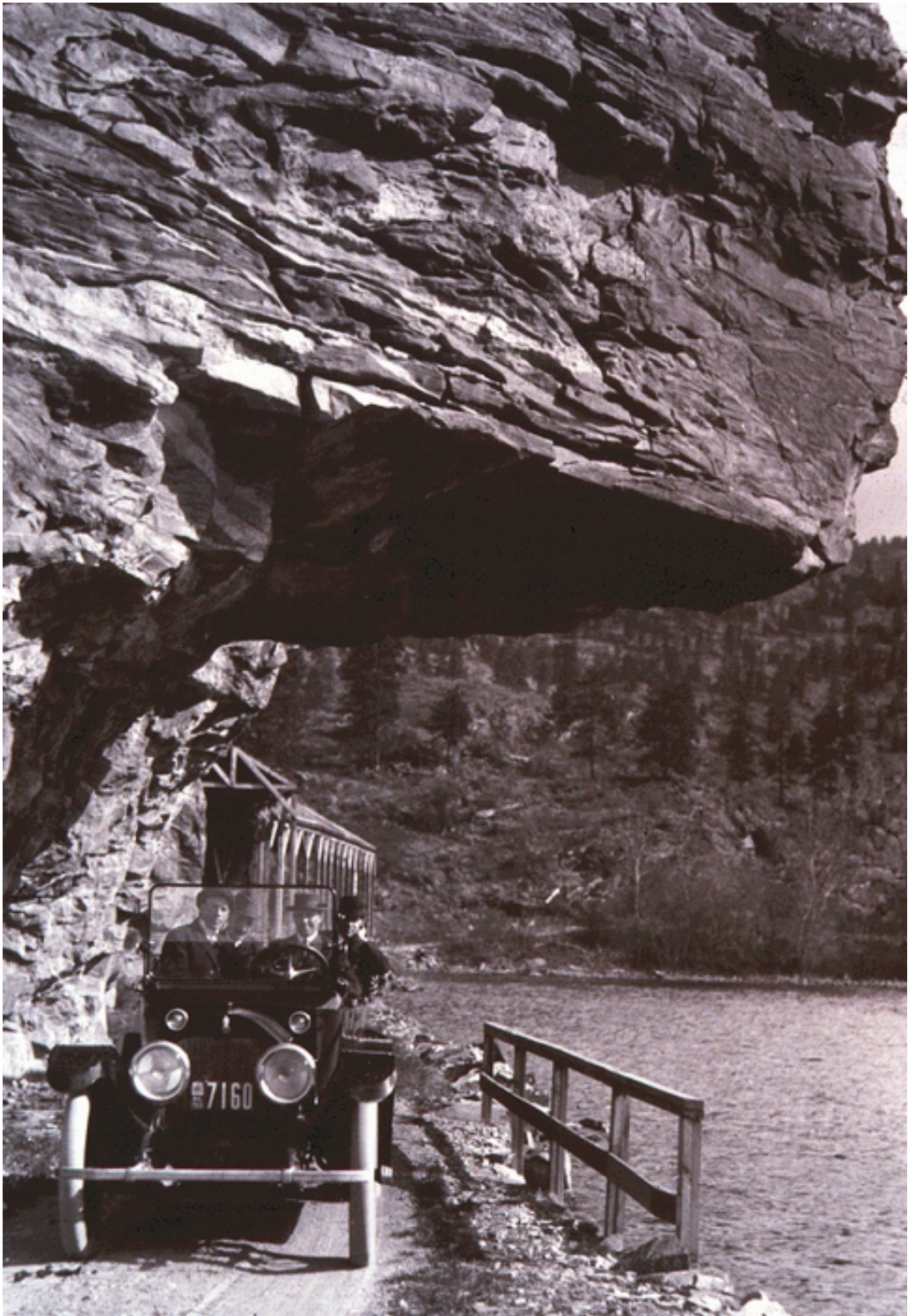


Gálos – Vásárhelyi

KÖZETTESTEK OSZTÁLYOZÁSA

AZ ÉPÍTŐMÉRNÖKI GYAKORLATBAN



GÁLOS MIKLÓS – VÁSÁRHELYI BALÁZS

**KÖZETTESTEK OSZTÁLYOZÁSA
AZ ÉPÍTŐMÉRNÖKI GYAKORLATBAN**

2006

A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Építőmérnöki Kar
Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék
kiadványa

Lektorálta:
Kovács László
okl. bányamérnök

ISBN

© Gálos Miklós – Vásárhelyi Balázs, Budapest 2006

Műszaki Egyetemi Könyvkiadó

TARTALOMJEGYZÉK

Előszó	7
Bevezetés	9
1. Mérnökgeológiai kőzetmodell	17
1.1 Mérnökgeológiai modellalkotás folyamata	17
1.2 A mérnökgeológiai modell elmei	18
1.3 Homogenitás, izotrópia és folytonosság a mérnökgeológiai kőzetmodellben	18
1.4 Irodalom	26
2. Kőzettömb szilárdságának meghatározása laboratóriumi és helyszíni vizsgálattal	27
2.1 Egyirányú nyomószilárdság meghatározása laboratóriumi vizsgálattal	27
2.2 A szilárdságot befolyásoló tényezők	30
2.3 Szilárdság alapján történő kőzetosztályozások	30
2.4 A rugalmassági modulus és az egyirányú nyomószilárdság közötti kapcsolat	32
2.5 Közvetett húzóvizsgálat	33
2.6 Szilárdság meghatározása helyszíni vizsgálattal és a pont-terheléses vizsgálattal	34
2.7 A pont-terhelés és az egyirányú nyomószilárdság közötti kapcsolat	37
2.8 Irodalom	38
3. Tagoltsági jellemzők meghatározása	39
3.1 Tagoltság kialakulása és rendszere	39
3.2 Tagoltság tágassága, nyitottsága	42
3.3 Tagoltság folytonossága és egymástól mért távolsága	44
3.4 Tagoló felületek felületi jellemzői és a kitöltöttségük	45
3.5 Tagoltság vagy tagoltsági rendszerek térbeli elhelyezkedése	
3.6 Tagoltság mértéke	49
3.6.1 Integrálgeometriai módszer	49
3.6.2 Az RQD érték a tagoltság mértékének meghatározására	54
3.6.2.1 Kőzettestek osztályozása az RQD érték alapján	56
3.6.2.2 Közvetett módszerek az RQD meghatározásához	56
3.6.2.3 Az alakváltozási modulus és az RQD közötti kapcsolat	60
3.6.3 C (Hansági) módszer	61
3.7 Irodalom	65
4. Tagoltság menti nyírószilárdság	66
4.1 Sima felület nyírási szilárdsága	66
4.1.1 Tapadás nélküli felületek közötti súrlódás	66
4.1.2 Tapadásos felületek közötti kapcsolat	67
4.2 Érdes felület nyírási szilárdsága	68
4.2.1 Patton modell	69
4.2.2 Jaeger modell	70
4.2.3 Barton modell	70
4.2.4 Pillanatnyi kohézió és súrlódási szög meghatározása	76
4.3 Irodalom	77

5. Kőzettest osztályozási módszerek	78
5.1 Terzaghi-féle kőzettest osztályozás	78
5.2 RSR (Rock Structure Rating) módszer	82
5.3 RMR (Rock Mass Rating) módszer	86
5.3.1 Az osztályozás tényezői és meghatározásuk	87
5.3.2 Osztályba sorolás RMR érték alapján	92
5.3.3 Kőzetterhelés mértéke, megtámasztás nélküli idő és szabad fejtési hossz	93
5.3.4 A kőzettest belső súrlódási szöge és kohéziója	94
5.3.5 Alakváltozási modulus és az RMR érték közötti kapcsolat	96
5.3.6 Kőzettest törési határgörbéje RMR ismeretében	97
5.4 RMR osztályozási módszer alkalmazása sziklarézsűknél – SMR módszer	98
5.5 Építmények alatti kőzettest teherbírásának meghatározása RMR módszerrel	102
5.6 Q index (Alagútépítési kőzetminősítő érték)	105
5.6.1 A kőzettest szerkezete	106
5.6.2 A kőzettömbök nyírószilárdsága	106
5.6.3 Feszültség-értékek	107
5.6.4 Súlyozott Q-érték meghatározása	109
5.6.5 Q tényező meghatározása geofizikai méréssel	109
5.6.6 Osztályozás Q-tényező alapján	110
5.6.7 Alakváltozási modulus meghatározása Q tényező ismeretében	112
5.7 Geológiai Szilárdsági Index (GSI) és a Hoek-Brown törési határállapot	113
5.7.1 A Geológiai Szilárdsági Index (GSI)	113
5.7.2 Hoek-Brown törési kritérium	115
5.7.3 Mohr-Coulomb paraméterek meghatározása	117
5.7.4 Alakváltozási modulus meghatározása GSI ismeretében	121
5.8 R _{Mi} tényező	122
5.8.1 Az R _{Mi} -nél használatos paraméterek	124
5.8.2 Az R _{Mi} meghatározása	124
5.8.3 Mérethatás	126
5.8.4 Alakváltozási modulus meghatározása R _{Mi} ismeretében	126
5.8.5 Az R _{Mi} használhatósága, előnyei és hátrányai	127
5.9 A különböző kőzettest osztályozások egymásba való átszámíthatósága	129
5.9.1 RMR-Q közötti kapcsolat	129
5.9.1 RMR-Q közötti kapcsolat	130
5.10 Irodalom	130
F1. Adatgyűjtés	132
F2. Példa a kőzettest osztályozások számítására	139
F3. Ajánlott irodalom	143

ELŐSZÓ

A geotechnikus, mélyépítő mérnöki gyakorlat egyik fontos szakterülete az összeálló kőzetkörnyezetben végzett tervezési és kivitelezési munka. Már az ilyen típusú kőzetek nevezéktana is meglehetősen bonyolult és ellentmondásos: sem az építőmérnöki gyakorlatban alkalmazott „összeálló”, illetve „kompakt”, sem pedig a bányászati zsargonban elterjedt „szálban álló” kifejezés nem fejezi ki pontosan a lényegét. Itt – a kézenfekvő magmatikus és metamorf kőzeteken kívül – olyan üledékekre kell gondolni, amelyek egykori talaj-szerű megjelenési formájukból vegyi, mechanikai, termikus hatások, illetve ezek kombinációinak eredményeképpen már átestek bizonyos diagenezisen és mechanikus viselkedésüket már nem lehet kielégítő módon leírni a talajmechanika eszköztárával. Az egyszerűség kedvéért a továbbiakban ezeket „összeálló” jelzővel említjük.

Nehéz egy diszkrét határvonalat kijelölni a talajok és az összeálló kőzetek között. A gyakorlati szempontok figyelembe vételével, e könyv céljai szerint azokat tekintjük a továbbiakban összeálló kőzetnek, melyek:

- lehetővé teszik, hogy belőlük kőzetmechanikai laborvizsgálat céljából próbatest vehető ki;
- normál laboratóriumi terhelőberendezéssel egytengelyű nyomószilárdságuk van ($\sigma_c > 1 \text{ MPa}$), és
- mechanikai tulajdonságaik különböző léptekben szignifikáns módon változnak, tehát a kőzettestben meglévő diszkontinuitások jelentős mértékben módosítják a mátrixion mérhető mechanikai (szilárdsági, rugalmassági és reológiai) viszonyokat.

Alagutak, föld alatti tárolóterek, kőbányák és bevágások sziklafalaival kapcsolatos mérnöki munkáink megkövetelik a létesítmény és kőzetkörnyezetének szerkezeti- és anyagszerkezeti tulajdonságainak alapos ismeretét. Ezeknél a létesítményeknél a földtani és a szerkezetépítő mérnöki ismeretek együttes használatára van szükség. Az összeálló kőzetkörnyezetben végzett mérnöki munkákat a kőzetmechanika alapozza meg. Magyar nyelven kőzetmechanikával foglalkozó összefoglaló könyvsorozat (szerkesztette: Asszonyi Csaba) első két kötete – 1. kötet: „A kőzetmechanika anyagszerkezeti és reológiai alapjai”; 2. kötet: „Kőzetkontinuumok mechanikája” – közel húsz évvel ezelőtt jelentek meg. A könyvekben a kőzetmechanika anyagszerkezeti és a kontinuum-szemléletű mechanikai alapismeretek kerültek tárgyalásra.

Összeálló kőzetkörnyezetben végzett mérnöki munkák tapasztalatai azt mutatták, hogy a nagyon változatos tulajdonságokkal rendelkező kőzetek különböző helyeken eltérő módon viselkedhetnek. A tervezést, a szerkezetkialakítást nehezíti, hogy a helyszíni mintavételezéssel gyűjtött minták laboratóriumi vizsgálatai során nyert szilárdsági jellemzők csak a tagolatlan, ép kőzetre jellemzőek, pedig a kőzeteket számtalan repedés, törés, kisebb-nagyobb elváló felületek tagolják. A tapasztalat azt mutatta és mutatja, hogy a kőzetösszlet viselkedését a tagolt kőzettest tulajdonságai és az adott térségben a kőzettestet érő földtani, vízföldtani, stb. hatások együttese határozza meg. Kérdés az, hogyan lehet ezt a nagyon sok tényezőt magába foglaló problémakört kezelni.

Nagy tervezési és kivitelezési tapasztalattal rendelkező kőzetmechanikusok kezdték el a kőzettesteket különböző tulajdonságaik figyelembe vételével osztályozni. Az általuk javasolt osztályozási módszerek abban különböznek egymástól, hogy a fontosnak ítélt tulajdonságokat hogyan szerepeltetik az általuk javasolt összefüggés-rendszerben, abban viszont egységesek, hogy ezernyi adat, sok-sok megfigyelés és tapasztalat áll minden összefüggés, képet, táblázat, tulajdonságot jelölő szám mögött.

Ebben a könyvben szakirodalmi adatok alapján összefoglalót adunk, a hazai mérnökgeológiai gyakorlatnak megfelelő kiegészítésekkel, a kőzettestek osztályozásának módszereiről, azok használatáról. Szeretnénk a jövő mérnökeit, a gyakorló mérnököket és a témakör iránt érdeklődőket megismertetni a mérnökgeológiának, a gyakorlati kőzetmechanikának ezzel a dinamikus fejlődő szakterületével. Az itt összefoglalt ismeretek könnyebbé teszik az eligazodást a szakirodalomban megjelenő kőzetmechanikával foglalkozó anyagokban is. Ne felejtjük el, hogy a geológusok, ezen belül is a mérnökgeológusok és a mérnökök (mind építő, mind bányamérnökök), beruházói-, tervezői, kivitelezői és üzemeltetői munkakörben dolgozó mérnökök egymásra utalt tevékenységének eredménye az elkészült mű, a mérnöki alkotás, melynek megvalósításához hatalmas szellemi tőke szükséges. Ennek a szellemi tőkének része kell, hogy legyen, a kőzettestek osztályozásával kapcsolatos ismeretanyag.

Jelen könyvnek nem célja (terjedelmi okokból nem is lehet) a mérnökgeológiai-geológiai alapok bemutatása – megírásakor feltételeztük, hogy a BME Építőmérnöki Karán folyó mérnökgeológiával kapcsolatos tantárgyak ismeretanyagával már rendelkezik az olvasó.

A könyvnek megírását és megjelenését az OTKA D048645 számú, „A kőzettest mechanikai állandóinak változása a kőzet állapotának és tagoltsági rendszerének függvényében” című kutatási program támogatta, melyért ezúton mondunk köszönetet, valamint jelentős segítséget nyújtott Vásárhelyi Baláznak az MTA Bolyai ösztöndíja is. Külön köszönettel tartozunk a MECSEKÉRC ZRt. Geotechnikai Irodájának munkatársainak is (elsősorban Deák Ferencnek és Molnos Imrének), akik a bátaapáti kis- és közepes aktivitású hulladéktároló feltáró lejtaknáinak tapasztalatai alapján tanácsokkal látták el a Szerzőket. Külön köszönettel tartozunk Kovács László okleveles bányamérnöknek, aki a lektori munkát lelkiismeretesen végezte el.

Budapest, 2006. szeptember 30

Gálos Miklós
Vásárhelyi Balázs

BEVEZETÉS

Közetkörnyezetben végzett mérnöki munkáink során az előkészítéstől a tervezésen és a kivitelezésen keresztül a földtani környezet és a mérnöki alkotás szoros kölcsönhatásban van. A mérnök feladata, hogy a létesítmény és a közetkörnyezet közötti kölcsönhatást, a kölcsönhatás elemeinek ismeretében, lehetőleg a részletkérdésekre is tekintettel, sikeresen kezelje. Ehhez az szükséges, hogy mind a létesítmény, mind pedig a közetkörnyezet anyagi (fizikai – ezen belül elsősorban mechanikai – és vegyi) tulajdonságait jól ismerje.

Az összeálló közetben végzett mérnöki munkák a mérnökgeológiának és a geotechnikának külön szakterületét képezik (angolul erre külön kifejezés is van: rock engineering). Gyűjtőnéven a különböző összeálló közetkörnyezetben végzett munkákat sziklamunka megnevezéssel használjuk. Ide sorolhatjuk mindazokat a mérnöki feladatokat, amelyeket a különböző szelvényű föld alatti létesítmények kialakításával, az alagutak építésével, alapozással, a hulladéktárolók építésével és üzemeltetésével, a kis-, közepes- és nagy aktivitású nukleáris hulladékok ideiglenes- és végleges lerakóinak elhelyezésével, valamint a természetes- és mesterségesen kialakított sziklarézsűk állékonyságával kapcsolatosan kell a közetkörnyezet adottságainak figyelembe vételével elvégezni.

A mérnöki munka változást hoz létre földkéreg egyensúlyi állapotában. A földtani szemlélet léptéke szerint ugyan csak kis területre kiterjedően, a mérnök beavatkozik abba az egyensúlyi állapotba, amelyet a földtani, geológiai folyamatok alakítottak ki. A létesítmény tervezésénél és kivitelezésénél a már kialakult feszültségi állapotok megváltozásával, az erők átrendeződésével számolni kell, továbbá vegyi jellegű változások is felléphetnek.

A feszültségek hatására létrejövő alakváltozások tehát a kőzetösszlet anyagi tulajdonságaitól függenek, amelyeket a szilárdságtanban megfogalmazott anyag törvényekkel törekszünk leírni. Természetes állapotban, illetve mesterségesen létrehozott helyzetben a kőzetösszlet saját tömegéből adódó, vagy egyéb, például tektonikai, szeizmikus, duzzadási, vagy más erőhatásra kialakuló részleges, vagy a teljes kőzettömegre kiható tönkremenetel, szintén a kőzetösszlet anyagi tulajdonságainak függvénye.

A közetkörnyezet anyagi tulajdonságainak megismerése és azoknak a mérnöki munka számára kezelhető formába rendezése a mérnökgeológia feladata. Ebben a szemléletben a közetkörnyezet építőanyag, amelyben, illetve amelyből a mérnöki szerkezetek készülnek.

A földtani környezet és a mérnöki létesítmény kölcsönhatásának kezelését a közetkörnyezet célnak megfelelő ismerete alapozza meg. Az ismeretek megszerzésének módszereit a mérnökgeológia tárgyalja. A nyert eredményeket a kőzetmechanika a saját szemléleti rendjében használja. A közetkörnyezet viselkedésének számításba vételezéséhez a kőzetmechanika a szükséges általánosításokat 0-1. ábrán bemutatott folyamat eredményeként kimunkált kőzetest-osztályozással teszi meg.

Az első, mai értelemben vett mérnökgeológiai kőzetest-osztályozás Ritter (1879) nevéhez fűződik, aki az alagútépítésben szerzett gyakorlati tapasztalatait írta le, főleg a biztosítás tervezéséhez. Lényegében ez a szemlélet tekinthető a mérnökgeológiai kőzetest osztályozás alapjának. A legelterjedtebb kőzetest-osztályozási módszereket a 0-1. táblázatban mutatjuk be, melyek közül a jelentősebbeket, leggyakrabban használtakat e könyvben külön-külön is elemzünk.

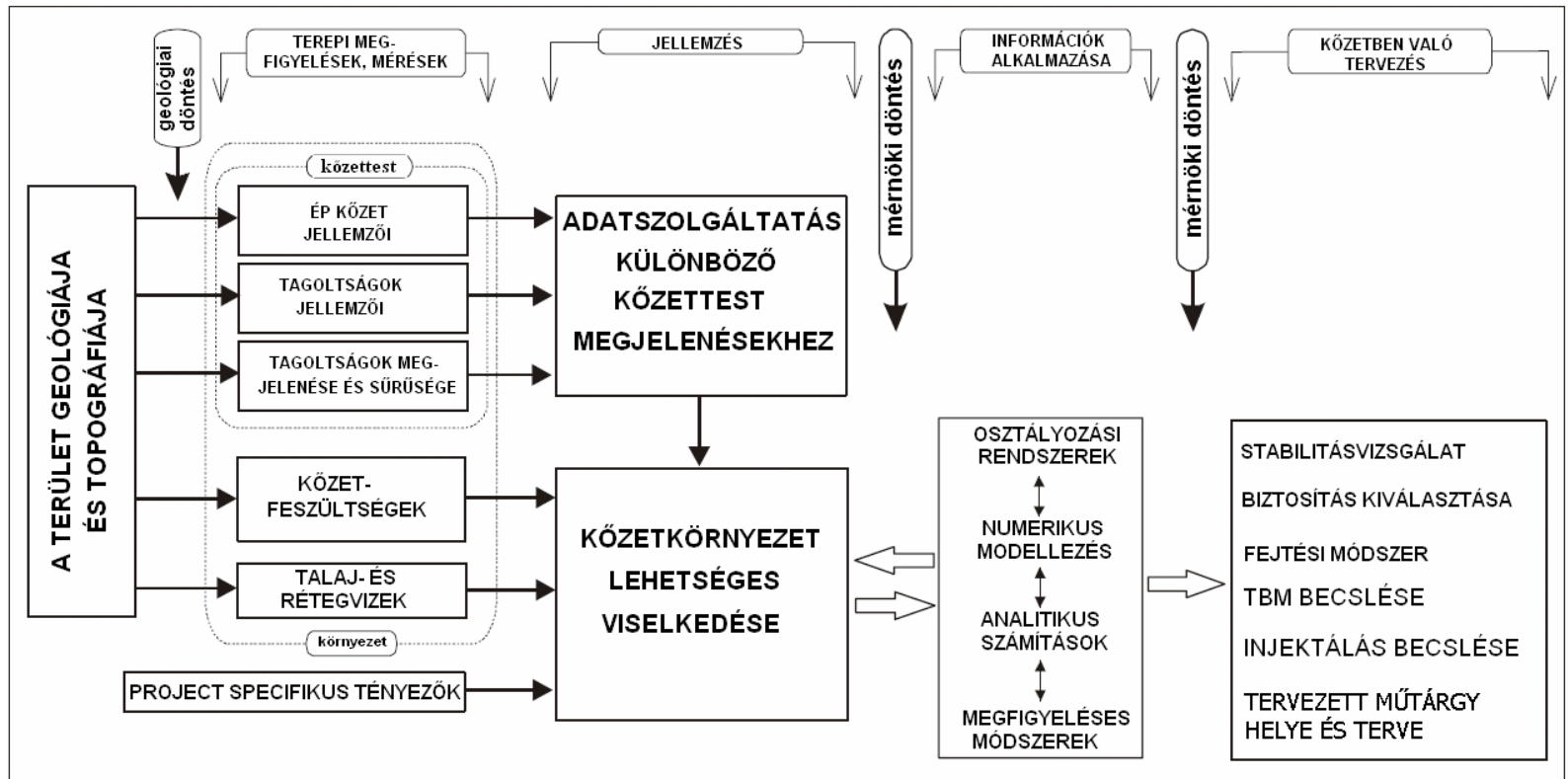
A mérnöki munkák során tett megfigyelések alapozták meg a különböző kőzettest osztályozási módszereket. Egy-egy módszer szerinti osztályba soroláskor vigyázni kell, hogy miben más, vagy miben hasonló a kapott eredmény a többi vizsgált esetenél tapasztaltakkal. Természetesen a különböző osztályozási rendszerek más-más paramétereket hangsúlyoznak. A javaslatot tevő tapasztalatai, szemlélete tükröződik az osztályozási mód szerinti számítási, besorolási összefüggésében. Ebből adódik, hogy ma már lehetőleg minél több osztályozási móddal vizsgáljuk meg a tervezett műtárgy kőzetkörnyezetét, mivel mindegyik más-más tulajdonságot tekint fontosnak, más-más tényező hatását emeli ki, így a kapott eredmény segíthet a pontosabb modellalkotásban.

Az elmúlt 50 évben az osztályozási rendszerek jelentős fejlődésen mentek keresztül, melyre kihatással voltak az újabb alagútépítési technológiák, valamint a számítástechnika (numerikus módszerek) fejlődése. Jelentősen segítette ezt a mérnöki tudományágat még az építési anyagtudományok új kutatási eredményei – itt elsősorban a lőttbeton technológia rohamos fejlődésére, az alagútfúró gépek (TBM) térhódítására, valamint a robbantásos fejtési módokban bekövetkezett változásokra kell gondolni. Fontos viszont tudnunk, hogy a kőzettest osztályozások szélsőséges állapotokban általában gyakorlatilag használhatatlanok.

A legtöbb sok-paraméteres kőzettest-osztályozási módszert az építőmérnöki gyakorlatból (főleg alagútépítésből) fejlesztették ki, amelyekben a kőzettest mérnökgeológiai jellemzői szerepelnek. A különböző osztályozási rendszerek más-más paramétereket hangsúlyoznak. Természetesen, mint minden módszer, ezek is csak közelíteni tudják a valóságot, segítséget nyújthatnak a tervezéshez, de nem mindenhatóak – minden munkának megvan a maga specialitása, amire külön figyelni kell, ami eltér az átlagostól, vagy akár a megszokottól – nem tekinthetők. Még azt is tapasztalhatjuk, hogy az egyes módszerek ellentétes eredményt adnak. Mégis fontos a kőzettest osztályozások ismerete a kőzetkörnyezetben való építkezés szempontjából, mivel az itt tárgyalt módszerek segítenek minket:

- a geológusok, a mérnökök, a beruházók, a tervezők, a kivitelezők közötti jobb párbeszédben;
- a mérnöki megfigyelések rendszerezésében, ahol a tapasztalat és az elmélet által levont következtetéseket hasznosíthatjuk;
- a kőzet kvantitatív tulajdonságának leírásában;
- és nem utolsósorban a megszerzett újabb tapasztalatok rendszerezésében, az eddigi ismeretanyagunkkal való összehasonlításban.

Mint minden kvalitatív módszernél, a kőzettest osztályozásnál is két érték közé kell a mércét helyezni: a kitűnő minőségű, ép, nagy szilárdságú kőzet és a leggyengébb, mállott, teljesen széttöredezett kőzet közé. A többdimenziós problémát (mely a kőzettömbök mállottságától kezdve a tagolófelületek állapotán át a víz jelenlétén keresztül számos elemet foglal magában) egy jellemzőre kell redukálni, melynek értékét a tervezett alagút-űrszelvényvel és jövesztési (fejtési) móddal összevetve adhatjuk meg a szükséges biztosítás módját és mértékét.



0-1. ábra. Megfigyelések, mérések és osztályozások alkalmazása a kőzetmechanikában (Stille & Palmström, 2003)

0-1. táblázat. A fontosabb kőzettest osztályozási módszerek és azok formája valamint alkalmazhatóságuk típusa (Palmström 1995, Vásárhelyi 2004)

A dőlt betűvel jelzetteket a könyvben részletesen tárgyaljuk.

Osztályozás neve	Szerző és időpont	Formája és típusa*	Főbb alkalmazás
<i>Kőzetterhelés</i>	Terzaghi, 1946	f: leíró és viselkedést bemutató t: speciális	Acél megtámasztás tervezése alagutakhoz
Megállási idő	Lauffer, 1958	f: leíró t: általános	Bemenő adat alagútépítéshez
Új Osztrák Alagútépítési Eljárás (NATM v. NÖT)	Rabcewitz, Pacher & Müller, 1958-1964	f: leíró és viselkedést bemutató t: speciális	Fejtési és tervezés különböző kőzetekben (talajokban); alagútépítési koncepció
Kőzettest osztályozás kőzetmechanikai szempontból	Coates, 1964, Patching & Coates, 1968	f: leíró, t: általános	Kőzetmechanikai bemenő adat
<i>RQD</i>	Deere, 1967	f: numerikus, t: általános	Alapvető a fúrómagok vizsgálatánál; más osztályozások bemenő adata
<i>C módszer</i>	Hansági, 1968	f: numerikus t: speciális	Fúrómagok vizsgálata, kőzettest szilárdsága
Kőzetek és talajok osztályozása	Deere <i>et al.</i> 1969	f: leíró, t: általános	A részekre és a kőzetblokkokra alapozottan ad információt
<i>RSR</i>	Wickham <i>et al.</i> 1972	f: numerikus t: speciális	Az alagutak megtámasztásának számításához
<i>RMR</i>	Bieniawski, 1973	f: numerikus t: speciális	Alagútépítés, bányászat, sziklarézsűk, alapozások tervezéséhez

Osztályozás neve	Szerző és időpont	Formája és típusa*	Főbb alkalmazás
<i>Q-módszer</i>	Barton <i>et al.</i> 1974	f: numerikus t: speciális	Mélyépítési szerkezetek megtámasztásához
Méret-szilárdság osztályozás	Franklin, 1975	f: numerikus t: speciális	A kőzet szilárdságán és a blokkok méretén alapul, főleg a bányászatban használják
<i>Topológiai osztályozás</i>	Matula & Holzer, 1978	f: leíró t: általános	Közlésre használják
Egységesített kőzettest osztályozás	Williamson, 1980	f: leíró t: általános	Közlésre használják
<i>Integrálgeometriai</i>	Rolofs & Beyers, 1981	f: numerikus t: általános	Tagoltság mértékének meghatározása
<i>Alap geotechnikai leírás</i>	ISRM 1981	f: leíró t: általános	Általános használatra
<i>GSI</i>	Hoek <i>et al.</i> 1995	f: numerikus t: általános	Alagútépítés, sziklarézsűk
<i>RMi</i>	Palmström. 1995	f: numerikus t: általános	Alagútépítés

*) Az alábbi definíciók használatával:

Formák (f):

Leíró: a bemenő adatok főleg leíró jellegűek

Numerikus: a bemenő adatok numerikus (számszerű) adatok az adott rendszer alapján

Viselkedést bemutató: a bemenő adat a kőzettest viselkedését adja meg az alagút környezetében

Alkalmazhatóság típusa (t)

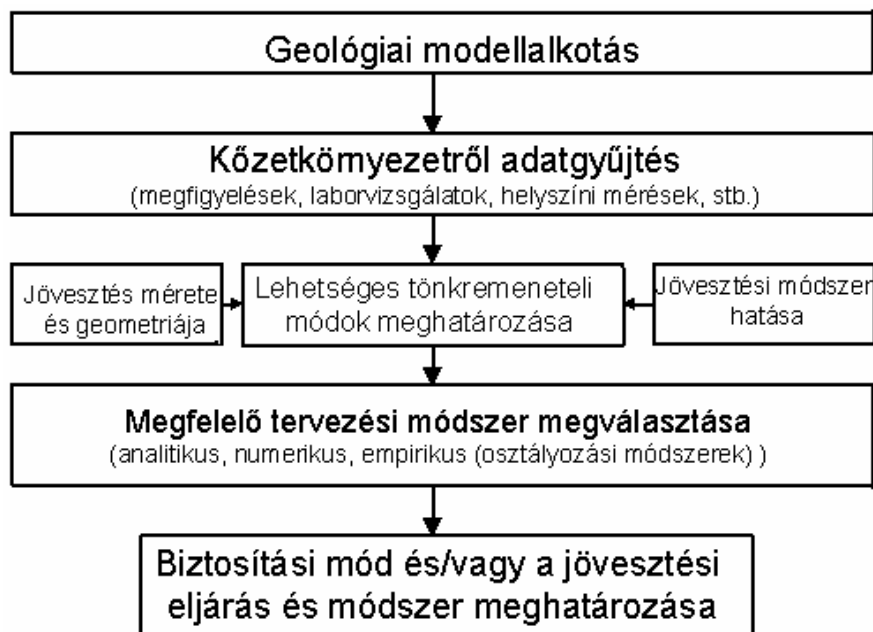
Általános: a rendszert általános leírásra fejlesztették ki

Speciális: a rendszer egy fajta alkalmazás esetére szolgál (pl: kőzet-megtámasztás)

Természetesen a ma használatos osztályozási módszerek használhatók mind nagyon jó, mind nagyon rossz állapotú kőzettestre, ugyanakkor a megbízhatóságuk általában a közepes tulajdonságú kőzettestben lényegesen jobb. Ennek oka, hogy a nagyon rossz minőségű kőzetkörnyezetben épített alagutak már a talajmechanikában használatos elméletek szerint méretezhetők, míg a legjobb minőségű kőzettestnél általában semmilyen biztosítási módra nincs szükség. Ki kell hangsúlyozni, hogy egy-egy osztályozási mód nem tartalmaz(hat) minden szóba jöhető paramétert, ezek együttes használata elengedhetetlen.

