

A Geológiai Szilárdsági Index (GSI) pontos meghatározásnak lehetősége és alkalmazása a Bábaapáti radioaktív hulladéktároló építésénél

Deák Ferenc

Kőmérő Kft. deakferenc@komero.hu

Vásárhelyi Balázs

PTE, Pollack M. Műszaki és Inf. Kar, Szilárdságtani és Tartószerkezeti Tsz. vasarhelyib@gmail.com

ÖSSZEFOGLALÁS: Napjainkban a kőzetkörnyezetben való mélyépítési tervezésénél (ún. alagutak, bányák, felszín alatti tárolók, stb.), mindinkább törekednek a kvantitatív módon történő tervezésre. A bemenő kőzetfizikai paramétereket sok esetben ma már jól tesztelt empirikus módszerekkel határozzák meg, ahol a kőzettest értékét valamelyik elterjedt kőzettest-osztályozás alapján határozzák meg. Jelen cikk célja bemutatni a ma már igen elterjedt, széles körben használt Geológiai Szilárdsági Index (GSI) pontos meghatározásának lehetőségét. Jelenleg a Bábaapáti Nemzeti Radioaktív Hulladék-tároló (építető az RHK Kft.) tervezése GSI alapon történik, így elsődlegesen fontos, hogy ez az érték lehetőleg objektíven, minél nagyobb pontossággal legyen meghatározva.

Kulcsszavak: GSI, kőzetmechanika, Bábaapáti

1 BEVEZETÉS

A Geológiai Szilárdsági Indexet (GSI) Hoek és szerzőtársai vezették be közel két évtizede, és használhatósága folytán az egyik legelterjedtebb kőzettest minősítési érték lett a kőzetmechanikában, ill. a mérnökgeológiában. Előnye, hogy a klasszikus kőzettest osztályozásokkal szemben ennek ismeretében lehetőség van a különböző kőzetmechanikai alapadatok meghatározására is különböző minőségű kőzettestek esetén. A GSI alkalmazásának lehetőségét Vásárhelyi (2001) vezette be Magyarországon. A közelmúltban összefoglaló cikk jelent meg ezen érték előnyeiről és határyairól, valamint hazai átmeneti kőzeteken való alkalmazhatóságáról Görög et al. (2010) cikkében.

A GSI érték meghatározása a kőzet tagoltsági viszonyaitól, valamint a tagolófelületek állapotától függ. Ezt mutatja a ma már általánosságban használt GSI táblázat (1. ábra), ahol a mátrix oszlopában a kőzettest tagoltsági viszonyai szerepelnek, azaz, hogy milyen sűrűséggel vannak a tagoló felületek a kőzettestben. A tagoló felület állapotától függ a mátrix sora. A GSI értéke ezek alapján 0 és 100 között változhat: 0 esetén kohézió nélküli – azaz szemcsés – talajt kapunk, ahol az elmélet nem használható. GSI = 100 esetén nincs tagoló felület, tehát a kőzettest és a kőzettömb megegyeznek. Az osztályozásban sem a talajvizet, sem a helyszíni feszültségviszonyokat nem veszik figyelembe, mivel azok külön bemenő adatként szerepelnek a számítási modellekben. A GSI érték meghatározását Hoek és szerzőtársai folyamatosan aktualizálták a különböző helyeken megvalósulásra kerülő projektek tapasztalatai alapján. Ma már széles körben használt a kis szilárdságú kőzetekre, ill. a heterogén kőzettest esetére (pl. flis) meghatározott GSI táblázatok is.







A GSI egyik jelentős hátránya, hogy amint az itt bemutatott ábrán is látszik, nincs pontosan definiálva a kőzettömbök mérete, valamint a tagoltságok állapota sem számszerűsített, ezáltal meghatározása szubjektívvé válik. A GSI értéke megalkotásakor, Hoek és szerzőtársai definíciója alapján, megegyezett a Bieniawski által 1976-ban bevezetett RMR értékkel, amennyiben az 18-nál nagyobb (az RMR értékről és annak alkalmazásáról lásd bővebben Vásárhelyi, 2004, ill. Gálos és Vásárhelyi 2005), azaz:

$$GSI = RMR_{1976} \quad (1)$$

Az érték számításánál természetesen nem szabad figyelembe venni a tagoltsági felületek irányítottságát (0 pont), valamint teljesen száraz állapotot kell feltételezni (15 pont). Bieniawski 1989-es, legutolsó, legáltalánosabban elterjedt változata esetén ezen érték kiszámítása az alábbira módosult $RMR_{1989} > 23$ esetén:

$$GSI = RMR_{1989} - 5 \quad (2)$$

A GSI érték a közelmúltig főleg szemrevételezéssel került megállapításra, ahol nem pontos számszerű értékre törekedtek, hanem egy adott tartomány bemutatására, ahol a GSI érték változhat. Sok esetben ki is emelték, hogy a GSI értékeket egy 5-10 pontos értékhatárral kell megadni. Az így használt empirikus kapcsolatok ugyanakkor nagyon érzékenyek a GSI pontos értékére (Lásd Ván és Vásárhelyi, 2007). Ezért a kőzetmechanikai numerikus modellezés adta lehetőségek, valamint a mérnökgeológus

GEOLÓGIAI SZILÁRDSÁGI INDEX (GSI) MEGHATÁROZÁSA		TAGOLÓFELÜLET ÁLLAPOTA					
SZERKEZET		CSÖKKENŐ FELÜLETI MINŐSÉG →					
 <p>ÉP VAGY TÖMÖR-ép próbatestek, vagy tömör kőzettest néhány ritkán elhelyezkedő diszkontinuitással</p>		90				N/A	N/A
 <p>BLOKKOS - nagyon jól összekapcsolódó ép kőzettest, mely kocka-tömböket tartalmaz, melyeket három orthogonális diszkontinuitás szabdal</p>		80	70				
 <p>NAGYON BLOKKOS - összekapcsolódó, részlegesen töredezett kőzettest, melyet négy vagy annál több diszkontinuitás szabdal</p>			60				
 <p>BLOKKOS / TÖREDEZETT / REPEDEZETT - szögletes kőtömbökből álló gyűrt kőzettest, melyet számos egymást keresztező diszkontinuitás szabdal. Folytonos vagy palás rétegződés.</p>			50	40			
 <p>SZÉTESŐ-rosszul összekapcsolódó, erősen töredezett kőzettest, mely érdes és kopott törmelékből áll</p>				30	20		
 <p>RÉTEGZETT/NYÍRT-blokkosság hiánya a sűrű töredezett palás rétegződés vagy nyírási felületek miatt</p>					10		
		N/A	N/A				

szemrevételező jelentős szubjektív döntésének kiiktatása miatt szükségessé vált a GSI érték minél objektívabb meghatározására.

