

A Geológiai Szilárdsági Index (GSI) magyarországi alkalmazhatósága

GÖRÖG Péter¹, VAMOS Mariann², TÖRÖK Ákos¹, VÁSÁRHELYI Balázs³

¹BME, Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék, 1111 Budapest, Műegyetem rakpart 3.

²Debreceni Egyetem Ásvány- és Földtani Tanszék, 4032 Debrecen Egyetem tér 1.

³Pécsi Egyetem, Pollack Mihály Mérnöki Kar, 7624 Pécs, Boszorkány u. 2.

Geological Strength Index (GSI) and its application in Hungary

Abstract

In engineering geology the rock mass characterization can be performed by using various methods of which the Geological Strength Index (GSI) is one of the recently introduced techniques. By applying the GSI method, design parameters — such as angle of friction, modulus of elasticity, cohesion and compressive strength — can be evaluated and calculated. The method was first developed for solid and blocky rock masses, but later it was extended to describe heterogeneous rock masses such as flysch. The present paper describes the development of the GSI method and it provides information about its applicability in Hungary for rock faces, tunnels and deep excavation sites. An Eocene marl belonging to the Buda Marl Formation is the example based on which the methodology is based and subsequently described. It is a heterogeneous rock mass with hard, strongly cemented calcareous marls and soft clayey sections possessing soil-like characteristics. The case studies presented here include field and laboratory test results of projects finalized at the Department of Construction Materials and Engineering Geology of the Budapest University of Technology and Economics.

Keywords: engineering geology, Geological Strength Index (GSI), Buda Marl

Összefoglalás

A mérnökgeológiában a kőzetkörnyezet leírásának egyik — a nemzetközi gyakorlatban mindinkább használt — módszere a Geológiai Szilárdsági Index (GSI), mely az elmúlt évtized alatt az egyik legjelentősebb kőzettest-értékelési mód lett. A módszer segítségével közvetve számszerűsíthető, a mérnöki tervezésben felhasználható, kőzetfizikai adatokat kapunk, amelyek alapján olyan fontos paraméterekre, mint a belső súrlódási szög, az alakváltozási modulus, a kohézió vagy az egyirányú nyomószilárdság is tudunk következtetni. A módszert nagy szilárdságú, homogén kőzetekre dolgozták ki, de ezt követően heterogén kőzettestekre is kiterjesztették. A GSI fejlődését és alkalmazhatóságának hazai vonatkozásait (sziklafalak, munkagödörök, alagutak) is bemutatja a cikk. Magyarországi példaként a Budai Márga szerepel, amely részben kemény kőzetként (pl. mészmárga) részben agyagos képződményként (pl. mállott agyagmárga) viselkedik és kőzetmechanikai szempontból erősen heterogén kőzetösszletként értelmezhető. A cikkben bemutatott példák a BME Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék utóbbi években elvégzett mérésein és kutatási eredményein alapulnak.

Tárgyszavak: mérnökgeológia, Geológiai Szilárdsági Index (GSI), Budai Márga

Bevezetés

Változatos megjelenésű és tulajdonságú kőzettestek mérnökgeológiai jellemzésénél komoly gondot jelenthet, a mérnöki tervezéshez szükséges földtani paraméterek meghatározása. Legnagyobb problémát a heterogén kőzettestek vizsgálatánál is eredményesen alkalmazható módszerek kidolgozása jelenti. Olyan földtani környezetben, ahol a kőzettest erősen tektonizált, gyűrt, általában heterogén

kőzettestek jelenlétével számolhatunk. A heterogenitást okozhatja a különböző kőzettypusok gyakori váltakozása, pl. márga- és mészkőrétegek. Az ilyen kőzettestek terhelés hatására kialakuló alakváltozása egymáshoz közeli zónák esetén is változékony lehet. A heterogén kőzettesteket a legtöbb esetben szabad szemmel is meghatározható szerkezeti elemek (litoklázisok, törések stb.) jellemzik, amelyeknek látható jelei többek között a főtepergés, a falak lemezes leválása, valamint a kőzetomlás. Az ilyen kőzet-

környezetekre is alkalmazható módszer a Geológiai Szilárdsági Index (GSI), bemutatását és hazai alkalmazhatóságának lehetőségeit ismerteti a jelen tanulmány.

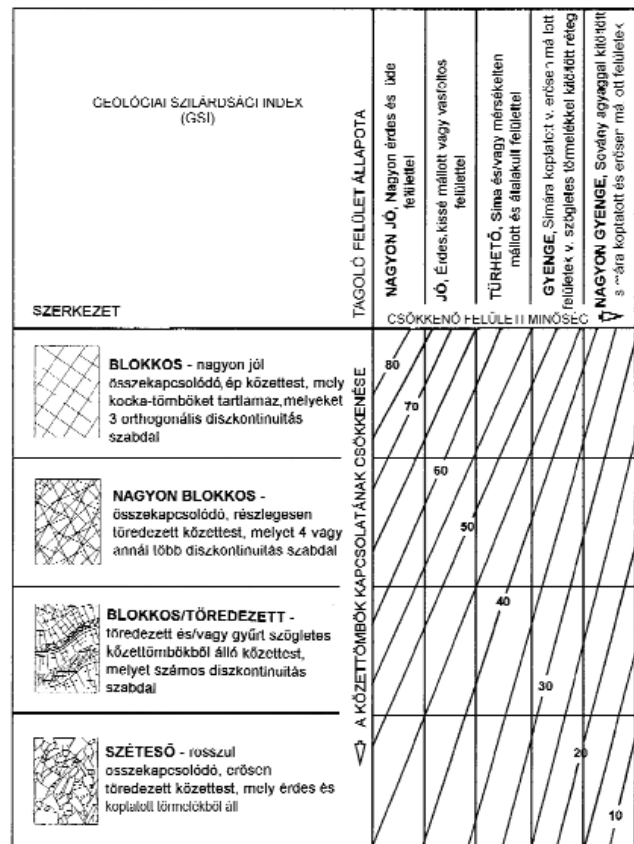
Azoknál a kőzettesteknél, ahol a tönkremeneteli folyamatok viszonylag egyszerűen nyomon követhetőek, az 1970-es években kidolgozott kőzettest-osztályozási eljárások jól alkalmazhatóak, többek között a BIENIAWSKI (1973) által bevezetett RMR-módszer, valamint Q-módszer (BARTON et al. 1974). A fent említett módszerekről az utóbbi években magyar nyelvű összefoglalók is megjelentek (VÁSÁRHELYI 2004, GÁLOS & VÁSÁRHELYI 2006). Az RMR és a Q-módszerek használhatóságát és megbízhatóságát számos nemzetközi példában ismertették (HOEK 2000). A kőzettest osztályozási rendszereket hazánkban az utóbbi években a Bábaapátiban létesülő kis- és közepes aktivitású hulladék-tároló vágatainak kivitelezésekor alkalmazták. Itt a jövesztési és biztosítási módnak a megválasztása az RMR és Q osztályozási módszerek alapján történik (DEÁK et al. 2006).

