara može se izvršiti **prema različitim načinima sidrenja**. Pri tome se mogu razmatrati sljedeće grupe štapnih sidara:

1. Mehanički usidrena štapna sidra

2. Injektirana štapna sidra i pletena sidra od čeličnih niti

3. Trenjem usidrena štapna sidra

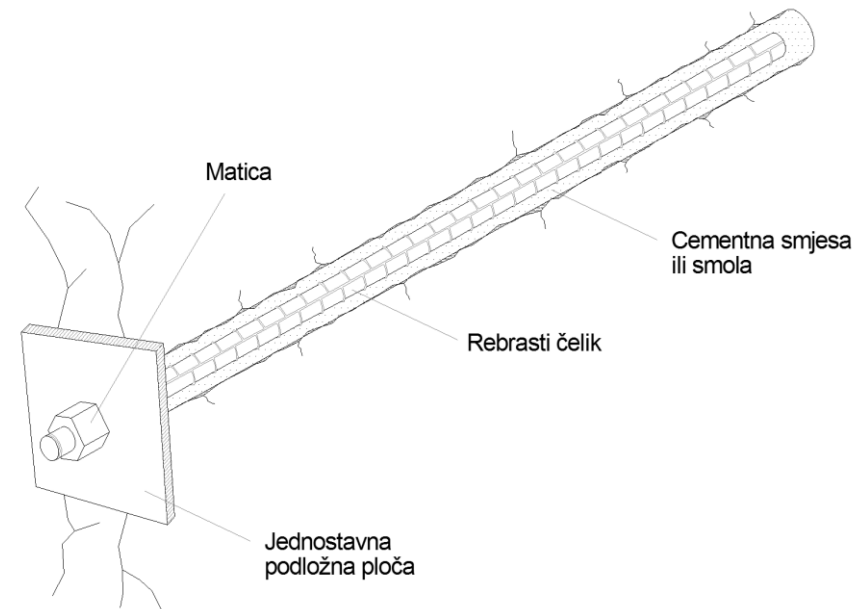
- Štapna sidra s ekspanzijskom glavom koja onemogućuje pomake sidra je najčešći oblik mehanički usidrenih štapnih sidara.
- Ekspanzijska glava konusno se širi rotacijom sidra pri čemu dolazi do utiskivanja elementa glave u zidove bušotine.





- Sidrenje se ostvaruje na osnovi dva mehanizma: trenja ekspanzijske glave i zidova bušotine te uklještenja glave u neravnine zidova bušotine. Pri tome uklještenje predstavlja značajniju komponentu u ukupnoj nosivosti sidra.
- Koriste se uglavnom kao privremena ojačanja stijenske mase jer uslijed djelovanja korozije vremenom dolazi do smanjenja nosivosti. Za uvjete trajnih konstrukcija nužna je primjena naknadnog injektiranja bušotine.
- Prednost mehanički usidrenih sidara je mogućnost trenutnog preuzimanja opterećenja nakon ugradnje, kao i unošenja predopterećenja u stijensku masu.
- Nedostatak mehanički usidrenih sidara je moguće slabljenje ili potpun prestanak njihovog djelovanja ako se iskop tunela izvodi miniranjem.

- Injektirana štapna sidra i pletena sidra od čeličnih niti ugrađuju se u bušotine ispunjene cementnom smjesom.
- Sidrenje odnosno veza sa stijenskom masom uspostavlja se cijelom injektiranom dužinom elementa ojačanja na osnovi kemijskih veza, trenja i uklještenja. Veći značaj pri tome imaju trenje i uklještenje, dok se kemijske veze s vremenom mogu u potpunosti razgraditi.





- **Injektirana štapna sidra** predstavljaju najčešće ojačanje stijenske mase u svijetu posljednjih pedeset godina, kako u građevinarstvu tako i rudarskoj industriji.
- Materijal za štapna sidra najčešće je rebrasto obrađeni čelik, koji se koristi u građevinarstvu ili odgovarajuće obrađeni presjeci čelika posebno proizvedeni za geotehnička sidra. Za injektiranje se koriste suspenzije na bazi cementa ili umjetnih smola, pri čemu je upotreba umjetnih smola, uglavnom zbog cijene, značajno rjeđe u uporabi. Injektiranje sidara izvodi se na dva različita načina i to:
 1. Izvedena bušotina zapunjava se injekcijskom smjesom, a štapno sidro ugrađuje se u zapunjenu bušotinu.
 2. U izvedenu bušotinu ugrađuje se štapno sidro nakon čega se injektira prostor između sidra i zidova bušotine. Injektiranje se izvodi ili ugradnjom cijevi za injektiranje do dna bušotine i injektiranjem do povrata smjese na ušće bušotine ili ugradnjom pakera i injektiranjem od ušća bušotine do postizanja odgovarajućeg pritiska propisanog projektom.



INJEKTIRANA ŠTAPNA SIDRA I PLETENA SIDRA OD ČELIČNIH NITI

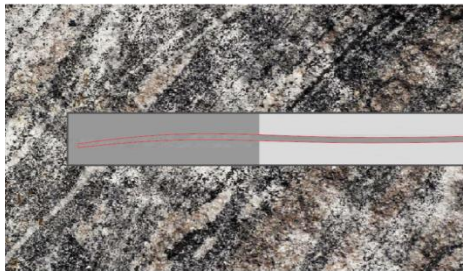
ZAVOD ZA
GEOTEHNIKU

1. izvedena bušotina zapunjava se injekcijskom smjesom, a štapno sidro ugrađuje se u zapunjenu bušotinu.

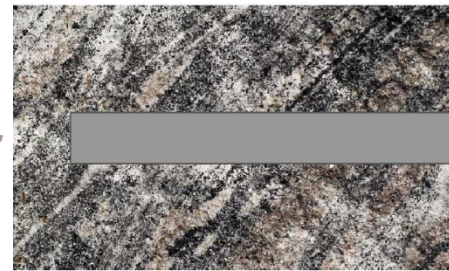
BUŠENJE BUŠOTINE



INJEKTIRANJE



ZAPUNJENA BUŠOTINA



UGRAĐIVANJE ŠIPKE



2. u izvedenu bušotinu ugrađuje se štapno sidro nakon čega se injektira prostor između sidra i zidova bušotine.