1. ábra. A GSI meghatározása kiegészítve a gyenge szilárdságú kőzetekre (Marinos & Hoek 2000)

A Bábaapáti Radioaktív hulladékártoló mélyépítési munkáinál is fontossá vált a GSI pontos meghatározása a numerikus modellezések elvégzése céljából. Jelen cikk előbb bemutatja a különböző GSI meghatározások kvantitatív lehetőségeit, majd elemzi a Bábaapátiban kapott eredményeket.

2 ELMÉLETEK A GSI ÉRTÉKÉNEK PONTOS MEGHATÁROZÁSÁRA

2.1 *Sonmez és Urusay (1999) elmélete*

Az 1. ábrán bemutatott grafikonból kiindulva elméletük célja az volt, hogy a közettömbök méretét (függőleges oszlop), valamint a tagoltságok felületi minőségét (vízszintes oszlop) számszerűsítsék.

A kőzetblokkok méretének meghatározásához (SR – Structure Rating) Palmström (1995) elméletéből kiindulva a térfogati tagoltság-szám (J_v) ismeretében az alábbi módon határozták meg:

$$SR = -17,5 \log(J_v) + 79,8 \quad (3)$$

Értéke 0 és 100 között változhat. A térfogati tagoltság-számot (J_v) Palmström (1996) megállapításai alapján a következőképpen számíthatjuk:

$$J_v = \sum_{i=1}^J \frac{1}{S_i} + \frac{N_r}{5} \quad (4)$$

ahol S_i az azonos i diszkontinuitású csoportban a tagoló felületek egymástól mért távolságának az átlaga (méterben), N_r pedig a véletlen tagoltságok száma. A kapott eredménnyel lehetőség van a kőzettestek osztályozására is. Ennek lehetőségét az 1. táblázatban mutatjuk meg.

1. táblázat. A térfogati tagoltság-szám ismeretében a kőzettest osztályba sorolása (Palmström, 1995)

Osztály	A tagoltság meghatározása	J_v meghatározás	J_v	Blokk-térfogat
1	Masszív	különlegesen alacsony	< 0,3	> 10 000 m ³
2	Nagyon kismértékben tagolt	nagyon alacsony	0,3 – 1,0	30 – 10 000 m ³
3	Kismértékben tagolt	Alacsony	1 – 3	1 – 30 m ³
4	Közepesen tagolt	közepesen magas	3 – 10	0,03 – 1 m ³
5	Erősen tagolt	Magas	10 – 30	1 – 30 dm ³
6	Nagyon erősen tagolt	nagyon magas	30 – 100	0,03 – 1 dm ³
7	Töredezett	különlegesen magas	> 100	< 30 cm ³

A tagolófelület minőségét (Surface Condition Rating – SCR) annak érdességéből (R_r), mállottságából (R_w), valamint kitöltöttségéből (R_f) határozza meg. Értéke 0-18 között változhat.

E két tényező ismeretében az 1. ábrát módosították, és adták meg már numerikusan a változókat a 2. ábra szerint.

2.2 *Cai et al. (2004) elmélete*

Cai et al. (2004) célja az volt, hogy a GSI értékét lehető legobjektívebb módon, minél pontosabban tervezték meghatározni. Ehhez elképzelésük szerint több szempontot érdemes figyelembe venni: egyrészt a tagolófelület állapotának meghatározását, amelyet Palmström (1995) az ún. jC értékkel definiált és számszerűsített. A tagoltság állapotát leíró tényező (jC) a következő három tényezővel van összefüggésben: tagoló felület érdessége (jR), mállottsága (jA) és állapota (jK), és ezt a következő összefüggés alapján határozza meg:

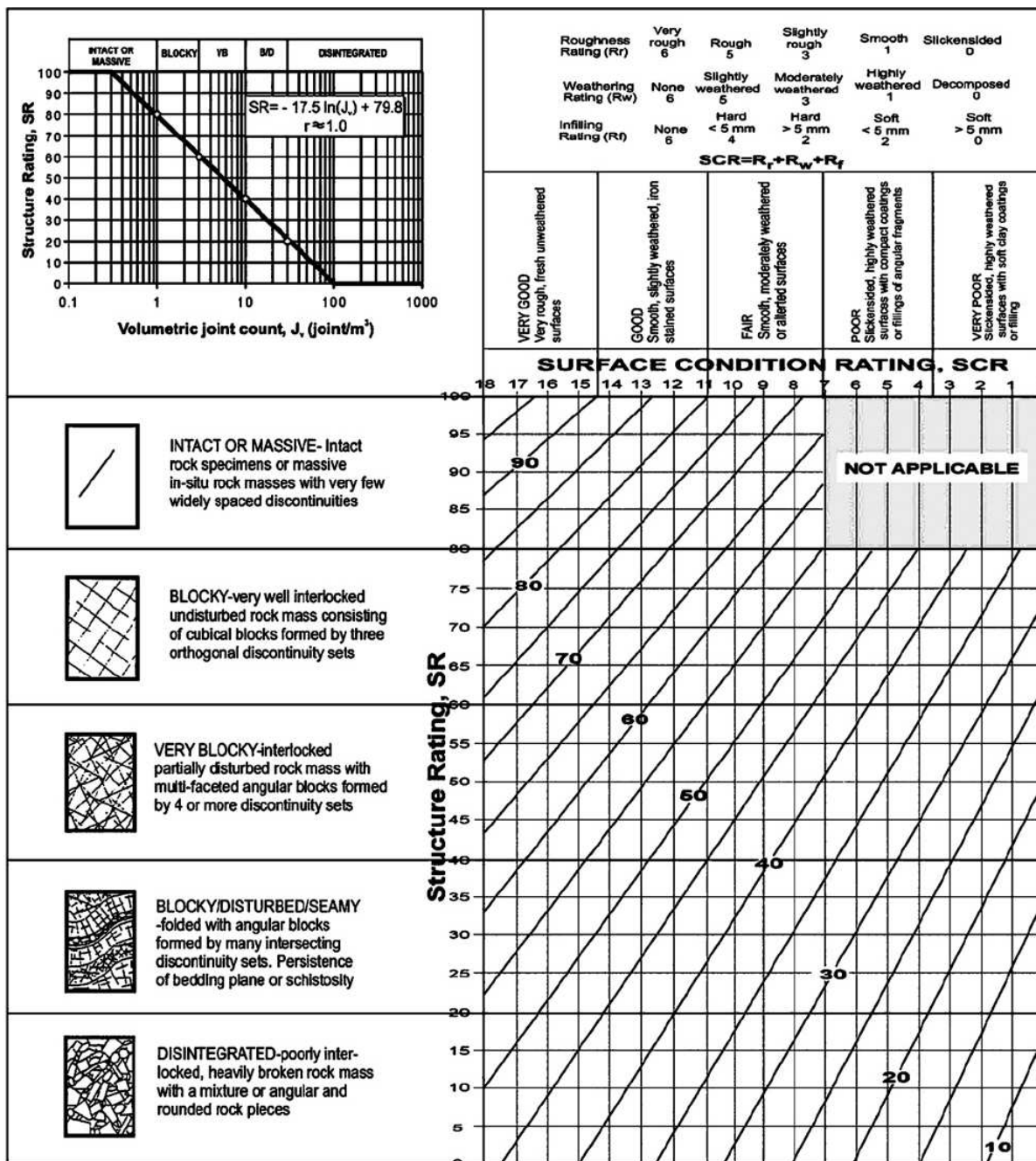
$$jC = jK(jR/jA) \quad (5)$$

A 2, 3 és 4. táblázatok ezen tényezők (jK , jR és jA) definícióit, és a hozzájuk rendelhető jelzőszámokat tartalmazzák Cai et al. (2004) alapján.

A kőzetblokk térfogatát az előbb ismertetett módon határozták meg. Az így megszerkesztett 3. ábrán a kőzetblokkok térfogata és a (5) egyenlet alapján meghatározott jC érték ismeretében a GSI értéke pontosan leolvasható.

2. táblázat. A tagoltság állapot tényezője (jK) (Cai et al, 2004)

Hullámosság	jK
Összekapcsolódó (nagy arányban)	3
Lépcsős	2,5
Nagy hullámosság	2
Kis v. közepes hullámosság	1,5
Sík	1



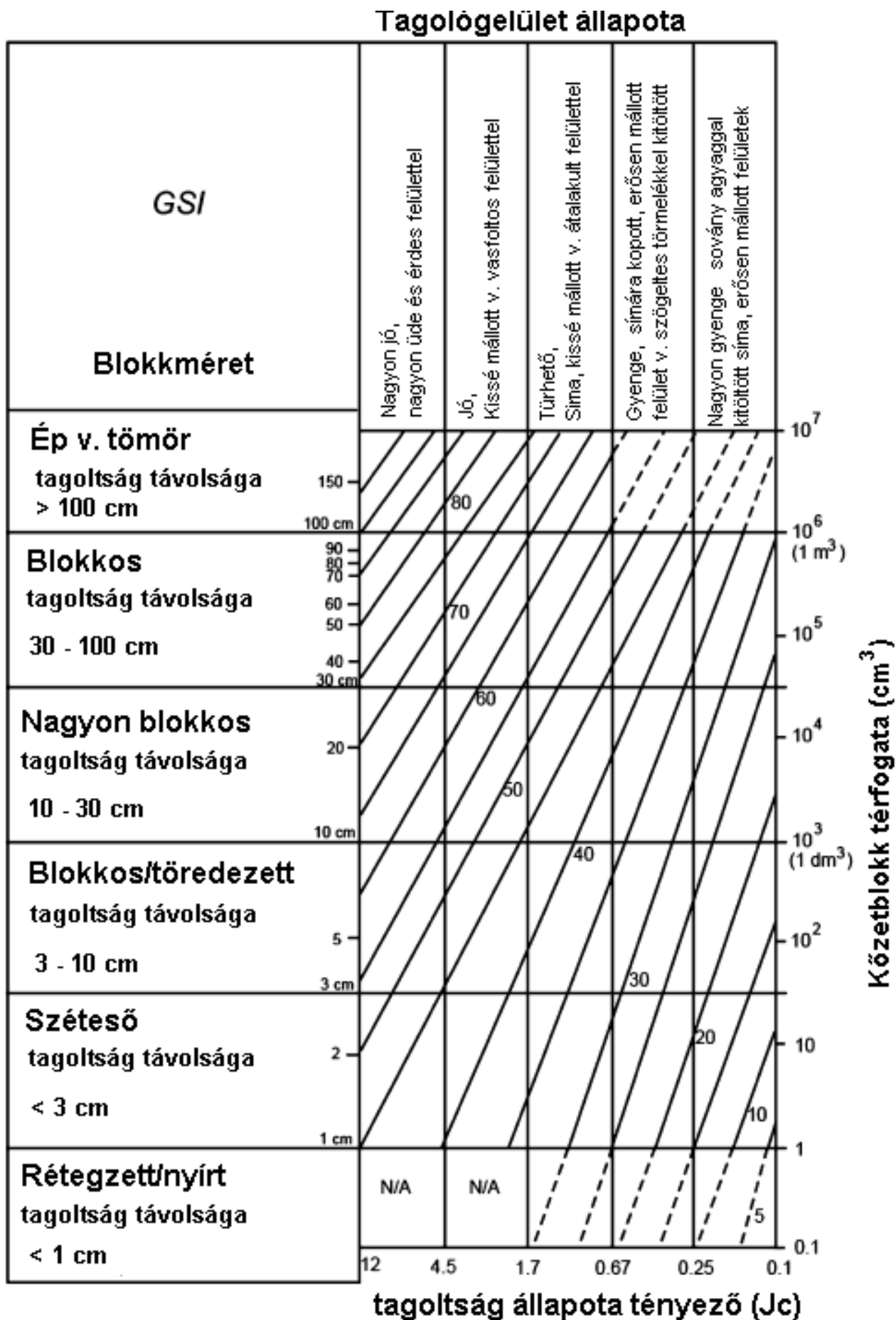
2. ábra. GSI meghatározása Sonmez és Urusay (1999) elmélete alapján

3. táblázat. A tagolófelület érdességének (jR) mérőszáma

Kis léptékben a tagolt-sági felület érdessége*	Nagy léptékben a tagolt-sági felület hullámossága				
	sík	kissé hullámos	erősen hullámos	lépcsőzetes	Összekapcsolódó
Nagyon érdes	3	4	6	7,5	9
Érdes	2	3	4	5	6
Kissé érdes	1,5	2	3	4	4,5
Sík	1	1,5	2	2,5	3
Síma	0,75	1	1,5	2	2,5
Tükrös**	0,6 – 1,5	1 – 2	1,5 – 3	2 – 4	2,5 – 5

szabálytalan tagoltságnál jR = 5 ajánlott

*: kitöltött tagoltságnál: jR = 1; **: tükrös tagoló-felületnél az érték függ a „barázdák” előfordulásától és kinézetétől. Markáns „barázdák” esetén a nagyobb érték használható.