A GSI-érték meghatározásában a kőzettestek mérnökgeológiai megfigyelésének és azok szerkezeti tulajdonságainak, valamint tagoltságai jellemzőinek van kulcsszerepe. A terepi jellemzők leírása döntő fontosságú a módszer alkalmazásánál. A GSI-rendszer a megalkotásakor leginkább az egynemű, de különböző mértékben repedezett kőzettestek jellemzésére szolgált, ám ezt a későbbiekben (főleg görög alagútépítési tapasztalatok alapján) a heterogén kőzettestekre is kiterjesztették (MARINOS & HOEK 2001). Az általánosított Hoek–Brown törési elmélettel (HOEK et al. 1995), melynek az egyik bemenő paramétere a GSI-érték, jelen cikkben nem foglalkozunk (erről részletesen magyarul lásd: VÁSÁRHELYI 2001, 2003), inkább a földtani viszonyokhoz közelebb álló vonatkozásait mutatjuk be a geológiai szilárdsági indexnek.

A Geológiai Szilárdsági Index története és fejlesztése

A Geológiai Szilárdsági Indexet (GSI) a mérnökgeológiai szempontok figyelembe vételével az RMR-módszerből fejlesztették ki (HOEK 1994, HOEK et al. 1995), azzal a céllal, hogy az eltérő állagú kőzettesteket is osztályozni lehessen. A GSI bevezetését az is indokolta, hogy rossz minőségű kőzettestek (RMR<30) leírására sem az RMR, sem a Q-módszer nincs megfelelően kidolgozva. Fontos különbség az RMR-módszerhez képest, hogy ez az új osztályozási rendszer nem alkalmazza az igen elterjedt, a tagoltság mértékének meghatározására szolgáló, de jelentős hibákkal terhelt RQD-értéket (PALMSTRÖM 1995), amely a lejelterjedtebb kőzettest osztályozási rendszerek egyik alapelemének tekinthető (pl.: RMR, Q). Ismeretes, hogy a tagolt kőzettest szilárdsága függ az ép kőzet anyagának tulajdonságaitól, a kőzettömbök elmozdíthatóságától, kibillenthetőségétől (azaz csúszási és elfordulási lehetőségétől, ún. szabadsági fokától), illetve a tagoltság mértékétől és annak állapotától. Az elmozdíthatóságot befolyásolja mind a kőzettömb geometriája, mind az azt határoló tagoló

felületek minősége és állapota, azaz egy érdes tagoló felületekkel rendelkező kőzettest jóval nagyobb szilárdságú, mint egy mállott tagoló felületekkel határolt és töredezett kőzettest. Mindezekből kitűnik, hogy a tagoló felületek állapotának és szerkezetének (geometriájának) fontos szerepe van a kőzettestek szilárdságának meghatározásánál, és a laboratóriumi szilárdsági méréseket (kisméretű próbatesten mért értékeket), mint tervezési paramétereket, nem lehet közvetlenül felhasználni. Ezért is látszott célszerűnek egy a terepi viszonyokat jobban tükröző rendszer kidolgozása. A fenti elvekből kiindulva szerkesztette meg HOEK et al. 1995-ben a GSI meghatározására szolgáló grafikus megoldást (1. ábra). Az ábrán a sorokban a kőzettest tagoltságai viszonyai szerepelnek, azaz, hogy milyen gyakorisággal jelennek meg a tagoló felületek a kőzettestben, míg a tagoló felület állapotát az ábra oszlopai mutatják. A GSI értéke mindezek alapján 0 és 100 között változhat. A minimumnál, azaz 0 érték esetén kohézió nélküli — azaz szemcsés — talajt kapunk, ahol az elmélet nem használható. GSI=100 esetén nincs tagoló felület, így a kőzettest és a kőzettömb ugyanaz (tagolatlan vagy ép kőzet). Hangsúlyozni kell, hogy a GSI sohasem egy pontos értéket, hanem egy értéktartományt jelöl. Ez részben annak is köszönhető, hogy minden egyes szerkezeti kategória és tagolófelületi állapot egy-egy mezőt foglal el és nem korlátozható egy adott egyenesre (lásd. 1. ábra).



