

Kontrola kvalitete štapnih sidara

Željko Arbanas, Meho-Saša Kovačević, Vlasta Szavits-Nossan

Ključne riječi

kontrola kvalitete,
štapno sidro,
injektiranje,
čupanje sidara,
akustična emisija,
laboratorijski pokus

Key words

quality control,
rock anchor,
grouting,
anchor pullout,
acoustic emission,
laboratory test

Mots clés

contrôle de qualité,
boulon d'ancrage,
injection, arrachement de
boulons, émission
acoustique, essai de
laboratoire

Ключевые слова

контроль качества,
стержневый якорь,
инжектирование,
извлечение якорей,
акустическая эмиссия,
лабораторный опыт

Schlüsselworte

Qualitätskontrolle,
Stabanker,
Verpressung,
Ankerreißen,
akustische Emission,
Laborversuch

Ž. Arbanas, M. S. Kovačević, V. Szavits-Nossan

Izvorni znanstveni rad

Kontrola kvalitete štapnih sidara

U radu se opisuju laboratorijski pokusi čupanja štapnih sidara sa 48 raznih injekcijskih smjesa, uz mjerenje akustične emisije. Pokazuje se da se novim mjerenjem i predloženim analitičkim postupkom može odrediti sila koja je blizu sile sloma, tako da štapno sidro i dalje ostaje upotrebljivo za ojačanje stijenske mase. Mjerenje akustične emisije može se preporučiti za in situ kontrolu kvalitete štapnih sidara, uz novi doprinos kvaliteti aktivnoga geotehničkog projektiranja.

Ž. Arbanas, M. S. Kovačević, V. Szavits-Nossan

Original scientific paper

Quality control for rock anchors

Laboratory rock-anchor pullout test with 48 different grouts, and with the acoustic emission measurement, is described in the paper. It is demonstrated that the force close to the failure point can be determined by the new measurement and the proposed analytical procedure, so that the rock anchor will remain usable for rock mass strengthening purposes. Acoustic emission measurements can be recommended for the in situ rock anchor quality control, as a novel qualitative improvement of active geotechnical design practices.

Ž. Arbanas, M. S. Kovačević, V. Szavits-Nossan

Ouvrage scientifique original

Contrôle de la qualité des boulons d'ancrage

L'essai d'arrachement des boulons en laboratoire avec 48 coulis différents, et avec le mesurage de l'émission acoustique, est décrit dans l'ouvrage. Il est démontré que la force près du point de la rupture peut être déterminée par ce mesurage nouveau et par le procédé analytique proposé, et que le boulon d'ancrage demeurera utilisable aux fins de stabilisation de la masse rocheuse. Les mesurages de l'émission acoustique peuvent être recommandés pour l'analyse in situ de la qualité des boulons d'ancrage, comme une nouvelle amélioration qualitative des études géotechniques actives.

Ж. Арбанас, М. С. Ковачевич, В. Савич-Носсан

Оригинальная научная работа

Контроль качества стержневых якорей

В работе описываются лабораторные опыты извлечения стержневых якорей с 48-ю различными инжекторными смесями, при измерении акустической эмиссии. Показывается, что новым измерением и предложенным аналитическим способом может быть определена сила, находящаяся близко к силе разрыва, таким образом, что якорный стержень и дальше остаётся в состоянии употребления для укрепления горной породы. Измерение акустической эмиссии может быть порекомендовано для in situ контроля качества стержневых якорей, при новом вкладе активного геотехнического проектирования.

Ž. Arbanas, M. S. Kovačević, V. Szavits-Nossan

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

Qualitätskontrolle von Stabankern

Im Artikel beschreibt man Laborausreissversuche von Stabankern mit 48 verschiedenen Verpressungsmischungen, wobei die akustische Emission gemessen wurde. Es wird gezeigt dass mit der neuen Messung und dem vorgeschlagenen analytischen Verfahren eine Kraft bestimmt werden kann die nahe der Bruchkraft ist, so dass der Stabanker weiter für die Verstärkung der Felsmasse nutzbar bleibt. Die Messung der akustischen Emission kann man für die in situ Qualitätskontrolle von Stabankern empfehlen, als neuen Beitrag zur Qualität des aktiven bodentechnischen Projektierens.

Autori: Dr. sc. **Željko Arbanas**, dipl. ing. građ., IGH d.d. PC Rijeka; prof. dr. sc. **Meho-Saša Kovačević**, dipl. ing. građ.; prof. dr. sc. **Vlasta Szavits-Nossan**, dip. ing. mat., Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zagreb

1 Uvod

Predviđanje ponašanja stijenske mase ojačane štapnim sidrima u otvorenim i podzemnim iskopima jedan je od važnijih problema u geotehničkoj praksi i u znanstvenim istraživanjima. Za projektiranje podzemnih otvora i zasjeka u stijenskoj masi obično se provode analize odnosa naprezanja i deformacija te analize stabilnosti na temelju odabranih empirijskih kriterija deformabilnosti i čvrstoće stijenske mase, uglavnom ojačane štapnim sidrima. Pri tome se nosivost sidara određuje na temelju pokusa čupanja. Međutim, zbog nedovoljne pouzdanosti empirijskih kriterija u numeričkim analizama, te zbog nedovoljnog poznavanja ponašanja stijenske mase i štapnih sidara, poželjno je tijekom izvedbe radova primijeniti aktivno geotehničko projektiranje [22]. Ključan element za aktivno geotehničko projektiranje jest mjerenje pomaka stijenske mase za izvedbe radova na geotehničkoj konstrukciji, kako bi, ukaže li se za tim potreba, bilo moguće intervenirati u projekt ili na licu mjesta i osigurati stabilnost konstrukcije.

Unatoč aktivnom geotehničkom projektiranju, koje omogućuje bolje poznavanje ponašanja stijenske mase ojačane štapnim sidrima, ponašanje samih štapnih sidara ostaje nepoznatim. Projektom predviđena nosivost štapnih sidara provjerava se tijekom izvođenja zasjeka i ojačanja štapnim sidrima kontrolnim *in situ* pokusima čupanja sidara, pri čemu je nužno ispitati barem 5% svih sidara [20]. Ispitana se sidra nakon pokusa čupanja odbacuju i više se ne mogu rabiti za ojačanje stijenske mase. Ovaj je nizak postotak ispitanih sidara za kontrolu kvalitete ugradnje kompromisno rješenje, a veći se broj sidara ne ispituje zbog skupoće cijelog procesa bušenja, ugradnje, njihova injektiranja te izvođenja pokusa čupanja sidara, koja se nakon svega toga moraju odbaciti.

