

Neka ograničenja sustava kategorizacije stijenskih masa II



Nakon uvoda u prošlom djelu *Minerala*, ovaj dio rada pobliže opisuje glavne značajke pojedinih kategorizacijskih sustava i metoda podzemnih iskopa. Naslovnom ilustracijom prikazan je jednostavan način određivanja kategorije stijenske mase na osnovi primijenjene dubine bušenja minskih bušotina. Na snimci je prikazano čelo tunela gdje je primijenjena dubina minskih bušotina iznosila malo iznad 5 metara. Napredak je u tom slučaju iznosio nešto manje od 5 metara. Broj ciklusa miniranja bez potrebe za stabilizacijom podzemnog iskopa moguće je izbrojati na osnovu otiska konturnog miniranja koji proizlazi iz ograničenja cikličke tehnologije iskopa

Branimir Janković, dipl. ing. rud.
Doc. dr. sc. Snježana Mihalić, dipl. ing. geol.
Prof. dr. sc. Lidija Frgić, dipl. ing. građ.

2.1. Geomehanički (RMR) sustav

Bieniawski je 1973. i 1974. godine objavio detalje svoje kategorizacije stijena nazvane Geomehanička klasifikacija (Geomechanics Classification) ili Rock Mass Rating (RMR) sustav (Bieniawski 1973, 1974). Do značajnih promjena došlo je kasnije tokom godina s

revizijama u 1974., 1975., 1976. i 1989.; ova prezentacija se temelji na verziji sustava iz 1989. godine.

Sljedećih šest koeficijenata koristi se za kategorizaciju stijena u RMR sustavu:

1. Jednoosna tlačna čvrstoća uzoraka stijene (monolita);
2. RQD vrijednost;
3. Razmak diskontinuiteta;
4. Stanje diskontinuiteta;
5. Utjecaj podzemne vode;
6. Orijentacija diskontinuiteta.

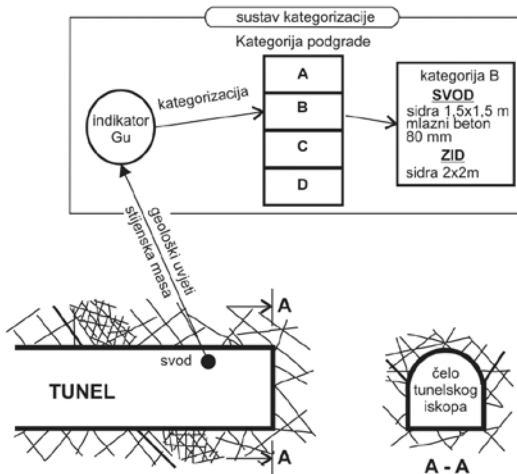
Suma ocjena svakog od ovih

koeficijenata daje vrijednosti RMR. Ocjena je rezultat nadzirane klasifikacije svakog koeficijenta (Stille, Palmstrom, 2003). Izračunatu RMR vrijednost zatim koristimo kako bi odredili u koju od pet unaprijed definiranih kategorija stijena stijenska masa pripada, (idući od "vrlo dobre" stijene prema "vrlo lošoj" stijeni). Prema iznesenom, sustav možemo opisati kao nadziranu kategorizaciju stijenske mase. Svi parametri su mjerivi na terenu, a neke od njih moguće je odrediti

i determinacijom jezgri istražnih bušotina.

S praktičnog stajališta, ocjena je također povezana s dužinom minske bušotine jednog ciklusa miniranja ili s duljinom tek iskopane dionice tunelskog otvora (napretka). Na slikama 1 i 2 dani su primjeri uobičajenih situacija u kojima se kategorizacija koristi u mehanici stijena/stijenskom inženjstvu.

Bieniawski je objavio set smjernica (Bieniawski, 1989) za procje-



■ Slika 1. Primjer razvrstavanja u kategorije podgrade

nu vremena stabilnosti nepodgrađenog podzemnog otvora (Laufer, 1958) i za izbor podgrade ili armiranja stijena u tunelima, temeljenog na RMR vrijednosti. Drugi autori su modificirali sustav i dane smjernice za projekte namijenjene posebno rudarstvu i određivanju stabilnosti kosina. Međutim, Bieniawski je snažno naglasio da je potrebno mnogo odvažnosti u primjeni sustava kategorizacije stijena u projektiranju podgrade ili armiranja stijena (Stille, Palmstrom, 2003).