1. ábra. A Geológiai Szilárdsági Index (GSI) meghatározása és értékei (HOEK et al. 1995 nyomán)

Figure 1. Geological Strength Index (after HOEK et al. 1995)

SZERKEZET	TAGOLÓ FELÜLET ÁLLAPOTA	CSÖKKENŐ I LLULLÓ II MINŐSÉG			
		NAGYON JÓ - nagyon erdes és tude felülettel	JÓ - erdes, kisebb mállott vagy vastó :28 felület	TÜRHEFTŐ - simra és mállott felülettel, mállott és alacsony felülettel	GYENGE - simra kopaltott, erdesen mállott felülettel vagy szögletes törmelékkel k :28 felület
ÉP VAGY TOMOR-ép próbatestek, vagy tömör kőzettest néhány ritkán elhelyezkedő diszkontinuitással		90	80	N/A	N/A
BLOKKOS - nagyon jól összekapcsolódó ép kőzettest, mely kocka-tömböket tartalmaz, melyeket három ortogonális diszkontinuitás szabdal		70	60		
NAGYON BLOKKOS - összekapcsolódó, részlegesen töredezett kőzettest, melyet négy vagy annál több diszkontinuitás szabdal		60	50		
BLOKKOS / TÖREDEZETT / REPEDEZETT - a zögléte a különbözők álló gyűrűk között, melyet számos egymást keresztező diszkontinuitás szabdal. Folytonos vagy palás rétegződés		50	40		
SZÉTESŐ - részlegesen összekapcsolódó, erősen töredezett kőzettest, mely erdes és kopaltott törmelékkel áll		40	30		
RÉTEGEZETT/NYÍRT - blokkosság hiánya a sűrű, töredezett palás rétegződés vagy nyírt felületek miatt		N/A	N/A		10

2. ábra. A GSI meghatározása kiegészítve a gyenge szilárdságú kőzetekre (MARINOS & HOEK 2000 nyomán)

Figure 2. Modified Geological Strength Index extended for heterogeneous rock masses (after MARINOS & HOEK 2000)

A gyakorlati élet megkívánta, hogy kis szilárdságú kőzetekre is kiterjesszék a GSI-érték alkalmazhatóságát (2. ábra). Az athéni metróépítés kapcsán egy heterogén, kőzettanilag és kőzetmechanikailag igen változatos kőzettesttel találkoztak az építők, az ún. „athéni flis”-sel. Az alagút állékonyságának meghatározásához a korábban a kis szilárdságú kőzetekre megalkotott osztályozás sem bizonyult megfelelőnek ezért a módszer továbbfejlesztésével a heterogén kőzettestre kifejlesztett osztályozás is elkészült (HOEK et al. 1998, MARINOS és HOEK 2000). A heterogén kőzeteket bemutató osztályozás alapjául az iszapkőtől homokkővön át a metamorfizált agyagpaláig mindenféle litológiai egységet magába foglaló „athéni flis” szolgált (3. ábra).

A Geológiai Szilárdsági Index alkalmazhatósága

A klasszikus kőzettest-osztályozások célja minden esetben a kőzettestben készített mütárgy (legtöbb esetben alagút) biztosításának, valamint fejtési (jóvesztési) paramétereinek meghatározása. A GSI-módszer nem alkalmas közvetlenül ezen paraméterek meghatározására, e mutató csupán a kőzettestek litológiai, szerkezeti jellegének és a

GSI meghatározása heterogén kőzettest esetén		TÁGOLTSÁGI FELÜLET ÁLLAPOTA				
a nyírtak a fő tektonikai hatásra bekövetkező alakváltozást jelölik		NAGYON JÓ, nagyon erdes és tude felülettel	JÓ, erdes, kisebb mállott felülettel	TÜRHEFTŐ simra, mérsékelten mállott és átalakult felülettel	GYENGE nagyon simra, helyileg csúszós felületek törmelékkel kitöltve	NAGYON GYENGE, nagyon simra vagy nagyon mállott felülettel puhla agyaggal kitöltve
A. Vastagpados, nagyon tömbös homokkő.		70	60	A		
B. Homokkő vékony iszapkő rétegekkel	C. Homokkő és iszapkő azonos mértékben		50	B	C	D
D. Iszapkő vagy iszapkő homokkő-rétegekkel	E. Gyenge iszapkő vagy agyagos pala homokkő-rétegekkel		40			E
F. Tektonikusan deformált, erősen hajlítot/töredezett, deformálódott agyagpala v. iszapkő töredezett és deformált homokkőrétegekkel, majdnem kaotikus szerkezettel.			30			F
G. Zavartalan iszap- v. agyag-pala esetlegesen keves nagyon vékony homokkőrétegekkel	H. Tektonikusan deformált iszap vagy agyagpala kaotikus szerkezettel és agyaglásúval. A homokkőrétegek kis darabokra estek szét.		20			G
			10			H

3. ábra. Geológiai Szilárdsági Index (GSI) heterogén kőzettestekre (flisre) kifejlesztve (MARINOS & HOEK 2000 nyomán)

Figure 3. Geological Strength Index of flysch, heterogeneous rock mass model (after MARINOS & HOEK 2000)

felület töredezettségi állapotának jellemzésére szolgál, meghatározása a természetes feltárások, útbevágások vagy alagutak kialakításakor feltáruló kőzettestek vizsgálatával lehetséges. Az így kapott számértékek a töredezettség gyakoriságával és az irányítottágukkal állnak kapcsolatban, a helyszínen ezek jól megfigyelhetők.