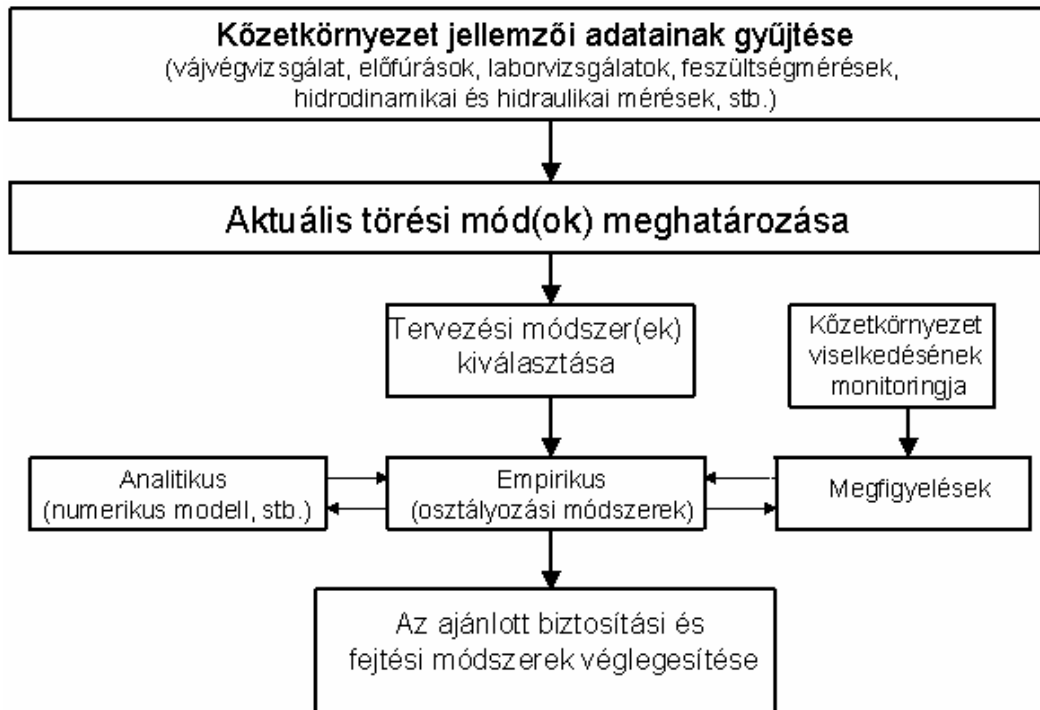
Az osztályozásnál mindig egy homogénnek tekinthető kőzetösszetletet vizsgálunk, amikor is csak korlátozott számú információ áll rendelkezésünkre. Ebből adódóan fokozott óvatossággal kell az információkat kezelni: el kell kerülni, hogy ugyanazt a tulajdonságot figyelembe vevő értéket többször is beszámítsuk, ugyanakkor az esetleges elhanyagolásokra is figyelni kell.

A kőzetkörnyezetben történő tervezésnél empirikus, numerikus, valamint analitikus módszereket együttesen (illetve egymást kiegészítve) alkalmaznak. A nemzetközi gyakorlatban a kőzettest osztályozáson alapuló empirikus módszerek a legnépszerűbbek, valószínűleg azért, mert alapvető céljuk az egyszerűsítés és képesek a geológiai és geotechnikai bizonytalanságok kezelésére is. Az empirikus felfogással készített alagútépítés tervezési folyamatábráját mutatja a 0-2. ábra. Felhasználva a feltáró szakasz eredményeit, a bemenő adatok korrekciójával, újra és újra számolva, kell a tervezést végrehajtani.



0-2. ábra. Az empirikus (kőzettest osztályozást figyelembe vevő) tervezési mód folyamatábrája (Stille & Palmström, 2003)

A kivitelezés szakaszában mind az alagutaknál (vágatoknál), üregeknél, mind pedig a szerkezeti részek kapcsolódásainál, tehát minden fontosnak ítélt helyen, figyelemmel kell kísérni a kőzettest viselkedését. Az eredmények birtokában a kivitelezés alatt folyamatosan kell az elméleti eredményeket a valós feszültségviszonyokkal, elmozdulásokkal összevetni. Tehát ellenőrizve, állandóan újraszámolva kell finomítani az addig használt paramétereket. A nyert ismeretekkel folyamatosan korrigálni kell eredményeinket, visszszámolni az addigiakat. Ennek a munkának a folyamatábráját mutatjuk be a 0-3. ábrán.



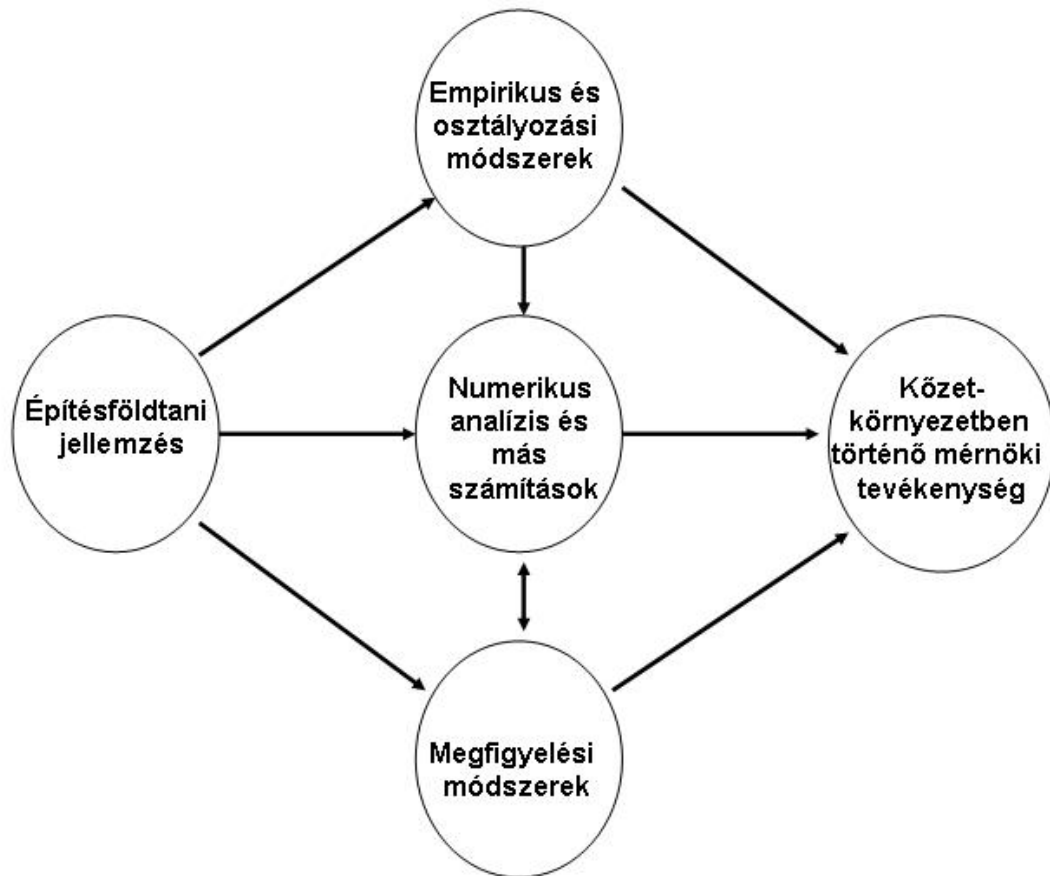
0-3. ábra. Az empirikus (kőzettest osztályozáson) alapuló alagúttervezés folyamatábrája a kivitelezési munka során nyert adatok pontosításával (Stille & Palmström, 2003)

A 0-4. ábra a főbb lépéseket foglalja össze, melyeket a kőzetkörnyezetben történő mérnöki tervezésnél figyelembe kell venni. Természetesen különböző építésföldtani viszonyok között a bemutatott folyamatábrán súlyponti eltolódások lehetnek, pl. blokkos kőzetkörnyezetben az empirikus módszer válhat uralkodóvá, míg duzzadó kőzetkörnyezet esetén a megfigyelés jelentősége nőhet meg.

A könyv felépítése megfelel annak folyamatnak, ahogyan a kőzettestek osztályozását végeznünk és hasznosítanunk kell. A könyv az alábbi fő egységekből áll:

- Az első részben a kőzetkörnyezet modellezését mutatjuk be, hogy a megfigyeléseket objektív értékekre váltva meg lehessen adni azt, hogy a kőzetmodellben mit tekintünk egységnek. A kőzetek anizotrópiája, inhomogenitása, töredezettsége, stb. indokolja, hogy a mérnökgeológiai kőzetmodell esetén a vizsgált egység választása több szinten történjen meg. A rendszer felépítését mutatjuk be az első fejezetben.
- A második részben a kőzettömb szilárdsági értékének meghatározását ismertetjük mind laboratóriumi, mind helyszíni vizsgálat alapján. Ennek a fejezetnek nem célja a kőzetmechanika ezen ágának átfogó tárgyalása, csupán a kőzettest-osztályozásnál bemenő adatként szereplő szilárdsági paraméterek meghatározását és ez alapján való osztályozásokat foglaljuk össze.
- A létesítmény kőzetkörnyezetében található diszkontinuitások, tagolások jelentősen befolyásolják azt, hogy milyen anyagjellemző értékeket lehet használni. Ezért a harmadik fejezet a tagoltságok jellemzőinek meghatározását tartalmazza. Részletezzük a tagoltságok osztályba sorolását; azok kialakulása, megjelenése, alakja, kitöltöttsége, stb. alapján.

- A tagolófelületek nyírási szilárdságával foglalkozik a negyedik fejezet.
- Az ötödik fejezetben a jelentősebb kőzettest osztályozási elméleteket foglaljuk össze. A fejezet végén külön részletezzük a helyszíni adatgyűjtés és az osztályozási módszerek közötti kapcsolatot is.
- A könyv végén lévő függelékben előbb egy mintapéldán keresztül mutatjuk be a kőzettest osztályozások használhatóságát, majd a kőzettest osztályozásoknál használható adatlapokat adunk közre. A harmadik függelékben a téma iránt érdeklődőknek a fontosnak ítélt szakirodalmakat ismertetjük.



0-4. ábra: Főbb lépések a kőzetkörnyezetben történő mérnöki tevékenység során (Stille & Palmström, 2003)

Irodalom

- Kovács L., Vásárhelyi B. (2006): A kőzettest osztályozások alkalmazása alagútépítésknél. Alagútépítési napok, Pécs, 93-97.
- Palmström, A. (1995): *RMi – a rock mass characterization system for rock engineering purposes*. Univ. Oslo, Norway, p. 400. (www.rockmass.net)
- Singh, B., Goel, R.K. (1999): *Rock mass classification – A practical approach in civil engineering*. Elsevier, p.267.
- Stille, H., Palmström, A. (2003): Classification as a tool in rock engineering. *Tunneling & Underground Space Techn.* **18**: 331-345.
- Vásárhelyi B. (2004): Kőzettest-osztályozási módszerek összefoglalása *Földtani Közöny* **134**(1): 109-129.

1. MÉRNÖKGEOLÓGIAI KÖZETMODELL ÉS ELEMEI

A műszaki gyakorlat megköveteli, hogy az adott létesítménnyel foglalkozó szakemberek a kőzetkörnyezetet szakterületüknek megfelelően, de egységes szemlélettel kezeljék. Ez csak úgy lehetséges, ha bizonyos általánosításokat végzünk és a jelenségeket az általánosítások felhasználásával modellezzük, azaz idealizáló feltevésekkel élünk. Az idealizáló feltevések térbeli modellben öltönek testet, amelytől megköveteljük, hogy a valóságot jól kövesse, hogy modell-elemei, vagy a modell összessége a mérnöki munka alapját képező számítási és méretezési, valamint összehasonlítási munkák elvégzésére elégséges információt nyújtson.

Jelen fejezet célja a mérnökgeológiai modellalkotás folyamatának és modell elemeinek bemutatása.

1.1 Mérnökgeológiai modellalkotás folyamata

A mérnökgeológiai modell részletessége a műszaki létesítmény, a földtani felépítés bonyolultságának, valamint az alkalmazás céljának függvénye. A mérnökgeológiai munkáknál olyan modellt használunk, amelynek térbeli rendszere elsősorban a földtani felépítést követi. Körülhatárolható térbeli, vagy síknak tekinthető elemei meghatározott térfogatúak (V_i), tömeggel rendelkeznek (M_i) és ezekhez az általunk választott tulajdonságok ($T_1...T_i...T_n$), vagy tulajdonságváltozások ($f(T_1)...f(T_i)...f(T_n)$) rendelhetők. E mérnökgeológiai modellt megfigyelési, feltárási és vizsgálati adatok alapján, a műszaki célnak megfelelően a földtani környezet feltételezett törvényszerűségeinek figyelembe vételével, mérlegelés alapján kell felállítani.

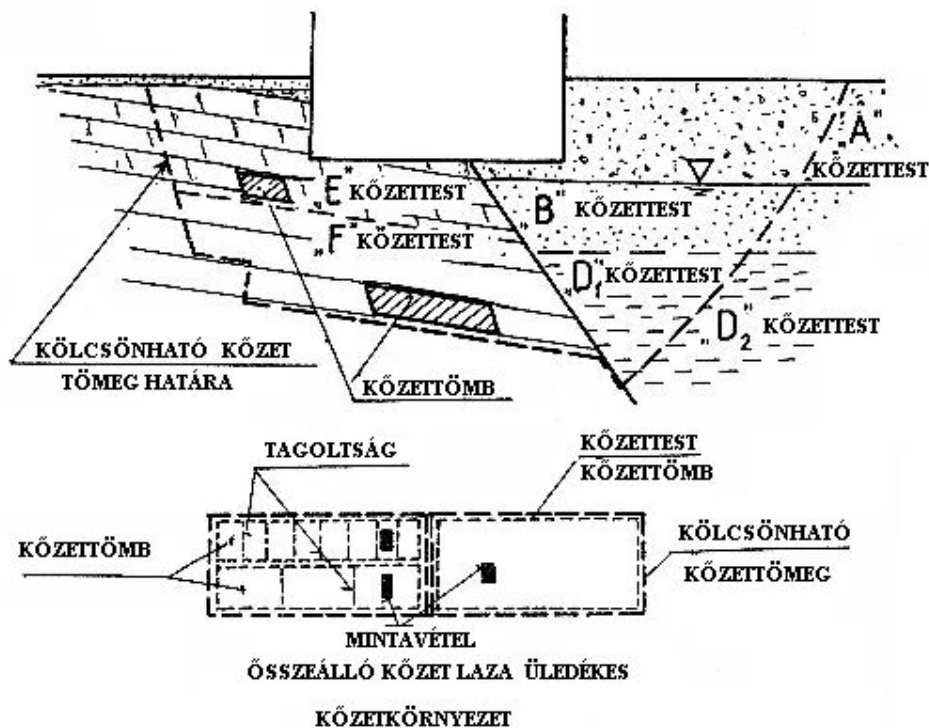
A mérnökgeológiai kőzetmodell elemei térbeli elemek, amelyeket határfelületek, (határfelületi elemek) választanak el egymástól, vagy a létesítménytől. A felbontáshoz szükséges határok meghúzása általában igen szubjektív, mert a határok felvételét sok tényező befolyásolja. Például, figyelembe kell venni a létesítendő műtárgy méreteit, a műtárgy környezeti hatásának határait, valamint a kőzet települését, rétegtani határait, kőzettani és kőzetfizikai tulajdonságokat, stb.

A modell-elemek fokozatosan kisebbedő elemekből állnak, minél kisebb egy modell-elem, annál pontosabban meghatározhatók annak a modell-elemnek a tulajdonságai, azaz annál jobban közelíti a valóságot. A modell-elemeket – természetesen mérnökgeológiai szempontból – homogénnek és izotrópnak tekintjük.

A mérnökgeológiai modellt a földtani környezetben a modell-elemekből kell megalkotni. Bármely térbeli modell-elem sajátosságai egy kisebb nagyságrendű térbeli és egy határfelületi modell-elem tulajdonságaiból tevődnek össze, azaz bármely modell-elem tulajdonságai levezethetők az alacsonyabb szintű (kisebb) modell-elemek tulajdonságaiból, amint azt az 1-1. táblázat és az 1-1. ábra mutat be.

1-1. táblázat. A mérnökgeológiai modell elemei (Gálos & Kertész, 1989)

<i>Térbeli modell-elem</i>	<i>Jellemző térbeli rendszer</i>	<i>Határfelületi modell-elem</i>
FÖLDTANI FORMÁCIÓ	Település	KÖZETHATÁR (kőzettelepülési határ)
KŐZETTEST		
KŐZETTÖMB	Szövet	TAGOLTSÁG (tagoló felület)
KŐZETALKOTÓK		(SZEMCSE-) KÖTÉS (anyagszerkezeti, érintkezési)



1-1. ábra. Mérnökgeológiai modell elemei (Greschik, 1986 alapján szerkesztette Gálos & Kertész, 1989)

1.2 A mérnökgeológiai modell elemei

Az alábbiakban a mérnökgeológiai modellek alapelemeit mutatjuk be kisebbedő sorrendben.

Földtani formáció

A mérnökgeológiai kőzetmodell legnagyobb, földtani alapon különválasztható egysége a *földtani formáció*. A földtani formáció a földkéregnek az a része, ahol a keletkezés

fő feltételei azonosak voltak. A különböző formációk egymáshoz fokozatosan, vagy éles határral kapcsolódnak a létrehozó földtani folyamatok jellegének megfelelően. Fokozatos átmenetet mutatnak a formációk akkor, ha a kőzetképződés körülményei fokozatosan, hosszú földtörténeti időszakok során változtak, éles az átmenet akkor, ha dinamikusak voltak a folyamatok, illetve ha a határok utólagos földtani változások hatására alakultak ki. A formációkat kialakulásuk helyéről, vagy arról a földtani korról szokásos elnevezni, amelyben képződtek, megemlítve a képződés körülményeit.

A mérnökgeológiai kőzetmodell a földtani formációkból az építőmérnöki tevékenység tárgyának figyelembevételével jelöli ki a feladat szempontjából számításba veendő kőzettömeget.

Kőzettömeg

A *kőzettömeg* a földtani formációnak az a téreleme, melynek határai mesterségesen, a mérnöki feladatnak megfelelően kerülnek kijelölésre. Alakját és a térfogatát a feladat műszaki paramétereinek, a kőzettömeget érő hatásoknak és a földtani körülményeknek együttes mérlegelésével lehet megadni.

A mérnökgeológiai modellezés a földkéreg egy tartományában, a kőzettömegben körülhatárolt olyan térelemekre vonatkozik, amelyeknek bármely pontjában a mértékadó kölcsönhatás még olyan jelentős lehet, hogy annak elhanyagolása meg nem engedett eltérést eredményezne. Ezt nevezzük kölcsönható (együttműködő, reaktív) kőzettömegnek, melynek határai a mérnöki feladatnak függvényében, mérlegeléssel kerülnek kijelölésre. A kőzettömeg egyes részeinek tulajdonságai igen eltérőek lehetnek, így a vizsgált kőzettömeg tulajdonságairól a megszokott értelemben nem beszélhetünk. A modell-elemek határai lehetnek:

- földtani, tektonikai, kőzettani határfelületek,
- a létesítmény épített elemeinek határai,
- szilárd földkéreg felszíne,
- szubjektív döntéssel meghúzott határok.

Kőzetest

A *kőzetest* olyan – általában tagolt – térelem, amely azonos kőzettani minőségű, tagolatlan kőzettömbökből áll. A kőzetest tulajdonságai részben a kőzetestet alkotó kőzettömbök tulajdonságaitól, részben a tagoltság mértékétől függenek. A kőzetestet alkotó kőzetek nemcsak anyagukban egyeznek meg, hanem a kőzetek tulajdonságaiban is (például mállottság, tagoltság, stb.).

A kőzetesteket egymástól olyan határfelületek választja el, amely mentén a kőzetminőség megváltozik, ez a változás lehet:

- éles (pl. két különböző kőzet határfelülete, tagoló felületek rendszerének változása, vetők, csúszólapok, stb.).
- fokozatos átmenetet mutató (pl. tagoló felület sűrűségének fokozatos változása, stb.). Ilyenkor a határ meghúzása szubjektív döntésen alapszik.

A kőzettestről feltételezhető, hogy az homogén és izotróp tulajdonságokkal rendelkezik. A kőzetestben általában a kőzestestre jellemző irányokban és hosszakban tagoló-felületek találhatóak. A kőzetestet tehát azonos minőségű tagolt térelem, melynek tulajdonsága (T_M) függ a kőzettömb tulajdonságától (T) és a tagoltsági tulajdonságoktól (T_t):

$$T_M = f(T, T_t) \quad (1.1.)$$

Ha a kőzetest tagolatlan, akkor

$$T_M = f(T) \quad (1.2.)$$

Kőzettömb

A *kőzettömb* (más néven kőzetblokk) a kőzetestnek az a része, amit tagoló-felületek határolnak. A kőzettömb tehát tagolatlan, homogén és izotróp rész, a mérnökgeológiai modell legkisebb eleme. Természetesen a kőzettömb tovább bontható még kőzetalkotó ásványokra, de ezek elemzése már általában nem tartozik bele a mérnökgeológiai vizsgálat szintjébe, ugyanakkor néhány esetben (főleg agyagásványok jelenlétének) szükséges lehet ezek pontos ismeretére.

A kőzeteket a műszaki kőzettanban képződésük szerint osztályozzuk – a Magyarországon használt fontosabb kőzeteket 1-2....1-4. táblázatok tartalmazzák. Az osztályozás fő csoportjai:

- magmás kőzetek (1-2. táblázat)
- üledékes kőzetek (1-3. táblázat)
- átalakult kőzetek (1-4. táblázat)

A kőzet vizsgálatakor a következőket kell meghatározni:

- ásványi összetétel, eloszlása, vegyi jelleg;
- kőzetalkotók megnevezése, nagysága, alakja;
- kora;
- kőzetszövet a műszaki kőzettan szöveti megnevezése szerint;
- porozitás jellege és mértéke;
- szín;
- megtartási állapot, mállottság;

1-2. táblázat. A mérnökgeológiában használatos fontosabb magmás kőzetek

MAGMÁS KŐZETEK					
Kőzetcsoport	Vegyi jelleg a szilíciumdioxid tartalom alapján				Szöveti jelleg
	Savanyú	Semleges	Bázikus	Ultra bázikus	
Mélyégi	GRÁNIT SZIENIT	DIORIT	GABBRÓ	<i>WEHLIT</i>	kristályos
Kiömlési	RIOLIT DÁCIT	ANDEZIT	BAZALT DIABÁZ		porfiros
Vulkáni tufák	RIOLITTUFA	ANDEZITTUFA	BAZALTTUFA		tufás
Meghatározó kőzetalkotó ásványok:	kvarc káliföldpát biotit horzsakő	plagioklász piroxén amfibol	plagioklász augit olivin	fém tartalmú szilikátok	

1-3. táblázat. A mérnökgeológiában használatos fontosabb üledékes kőzetek

ÜLEDÉKES KŐZETEK					
Törmelékes üledékek	Oldatból kivált, vegyi üledékes kőzetek				
Szemnagyság alapján:	Vegyi jelleg alapján:	tengeri eredetű			édesvízi
ALEUROLIT	Karbonátos	TÖMÖTT	DURVA	DOLOMIT	FORRÁSVÍZI
HOMOKKŐ		MÉSZKŐ	MÉSZKŐ		MÉSZKŐ
KONGLOME- RÁTUM	Szilikátos	HIDROKVARCIT			
BRECCSA	Szulfátos	GIPSZ, ANHIDRIT, ALABÁSTROM			
Átmenet a törmelékes és vegyi üledékek között: AGYAGMÁRGA , MÉSZMÁRGA					
ragasztott	Szövet	karbonátos (bioklasztos, ooidos, onkoidos, pelites, mikrokristályos)			

1-4. táblázat. A mérnökgeológiában használatos fontosabb átalakult kőzetek

ÁTALAKULT KŐZETEK					
Vegyi jelleg / szerkezet	szilikátos				karbonátos
palás	AGYAGPALA	FILLIT	KVARCPALA		
tömbös	GNEISZ	AMFIBOLIT	KVARCIT	SZERPENTIN	MÁRVÁNY
Szövet	kristályos				

1.3 Homogenitás, izotrópia és folytonosság a mérnökgeológiai kőzetmodellben

A mérnökgeológiai modellben az egyes modell-elemek megítélését a homogenitás-inhomogenitás, valamint izotrópia-anizotrópia szempontjából az 1-5. táblázatban szemléltetjük. Az alábbiakban Gálos & Kertész (1981) ajánlásait figyelembe véve mutatjuk be a mérnökgeológiai modell-elemek mikor tekinthetők homogénnek, izotrópnak, valamint folytonosnak.

A mérnökgeológiai kőzetmodell elemei szempontjából a homogenitás és a heterogenitás, valamint az izotrópia és anizotrópia fogalmát a modell-elemeknek, mint térelemeknek nagysága; a műszaki feladat jellege és a létesítmény, valamint a modell-elem hatásmechanizmusa szerint, dialektikusan kell értelmezni.

1-5. táblázat. Homogenitás, izotrópia és folytonosság a mérnökgeológiai kőzetmodell rendszerében

HOMOGENITÁS					
MÉRLEGELESI SZEMPONT	FÖLDTANI FORMÁCIÓ	KŐZET-TEST	KŐZET-TÖMB	KRISTÁLYOS	ALKATTALAN
				KŐZET-ALKOTÓ	
Földtani					
Települési	<i>Heterogén</i>			<i>Homogén</i>	
Tagoltsági					
Kőzettani					
Anyagszerkezeti					
IZOTRÓPIA					
MÉRLEGELESI SZEMPONT	FÖLDTANI FORMÁCIÓ	KŐZET-TEST	KŐZET-TÖMB	KRISTÁLYOS	ALKATTALAN
				KŐZET-ALKOTÓ	
Földtani					
Települési	<i>Anizotróp</i>			<i>Izotróp</i>	
Tagoltsági					
Kőzettani					
Anyagszerkezeti					
FOLYTONOSSÁG					
MÉRLEGELESI SZEMPONT	FÖLDTANI FORMÁCIÓ	KŐZET-TEST	KŐZET-TÖMB	KRISTÁLYOS	ALKATTALAN
				KŐZET-ALKOTÓ	
Földtani					
Települési	<i>Nem-folytonos</i>			<i>Folytonos</i>	
Tagoltsági					
Kőzettani					
Anyagszerkezeti					

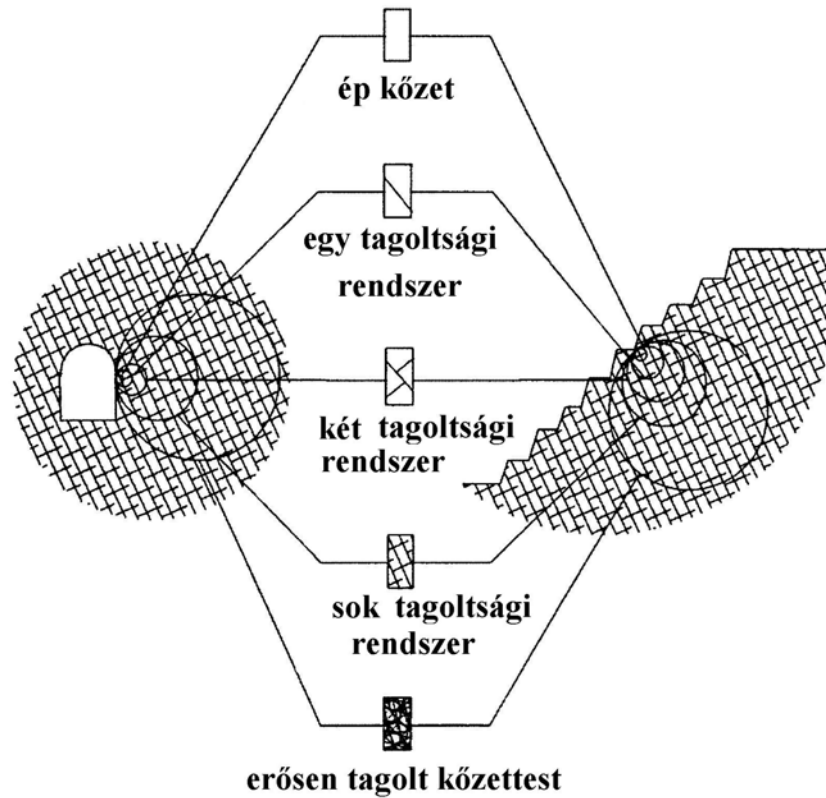
A modellalkotáshoz ezeknek az összetartozó fogalom-pároknak alapvetően földtani, ezen belül települési és tagoltsági, valamint kőzettani és anyagszerkezeti vonatkozásait kell tisztázni. E szemléletmódba kell illeszteni az építési feladat megvalósításához szükséges modell-elemekről alkotott képünket.

Elvileg minden mérnökgeológiai modell-elem heterogén és anizotróp. A kőzetmodell a feladat rendszerében akkor tekinthetjük homogénnek (kvázi-homogénnek), ha a szemlélet módja szerint, a feladat nagyságrendjében a homogenitást zavaró tényezők elhanyagolhatók. Hasonlóan az izotrópia is általában a műszaki sajátosságok szerint értelmezett kvázi-izotrópia lehet csak. E tényezők különbözően értelmezhetőek földtani, települési, tagoltsági, kőzettani és anyagszerkezeti szempontból.