4. ábra: A GSI értéke a tagoltsági állapot és a tagoltságok távolságának ismeretében (Cai et al, 2004)

4. táblázat. A tagoltság mállottságának mérőszáma (jA)

Terminológus	Leírás	jA	
A. Kőzetfelületek közötti kapcsolat			
Tiszta tagoltság	Lágy, áthatolhatatlan kitöltés (kvarc, epidot, stb.)	0,75	
Begyógyult vagy összeforrt tagoltságok Üde kőzetfalak	Nincs burkolat vagy kitöltés a tagoltsági felületen, a szennyeződések kivéve.	1	
Mállott tagoló felület	A tagoló felület egy osztállyal magasabb mállottságot mutat, mint a kőzet.	2	
I. 1. foknál mállottabb			
II. 2. foknál mállottabb	A tagoló felület két osztállyal magasabban mállott, mint a kőzet.	4	
Burkolat vagy kitöltöttség			
Homok, iszap, kalcit, stb.	Szemcsés anyag agyag nélkül.	3	
Agyag, klorit, talk, stb.	Puha és kohéziós anyagok.	4	
B. Részlegesen kitöltött vagy nincs kapcsolat a felületek között			
<i>A kitöltő anyag típusa</i>	<i>Leírás</i>	Részleges fal- érintkezés (vékony kitöltés < 5 mm)	Nincs fal érintkezés (vékony kitöltöttség vagy barázdáltság)
Homok, iszap, kalcit, stb.	Szemcsés anyaggal kitöltött (agyagmentes)	4	8
Tömörített agyagok	Kötött és lágyuló kitöltöttség	6	10
Puha agyagok	Közepestől kicsit túlkonzolidált kitöltöttség	8	12
Duzzadó agyagok	A kitöltött anyag tisztán duzzadó tulajdonságot mutat	8-12	12-20

2.3 Russo (2009) elmélete

Russo (2009) a GSI kvantitatív meghatározásánál Palmström R_{Mi} (kőzettest index) rendszerű kőzettest osztályozásból indult ki (megjegyezzük, hogy ez a kőzettest osztályozás Hansági, 1965, 1986 elméletén alapszik, azt dolgozta tovább). A kőzettest index (R_{Mi}) értékét a fentiekből adódóan a következőképpen ajánlja meghatározni:

$$R_{Mi} = \sigma_{cm} = J_p \cdot \sigma_c \quad (6)$$

Ahol σ_{cm} a kőzettest szilárdsága [MPa], σ_c az ép kőzet nyomószilárdsága [MPa] J_p az ún. tagoltsági paraméter, melyet későbbiekben részletesen ismertetünk.

Hoek (1900) definíciója alapján a kőzettest szilárdsága az alábbi összefüggéssel határozható meg:

$$\sigma_{cm} = \sigma_c \cdot s^a \quad (7)$$

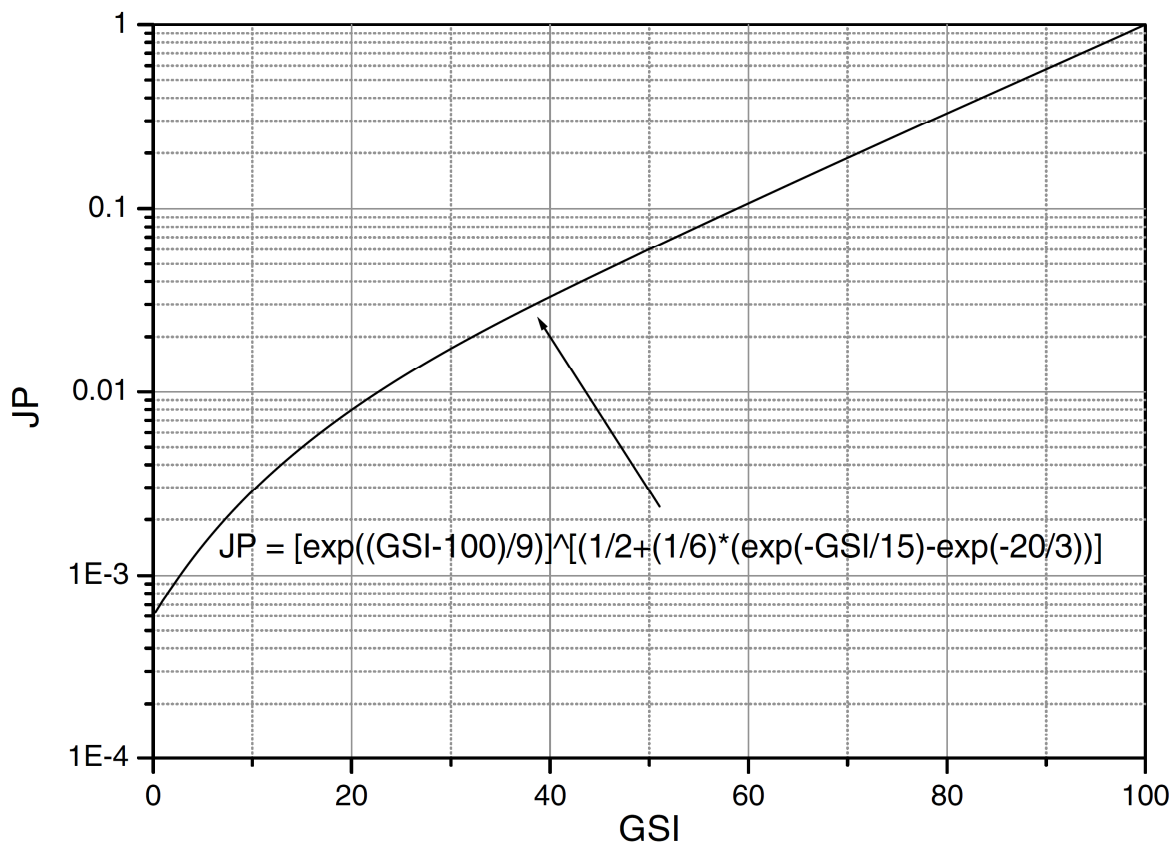
Ahol s és a az ún. Hoek-Brown állandók (bővebben lásd Vásárhelyi, 2003). Ezek értéke definíció szerint (Hoek et al., 2002):

$$s = \exp[(GSI-100)/9] \quad \text{és} \quad (8)$$

$$a = 0,5 + \frac{1}{6} \left(e^{\frac{GSI}{15}} - e^{\frac{20}{13}} \right) \quad (9)$$

Elfogadva mindkét egyenlet helyességét, J_p és GSI közötti kapcsolat az alábbi (a kapcsolatot mutatjuk be a 4. ábrán):

$$J_p = [\exp((GSI - 100)/9)]^{0,5 + (1/6)(\exp(-GSI/15) - (\exp(-20/3)))} \quad (10)$$



4. ábra. A J_p és a GSI érték közötti kapcsolat (Russo, 2004)