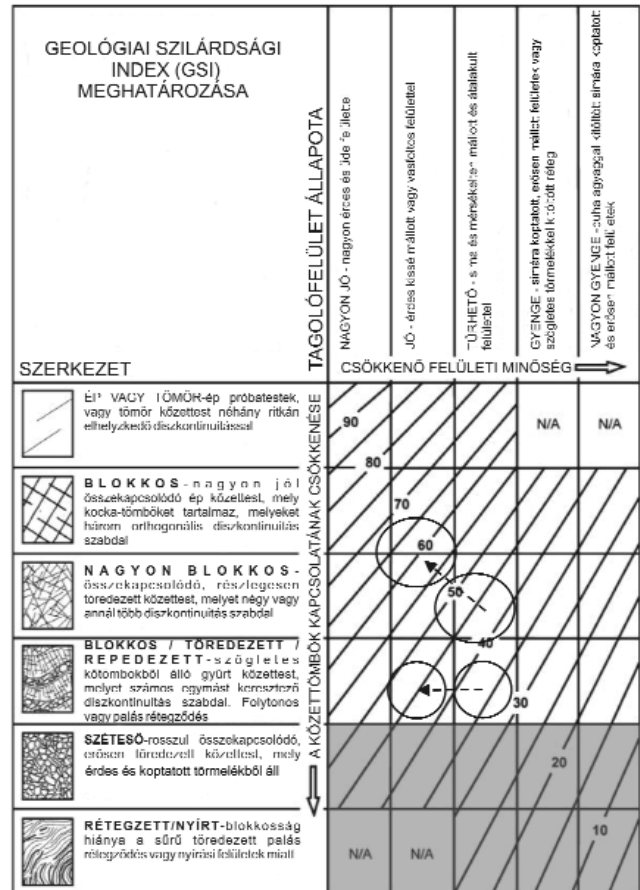
A GSI meghatározására elsősorban természetes feltárások, alagutak frontfejtési felületei alkalmasak, de fűrómagok anyagának vizsgálata alapján is lehetőség van a GSI értéknek közvetett becslésére. A felszíni feltárások és kőzetkibukkanások egy tervezés kezdeti fázisában rendkívül gazdag adatforrást jelentenek, igaz az így feltárt kőzetfelületen a környezeti hatások, mint például a mállás, illetve a kőzettest alkotóiban lejátszódó egyéb folyamatok olyan elváltozásokat hozhatnak létre, melyek hatására a kőzetfelület állapotában jelentős eltérés lehet a frissen feltárt kőzetfelülethez képest. Így az értékelésnél a felszíni, esetleg már elváltozott, kőzetet mutató feltárásokból nyert adatokat extrapolálni kell a mélységbeli in situ környezetre. Azaz a felszínen, a mállott zónában kapott GSI-értékeket relatív minimumnak kell tekinteni, és ehhez képest a mélyebben fekvő kőzettesteknél nagyobb értékeket lehet figyelembe venni. Ezt az extrapolációs folyamatot mutatjuk be a 4. ábrán. A mélyebben fekvő kőzettestek és kőzetkörnyezet állapotáról leginkább magfűrással tájékozódhatunk.

Szikla- vagy kőzetlejtők állékonysági elemzésénél is használható ez a kőzettest-vizsgálati módszer, hiszen azokat a helyeket keressük az ilyen elemzéseknél, ahol egy potenciális csúszólap létrejöhet. A GSI-értékek meghatározásakor különösen körültekintőnek kell lenni, amikor a potenciális csúszó- vagy elmozdulási felület több különböző minőségű kőzetzónát is érinthet.

A GSI osztályozási mutató azon feltételezésen alapul, hogy izotrópként viselkedő kőzettestben véletlenszerűen jelennek meg az adott irányokat mutató törések. Másképpen fogalmazva úgy is értelmezhetjük, hogy a kőzettest viselkedése független a terhelési irányoktól. Ebből következik, hogy a GSI-rendszer alkalmazása a markánsan meghatározható szerkezeti vonalakkal, törésekkel és tektonikai síkokkal jellemzett kőzettesteknél nem javasolt. Fontos megjegyezni, hogy a gyakorlati élet számára készült rendszerről van szó és nem földtani múltban létrejött tektonikai események értelmezése, vagy paleofeszültség-terek meghatározására kívánták alkalmazni a rendszer megalkotói. A tektonikai síkokat, mint tagoló felületeket értelmezi a GSI-osztályozás.

A GSI-mérőszám-tartományt gondos terepi megfigyelések alapján kell és lehet meghatározni. Az alábbiakban a terepen megfigyelhető legfontosabb tényezőket részletezzük.

Anizotropia: Az uralkodóan izotróp kőzettestekre alkalmazható paraméter. Leginkább a törések, tektonikai síkok iránya a döntő. Kritériumként szerepel, hogy a törések az adott vizsgált kőzetszakaszon ne kövessenek egy jellegzetes irányt, azaz ne legyen olyan jellegzetes orientációjuk, amely kettő vagy három tagoltság kombinációjából adódik. Ha a törésnél a kőzettest nyírószilárdsága helyett a tagoltság nyírószilárdsága hat, abban az esetben a GSI-t figyelmen



4. ábra. A GSI felszíni kibúvásokban megfigyelt értékei alapján a mélyebben fekvő üde kőzetekre visszavezetett GSI-értékek meghatározási módszere. Fehér zóna: az ebbe a zónába tartozó felszínen megfigyelt GSI-értékeket, alapos geológiai mérlegelés után, a nyílak mutatta irányba (balra és felfelé) eltolva kaphatjuk meg a mélyebben fekvő, még üde kőzettestre vonatkozó adatokat. Szürke zóna: a zóna mozgására csak korlátozottan vagy egyáltalán nincs lehetőség a kőzettest gyenge minősége miatt (általában breccásodott, milonitesedett vagy gyűrű zónák) (MARINOS et al. 2005 nyomán)

Figure 4. Geological Strength Index of near surface and deep seated freshly excavated rock masses, a comparison

In the white area the surface readings of GSI values can be shifted – only after scrupulous geological evaluation – along the arrows (up and left) to describe the GSI values of freshly exposed or deep seated rock masses. In the grey shaded area the shifting of GSI values of surface observations and freshly exposed or deep seated rock masses are very limited or not possible, since the rock masses plotted here have very poor quality (usually brecciated, milonitic or folded zones) (after MARINOS et al. 2005)

kívül kell hagyni. A GSI-érték számításánál viszont figyelmen kívül hagyható a jól definiált fő diszkontinuitás.

Tagoltságok megjelenése, kitöltöttsége: Egy kőzettest szilárdsági és alakváltozási tulajdonságai az ép kőzet egyes darabjainak egymással érintkező felületének típusától és annak jellegétől függ. A kőzettest tulajdonságokat jelentősen befolyásolják azok a tagoló felületek, amelyek az egyes kőzettömböket szétválasztják. A GSI-táblázat gyenge és nagyon gyenge kategóriával jelzett oszlopa alapján határozhatjuk meg a kitöltő anyaggal jellemzett tagoló felületekkel átjárt kőzettesteket. Amennyiben a tagoló felületekben gyakori a kitöltő anyag és a kitöltés vastag (néhány cm-t meghaladó vastagságú), vagy a tagoló felületként értelmezhető nyírási zóna agyagos repedéskitöltést tartalmaz, akkor a heterogén kőzettestekre vonatkozó GSI-ábrát ajánlott alkalmazni (pl. 3. ábra).