Egy földtani formáción belül földtani szempontból minden modell-elem homogén, település szempontból csak a kőzettest és az annál kisebb modell-elemek azok. Tagoltsági szempontból a kőzettest lehet homogén (tagolatlan vagy egyenletesen tagolt), vagy heterogén; a kőzettömb és a kisebb modell-elemek tagolatlanok, így e szempontból homogének. Kőzettani szempontból a kőzettest (és a kisebb modell-elemek) általában homogének, kivételes esetben pl. a dolomit-mészke vagy kavics-homok változatokból álló kőzettest pedig heterogén. Anyagszerkezeti szempontból homogénnek csak a szabályos elrendezésű atomhalmaz, a kristály tekinthető, az alakatlan kőzetalkotó, valamint az összes többi modell-elem e szempontból már heterogén.

Az izotrópia vizsgálata során a földtani formációt minden szempontból anizotropnak tekinthetjük, a kőzettest földtani és települési szempontból lehet izotrop is, e szempontból a kisebb modell-elemek izotrópok. Tagoltsági anizotrópia csak a kőzettestben és a nagyobb modell-elemekben értelmezhető; míg kőzettani szempontból anizotrópia (pl. rétegzettség) már a kőzettömb léptékében is. Anyagszerkezeti szempontból csak az alakatlan, túlhűtött folyadéknak is tekinthető kőzetalkotó (pl. kőzetüveg) mondható izotrópnak, a kristályos kőzetalkotó anizotróp.

A földkéreg térelemeit általában kontinuumnak tekinthetjük, így a folytonosság érvényesülését csak egyéb szempontból vizsgáljuk, ahol a folytonosság megszakadásának a vizsgált szempont szerinti hirtelen változásokat tekintjük. Így települési szempontból a formáció, tagoltsági szempontból a kőzettest és a formáció már nem tekinthető folytonosnak, kőzettani és anyagszerkezeti szempontból a kőzettömb folytonossága sem mindig áll fenn. Bray (1967) mutatta ki elsőnek, hogy abban az esetben, ha a tagoló-felületek száma meghaladja a 10-et, a kőzettest viselkedése csupán 5 %-ban tér el a valódi homogén és izotróp viselkedéstől. Hoek és Brown (1980) bebizonyították, hogy a homogenitás igen erősen függ a próbatest méretétől, azaz a legheterogénebb kőzettestből is kivehető homogén minta. Belátható, hogy a kőzettest csak abban az esetben tekinthető homogénnek, ha kevesebb, mint két tagoltsági rendszert tartalmaz, vagy ha teljesen feltöredezett (azaz több tagoltsági rendszert tartalmaz). E két eset között inhomogén viselkedése miatt a kőzetkörnyezet általában nehezen modellezhető. Ezt mutatja be az 1-2. ábra.



1-2. ábra. Kőzetkörnyezet osztályozása a tagoltsági rendszerek száma szerint (Hoek, 1994)

Abban az esetben, ha a létesítmény kőzetkörnyezete egy, vagy két tagoltsági rendszert tartalmaz, mechanikai viselkedését homogén kőzettelként kezelni nem lehet. Erre mutatnak példát az 1-3. ábra fényképfelvételei, amelyeken egy homogénnek nem tekinthető kevésbé tagolt sziklarézsút, valamint egy homogén viselkedést feltételezhető, feltöredezett kőzetanyagú, az angolszász szakirodalomban bányát láthatunk. Az 1-4. ábra alagút esetében mutatja be ezt: a blokkos, kőzettömbökből álló kőzettel viselkedésénél csak egyedi kőzettömbök viselkedésével írható le, míg a feltöredezett, több tagoltsági rendszert tartalmazó kőzettel már homogenizálható.

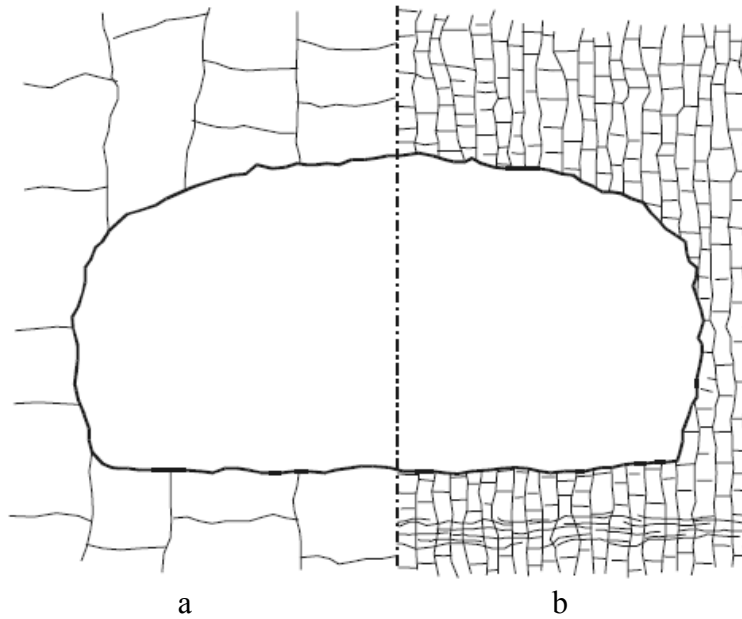


a



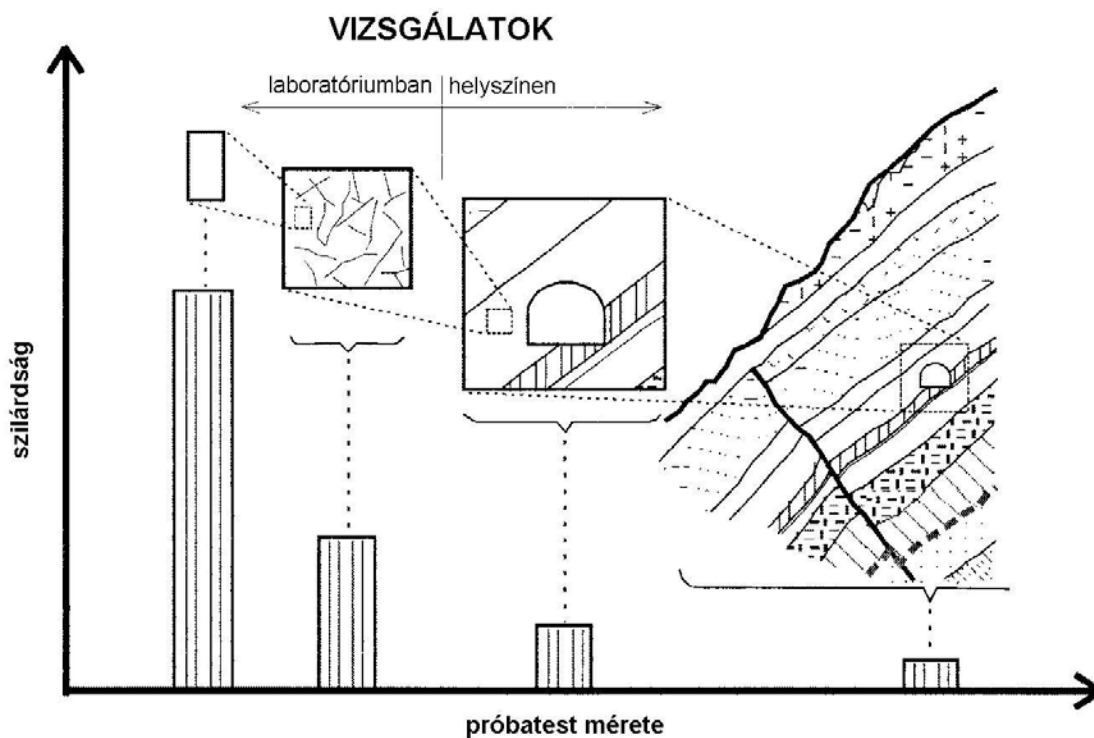
b

1-3. ábra. Csak egyedi kőzettömbök viselkedésével leírható (a), és homogénnek tekinthető (b) sziklarézsút (Hoek & Diederichs, 2006)



1-4. ábra. Példa a blokkos (a) és a feltöredezett (b) (Barton, 1990)

Különböző modellszinteken az elemek szilárdsági tulajdonságai nagyon eltérőek. Minél nagyobb egységet veszünk figyelembe, az elem annál kisebb szilárdsággal rendelkezik. A szilárdság modellszintenként történő változását mutatja az 1-5. ábra. A szilárdsági értékek ilyen nagymértékű változását a méterhatáson kívül az okozza, hogy a legalacsonyabb modellszintű elemekben nincs számottevő tagoló felület, míg a magas szintű modell-elemek esetén a szilárdsági érték meghatározásakor már a tagoltság fontos szerepet játszik.



1-5. ábra. A vizsgált modell-elem méretének hatása a szilárdságra (Palmström, 1995)

1.4 Irodalom:

- Bray, J.W. (1967): A study of jointed and fractured rock. Part 1. *Rock Mech. Engng. Geol.* **5-6**(2-3): 117-136.
- Gálos M., Kertész P. (1981): A mérnöki munkák környezetének modellezése – a mérnökgeológiai kőzetmodell. *Mélyépítéstudományi Szemle*, **31**(12): 540-545.
- Gálos M., Kertész P. (1989): *Mérnökgeológia*, – Kézirat, Tankönyvkiadó, Budapest.
- Greschik Gy. (1986): *Alapszabvány javaslat a Magyar Szabványügyi Hivatal számára*. Budapest, (Kézirat), előterjesztette MTA Talaj-, Kőzetmechanikai Bizottsága, Szabványosítási Albizottsága.
- Hoek, E. (1994): Strength of rock and rock masses. – *ISRM News Journal*, Vol. **2**(2): 4-16.
- Hoek, E., Brown, E.T. (1980): *Underground excavations in rock*. London, Inst. Min. Metall.
- Hoek, E., Diederichs, M. S. (2006): Empirical estimation of rock mass modulus. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, **43**: 203-215.
- Kertész P. (1985): *Mérnökgeológia*, Mérnöki Kézikönyv, **3**: 103-132
- Palmström, A. (1995): *RMi – a rock mass characterization system for rock engineering purposes*. Univ. Oslo, Norway, p. 400. (www.rockmass.net)



2. KÖZETTÖMB EGYIRÁNYÚ NYOMÓSZILÁRDSÁGÁNAK MEGHATÁROZÁSA LABORATÓRIUMI ÉS HELYSZÍNI VIZSGÁLATTAL

A műszaki, mérnökgeológiai gyakorlatban a kőzet, azaz a kőzettestet alkotó kőzettömbök egyirányú nyomószilárdságának ismerete az egyik legfontosabb anyagjellemző. Ha egy kőzetről beszélünk, az az első kérdés, hogy mekkora a nyomószilárdsága, mert ennek alapján történik osztályba sorolása, minősítése. Elsősorban a kőzet szilárdságát veszik figyelembe az alagút-fúró gép előrehaladási sebességének megbecslésénél, a várható kopások számításánál és a különböző fejtési módok optimalizálásánál is.

A kőzet szilárdsága azért nehezen definiálható, mert a kőzet a legritkább esetben tekinthető homogénnek és izotrópnak. A mért szilárdság értéket jelentősen befolyásolják a próbatest anyagszerkezeti hibái, melyek sok esetben szabad szemmel nem észrevehetőek: gyengébb zónák, zárványok, mikro-repedezettség jelenléte, anyagi folytonossági változások, stb., ezek iránya és nagysága. Jelentős befolyásoló tényező még a porózus kőzeteknél a folyadék (víz) esetleges jelenléte is, mivel ugyanaz a kőzet különböző telítettségében jelentős szilárdsági eltérést mutathat.

Ebben a fejezetben a kőzettömb egyirányú nyomószilárdságának meghatározására leggyakrabban használt módszereket mutatjuk be: a szabályos próbatesteken laboratóriumi körülmények között végzett, valamint a helyszínen, terepi megfigyelés alapján végzett mérések és az ún. pont-terheléses vizsgálatot. Kőzeteknek a nyomószilárdsági érték alapján való osztályba sorolás lehetőségét külön részletezzük. Jelen fejezetben nem térünk ki a kőzetmechanikában használatos többi szilárdsági vizsgálati módszerekre (pl. nyíró, triaxiális vizsgálatok, stb.), mivel a kőzettest osztályozásoknál bemenő adatként ezeket nem használjuk fel.

2.1 Egyirányú nyomószilárdság meghatározása laboratóriumi vizsgálattal

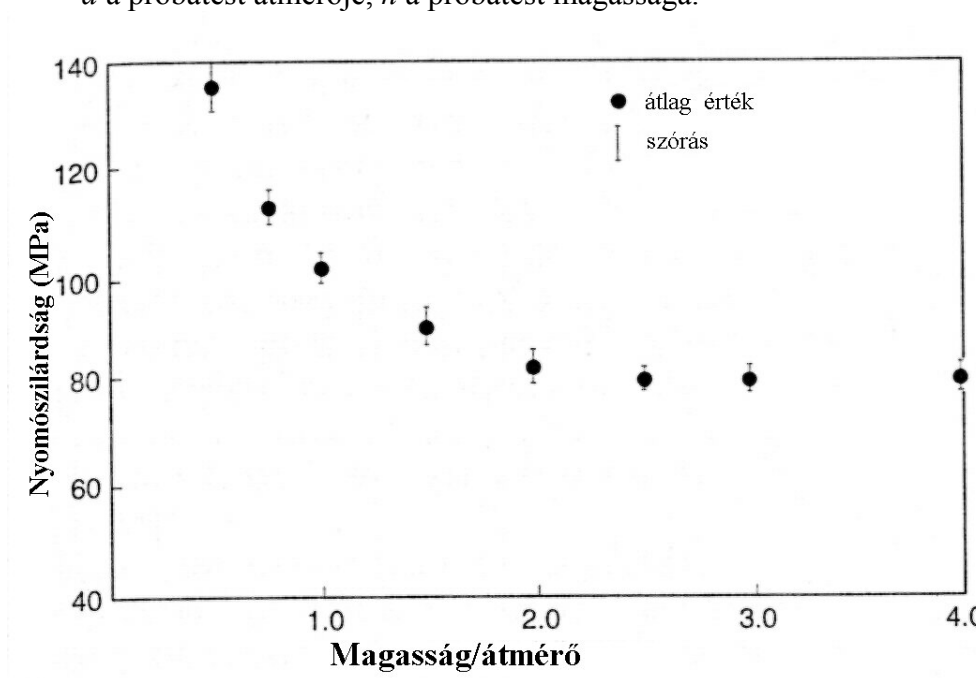
A kőzet egyirányú nyomószilárdságának meghatározására legáltalánosabban elterjedt módszer a henger alakú próbatesten végzett vizsgálat, mivel a fűrómagból a próbatest könnyen kialakítható, illetve a kőzettömbből laboratóriumban is ez a próbatest munkálható ki a legegyszerűbben. A henger alakú próbatestet lehetőleg 2:1-es magasság : átmérő arányú legyen, a korábbi hazai szabványok is ezt az arányt írták elő.

Az egyirányú nyomószilárdsági vizsgálat céljára kialakított henger alakú próbatestnél a mért érték a magasság:átmérő arányszám változására a legérzékenyebb. Ennek az az oka, hogy a nyomófelületeknél a keresztirányú alakváltozás gátlásából adódóan zavart feszültségviszonyok jönnek létre. Kisebb alaktényezőjű próbatest esetén a zavart zónák túl közel vannak egymáshoz, ami miatt a valóságtól eltérő eredményt kaphatunk.

Abban az esetben, amennyiben a magasság nagyobb, mint az átmérő kétszerese, gyakorlatilag nem változik a nyomószilárdság értéke, míg ennél kisebb arány esetén jelentősen nagyobb szilárdságot mérünk (2-1. ábra). A szabályos próbatesten mért nyomószilárdságot az amerikai szabvány (ASTM) a következő összefüggés alkalmazásával ajánlja a 2:1 arányú próbatesten mért értékre átszámítani, ha a próbatest ettől az aránytól eltérő arányú volt:

$$\sigma_{c2:1} = \frac{\sigma_c}{0,88 + 0,24(d/h)} \quad (2.1.)$$

ahol $\sigma_{c2:1}$ a számított nyomószilárdság 2:1-es próbatestre, σ_c a mért nyomószilárdság, d a próbatest átmérője, h a próbatest magassága.



2-1. ábra. Az egyirányú nyomószilárdság változása a magasság : átmérő arányában homokkövek esetén (John, 1972)

Hoek és Brown (1980) tíz különböző kőzeten végzett vizsgálatot annak megállapítására, hogy a 2:1-es arányú próbatesteken a mért szilárdság milyen összefüggésben áll a próbatest átmérőjének változásával. A dimenziótlanított értékeket ábrázolva (lásd 2-2. ábra), a kapott pontokra, az alábbi összefüggéssel megadott görbe illeszthető:

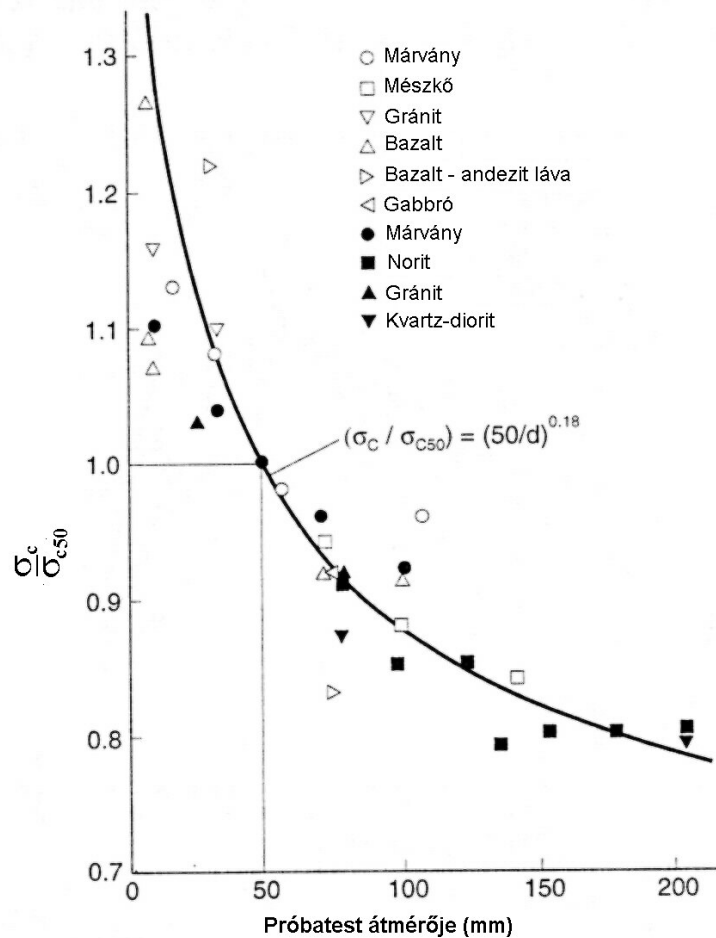
$$\sigma_{c50} = \frac{\sigma_c}{(50/d)^{0,18}} \quad (2.2.)$$

ahol σ_{c50} az 50 mm átmérőjű próbatest nyomószilárdsága, σ_c a mért szilárdság; míg d a próbatest átmérője.

A (2.1.) és (2.2.) képleteket egy összefüggésbe foglalva lehetőség van bármilyen méretarányú és átmérőjű próbatest 50 mm átmérőjű, 2:1 arányúra történő átszámítására:

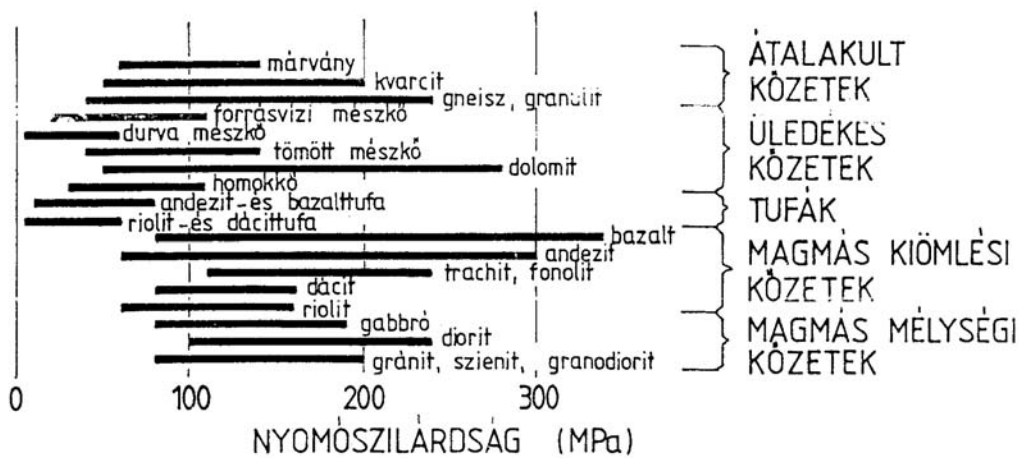
$$\sigma_{c(2:1);(50)} = \frac{\sigma_c d^{0,18}}{1,78 + 0,485(d/h)}. \quad (2.3.)$$

Megállapítható, hogy csak a 2:1-es próbatestek szilárdsága a mértékadó. Amennyiben a mérések ettől eltérő arányú hengereken készülnek, minden esetben át kell számolni erre a méretarányú esetre. A mai nemzetközi gyakorlatban minden egyirányú nyomószilárdsági értéket erre a próbatest-alakra számítanak át. A kapott eredmények alapján történő kőzet-minősítés, valamint összehasonlítás és értékelés ezen (50 mm átmérőjű, 2:1 magasság:átmérő arányú) alakra történik.



2-2. ábra. Az egyirányú nyomószilárdság változása a próbatest átmérőjének függvényében (Hoek & Brown, 1980)

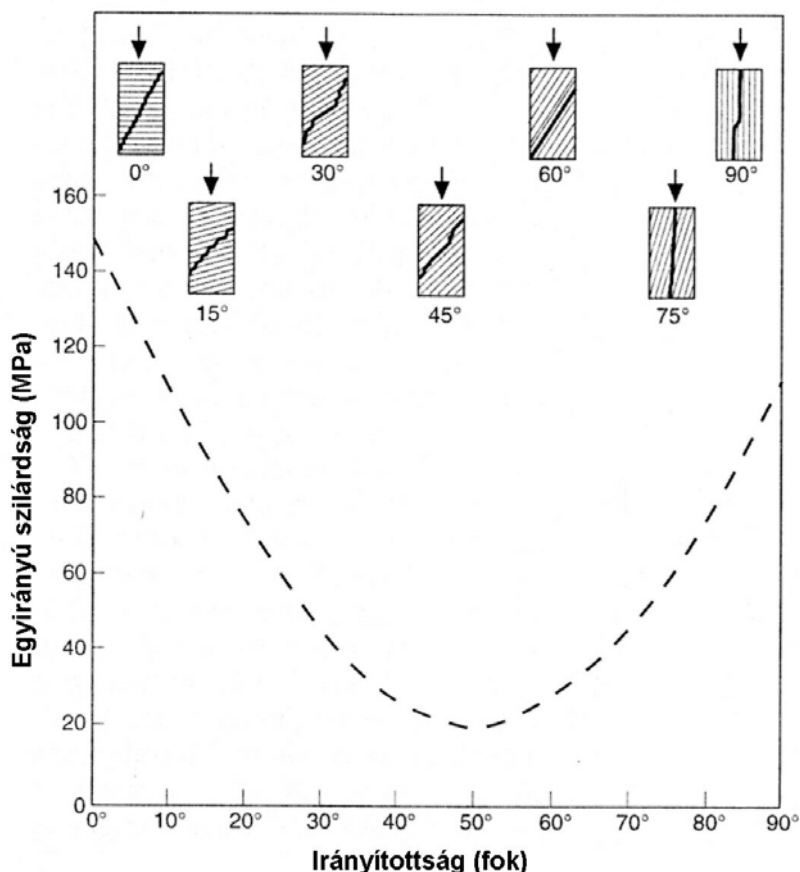
A 2-3. ábra a gyakorlatban előforduló kőzetek nyomószilárdságának jellegzetes tartományait mutatja be.



2-3. ábra. Fontosabb kőanyagok nyomószilárdság tartományai (Gálos & Kürti, 1986)

2.2 A szilárdságot befolyásoló tényezők

Egy kőzet a leggyakrabban tekinthető homogénnek és izotrópnek, annak ellenére, hogy vizsgálatainknál így idealizáljuk. Az irányítottság jelentősen befolyásolja a kapott mérési eredményt, amint az a 2-4. ábrán is látható: a vízszintes irányítottság esetén a szilárdság a legnagyobb, míg a legkisebb értéket az 50° körül érték. Számos mérés igazolta, hogy a palákon végzett kísérleti eredmény más anizotróp kőzetekre is igaz.



2-4. ábra. Az irányítottság hatása az egyirányú nyomószilárdság értékére devon kori palák esetén (Brown *et al.* 1977)

A nyomószilárdságot a kőzet víztartalma is jelentős mértékben befolyásolja. A vízzel telített kőzet szilárdsága jóval kisebb, mint száraz állapotúé. Hawkins és McConnell (1992) 35 különböző angliai homokkővet vizsgálva exponenciális kapcsolatot írt fel a vízzel való telítettség és az egyirányú nyomószilárdság között. Eredményeik azt mutatták, hogy a kőzet szilárdsága a víztartalom növekedésével exponenciális mértékben csökken:

$$\sigma_{cw} = \sigma_{c0}e^{-bw} + \sigma_{c100} \quad (2.4.)$$

ahol σ_{cw} a kőzet egyirányú nyomószilárdsága w (m %) víztartalom esetén, σ_{c0} és σ_{c100} légszáraz, illetve telített kőzetfizikai állapotban mért nyomószilárdság. b dimenzió nélküli anyagállandó, melynek értéke a kőzet porozitásától függ.

Főleg a porózus kőzetek reagálnak érzékenyen a víz jelenlétére, szilárdságukat sok esetben el is veszítik. Általánosságban elmondható, hogy kb. 25-30 %-os telítettségénél a kőzet szilárdsága már közel megegyezik a teljesen telített állapotúéval. Ez a hatás elsősorban porozitás (és azon belül is az effektív porozitás) függvénye. Kb. 5 % effektív porozitás érték alatt a szilárdságváltozás már elhanyagolható. A vízzel telített és a száraz kőzetfizikai állapot közötti különbséget (λ) változási tényezővel jellemezzük:

$$\lambda = \frac{\sigma_{c100}}{\sigma_{c0}} \quad (2.5.)$$

ahol σ_{c100} a vízzel telített, míg σ_{c0} a légszáraz kőzetfizikai állapotban mért nyomószilárdsági érték. A 2-1. táblázatban a változási jellemző értékei alapján történő osztályozást ismertetjük.

2-1. táblázat. A kőzetanyag víz hatására bekövetkező szilárdságváltozásának értékelése a változási jellemző (λ) ismeretében

λ	Értékelése
0,0 – 0,5	tönkrement
0,5 – 0,75	rossz
0,75 – 0,9	kevésbé jó
0,9 – 1,0	jó

2.3 Szilárdság alapján történő kőzetosztályozások

Amint az a 2-3. ábrán közölt adatokból is kitűnik, a kőzet egyirányú nyomószilárdsága viszonylag tág határok között változik, sokszor egy a helyről származó, azonos ásványi összetételű kőzetblokkok szilárdságai között is nagyságrendi eltérések lehetnek.

Egyik első szilárdság alapján történő osztályozási módszert Protodjakonov (1969) alkotta meg, melyet a 2-2. táblázatban közlünk. A táblázatban szereplő szilárdsági tényező (f) segítségével jó közelítéssel kiszámolható a kőzetre felvehető kohézió (c) nagysága is a

$$c = 3f \quad (2.6.)$$

összefüggés használatával.

A 2-3. táblázatban a Nemzetközi Mérnökgeológiai Egyesület (IAEG) és a Nemzetközi Kőzetmechanikai Társaság (ISRM) által javasolt szilárdsági érték szerinti besorolásokat adjuk meg.

A bemutatott táblázatok jól érzékeltetik a besorolás szubjektivitását. A kőzettest osztályozások általában az ISRM ajánlását veszik alapul, illetve egyes szerzők ettől eltérő besorolást is alkalmazhatnak (ezeket az eseteket az adott helyen külön részletezzük).

2-2. táblázat. Kőzetek szilárdság szerinti osztályozása Protodjakonov alapján

Osztály	Megnevezés	Kőzetnév	Nyomószilárdság σ_c [MPa]	Szilárdsági tényező, f
I.	rendkívül szilárd kőzet	szilárd, tömör kvarcit, andezit, bazalt, stb.	> 200	20
II.	igen szilárd kőzet	szilárd gránit, kvarcporfir, kvarcitpala, igen kemény homokkő	200...150	15
III.	szilárd kőzet	gránit, tömött mészkő, homokkő, konglomerátum, márga	150...80	10
IV.	közepesen szilárd kőzet	homokkő, mészkő, márga, agyagpala	80...50	8...5
V.	meglehetősen szilárd kőzet	kisebb szilárdságú homokkő és mészkő	50...20	5...2
VI.	kevésbé szilárd kőzet	laza pala, durva mészkő, gipsz, cementált homok, vulkáni tufák	< 20	2...1
VII.	tömör talaj	agyag, lösz, iszap	-	1...0,8
VIII.	laza talaj	tőzeg, vizes iszap, homok,	-	0,6
IX.	szemcsés talaj	homok, kavics	-	0,5
X.	folyós talaj	iszap, vizes lösz, folyós homok	-	0,3

2-3. táblázat. A kőzetek szilárdság szerinti osztályozása különböző szakmai egyesületek ajánlásai alapján

Leírás	Szilárdsági érték [MPa]	
	IAEG, 1979	ISRM, 1981
<i>Rendkívül gyenge</i>		0,25 – 1
<i>Nagyon gyenge</i>		1 – 5
<i>Gyenge</i>	1,5 - 15	5 – 25
<i>Alacsony szilárdságú</i>	15 – 50	
<i>Közepes szilárdságú</i>		25 – 50
<i>Szilárd</i>	50 – 120	50 – 100
<i>Nagy szilárdságú</i>	120 – 230	100 – 250
<i>Rendkívül szilárd</i>	> 230	> 250

2.4 A rugalmassági modulus és az egyirányú nyomószilárdság közötti kapcsolat

A laboratóriumi mérések szerint a rugalmassági modulus arányos az egyirányú nyomószilárdsággal. Ezért a rugalmassági modulus – egytengelyű nyomószilárdság hányados is jellemzi a kőzetminőséget, illetve sok esetben ezen arányszám ismerete elengedhetetlen az abban/azon való tervezésnél. Ennek alapján való osztályozást a 2-4. táblázat tartalmazza Deere (1969) alapján. Az eddigi vizsgálati eredmények azt mutatják, hogy víz hatására ez az arányszám nem változik.