RMR vrijednost je također korištena za procjenu svojstava stijenjskih masa. U radovima Bieniawskog (Bieniawski, 1984, 1989) i Serafima i Pereira (Serafim, Pereira, 1983) dane su relacije između RMR vrijednosti i modula deformabilnosti stijenske mase. RMR vrijednost je također korištena kao jedan od načina za procjenu koeficijentata m i s u Hoek-Brownovom kriteriju loma (Wood, 1991; Hoek, 1994; Hoek i Brown, 1998) slično kao što je i GSI vrijednost korištena za ocjenu čvrstoće stijena. Međutim, to daje jedino empirijski odnos i nema nikakve veze s klasifikacijom stijena u stijenskom inženjerstvu u njegovom pravom smislu (Stille, Palmstrom, 2003).

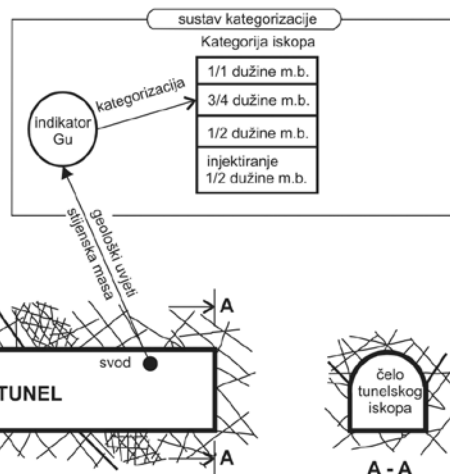
Stille i Palmstrom, prezentirajući svoja iskustva (Stille, Palmstrom, 2003) u korištenju ovog sustava tvrde da dobro kategorizira stijensku masu po kvaliteti, budući da je razmjerno dobro definiran te je ocjenu za svaki koeficijent mogu-

će procijeniti s prihvatljivom točnošću. U istom radu također tvrde da razmjerno mala baza podataka čini sustav manje prihvatljivim za korištenje kao empirijsku metodu za izbor podgrade ili armiranja stijene.

2.2 Geomehanički (MRMR) sustav

Negdje otprilike u isto vrijeme kada su objavljene prve "konačne" verzije geomehaničkog klasifikacijskog sustava i Q sustava, kao odgovor za potrebom racionalizacije poslovanja i poboljšanja komunikacije zaposlenika različitih struka u rudarstvu, razvijen je i sustav za kategorizaciju stijenske mase za potrebe projektiranja u rudarstvu.

Točnije, to se dogodilo 1974. godine kad je kategorizacijski sustav poznat pod nazivom Mining Rock Mass Rating (MRMR) predstavljen kao konačna faza razvoja CSIR – Council for Scientific and Industrial Research – geomehaničkog sustava kategorizacije (Bieniawski, 1973; Laubscher, 1975). Razvijen je na konceptu in situ ocjenjivanja kvalitete stijenske mase i korekcije ocjenjivanja, obzirom na složene uvjete eksploatacije mineralnih sirovina za koje su vezani koeficijenti i ostale veličine koje daju konačnu ocjenu. Otada, bilo je izmjena i usavršavanja (Laubscher 1977; 1984), a sustav je uspješno korišten u rudarskim projektima u Kanadi, Čileu, na Filipinima, Šri Lanci, Južnoj Africi,



■ Slika 2. Primjer razvrstavanja u kategorije iskopa

SAD-u i Zimbabveu (Laubscher, 1990).

Ukupnu ocjenu čini zbir triju veličina, koja se zatim korigira prema uvjetima pripreme i eksploatacije ležišta, te takva daje konačnu (MRMR) ocjenu i prema tome svrstava stijensku masu u jednu od pet kategorija i dvije podkategorije. Te veličine su:

1. Jednoosna tlačna čvrstoća uzoraka stijene (IRS – Intact Rock Strength);
2. Razmak diskontinuiteta i pukotina;
3. Stanje diskontinuiteta.

Korekcije ovise o raznim uvjetima kao što su: alteracija diskontinuiteta, orijentacija pukotina, naprezanja u stijenskoj masi uzrokovana metodom eksploatacije i negativne pojave koje su posljedice miniranja.

Na temelju kategorizacije daje se prijedlog tehnika stabilizacije podzemnih prostorija i metoda eksploatacije. Također, na istoj osnovi, na površinskim kopovima daje se prijedlog nagiba radnih kosina.

Laubscher u svom radu iz 1990. godine navodi da se od uvođenja ovog sustava u (tada) 12 rudnika širom svijeta znatno popravila situacija u komunikaciji između raznih poslovnih jedinica, te da je sustav prihvaćen s olakšanjem od osoblja zaduženog za istraživanje i geologiju do onih zaposlenih u proizvodnji (Laubscher, 1990).