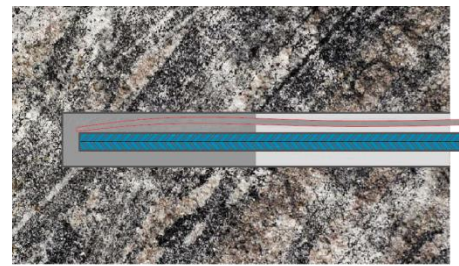
BUŠENJE BUŠOTINE



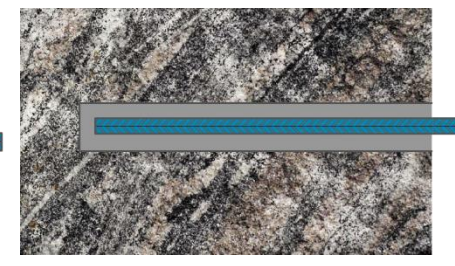
UGRAĐIVANJE ŠIPKE



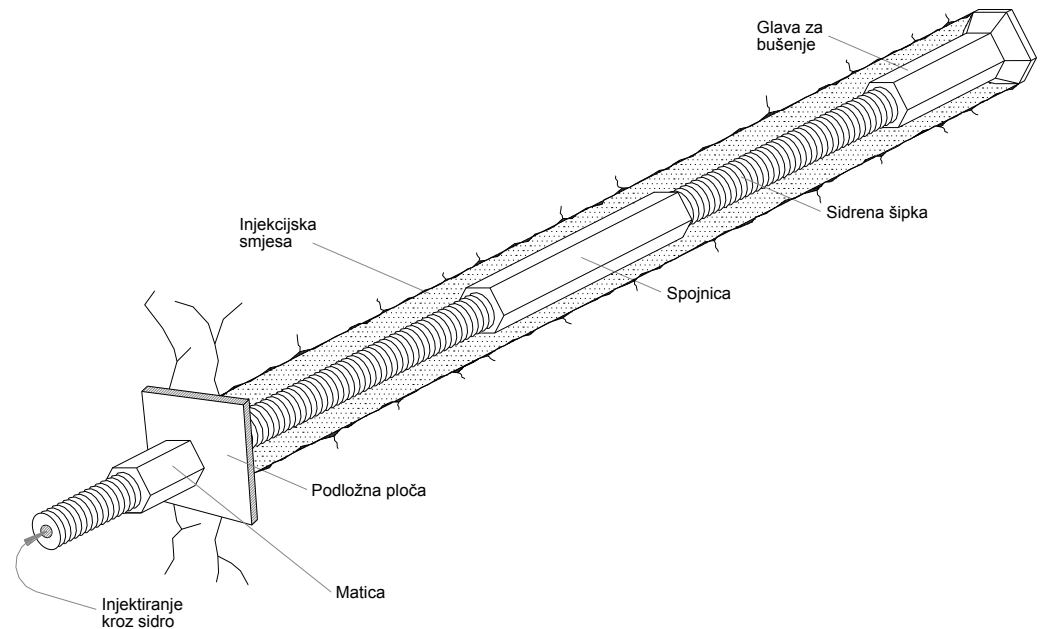
INJEKTIRANJE



ZAPUNJENA BUŠOTINA



- U posljednje vrijeme u uporabi je tip **samobušivih sidara**, vrlo praktična aplikacija štapnih sidara odgovarajuće obrađenog čeličnog presjeka namijenjenog za ojačanje stijenske mase.
- Samobušiva sidra koriste se kao dio bušačkog sustava na način da se umjesto bušaće šipke koriste elementi samobušivog sidra, koji na vrhu imaju odgovarajuću bušaću glavu.





- Elementi sidra proizvode se u sekcijama standardne dužine (2, 3 ili 4 m) i po potrebi nastavljaju odgovarajućim spojnica.
- Bušenjem sidra odgovarajuće dužine završeno je i postavljanje sidra. Injektiranje sidra izvodi se kroz samo sidro, pri čemu injekcijska smjesa izlazi kroz otvore na bušaćoj glavi, sve dok injekcijska smjesa ne počne izlaziti na ušću bušotine.
- Prednosti samobušivih sidara su u mogućoj značajnijoj dužini izvedbe, kao i izbjegavanje mogućnosti zarušavanja bušotine uslijed izvlačenja bušaće šipke i ulaganja sidara u klasičnim postupcima izvedbe sidara, te upotreba u oštećenim stijenskim masama.

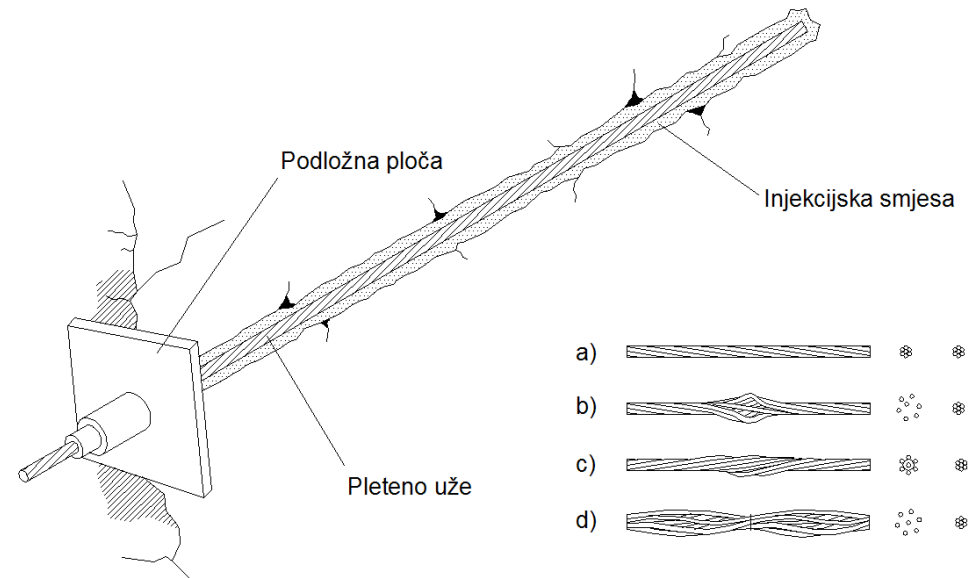


- Injektirana štapna sidra u većini slučajeva koriste se kao **pasivna sidra** odnosno sidra u koja se u toku izvedbe ne unose dodatna opterećenja koja se prenose na stijensku masu.
- Aktiviranje potpuno injektiranih štapnih sidara odvija se uslijed deformacija stijenske mase pri čemu uslijed deformacija u stijenskoj masi, štapna sidra preuzimaju dio naprezanja. U posljednje vrijeme u upotrebi je tip samobušivih sidara koji omogućuje injektiranje samo određenih dijelova bušotine, a što omogućuje formiranje slobodnih dionica i unošenje odgovarajućih naprezanja u stijensku masu napinjanjem štapnog elementa.

PARAMETRI RAZNIH
TIPOVA IBO
SAMOBUŠIVIH
SIDARA

Tip sidra	Jedinica	R32L	R32N	R32S	R38N	R51L	R51N	T76N	T76S
vanjski promjer	[mm]	32	32	32	38	51	51	76	76
maks. vlačna sila	[kN]	200	280	360	500	500	800	1600	1900
vlačna sila	[kN]	160	230	280	400	450	630	1200	1500
težina	[kg/lfm]	2,7	3,4	4,1	6,1	7,0	8,4	15,0	19,7

- Injektiranje **pletениh sidara od čeličnih niti** radi ojačanja stijenske mase koristi se posljednjih trideset godina.
- Po definiciji pleteno sidro predstavlja element ojačanja stijenske mase, uobičajeno izveden od čeličnih niti pletениh kao čelično užе i ugrađeno bez unesenog vlačnog opterećenja ili kao vlačno opterećeno i injektirano u kontaktu sa stijenskom masom.