2-4. táblázat. A rugalmassági modulus és az egyirányú nyomószilárdság hányadosa alapján való osztályozás (Deere, 1969)

Osztály	Megnevezés	E/σ_c
H	Nagy modulus viszonyszám	> 500
M	Közepes modulus viszonyszám	200 – 500
L	Kis modulus viszonyszám	< 200

2.5 Közvetett húzóvizsgálat

A nyomószilárdság mellett fontos kőzetjellemző a kőzetek húzószilárdsága is. Laboratóriumi mérésnél ún. közvetett húzóvizsgálatot (más néven Brazil-vizsgálatot) henger alakú próbatesten végezzük el. Az általában 1:1 átmérő:magasság arányú próbatestet két szemközti alkotója mentén, párhuzamos nyomólapok között terheljük úgy, hogy a nyomóterhelést folyamatosan növelve törésig fokozzuk. A próbatestet a terhelő erő irányával megegyező átmérője mentén, a húzószilárdság hatására törik. A 2-5. ábrán mutatott, d átmérőjű és h magasságú próbatestnél a mért törőteher (F_t) ismeretében a húzószilárdság a

$$\sigma_t = \frac{2 F_t}{\pi d h} \quad (2.7.)$$

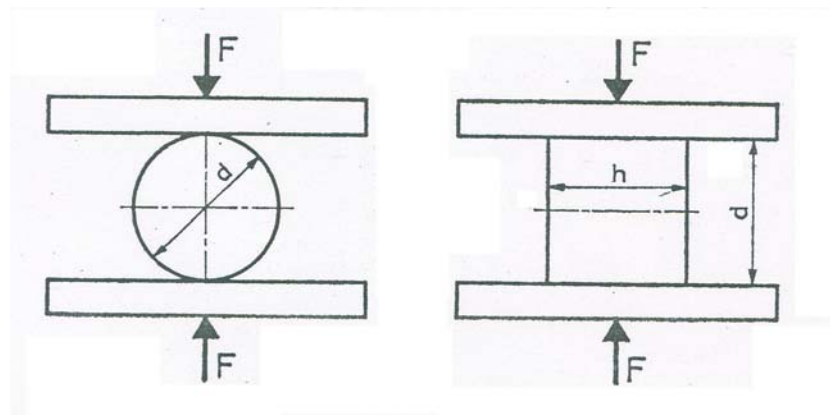
összefüggéssel határozható meg.

A húzószilárdság (σ_t) és a nyomószilárdság (σ_c) közötti kapcsolat kőzetcsoportonként változó. Gálos és Kürti (1986) vizsgálatai alapján általánosságban a következő összefüggés írható fel:

$$\sigma_t = 0,226 \sigma_c^{0,785} \quad (2.8.)$$

A legtöbb esetben ez azt jelenti, hogy a húzószilárdság a nyomószilárdság 1/10-e körül van. A nyomás és húzószilárdság közötti arányszámot a Brinke féle szám (B) fejezi ki:

$$B = \frac{\sigma_c}{\sigma_t} \quad (2.9.)$$



2-5. ábra. Próbatest elhelyezése a nyomólapok közé közvetett húzó (Brazil) vizsgálatnál

2.6 Szilárdság meghatározása helyszíni vizsgálattal és a pont-terheléses vizsgálattal

A helyszínen a kőzettömb szilárdságának meghatározására csak közelítő vizsgálatok elvégzésére van lehetőség. A legtöbb esetben a helyszíni bejárás alkalmával, azonnal kell a kőzettömb szilárdságát meghatározni és osztályba sorolni. A geológuskalapács segítségével történő szilárdság-beclsés módszerét a 2-5. táblázatban foglaltuk össze.

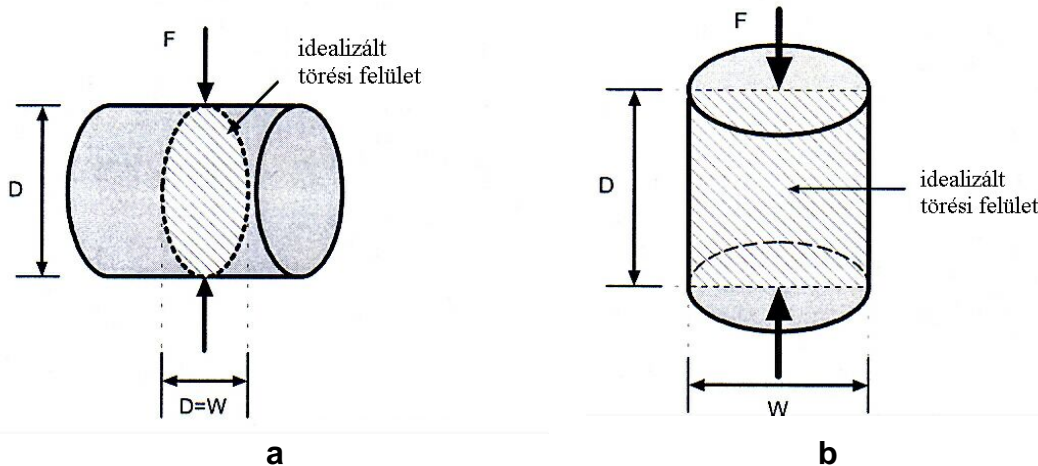
2-5. táblázat. Terepi meghatározás és a várható egyirányú nyomószilárdság közötti kapcsolat

Egyirányú nyomószilárdság (MPa)	Terepi megfigyelés	Példák
> 250	Geológuskalapáccsal csak forgácsolható	üde bazalt, diabáz, gneisz, gránit, kvarcit
100-250	A geológuskalapács sok ütésével lehet csak egy darabot nyerni belőle	amfibolit, homokkő, bazalt, gabbró, granodiorit, mészkő, márvány, riolit
50-100	A geológuskalapáccsal több mint egy ütés kell ahhoz, hogy letörjünk egy darabot	mészkő, márvány, fillit, pala, homokkő
25-50	Geológuskalapács egy ütésével darab letörhető; késsel nem sérthető	agyagkő, iszapkő, pala, szén, beton
5-25	Késsel nehezen héjazható, geológuskalapáccsal egy pontban a felszínen sebezhető	kréta, kősó, hamuzsír
1-5	Késsel héjazható, geológuskalapács erős ütésétől szétporlad	nagyon mállott kőzetek
0,25-1	Tüvel megsérthető, karcolható	kemény töredezett anyag

A gyors helyszíni mérésre elterjedt módszer az ún. pont-terheléses vizsgálat, melyet Broch és Franklin vezetett be 1972-ben, és ez ma már a Nemzetközi Kőzetmechanikai Társaság ajánlásai között is szerepel (ISRM, 1985). A vizsgálat lényege az, hogy a terhet nem két párhuzamos felületen, hanem két egymással szemben lévő „ponton” adjuk a kőzetre (lásd 2-6. ábra). Az egymással szemben lévő acél nyomófejeket 60°-os kúppal és $r = 5$ mm-es lekerekítéssel képezték ki. A méréssel csak a maximális törőteher meghatározásra van lehetőség.

A pont-terheléses vizsgálatnál a kőzet jóval kisebb erőhatásra is eltörik, mint az egyirányú nyomóvizsgálatnál. Ebből adódóan lehetőség nyílt kézi tesztelő kifejlesztésére, így ez a terepen könnyen használható felszerelésként terjedt el.

A pont-terheléses vizsgálat előnye, hogy sokkal gyorsabban kapunk információt a kőzet szilárdságáról, nem igényel olyan pontos előkészítést, mint a próbatest laboratóriumi vizsgálata, ugyanakkor hátránya, hogy az értékeket csak közelítő eredményként lehet elfogadni, valamint a hagyományos laboratóriumi vizsgálatra csak pontatlanul számíthatók át.



2-6. ábra. A pont terheléses vizsgálat a) átmérő- és b) tengely irányban való végrehajtása henger alakú próbatestnél

A vizsgálatot először szabályos, henger alakú próbatesteken végezték. Henger alakú próbatesteknél a közet szilárdsága:

$$I_S = \frac{4F}{\pi D^2} \quad (2.10.)$$

ahol D a próbatest átmérőjét jelöli (lásd 2-7. ábra).

Az ISRM (1985) a fenti összefüggést általánosította az egyenértékű-átmérő bevezetésével más alakú mintákra is:

$$I_S = \frac{F}{D_e^2} = \frac{\pi F}{4WD} \quad (2.11.)$$

$$WD = A = \frac{\pi}{4} D_e^2$$

ahol I_s a pont-terhelési szilárdság, F a mért erő (N), D_e az egyenértékű próbatest átmérője (mm), D a próbatest vastagsága, W a próbatest szélessége, míg A az a minimális felület, mely a terhelés hatására széttörik.

A 2-7. ábra az ISRM által megadott vizsgálati minta-formákat és az átszámítási lehetőségeket mutatja be. A meghatározott pont-terhelési szilárdsági érték természetesen nagy mértékben függ a próbatest méretétől. A kapott értékeket ezért szükséges itt is átszámítani egy megegyezés szerinti alakra. Az egyirányú nyomószilárdságnál az egységesítés az 50 mm-es átmérőjű testekre megtörtént, ezért itt is ezt a méretet vették mértékadónak (Brook, 1985, ISRM, 1985). Az 50 mm-es átmérőjű henger próbatestre való átszámításra két módszert ajánlanak:

- 1) Ugyanazon közeten a méréseket elvégezni különböző egyenértékű átmérővel, és azokat log-log skálán ábrázolva meghatározni az 50 mm-hez tartozó értéket, amint azt a 2-8. ábra mutatja. Az egyenértékű átmérő négyzetét és a mért törőterhet ábrázolva egy egyenest kapunk. A 2500 mm²-nél leolvasott törőterhet kell figyelembe venni.

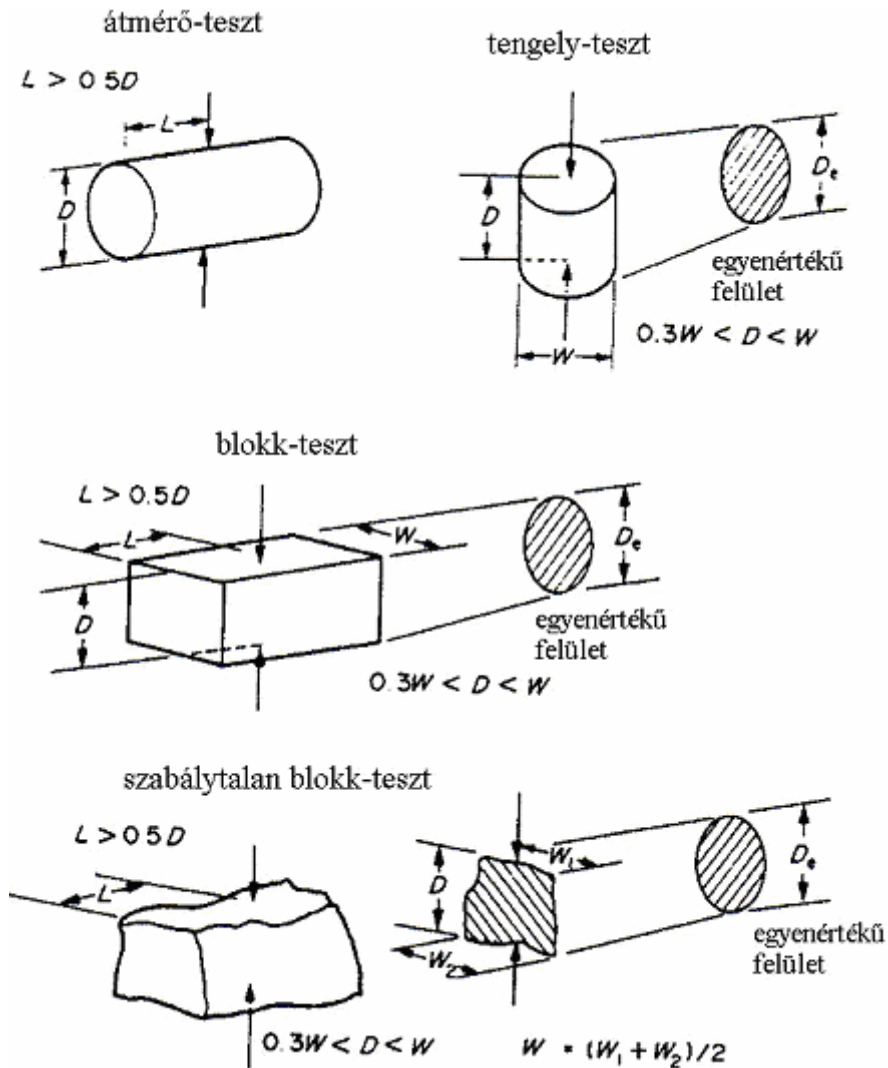
- 2) Alaki korrekciós tényező használata (f), melyre a következő képletet adják meg:

$$I_{50} = f \frac{F}{D_e^2} = f \frac{\pi F}{4WD} \quad (2.12.)$$

$$f = \left(\frac{D_e}{50} \right)^{0,45} \quad (2.13.)$$

ahol a jelölések jelentése megegyezik a (2.11.) képletnél megadottakkal.

A magyarországi gyakorlatban elterjedt az ún. fűrőmag hasító vizsgálat is, melyet fűrőmagok minősítésénél használnak abban az esetben, ha nincs lehetőség próbatest kialakítására. Az egymással szemben lévő 30-45°-os lapszögű hasító-élek közé elhelyezett ép magdarabot egyenletes terheléssel kell eltörni. A mért törőterhelésből a hasító szilárdság a (2.11.) képlettel határozható meg.



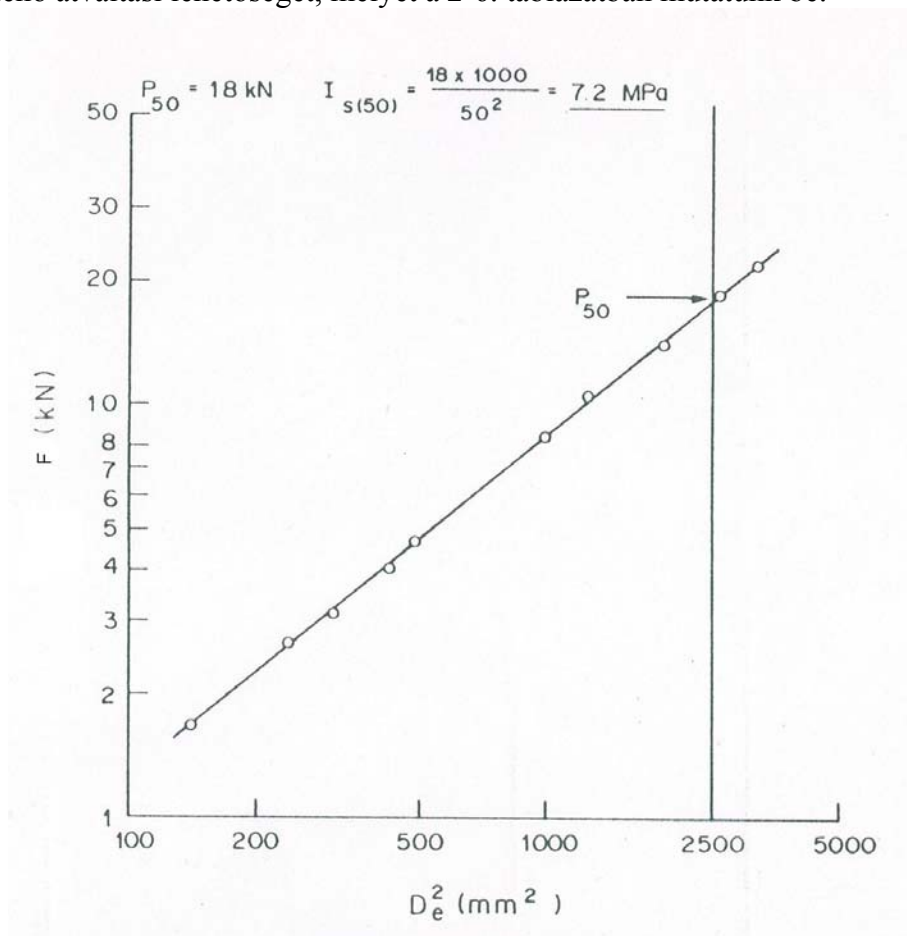
2-7. ábra. Az ISRM (1985) által ajánlott egyenértékű felületek különböző alakú próbatesteknél

2.7 A pont-terhelés és az egyirányú nyomószilárdság közötti kapcsolat

Számos szerző foglalkozott azzal, hogy a pont-terheléssel, illetve szabványos, laboratóriumi nyomószilárdsági kísérlettel meghatározott értékeket hogyan lehet egymásba átváltani. Általánosságban elmondható, hogy lineáris kapcsolat adható meg a nyomószilárdság és a pont-terheléses szilárdság között, azaz

$$\sigma_c = a I_{50} \quad (2.14.)$$

A képletben szereplő a konstans értéke az ISRM (1985) ajánlása alapján átlagban 22-nek vehető fel. Ez az érték a kőzet szilárdságának függvényében jelentősen változhat: kis szilárdságú kőzeteknél 20 körüli, míg nagy szilárdságúaknál 25-ös érték felvétele a reális. Hawkins (1998) külön vizsgálta a telített és száraz kőzetek egyirányú nyomószilárdsági értékre történő átváltási lehetőséget, melyet a 2-6. táblázatban mutatunk be.



2-8. ábra. Az $I_{s(50)}$ pont-terheléses szilárdság meghatározása abban az esetben, ha az egyenértékű átmérő (D_e) eltér 50 mm-től. (ISRM, 1985 alapján)

2-6. táblázat. Tapasztalati kapcsolat I_{50} és σ_c között üledékes és átalakult kőzeteknél száraz és nedves kőzetfizikai állapot esetén (Hawkins, 1998)

I_{s50}	a értéke ($\sigma_c = a I_{50}$)	
	nedves kőzet	száraz kőzet
< 2	10	15
2 – 5	16	20
> 5	24	25

2.8 Irodalom

- Bieniawski Z.T. (1973): Engineering classification of rock masses. *Trans S. Afr. Inst. Civil Eng.* **15**: 335-344.
- Broch, E.M., Franklin J.A. (1972): The point load strength test. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* **9**: 669-697.
- Brook, N. (1985): The equivalent core diameter method of size and shape correction in point load testing. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* **22**: 61-70.
- Brown, E.T., Richards, L.R., Barr, M.V. (1977): *Shear strength characteristics of Delabole Slates*. Proc. Rock Engng. Conf. Newcastle upon Tyne, 35-51.
- Coates, D.F. (1964): Classification of rocks for rock mechanics. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* **1**: 421-429.
- Deere, D.U. (1969): Geological considerations. In: *Rock mechanics in engineering practice*. (Stagg, K.G. & Zienkiewicz, O.C.), 1-20.
- Gálos M., Kürti I. (1986): Építési kőanyagok egyirányú nyomószilárdságának minősítő jellege. *Építőanyag*, **38**: 268-275.
- Hawkins, A.B. (1998): Aspects of rock strength. *Bull. Engng. Geol. & Env.* **57**: 17-30.
- Hawkins, A.B., McConnell, B.J. (1992): Sensitivity of sandstone strength and deformability to changes in moisture content. *Q. J. Engng. Geol.* **25**: 115-130.
- Hoek, E., Brown, E.T. (1980): *Underground excavations in rock*. London, Inst. Min. Metall.
- IAEG (1979): Report of the commission on engineering geological mapping. *Bull. IAEG*, **19**: 364-371.
- ISRM (1978): Suggestive methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* **16**: 135-140.
- ISRM (1981): *Suggested methods: rock characterization testing and monitoring*. Brown, E.T. (Ed.). Pergamon Press, 211 p.
- ISRM (1985): Suggestive methods for determining point load strength, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* **22**: 51-60.
- John, M. (1972): *The influence of length to diameter ratio on rock properties in uniaxial compression: a contribution to standardization in rock mechanics testing*. Rep. S. Afr. CSIR.
- Protodyakonov, M.M. (1969): *Method of determining the strength of rocks under uniaxial compression*. Mechanical Properties of Rocks, 1-8.
- Vásárhelyi B. (2003): Kőzetek szilárdságának meghatározása és osztályba sorolása, *Közúti és Mélyépítési Szemle*, **53**(11): 28-32.



3. TAGOLTSÁGI JELLEMZŐK MEGHATÁROZÁSA

A mérnökgeológiai, kőzetmechanikai gyakorlatban a tagoltságot olyan modell-elemnek tekintjük, amely síkként, vagy sík-rendszerként kezelhető. Ezért a görbült, gyúrt felületeket is szakaszonként síkokkal helyettesítjük, majd jellemzésükhöz a szükséges tulajdonságokat megadjuk. A tagoltság felvétele azt jelenti, hogy meghatározzuk:

- a tagoltság kialakulását és rendszerét,
- a tagoltság tágasságát vagy nyitottságát (apertúra),
- a tagoltság folytonosságát és egymástól mért távolságát,
- a tagoló felületek felületi jellemzőit és kitöltöttségét,
- a tagoltság vagy tagoltsági rendszer térbeli elhelyezkedését,
- a tagoltság mértékét.

Az alábbiakban ezek meghatározását, az ismeretükhöz szükséges jellemzők megadásának lehetőségét mutatjuk be.

3.1 Tagoltság kialakulása és rendszere

Tagoltság alatt mindazokat a diszkontinuitásokat (anyagi folytonossági hiányokat és hibákat) értjük, amelyeket kőzetképződési, tektonikai vagy egyéb tönkremeneteli folyamatok eredményeztek.

A kőzet keletkezéséhez tartozó legjellegzetesebb tagoltsági formák a kőzethatárok és réteghatár, amelyek általában zártak. Ide sorolhatók a kőzetkeletkezéssel együtt járó kihülési elválások, harántrepedések, illetve a száradási repedések, melyek nyíltak vagy megnyílóak, gyakran utólagosan kitöltöttek.

Tektonikai folyamatok eredményezik az utólagos földtani hatások okozta tagoltságot, amely diszlokáció, földrengés, illetve mállás hatására képződhet. Ide tartozik még a nagy mélységbe eltemetett kőzetestre utólagos kiemelkedéséből, leterheléséből adódó tagoltság is. A vetődés vetősíkokat eredményez, amelyek mentén a kőzetösszlet összetöredezhet, vonszolódási nyomokat mutathat. A gyűrődési redőn mind az antiklinális, mind a szinklinális külső oldalán berepedések találhatóak, amelyek kifelé megnyílóak. A belső oldalon nyomásból adódó nyíró repedések fordulhatnak elő.

Földrengés hatására hatalmas kiterjedésű hasadékok keletkezhetnek, amelyek idővel záródhatnak, de a földrengés epicentruma közelében kisebb megnyílások is előfordulhatnak.

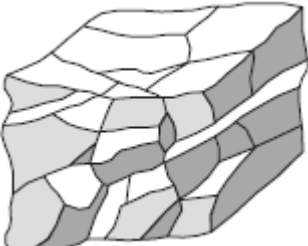
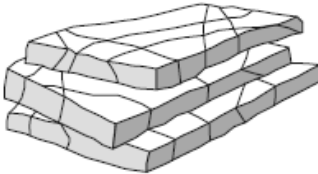
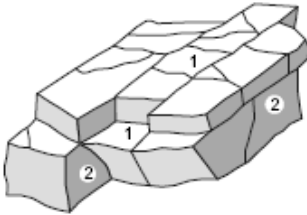
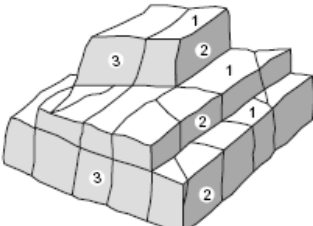
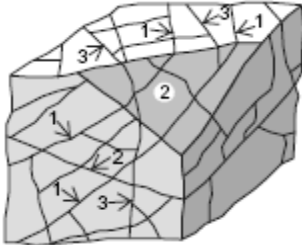
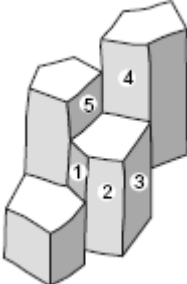
A mállás leggyakrabban felszín közelben a már meglévő tagoltságot, tagoltsági rendszert nyitja meg, ahol a tagoló felületek közötti tér bemosott törmelékanyaggal, a kőzet mállástermékekével kitöltött.

A mérnöki létesítmény kivitelezésekor annak környezetében új tagoltsági rendszerek jöhetnek létre. Tagoltság alakul ki a létesítmény kőzetkörnyezetében akkor, ha a megváltozott feszültségviszonyok és/vagy a jövesztés dinamikus hatása miatt a kőzetkörnyezetben lokális tönkremenetel jön létre. Az elmondottakat a 3-1. táblázatban foglaljuk össze.

3-1. táblázat. A tagoltság osztályozása eredet szerint

Eredet	Tagoltság	Mérnökgeológiai megnevezés	Jellege
Kőzetkeletkezéssel összefüggő	magmás, üledékes és átalakult kőzetképződési folyamat hatására	közethatár, réteghatár	zárt zárt, gyakran kitöltéssel
Kőzetképződéshez kapcsolható	kihülés hatására	elválások, harántrepedések, kihülési repedések	nyílt, gyakran kitöltéssel nyílt vagy megnyíló
	kiszáradás hatására litoszférában fellépő húzás, nyomás	száradási repedések húzási vagy nyomási fő- és mellékrepedések, nyomási varratok	nyílt vagy zárt
	idegen anyagok közbetelepülése	szaturák	zárt
Utólagos természetes hatás	diszlokáció hatására	tektonikai repedések, hasadékok, közetrés	záródó vagy megnyíló
	vetődés	vetősík	nyílt, zárt, gyakori kitöltéssel
	gyűrődés	gyűrődési redő	nyílt, megnyíló
	földrengés hatására	hasadékok	nyílt
	mállás hatására	mállási repedés	megnyíló
Utólagos mesterséges hatás	műszaki munkák technológiai hatására	robbantási, fejtési repedések	nyílt
	tönkremenetel lokális/teljes hatásra	repedések/csúszólapok	nyílt, megnyíló

3-2. táblázat. Tagoltsági rendszerek típusai (Matula, 1981)

Megjelenés	Leírás	Kőzetmechanikai megnevezése:
	<p>Soklapú blokkok: szabálytalan tagoltságok. Az elkülöníthető tagoltsági hálózatok rendszertelenül (vagy csak igen kis mértékű rendszerrel) helyezkednek el. <i>Nemzetközi betűjele: Po-típus</i></p>	<p>homogén tagoltságú kőzettest</p>
	<p>Táblás, lemezes blokkok: egy meghatározó párhuzamos tagoltsági rendszer több nem folytonos tagoltsággal. A blokkok vastagsága kisebb, mint a hossza vagy a szélessége <i>Nemzetközi betűjele: Ta-típus</i></p>	<p>lemezes tagoltságú kőzettest</p>
	<p>Prizmatikus blokkok: két meghatározó tagoltsági rendszerrel, melyek hozzávetőlegesen merőlegesek és párhuzamosak egymással. A harmadik tagoltsági rendszer szabálytalan. A blokkok vastagsága jóval kisebb, mint a hossza vagy szélessége. <i>Nemzetközi betűjele: Pr-típus</i></p>	<p>réteges tagoltságú kőzettest</p>
	<p>Egyenlő méretű blokkok: három meghatározó, közel egyenlő, egymásra merőleges tagoltsági rendszer, mely közel egyenlő méretű blokkokat eredményez. Szabálytalan tagoltságok megjelenhetnek <i>Nemzetközi betűjele: Eq-típus</i></p>	<p>tömbös tagoltságú kőzettest</p>
	<p>Romboidos blokkok: három (vagy több) meghatározó, kölcsönösen ferde tagoltsági háló, mely ferde-alakú, egyenlő méretű blokkokat eredményez <i>Nemzetközi betűjele: Rh-típus</i></p>	<p>általánosan irányított tagoltságú kőzettest</p>
	<p>Oszlopos blokkok: számos, általában több mint három tagoltsági háló melynél a tagoltsági rendszerek egymással párhuzamos síkok által kialakított oszlopok, melynek magassága sokkal nagyobb, mint a többi dimenziója. Szabálytalan tagoltságok általában keresztirányban megjelennek. <i>Nemzetközi betűjele: Co-típus</i></p>	<p>oszlopos tagoltságú kőzettest</p>

Megjegyezzük, hogy repedésről akkor beszélünk, ha a tágasság és a felületi érdesség egy nagyságrendben van, hasadékoknál a tágasság nagyságrendekkel haladja meg a felületi egyenlőtlenséget; a hazai gyakorlatban szokásos megnevezések:

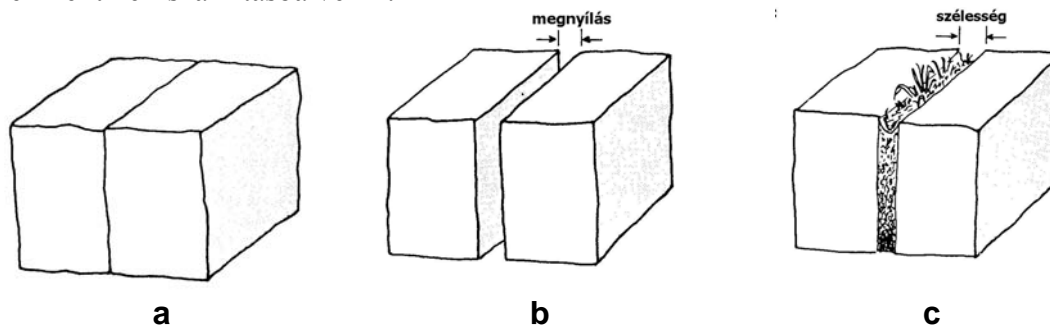
- repedés: mm-cm
 - rés: cm-dm
 - hasadék: dm-m
- nagyságrendű.

Láthatjuk, hogy a különböző kőzetképződési feltételek és utólagos hatások más-más tagoltsági rendszert hoznak létre. A tagoltsági rendszereket különböző típusokba lehet besorolni, melyeket a 3-2. táblázat tartalmazza a Nemzetközi Mérnökgeológiai Egyesület (IAEG) Matula (1981) ajánlása alapján. A táblázatban a mérnökgeológiai jellegű leírás mellett a kőzetmechanikai megnevezést is megadjuk.

3.2 A tagoltság tágassága, nyitottsága

Kőzetmechanikai szempontból, a kőzettest mechanikai vizsgálatánál külön jelentősége van az 1 cm-nél kisebb megnyílásoknak. Az ISRM (1978) ajánlása alapján öt különböző kategóriába lehet sorolni a tagoltságokat megnyílásuk alapján: a zárttól az 1 cm-nél nagyobb megnyílásúig, amint azt a 3-3. táblázatban láthatjuk. Ezt szemléletei a 3-1. ábra: a zárt és a megnyílt tagoltságok mellett figyelembe kell még venni, hogy az esetlegesen megnyílt tagoltság kitöltött-e. A kitöltő anyag jelenléte jelentősen befolyásolhatja a kőzettest mechanikai viselkedését, ezért ennek anyagát és szélességét külön meg kell határozni.

A tagoltságok tágasság (nagyság) szerinti osztályozását a 3-4. táblázat foglalja össze. Ki kell hangsúlyozni, hogy a karsztjáratok és barlangok ebben a vonatkozásban nem tagoltsággént kezelendők, hanem azokat a tagoltsággal összefüggésbe hozható modell-elemként kell számításba venni.