Bolje poznavanje nosivosti štapnih sidara pridonijelo bi većoj sigurnosti u stabilnost geotehničke konstrukcije u stijenskoj masi. U svijetu se stoga provode brojna laboratorijska ispitivanja učinkovitosti štapnih sidara za ojačanje stijenske mase, pri čemu njihova učinkovitost, osim nosivosti sidara, ovisi i o injekcijskoj smjesi te o režimu injektiranja.

U radu su opisani laboratorijski pokusi za određivanje ponašanja štapnih sidara s ukupno 48 različitih injekcijskih smjesa. Na ovim su uzorcima provedeni pokusi čupanja sidara s mjerenjem akustične emisije. Pokazala se velika prednost mjerenja akustične emisije u odnosu na standardni pokus čupanja sidara (bez ovih mjerenja), jer je, na temelju naglog porasta broja impulsa akustične emisije, moguće odrediti nosivost štapnoga sidra, odnosno silu vrlo blizu nosivosti ili sili sloma, bez čupanja sidra do kraja. Pojava plastičnih deformacija, odnosno početak pucanja veza između sidra i injekcijske smjese, te

veza u samoj injekcijskoj smjesi, što se jasno može detektirati pri mjerenju akustične emisije, ukazuje na približavanje sili sloma. Za razliku od standardnog pokusa čupanja sidara, ovdje se, nakon naglog porasta mjenog broja impulsa akustične emisije, pokus može zaustaviti prije dosezanja sile sloma i ostaviti štapno sidro u uporabivom stanju za ojačanje stijenske mase.

Na temelju dobivenih rezultata, akustična se emisija može preporučiti za *in situ* kontrolu kvalitete ugrađenih sidara. Uz mogućnost kontrole kvalitete većeg broja sidara, umjesto svega njih 5%, ovim bi se postupkom bitno pridonijelo boljem poznavanju ponašanja štapnih sidara u ojačanoj stijenskoj masi, a time i kvaliteti aktivnoga geotehničkog projektiranja.

2 Aktivno geotehničko projektiranje

Projektiranje zasjeka u stijenskoj masi svodi se na odabir njegova nagiba i/ili potrebnih mjera podgrađivanja. Podgradni sustav na licu iskopa služi za osiguravanje stabilnosti stijenske mase na zasjeku, a štapnim se sidrima ojačava stijenska masa i smanjuju njezini pomaci. Time štapna sidra postaju sastavnim dijelom stijenske mase. Sile u ugrađenim štapnim sidrima nastaju zbog prijenosa opterećenja sa stijenske mase preko injekcijske smjese na štapna sidra, poradi pomaka nastalih u stijenskoj masi nakon iskopa ili unošenjem sile prednapinjanja u štapna sidra.

Za projektiranje zasjeka obično se, za analizu naprezanja i deformacija, rabi standardni empirijski kriterij deformabilnosti stijenske mase [8], [30], a za analizu stabilnosti empirijski zakon čvrstoće stijenske mase [16] i nosivost štapnih sidara. Analiza stabilnosti rezultira faktorom sigurnosti u stijenskoj masi, koji u praksi može biti znatno drugačiji od onog u projektu zbog netočne pretpostavke o nosivosti štapnih sidara. Također je *in situ* mjerenjima pomaka utvrđeno da su deformacije stijenske mase pri izvođenju ojačanih stijenskih zasjeka redovito mnogo veće od prognoza dobivenih standardnim analizama naprezanja i deformacija [23].

Zbog navedenih je razloga potrebno bolje poznavanje ponašanja stijenske mase i štapnih sidara. To je moguće uz pomoć aktivnoga geotehničkog projektiranja [22]. Ovaj pristup projektiranju omogućava da se projekt modificira tijekom izvođenja radova na temelju rezultata *in situ* mjerenja, koja daju podatke o realnom ponašanju materijala u kojem se radovi izvode i o ponašanju konstrukcije, radi osiguranja stabilnosti, sigurnosti i ekonomičnosti projektiranog objekta. Za zasjeka u stijenskoj masi rabe se deformetri i inklinometri koji mjere vertikalne i horizontalne pomake u stijenskoj masi. Rezultati mjerenja koriste se za povratne analize naprezanja i deformacija u kojima se, odgovarajućim izborom defor-

macijskih karakteristika stijenske mase i krutosti sidara, usklađuju mjereni i proračunati pomaci na zasjeku do inženjerski prihvatljive točnosti [1]-[5]. Zatim se provodi novi proračun stabilnosti stijenske mase ojačane štapnim sidrima i utvrđuje realan faktor sigurnosti. Time se dobivaju informacije o tome je li originalnim projektom osigurana stabilnost zasjeka i, u slučaju da se utvrdi nedovoljna sigurnost, moguće je izmjenom nagiba zasjeka za sljedeću fazu iskopa u projektu i/ili ugradnjom dodatnih sidara, napredovati s geotehničkim radovima na zasjeku s većom sigurnošću u stabilnost konstrukcije. Također je moguće utvrditi previsoki faktor sigurnosti predviđen prvotnim projektom i ostvariti uštede u daljnjem izvođenju radova na zasjeku.

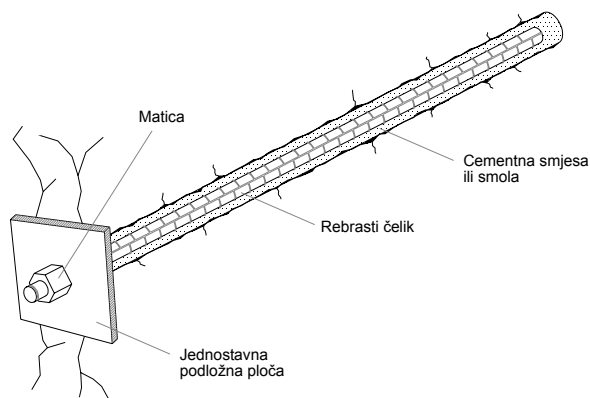
Varijacija deformacijskih karakteristika stijenske mase radi usklađivanja mjerenih i proračunatih pomaka u povratnim analizama znatno bi se uspješnije mogla provoditi kada bi se s većom pouzdanošću mogla odrediti krutost sidara. Za novu analizu stabilnosti stijenske mase mnogo bi pomoglo bolje poznavanje njihove nosivosti. Time bi aktivno geotehničko projektiranje dobilo na kvaliteti i pouzdanosti. Upravo postupak ispitivanja sidara akustičnom emisijom, koji se opisuje u članku, omogućava da se bolje uoče ove bitne nepoznanice u povratnim analizama.