Osvrćući se na primjenu sustava u izboru podgrade, u istom

radu Laubscher naglašava potrebu interaktivnog pristupa u instalaciji podgrade ili armiranja stijena između zaposlenika zaduženih za nadzor, projektiranje, ugradnju i logistiku. Također, on naglašava važnost poznavanja principa podgrađivanja ili armiranja stijena i posljedica neadekvatne ugradnje kojima mora vladati posada za stabilizaciju podzemnih iskopa.

2.3 Q sustav

Na osnovu razmatranja velikog broja opažanjaⁱⁱ u tunelskim iskopima, Barton i drugi (Barton et al., 1974) s norveškog geotehničkog Instituta (NGI) predložili su tunnelski indeks kvalitete (Tunneling Quality Index – Q) kao kategorizacijski sustav za određivanje podgrade ili armiranja stijene u tunnelskom iskopu. To je kvantitativan kategorizacijski sustav temeljen na numeričkoj ocjeni kvalitete stijenske mase. Kasnije, Barton i drugi su objavili nekoliko radova u vezi s Q sustavom ciljajući na proširenje njegove primjene. Neki od njih koriste dodatne prilagodbe Q sustava.

Numerička vrijednost indeksa Q je određena kroz šest koeficijentata i sljedećom jednadžbom:

$$Q = RQD/J_n \times J_r/J_a \times J_w/SRF \quad (1)$$

gdje

1. RQD je ocjena kvalitete jezgre;
2. J_n je broj familija diskontinuiteta;
3. J_r je hrapavost najnepovoljnijih diskontinuiteta;
4. J_a je stanje najnepovoljnijih diskontinuiteta;
5. J_w je dotok vode;
6. SRF je indeks uvjeta naprezanja.

Objašnjavajući sustav i upotrebu koeficijentata za određivanje vrijednosti Q, Barton i drugi daju sljedeće objašnjenje (Barton et al., 1974):

- Prvi kvocijent (RQD/ J_n) u grubo predstavlja veličine blokova u stijenskoj masi.

- Drugi kvocijent (J_r/J_a) reprezentira čvrstoću smicanja između blokova.

- Treći kvocijent (J_w/SRF) uvjetno rečeno predstavlja aktivno

naprezanje.

Ovaj treći kvocijent je najsloženiji empirijski čimbenik i kritiziran je u nekoliko radova i na nekoliko radionica. Njemu treba posvetiti posebnu pažnju, jer on predstavlja četiri grupe svojstava i karakteristika stijenske mase: utjecaj naprezanja u krtoj raspucanoj stijenskoj masi i monolitu, utjecaj naprezanja u deformabilnoj (plastičnoj) stijenskoj masi, oslabljene zone i bujajuće stijene (Stille, Palmstrom, 2003).

Q sustav možemo koristiti kao nadziranu kategorizaciju stijenske mase. Definirano je devet različitih kategorija kvalitete stijenske mase, u rasponu od "iznimno loše" do "iznimno dobre".

Q sustav se obično koristi kao empirijska metoda za projektiranje podgrade ili armiranja stijene tunelskog otvora. Zajedno s omjerom raspona ili visine otvora i podgradnog koeficijenta iskopa (excavation support ratio) (ESR), Q vrijednost indicira preferiranu podgradu ili armiranje stijene. Točnost određivanja podgrade ili armiranja stijene vrlo je teško ocijeniti. Iskustva iznesena u brojnim radovima i izvještajima u korištenju sustava su takva da, posebno u lošijoj kategoriji stijene ($Q < 1$) sustav daje neodgovarajuću podgradu. Prirodna svojstva takve stijenske mase koja su neophodna za određivanje mjera za stabilizaciju iskopa (npr. bujanje, konvergencija ili istakanje tla), nisu eksplicitno razmotrena u Q sustavu. Nisu razmotrena ni takva pitanja kao što je vrijeme potrebno za postavljanje podgrade i potreba za probojnom podgradom. Na mjestima rasjednih i oslabljenih zona, podgradu treba provjeriti ili je projektirati drugim inženjerskim metodama (Stille, Palmstrom, 2003).