3-1. ábra. Tagoltságok megnyílásának osztályozásai (ISRM, 1978):
a: zárt tagoltság, b: nyitott tagoltság, c: kitöltött tagoltság

3-3. táblázat. A tagoltságok megnyílásának osztályba sorolása (ISRM, 1978)

Osztály	Megnevezés	Megnyílás mértéke
1	zárt	< 0,1 mm
2	közeli	0,1 – 0,5 mm
3	kissé nyitott	0,5 – 2,5 mm
4	nyitott	2,5 – 10 mm
5	szélesen megnyílt	> 10 mm

3-4. táblázat. Tagoltságok megnevezése nagyság szerint

Tagoltság	Jellemző méret - nagyságrend		Eredet		Mérnökgeológiai megnevezés	
	Tágas-ság	térbeli kiterjedés	belső anyagváltozás	külső hatások	belső eredet	külső eredet
KÖZETREPEDÉS gyakorlatilag nincs elmozdulás	mm	m	Kőzetképződés magmás közetté válás, kihülés	tektonika nyomás alatti oldódás mállás robbantás	közethatár, réteghatár hajszálrepedés	közetrés, - rendszer (litoklázis) sztilolit-varrat repedés hajszálrepedés
KÖZETHASADÉK vízszintes elmozdulás jelentős kiterjedésű lehet	cm	m száz m	magmás közetté válás, kihülés üledékes közetté válás, kiszáradás	tektonika vagy terheléses nyomás tektonika földrengés felszínmozgás üregfelszakadás, robbantás	pados-, oszlopos-, gömbös leválás mozaik-, oszlopos elválás	lemezesség palásság hasadék (diaklázis) hasadék csúszólap hasadék hasadék
TÖRÉSES ELMOZDULÁS függőleges és vízszintes elmozdulás jelentős kiterjedésű lehet	cm m	száz m km		tektonika földrengés üregbeszakadás felszínmozgás robbantás		vetődés (parak) leszakadás felszakadás kőzetomlás kőzetomlás

3.3 Tagoltságok folytonossága és egymástól mért távolsága

Az azonos tagoltságok a kőzettestben lehetnek folytonosak vagy szakaszosak. Szakaszos tagoltsági rendszer esetén fontos ismerni a tagoltsági szakaszok közötti távolságot, mivel bizonyos távolságon belül, külső vagy belső feszültség hatására összekapcsolódhatnak. A 3-5. táblázatban az ISRM (1978) által felállított kategóriákat mutatjuk be.

A tagoltsági rendszeren belül az egymással közel párhuzamosnak tekinthető tagoltságok egymástól mért távolságainak osztályba sorolását a 3-6 táblázat tartalmazza.

3-5. táblázat. A szakaszos tagoltságok megnyílt szakaszai közötti távolságok (zárt hosszak) osztályba sorolása és megnevezése

Megnevezés	Távolság
nagyon közeli	< 1 m
Közeli	1 – 3 m
közepes	3 – 10 m
messzi	10 – 20 m
nagyon messzi	> 20 m

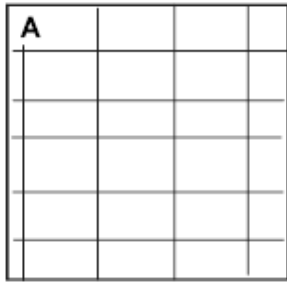
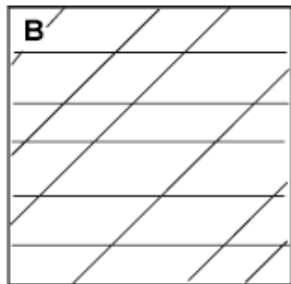
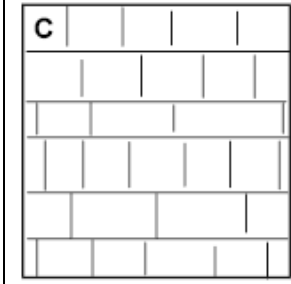
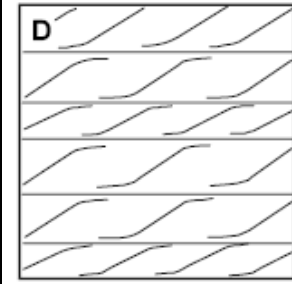
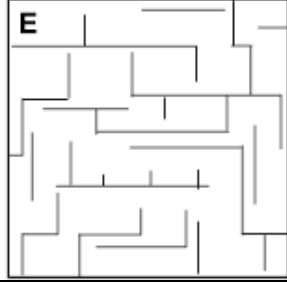
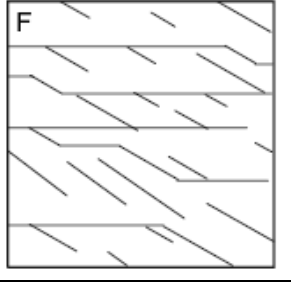
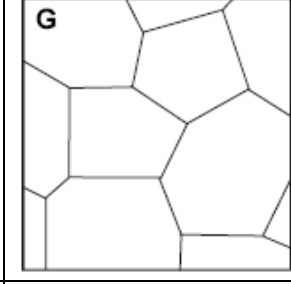
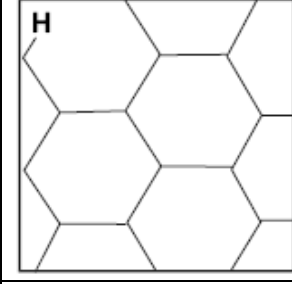
3-6. táblázat. A tagoltságok egymástól mért távolságának osztályba sorolása

Megnevezés	Távolság
nagyon távoli	> 2 m
távoli	0,6 – 2 m
közepesen	20 – 60 cm
közeli	6 – 20 cm
nagyon közeli	< 6 cm

A 3-2. táblázatban ismertetett tagoltsági rendszerek feltárásban való megjelenési formáit a 3-7. táblázatban mutatjuk be. A tagoltságok megjelenése lehet: egymásra merőleges (ortogonális rendszer, + metszéspont) és nem merőleges (nem ortogonális, x metszéspont). Mindkét esetben az alábbi három csoportot lehet felállítani attól függően, hogy a tagoltság folytonos-e a metszéspontban:

- a) minden tagoltság folytonos (keresztezi a többi tagoltsági rendszert),
- b) néhány tagoltság folytonos, néhány nem-folytonos,
- c) a tagoltságok nem folytonosak.

3-7. táblázat. A főbb tagoltsági formák megjelenésének rajzos bemutatása (Pollard & Aydin, 1988)

			
Ortogonalis megjelenés, folyamatos hálóval (+ metszéspont)	Nem ortogonalis megjelenés folyamatos hálóval (x metszéspont)	Ortogonalis megjelenés, egy rendszer folytonos (T metszéspont)	Nem ortogonalis megjelenés, egy rendszer folytonos
			
Ortogonalis megjelenés, mindkét hálózat többnyire nem folytonos	Nem ortogonalis megjelenés, mindkét hálózat többnyire nem folytonos	Hármas metszéspont minden tagoltságnál	Hármas metszéspont 120°-os szögben

3.4 Tagoló felületek felületi jellemzői és a kitöltöttségük




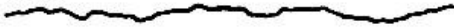





A tagoló felületek vizsgálatakor meg kell határozni annak érdekességi viszonyait. Makroszkopikus megfigyelés alapján megkülönböztetünk:

- lépcsős,
- hullámos,
- sík

formákat, melyeket még tovább durva, sima és egyenletes alcsoportokra kell osztani, a 3-2. ábrán megadott jelleg alapján. Az osztályba sorolást mind a repedések, mind pedig a rések és hasadékok esetében meg kell tenni.

A tagoló felület mállottsági, geokémiai átalakultsági fokát a felület jellemzésénél külön meg kell vizsgálni és a 3-8. táblázatban megadottak alapján a mállottság (átalakultság) fokát minősíteni kell.

A tagoló felületek közötti rés lehet kitöltött, részben kitöltött vagy üres. A tagoltság vizsgálatakor meg kell határozni a kitöltő anyag mennyiségét és fizikai tulajdonságait, mivel ezek jelentősen befolyásolhatják a közettést mechanikai viselkedését. Külön kell foglalkozni a tagoló felületek között az agyag esetleges jelenlétével, amelynek a közettömbök elmozdulásánál lehet jelentős szerepe. Kiemelten kell kezelni a vetőagyag jelenlétét.

A tagolófelület formája		JRC ₂₀	JRC ₁₀₀
lépcsős			
I	durva 	20	11
II	sima 	14	9
III	egyenletes 	11	8
hullámos			
IV	durva 	14	9
V	sima 	11	8
VI	egyenletes 	7	6
sík			
VII	durva 	2.5	2.3
VIII	sima 	1.5	0.9
IX	egyenletes 	0.5	0.4

3-2. ábra. A tagolófelületek formája és osztályozása. Az ábrán a 4. fejezetben tárgyalt “JRC” jelzőszámokat is szerepeltetjük

3-8. táblázat. A kőzetanyag és tagoló felület mállottsági, átalakultsági osztályba sorolása

Megnevezés	Leírása	Jele
<i>üde</i>	A mállásnak, illetve más geokémiai átalakulásnak nincs látható jele, legfeljebb a nagyobb tagoló felületek mentén észlelhető halvány elszíneződés	W.I
<i>kisé mállott</i>	A kőzetanyag és a tagoló felület elszíneződése határozottan látszik a mállás, geokémiai átalakulás miatt, és ez legtöbbször szilárdságvesztéssel is jár.	W.II
<i>közepesen mállott</i>	A kőzetanyag 35 %-ot el nem érő hányada talajjába bomlott és/vagy szétaprózódott. Üde, el nem színeződött kőzettömbök össze nem függően helyezkednek el, vagy a mállottabb, átalakultabb részek magját alkotják.	W.III
<i>igen mállott</i>	A kőzet legalább 35 %-a elbomlott, vagy talajjává változott. Üde, el nem színeződött kőzettömbök össze nem függően helyezkednek el, vagy mállottabb (geokémiailag átalakultabb) részek magját alkotják.	W.IV
<i>teljesen mállott</i>	A kőzetanyag talajjába bomlott és/vagy aprózódott szét. Az eredeti kőzetest-szerkezet még felismerhető.	W.V
<i>talajjába mállott</i>	A teljes kőzetanyag talajjába alakult át. A test struktúrája és anyaga teljesen felbomlott. Jelentős térfogati változás is van, de a talaj még nem szállítódott el.	W.VI

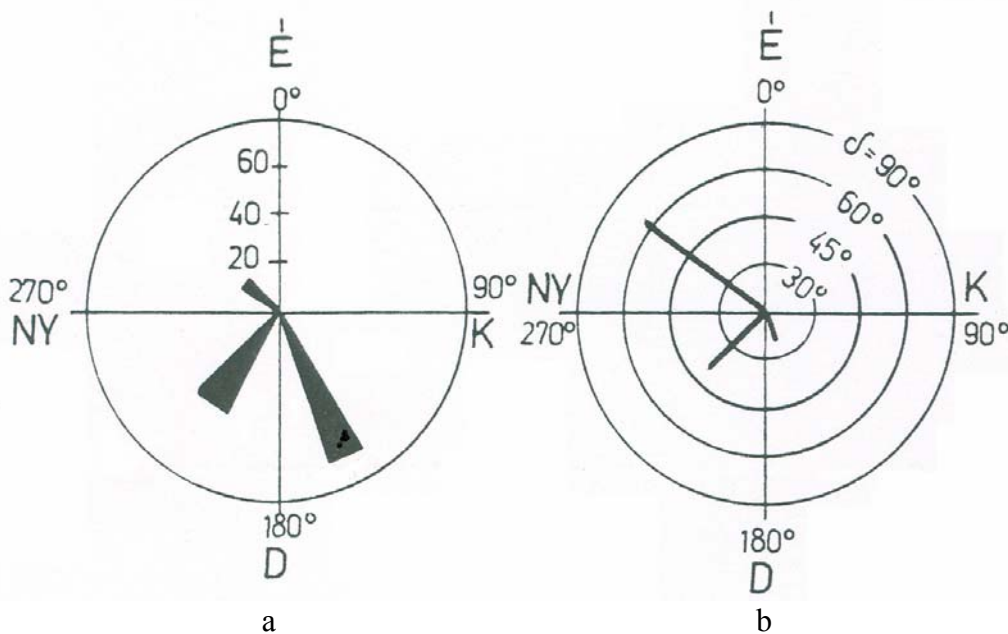
3.5 Tagoltság vagy tagoltsági rendszerek térbeli elhelyezkedés

A tagoltság vagy a tagoltsági rendszerek térbeli elhelyezkedését a tagoló felületek dőlésadatainak – dőlésirány (α), dőlésszög (δ) – mérésével vesszük fel, és a mért eredmények ábrázolásával adjuk meg. A mért értékek ábrázolása többféle módon lehetséges. A gyakorlatban a két legfontosabb lehetőség az eredmények:

- dőlésrózsában (rózsadiagrammon)
- sztereografikus projekcióval való megadása.

Dőlésrózsában történő ábrázolás

A tagoló felületek mérési eredményeit ezzel a módszerrel úgy ábrázoljuk, hogy dőlésirányban húzunk egy olyan vonalat, amelynek hossza arányos a dőlésszöggel. Így a nagyszámú mérési eredmények esetén egy a gyakoriságot jól mutató mező jelenik meg, ahol a terület a gyakorisággal arányos. A módszer egyedi mérési eredmények bemutatására is jól használható. A dőlésrózsa szerkesztését és eredményét mutatja a 3-3. ábra.



3-3. ábra. Dőlésadatok ábrázolása dőlésrózsában:

a) gyakorisági mérőháló b) egyedi mérési eredményeket mutató háló

Sztereografikus projekcióval készített ábrázolás

A szabatos, mind méretezésre, mind földtani felvételre jól használható módszer a gömb-projekció szerinti ábrázolás, melynél a sztereografikus projekció használata terjedt el. A tagoló felületeket a vetítés rendje szerint két formában adhatjuk meg:

- poláris és
- ekvatoriális

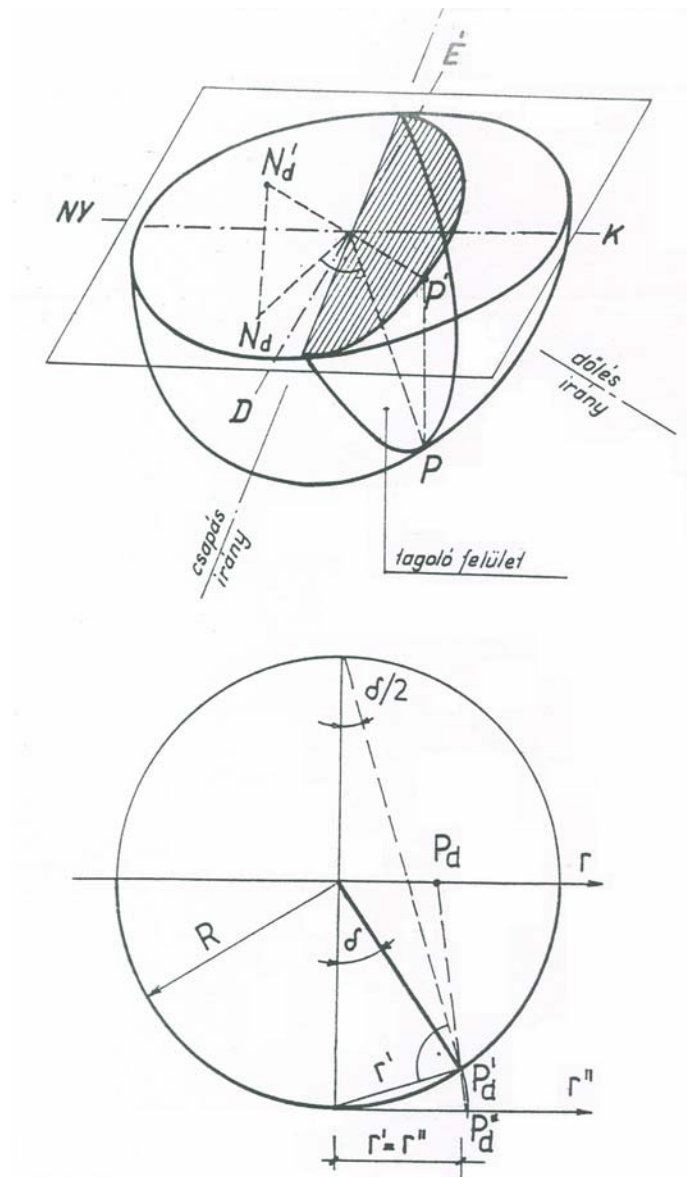
sztereografikus vetülettel. A poláris vetületnél a síknak tekintett tagoló felület dőlésirányát metszjük a félgömbbel, az ekvatoriális vetületnél a sík és a félgömb metszévonalát vetítjük a főkörre.

Poláris vetületi ábrázolás (normál hálón történő ábrázolás):

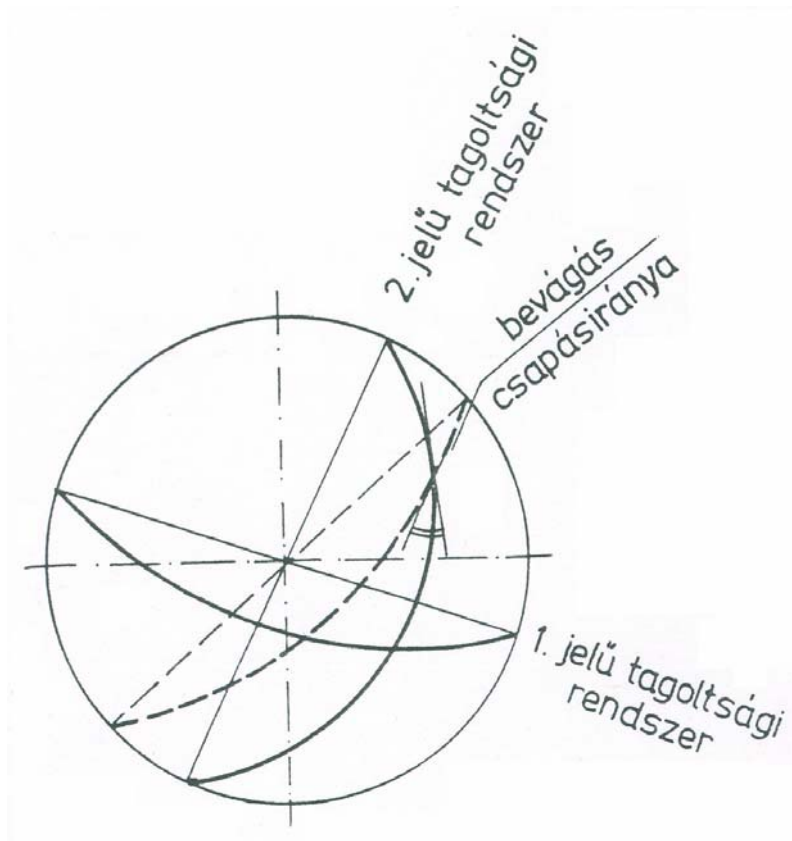
A poláris sztereografikus projekcióban minden síkot egy pont ábrázol, amelynek irányszöge a dőlésirány, az r sugár-menti távolság pedig a dőlésszög cosinusával arányos. A 3-4. ábrán látható P_d segédszerkesztés felhasználásával elérhető, hogy a vetítés után az r sugár-menti távolság a közölt összefüggés szerint arányos lesz a dőlésszöggel, ami a középponttól egyenletes beosztást eredményez.

Ekvatoriális ábrázolás (Schmidt hálón történő ábrázolás):

Az ekvatoriális sztereografikus projekcióban a tagoló felületeket egy-egy körcikk jellemzi. A kör középpontján átmenő húrok iránya a dőlésirányra merőleges, azaz a csapásirány irányszögét adják meg. Az ábrázolás előnye, hogy a tagoló felületek metszését az ívek metszése szöghelyesen mutatja, tehát a veszélyes – pl. hegyesszögű – metszések ebben a projekcióban jól értelmezhetőek. A 3-5. ábrán egy egymásra közel merőleges tagoltsági rendszernek és egy, ebben a környezetben létesült bevágásnak, mint tagoló felületnek az ekvatoriális sztereografikus vetületét mutatjuk be.



3-4. ábra. Dőlésadatok ábrázolása sztereografikus projekcióval



3-5. ábra. Különböző síkok ábrázolása sztereografikus projekcióval

3.6 Tagoltság mértéke

A tagoltság mértékének meghatározására számos módszer ismert. Az alábbiakban három különböző lehetőséget részletezünk:

- az integrálgeometriai módszert,
- az RQD érték meghatározásának módszerét,
- a C (Hansági) módszert.

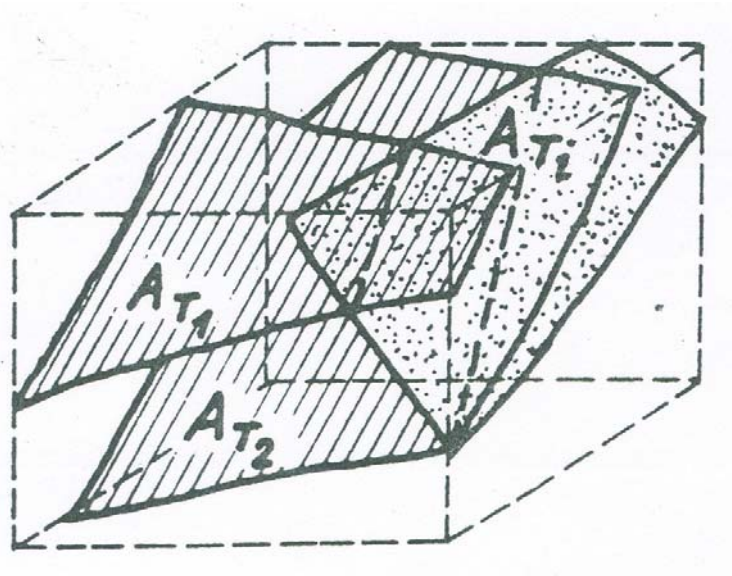
Mindhárom módszer célja a tagoltság mértékének számszerűsítése, majd a tagoltság jellemzői alapján a kőzettest minősítése és osztályba sorolása történhessen meg.

3.6.1 Integrálgeometriai módszer

A tagoltság mértékének meghatározásához Beyer és Rolofs (1981) valószínűség-számítási megfontolások alapján javasolta az ún. integrálgeometriai módszert, melyet hazánkban Gálos (1985) terjesztett ki a magfúrásos kutatásból nyerhető adatok hasznosítására.

A tagoltság mértékét a tagoltsági felület egységnyi térfogatra vetített fajlagos értékével (t) lehet jellemezni. Egy V_M térfogatú kőzettestben lévő ΣA_{Ti} felszínű tagoló felület esetében tehát a tagoltság értéke az alábbi összefüggéssel írható le (lásd 3-6. ábra):

$$t = \frac{\sum_{i=1}^n A_{Ti}}{V_M} \quad [\text{m}^2/\text{m}^3] \quad (3.1.)$$



3-6. ábra. Tagoló felületek a közzettestben

A tagoló felületek fajlagos értékének meghatározására két lehetőség van:

- feltárásban a feltárt felület és a tagoló felületek metszsvonalai alapján,
- teljesnek tekintett magkihozatalú magfúrás alapján.

Tagoltság meghatározása feltárásban

A tagoltsági felület fajlagos értékének meghatározása mérőhálójával történik. A mérőháló metszéspontjainak felvételével az ún. integrálgeometriai módszer használata abban az esetben lehetséges, ha a közzettestet valamilyen felületi metszetben lehet megvizsgálni. Ez lehet sziklarézsű, bányafal, táró oldala, munkagödör fala, természetes völgyoldal, stb.

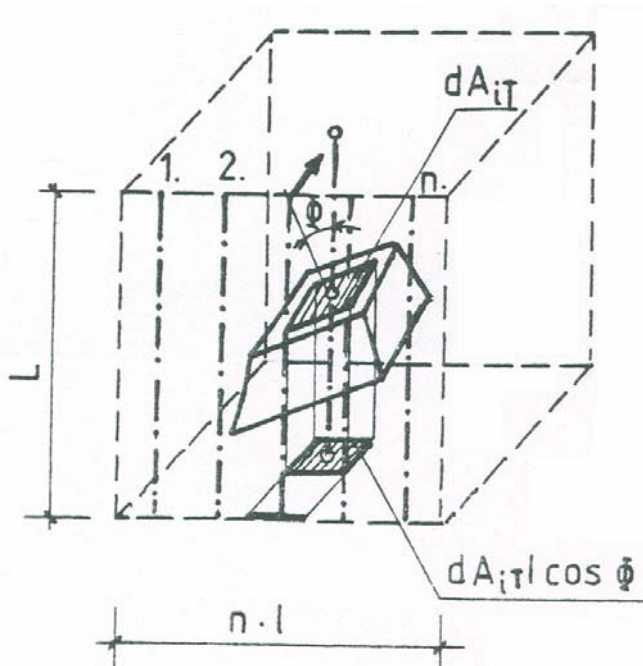
A közzettestre illesztett, párhuzamos vonalakkal álló mérőhálónál a mérőháló és a tagoltsági felületek metszéspontjainak számából (N_i) lehet a tagoltsági felület fajlagos értékét számítani. A tagolófelület számunkra a vizsgált felületen metszsvonalával jelenik meg, a 3-7. ábra szerint. Az ábra jelöléseit felhasználva a mérővonal metszésének síkba vetített valószínűségét meghatározhatjuk. „ n ” darab mérővonal esetében a teljes tagoló felületre integrálva ez a metszett pontok számát adja, melynek eredményeként a (3.1.) összefüggést az alábbi alakra írhatjuk át:

$$t = \frac{2N_i}{\sum_{n=1}^m L_n} \quad (3.2.)$$

ahol N_i a mérőhosszak és a tagoltsági metszsvonalak közötti metszett pontok száma úgy, hogy minden tagoló felületet figyelembe kell venni, azaz egy tagoltság két

metszett pontot ad; m a mérőhosszak száma; L_n az n -edik mérőhossz hossza méterben.

A tagoló felületek metszésvonalai alapján történő tagoltsági felvételére jól lehet használni a felületről készített fénykép-, illetve fotogrammetriai felvételt, mivel a megfelelő lépték alkalmazásával a felvételre egy mérőhálót lehet rajzolni, és a metszett pontok számát meg lehet határozni. A módszer, a mérőháló elforgatásával, a tagoltság irányítottságának értékelésére is alkalmas.



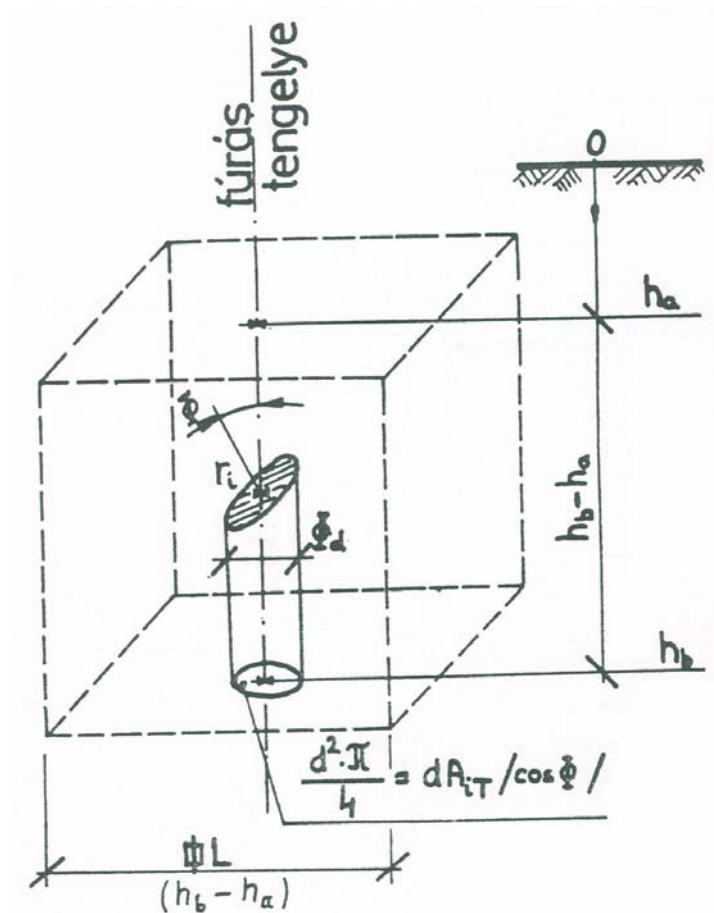
3-7. ábra. Egyenes mérőháló a tagolt közzettest felületén (Gálos, 1985)

Tagoltság meghatározása magfúrás esetén

A fúrások maganyagának feldolgozása alapján a tagoltság felvétele a magkihozatal függvénye. Csak teljes, vagy majdnem teljes magkihozatalú fúrás alkalmas a tagoltsági felület fajlagos értékének meghatározására. A $(h_b - h_a)$ fúrómag hosszon előforduló tagoló felületek száma alapján a tagoltság fajlagos értéke az alábbiak alapján számolható ki, ha a magfúrás tengelyét tekintjük mérővonalnak (lásd 3-8. ábra):

$$t = \frac{2 \sum_{h_a}^{h_b} N_i}{h_b - h_a} \quad (3.3.)$$

ahol N_i az i -edik tagoló felület mérővonal metszése, $(h_b - h_a)$ a kiserelési mélységköz.



3-8. ábra. Kőzettest tagoltságának meghatározása magfúrás maganyagának feldolgozásával

A vizsgálat lehetőséget biztosít arra, hogy a tagoltsági réstérfogatot is meghatározhassuk. A tagoltság fajlagos értéke és a tagoltsági réstérfogat alapján a kőzettest osztályba sorolása is lehetséges.

Tagoltság fajlagos réstérfogata

A tagoltság fontos jellemzője a tagoltság fajlagos réstérfogata (n_M), ami a tagoltság tágasságából adódó rések térfogatának (V_t) aránya a V_M kőzettest térfogatához:

$$n_M = \frac{V_t}{V_M} \quad [\text{m}^3/\text{m}^3] \quad (3.4.)$$

A tagoltság fajlagos réstérfogatát a gyakorlatban százalékos, vagy ezrelékes formában adjuk meg. Az \bar{x}_0 átlagos réstágasság ismeretében a tagoltság fajlagos réstérfogata a tagoló felületek fajlagos értékével számolható:

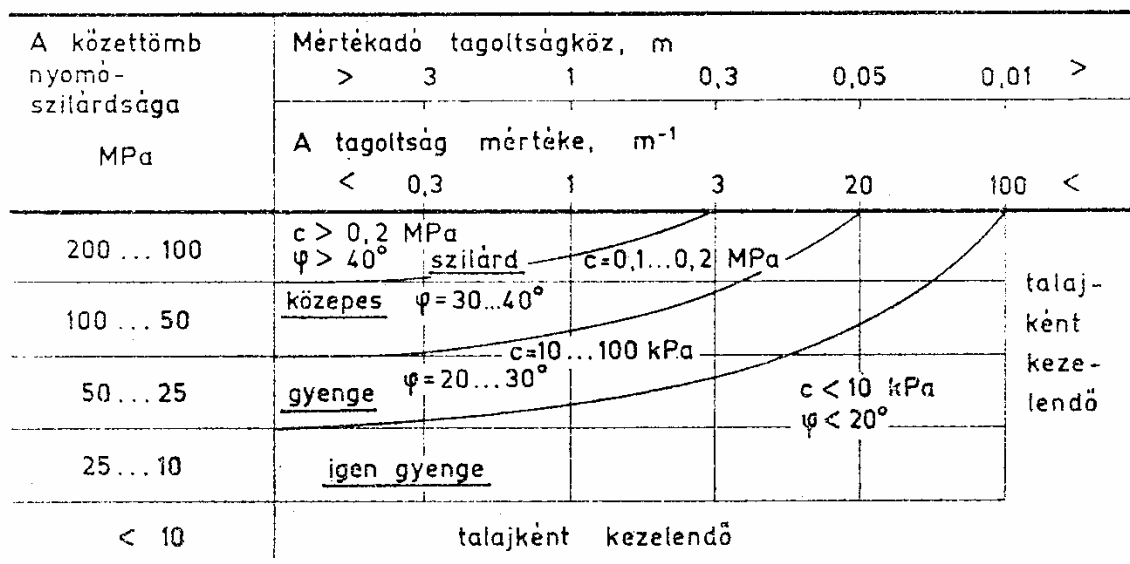
$$n_M = t\bar{x}_0 = \frac{2N_i}{\sum_{n=1}^n L_n} \bar{x}_0 \quad (3.5.)$$

Mérőhálós felvételezés esetén az átlag réstávolságot (\bar{x}_i) a mérőháló metszéspontjától két oldalra és azonos távolságban végzett további két-két tágasságmérés átlagaként kell meghatározni.