A (10) egyenletnek nincs matematikailag helyes inverz függvénye. Szigmaid függvénnyel való közelítés gyakorlatilag teljesen jónak mondható ($R^2 = 0,99995$), azaz a GSI érték az alábbi alakban határozható meg J_p ismeretében:

$$GSI \approx 153 - 165 / [1 + (J_p / 0,19)^{0,44}] \quad (11)$$

A J_p meghatározását Palmström (1995) részletesen bemutatja és elemzi. J_p értéke 4 fő tényezőtől tevődik össze:

- a kőzetblokk térfogata (vagy a tagoltságok sűrűsége), - jele V_b
- a tagoltság érdessége; - jele j_R (3. táblázat – lsd. előző fejezetben)
- tagoltság mállottsága, - jele j_A (4. táblázat – lsd. előző fejezetben)
- valamint a tagoltság méretei; - jele j_L (5. táblázat)

5. táblázat. A tagoltság hosszának és folytonosságának a mérőszáma (j_L)

Tagoltság hossza (m)	Meghatározása	Típusa	j_L	
			Folytonos tagoltság	Megszakításos tagoltság**
< 0,5	nagyon rövid	rétegzett/leveles	3	6
0,1 – 1,0	rövid/kicsi	Tagoltság	2	4
1,0 – 10	közepes	Tagoltság	1	2
10 – 30	hosszú/nagy	Tagoltság	0,75	1,5
> 30	nagyon hosszú/nagy	kitöltött tagoltság vagy nyírás*	0,5	1

* gyakran egyedülálló és ezekben az esetekben külön kell kezelni; ** a megszakításos tagoltság vége tömör kőzettestben van

Számos helyszíni vizsgálat és nagymintákon végzett kísérlet alapján határozták meg azt, hogy milyen módon van kapcsolatban a tagoltságot leíró tényező (j_C) és a kőzettömb térfogata (V_b) a tagoltsági paraméterrel (J_p). A kapott eredmények alapján analitikus alakban az alábbi képlettel lehet számolni:

$$J_p = 0,2 \sqrt{j_C} (V_b)^D \quad (12)$$

ahol V_b a kőzettömb térfogata [m^3]-ben és $D = 0,37 j_C^{-0,2}$.

A tagoltság állapotát leíró tényező (j_C) a következő három taggal van összefüggésben: tagoló felület érdessége (j_R), mállottsága (j_A) és mérete (j_L), a következő összefüggés alapján:

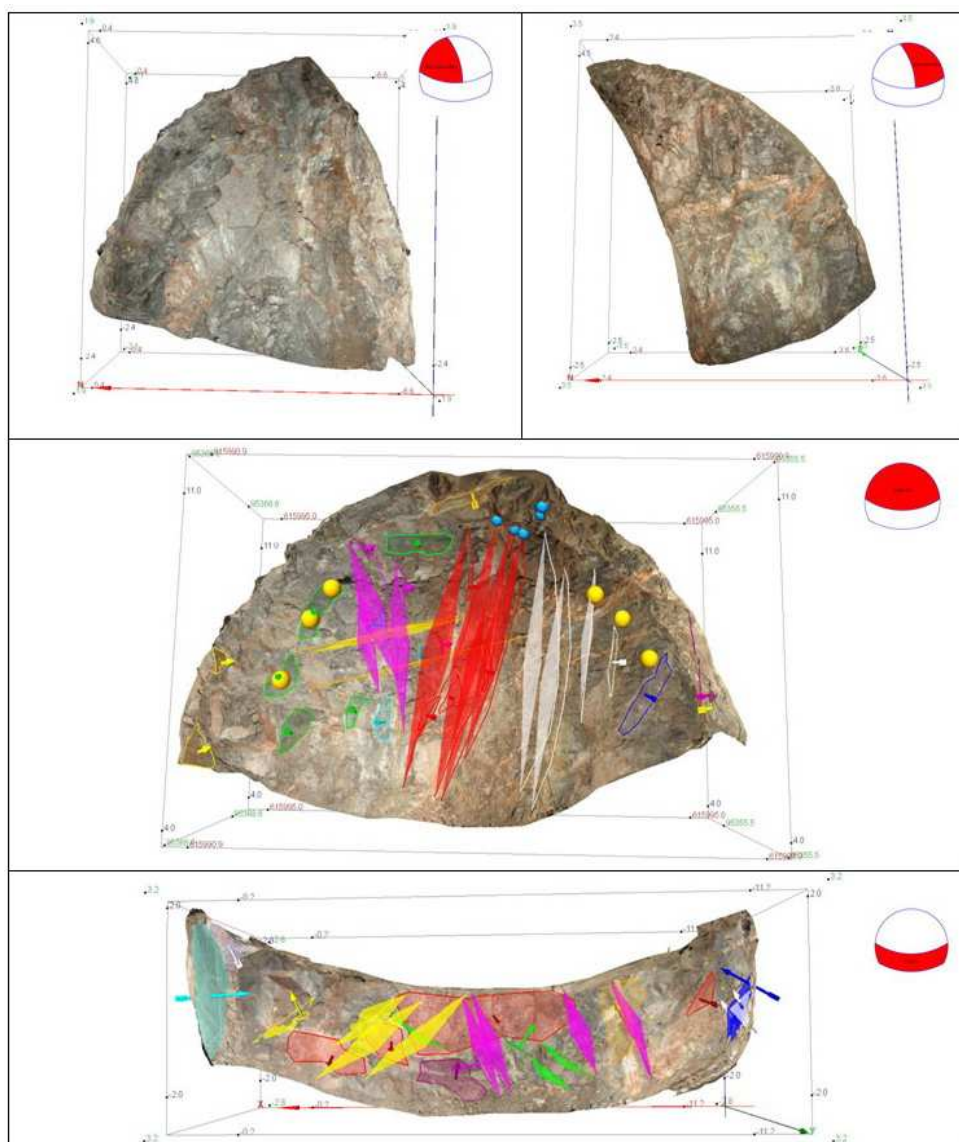
$$jC = jL(jR/jA). \quad (13)$$

Fontos hangsúlyozni, hogy a Palmström által megalkotott J_p érték jól használható abban az esetben is, ha fúrómag alapján meghatározott RQD tényező áll a rendelkezésünkre, de ennek méréstartományán kívül (azaz 10 cm-nél kisebb, illetve 1 m-nél nagyobb tagolófelület távolságok esetén) is lehetőség van vele számolni az ún. térfogati tagoltság szám segítségével. A térfogati tagoltság szám (definíció szerint) megadja azt, hogy 1 m³-nyi kőzettestben hány darab tagoltság található.