Metodologiju aktivnoga geotehničkoga projektiranja, odnosno korekcije projekta zasjeka i/ili uporabe dodatnih podgradnih mjera, ako se tijekom izvedbe iskopa utvrdi moguća pojava nestabilnosti ili nedovoljne stabilnosti zasjeka u stijenskoj masi, prikazali su Hoek i Bray [15] te Hoek i Brown [17]. Postupke za odabir podgradnih sustava dali su Windsor i Thompson [36] a za odabir odgovarajućih štapnih sidara Stillborg [32]. Potonji autor ukazuje na potrebu da se projektiranju pristupi kao jedinstvenom procesu, od izrade projekta do izvedbe i eksploatacije, pri čemu mjerenja *in situ* imaju izrazito važnu ulogu. Aktivnim geotehničkim projektiranjem ne dobiva se samo sigurno i ekonomično rješenje za objekt, već i važne spoznaje o realnom ponašanju materijala i, u slučaju stijenske mase, o ponašanju podgradnog sustava.

3 Injektirana štapna sidra

Postoji niz razloga za uporabu štapnih sidara za osiguranje stijenske mase, od kojih su najvažniji [32]: svestrana mogućnost uporabe za bilo koji odabrani oblik iskopa, relativno niska cijena, jednostavnost uporabe i u potpunosti mehanizirana ugradnja. Koristeći se štapnim sidrima vrlo je jednostavno mijenjati intenzitet ojačanja stijenske mase promjenom razmaka među njima i njihove dužine, ovisno o utvrđenoj kakvoći stijenske mase u zasjeku.

Injektirana štapna sidra ugrađuju se u bušotine ispunjene cementnom smjesom ili smjesom od umjetnih smola (slika 1.). Sidrenje, odnosno veza između sidra i stijenske mase, uspostavlja se cijelom injektiranom dužinom s pomoću kemijskih veza, trenja i uklještenja. Pri tome veći utjecaj imaju trenje i uklještenje, jer se kemijske veze s vremenom mogu potpuno razgraditi.



Slika 1. Injektirana štapna sidra

U posljednjih se pedeset godina injektiranim štapnim sidrima u svijetu najčešće ojačavaju stijenske mase, i to u građevinarstvu i rudarstvu. Materijal za štapna sidra najčešće je rebrasto obrađeni čelik, koji se rabi u građevinarstvu, ili odgovarajuće obrađeni presjeci čelika posebno proizvedeni za geotehnička sidra. Za injektiranje se upotrebljavaju suspenzije cementa ili umjetnih smola [14], pri čemu je uporaba umjetnih smola znatno rjeđa, uglavnom zbog njihove visoke cijene [10].

4 Dosadašnja ispitivanja štapnih sidara

4.1 Svrha ispitivanja

Na izvedenim zasjecima, ojačanim štapnim sidrima, uočeno je različito ponašanje stijenske mase i sidara, pa su provedena brojna istraživanja nosivosti, veze između sidra i stijenske mase te parametara koji utječu na nosivost sidara. Ova su istraživanja uglavnom usmjerena prema utvrđivanju modela ponašanja sidara i stijenske mase koji će dobro opisati svojstva triju materijala, i to sidra, injekcijske smjese i stijenske mase te njihovih dviju veza, vezu između sidra i injekcijske smjese te vezu između injekcijske smjese i stijenske mase. Pri tome se razmatra slom sljedećih elemenata sustava ojačanja stijenske mase [9], [12], [13], [24]:

- slom u čeliku štapnog sidra,
- slom veze između sidra i injekcijske smjese,
- slom u injekcijskoj smjesi,
- slom veze između injekcijske smjese i stijenske mase,
- slom stijenske mase u okolini sidra,
- slom stijenske mase oko područja ojačanog sidrima.

Najčešće se, međutim, događa slom veze između sidra i injekcijske smjese ili slom u samoj injekcijskoj smjesi.

Ispitivanje štapnih sidara obično se provodi na temelju mjerenja deformacija sidra tijekom pokusa čupanja [20]. Rezultati ovih pokusa daju veliku raznolikost rezultata, ne toliko što se tiče nosivosti, već što se tiče odnosa sila čupanja i ostvarenih deformacija sidra.

4.2 Laboratorijska ispitivanja

Zbog raznih tipova opreme za ispitivanje štapnih sidara pokusom čupanja, raznih dimenzija sidara i načina ispitivanja, dobiveni su veoma različiti rezultati, ali se ipak iz ovih pokusa mogu izvesti zaključci koji pokazuju opće zakonitosti u ponašanju sidara.

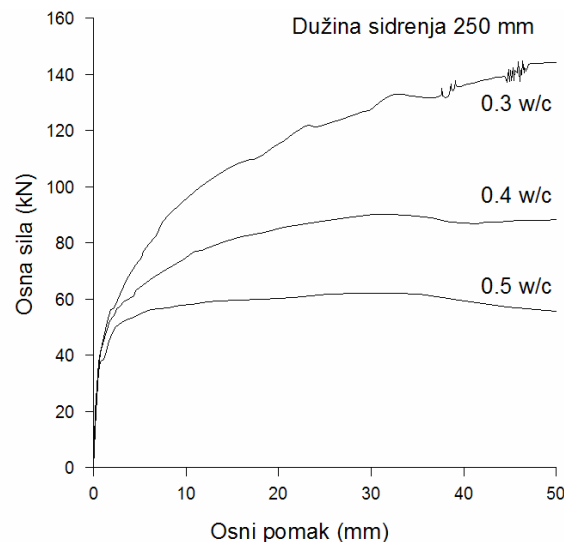
Nosivost štapnog sidra raste s porastom dužine sidrenja, ali ne proporcionalno. Detaljna istraživanja utjecaja dužine sidrenja te promjera i površine štapnih sidara na nosivost sidara proveli su Kilic i dr. [21]. Uočili su postojanje granične dužine sidrenja te su predložili odgovarajuće izraze za odnose sile čupanja štapnog sidra i njegova promjera, površine njegova poprečnog presjeka te sidrišnu dionicu.

Nosivost štapnog sidra raste i s povećanjem tlačne čvrstoće injekcijske smjese. Ako se upotrebljava cementna smjesa, nosivost sidara raste s porastom jednoosne tlačne čvrstoće injekcijske smjese [11]. Za vrijednosti jednoosne tlačne čvrstoće injekcijske smjese manje od 21 MPa, nosivost sidara raste proporcionalno s porastom čvrstoće, dok se za veće vrijednosti prirast nosivosti smanjuje. Za vrijednosti jednoosne tlačne čvrstoće injekcijske smjese veće od 42 MPa, nosivost sidara više ne raste.