A tagoltsági felület és tagoltsági réstérfogat ismeretében lehetőség van a kőzettestek osztályba sorolására. Ezt mutatja be a 3-9. táblázat, amely a teljesen éptől a töredezett kőzettestig öt különböző kategóriát állít fel. Az osztályozás hiányossága az, hogy nem veszi figyelembe a kőzet szilárdsági tulajdonságait. Ezt kiküszöbölendő, Gálos és Kertész (1989) Bieniawski (1989) ajánlásait figyelembe véve a 3-9. ábra alapján ajánlja osztályba sorolni a kőzettestet a tagoltsági fajlagos felület és a kőzettestet alkotó kőzettömbök szilárdságának ismeretében. A megadott diagram segítségével a kőzettest fizikai paraméterei (belső súrlódási szög, kohézió) is megbecsülhető.

3-9. táblázat. A kőzettest osztályba sorolása tagoltsági felület fajlagos értéke valamint a réstérfogat alapján

A kőzettest megnevezése	Tagoltsági felület fajlagos értéke (t) [m^{-1}]	Tagoltsági réstérfogat (n_t) [-]
ép	< 0,3	< 0,02
kissé tagolt	0,3 – 3,0	0,02 – 0,04
közepesen tagolt	3,0 – 20	0,04 – 0,10
erősen tagolt	20 – 100	0,10 – 0,50
töredezett	> 100	> 0,5



3-9. ábra. A tagolt kőzettest minőségi osztályai a tagoltsági felület fajlagos értéke és a nyomószilárdság alapján (Kertész & Gálos, 1985)

3.6.2 Az RQD érték a tagoltság mértékének meghatározására

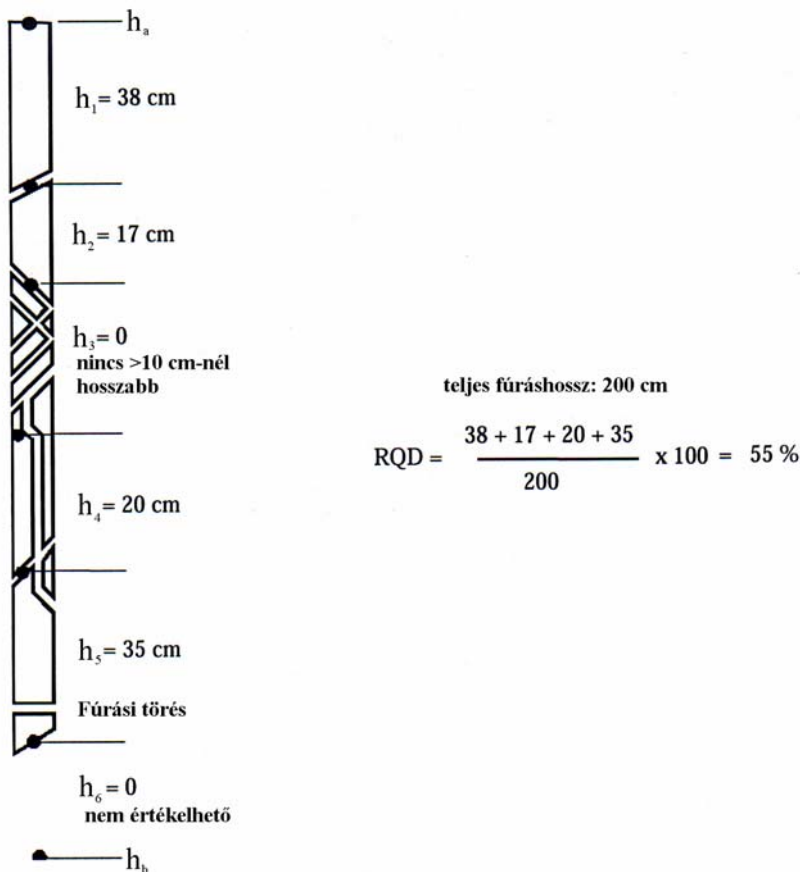
A tagoltság mértékének megállapítására és annak számszerűsítésére az RQD-módszer (RQD = Rock Quality Designation) terjedt el. Ezt a legtöbb kőzettest osztályozási módszer mint alapadatot használja fel. Az RQD értéket előbb fúrómagra határozták meg, majd a szabad sziklafalakon felvehető egységnyi térfogatra eső tagoltsági értékkel is megfeleltették. A legújabb kutatásoknál már a tagolófelület irányát is figyelembe veszik e tényező pontos megállapításánál.

Az RQD érték használatát Deere vezette be 1964-ben, és ma már ez az egyik alapvető mérőszám a kőzettest tagoltságára vonatkozóan. Meghatározásánál a fúrómagból, (melynek átmérője minimálisan 54,7 mm, azaz 2,15 hüvelyk) és a kihozott magmintadarabok hosszának méréséből indultak ki. Maga a mérőszám százalékban adja meg azon daraboknak az összhosszát, melyek hosszabbak, mint 100 mm (ill. az angolszász használatban 4 hüvelyk), azaz az RQD érték:

$$RQD = \frac{\sum h_{10}}{h_b - h_a} 100 [\%] \quad (3.6.)$$

ahol $\sum h_{10}$ a 10 cm-nél hosszabb darabok összhossza, h_b és h_a pedig a vizsgált mélységköz felső és alsó mélysége.

Deere szerint azon fúrások is épnek tekintendők, amelyen a tagoló felület a fúrástengellyel megegyezően helyezkedik el. Javasata alapján a kiszámítás lehetőségét egy példán keresztül mutatjuk be a 3-10. ábra segítségével.



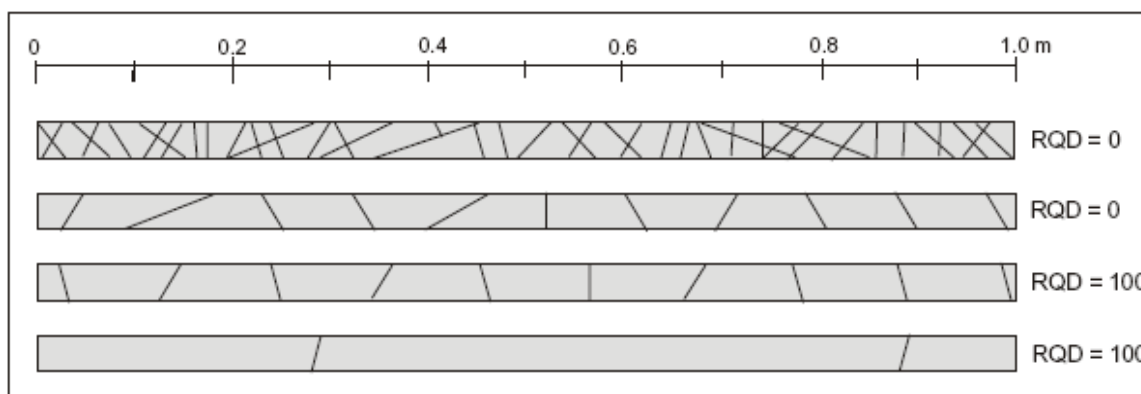
3-10. ábra. Példa az RQD meghatározásának módszeréhez (Deere, 1989).

A 3-11. ábrán egy ép és egy nagyon töredezett magfúrás eredménye látható. A 3-12 ábra Palmström (2001) mérési eredményét mutatja, felhívva a figyelmet ezen érték használatának buktatóira: amint az ábrán jól látszik, lényeges eltérés lehet mind az $RQD = 0\%$, mind az $RQD = 100\%$ -os értékkel jellemezhető fúrásszakasz között.

Az RQD érték megállapításakor az egyértelműen a fúrásakor keletkezett friss törések figyelmen kívül hagyandók. Palás kőzetek esetében pedig közvetlenül a magkihozatal után kell a minősítést elvégezni, nehogy a paláság síkjában bekövetkező fellazulás az eredményt meghamisítsa. Megfelelő fúrás és magkihozatal mellett az RQD érték még rossz magkihozatal esetén is reális képet ad, mivel a rossz magkihozatal oka ilyenkor általában a nagyon gyenge kőzetminőség. A fúrómagok hossza nemcsak a kőzet repedezettségétől függhet, hanem egyéb, a kőzet tulajdonságaitól független körülményektől is, így például az alkalmazott fúrás módtól, a fúróberendezés állapotától, sőt a fúrószemélyzet gyakorlottságától is. Több száz fúrómagon végzett vizsgálat azonban azt mutatta, hogy mindeme körülmények következtében eltört fúrómagok az összes törésnek legfeljebb 11 %-át teszik ki, és ráadásul meglehetősen állandó jellegűek is. Mindez azt bizonyítja, hogy a fúrómagtöréseknek csaknem 90 %-a a kőzet repedezetségi fokától függ. Mivel a külső hatások okai állandó tendenciát mutatnak, kellő biztonsággal feltételezhető, hogy a fúrómagdarabok kapott hosszára alapozott módszerek alkalmasak a repedezetség meghatározására, de minden esetben arra jók, hogy a számítások eredményeit egymással megbízható módon össze lehessen hasonlítani.



3-11. ábra. Egy ép (a) és egy nagyon töredezett (b) kőzettest magládája



3-12. ábra. Példa a minimális (0 %) és maximális (100 %) RQD tényezőkre (Palmström, 2005)

3.6.2.1 Kőzettestek osztályozása az RQD érték alapján

A 3-10. táblázat a gyakorlati megfigyelések alapján megállapított RQD érték és a kőzettest osztályok közötti kapcsolatot adja meg. Ez a táblázat megegyezik az EUROCODE 7-1-ben megadott osztályozással.

Az RQD érték mellett mind általánosabbá válik az ún. TCR (Total Core Recovery) érték megadása is, mely azt mutatja meg, hogy a teljes fúráshossz hány százaléka áll teljesen ép fúrómagból. Ez az érték inkább tájékoztató jellegű, az RQD mellett szokták csak felhasználni. Természetesen TCR \geq RQD, értéke 0 és 100 % között változhat.

3-10. táblázat. Kőzettestek osztályozása az EUROCODE 7 -1 szerint a kőzetmechanikai megnevezésekkel

RQD %	Kőzettest minősítése EUROCODE 7-1 alapján	Kőzettest kőzetmechanikai minősítő megnevezése
> 25	Nagyon gyenge	Gyakorlatilag talajként kezelhető
25 – 50	Gyenge	Nagyon töredezett
50 – 75	Megfelelő	Töredezett
75 – 90	Jó	Kisé töredezett
90 – 100	Kiváló	Ép

3.6.2.2 Közvetett módszerek az RQD meghatározásához

Térfogati tagoltságszám

Abban az esetben, amikor nem áll rendelkezésünkre fúrómag, viszont a tagolt felület jól látható, az RQD értéke az egységtérfogatra vonatkoztatott tagoltsági számból is kiszámítható Palmström (1982) ajánlása alapján agyag-mentes kőzettest esetén:

$$RQD = 115 - 3,3 J_V \quad (3.7.)$$

ahol J_V megadja az egy köbméterben található összes tagoltságnak a számát. (azaz a térfogati tagoltság számot)

A térfogati tagoltság számot (J_V) Sen és Essa (1992), valamint Palmström (1996) megállapításai alapján a következőképpen számíthatjuk:

$$J_V = \sum_{i=1}^J \frac{1}{S_i} + \frac{N_r}{5}, \quad (3.8.)$$

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 a 3-11. táblázatban adjuk meg.

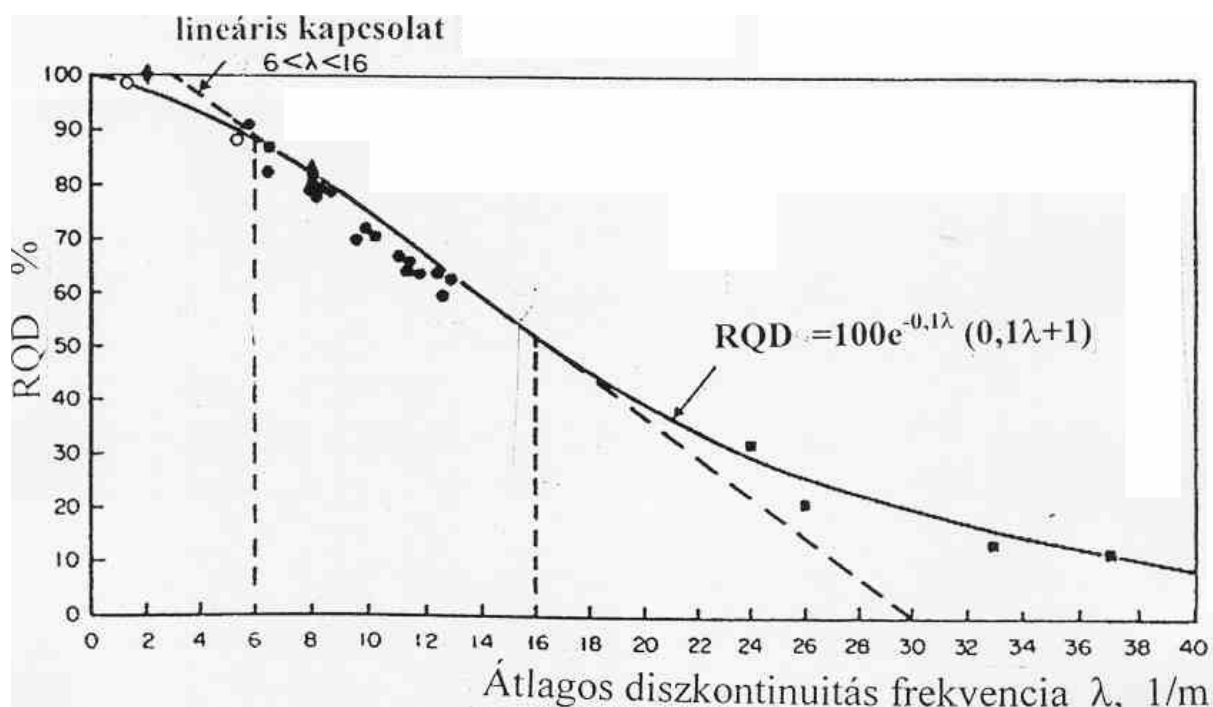
3-11. táblázat. A térfogati tagoltság-szám ismeretében a kőzettest osztályba sorolása (Palmström, 1982)

Osztály	A tagoltság meghatározása	J_v meghatározás	J_v
1	Masszív	különlegesen alacsony	< 0,3
2	Nagyon kismértékben tagolt	nagyon alacsony	0,3 – 1,0
3	Kismértékben tagolt	alacsony	1 – 3
4	Közepesen tagolt	közepesen magas	3 – 10
5	Erősen tagolt	magas	10 – 30
6	Nagyon erősen tagolt	nagyon magas	30 – 100
7	Töredezett	különlegesen magas	> 100

Az RQD érték felszíni bevágásban történő meghatározásának lehetőségével részletesen foglalkozik még Priest és Hudson (1976), akik a fenti (3.8.) összefüggést ellenőrizték angliai útépítésekhez készített bevágásoknál, és azt a kapott eredményeikkel pontosították. A mért értékek statisztikai feldolgozása alapján az alábbi összefüggést írták fel:

$$RQD = 100 e^{-0,1\lambda}(0,1\lambda+1), \quad (3.9.)$$

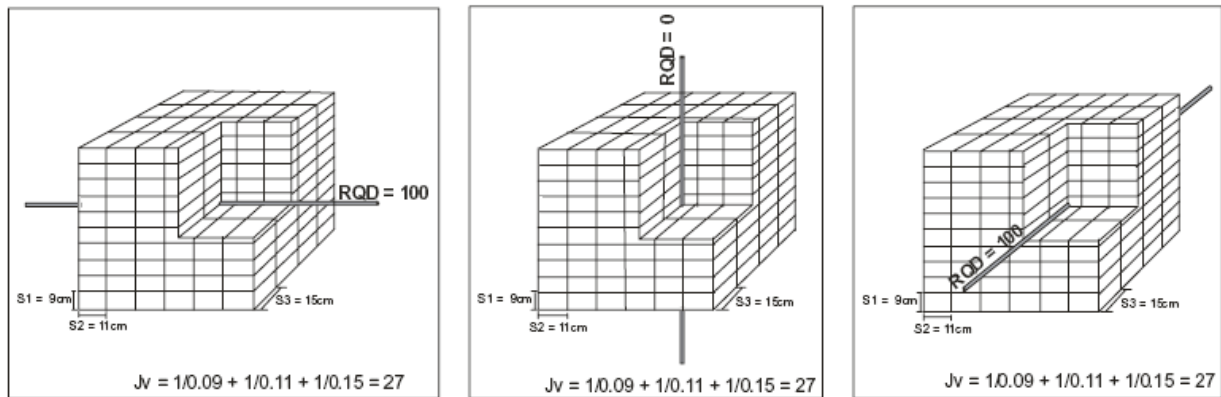
ahol λ az egy folyóméterre eső tagoltságok száma, azaz azok frekvenciája. A kapott eredményt a 3-13. ábrán is bemutatjuk.



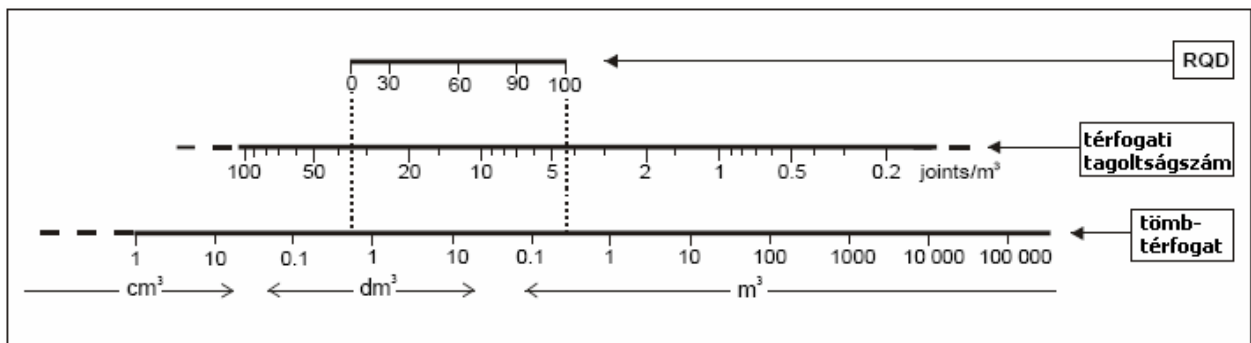
3-13. ábra. RQD meghatározása feltárásban: a tagoltságok frekvenciája és az RQD közötti kapcsolat (Priest & Hudson, 1976)

Amint azt fentebb említettük, az RQD értéke irányfüggő, míg a térfogati tagoltság-szám értéke nem. A 3-14. ábra egy szélsőséges példát mutat (Palmström, 2005): feltételezzük, hogy 3 tagoltsági rendszer van, melyek 9, 11, illetve 15 cm-es távolságra vannak egymástól. A fúrásiránytól függően így RQD = 100 %-os és RQD = 0 %-os értékeket kaphatunk, míg a térfogati tagoltság-szám értéke állandó.

A kőzettömbök mérete, az RQD tényező és a térfogati tagoltság-szám (Jv) közötti kapcsolatot a 3-15. ábra szemlélteti.



3-14. ábra. Ugyanabban a kőzettestben készített három különböző irányú fúrás RQD értéke és térfogati tagoltság-száma (Palmström, 2005)



3-15. ábra. Az RQD tényező, a térfogati tagoltság-szám és a kőzettömb térfogata közötti kapcsolat (Palmström, 2001)

Súlyozott tagoltsági-érték

Az RQD érték a tagoltság irányától függő paraméter, azaz azt a fúrás iránya jelentősen befolyásolja. Például a fúrással párhuzamos tagoltságokat egyáltalán nem veszi – nem is veheti – figyelembe, mivel a megfúrás tengelye párhuzamos a tagoltsággal. Ezt a hibát kiküszöbölendő Palmström (1996) bevezette a súlyozott tagoltsági-értéket, melyben már figyelembe lehet venni a tagoltsági irányokat is. A súlyozott tagoltsági érték ($wJd = \text{weighted Joint density}$) a következőképpen számolható ki (lásd 3-16. ábra):

- Kőzettest felületén való mérés esetén (2 dimenziós vizsgálatnál), például bevágásban, ahol a kőzettest szabad felszíne vizsgálható:

$$wJd = \frac{1}{\sqrt{A}} \sum \frac{1}{\sin \delta} = \frac{1}{\sqrt{A}} \sum f_i \quad (3.10.)$$

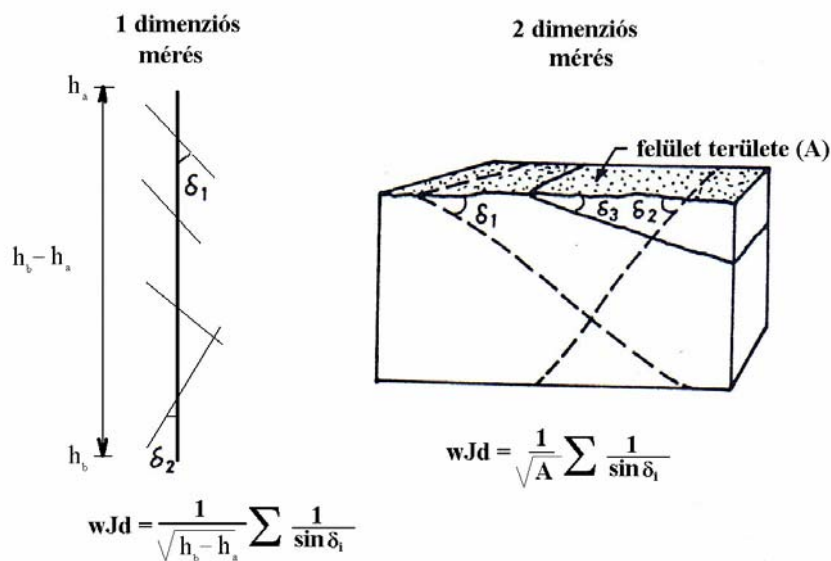
- Fúrásos feltárás esetén (1 dimenziós vizsgálatnál), ahol a fúrómagok magládában, vagy kiterítve vizsgálhatók:

$$wJd = \frac{1}{\sqrt{h_b - h_a}} \sum \frac{1}{\sin \delta} = \frac{1}{\sqrt{h_b - h_a}} \sum f_i \quad (3.11.)$$

ahol δ a vizsgált sík és a tagoltság síkja közötti szög, A a vizsgált terület mérete (m^2), $(h_b - h_a)$ a vizsgált kiserelési mélységköz és f_i a súlyozási érték, mely a 3-12. táblázat alapján vehető fel.

3-12. táblázat. Ajánlott súlyozott értékek a tagoltsági irány-tartományoknál (Palmström, 1996)

A tagoltsági-sík és a vizsgált sík közötti szög	f_i
$> 60^\circ$	1,0
31-60°	1,5
16-30°	3,5
0-15°	6,0



3-16. ábra. Súlyozott tagoltsági érték (wJd) meghatározása fúrómagból (balra) és kőzettelületből (jobbra) Palmström (1996) nyomán.

RQD meghatározása szeizmikus módszerrel

A szeizmikus módszer azon az elven alapszik, hogy a rugalmas anyagban terjedő hullámok sebességéből következtethetünk az adott réteg tulajdonságaira. A módszer előnye, hogy aránylag olcsóbb és gyorsabb, mint a fúrásos vizsgálat. Ennél a vizsgálatnál megismerhetjük az alapkőzet térbeli elhelyezkedését és geológiai szerkezetét, valamint megbecsülhetjük annak RQD tényezőjét is:

$$RQD (\%) = (V_F/V_L)^2 \cdot 100 \quad (3.12.)$$

ahol V_F a helyszínen a geostatikai nyomás alatt terhelt (*in situ*) mért hullámterjedési sebesség, V_L a kőzettömbből kivett próbatesten, laboratóriumban mért longitudinális hullám terjedésének sebessége azonos környezeti nyomás mellett.

3.6.2.3 Az alakváltozási modulus és az RQD közötti kapcsolat

Az RQD érték használatakor már korábban is felvetődött a kérdés, hogy összefüggésben van-e ez a tényező a kőzetkörnyezet alakváltozási modulusával. Az első ilyen összefüggést Coon és Merritt (1970) írta fel. Ők öt különböző helyen és kőzetkörnyezetben épített gát helyszíni (*in situ*) vizsgálatainak adatait dolgozták fel, és az alábbi összefüggést határozták meg a kőzettest alakváltozási modulusa (E_m) és a szabályos alakú próbatesten laboratóriumi vizsgálatokkal mért alakváltozási modulus (E_r) között:

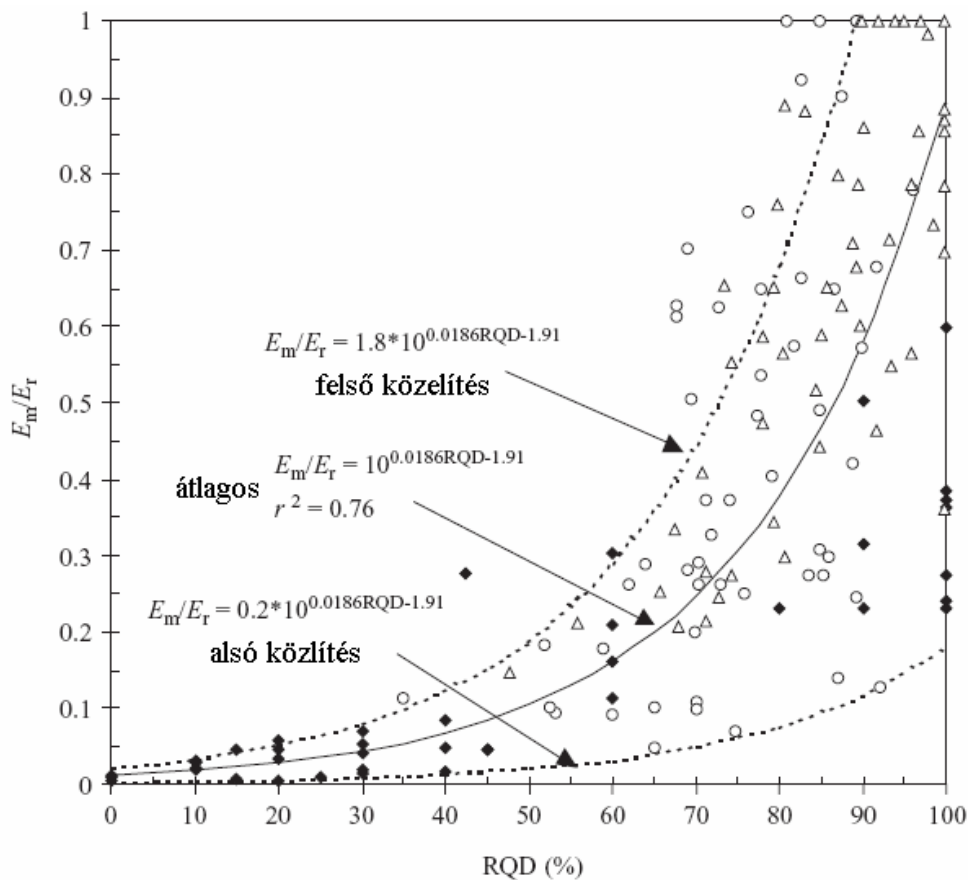
$$E_m = \alpha_E E_r \quad (3.13.)$$

ahol α_E az RQD függvényében meghatározott tényező:

$$\alpha_E = 0,0231 \text{ RQD} - 1,32 \geq 0,15 \quad (3.14.)$$

Ezt a számítási módot az Egyesült Államokban ma már szabványosították, az állami autópályák hídjainak tervezésekor az így számított alakváltozási modulusot kell figyelembe venni (AASHTO, 1989).

Amint az a képletből is látszik, $\text{RQD} > 60\%$ esetén használható kellő biztonsággal, mivel ennél jobban töredezett kőzettest esetén α_E értékét 0,15-nek kell felvenni. Nagy hibája a javasolt összefüggésnek az, hogy kevésbé töredezett kőzettestek esetén a kőzettest és a próbatest alakváltozási modulusának értéke megegyezik, ami természetesen a valóságban nem igaz.



3-17. ábra. A kőzettest és az ép kőzet deformációs modulusának hányadosa az RQD függvényében a feldolgozott mérési eredmények alapján (Zhang & Einstein, 2004)

Zhang és Einstein (2004) a szakirodalomban megjelent jelentősebb mérési eredményeket feldolgozva új összefüggéseket állított fel az alakváltozási modulus és az RQD közötti kapcsolat leírására (Gálos & Vásárhelyi, 2005). A 3-17. ábrán azokat a közelítő görbéket szerepeltetjük, melyek alapján a köztetömbből kivett próbatesten mért és a köztettet alakváltozási modulusa között az alábbi összefüggés látható:

- alsó közelítésben:

$$E_m / E_r = 0,2x10^{0,0186RQD-1,91} \quad (3.15a.)$$

- felső közelítésben:

$$E_m / E_r = 1,8x10^{0,0186RQD-1,91} \quad (3.15b.)$$

- átlagos:

$$E_m / E_r = 10^{0,0186RQD-1,91} \quad (3.15c.)$$

Az összefüggések nagy előnye, hogy $0 \leq RQD \leq 100$ értékekre igazak. Hiányosságuk viszont az, hogy a tagoltság állapotát, esetleges kitöltöttségét, valamint a tagoltság irányát semmilyen formában sem veszik figyelembe.

3.6.3 C (Hansági) módszer

Az RQD érték megalkotásakor Deere feltételezte, hogy a feltáró fúrásnál minimálisan 54 mm átmérőt használnak. Ez a kötöttség elég sok nehézséget okoz, hiszen sok esetben még igen nagy anyagi ráfordítás esetén sincs lehetőség ekkora átmérőjű fúrásra. Ezt figyelembe véve, valamint az RQD módszer egyéb korlátai miatt, Hansági (1965, 1986) ajánlására vezették be az ún. C tényező számításának módszerét, mely minden átmérő esetén használható. Kétségtelen tény, hogy a C tényező kiszámítása bonyolultabb, mint az RQD érték meghatározása, viszont a C tényező a gyakorlat szempontjából jobban megfelel az elvárt követelményeknek.