Pleteno sidro od čeličnih niti:

- a) Standardni tip
- b) Garford bulb
- c) Nutcase
- d) Birdcage

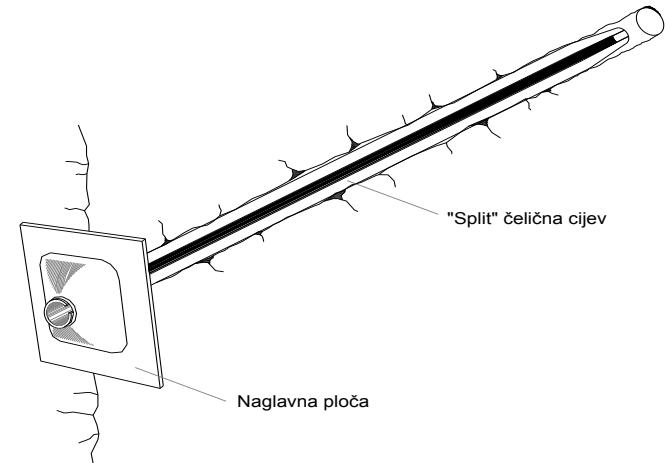


- Prednost pletenih sidara je u mogućnosti uporabe velike duljine istih kao i kombinacije unošenja vlačnih naprezanja i prijenosa na podgrađenu stijensku masu.
- Pletena sidra od visokokvalitetnog čelika upotrebljavaju se u SAD i Australiji češće nego kruta štapna sidra. Standardno pleteno sidro sastoji se od ravne centralne čelične niti promjera 5.41 mm opletene sa 6 ovojnih čeličnih niti promjera 5.16 mm. Ukupan promjer iznosi 15.24 mm ili više. U odnosu na kruta štapna sidra odlikuje ih velika specifična površina, ali i velika deformabilnost. Zbog visoke kvalitete upotrijebljenih čelika u pravilu su veće nosivosti od krutih štapnih sidara.
- Zbog velike upotrebe i iskustva postignutih upotrebom dolazi do razvoja različitih tipova pletenih sidara. Modifikacije se sastoje u načinu pletenja čime se u određenim područjima povećava promjer sidara, ali i specifična površina poprečnog presjeka. Također se modificiraju i oblici poprečnog presjeka pojedinih niti u pletivu.

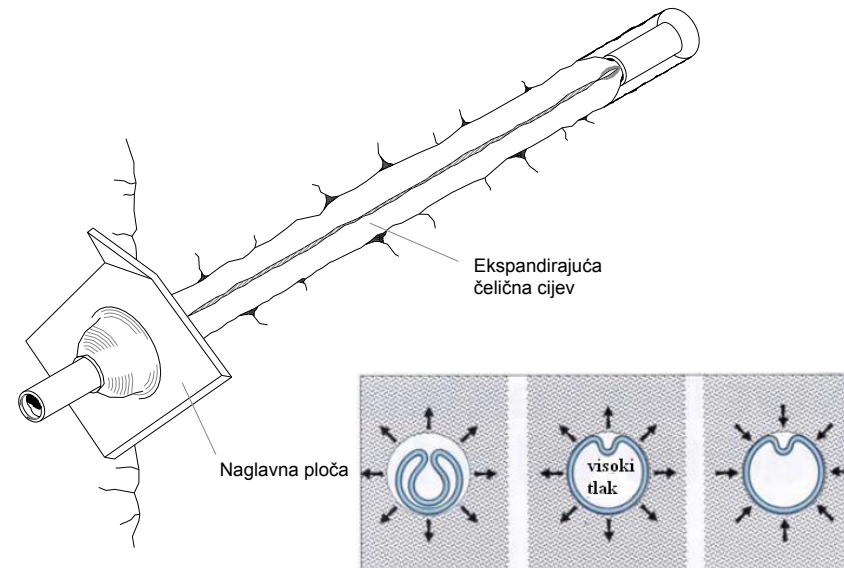


- Trenjem usidrena štapna sidra predstavljaju najnovija dostignuća u tehnici ojačanja stijenske mase. U praksi su u upotrebi dva tipa ovakvih sidara i to *Split Set* (Ingersoll – Rand Co., USA) i *Swellex* (Atlas Copco AB, Švedska).
- U oba sustava prijenos opterećenja realizira se trenjem (a kod Swellex sustava i uklještenjem) uslijed radijalne sile koja djeluje na zidove bušotine duž cijele dužine bušotine. I u jednom i drugom sustavu sidro se sastoji od čelične cijevi koja se mehaničkim (*Split Set*) ili hidrauličkim putem (*Swellex*) širi sve dok stijenke cijevi ne dostignu kontakt sa zidovima bušotine.
- Opterećenje stijenske mase prenosi se na element ojačanja izravno, bez nužno potrebnog završnog elementa prijenosa i injektiranja bušotine.
- **Prednosti** trenjem usidrenih sidara su relativno jednostavna ugradnja i trenutno preuzimanje opterećenja neposredno nakon ugradnje. **Nedostaci** su relativno visoka cijena, kao i ograničenost uporabe za trajne konstrukcije zbog korozije. Najčešće se koristi za tunnelske primarne podgrade.

➤ **Split Set** koristi naglavnu ploču radi osiguranja dijela stijenske mase na klizanje duž sidra. Ugradnja sidra izvodi se mehaničkim utiskivanjem sidra u bušotinu, pri čemu je promjer cijevi sidra veći od promjera bušotine. Sidro se pri tom može prilagoditi velikim pomacima bez sloma.



➤ **Swellex** je po mehanizmu sidrenja sidro koje nosi trenjem i uklještenjem u zidove bušotine. Izvodi se proširivanjem ugrađene cijevi hidrauličkim pritiskom unutar cijevi, pri čemu se cijev skraćuje. Sidro može podnijeti velike deformacije stijenske mase.





- Ponašanje štapnih sidara u stijenskoj masi predmet je brojnih analiza i odgovarajućih modela stijenske mase i ojačanja štapnim sidrima. Analize se u pravilu zasnivaju na rezultatima standardnih pokusa čupanja sidara izvedenim u klasificiranoj stijenskoj masi.

- Modeliranje ponašanja sidara i stijenske mase može se razdvojiti na:
 1. Modele koji razmatraju ponašanje sidara u okolišu stijenske mase i njihov međusobni odnos, pri tom **zanemarujući uvjete stanja naprezanja** u stijenskoj masi koja proizlaze iz zahvata u stijenskoj masi kao npr. iskopa podzemnih otvora ili zasijecanja padina.

 2. Modele koji razmatraju ponašanje stijenske mase ojačane sidrima **u uvjetima stanja naprezanja** uzrokovanog iskopom podzemnih otvora ili zasijecanjem padina



- Modeliranje ponašanja sidara u stijenskoj masi još uvijek je, unatoč brojnim predloženim modelima, jedno od značajnijih područja istraživanja u mehanici stijena. Pri tome autori posjeduju različite pristupe rješenju problema. Težnja većine istraživanja je utvrditi praktičan model koji dobro opisuje stvarno ponašanje tri potpuno različita materijala (čelika, injekcijske smjese i stijenske mase) i njihove dvije veze (sidro-injekcijska smjesa i injekcijska smjesa-stijenska masa).
- Pri tome su prepoznati različiti mogući modeli sloma unutar sustava ojačanja stijenske mase:
 - **Slom u čeliku štapnog sidra**
 - **Slom veze sidra i injekcijske smjese**
 - **Slom u injekcijskoj smjesi**
 - **Slom veze injekcijske smjese i stijenske mase**
 - **Slom stijenske mase u okolišu sidra**
 - **Slom stijenske mase oko zone ojačane sidrima**