Víz jelenléte: A GSI direkt módon nem veszi figyelembe a víz jelenlétét, azt a modellezésnél, mint bemenő adatot kezel. Ugyanakkor meghatározásánál mindenképpen figyelembe kell venni azt a tényt, hogy a víz hatására a kőzettest nyírószilárdsága jelentősen lecsökkenhet. A nedvesség megjelenhet a tagoló felületekben a töredezett zónákban és a repedéskitöltő anyagokban is. Leginkább az erősen töredezett, gyenge és nagyon gyenge kőzettestre igaz az a megállapítás, hogy nedvesség jelenlétében a GSI-érték jelentősen csökken, azaz balról jobbra tolódik el, ahogy azt az 5. ábra is mutatja.

Mállás: A mállott kőzeteknél a víz hatásához hasonló jelenséget figyelhetünk meg, azaz ugyanazon kőzet üde és mállott változatára vonatkozó GSI-érték eltolódást mutat, a mállott kőzettestek a jobb oldali mezőben helyezkednek el (5. ábra). Mállás során az eredetileg még ép kőzetalkotókat is érheti elváltozás (pl. gránit földpátkristályait), amit a mechanikai modellalkotásnál veszünk figyelembe. Azon mállásos folyamatoknál, ahol a mállás már a kőzettest szer-

kezeti elemeit is elérte és mélyebb mállott zónát eredményezett, az adott kőzet már olyan képződménynek tekintendő, ahol a GSI-rendszer nem alkalmazható.

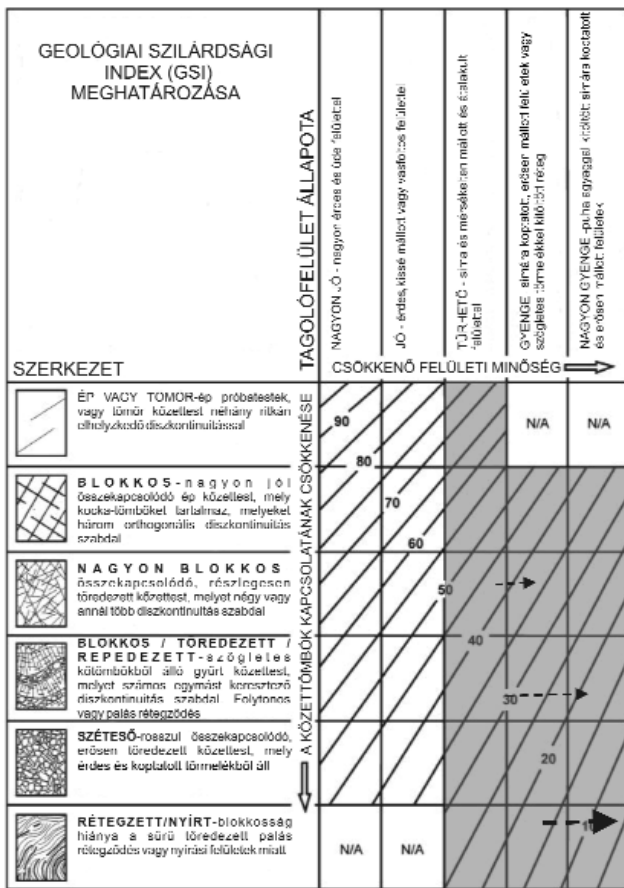
Heterogén és litológiailag változatos üledékes kőzetek: Napjainkban a GSI-rendszer a keményebb kőzetek közé (pl. homokkő, mészkő vagy kvarcit) beágyazódott, gyengébb minőségű kőzetek (pl. aleurolit, agyagpala vagy fillit) gyenge minőségű elnyíródott kőzettestjeire is alkalmazható. Flis osztályozásához kapcsolódó GSI-értékeket MARINOS & HOEK (2001) cikke részletezi, míg a litológiailag változatos, de tektonikailag zavartalan kőzettestek közül a molasz GSI-besorolását HOEK et al. 2005 munkájában tanulmányozhatjuk.

Kis szilárdságú kőzetek: A kevésbé tektonizált kőzetkörnyezetben megjelenő kis szilárdságú kőzetek közé sorolhatjuk a márgát, az agyagos kőzeteket, az aleurolitot, valamint a gyenge minőségű homokköveket. Ezek a nyugodt településűek, akkor kevés diszkontinuitással jellemezhető egyszerű tagoltságú kőzeteknek tekinthetők. Amennyiben jól rétegzettek és ezért réteglapokkal tagoltak, ezek a réteglapok jól definiálható diszkontinuitási felületként nem értelmezhetőek. Osztályozásuknál a „blokkos” és a „masszív” kőzettestekre jellemző GSI-értékekkel számolunk. A diszkontinuitás, még ha csak korlátozott mértékben van is jelen, akkor sem lehet a nagyon gyenge (általában gyenge vagy nagyon gyenge) besorolásnál jobb, így a GSI 40–60 közötti értéket vehet fel (MARINOS et al. 2005).