A C tényező a C_p ún. próbatest-tényezőnek és a C_m maghosszúság-tényezőnek számtani középárányából adódik, vagyis:

$$C = \frac{C_p + C_m}{2} \quad (3.16.)$$

A C_p próbatest-tényező kiszámításakor meghatározzák azt, hogy a magátmérőnél hosszabb hengeres fúrómag-darabokból hány p darab magátmérő-hosszúságú próbatestet lehetne kialakítani. Ezek a kifűrészelhető próbatest-darabok összegezve (pD) egy fúrómag-hosszúságot adnak, amit arányba állítunk a vizsgálat tárgyát képező fűrőlyuk vagy fűrőlyukszakasz ($h_b - h_a$) hosszúságával. Számszerűleg:

$$C_p = \frac{pD}{h_b - h_a} \quad (3.17.)$$

ahol C_p a próbatest-tényező, p a vizsgálat tárgyát képező fűrőlyukból vagy fűrőlyukszakaszból kimunkálható szabványos próbatestek száma (db), D a

fűrőmag átmérője, (h_b-h_a) a vizsgálat tárgyát képező vizsgált mélységköz hossza.

A C_m maghosszúság-tényező kiszámítása nagyjából hasonlóan történik, mint az RQD érték meghatározása, de szoros kapcsolatba hozva a mindenkori magátmérővel, továbbá nem a magdarabok összegzett M hosszát, hanem a magdarabok átlagos \bar{m} hosszát viszonyítjuk a teljes (h_b-h_a) fűrőlyuk szakaszhoz. Fontos, hogy a maganyagot olyan intervallumokra bontsuk a vizsgálathoz, amelyen belül a kőzet nagyjából egységes képet (kőzetmechanikai viselkedést) mutat. Hansági eredetileg megadta a maximális kiválasztható intervallumhosszt is, amit a fűrőmag súlyából adódó, öntörést létrehozó nyomatékból vezetett le. A maghosszúság-tényező kiszámítási módja:

$$C_m = \frac{\bar{m}}{h_b - h_a} \quad (3.18.)$$

ahol

$$\bar{m} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i}{n} = \frac{M}{n}. \quad (3.19.)$$

Ebben a kifejezésben M azon fűrőmag-darabok összegzett hossza, (azaz $\sum_{i=1}^n m_i$), amelyeknek hengeres hossza legalább akkora, mint a magátmérő. Azaz az összefüggés a következő alakban is felírható:

$$C_m = \frac{M}{n(h_b - h_a)}, \quad (3.20.)$$

ahol n azon magdarabok száma, melyek hossza meghaladja a fűrőmag átmérőjét. A C tényező kifejezhető az (3.16.), (3.17.) és (3.20.) összefüggésből:

$$C = \frac{1}{2(h_b - h_a)} \left(pD + \frac{M}{n} \right) \quad (3.21.)$$

A C tényező nagysága 0 és az 1 között változhat. Ha egyáltalán nem lehetséges szabványos henger alakú próbatestet kialakítani a fűrőmagból, akkor a C tényező értéke 0. Ha viszont a magfúrás által csak egyetlen és olyan $(h_b - h_a)$ hosszúságú fűrőmag kerülne kinyerésre, mint a vizsgálat tárgyát képező fűrőlyuk mélysége, vagy fűrőlyukszakasz hossza, akkor a C tényező értéke 1. Ez utóbbi eset nyilvánvalóan csak rendkívül ritkán és igen tömött, egynemű, szilárd kőzetek esetében fordulhat elő. Ekkor a kőzetest és a kőzettömb közötti határ elmosódik, a kőzetest anyagtulajdonságai a kőzettömbével egyeznek meg.

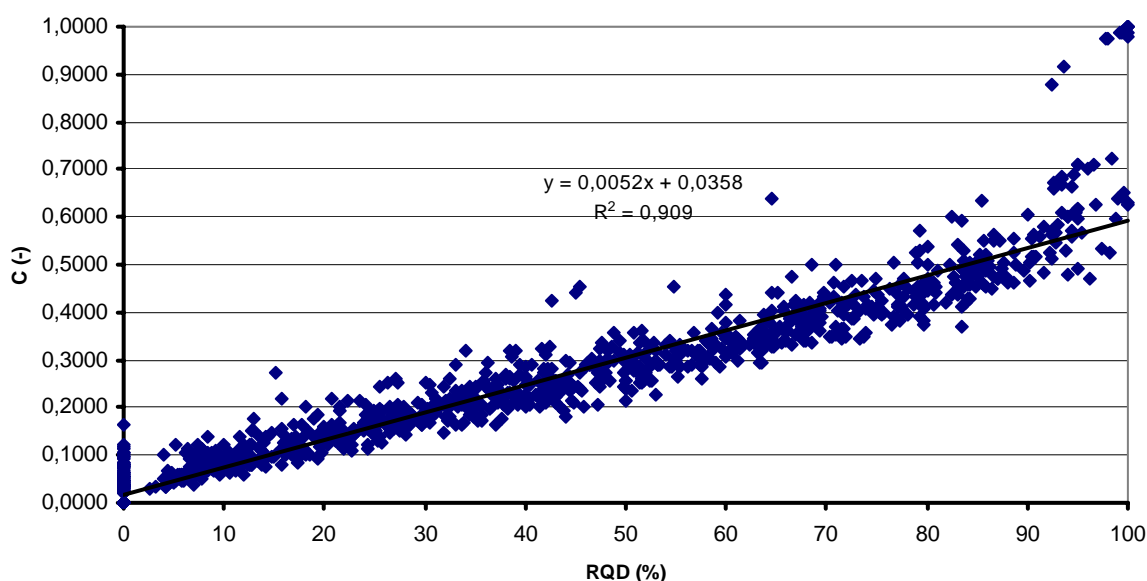
A (3.20.) egyenletből nyilvánvalóvá válik, hogy a C_m maghosszúság-tényező nagysága sokkal kisebb, mint a C_p próbatest-tényező, mert a maghosszúság-tényező a magdarabok átlagos hosszának és a kérdéses $(h_b - h_a)$ fűrőlyukszakasz hosszának aránya. Ez ugyan ellentmondásnak látszik, azonban könnyű belátni, hogy a maghosszúság-tényezőnek igen fontos szerepet kell kapnia a C repedezettségi (tagoltsági) tényező értékének kiszámításában, mert ez fejezi ki leginkább a kőzet repedezettségi (tagoltsági) tulajdonságait. Elképzelhető ugyanis, hogy a kőzetből magfúrással viszonylagosan sok rövidebb, de az átmérőt mégis meghaladó hosszúságú hengeres magdarabokat kapunk, aminek következtében a C_p próbatest-

tényező aránylag elég nagy értékű lesz, de ugyanakkor a C_m maghosszúság-tényező igen kicsi értékű, mert a kinyert magok átlagos hosszúsága kicsi. Ennek megfelelően a C_m reális értékre csökkenti le a C tényező nagyságát.

A C és az RQD- tényező között jól kimutatható korreláció áll fent abban az esetben, ha $10 \leq \text{RQD} \leq 90$ % között van. Ebben az esetben a (3.22) képlettel lehet a két tényező között a kapcsolatot meghatározni.

$$C = 0,052 \text{ RQD (\%)} + 0,0358 \quad (R^2 = 0,909) \quad (3.22)$$

RQD = 0 és RQD = 100 % érték környezetében a C tényező sokkal érzékenyebben mutatja a fúrómag töredezettségét. A bátaapáti feltáró fúrások maganyagának elemzésénél kapott értékek a 3-18. ábrán mutatjuk be.



3-18. ábra. A bátaapáti fúrómagok számított C tényezői az azonos szakaszon kiszámított RQD érték függvényében

Hansági (1965) kísérletet tett a kőzettest szilárdságának (σ_c^M) kiszámíthatására is. Ez értéket C tényező és a laboratóriumban meghatározott kőzettömbből vett minta egytengelyű nyomószilárdságának (σ_c) a szorzataként tételezte fel:

$$\sigma_c^M = C \sigma_c \quad (3.23.)$$

A kőzettestnek nemcsak a nyomó-, hanem a húzószilárdsága is ugyanígy határozható meg, ha a laboratóriumban végzett vizsgálat alapján a kőzet húzószilárdsága ismert. A gyakorlatban ez a megállapítás túlzott egyszerűsítésnek mutatkozott.

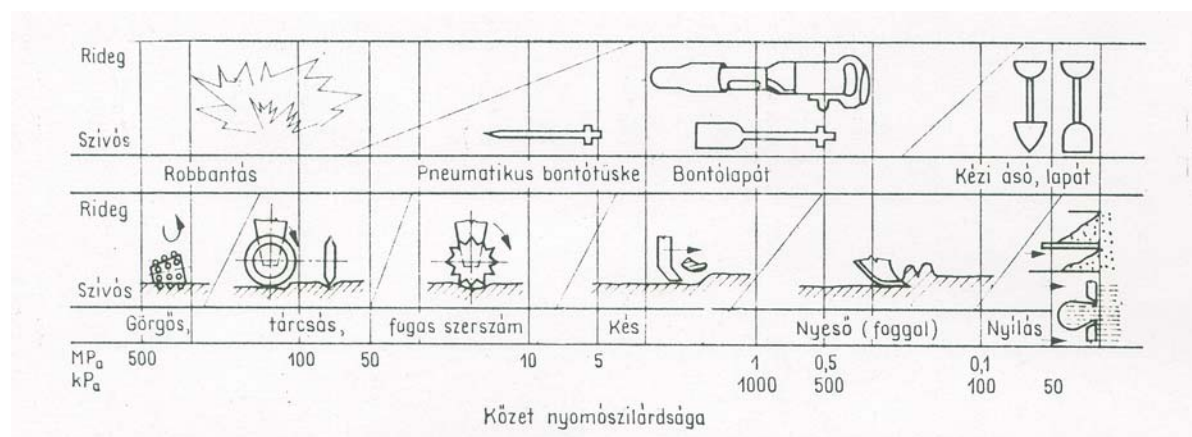
Mérésekkel megállapították, hogy a C tényező nagysága – és ebből adódóan a kőzettömb (3.23) szerint értelmezett szilárdsága – fordítottan (közel lineárisan) arányban áll az uralkodó kőzetcsoporttal. Ez a megállapítás a gyakorlat számára fontos, mert azt mutatja, hogy a magfúrással kapott kőzettömbből számított C tényező értékei mintegy magukba foglalják az uralkodó primer kőzetcsoportok hatásait is. A gyakorlatban ugyanis majdnem közböns, hogy vágatnyitáskor a kőzet miért tör össze: azért, mert már eredetileg is repedezett volt, vagy pedig azért, mert az uralkodó kőzetcsoportok vezettek az a kőzet összetörésére, amit a C tényező nagysága viszont megbízhatóan kifejezésre is juttat.

A 3-13. táblázatban egy 5 méter széles, 3,6 m magas vágat esetén bemutatjuk az ajánlott biztosítást, amit a C tényező segítségével meghatározott kőzettest szilárdsági érték alapján állítottak össze. Megjegyezzük, hogy Hansági (1965, 1986) módszerét, amit a kirunai bányákhoz fejlesztett ki, a nemzetközi általános mérnöki gyakorlatban (alagútépítésnél, alapozások tervezésénél) nem terjedt el. Magyarországon főleg a bányamérnöki gyakorlatban és a radioaktív hulladéktárolók kutatásában (Kovács, 1996, 1997) ismert és több esetben figyelembe vett tényező.

Az itt bemutatott módszert fejlesztette tovább Palmström az R_{Mi} érték meghatározásához, melyet az 5.7. fejezetben részletesen bemutatunk.

3-13. táblázat. Kőzettest nyomószilárdsága alapján egy 5 m széles, 3,6 m magas, boltozottan kihajtott vágatban szükséges biztosítás (Hansági, 1986)

A kőzettest nyomószilárdsága (MPa)	Szükséges biztosítás
0 – 10	Szisztematikus kőzethorgonyzás, acélhálós löttbeton-biztosítás vagy öntött-betonozás
10 – 20	Szisztematikus kőzethorgonyzás és löttbeton
20 – 25	Szisztematikus kőzethorgonyzás
25 – 35	Néhány kőzethorgony
> 35	A vágat nem igényel biztosítást



3-19. ábra. A kőzettest nyomószilárdságához tartozó fejtési módok (Ábrahám, 1982)

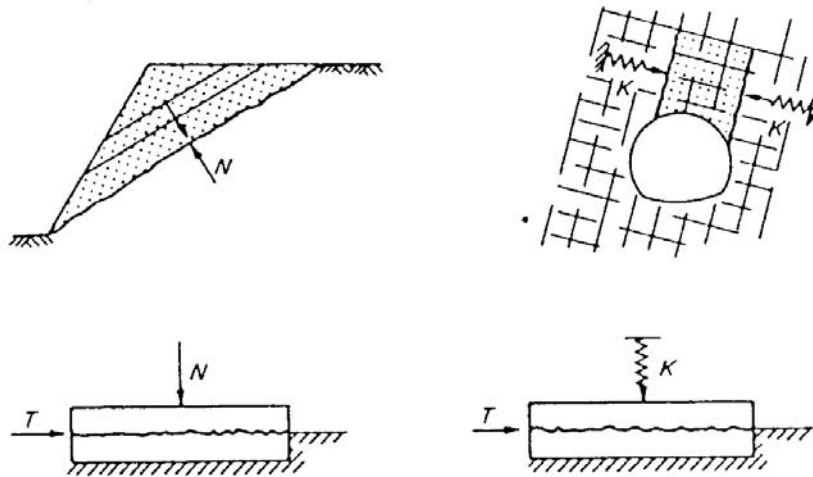
3.7 Irodalom

- AASHTO (1989): *Standard specifications for highway bridges*. American Association of State Highway and transportation officials.
- Ábrahám K. (1982): *Metró kézikönyv. Tervezés, építés, üzemeltetés*. Műszaki Könyvkiadó. Budapest.
- Beyer, F.; Rolofs, F. (1981): Integralgeometrische Bestimmung geotechnisch wichtiger Kulfteigenschaften. *Rock Mechanics* **14**(1): 43-56.
- Coon, R.F.; Merritt, A.H. (1970): *Predicting in situ modulus of deformation using rock quality indices*. In: Determination of the in situ modulus of deformation of rocks, ASTM STP 477, 154-173.
- Deere, D.U. (1964): Technical description of rock cores for engineering purposes. *Rock Mechanics and Engineering Geology*. **1**: 17-22
- Deere, D.U. (1989): Rock quality designation (RQD) after 20 years. US Army Corps. Engrs Rep. GL-89-1.
- Eurocode 1997-1: Geotechnikai tervezés, 1: Általános szabályok.
- Gálos M. (1985): A közzettagoltság meghatározásának és ábrázolásának módszerei. *Mélyépítéstudományi Szemle*, **33**(4): 171-176.
- Gálos M.; Kertész P. (1989): *Mérnökgeológia*, Kézirat, Tankönyvkiadó, Budapest.
- Gálos M.; Vásárhelyi B. (2005): Mechanikai viselkedés az RQD-érték ismeretében. *Mélyépítés* **3**(2): 18-22.
- 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.
- ISRM (1978): Suggestive methods for the quantitative description of discontinuities in rock mass. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* **15**: 319-368.
- Kertész P; Gálos M. (1985): Mérnökgeológia – A közzettest tulajdonságai. *Mérnöki kézikönyv*, **3**:16-126.
- Kovács L. (1996): *Rock engineering investigations inside a claystone URL in Hungary*. TOPSEAL'96 Transactions, Stockholm, **II**: 205-208.
- Kovács L. (1997): A Bodai Aleuroit Formáció kőzetmechanikai, geotechnikai vizsgálati programja. *BKL-Bányászat*, **130**(4): 299-306.
- Matula, M. (1981): Rock and soil description and classification for engineering geological mapping. *Bul. IAEG* **24**: 235-274.
- Palmström, A. (1982): The volumetric joint count – a useful and simple measure of the degree of rock jointing. In: *Proc. 4. Cong. Int. Assn. Engng. Geol. Delhi*, **5**: 221-228.
- Palmström, A. (1996): RMI – A system for characterizing rock mass strength for use in rock engineering. *J. Rock Mech. Tunn. Techn.* **1**:69-108.
- Palmström, A. (2001): *Measurement and characterization of rock mass jointing*. In: In situ characterisation of rocks (Eds: Sharma, V.M.; Saxena, K.R.) 49-97.
- Palmström, A. (2005): Measurements of and correlations between block size and rock quality designation (RQD) *Tunnelling & Underground Space Techn.* **20**: 362-377.
- Pollard, D.D.; Aydin, A. (1988): Progress in understanding jointing over the past century. *Bull. Geol. Soc. Am.* **100**: 1181-1204.
- Priest, S.D.; Hudson, J. (1976): Discontinuity spacing in rock. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.* **13**: 135-148.
- Şen, Z.; Essa, E.A. (1992): Rock quality charts for log-normally distributed block sizes. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abst.*, **29**:1-12.
- Zhang, L.; Einstein, H.H. (2004): Using RQD to estimate the deformation modulus of rock masses, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* **41**: 337-341.

4. TAGOLTSÁG MENTI NYÍRÓSZILÁRDSÁG

A kőzettestekben található tagoltságok nyírási szilárdságának ismerete elengedhetetlenül szükséges a kőzettest belsejében lejátszódó folyamatok megismeréséhez. Sziklamunkák szerkezet-ellenőrzésénél a kőzettömbök stabilitásának számításba vétele a kőzettömböket határoló diszkontinuitások viselkedésének megítélése alapján lehetséges. Tagolt kőzettestekben a felületek menti elmozdulás lehetősége a kőzettömbök térbeli elhelyezkedésének függvénye. Ki kell emelni, hogy az itt bemutatott nyírószilárdság nem azonos a kontinuum mechanikában használatos nyírószilárdság fogalmával, hanem a tagolófelületek közötti erő-elmozdulást figyelembe vevő tényező.

Sziklarézsúknál a kőzettömbök közötti súrlódás a felületre merőleges nyomóerővel, felszín alatti üregeknél, alagutaknál a nyomóerő a keresztirányú alakváltozó képességet figyelembe vevő rugóállandóval vehető számításba. A modellezés lehetőségeit a 4-1. ábra szemlélteti.



4-1. ábra. A nyírási vizsgálatok modellezése: sziklarézsúk esetén állandó nyomóerőt (N) míg alagutaknál rugóállandót (K) kell feltételezni.

A tagolófelületek nyírási szilárdságát nagymértékben befolyásolják a tagoló felületek tulajdonságai, azaz azok megnyíltsága, a felületek érdessége, mállottsága, esetleges kitöltöttsége, a víz jelenléte, stb. Jelen fejezetben a tagoltságok nyírási szilárdságánál használatos fontosabb számítási modelleket mutatjuk be.

4.1 Sima felület nyírási szilárdsága

4.1.1 Tapadás nélküli felületek közötti súrlódás

Két sima felület közötti nyírási szilárdság (τ) vizsgálata során tapasztalhatjuk, hogy a nyomófeszültség (σ_n) növelésével a nyírási feszültség lineárisan növekszik, azaz

$$\tau = \sigma_n \operatorname{tg} \phi \quad (4.1.)$$

ahol ϕ a súrlódási szög.

A viszonylagosan sík, polírozatlan, természetes állapotban lévő kőzetekkel végzett vizsgálatok eredményeként, Jaeger és Cook (1969) kutatási munkája alapján meghatározott súrlódási szögeket, a 4-1. táblázatban foglaltuk össze. A 4-2. táblázat néhány fontosabb anyag és ásvány súrlódási szögét tartalmazza.

4-1. táblázat. Természetes kőzetfelszínek súrlódási szöge (Jaeger & Cook, 1969 alapján)

Kőzet neve	Súrlódási szög – ϕ_b (fok)
Homokkő	29-39
Gránit	34-37
Kvarcit	27-38
Dolerit	36-54
Dolomit	23
Trahit	36-39
Márvány	36-43
Gneisz	35-41
Gabbró	10-38

4-2. táblázat. Különböző anyagok és ásványok felületének súrlódási szöge (Jaeger & Cook, 1969 alapján)

Anyagnév	Súrlódási szög – ϕ_b (fok)
Kőso	40,1
Galenit	34,4
Terméskén	28,6
Korund	22,9
Jég	28,6
Üveg	40,1
Gyémánt	5,7-17,2
Kvarc	6,3-10,9
Földpát	6,3
Kalcit	8,0
Muszkovit	24,6
Biotit	17,8
Szerpentin	35,5
Talk	20,6

4.1.2 Tapadásos felületek közötti kapcsolat

Két sima felületű próbatest nyírási vizsgálatakor, amikor a felületek között kapcsolat (adhézió) van, a nyírási szilárdság meghatározásánál a normál erőt állandó értéken tartva a nyíróerő fokozatosan növekszik, elér egy csúcserőértéket, majd a kísérletet folytatva egy maradó (reziduális) feszültséggel lehet e köztük fellépő feszültséget jellemezni (lásd 4-2. ábrát). Különböző nagyságú normál feszültségekkel a kísérletet megismételve a nyírófeszültség (τ) a normál-feszültség (σ_n) között lineáris kapcsolatot lehet meghatározni, ahol az egyenesek meredeksége az anyag belső súrlódási szöge, azaz Mohr-Coulomb egyenlet alapján:

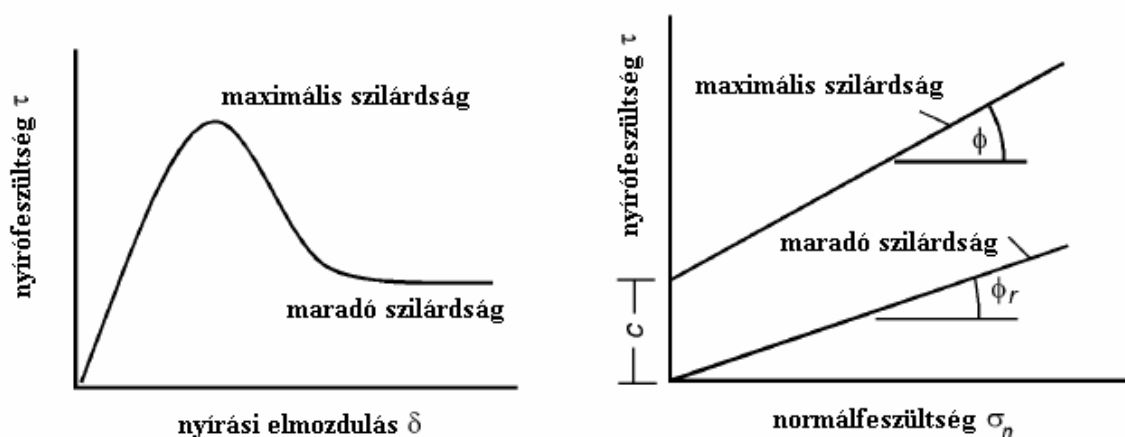
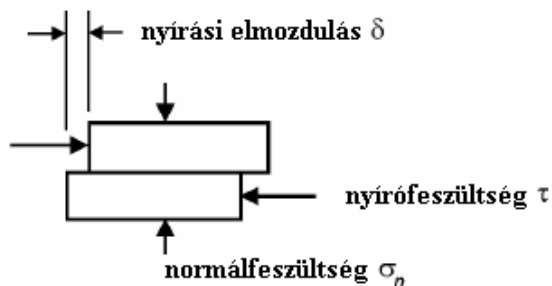
$$\tau = c + \sigma_n \operatorname{tg} \phi \quad (4.2.)$$

ahol c a kohézió, ϕ a belső súrlódási szög.

A maradó (reziduális) nyírési feszültsége az alábbi összefüggés írható fel:

$$\tau = \sigma_n \operatorname{tg} \phi_r \quad (4.3.)$$

ahol ϕ_r a maradó súrlódási szög.

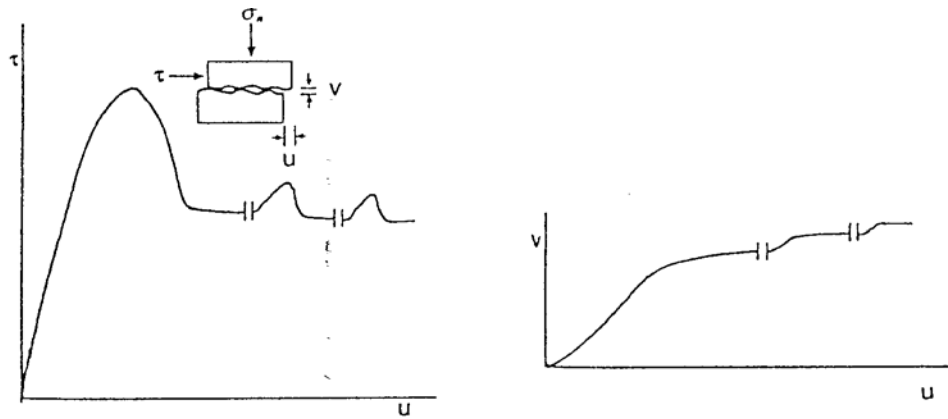


4-2. ábra. Nyírási folyamán fellépő feszültség-elmozdulás tapadó felületek esetén

4.2 Érdes felület nyírési szilárdsága

A természetben előforduló kőzettömbök közötti tagolófelületek a legritkább esetben simák – annak nyírasi viselkedését jelentősen befolyásolja a felület érdessége, keménysége, esetleges mállottsága. Általánosságban elmondható, hogy a felület érdessége növeli a nyírászilárdságot, és ez a szilárdság elsődlegesen fontos tényező a kőzettömbök stabilitásának számításánál. A 4-3. ábra egy laborvizsgálattal végzett nyírasi vizsgálat eredményét mutatja be, ahol állandó nyomóerő esetén mérték a nyírasi feszültséget, illetve a kétirányú elmozdulást.

Alábbiakban a kőzettömbök közötti tagoló felületek érdességének ismeretében meghatározható nyírasi szilárdság számítását szolgáló modellek közül azokat mutatjuk be, melyek segítségével lehetőség van a kőzettömbök stabilitásának kimutatására.



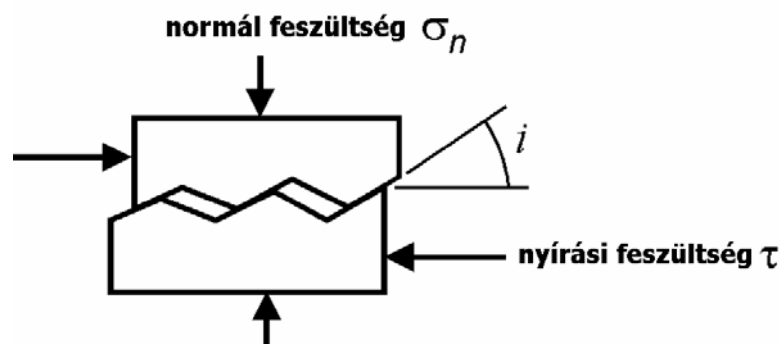
4-3. ábra. Állandó nyomófeszültség esetén a nyírófeszültség-elmozdulás ábra, valamint az ehhez tartozó elmozdulás-megnyílás görbe

4.2.1 Patton modell

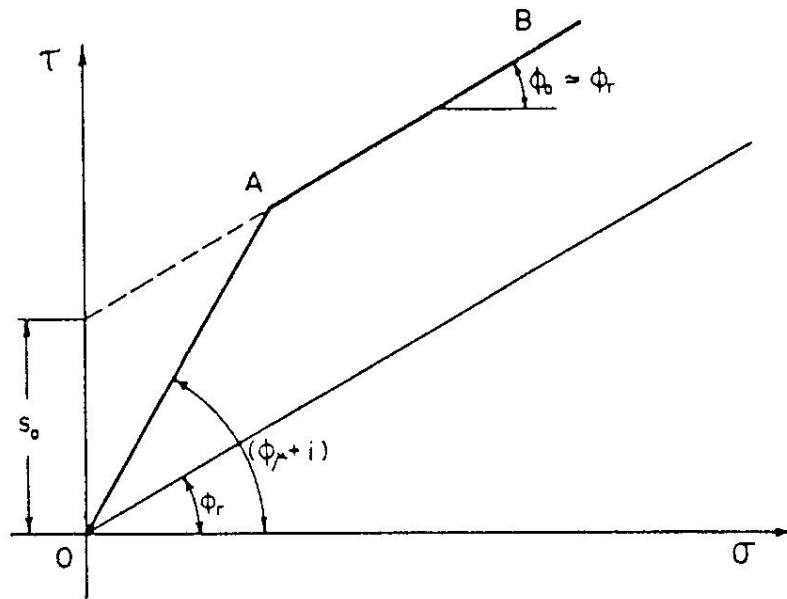
Elsőként Patton (1966) mutatta meg fogazott próbatesteken végzett vizsgálatával, melynek elvi vázlatát a 4-4 ábrán mutatjuk be, hogy egy bizonyos normál-feszültségig a fogak szöge (i) és a kőzet súrlódási szöge (ϕ_b) ismertében a normál-feszültség (σ_n) és a nyírófeszültség (τ) között az alábbi összefüggés áll fenn:

$$\tau = \sigma_n \operatorname{tg}(\phi_b + i) \quad (4.4.)$$

A (4.4.) egyenlet csak alacsony nyomófeszültség mellett igaz, azaz abban az esetben, ha a nyírési elmozdulás a kapcsolódó felületek egymáson való elcsúszásával jön létre, amint azt a 4-5. ábrán mutatja. Egy bizonyos (kőzet anyagára jellemző) nyomófeszültség után a kőzet fogai eltörnek, azaz már annak szilárdsága a domináns. Ilyen esetben a (4.1.) egyenlettel kell számolni.



4-4. ábra. Patton-féle fogazott próbatest vázlatja



4-5. ábra. Patton-féle bilineáris modell

4.2.2 Jaeger modell

Jaeger (1971) modellének felállításakor abból indult ki, hogy a mért nyírási feszültség részben súrlódásból, részben törésből adódik, és a kettő között fokozatos átmenet áll fenn. Mérési eredményeit feldolgozva exponenciális összefüggést talált:

$$\tau = c \left[1 - e^{-b\sigma_n / q_u} \right] + \sigma_n \tan \phi_b \quad (4.5.)$$

ahol a már definiált állandók mellett q_u a közet egyirányú nyomószilárdsága.

4.2.3 Barton modell

Barton és Choubey (1977) elméletük megalkotásakor Patton egyenletéből indultak ki, és célul tűzték ki, hogy a terepi megfigyelés, mérés ismeretével is alkalmazható legyen. A (4.4.) egyenletet az alábbi formába írták át:

$$\tau = \sigma_n \operatorname{tg}(\phi_b + \operatorname{JRC} \log_{10}(\operatorname{JCS} / \sigma_n)) \quad (4.6.)$$

ahol JRC (Joint Roughness Coefficient) a tagoltság érdességének a mérőszáma, JCS (Joint Compressive Strength) a tagoltság anyagának a nyomószilárdsága.