Itt külön-külön kell vizsgálni azt az esetet, amikor 3 vagy több tagoltsági egység közel hasonló méretű blokkokat darabol, amikor 2-3 tagoltsági rendszer hosszú tömböket metsz ki, továbbá ha csak 2 tagoltsági rendszer van, melyek miatt nagyon hosszú tömbökről beszélhetünk, és végül, ha csak 1 tagoltságot észlelünk (ebben az esetben lapos kőzettömbjeink vannak).

3 TAPASZTALATOK A BÁTAAPÁTI KIS ÉS KÖZEPES RÁDIOAKTÍVHULLADÉK-TÁROLÓ GEOTECHNIKAI FELMÉRÉSEI ALAPJÁN

A jelenleg elkészült két 96 m² szelvényméretű tárolókamrát kivéve a teljes felszín alatti mérőki létesítmény megépítése során a terepi dokumentálás során csak az RMR és a Q kőzettest osztályozási értékek lettek meghatározva (5. ábra).



5. ábra: Az I-K1 és I-K2 tárolókamrák különböző jövesztési fázisairól készített ShapeMetriX3D modellek, melyek a Bátapátiban végzett geotechnikai dokumentálás szerves részei

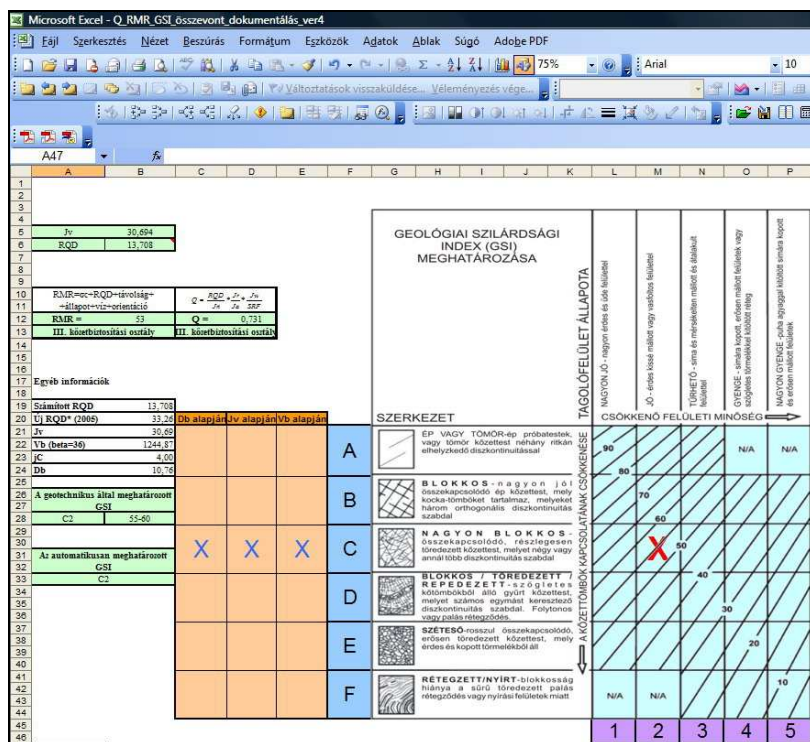
A különböző kivitelezési fázisok tervezéséhez felhasznált GSI értékek rendre származtatva voltak az előbb említett kőzetosztályozási rendszerekből. Kezdetekben a nemzetközi szakirodalomban fellelhető

összefüggések segítségével, majd később hely- azaz Bábaapáti-specifikus korrelációkkal. A GSI értékek direkt módon való meghatározása és kiszámítása a tárolókamrák építésével kezdődött meg (a tárolókamrák építése során elvégzett vájvégdokumentációk száma: 216 db., a mostanáig megépült teljes alagútrendszer 2695 geotechnikai vágatdokumentációt tartalmaz).

A terepi vágatdokumentálás adatainak vájvégenkénti összegzéséhez, valamint a kőzetosztályozási paraméterek és a végeredmények számításához egy automatizált Microsoft Excel táblázatrendszer nyújt segítséget, melyet úgy készítettünk el, hogy az a szubjektivitást lehetőség szerint kizárja. Ez a rendszer automatikusan határozza meg a Q, RMR és GSI értékeket is (6. ábra).

A régi bemenő paraméterek mellett egy új paraméter meghatározásának bevezetésére volt szükség, nevezetesen a jL jelölésére.

A jR és jA definíciói megegyeznek a Barton féle Q kőzetosztályozás Jr és Ja tényezőkével, így azok parametrizálását használjuk a kvantitatív számításához.



6. ábra: Az Excelben automatikusan meghatározott kőzetosztályozási értékek eredmény munkalapja

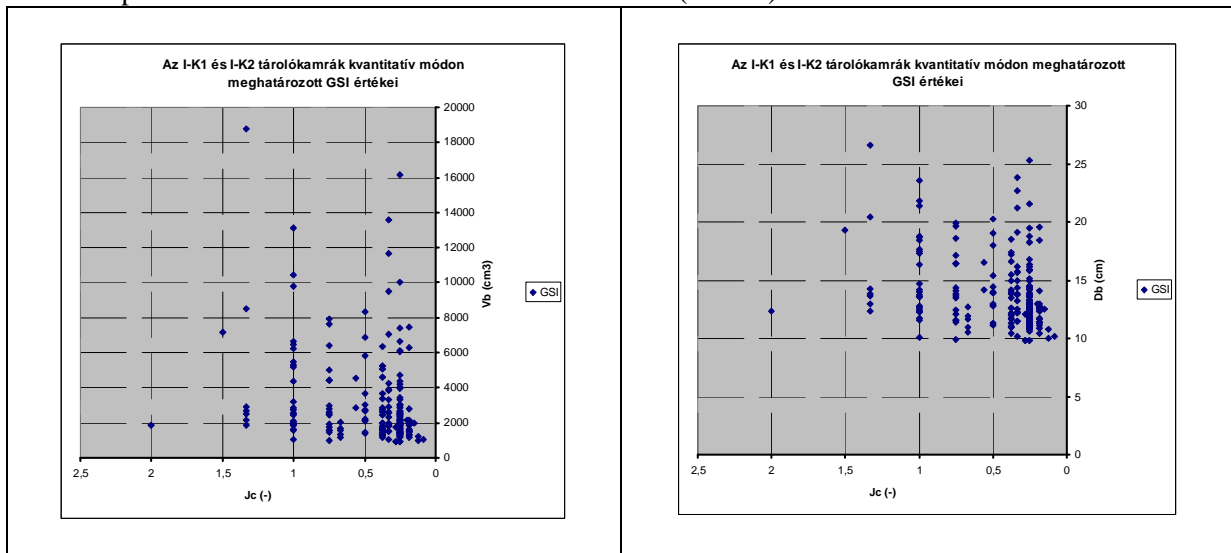
Ahhoz, hogy a GSI esetében az érték meghatározást végző személy felülbírálati lehetősége megmaradjon, automatikusan csak egy kód meghatározás történik. A végső értéket (vagy esetünkben értéktartományt) a dokumentálást végző geotechnikus határozza meg. A kód, melyet az előbb említettünk, tartalmaz egy betűt (GSI mátrix sora) és egy számot (GSI mátrix oszlopa) (pl. C2 – a mátrixban elfoglalt hely, 55-60 – a mátrixban elfoglalt helyhez tartozó értéktartomány, mely intervallumot tervezői elvárásnak megfelelően határoztunk meg). A geotechnikus felülbírálati lehetőségének fenntartására azért van szükség, mert a kvantitatív módon való meghatározás néhány egyedi kőzettest jellemzőt nem vesz figyelembe (pl. vizesedés).