- S obzirom na različite mehanizme sloma postoji veliki broj pristupa projektiranju ojačanja stijenske mase koji se kreću od vrlo jednostavnih empirijskih metoda sve do vrlo složenih analitičkih i numeričkih proračuna.
- Zbog toga je metode projektiranja ojačane stijenske mase štapnim sidrima moguće podijeliti u tri osnovne grupe:
 - 1) **EMPIRIJSKE METODE PROJEKTIRANJA**
 - 2) **ANALITIČKE METODE PROJEKTIRANJA**
 - 3) **NUMERIČKE METODE PROJEKTIRANJA**



1) EMPIRIJSKE METODE PROJEKTIRANJA

- Empirijske metode projektiranja ojačanja stijenske mase zasnivaju se na primijenjenim metodama koje su se pokazale uspješne u praksi na već izvedenim građevinama.
- Kako bi se uopće moglo koristiti empirijske metode projektiranja, nužno je **koristiti klasifikacijske postupke opisa stijenske mase**, na osnovi kojih se mogu povezivati pojedina empirijska rješenja sa stanjem stijenske mase na koju će se izvršiti aplikacija rješenja.
- Empirijske metode uglavnom se koriste u rješavanju relativno jednostavnih inženjerskih problema, pri kojima je utjecaj zahvata na dubinu potrebnog podgrađivanja relativno mali, a faktori sigurnosti podgradnog sustava u pravilu veliki.



2) ANALITIČKE METODE PROJEKTIRANJA

- Analitičke metode mogu relativno dobro opisati zakone ponašanja pojedinačnih štapnih sidara.
- Problem se javlja pri primjeni postojećih odnosa u analizama ponašanja štapnih sidara u sklopu potrebnih podgradnih sustava u geotehničkim zahvatima, kada se analitički izrazi više ne mogu uklopiti u rješenje cjelokupnog problema. Tada nužno slijedi numerička razrada analitičkih modela i uključivanje izvorno analitičkih modela sidara u numeričke modele za analizu geotehničkih zahvata koji u sebi imaju uključenu mogućnost ojačanja stijenske mase štapnim sidrima.
- Analitičke metode **ograničenih su mogućnosti u opisivanju složenijih odnosa ponašanja materijala (sidra, injekcijske smjese i stijenske mase), a pogotovo njihovih veza (sidro-injekcijska smjesa i injekcijska smjesa-stijenska masa).** To se najviše odnosi na mogući opis nelinearnih ponašanja pojedinih veza, a koje se u pravilu javljaju u stvarnom ponašanju *in situ*.



3) NUMERIČKE METODE PROJEKTIRANJA

- U numeričkim modelima se, obzirom na njihove velike mogućnosti, pojavljuju sljedeće situacije:
 - A. Vrlo složeni modeli koji vrlo dobro opisuju ponašanje štapnih sidara u stijenskoj masi.
- Ovi modeli su često ili **previše složeni** ili se za opisivanje pojedinih veza koriste fizikalni odnosi koje je teško odrediti iz raspoloživih podataka dobivenih istražnim radovima ili ispitivanjima ponašanja sidara u laboratoriju i *in situ*, te je njihova praktična primjena vrlo ograničena. To se posebno odnosi na 3D modele, s visokim zahtjevima u opisivanju modela, upotrebljivim za relativno rijetke slučajeve ponašanja.



B. Modeli koji relativno dobro opisuju ponašanje stijenske mase ojačane štapnim sidrima, dok je ponašanje štapnih sidara opisano relativno jednostavnim modelima ponašanja.

➤ Ovaj tip modela je prihvatljiv za **srednje složene geotehničke zahvate**, a porastom veličine modela zahtjeva znatan trud u izradi modela. Rezultati su prihvatljivi u okviru potrebe rješavanja inženjerskih problema.

C. Modeli koji relativno dobro opisuju ponašanje stijenske mase ojačane štapnim sidrima, ali je opis ponašanja štapnih sidara kao elemenata ojačanja u ukupnom modelu loše zastupljeno i relativno odstupa od stvarnog ponašanja sidara *in situ*.

➤ Ovakav tip modela je upotrebljiv u **praktičnom rješavanju inženjerskih problema**, ali uz znatan oprez u tumačenju dobivenih rezultata.



➤ Ispitivanje sidara je nužno u cilju:

1. verifikacije projektnog rješenja–

Pri modeliranju sidara se koriste rezultati istražnih radova (za podatke o stijenskoj masi) te podaci o parametrima injekcijske smjese i čelične dionice. S obzirom da je modeliranje takvih sidara ‘opterećeno’ određenom dozom nesigurnosti, preporuča se ispitivanje sidara da bi se ustvrdilo ponaša li se sidro u skladu s pretpostavljenim.

2. dobivanja parametara nužnih za projektiranje-

Ponekad je poželjno ispitati sidro i prije projektiranja da bi se dobili podaci nužni da što vjerodostojniji model. Takvo sidro se naziva ‘probno sidro’ i izvodi se na probnom polju, na lokaciji gdje će se izvoditi građevina.



3. kontrole kvalitete izvedenih radova–

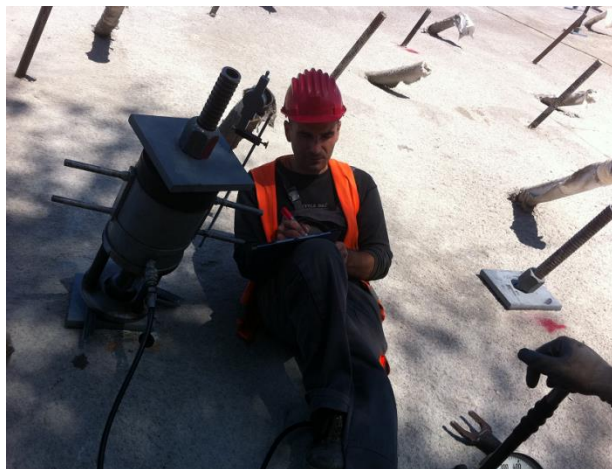
Kontrola kvalitete radova izvedbe sidara je nužna da bi se uočile eventualne nepravilnosti nastale nekvalitetnom izvedbom sidara. Nekvalitetna izvedba negativno utječe na parametre nužne za funkcionalnost sidra pretpostavljenu projektom.

➤ S aspekta ispitivanja sidara, mogu se ispitivati:

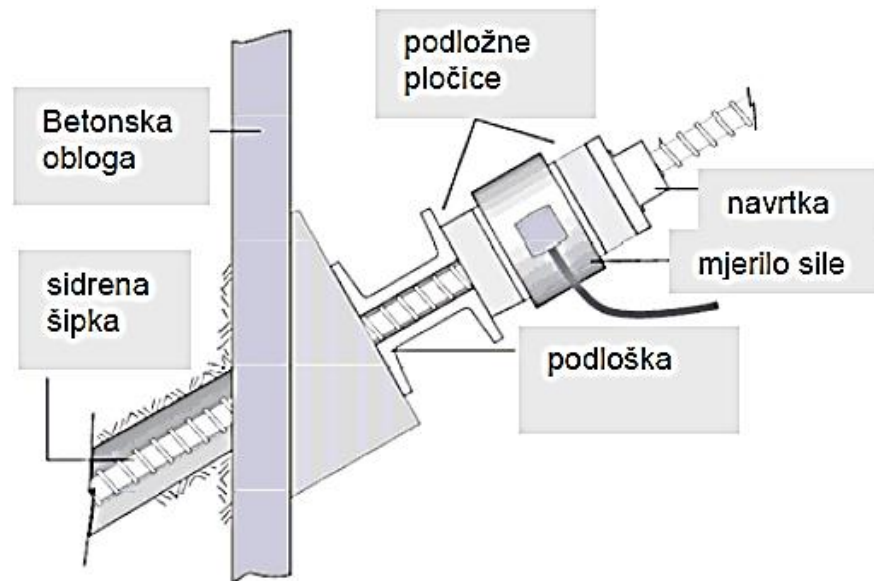
a) nosivost sidra / sila u sidru

b) kvaliteta injektiranosti sidra

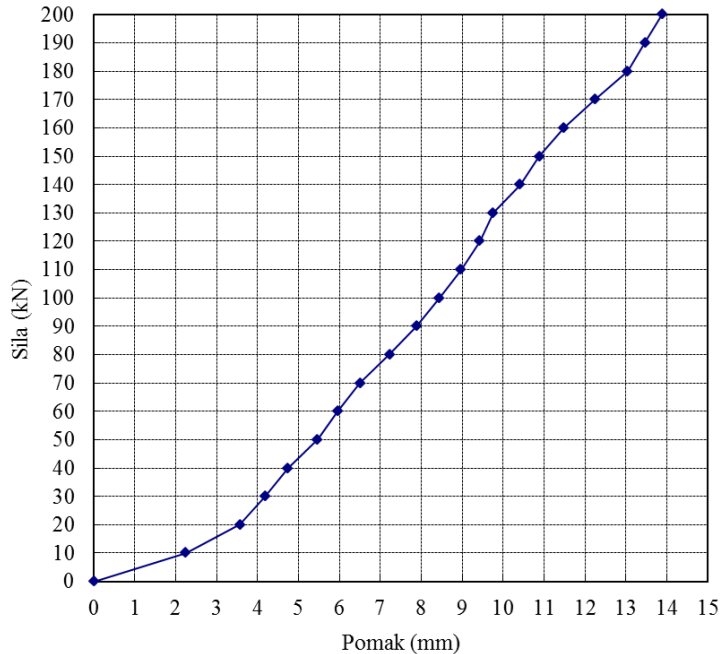
- test čupanja sidara – eng. ‘pull - out test’ (ISRM, (Međunarodno društvo za mehaniku stijena) 1974.)
- na svjetskoj razini najčešće korištena metoda ispitivanja sidara
- metoda je razorna, a prema ISRM-u potrebno je minimalno 5% ugrađenih sidara ispitati



- Pri opažanju sidara obično se vrši mjerenje sile na glavi sidra.
- Svrha mjerenja sile na glavi sidra je da se utvrdi sila kojom stijenka masa na konturi iskopa djeluje na glavu sidra (podložnu pločicu i navrtku). Mjerilo sile umetne se između navrtke i posebnog elementa koji je prilagođen obliku mjerila sile. Tijekom vremena očitava se sila koju sidro preuzima na sebe.



- nametanjem vlačne sile, određuje se odnos sila-pomak



- postoje dvije vrste ispitivanja testom čupanja:

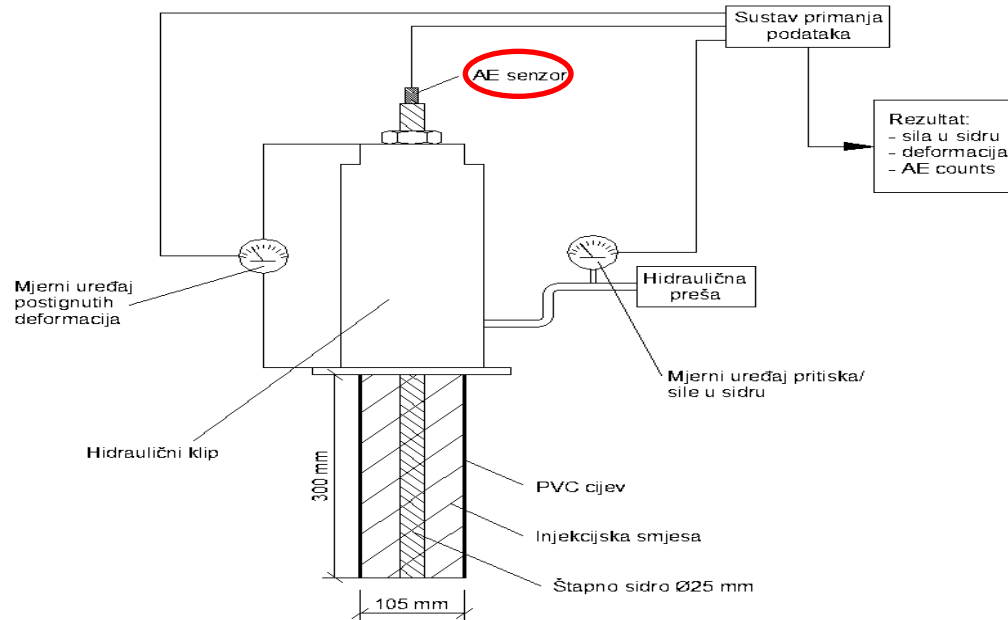
- provjera stvarne nosivost sidra prilikom čega dolazi do izvlačenja sidra iz stijenske mase
(daje odgovor na 'Kolika je nosivost sidra?')
- sidro se ispituje do sile predviđene projektom, te se zatim ispitivanje zaustavlja
(daje odgovor na 'Može li se ostvariti predviđena sila?')



- Metoda čupanja sidara predstavlja opće prihvaćeni standard i u većini slučajeva je jedina metoda koja se primjenjuje za ispitivanje sidara.
- Činjenica je međutim, da je metoda razorna (sidra koja se iščupaju nisu više funkcionalna), relativno skupa i spora metoda ispitivanja.
- Stoga se u posljednje vrijeme razvijaju metode kojima se nastoji na nerazorni način, brzo i jeftino, odrediti sila u sidru – takve metode su metoda akustične emisije i GRANIT sustav.



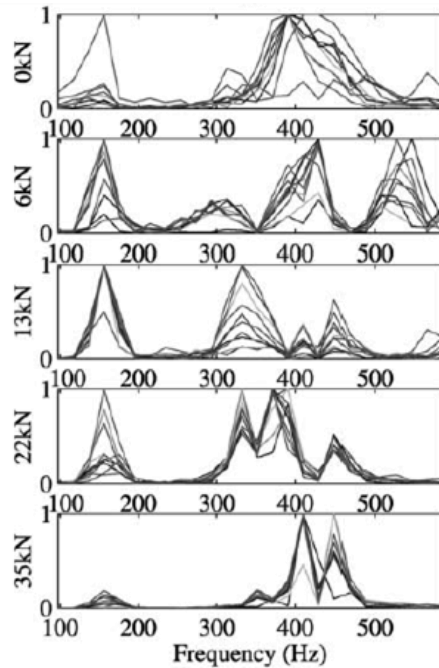
- Kao jedna od novih metoda ispitivanja sidara je nerazorna metoda **tehnike akustične emisije**, čija je primjena na ispitivanje sidara još u razvojnoj fazi.
- Ispitivanja tehnikom akustične emisije (AE) armaturnih šipki u armiranom betonu ukazali su na mogućnost ispitivanja ponašanja štapnih sidara injektiranih u stijenskoj masi.
- Napredovanje elastičnih valova nastalih kao rezultat pucanja veza injekcijske smjese i štapnog sidra, kao i pojavom pukotina u injekcijskoj smjesi odvija se duž štapnog sidra.
- Na kraju sidra su postavljeni senzori koji registriraju takve pojave.