Geológiai Szilárdsági Index hazai alkalmazhatósága

A Geológiai Szilárdsági Index módszerét számos hazai kőzetfeltáráshoz lehet alkalmazni. Az alkalmazhatóságot csak az korlátozza, hogy viszonylag kis mértékű a feltártság és szikla környezetbe kevés bevágás vagy alagút épül hazánkban. Mindazonáltal a hazai alkalmazhatóságot egy elterjedt, de viszonylag heterogén kőzetelőforduláson a Budai Márga Formációba tartozó kőzetek alapján mutatjuk be. Erre lehetőséget biztosít, hogy Budapesten, a budai oldalon számos esetben találkoznak a mélyépítési munkálatoknál Budai Márgával (pl.: Gellért-hegy É-i oldala, Várhegy, Rózsadomb) és az utóbbi években sok, de általában csak ideiglenes feltárás készült ebben a kőzetben. Talajmechanikai módszerekkel csak a Budai Márga erősen mállott, teljesen agyagosodott zónáinak mechanikai paramétereit lehet meghatározni, az általában heterogén Budai Márga kőzettestet a tradicionális kőzetmechanikai rendszerekkel is csak nehezen írható le (GÖRÖG 2007a). Vizsgálataink azt mutatják, hogy a heterogén Budai Márga kőzettestek jól leírhatók a GSI-módszer alkalmazásával, ugyanis a változatos (általában mészmárga és agyagmárga váltakozásából álló) kőzettestre a heterogén felépítést is figyelembe vevő rendszer használata előnyös.

A GSI-érték önmagában ugyan nem jellemzi a kőzettest szilárdságát, azonban fontos bemenő adata a Hoek–Brown-féle törési határállapotnak, amivel már meghatározhatóak a kőzettest mechanikai paramétereit. Tapasz-



5. ábra. A GSI értékének csökkenése túrhető és nagyon gyenge kategóriájú tagoló felületek estén víz és mállás hatására

Abban az esetben, ha tagolófelület nedves állapotú, a terepen megállapított GSI-értékek (zónát) jobboldali irányban szükséges elmozdítani (nyilak), mivel a víz hatására a tagolófelületek mechanikai tulajdonságai lecsökkennek. Minél gyengébb minőségű a kőzettest az elmozdítás mértéke annál nagyobb kell, hogy legyen (MARINOS et al. 2005 nyomán)

Figure 5. Decrease of GSI values at poor and very poor quality discontinuity system intersected rock masses by weathering and by water

When the discontinuities are moist or filled with water it is necessary to shift observed GSI values to the left (arrows), since water decreases the friction of discontinuity system and reduces the strength of the rock mass. The poorer the quality of the rock masses the longer the shift in values is necessary to apply (after MARINOS et al. 2005)

talataink szerint a Budai Márga üde állapotban általában kedvezően viselkedik és a hagyományos módszerekkel is könnyen leírható. Sok esetben nem ilyen egyszerű a helyzet, ugyanis előfordul, hogy a márga kőzettestbe változó vastagságban és sűrűséggel agyagrétegek települnek, és a márga tagoltsági repedésein keresztülszivárgó vízzel is számolni kell. Ilyen esetben a kőzettest értékelése összetettebb problémát jelent, és a hagyományos módszerekkel nehezen számszerűsíthető. A GSI-érték segítségével eddig az általunk vizsgált minden típusú Budai Márga kőzettest jól jellemezhető volt, és az összetettebb problémák is kezelhetőek voltak. Meghatározásakor figyelembe kell venni a tagoltságok sűrűségét, a felületek állapotát, a tagoltságok tágasságát és kitöltöttségét. Mindemellett a fentebb említett, közbetelepült, vékony agyagrétegek, illetve a víz hatása is jellemezhető a GSI segítségével.

A Budai Márga Formáció általában heterogén kőzettestnek számít, ugyanis a formáció kőzetei között megtalálhatók a közepesen szilárd mészmárgától (6. ábra, a) az erősen mállott, sokszor laminált nagyon gyenge kőzetfizikai tulajdonságokkal bíró agyagmárgáig (6. ábra, b) többféle állapotú és szilárdságú kőzetek. Ezért nehéz általános javaslatot adni a GSI-érték meghatározására Budai Márga kőzetkörnyezetben (GÖRÖG 2007b).

A GSI-táblázat oszlopai a tagoló felületek állapotának jellemzésére szolgálnak a nagyon jótól a nagyon gyenge állapotúig (utóbbi már puha agyaggal is kitöltött). A Budai Márga a legtöbb esetben kissé laminált szerkezetű és agyag-

tartalma is jelentős, így a tagoltsági felületi tulajdonságok alapján nem kerülhet a legjobb osztályba. Törési felülete a legkritikább esetben jellemezhető nagyon érdes felületként. A GSI-táblázat sorai a kőzettest szerkezetének jellemzésére szolgálnak az ép, tömörtől a vékonyan rétegzett, nyírt szerkezetig. Eddigi feltárásaink és tapasztalataink alapján minden típusú szerkezet megjelenhet a Budai Márga kőzettest esetében. A tagoltsági formák közül blokkos és széteső szerkezetű típusok is előfordulnak (6. ábra). Fúrásokból azonban teljesen tömör folytonos magdarabok is ismertek, amelyben akár 1 m hosszúságú, ép, tagoltságmentes szakaszok is azonosíthatók (7. ábra). Felszíni feltárásokban a Budai-hegységben a márga általában erősen töredezett, sokszor jól rétegzett (8. ábra).

A többi kőzethez hasonlóan a márgánál is a víz hatását a tagoltsági felületek rosszabb osztályba sorolásával vesszük figyelembe, amit az ábrán a besoroláskor, a jobbra való eltolással jelezhetünk, ugyanis víz hatására a tagoltsági felületek állapota romlik, így a GSI-érték is csökken (lásd. 5. ábra). Jó állapotú tömör vagy blokkos kőzettestek esetén a víz hatása a tagoltságok állapotára jóformán elhanya-



6. ábra. Eltérő tagoltságú és megjelenésű Budai Márga fúrásmintái a budai Várhegyről; a: blokkos, b: széteső tagoltságú

Figure 6. Different discontinuity systems of Buda Marl: a) blocky and b) disintegrated (cores are from the Castle Hill of Budapest)



7. ábra. Ép, szinte tagoltságmentes mészmárga (Budai Márga Formáció) a Gellért hegy É-i lábánál lemélyített fúrásban

Figure 7. Intact calcareous marl with a few widely spaced discontinuities (Buda Marl from a core drilled at Gellért Hill, Budapest)



8. ábra. Erősen töredezett szerkezetű, rétegzett márga nyílt feltárásban (alapozási gödör) a Hegyalja úton