U raspucanoj stijeni, orijentacija pukotina je bitan čimbenik. U takvim slučajevima, vrlo je važno slijediti smjernicu koju su prezentirali Barton i drugi (Barton et al., 1974) da koeficijenti J_r i J_a trebaju biti u korelaciji s plohom diskontinuiteta po kojoj će najvjerojatnije

doći do klizanja bloka. Sa stajališta mehanike stijena, očito je da je i takav jednostavan slučaj opterećenja kao što je nestabilnost potencijalno nevezanog bloka daleko teže kvantificirati nego što je to moguće pomoću jednog broja – Q vrijednosti (Stille, Palmstrom, 2003).

Naravno, Q sustavom se može koristiti kao indikatorom za izbor podgrade ili armiranja stijene tunelskog iskopa ili drugih tipova kategorizacije u mehanici stijena/stijenskom inženjerstvu. Međutim, uobičajeno je Q vrijednost koristiti kao jedini indikator određivanja stijenske kategorije koja je u pitanju. U brojnim radovima ističe se snažno protivljenje takvoj primjeni jednog inženjerskog sustava kategorizacije, budući da je takav pristup previše šablonski i ne dopušta da se drugi vidovi opažanja uzmu u obzir.

Grimstad i Barton su 1993. predstavili jednadžbu za upotrebu Q vrijednosti u procjeni modula deformabilnosti stijenske mase (za vrijednost $Q > 1$) (Grimstad, Barton 1993). Q vrijednost se također koristi kao jedan od načina procjene m i s koeficijenata u Hoek-Brownovom kriteriju loma (Hoek, 1983; Hoek i Brown, 1988).

2.4 RMi sustav

Indeks stijenske mase (Rock Mass index), RMi, je volumetrički koeficijent koji indicira približnu jednoosnu tlačnu čvrstoću stijenske mase. Sustav je razvio Palmström 1995. i kasnije je unapređivan i predstavljen u nekoliko drugih radova. On se koristi jednoosnom tlačnom čvrstoćom intaktne

stijene (σ_c) i efektom smanjenja čvrstoće uzrokovano diskontinuitetima koji penetriraju u stijenu izraženom kao:

$$RMi = \sigma_c \times JP \text{ za raspucanu stijensku masu} \quad (2)$$

$$RMi = \sigma_c \times f_\sigma \text{ za kompetentne masivne stijene s veličinama bloka većima od približno } 5 \text{ m}^3 \text{ (gdj je } f_\sigma < JP); \quad (3)$$

Koeficijent diskontinuiteta (JP) zbog empirijskih je razloga povezan sa koeficijentom stanja pukotina, J_C i volumena bloka, V_b . Koeficijent stanja, J_C , može biti procijenjen pomoću:

- hrapavosti diskontinuiteta, J_R ;
- alteracije diskontinuiteta, J_A ; i
- veličine diskontinuiteta, J_L .

Koeficijent masivnosti, f_σ , predstavlja efekt smanjenja jednoosne tlačne čvrstoće (koji za uzorke intaktne stijene ili monolita ima vrijednost od približno 0,5).

RMi sustav ima neka obilježja slična onima Q sustava. Tako su koeficijenti J_R i J_A skoro isti kao J_r i J_a u Q sustavu. Povezanost različitih ulaznih koeficijenata korištenih u RMi sustavu prikazana je na slici 3.

Različiti ulazni koeficijenti mogu biti određeni uobičajenim mjerenjima i kartiranjem, te empirijskim izrazima Palmströma. Primjena sustava zahtijeva više računanja nego što je to slučaj s RMR i Q sustavom, ali mogu se koristiti tablični kalkulatori iz kojih se RMi vrijednosti mogu očitati direktno.

Na osnovu karakterizacije stijenske mase primjenom RMi kategorizacije kombinirane s geometrijskim značajkama podzemnog otvora i geomehaničkim svojstvima stijena (kao što su naprezanja),

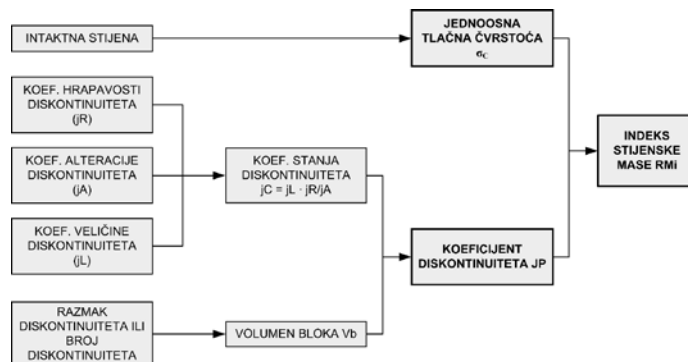
različiti problemi u stijenskom inženjerstvu, kao, na primjer, izbor odgovarajuće podgrade ili armiranja stijenske mase, moguće je procijeniti upotrebom dijagrama za izbor podgrade ili armiranja stijenske mase (Palmström, 1996). Dijagrami su sačinjeni na osnovi iskustava na više od 25 različitih projekata i radilišta kao i na osobnom iskustvu Palmströma u raznim podzemnim projektima u kompetentnim (čvrstim) stijinama.