Kilic i dr. [21] proveli su i iscrpna istraživanja utjecaja injekcijske smjese na nosivost sidara. Uočili su smanjenje sile čupanja sidra s povećanjem vodocementnog faktora injekcijske smjese. Predložili su korelacije između intenziteta veze štapnih sidara s injekcijskom smjesom i posmične čvrstoće injekcijske smjese, njezine jednoosne tlačne čvrstoće te modula elastičnosti. Ova istraživanja ukazuju i na povećanje sile čupanja, odnosno ojačanje veze između sidara i injekcijske smjese tijekom vremena, što je u skladu s poznatim očvršćenjem cementnih veziva nakon približno sedam dana od trenutka vezanja, kada dolazi do smanjenja prirasta čvrstoće s vremenom.

Za injektiranje sidara uglavnom se rabi injekcijska smjesa portlandskoga cementa i vode u omjerima vodocementnog faktora od 0,3 do 0,5. Niži vodocementni faktor, $v/c = 0,3$, daje veću nosivost sidara (slika 2.), ali su pri tome smjese teško ugrađive, smjesa nije homogena, a dobiveni rezultati pokusa čupanja veoma su različiti. S druge strane, smjese s višim vodocementnim faktorom, $v/c = 0,5$,

lakše su za ugradnju, ali su znatno slabije. Osim toga, zbog skupljanja smjese dolazi do skraćivanja sidrišnih dionica i oslabljivanja veze između injekcijske smjese i stijenske mase. Aditivi, kao što su plastifikatori i dodaci za bubrenje, rabe se za rješavanje problema ugrađivosti injekcijske smjese, ali ovi dodaci znatno utječu na smanjenje čvrstoće i promjenu deformacijskih značajki smjese [18].



Slika 2. Utjecaj vodocementnog faktora na nosivost sidara [28]

Opsežna ispitivanja utjecaja raznih injekcijskih smjesa na ponašanje štapnih sidara provedena su i na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu [33] radi dobivanja injekcijske smjese sa zadovoljavajućim svojstvima ugrađivosti i tiksotropnosti, smanjene propusnosti, dobrih mehaničkih svojstava i dobre zaštite sidara od korozije.

4.3 Terenska ispitivanja

Pošto je ISRM (Međunarodno društvo za mehaniku stijena) preporučio postupke za ispitivanje sidara za ojačanje stijenske mase [19], oni su postali općeprihvaćeni standard i u većini slučajeva jedina metoda koja se primjenjuje *in situ*. Zbog ograničenih mogućnosti ovih ispitivanja, prvenstveno zbog toga što se, prema ovim propisima, čupanjem sidara *in situ* ispituje njih svega 5%, u posljednje se vrijeme razvijaju nove, vrlo korisne metode za opažanje ponašanja štapnih sidara.

Pri tome se u stijensku masu ugrađuju instrumenti za mjerenje, deformetri i inklinometri, kojima se mjere deformacije u sidrima i okolnoj stijenskoj masi [6], [7], [25], [26], [29]. Rezultati ovih mjerenja služe za uvid u ponašanje stijenske mase, a s pomoću njih je moguće provesti i odgovarajuće povratne analize, kojima se dobiva uvid u realno stanje naprezanja i deformacija u stijenskoj masi te njezin realan faktor sigurnosti [1], [3] i [5].

5 Novo laboratorijsko ispitivanje štapnih sidara akustičnom emisijom

5.1 Opis uzoraka

S obzirom da su na temelju *in situ* opažanja ponašanja većeg broja u Hrvatskoj izvedenih ojačanih stijenskih zasjeka također uočene razlike u ponašanju štapnih sidara, na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu provedena su opsežna ispitivanja štapnih sidara u strogim laboratorijskim uvjetima, radi utvrđivanja njihove nosivosti i zakonitosti ponašanja [3]. Pri tome su izvedeni pokusi čupanja sidara injektiranih smjesama različitih značajki čvrstoće i deformabilnosti koje se inače rabe *in situ* pri izvedbi štapnih sidara, uz mjerenje akustične emisije. Dobiveni rezultati pokazuju visoki stupanj pouzdanosti mjerenja akustične emisije i mogućnost jednostavne primjene ove nerazorne metode u praksi za kontrolu kvalitete štapnih sidara.

Za ispitivanje su upotrijebljena štapna sidra od rebrastog čelika RA 400/500, promjera 25 mm, ugrađena u cilindrični uzorak injekcijske smjese dužine 300 mm i promjera 105 mm. Štapna su sidra postavljena u oplata od PVC cijevi, nakon čega su se oplata u cijelosti ispunjavale injekcijskom smjesom. Slobodan dio sidra, s narezanom glavom za postavljanje opreme za čupanje sidra, bio je dužine 200 mm (slika 3.). Ispitivanja su provedena s ukupno 48 različitih injekcijskih smjesa. Odabrane su tri osnovne vrste smjesa, i to: cementne smjese, cementne smjese s dodatkom plastifikatora i cementne smjese s dodatkom sredstava za bubrenje [3].



Slika 3. Uzorci štapnih sidara za ispitivanje [3]

5.2 Injekcijske smjese

Cementne smjese cementa i vode u praksi se najčešće rabe za injektiranje štapnih sidara. Vodocementni faktori varirani su od $v/c = 0,42$ do $v/c = 0,48$. S obzirom da se u određenim uvjetima injekcijske smjese ponašaju

tiksotropno, što znači da pri jačem poremećaju miješanjem ili vibriranjem prelaze u tekuće stanje, cementnim se smjesama i cementnim smjesama s dodatkom plastifikatora dodavao bentonit s vrijednostima od 5% do 15% od količine cementa. Uporabljani su cement PC 15 dz 45S i bentonit Betonplast-30. Sastav cementnih smjesa prikazan je u tablici 1.

Cementne smjese s dodatkom plastifikatora rabe se za injektiranje pri niskim temperaturama ili radi dosezanja visokih vrijednosti čvrstoće smjese već u ranoj fazi injektiranja. Pri uporabi plastifikatora potrebno je manje vode, tako da su vodocementni faktori bili u rasponu od $v/c = 0,32$ do $v/c = 0,37$. Za ove je uzorke bentonit dodavan s vrijednostima od 5% do 10% od količine cementa. Ovdje je, uz istu vrstu cementa i bentonita, upotrijebljen plastifikator Melment L 10/40. Sastav ovih smjesa prikazan je u tablici 2.