Figure 8. Strongly disintegrated and bedded marl in an excavation pit (at Hegyalja street, Gellért Hill, Budapest)



9. ábra. A példaként bemutatott (6–8. ábra), eltérő megjelenésű Budai Márga kőzettestek elhelyezkedése a GSI-táblázatban

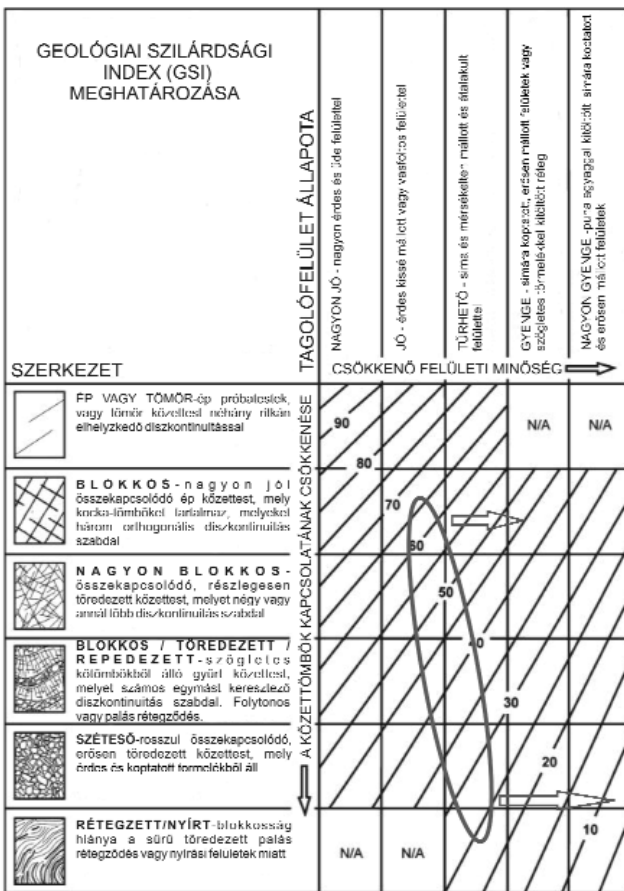
Figure 9. Various quality of Buda Marl rock masses in the GSI chart (see examples on Figures 6–8)

golható. Nagyon blokkos és töredezett kőzettestek esetén ez a hatás szintén nem túl jelentős, azonban márga esetén különösen, ha agyagtartalma magasabb, a víz figyelembe vételére mégis javasoljuk az egy oszloppal való eltolást. Széteső vagy laminált kőzettest esetén a törési felületek általában mállottak, agyagosabb jellegűek, ezért víz hatására ezek állapota sokkal kedvezőtlenebbé válik. A víz hatását ez esetben két oszloppal való eltolással vehetjük figyelembe.

A Budai Márga esetében nagyon gyakoriak a vékony agygréteg-betelepülések, ami szintén nagymértékben rontja a kőzettest állapotát és a GSI értékét. A GSI-érték meghatározásánál ezt szintén jobbra eltolással vehetjük figyelembe, ritka betelepülések esetén (kb. 10 m-enként) egy kategóriával célszerű a felületi tulajdonságokat rosszabbra venni. Sűrű betelepülések esetén (kb. 5 m-enként) a felületi tulajdonságokat, tapasztalataink alapján, nagyon gyenge, legjobb esetben gyenge állapotúnak célszerű venni.

Példaként a fentebb jellemzett általunk korábban vizsgált kőzettest osztályba sorolását ismertetjük. A 7. ábrán az általában tömör néhány részen inkább blokkos szerkezetű Budai Márga mészmárga anyagú változatát mutatjuk be, melynek a tagoltsági felületei általában érdesek néhány helyen simák. Ezek alapján a GSI-értéke 65–5 között lehet (9. ábra A zóna). A 6. ábra a részén bemutatott kőzettest szerkezete blokkos vagy nagyon blokkos lehet, tagoltsági felületei viszont jó állapotúak így a GSI értéke 50–60 között mozog (9. ábra B zóna). A 8. ábrán felszíni feltárásban látható a töredezett szerkezetű mészmárga, melynek a tagoltsági felületei általában tűrhetőnek nevezhető, sok helyen található limonitos kiválás, illetve néhol mállott felület is előfordul, amely inkább a gyenge kategóriába sorolható. Így a GSI értéke 35–40 között változik (9. ábra C zóna). A 6. ábra b részén bemutatott kőzettest szerkezete szétesőként jellemezhető, tagoltsági felületei általában a tűrhető, de néhány helyen a gyenge kategóriába sorolhatóak, így a GSI értéke 20–30 között lenne (9. ábra D zóna). Figyelembe véve az agyagos jelleget és betelepülést a táblázatban jobbra csúszik a kőzettest értékelése és ez esetben inkább a nagyon gyenge kategória alkalmazása javasolt, így a kőzettest tényleges GSI-értéke 10–15 között van (9. ábra E zóna) (GÖRÖG 2007a).

A fenti példakkal a legjellemzőbb Budai Márga kőzettestekre vonatkozó GSI-érték meghatározását kívántuk szemléltetni. Ezeket felhasználva, a 9. ábrán lefedett területek összegzésével és a BME Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék korábbi vizsgálatait valamint GÖRÖG (2007a) megállapításait is figyelembe véve, egy a Budai Márgára jellemző



10. ábra. A Budai Márga elhelyezkedése a GSI-táblázatban, a víz és a betelepült agygrétegek hatását a nyilakkal jelzett mértékű eltolással vehetjük figyelembe a kőzettestek értékelésénél (bővebb magyarázatot l. a szövegben)