- Za razliku od drugih nerazornih metoda, akustična emisija ima prednost u tome što je izvor signala u samom materijalu, a ne izvan njega.
- Moguće je odrediti silu koja je vrlo blizu sile sloma kada mjereni broj impulsa akustične emisije naglo poraste.
- Pri ovoj sili u materijalu nastaju plastične deformacije, dok je njegov integritet još uvijek sačuvan.

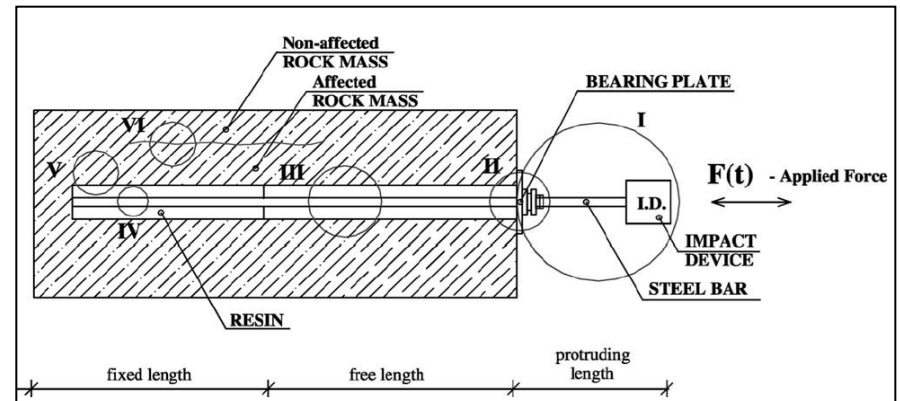
- **GRANIT** sustav (Starkey et al., 2003., Ivanović et al., 2003.) je razvijen na Sveučilištu u Aberdeenu (Škotska).
- sustav je patentiran i licenciran, i koristi se (još uvijek ograničeno) za ispitivanje geotehničkih sidara koja imaju slobodnu (neinjektiranu) i sidrišnu (injektiranu) dionicu, tzv. aktivna sidra.
- u svakom sidru tijekom njegovog vijeka trajanja, dolazi do promjene sile tijekom kojeg se sila u sidru mijenja, te je pretpostavka ispitivanja da se određivanjem vlastitih frekvencija sidara može odrediti razina sile u sidru.



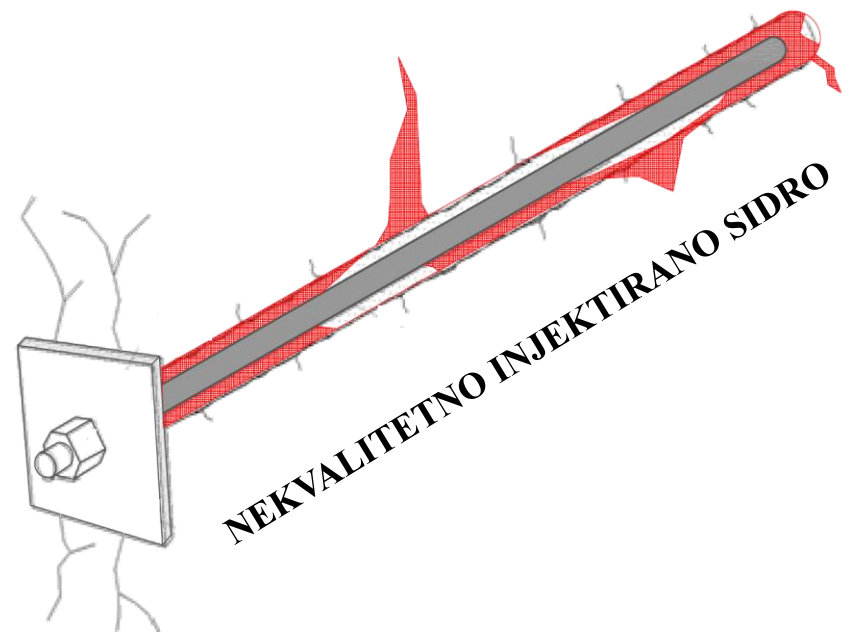
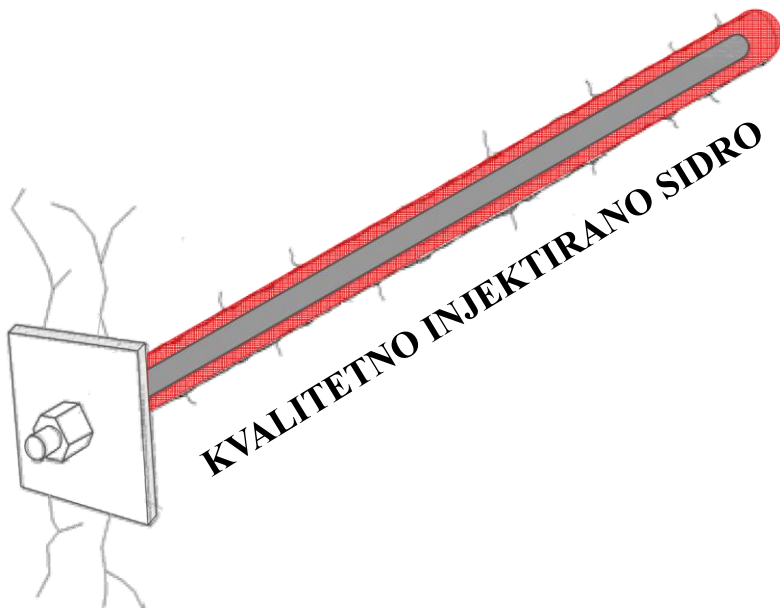


Load	~ 0 kN	7 kN	13 kN	21 kN	35 kN	44 kN
f_1	165.45	205.94	233.55	251.04	263.64	267.57
f_2	327.71	340.17	358.44	381.9	414.77	431.02
f_3	574.59	574.76	574.98	575.26	575.72	576.01
f_4	828.68	829.82	831.04	832.33	833.98	834.8
f_5	1053.3	1060.9	1068.6	1076.2	1085.1	1089.1
f_6	1235.1	1246.4	1260.1	1276.2	1298.9	1310.3
f_7	1449.1	1453.7	1459.9	1468.5	1484.1	1494.5
f_8	1692.4	1694	1696.2	1699	1704.2	1707.7
f_9	1939.1	1939.7	1940.6	1941.6	1943.5	1944.7
f_{10}	2180.7	2181	2181.3	2181.8	2182.5	2182.9

- generiranje impulsa na glavi sidra se postiže koristeći patentirani uređaj, dok se vibracijski odgovor sidra i njegove okoline mjeri akcelerometrom koji se nalazi na glavi sidra