RMi vrijednost može biti upotrijebljena kao input u druge metode stijenskog inženjerstva, kao, na primjer, numeričko modeliranje, Hoek-Brownov kriterij loma stijenske mase, te za procjenu modula deformabilnosti stijenske mase (Palmström i Singh, 2001).

RMi sustav možemo okarakterizirati kao tipičnu empirijsku metodu projektiranja i on nije klasifikacija u pravom smislu. Međutim, Palmström je predvidio pet različitih kategorija čvrstoće stijenske mase, od vrlo male, do vrlo visoke. Stoga, RMi sustav možemo koristiti kao nadziranu kategorizaciju za čvrstoću stijenske mase.

Ovim sustavom se najbolje koristiti u masivnoj i raspucanoj stijenskoj masi gdje diskontinuiteti u različitim familijama imaju slična svojstva. Njime se također može koristiti i kao prvom provjerenom za izbor podgrade ili armiranja stijenske mase u rasjednim i slabim zonama, ali, u tom pogledu treba pripaziti na njegova ograničenja koja je istaknuo Palmström (Palmström, 1995). U posebnim geomehaničkim uvjetima kao što su bujanje, konvergencija, pojave slabog tla i oslabljenih zona (rasjedne zone, itd..) podgradu ili armiranje stijene treba projektirati (izabrati) posebno za svaki pojedini slučaj. Druge značajke koje treba neovisno razmotriti su vezane za specifične projektne zahtjeve kao što su trajnost i sigurnost.

Kao i sve druge empirijske metode projektiranja, nije moguće ocijeniti točnost sustava. Koeficijent sigurnosti ili vjerojatnost sloma za dani skup indikatora se ne može izračunati (Stille, Palmstrom, 2003).



■ Ulazni koeficijenti u RMi sustav (Palmström, 1996)

2.5 GSI sustav

Geološki indeks čvrstoće (geological strength index), GSI, predstavili su Hoek 1994. i Hoek i dr. 1998. (Hoek, 1994; Hoek et al., 1998) davši sustav za procjenu smanjenja čvrstoće stijenske mase za različite geološke uvjete rekonstruirane na terenu. Karakterizacija stijenske mase je jasna i temeljena na vizualnom dojmu strukture stijenske mase, u smislu blokovitosti i stanju površina diskontinuiteta indiciranom hrapavošću diskontinuiteta i njihovom alteracijom. Kombinacija ovih dvaju parametara daje praktičnu osnovu za opis širokog raspona tipova stijenske mase. Zgodno je primijetiti da nema inputa za čvrstoću stijenskog materijala u GSI sustav.

Vizualna determinacija GSI koeficijentata predstavlja povratak u kvalitativne opise značajki stijena, umjesto rastućeg broja kvantitativnih ulaznih podataka u RMR, Q i RMI kategorizacijama. GSI se pokazao uglavnom koristan za slabije stijene s $RMR < 20$ (Stille, Palmstrom, 2003).

Kako se GSI koristi za procjenjivanje ulaznih koeficijentata (čvrstoće), on je samo empirijski izraz i nema ništa s inženjerskom klasifikacijom stijena (Stille, Palmstrom, 2003).

2.6 NATM

Novu austrijsku tunelsku metodu razvili su Rabcewicz 1964./1965. i Pacher 1975. (Rabcewicz 1964/1965; Pacher 1975). U praksi, NATM uključuje cijeli niz aspekata

tunelskog inženjerstva u stijenjskoj masi, od istraživanja tijekom projektiranja, inženjeringa i ugovaranja, do gradnje i monitoringa (Brown, 1981). Važno je primijetiti da je NATM razvijena za gradnju tunela u slabom ili bujajućem zemljanom materijalu. NATM je uspješno primijenjena u velikom broju tunelskih iskopa u mnogim dijelovima svijeta, od kojih su brojni izvedeni u lošim stijenama i teškim geomehaničkim uvjetima. U usporedbi s tradicionalnim izvođenjem tunelskih iskopa postignuta su znatna smanjenja troškova, kao i kraće vrijeme iskopa/gradnje. Međutim, primjena NATM nije prošla bez dosta neugodnih odvala i nekoliko potpunih urušavanja podzemnih iskopa.