Figure 10. Decrease of GSI values of Buda Marl when clayey beds are intercalated or discontinuity systems are filled with water. The arrows mark the direction of shift in GSI values (the length of the arrows are proportional with the rate of shifting)

zóna körülhatárolható és a GSI-rendszerbe beilleszthető (10. ábra). A zóna elhelyezkedése alapján megfigyelhető, hogy minél töredezettségesebb egy kőzettest általában a tagoltsági felületeinek állapota annál kedvezőtlenebb ezért a Budai Márga esetében ez a zóna ferde elhelyezkedésű. Vízrel telített Budai Márga kőzettest esetén a GSI-rendszerben ábrázolt zóna jobbra tolódik, és még jobban elferdül, amit a 10. ábrán a nyilakkal szemléltetünk, ugyanis a szerkezetileg egységesebb márgára kevésbé van hatással a víz, mint a töredezett, széteső szerkezetűre. A vékony agyagréteg-betelepüléseknek hasonló hatást lehet tulajdonítani. Azaz a 10. ábrán a vízéhez hasonlóan szemléltethető az eltolódás (GSI-érték csökkenés), és hasonló elferdülést okoz. Ez azzal magyarázható, hogy a kedvező szerkezetű márgában ritkábbak az agyagos betelepülések, mint a töredezett és széteső szerkezetűnél.

Következtetések

1. A Geológiai Szilárdsági Index (GSI) egy terepi megfigyeléseken alapuló olyan új kőzettest osztályozási módszer, amely alkalmazható heterogén kőzettestek állékonyság vizsgálatára is.

2. A GSI-értéket sohasem lehet egy adott konkrét számként értelmezni, hanem mindig tartományként lehet csak meghatározni.

3. A tagoltsági viszonyok és a tagoló felületek állapotának mérlegelése döntően befolyásolja a GSI-értékeket, csakúgy mint a víz vagy az agyagos kitöltő felületek megjelenése. Ki kell emelni, hogy a víz hatása nem egyformán jelentkezik különböző kőzettesteknél, sőt bizonyos esetekben el is hanyagolható.

4. A Budai Márgába tartozó kőzetfajták mérnökgeológiai szempontból heterogénnek tekinthetők, mind a tagoltságuk, mind a tagoló felületek jellemzői alapján.

5. A Budai Márga Formációba tartozó kőzettestek osztályozása a GSI-módszer alapján lehetséges, elsősorban a heterogén kőzetekre kifejlesztett és a hazai geológiai viszonyokra adaptált grafikonok segítségével.

Köszönetnyilvánítás

Hálásak vagyunk lektorainak Dr. GÁLOS Miklósnak és Dr. GRESCHIK Gyulának, akik kritikai észrevételeikkel nagyban hozzájárultak a cikk formai és tartalmi megújításához. Köszönettel tartozunk Dr. KLEB Bélának és Dr. PAÁL Tamásnak is hasznos tanácsaikért. A márga laborvizsgálataiban és a terepi munkákban EMSZT Gyula és ÁRPÁS Endre László segített. VÁSÁRHELYI Balázs köszönetet mond az OTKA (D048845 és K60768) valamint a Bolyai ösztöndíjnak a kutatás finanszírozásáért.

Irodalom — References

- BIENIAWSKI, 1973: Engineering classification of jointed rock masses. — *Transactions South Africa Institution Civil Engineering* **15**, 335–344.
- BARTON, N., LIEN, R. & LUNDE, J. 1974: Engineering classification of of rock masses for the design of tunnel support. — *Rock Mechanics Rock. Engineerig* **7**, 183–236.
- DEÁK F., MOLNOS I., KOVÁCS L. & VÁSÁRHELYI B. 2006: Bátaapáti radioaktív hulladékártó építése — Geotechnikai váгатdokumentálás. — *Mélyépítés* **4/17**, 7–13
- GÁLOS M. & VÁSÁRHELYI B. 2006: *Kőzettestek osztályozása a mérnöki gyakorlatban*. — Műegyetemi Kiadó, Budapest, 144 p.
- GÖRÖG P. 2007a: Characterization and the mechanical properties of the eocene buda marl. — *Central European Geology* **50/3**, 241–258.
- GÖRÖG P. 2007b: A geológiai szilárdsági index alkalmazása budai márga kőzetkörnyezetre. — In: TÖRÖK Á. & VÁSÁRHELYI B. (szerk.) *Mérnökgeológia-Kőzetmechanika 2007*. Műegyetemi Kiadó, Budapest, 25–40.
- HOEK, E. 1994: Strength of rock and rock masses. — *SRM News Journal*, **2/2**, 4–16.
- HOEK, E. 2000: Practical rock engineering. — www.rocscience.com
- HOEK, E., KAISER, P. K. & BAWDEN, W. F. 1995: *Support underground excavations in hard rock*. — Balkema, Rotterdam, 215 p.
- HOEK, E. MARINOS, P. & BENISSI, M. 1998: Applicability of the geological strength index (GSI) classification for weak and sheard rock masses — the case of the Athens schist formation. — *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* **57/2**, 151–160.
- HOEK, E. MARINOS, P. & MARINOS, V. 2005: Characterization and engineering properties of tectonically undisturbed but lithologically varied sedimentary rock masses. — *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* **42/2**, 277–285
- MARINOS, V., MARINOS, P. & HOEK, E. 2005: The geological strength index: applications and limitations. — *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* **64**, 55–65.
- MARINOS, P. HOEK, E. 2000. GSI: a geologically friendly tool for rock mass strength estimation. — In: *Proceeding GeoEng2000*, Melbourne, Technomic Publ. Lancaster, 1422–1446.
- MARINOS, P. HOEK, E. 2001: Estimating the geotechnical properties of heterogenous rock masses such as flysch. — *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* **60**, 82–92.
- PALMSTRÖM, A. 1995: *RMi — a rock mass characterization system for rock engineering purposes*. — Univ. Oslo, Norway, p. 400 (www.rockmass.net).
- VÁSÁRHELYI B. 2001: Új eredmények a kőzet- és talajmechanikában: a Hoek-Brown törési határállapot és a Geológiai Szilárdsági Index (GSI) bemutatása. — *Közúti és Mélyépítési Szemle* **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.
- Kézirat beérkezett: 2007. 07. 12.