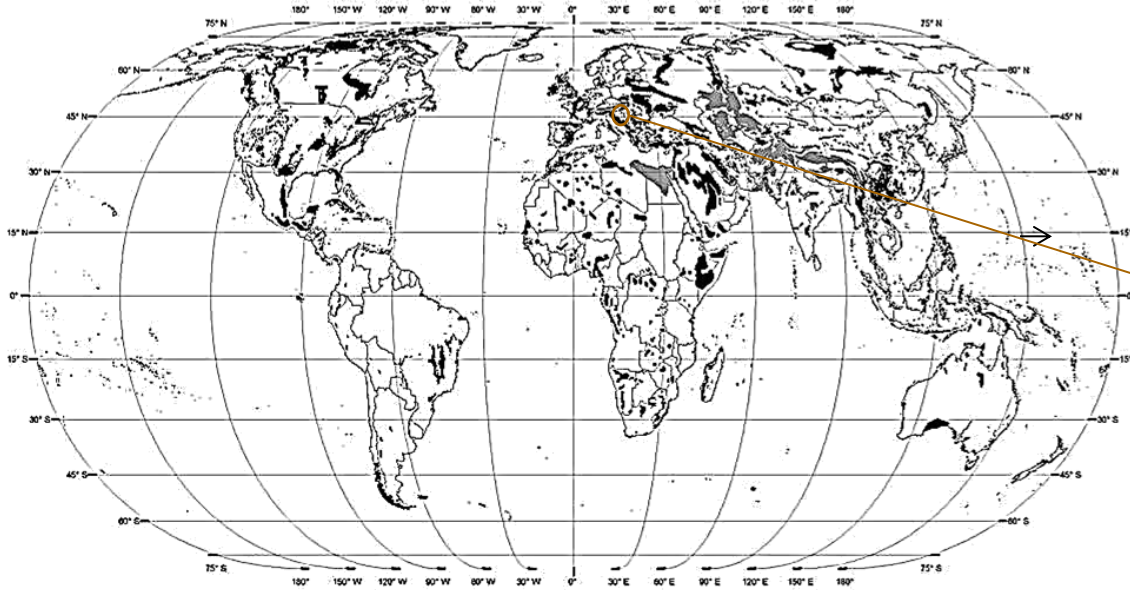


- osnovni problem prilikom injeztiranja sidra je nekvalitetno injeztiranje



- terenske prilike u kojima se injektiranje izvodi su glavni uzrok nekvalitenog injektiranja - problem izvedbe u krškim terenima

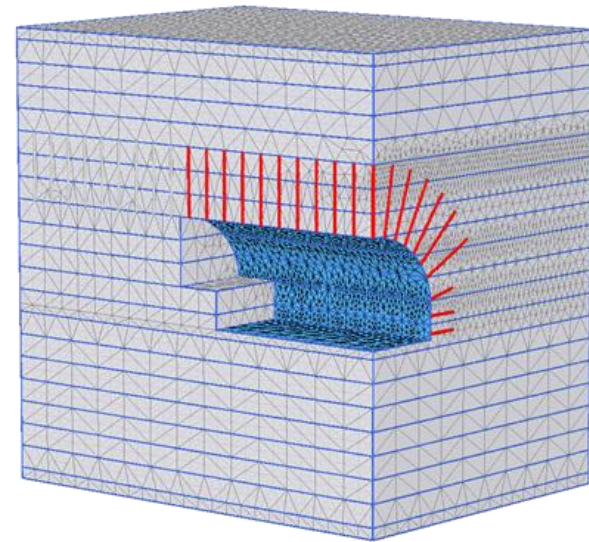
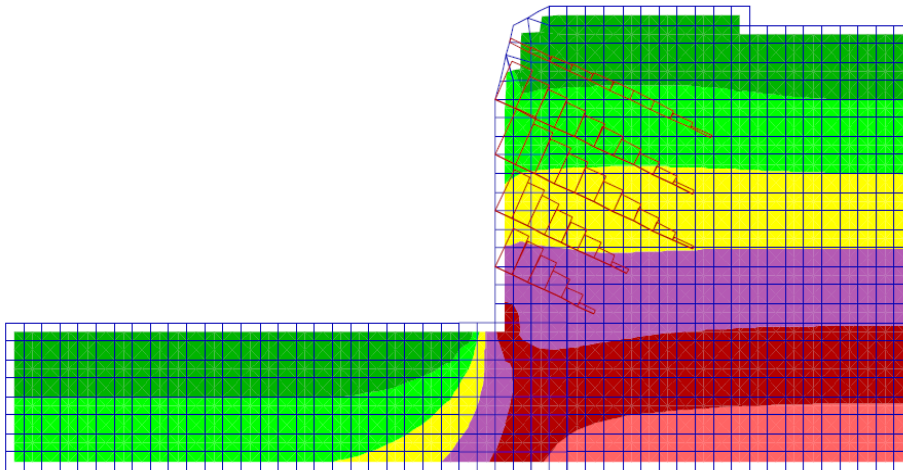
20 % svjetske kopnene površine



54 % kopnene površine RH



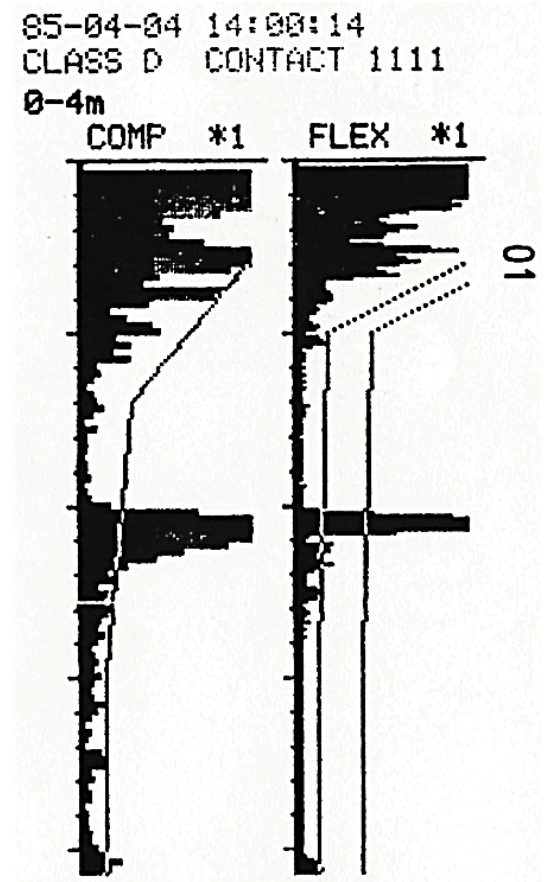
- Izravna posljedica nekvalitetno injektiranog sidra je reducirana nosivost sidra
- numeričkim analizama se pretpostavlja potpuna zainjektiranost štapnog sidra i ne uzimaju se u obzir eventualne greške prilikom injektiranja



- Najčešće korištena metoda određivanja kvalitete injeckiranja štapnih sidara je tzv. **Boltometer** patentiran 1978. u Švedskoj (firma Geodynamik na zahtjev rudarske kompanije Boliden Mineral AB)
- prvi Boltometer je proizveden 1983. pod imenom 'Boltometer Model 002'



- generiranje (piezoelektrični element) ultrazvučnih valova u sidru i praćenje njihove refleksije
- ako je sidro dobro injektirano, neće biti povrata energije signala, međutim ako je štapno sidro loše injektirano registrirati će povrat određene količine energije
- pri tome mora postojati razlika u impendanciji između injekcijske smjese i stijenske mase, jer će u protivnom valna energija u potpunosti disipirati u stijenu, prije nego li je uopće val stigao do greške u injektiranju