A végső adatbázisunkba mind az automatikusan, mind pedig a geotechnikus által meghatározott kódok illetve értéktartományok is bevezetésre kerültek. A későbbi GSI elemzéseinkben felhasználtuk egyrészt az összes kódot, másrészt pedig az értéktartományok középtékeit. A bemenő paraméterek használatával, minden vájvég esetében meghatároztuk annak a GSI mátrixban elfoglalt helyét. Ezeknek az eredményeit mutatja be a 7. ábra.

GEOLOGIAI SZILÁRDSÁGI INDEX (GSI) MEGHATÁROZÁSA							
SZERKEZET		TAGOLÓ FELÜLET ÁLLAPOTA	CSÖKKENŐ FELÜLETI MINŐSÉG →				
		NAGYON JÓ - nagyon erdes és jó felület	JÓ - erdes kis mélyített vagy veszős felület	TÜRHETŐ - sima és mérsékelt málott és átalakult felület	GYENGE - simára kopott, erősen málott felületek vagy szögletes törmelékek között réteg	NAGYON GYENGE - puha agyaggal kitöltött simára kopott és erősen málott felületek	
A	<p>ÉP VAGY TÖMÖR-ép próbatestek, vagy tömör kőzettest néhány ritkán elhelyezkedő diszkontinuitással</p>	A KÖZETTÖMBÖK KAPCSOLATÁNAK CSÖKKENÉSE ↓	90		N/A	N/A	
B	<p>BLOKKOS - nagyon jól összekapcsolódó ép kőzettest, mely kocka-tömbököt tartalmaz, melyeket három orthogonális diszkontinuitás szabdal</p>		80				
C	<p>NAGYON BLOKKOS - összekapcsolódó, részlegesen töredezett kőzettest, melyet négy vagy annál több diszkontinuitás szabdal</p>		70				
D	<p>BLOKKOS / TÖREDEZETT / REPEDEZETT - szögletes kötömbökből álló gyűrű kőzettest, melyet számos egymást keresztező diszkontinuitás szabdal. Folytonos vagy palás rétegződés.</p>		60	50	54	136	23
E	<p>SZÉTESŐ-rosszul összekapcsolódó, erősen töredezett kőzettest, mely erdes és kopott törmelékből áll</p>		40		2	1	
F	<p>RÉTEGZETT/NYÍRT-blokkosság hiánya a sűrű töredezett palás rétegződés vagy nyírási felületek miatt</p>		30			20	
				10			
			1	2	3	4	5

7. ábra. A geotechnikusok által elfogadott és véglegesített GSI mátrix meghatározására használt kódok és helyzete és számbeli eloszlása a tárolókamrák vájvég adatai alapján

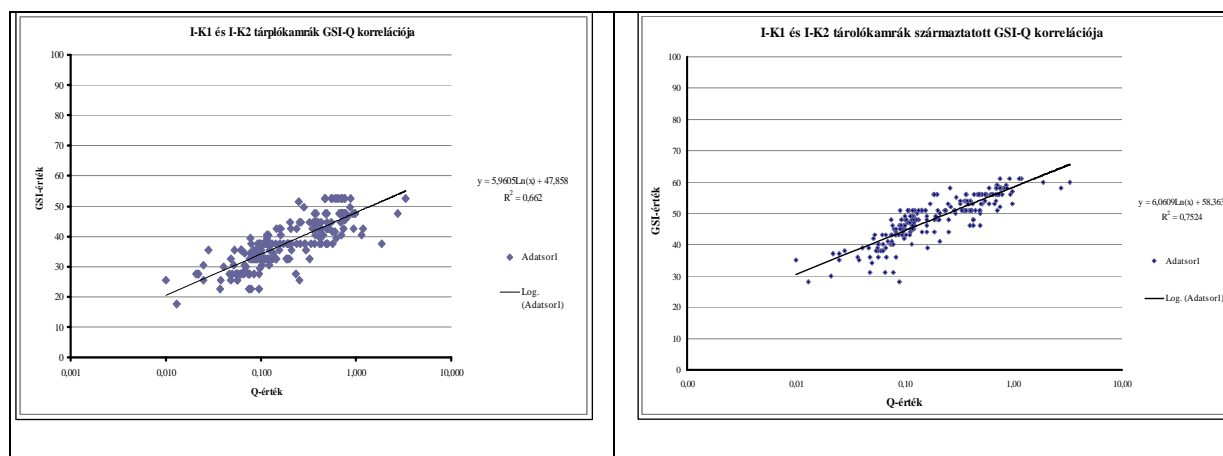
Az alábbi ábrán szereplő adatpontokat mind a már meglévő dokumentációból vettük ki, azaz a Vb és Db értékek számításához szükséges RQD-t, valamint a Jc számításához szükséges Jr/Ja-t a Q rendszer bemenő paramétereiből automatizált módon emeltük át (8. ábra).



8. ábra: Az I-K1 és I-K2 tárolókamrák kvantitatív módon meghatározott adatpontjainak elhelyezkedése a Vb-Jc és Db-Jc diagramokon

A GSI alapján a két megépített kamra esetében elmondható, hogy a harántolt kőzettest szerkezete alapján legnagyobb részben a „Nagyon blokkos” kategóriába esik. Erre a következők jellemzőek: sok esetben összekapcsolódó blokkok, részlegesen töredezett kőzettest, melyet négy vagy több diszkontinuitás szabdal. A tagoló felületek állapotának besorolása alapján a „Gyenge” kategóriába tartozik, melyre jellemzőek a simára kopott, erősen málott felületek, vagy szögletes törmelékekkel kitöltött rétegek. Kisebb részben szerepel a „Nagyon blokkos” – „Türhető” (sima, mérsékelt málott és átalakult felületekkel rendelkező tagoló felületekkel). Elenyésző mennyiségben „Nagyon blokkos” – „Nagyon gyenge” kőzettestet is dokumentáltak (puha agyaggal kitöltött, simára kopott és erősen málott tagoló felületekkel).