Tablica 1. Sastav cementnih smjesa [3]

Sidro	Sastav smjese (kg)		Vodocementni faktor
	cement	bentonit	
1	100	0	0.42
2	100	0	0.45
3	100	0	0.48
4	100	5	0.42
5	100	5	0.45
6	100	5	0.48
7	100	10	0.42
8	100	10	0.45
9	100	10	0.48
10	100	15	0.42
11	100	15	0.45
12	100	15	0.48

Tablica 2. Sastav cementnih smjesa s dodatkom plastifikatora [3]

Sidro	Sastav smjese (kg)			Vodocementni faktor
	cement	plastifikator	bentonit	
13	100	2	0	0.32
14	100	2	0	0.35
15	100	2	0	0.37
16	100	4	0	0.32
17	100	4	0	0.35
18	100	4	0	0.37
19	100	2	5	0.32
20	100	2	5	0.35
21	100	2	5	0.37
22	100	2	10	0.32
23	100	2	10	0.35
24	100	2	10	0.37
25	100	4	5	0.32
26	100	4	5	0.35
27	100	4	5	0.37
28	100	4	10	0.32
29	100	4	10	0.35
30	100	4	10	0.37

Cementne smjese s dodatkom sredstava za bubrenje upotrebljavaju se za injektiranje štapnih sidara u trošnim stijenskim masama s izrazito heterogenim naslagama. Ove smjese imaju i plastifikacijska svojstva, a bubrenjem se nadoknađuje skupljanje smjese pri njezinu stvrdnjavanju. Sredstvima za bubrenje nije dodavan bentonit jer je osim običnog dodatka za bubrenje rabljen i poseban, standardni dodatak za sprječavanje tiksotropnih svojstava injekcijske smjese. Uz istu vrstu cementa kao i za prethodne pokuse uporabljeno je sredstvo za bubrenje Stabilmac i sredstvo za bubrenje s netiksotropnim svojstvima Meyco Fix Flowcable. Sastav ovih smjesa prikazan je u tablici 3.

Tablica 3. Sastav cementnih smjesa s dodatkom za bubrenje [3]

Sidro	Sastav smjese (kg)			Vodocementni faktor
	cement	dodatak za bubrenje		
		ne-tiksotropni	obični	
31	100	3	0	0.32
32	100	3	0	0.34
33	100	3	0	0.38
34	100	5	0	0.32
35	100	5	0	0.34
36	100	5	0	0.38
37	100	0	5	0.45
38	100	0	5	0.50
39	100	0	5	0.55
40	100	0	10	0.45
41	100	0	10	0.50
42	100	0	10	0.55
43	100	0	15	0.45
44	100	0	15	0.50
45	100	0	15	0.55
46	100	0	20	0.45
47	100	0	20	0.50
48	100	0	20	0.55

5.3 Akustična emisija

Pokusi čupanja sidara provedena su tako da je na glavu sidra postavljena hidraulična preša za čupanje sidra, koja se oslanja na kraj cilindra injekcijske smjese tako da se spriječe pomaci injekcijske smjese na kontaktu hidraulične preše i sidra pri čupanju sidra. Vlačna sila, kojom se sidro poteže, prenosi se na cilindrični uzorak injekcijske smjese preko veza između sidra i injekcijske smjese. Vlačna sila i deformacije štapnog sidra mjere se digitalno.

Tijekom pokusa čupanja sidara mjerena je i akustična emisija izazvana čupanjem [3]. Akustičnom se emisijom, zvukom i digitalno mjeri broj vrhova dolaznih valova nastalih oslobađanjem energije pri nastanku pukotina u materijalu, tako što se na slobodan kraj sidra postavi senzor. Time se detektira svako popuštanje veza između

štapnog sidra i injekcijske smjese te pojava pukotina u injekcijskoj smjesi duž cijeloga štapnoga sidra.

U uzorku se, naime, zbog koncentracije naprezanja otvaraju pukotine, pri čemu se naglo oslobađa energija, a ona se kroz uzorak širi u obliku valova. Ovi valovi izazivaju akustičnu emisiju [31], [34]. Vrlo osjetljivi senzor, koji se sastoji od piezoelektričnoga kristala, transformira energiju vala u električni napon, a ovaj se preko pojačala prenosi u sustav za mjerenje broja impulsa akustične emisije. Mjeri se broj impulsa akustične emisije, odnosno vrhova dolaznih valova koji prelaze zadanu graničnu vrijednost električnog napona, pri čemu se postiže odgovarajuća osjetljivost mjerenja. Tek su iznad ove granične vrijednosti primljeni impulsi mjerodavni kao rezultati ispitivanja akustičnom emisijom.

Za razliku od drugih nerazornih metoda, akustična emisija ima prednost u tome što je izvor signala u samom materijalu, a ne izvan njega. Također je značajno što se većinom ostalih nerazornih metoda otkrivaju geometrijski diskontinuiteti, dok se akustičnom emisijom prate pomaci u materijalu. Glavna je prednost ove metode mogućnost da se cijeli uzorak ispituje tijekom jednokratnog opterećenja, bez postavljanja ikakvih uređaja za ispitivanje u sam uzorak. Pri tome je važno da se materijal ili konstrukcija opterećuje tako da se izazove emisija valova iz svih njezinih dijelova u kojima se mogu pojaviti defekti u obliku pomaka [27].

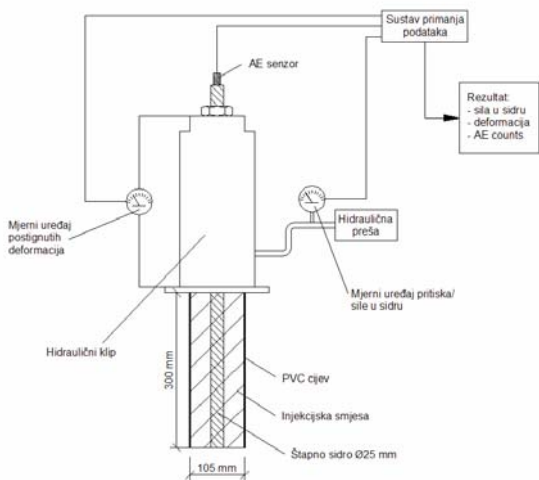
Mjerenje akustične emisije ima vrlo veliku mogućnost primjene pri raznim uvjetima opterećenja - od provjere rezultata zavarivanja, do ispitivanja integriteta cijelih aviona, svemirskih letjelica, nuklearnih reaktora, rudnika, mostova, zgrada, brana, cjevovoda i drugih postrojenja te ispitivanja integriteta raznih materijala [27]. Ovom se metodom dobiva trenutni uvid u ponašanje materijala pri opterećenju, a posebno u uvjetima koji upućuju na dosezanje čvrstoće materijala i pojavu sloma. Moguće je, naime, 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.

Mjerenje akustične emisije pri čupanju armaturnih šipki iz betona opisali su Vogel i Koepfel [35]. Na temelju ovoga rada i velike prednosti ove metode u odnosu na standardni pokus čupanja sidara, na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu počela su opsežna laboratorijska ispitivanja s mjerenjem akustične emisije. Dok se standardnim pokusom čupanja sidara ispitano sidro nakon pokusa više ne može upotrijebiti, mjerenjem akustične emisije moguće je dosegnuti silu u sidru neposredno prije sloma te isto sidro nakon ispitivanja može i dalje služiti za ojačanje stijenske mase.