U austrijskoj praksi izvođenja tunelskih iskopa, stijena (tlo) je opisana bihevioristički i kategorija joj je dodijeljena na terenu, prema terenskim opažanjima. Način iskopa i podgrađivanja ili armiranja stijenske mase moguće je odrediti na temelju te kategorizacije. Koršten kvalitativni opis stijene (tla) je potom koreliran, dosta nedosljedno, s tehnikama iskopa i s principima i trajnošću nepodgrađenih otvora u standardnim uvjetima podgrađivanja. Zato NATM nije inženjerski kategorizacijski sustav, već građevinska strategija (na Njemačkom "bauweise") koja sadrži nekoliko metoda za procjenjivanje količine podgradnih elemenata i tipova podgradnih sklopova, kao i moguća vremena stabilnosti za pojedine raspone obzirom na

nađene uvjete, moguće inženjerske postupke itd... (Jodl, 1995).

Na osnovi prikupljenih iskustava tijekom gotovo polustoljetne primjene NATM metode 2001. godine izdane su austrijske smjernice za geomehaničko planiranje podzemnih radova (Austrian Code, 2001), koje se mogu sažeti u nekoliko koraka:

- Prvi korak u karakterizaciji stijenske mase je određivanje tipova stijenske mase definirane litologijom, laboratorijskim ispitivanjima i podacima terenskih opažanja. Prema tome, potrebno je dodijeliti opseg karakteristika svakom tipu stijenske mase.

- Drugi korak je odrediti očekivane modele ponašanja stijene u neposrednoj blizini podzemnog otvora. Posljednje se izvodi kombinacijom prethodno određenih tipova stijenske mase s projektnim faktorima, kao što su: stanja naprezanja, orijentacija diskontinuiteta u odnosu na uzdužnu os iskopa, utjecaj podzemne vode kao i oblik i veličina podzemnog iskopa. Nadalje, potrebno je prepoznati potencijalne modele urušavanja kao što su gravitacijski uslovljeno klizanje blokova i/ili smično popuštanje u stijenskoj masi, te iz toga procijeniti veličinu rezultatnog pomaka na obodu podzemnog otvora. Pažljivo istraživanje mogućih modela ponašanja stijenske mase od ključne je važnosti u ovoj fazi, budući da omogućuje izbor efikasne metode za procjenu potrebne podgrade ili armiranja stijene.

Tijekom iskopa/gradnje, praćenjem i promatranjem prikupljaju se dodatne informacije/podaci o nađenom stanju stijenske mase i koriste se za verifikaciju pretpostavki postavljenih tijekom planiranja. U ovoj fazi, ponašanje sustava (stijena-iskop), određuje se na osnovi analiza interakcije stijenske mase i podgrade ili armature stijenske mase. Uočeno ponašanje sustava zatim se uspoređuje sa projektnim zahtjevima.

¹ Pojam nenadzirana klasifikacija odnosi se na proces definiranja klasa objekata. To se ponekad naziva i klaster analiza ili analiza klastera. To znači da pred sobom imamo skup objekata i cilj nam je formulirati klasnu strukturu. U slučaju nenadzirane klasifikacije moramo odlučiti koliko klasa želimo koristiti, te zatim povezati objekte iz skupa sa odgovarajućim klasama. Mnogi današnji sustavi klasifikacije su primjer takve klaster analize.

U nadziranoj klasifikaciji, klasna struktura poznata je a priori, a principi raspodjele u klase prethodno su formulirani dopuštajući nam raspodjelu objekata u odgovarajuće klase. To je još poznato i kao nadzirano prepoznavanje struktura (uzoraka). Poznati primjeri ovakvih klasifikacija između ostalih uključuju ISRM – International Society for Rock Mechanics klasifikaciju čvrstoće stijena, ili geotehničku klasifikaciju tla.

² U prvoj verziji sustava (1974) u oko 200 tunela, 1993. broj recenziranih opažanja popeo se na 1000 (Grimstad, Barton, 1993). **M**

PONOSNI

EURO BAGER

Velikogranička 2
10415 Novo Cice
tel: 01/6228 040
fax: 01/6228 048
www.eurobager.com

CASE
CONSTRUCTION

GENERALNI ZASTUPNIK ZA REPUBLIKU HRVATSKU