A GSI terepi meghatározásának bevezetésével lehetőség nyílt egyfajta ellenőrzésre és jobb átjárhatóságra az addig használt Q és RMR között is, amellet, hogy megfelelő információk gyűltek össze a további tervezések részére. A három módszer egyidejű használatával lehetőség van az emberi tényezőből fakadó szubjektivitás, illetve hibák kiküszöbölésére, melyek felfedezhetőek voltak a kamrák adataiból készült diagramokon. Az első esetben megnéztük az RMR-ből származtatott GSI értékek korrelációját a Q értékekkel, majd a terepen meghatározott GSI értéktartományok számtani középértékét hasonlítottuk össze a Q-val (9. ábra).



9. ábra: GSI-Q korrelációk a Bábaapátiban megépített tárolókamrák esetében (bal oldalon a terepi számítások, míg jobb oldalon a származtatott GSI értékek figyelembe vételével)

A vizsgálatokból egyértelműen látszott, hogy a származtatott GSI értékek jobb korrelációt hoztak ($R^2=0,75$), míg a direkt számolt GSI értékek Q-val való korrelációjának szorossága kissé alul maradt ($R^2=0,66$), mindezek mellett az RMR-Q korrelációk a megszokott módon még jobb szorosságot mutattak.

Későbbi vizsgálatok során kiderült, hogy a hibák emberi tényezőre vezethetők vissza, hiszen a személyekre lebontott korrelációkban kisebb fokú különbségeket sikerült kimutatni. A hibaforrások vizsgálatával megállapítható volt, hogy az eltérések az RMR tagoltsági állapotának meghatározásánál használatos „éresség”, „mállottság”, valamint a Q kőzetblokkok közötti nyírószilárdságot jellemző Jr/Ja (a tagoltságok éressége/mállottsága) között ellentmondások jelntek meg. Az ellentmondások visszavezethetőek voltak a terepi dokumentálás szubjektivitására. A Bábaapáti projekt kezdetétől a Q és RMR kőzetosztályozási módszer volt használva egymással párhuzamosan. A tervező az eredeti 9 Q kőzetosztályt 5-re, majd később 6-ra bontotta fel és ezekhez adta meg a kőzetbiztosítási eljárásokat. Az RMR-nél az eredeti formájában 5 kőzetosztályt használtunk. A dokumentáló személyek jól ismerve a korrelációkat a több éves tapasztalat alapján sokszor néhány olyan paramétert is megváltoztattak, a két módszer közötti jó korreláció érdekében, melyek valójában ellentmondásokat szültek, ám a meglévő módszerek vizsgálatánál ezek nem váltak láthatóvá. Egy másik hibaforrásként jelent meg az RMR-nél használatos „csökkentő” paraméter, az orientáció meghatározása.

A felsorolt ellentmondások és szubjektivitás kiszűrésével a korrelációk szorosabbá váltak és a jövőben a három módszer együttes használatával ez még javítható, ugyanakkor minden egyes dokumentáció kvantitatív módon való elkészítésével biztosítható a nagyfokú objektivitás, mely elengedhetetlen követelmény a mérnökgeológiai vizsgálatoknál.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- Cai M.; Kaiser P.K.; Uno H.; Tasaka Y.; Minami M. 2004: Estimation of rock mass deformation modulus and strength of jointed hard rock masses using GSI system. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* **41**: 3-19.
- Gálos M.; Vásárhelyi B. 2006: *Kőzettestek osztályozása az építőmérnöki gyakorlatban*. Műegyetemi Kiadó, p. 144.
- Görög P.; Vámos M.; Török Á.; Vásárhelyi B. 2010: A Geológiai Szilárdsági Index (GSI) magyarországi alkalmazhatósága. *Földtani Közlöny* **140**(1): 445-468.
- Hansági I. 1965: Numerical determination of mechanical properties of rock and of rock masses. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, **2**: 219-223.
- Hansági I. 1986: *Gyakorlati kőzetmechanika az ércbányászatban*. Műszaki kk. p. 172.
- Hoek E.; Brown E.T. 1980: *Underground excavations in rock*. London, Inst. Min. Metall.
- Hoek E.; Kaiser P.K.; Bawden W.F. 1995: *Support underground excavations in hard rock*. Balkema.
- Hoek E.; Marinos P.; Benissi M. 1998: Applicability of the geological strength index (GSI) classification for weak and sheared rock masses – the case of the Athens schist formation. *Bull. Eng. Geol. Env.* **57**(2): 151-160.
- Marinos P.; Hoek E. 2000: *GSI: a geologically friendly tool for rock mass strength estimation*. In: Proc. GeoEng2000, Melbourne, Technomic Publ. Lancaster, 1422-1446.
- Marinos P.; Hoek E. 2001: Estimating the geotechnical properties of heterogenous rock masses such as flysch. *Bull. Eng. Geol. Env.* **60**: 82-92.
- Marinos V.; Marinos P.; Hoek E. 2005: The geological strength index: applications and limitations. *Bull. Eng. Geol. Env.* **64**: 55-65.
- Palmström A. 1995: *RMi – a rock mass characterization system for rock engineering purposes*. PhD thesis, Univ. Oslo, Norway, p. 400. (www.rockmass.net)
- Russo G. 2009: A new rational method for calculating the GSI. *Tunnelling and Underground Spave Technology*, **24**: 103-111.
- Sonmez H. Urusay R. 1999: Modifications to the geological strength index (GSI) and their applicability to stability of slopes. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* **36**: 743-760.
- Stille H., Palmström A. 2003: Classification as a tool in rock engineering. *Tunneling & Underground Space Techn.* **18**: 331-345.
- Ván P.; Vásárhelyi B. 2007: *Sensitiviy analysis of the Hoek-Diederichs rock mass modulus estimating formula*. In: Proc. 11. ISRM Cong. Lisboa, “The Second Half Century of Rock Mechanics” (eds: Soussa, L.R.; Ollala, C.; Grossmann, N.F.) Taylor & Francis, I: 411-414.
- Vásárhelyi B. 2001: Új eredmények a kőzet- és talajmechanikában: a Hoek-Brown törési határállapot és a Geológiai Szilárdsági Index (GSI) bemutatása. *Közúti és Mélyépítési Sz.* **51**(11): 424-431.
- Vásárhelyi B. 2003: A módosított Hoek-Brown törési kritérium, *BKL – Bányászat*. **136**(5): 276-283.
- Vásárhelyi B. 2004: Kőzettest-osztályozási módszerek összefoglalása *Földtani Közlöny* **134**(1): 109-129.
- Vásárhelyi B. 2005: A kőzettest értékelése RMi (Kőzettest index) alapján, *BKL – Bányászat*, **138**(6): 20-24.