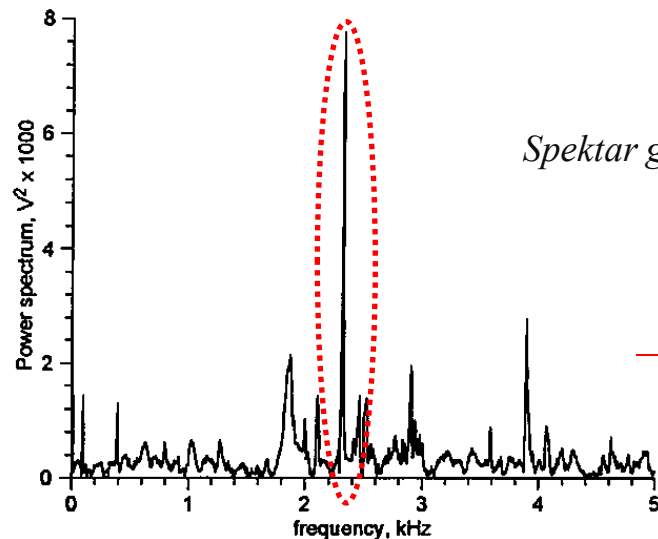


- na temelju razine povratne energije, Boltometar klasificira injektirana sidra u 4 skupine:
 - A (optimalno)
 - B (reducirano)
 - C (manjkavo)
 - D (vrlo loše)

- Glavni nedostaci Boltometra su problemi pri ispitivanju u raspucalim stijenskim masama (kao što je krš), gdje dolazi do 'gubitka' energije.

- Nadalje, glava sidrene šipke mora biti precizno obrađena (sječenje, brušenje, poliranje) kako bi se osigurao kvalitetan kontakt generatora valova i čelika. Potreba sječenja i brušenja glave sidrene šipke onemogućava upotrebu boltometra u rudnicima i tunelima s metanskim režimom odnosno u rudnicima s eksplozivnom ugljenom prašinom.

- Kovačević et al. (1999.) su generiranjem mehaničkog impulsa na glavi sidra, određivali dominantu frekvenciju, te je stavili u vezu s postotkom injektiranosti štapnog sidra
- kao značajna prednost metode je navedena činjenica da nije potrebna obrada glave sidra (kao kod Boltometra), međutim analizirana je samo dominantna frekvencija, a kompleksniji (realniji) slučajevi nekvalitetnog injektiranja nisu razmatrani.



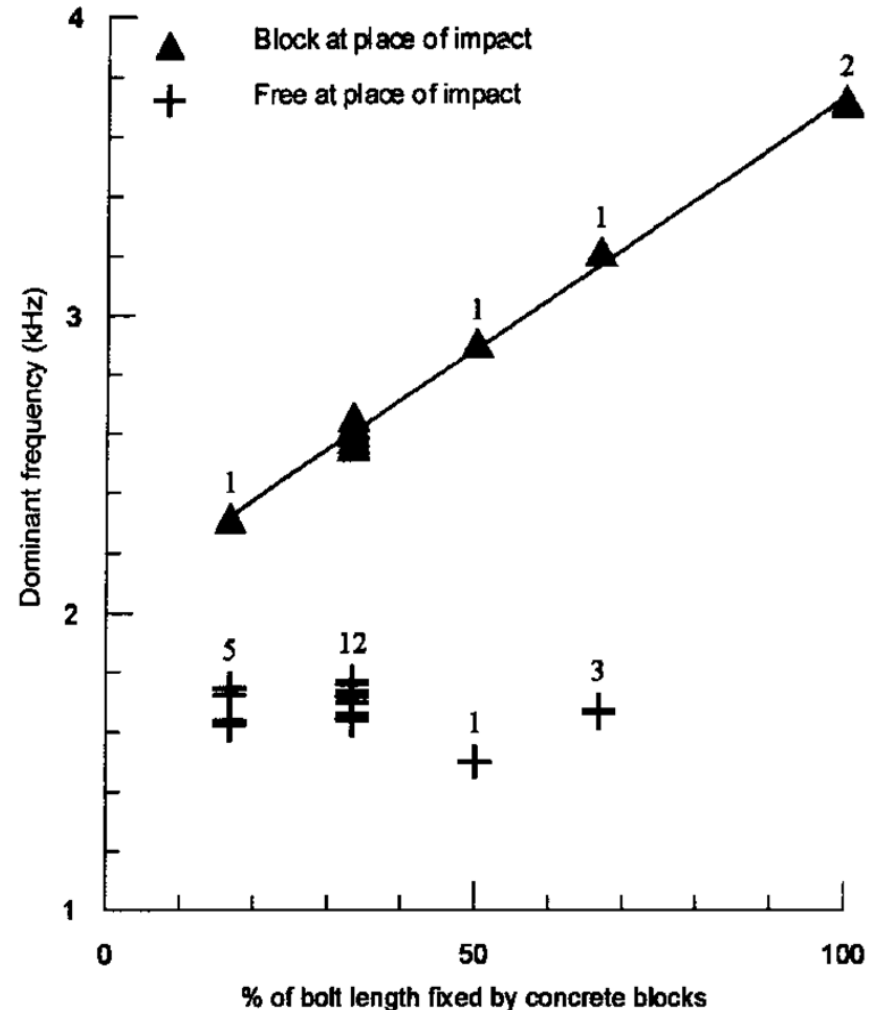
Spektar gustoće snage iz rezultata ispitivanja 3 m dugog sidra na tunelu Sv. Rok



LABORATORIJSKA ISPITIVANJA

Bolt number Length of free (F) and blocked (B) sections in meters

1	3.0 (B)
2	1.0 (B) - 2.0 (F)
3	1.0 (F) - 1.0 (B) - 1.0 (F)
4	2.0 (B) - 1.0 (F)
5	0.5 (F) - 1.0 (B) - 1.5 (F)
6	0.5 (F) - 2.0 (B) - 0.5 (F)
7	0.5 (F) - 2.5 (F)
8	0.5 (F) - 0.5 (B) - 2.0 (F)
9	1.0 (F) - 0.5 (B) - 1.5 (F)
10	0.5 (B) - 0.5 (F) - 0.5 (B) - 1.5 (F)
11	0.5 (B) - 1.0 (F) - 0.5 (B) - 1.0 (F)
12	0.5 (B) - 1.5 (F) - 0.5 (B) - 0.5 (F)
13	0.5 (B) - 2.0 (F) - 0.5 (B)
14	0.5 (F) - 0.5 (B) - 0.5 (F) - 0.5 (B) - 1.0 (F)
15	0.5 (F) - 0.5 (B) - 1.0 (F) - 0.5 (B) - 0.5 (F)
16	0.5 (B) - 0.5 (F) - 0.5 (B) - 0.5 (F) - 0.5 (B) - 0.5 (F)





TERENSKA ISPITIVANJA

Number of bolts Length of free (F) and grouted (G) sections in meters

5	3.0 (G)
5	2.0 (G) - 1.0 (F)
4	1.5 (G) - 1.5 (F)
4	1.0 (G) - 2.0 (F)
3	1.1 (F) - 1.9 (G)
2	1.7 (F) - 1.3 (G)
2	2.7 (F) - 0.3 (G)
1	2.3 (F) - 0.7 (G)
1	0.3 (F) - 2.7 (G)
3	0.9 (F) - 1.1 (G) - 1.0 (F)