Akustična je emisija u laboratorijskim pokusima iskorištena uz standardnu opremu za pokus čupanja sidara (slike 4. i 5.). Povezivanjem sustava za mjerenje broja impulsa sa sustavima za mjerenje sile čupanja i deformacija štapnog sidra istovremeno se registriraju sve tri veličine. Rezultati mjerenja akustične emisije prikazani su kao odnos sile čupanja i izmjenjenog broja impulsa.



Slika 4. Oprema za izvođenje pokusa čupanja u laboratoriju [3]



Slika 5. Shematski prikaz opreme za izvođenje pokusa čupanja u laboratoriju [3]

5.4 Rezultati laboratorijskih ispitivanja

Na slici 6. prikazani su rezultati ispitivanja sidra 12 iz tablice 1. s cementnom smjesom. Prvi dijagram daje tipični odnos sile čupanja i pomaka sidra iz pokusa čupanja sidra te odnos sile i omjera prirasta pomaka i prirasta sile. Zadnja zabilježena vrijednost sile odgovara nosivosti sidra, jer je pri sljedećem inkrementu sile sidro izgubilo integritet. Iz oblika ovih dviju krivulja vidi se da na temelju njih nije moguće predvidjeti nosivost sidra bez vođenja pokusa do samog pucanja sidra.

U drugom je dijagramu prikazan odnos sile čupanja i broja impulsa akustične emisije te odnos sile i omjera prirasta broja impulsa i prirasta sile. Ovdje se uočava drukčiji oblik krivulja u odnosu na krivulje iz prvog dijagrama, a posebno je uočljiv gotovo bilinearni oblik krivulje prirasta broja impulsa. U trećem je dijagramu prikazan odnos broja impulsa i pomaka sidra. Iz drugog se dijagrama jasno može vidjeti nagli porast broja impulsa neposredno prije dosezanja nosivosti sidra. Ovaj nagli porast broja impulsa ukazuje na mogućnost zaustavljanja pokusa čupanja sidra neposredno prije dosezanja sile sloma, pri čemu integritet sidra nije narušen te se ono može rabiti za ojačanje stijenske mase. Nagli porast broja impulsa pri kraju pokusa vidi se i na trećem dijagramu.

Svi rezultati ispitivanja obrađeni su tako da je za svaki pokus s mjerenjem broja impulsa akustične emisije određivana sila F_{AE} blizu sile sloma, pri kojoj naglo poraste broj impulsa. Ova je sila manja ili jednaka nosivosti sidra, koja se inače dobije iz pokusa čupanja sidra, a svakako je manja od sile sloma. Pri ovoj sili moguće je zaustaviti pokus.

U nastavku je predložen originalni analitički postupak za određivanje sile F_{AE} . Pri tome je nužno da postoji barem 6 zabilježenih vrijednosti sile čupanja F i broja impulsa akustične emisije C . Od 48 pokusa, ovaj je uvjet ispunjen u njih 47. Točke krivulje $\Delta C/\Delta F$ označe se indeksom i odnosno $(\Delta C/\Delta F)_i$. Tada se provjerava jesu li za $i = 6$ ispunjena sljedeća dva uvjeta:

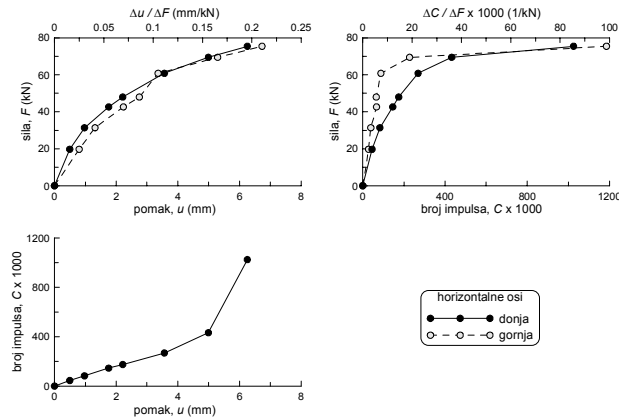
$$\frac{(DC/DF)_i}{(DC/DF)_{i-2}} \geq 3 \tag{1}$$

$$\frac{(DC/DF)_{i-1}}{(DC/DF)_{i-2}} \geq 2 \tag{2}$$

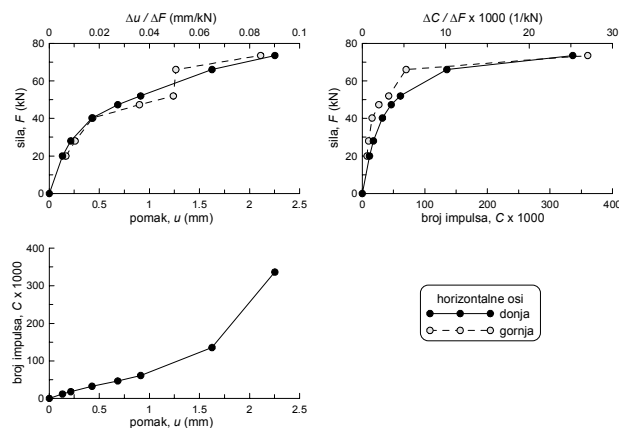
Ako su ova dva uvjeta ispunjena, tada je $F_{AE} = F_6$, a ako nije ispunjen barem jedan od dvaju uvjeta, uzima se $i = 7$ (ako postoji) i provjera se ponavlja. Ako je provjera dvaju uvjeta uspješna za $i = 7$, tada je $F_{AE} = F_7$, a ako provjera nije uspješna, uzima se $i = 8, 9 \dots$ do zadnje točke krivulje. Ako ni za zadnju točku krivulje nisu ispunjeni uvjeti (1) i (2), tada nije moguće odrediti silu F_{AE} .

Od 47 pokusa s najmanje šest točaka, sila F_{AE} određena je u zadnjoj točki krivulje za njih 27 (57%), za 13 je pokusa (28%) sila F_{AE} određena u točki koja nije bila zadnja, a za 7 pokusa (15%) nije bilo moguće odrediti silu F_{AE} . Ako se s F_n označi sila u zadnjoj točki krivulje, od ukupno 85% uspješnih određivanja sile F_{AE} , pokazalo se da je, prosječno, $F_{AE} = 0.948 F_n$, dakle sila F_{AE} vrlo je blizu zadnje izmjerenoj vrijednosti sile, odnosno nosivosti sidra, kako se određuje iz pokusa čupanja sidra.

Od sedam pokusa, za koje nije bilo moguće odrediti silu F_{AE} , na slici 7. prikazani su rezultati ispitivanja za jedno od ovih sedam sidara, odnosno za sidro 10 iz tablice 1. s cementnom smjesom. Iz dijagrama koji prikazuju broj impulsa akustične emisije pokazuje se da je ipak moguće odrediti nosivost sidra pri naglom porastu broja impulsa.



Slika 6. Rezultati ispitivanja za sidro 12 (cementna smjesa)



Slika 7. Rezultati ispitivanja za sidro 10 (cementna smjesa)

Na osnovi prikazanih rezultata, svakako se uočava prednost mjerenja akustične emisije u odnosu na standardni pokus čupanja sidara. Poželjno bi bilo u ovim pokusima, u laboratoriju ili na terenu, primjenjivati konstantne inkremente sile. Čak se i iz provedenih pokusa s uobičajenim brojem inkremenata sila, koji nisu bili jednaki, pokazalo mogućim odrediti nosivost ili silu vrlo blizu nosivosti štapnih sidara. Prikazan analitički postupak određivanja sile F_{AE} , koja je vrlo blizu, ili je jednaka zadnje mjerenoj vrijednosti sile prije sloma, daje utemeljenje za primjenu ove metode za *in situ* kontrolu kvalitete štapnih sidara. Pri tome bi se pokus čupanja sidra s mjerenjem akustične emisije zaustavio kada se odredi sila F_{AE} , a sidro bi ostalo upotrebljivo za ojačanje stijenske mase umjesto da se odbaci, kao što je to nužno nakon standardnog pokusa čupanja sidara. Valja naglasiti da su

prikazani rezultati dobiveni za 48 raznih injekcijskih smjesa, što pokazuje široki raspon primjene akustične emisije za kontrolu kvalitete sidara.

6 Zaključak

Štapna se sidra standardno rabe za ojačanje stijenske mase pri izvedbi zasjeka. Prema propisanim kontrolnim pokusima čupanja sidara, *in situ* se ispituje svega 5% sidara koja više nisu upotrebljiva za ojačanje stijenske mase, jer ih nakon pokusa čupanja treba odbaciti. U radu je prikazano laboratorijsko ispitivanje injektiranih štapnih sidara pokusom njihova čupanja, uz istovremenu primjenu nove metode mjerenja akustične emisije. U ovim je pokusima upotrijebljeno ukupno 48 raznih injekcijskih smjesa.

Rezultati ispitivanja pokazuju pouzdanost mjerenja akustične emisije pri čupanju sidara, koja se očituje u naglom porastu broja impulsa akustične emisije u blizini sile sloma uzorka, dok je još uvijek zadržan integritet injektiranoga štapnoga sidra. Predložen je originalni analitički postupak određivanja sile koja je blizu sile sloma, a pri kojoj je moguće pokus zaustaviti i istim sidrom dalje koristiti za ojačanje stijenske mase. Ovaj se je postupak pokazao da se od 47 pokusa s raznim injekcijskim smjesama, u 85% slučajeva može odrediti silu blizu sile sloma, pri kojoj pokus čupanja sidra treba zaustaviti. Velika je prednost mjerenja akustične emisije u odnosu na standardni pokus čupanja sidara, što se pri potonjem sidro čupa dok se ne slomi i dalje se više ne može rabiti. Mjerenje akustične emisije može se, dakle, preporučiti za *in situ* kontrolu kvalitete štapnih sidara nakon njihove ugradnje u stijensku masu. Široki raspon injekcijskih smjesa upotrijebljenih u prikazanom laboratorijskom ispitivanju ulijeva dodatnu sigurnost u pouzdanost mjerenja akustične emisije. Čupanjem ugrađenih sidara na terenu, uz mjerenje akustične emisije, trebalo bi provjeriti rezultate navedenih laboratorijskih ispitivanja i predloženi analitički postupak za određivanje sile pri kojoj pokus čupanja treba zaustaviti.

Osim navedene, bitne prednosti mjerenja akustične emisije i mogućnosti uporabe ove metode za kontrolu kvalitete *in situ* ugrađenih štapnih sidara, akustična je emisija, uz *in situ* mjerenja pomaka stijenske mase deformetrima i inklinometrima, dodatan doprinos kvaliteti aktivnoga geotehničkog projektiranja. Ovaj pristup projektiranju zasjeka u stijenskoj masi, ili drugih geotehničkih konstrukcija, omogućava da se intervenira u prvotni geotehnički projekt tako da se uvedu nove mjere osiguranja geotehničke konstrukcije na temelju realnih deformacijskih karakteristika stijenske mase i štapnih sidara te pouzdano određene nosivosti štapnih sidara. Time se pridonosi kvaliteti, sigurnosti i ekonomičnosti izvedene konstrukcije, a ujedno se stječu dodatne korisne spoznaje o ponašanju stijenske mase i štapnih sidara.

LITERATURA

- [1] Arbanas, Ž.: *Utjecaj štapnih sidara na ponašanje stijenske mase pri izvedbi visokih zasjeka*, magistarski rad, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2002.
- [2] Arbanas, Ž.: *Izvedba građevne jame Zagrad u Rijeci*, Građevinar 55 (2003.) 10, 591.-597.
- [3] Arbanas, Ž.: *Predviđanje ponašanja ojačane stijenske mase analizama rezultata mjerenja izvedenih građevina*, doktorska disertacija, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2004.
- [4] Arbanas, Ž.; Jardas, B.; Kovačević, M.S.: *Reinforcement Systems in Construction of Open Pit Zagrad in Rijeka, Croatia*, Proc. 13th European Conf. on Soil Mech. and Geotech. Eng., Geotechnical Problems with Man-made and Man Influenced Grounds, Prague, Czech Republic, (Eds. I. Vaniček, R. Barvinek, J. Boháč, J. Jettmar, D. Jirasko and J. Salak), August 25-28 (2003.), 2, 23.-28.
- [5] Arbanas, Ž.; Jardas, B.; Kovačević, M.S.: *Excavation of Open Pit Zagrad in Rijeka, Croatia-A case history*, Proc. 5th Int. Conf. on Case Histories in Geotech. Eng., New York, NY, USA, April 13-17 (2004.).
- [6] Bawden, W.F.; Lausch, P.: *The Use of SMART Cable Bolt Instruments Towards the Design and Design Optimization of Underground Support Systems*, Annual Meeting of the Canadian Geotechnical Society (CGS), www.mdt.ca, (2000.).
- [7] Bawden, W.F.; Denison, S.; Lausch, P.: *Lessons in Control of Mine Costs from Cable Bolt Support*, Proc. of 4th North American Rock Mechanics Symposium (NARMS), Pacific Rocks, Seattle, Washington, www.mdt.ca, (2000.).
- [8] Bieniawski, Z.T.: *The Geomechanics Classification in Rock Engineering Applications*, Proc. 4th Congr. Int. Soc. Rock Mech., Montreux, 2 (1979.), 41.-48.
- [9] Duan, F.: *Numerical Modeling of Cable Bolt Support System*, Ph. D. Thesis, Dept. of Mining Eng., University of Utah, USA, 1991.
- [10] Farmer, I.W.: *Stress Distribution along a Resin Grouted Rock Anchor*, Int. J. Rock Mech. & Mining Sci. & Geomechanics Abstracts, 12 (1975.), 347.-351.
- [11] Gilkey, H.J.; Chamberlin, S.J.; Beal, R.W.: *Bond between Concrete and Steel*, Reproduction in Engineering Report No. 26, Iowa Eng. Exp. Station, Iowa State Coll. Ames, 1956., 25.-147.
- [12] Hanna, T.H.: *Foundations in Tension, Ground Anchors*, Trans Tech Publications, Series on Rock and Soil Mechanics, 6, 1st Edn., Clausthal-Zellerfeld, 1982.
- [13] Hobst, L.; Zajic, L.: *Anchoring in Rock, Developments in Geotechnical Engineering*, 13, Amsterdam, Elsevier Scientific Publishing Co., 1977.
- [14] Hoek, E.: *Rock Engineering, A Course Notes*, <http://www.rocsience.com>, 2000.
- [15] Hoek, E.; Bray, J.W.: *Rock Slope Engineering*, 2nd Edn., The Institute of Mining and Metallurgy, London, 1977.
- [16] Hoek, E.; Brown, E.T.: *Practical Estimates of Rock Strength*, Int. J. Rock Mech. & Mining Sci. & Geomechanics Abstracts, 34 (1997.) 8, 1165.-1187.
- [17] Hoek, E.; Brown, E.T.: *Underground Excavations in Rock*, Institution of Mining and Metallurgy, London, 1980.
- [18] Hutchinson, D.J.; Diederichs, M.S.: *Cablebolting in Underground Mines*, BiTech Publishers Ltd., Canada, 1996.
- [19] ISRM, Commission on Standardization of Laboratory and Field Test: *ISRM Suggested Methods for Determining the Uniaxial Compressive Strength and Deformability of Rock Materials*, Int. Jour. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 16 (1979.) 2, 135.-144.
- [20] ISRM, Commission on Standardization of Laboratory and Field Test: *ISRM Suggested Methods for Rockbolt Testing*, Oxfordom, Pergamon Press, 1981.
- [21] Kilic, A.; Yasar, E.; Celik, A.G.: *Effect of Grout Properties on the Pull-out Load Capacity of Fully Grouted Rock Bolt*, Tunnelling and Underground Space Technology, 17 (2002.), 355.-362.
- [22] Kovačević, M.S. *The Observational Method and the Use of Geotechnical Measurements*, Geotechnical problems with man-made and man influenced grounds, Proc. 13th Europ. Conf. on Soil Mech. and Geotech. Eng., Prague, Czech Republic, August 25-28, (2003.) 3, 575.-582.
- [23] Kovačević, M.-S.; Skazlić, Ž.; Szavits-Nossan, V.: *Case Histories of Very Hard Fissured Soils Stiffness Determination*, Geotechnology in Harmony with the Global Environment, Adachi, T. (ed.), Osaka, Millpress Rotterdam, (2005.), 703.-706.
- [24] Littlejohn, G.S.; Bruce, D.A.: *Rock Anchors*, State of the Art, Geopublications Ltd., Brentwood, (1977.).
- [25] Martin, L.; Milne, D.; Ruest, M.; Pakalnis, R.: *Evaluation of Instrumented Cable Bolts in Cement Grout to Determine Physical and Numerical Modeling Properties*, Report of Investigations 9662, US Department of Health and Human Services, NIOSH, Publication No. 2004-140, www.cdc.gov/niosh, (2004.).
- [26] Mossavi, M.; Bawden, W.F.; Hyett, A.J.: *Mechanism of Bond failure and Load Distribution along Fully Grouted Rock Bolts*, Mining Technology, Transaction of the Institute of Mining and Metallurgy, 111 (2002.) 1, 1.-12.
- [27] Pollock, A. A.: *Acoustic Emission Inspection*, Metals Handbook, Ninth Ed., ASM International, 17 (1989.), 278.-294.
- [28] Reichert, R.D.: *A Laboratory and Field Investigations of the Major Factors Influencing Bond Capacity of Grouted Cable Bolts*, M. Sc. Thesis, Queen's University, Kingston, Ontario, Canada, 1991.
- [29] Ruest, M.: *Back Analysis of Instrumented Hanging Wall Cable Bolt Reinforcement at Complexe Bousquet*, M. S. Thesis, Queen's University, Kingston, Ontario, Canada, 1998.
- [30] Serafim, J.L.; Pereira, J.P.: *Consideration of the Geomechanical Classification of Bieniawski*, Proc. Int. Symp. on Engineering Geology and Underground Construction, Lisbon, 1 (1983.), 2, 33.-42.
- [31] Seto, M.; Utagawa, M.; Katsuyama, K.: *Some Fundamental Studies on the AE Method and its Application to In-Situ Stress Measurements in Japan*, Proc. 5th Int. Workshop on the Application of Geophysics in Rock Engineering, Toronto, Canada, (2002.), 67.-71.
- [32] Stillborg, B.: *Professional Users Handbook for Rock Bolting*, Trans Tech Publications, Series on Rock and Soil Mechanics, 18, 2nd Edn., Clausthal-Zellerfeld, 1994.
- [33] Stipanović, I.; Kovačević, M.S.; Bjegović, D.: *Improvement of Grout Properties by Different Admixtures*, Workshop of COST on NTD Assessment and New Systems in Prestressed Concrete Structures, Institute for Technology – NRI, Random, (2005.), 117.-127.
- [34] Villaescusa, E.; Li, J.; Seto, M.: *Stress Measurements from Oriented Core in Australia*, Proc. 5th Int. Workshop on the Application of Geophysics in Rock Engineering, Toronto, Canada, (2002.), 72.-77.
- [35] Vogel, T.; Koepfel, S.: *Possibilities and Limitations of Acoustic Emission Analysis for Reinforced Concrete*, Int. Symp. Non-Destr. Testing in Civ. Eng., www.ndt.net/article/ndtce03/papers/v108/v108.htm, (2003.).
- [36] Windsor, C.R.; Thompson, A.G.: *Reinforcement Design for Jointed Rock Masses*, Proceeding 33rd US Symp. on Rock Mech., Santa Fe, Rock Mechanics, (Tillerson and Wawersik Eds.) Rotterdam, A. A. Balkema, (1992.), 521.-530.