A (4.6.) egyenlet nem alkalmazható abban az esetben, ha nincs normál-feszültség (azaz $\sigma_n = 0$), míg a felső határa $\sigma_n = \operatorname{JCS}$ -nál van. A (4.6.) egyenletet a maradó (reziduális) nyírófeszültségre is ellenőrizték, és az alábbi összefüggést találták:

$$\tau_r = \sigma_n \operatorname{tg}(\phi_r + \operatorname{JRC} \log_{10}(\operatorname{JCS} / \sigma_n)) \quad (4.7.)$$

ahol ϕ_r a maradó (reziduális) súrlódási szög.

Barton és Choubey (1977) empirikus összefüggést határozott meg az ép, száraz kőzet és a vizes, mállott kőzet súrlódási szöge között:

$$\phi_r = (\phi_b - 20^\circ) + 20 (r/R) \quad (4.8.)$$

ahol r a vizes kőzeten, míg R az ép, száraz kőzeten mért Schmidt-kalapáccsos visszapattnási érték, ϕ_b pedig a száraz, sík (de nem polírozott) felületen mért alap súrlódási szög.

JCR és JCS terepi meghatározása

A JRC értéke 0 (teljesen sima) és 20 (érdes felület) között változhat. Barton és Choubey (1977) ajánlást fogalmazott meg ennek az értéknek a felvételére, melyeket a 4-6. és a 4-7. ábrán közlünk. Az értéket szemrevételezéssel kell meghatározni. Próbatetek esetén természetesen közel azonos méretűek a próbatetek, mint az ábrán megadottak – természetesen a nagyobb dimenziójú (méteres vagy 10 méteres) mérések esetén arányosan át kell számítani. 4-8 ábra a vizsgált tagoltsági hosszra a JRC értékének meghatározásának lehetőségét mutatja be az érdesség amplitúdójának ismeretében Barton és Bandis (1982) ajánlása alapján.

A JRC értékét (mely a tagoló felületen mért egyirányú nyomószilárdságot mutatja) Schmidt kalapáccsal kell megmérni. Az L típusú Schmidt kalapáccsal való szilárdsági meghatározás lehetőségét a 4-9. ábrán mutatjuk be.

JRC és JCS értékeinek mérethatása

Mivel a laboratóriumi körülmények közötti nyírási vizsgálat nagyságrendekkel kisebb próbatesten történik, mint ami a valóságban van, továbbá a terepi megfigyelés esetén sincs lehetőség a teljes tagolófelület vizsgálatára, ezért Barton és Bandis (1982) a következő átszámolást ajánlja:

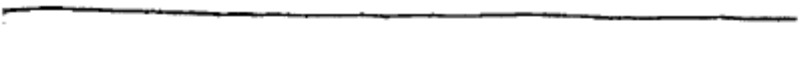
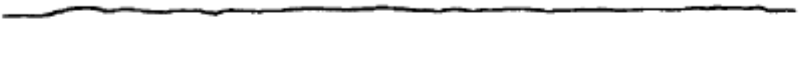


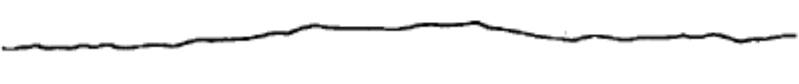





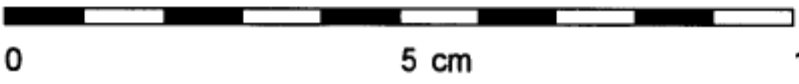
$$JRC_n = JRC_0 \left(\frac{L_n}{L_0} \right)^{-0,02 JRC_0} \quad (4.9.)$$

ahol JRC_0 és L_0 (hossz) a laboratóriumi körülmények között meghatározott értékek, JRC_n és L_n pedig a vizsgált blokk mérete.




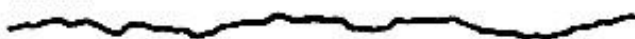





A mért szilárdsági érték átszámítását is el kell végezni, mivel a nagyobb felületen a gyengébb zónák jelenléte jóval nagyobb, és ebből adódóan a tagoltság falának nyomószilárdsága (JCS) csökken a nagyobb méret esetén. Barton és Bandis (1982) az alábbi átszámolást javasolják:

$$JCS_n = JCS_0 \left(\frac{L_n}{L_0} \right)^{-0,03 JCS_0} \quad (4.10.)$$

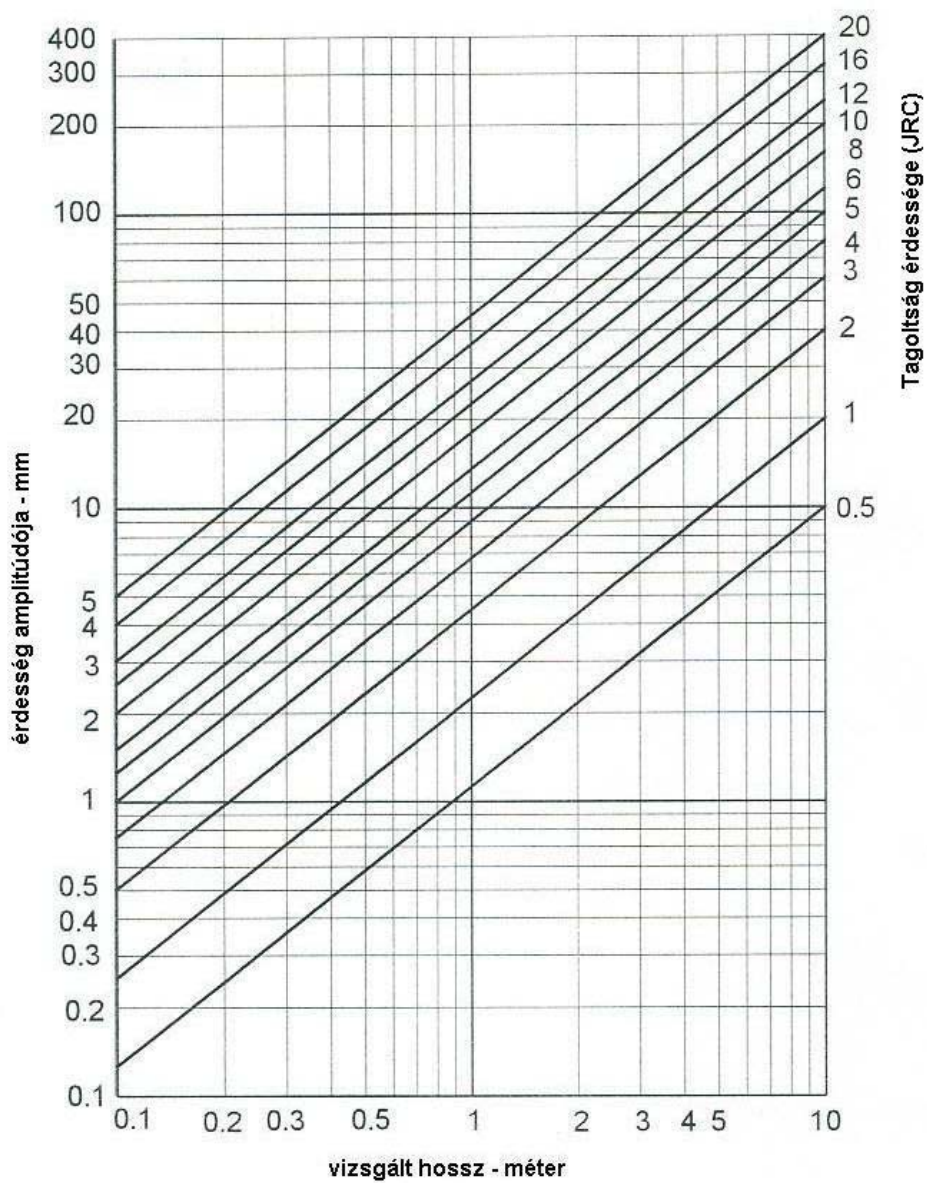
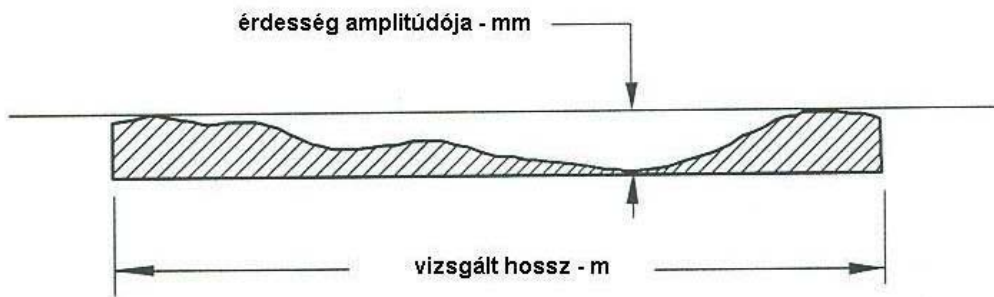
ahol JCS_0 és L_0 (hossz) a laboratóriumi körülmények között meghatározott értékek, JCS_n és L_n pedig a vizsgált blokk mérete.

	$JRC = 0 - 2$
	$JRC = 2 - 4$
	$JRC = 4 - 6$
	$JRC = 6 - 8$
	$JRC = 8 - 10$
	$JRC = 10 - 12$
	$JRC = 12 - 14$
	$JRC = 14 - 16$
	$JRC = 16 - 18$
	$JRC = 18 - 20$
	

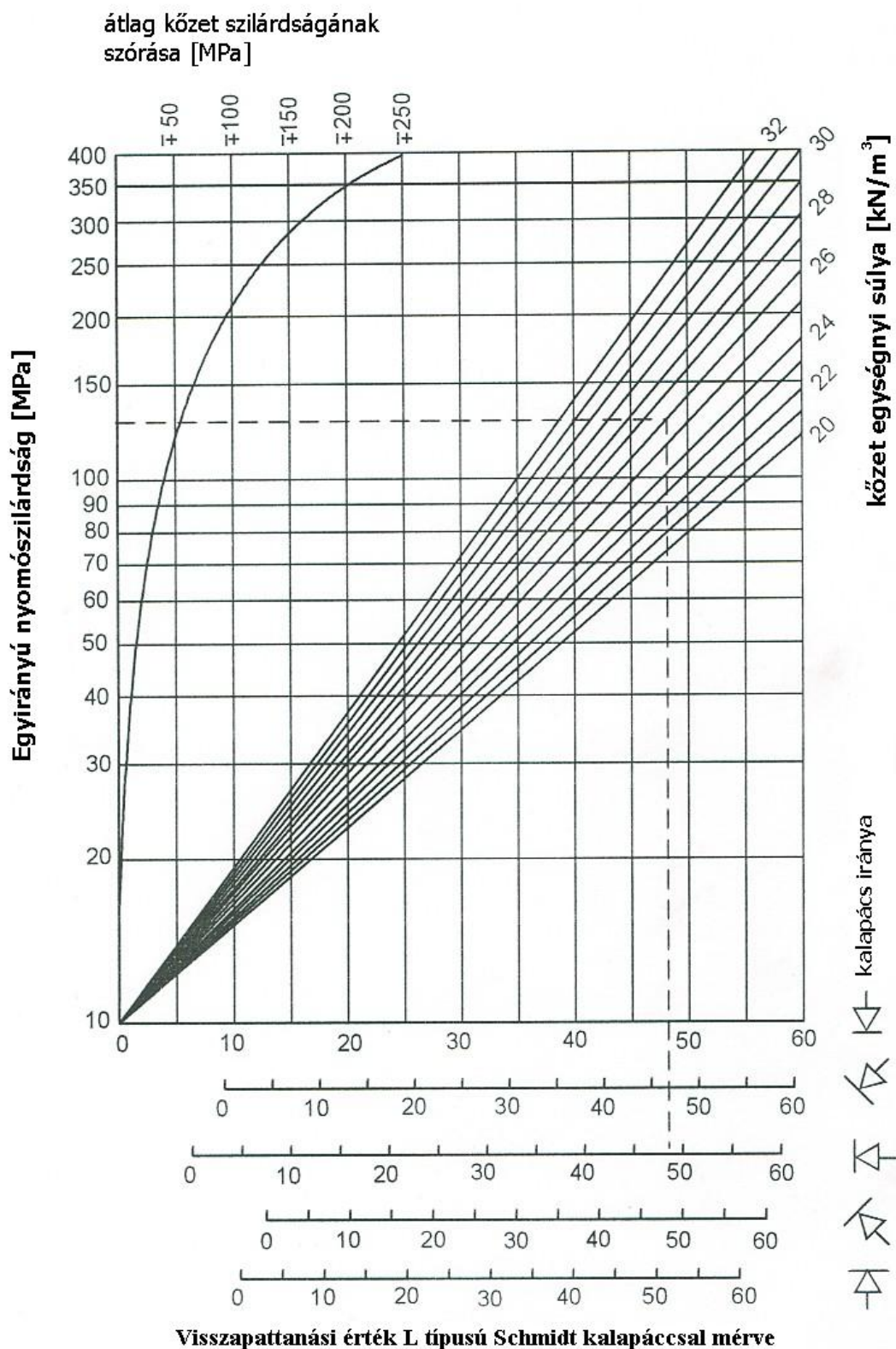
4-6. ábra. A tagolófelület érdessége (oldalnézet) és a JRC értéke közötti kapcsolat (Barton & Choubey, 1977)

A tagolólófelület formája		JRC₂₀	JRC₁₀₀
lépcsős			
I	durva 	20	11
II	sima 	14	9
III	egyenletes 	11	8
hullámos			
IV	durva 	14	9
V	sima 	11	8
VI	egyenletes 	7	6
sík			
VII	durva 	2.5	2.3
VIII	sima 	1.5	0.9
IX	egyenletes 	0.5	0.4

4-7. ábra. A tagoló felület formája alapján meghatározott JRC érték 20 és 100 cm oldalhosszúságra



4-8. ábra. Vizsgált tagoltsági hosszon a JRC értékének meghatározása az érdesség amplitúdójának ismeretében (Barton & Bandis, 1982)



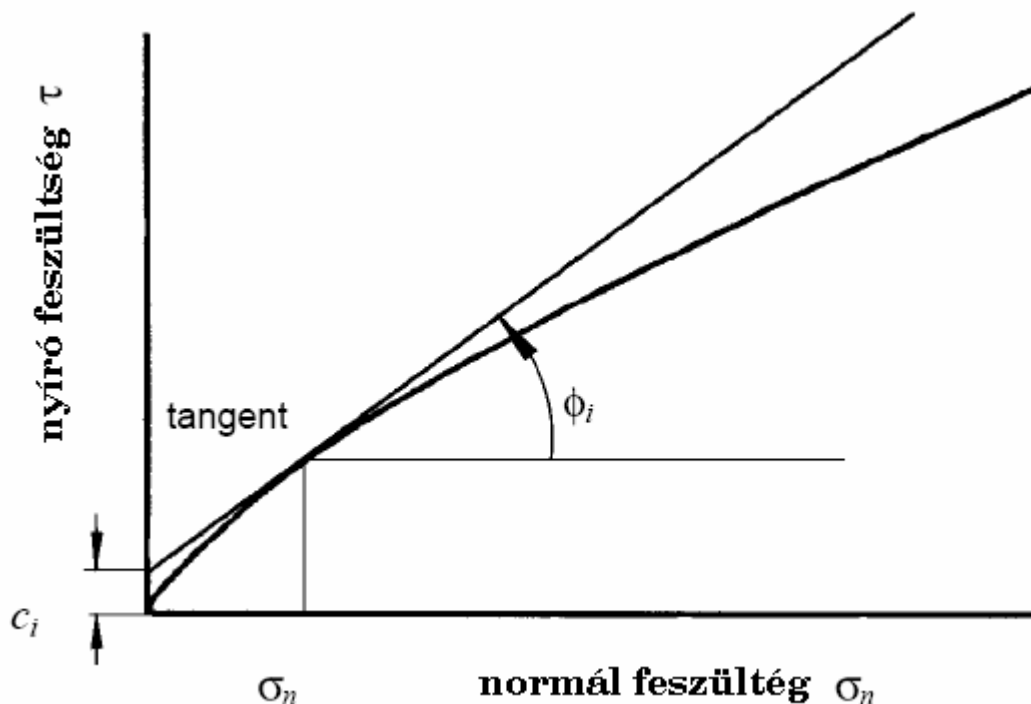
4-9. ábra. Az L-típusú Schmidt kalapács visszapattanási érték és a tagoló felület nyomószilárdsága közötti kapcsolat (Barton & Bandis, 1982)

Fontos megjegyezni, hogy a nyírószilárdsági értéket jelentős mértékben csökkenti a tagoltságot kitöltő puha anyag (esetek többségében agyagok). Ebben az esetben talajmechanikai vizsgálatokat kell végezni a tagoltságban talált anyaggal, és annak talajfizikai állandói lesznek a mértékadóak, függetlenül a körülöttük lévő közetkörnyezet milyenségétől.

Abban az esetben, ha a közettestben nyomás alatti víz van, a normál-feszültséget a számításnál csökkenteni kell. Egyensúlyi állapot esetén, azaz amikor a víznyomás az idővel nem csökken, a csökkentett normál-feszültség értéke: $\sigma_n' = \sigma_n - u$, ahol u a víznyomás, σ_n' pedig az effektív normál-feszültség. Víznyomás alatti tagolófelületek esetén a fenti elméleteknél ezt az értéket kell alkalmazni.

4.2.4 Pillanatnyi kohézió és súrlódási szög meghatározása

A tagolófelület közötti nyírási szilárdságát a legtöbb esetben nem lineáris, amint azt a legtöbb elmélet feltételezi, hanem nem-lineáris egyenlettel írható a legpontosabban fel. Ugyanakkor a stabilitás számításakor fontos a belső súrlódási szög (ϕ_i) és a kohézió (c) ismeretére az adott nyomófeszültségnél, melyet az adott görbe érintőjeként határozhatunk meg (lásd 4-10. ábrát).



4-10. ábra: Pillanatnyi kohézió és pillanatnyi súrlódási szög meghatározása

A pillanatnyi súrlódási szög (ϕ_i) és a kohézió (c) a nyomófeszültség ismeretében (σ_n) az alábbi összefüggésben van:

$$\phi_i = \arctg\left(\frac{\partial \tau}{\partial \sigma_n}\right) \quad (4.11)$$

ahol Barton egyenletét (4.6.) figyelembe véve:

$$\frac{\partial \tau}{\partial \sigma_n} = \tan \left(JRC \log_{10} \frac{JCS}{\sigma_n} + \phi_b \right) - \frac{\pi JRC}{180 \ln 10} \left[\tan^2 \left(JRC \log_{10} \frac{JCS}{\sigma_n} + \phi_b \right) + 1 \right] \quad (4.12.)$$

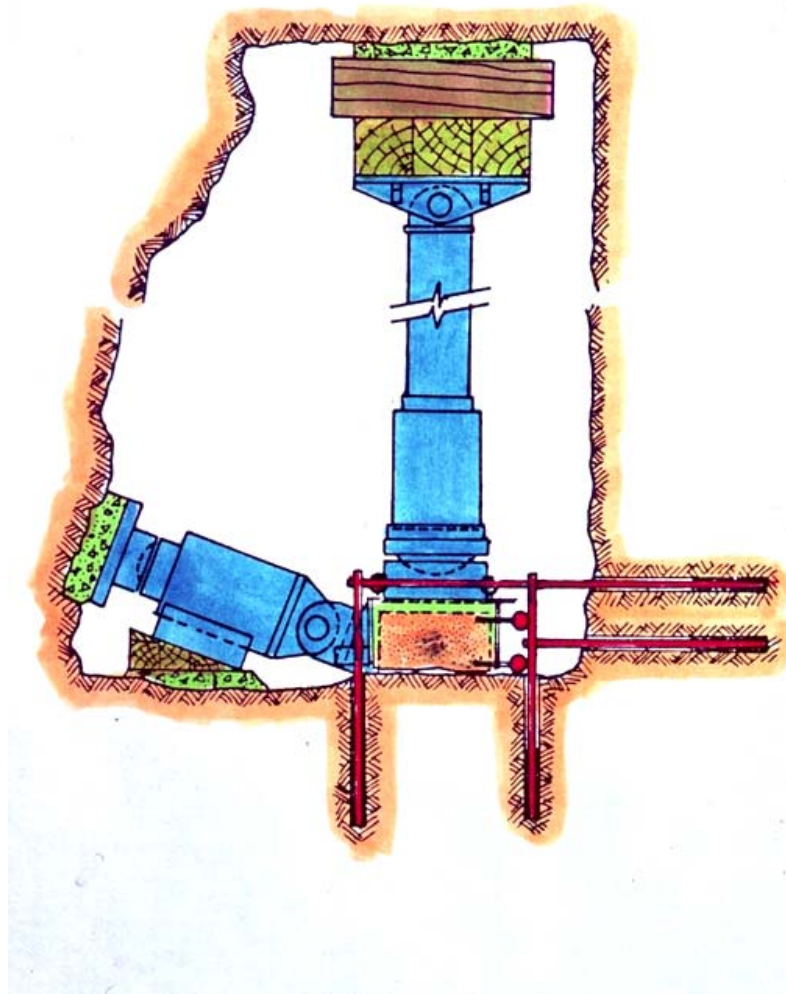
A pillanatnyi kohézió (c_i) a súrlódási szög ismeretében határozható meg:

$$c_i = \tau - \sigma_n \operatorname{tg}(\phi_i) \quad (4.13)$$

A legtöbb stabilitási problémánál a számításokat különböző nyomófeszültségekkel kell kiszámolni.

4.3 Irodalom

- Barton, N. & Bandis, S. (1982): *Effects of block size on the shear behaviour of jointed rock*. Proc. 23. US Rock Mech. Symp., Berkeley, 739-760.
- Barton, N. & Choubey, V. (1977): The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock Mech.* **10**:1-54.
- Jaeger, J.C. & Cook, N.G.W. (1969): *Fundamentals of rock mechanics*. Metnuen & Co. Ltd. London
- Jaeger, J.C. (1971): Friction of rocks and stability of rock slopes. *Geotechnique*, **21**: 148-158.
- Patton, F.D. (1966): *Multiple modes of shear failure in rock*. Proc. 1. ISRM Cong. Lisbon, **1**: 509-513.



5. Kőzettest osztályozási módszerek

A fejezet célja a fontosabb kőzettest-osztályozási módszerek megismertetése és használatuk bemutatása. Az adott osztályozási módszer leírása mellett, ahol lehetőség van rá, ismertetjük a különböző mechanikai paraméterek (belső súrlódási szög, kohézió, rugalmassági modulus, nyomószilárdság, stb.) meghatározásának lehetőségeit is. A legtöbb kőzettest-osztályozás célja, hogy alagútépítésnél javaslatot adjon a szükséges biztosítási mód megválasztására, a fejtési hossz és az alagútátmérő ismeretében.

5.1 Terzaghi-féle kőzettest osztályozás

Terzaghi (1946) kőzettest osztályozási rendszere alagutak megtámasztásához az egyik első osztályozási módszernek tekinthető. Módszerével a biztosító acélhálóra ható kőzetterhelés értéke becsülhető meg. Így a megtámasztás nagyságára ad közelítő értékeket.

Terzaghi abból indult ki, hogy az alagút boltozatánál számításba veendő terhelés az ún. kőzetterhelési tényezőtől (H_p) függ, mely a fötte feletti töredezett kőzettest vastagságának függvénye. Feltételezhetjük, hogy eddig a magasságig hat az alagútra kőzet terhelése, e feletti terhelést az átboltozódás hatása miatt nem kell figyelembe venni (lásd 5-1 ábra).

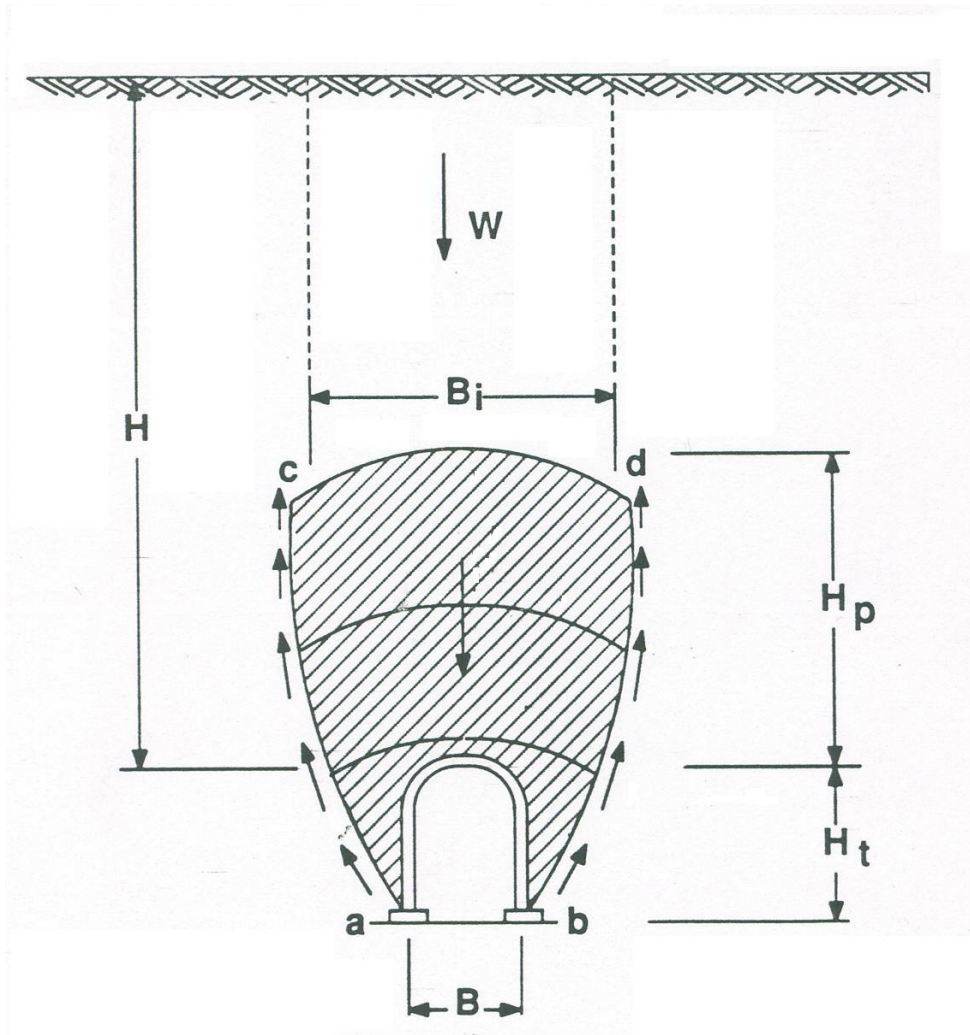
Osztályozási módszerét egy, az 1920-as években, az Alpokban épített, 5,5 m átmérőjű, acélívekkel megtámasztott közúti alagút építéséhez dolgozta ki és az építés során a gyakorlati tapasztalatokat figyelembe véve korrigált.

Terzaghi kőzettest-osztályozását ma már nem használjuk, mivel a modern megtámasztási technológiákra (lőttbeton, kőzetcsavar) nincs átdolgozva. A történelmi hitelesség végett, valamint, mivel gondolkodási módja meghatározta a későbbi elméleteket, fontosnak érezzük ennek rövid bemutatását.

Kvalitatív alapon Terzaghi kilenc osztályba sorolta a kőzettesteket töredezettségük és a tagoló felületek mennyiségének figyelembe vételével. A kőzetosztályokat leírásukkal együtt a 5-1. táblázat tartalmazza. A kőzetosztály alapján való kőzetterhelési-tényező (H_p) meghatározását az 5-2. táblázat tartalmazza. Ebben a táblázatban Terzaghi által ajánlott biztosítási módokat adjuk meg. Az alagút méretezésénél figyelembe vehető nyomás meghatározásához Terzaghi az alábbi egyenletet javasolja:

$$p = H_p \gamma \quad (\text{MPa}) \quad (5.1)$$

ahol p a nyomás, γ az egységnyi kőzettest súlya és H_p kőzetosztály alapján való kőzetterhelési-tényező (lásd 5-2. táblázat).



5-1. ábra. Terzaghi (1946) féle kőzetest-terhelési elmélet



5-1. táblázat. Terzaghi-féle kőzettest osztályozás kategóriái (Terzaghi, 1946)

Kőzet- osztály	Kőzettest típus	Leírása
I.	Ép kőzet	Az üde kőzetet nem tagolják sem tagoló felületek, sem hajszálrepedések. Amennyiben az törik, a törés az ép kőzeten halad keresztül. Robbantással való fejtés esetén, amellyel a kőzet természetszerűleg sérül, a robbantás után néhány órától néhány napig állékony marad. Ez esetben lemezes leválásról beszélhetünk. Kemény, ép kőzethnél találkozhatunk határállapottal is: spontán és erőteljes kőzettábla leválással mind a főtében mind az oldalakon. A kőzet egyirányú nyomószilárdsága minimálisan 100 MPa.
II.	Rétegződött kőzet	A kőzet kemény és egyedi rétegeket tartalmaz. A rétegek közötti erő kicsi vagy semmilyen, azaz könnyen szétválhatnak. Transzverzális tagoltsága lehet. Az ilyen kőzethnél gyakori a lemezesedés.
III.	Mérsékelten tagolt kőzet	Ez a kőzetosztály már tartalmaz tagoltságot és hajszálrepedéseket, de a tagoltságok a blokkok között csak lokálisan növekednek, vagy közvetlenül összekapcsolódnak úgy, hogy a vertikális falaknál nincs szükség vízszintes megtámasztásra. Ennek a kőzettípusnál mind lemezesedéssel, mind kiszakadással találkozhatunk.
IV.	Mérsékelten blokkos kőzettest	Kémiaiilag egységes (vagy majdnem egységes) ép kőzetdarabokat tartalmaz, melyek teljesen elkülönülnek egymástól és szabálytalanul összekapcsolódnak. A kőzettömbök mérete 1 m körüli. Ezen kőzettesteknél a vertikális falaknál szükség lehet a vertikális megtámasztásra.
V.	Töredezett kőzettest	Kémiaiilag egységes kőzet karaktere teljesen aprózódott, a kőzettömbök méretei 1 m alattiak. Ezek mérete homoknagyságú is lehet, azaz építés alatt talajfolyás is felléphet. Vertikális megtámasztás szükséges
VI.	Teljesen töredezett, de kémiaiilag egységes	Kémiaiilag egységes kőzeteket tartalmaz, melyek teljesen töredezett állapotúak. Nincs kapcsolódás. A kőzettömbök mérete néhány cm-től maximálisan 30 cm-ig terjedhet.
VII.- VIII.	Aprózódott kőzettest	Mechanikai folyamat, melynél az aprózódott kőzet lassan előrenyomul az alagútban annak jövesztése alatt, megfigyelhető térfogatnövekedés nélkül. AVII és VIII. osztály a mélységtől függ (VII: átlagos mélységű, VIII: nagy mélységű alagutak esetén).
IX.	Duzzadó kővek	Duzzadó kőzetek esetén nagyméretű expanzióra kell számítani. A duzzadást a kőzetben lévő ásványok (főleg montmorillonit) okozzák, melynek mennyisége meghatározza a duzzadás várható mértékét.

5-2. táblázat. A kőzet-terhelési érték (H_p) meghatározása kőzetest osztály alapján (Terzaghi, 1946)

Kőzet-osztály	Kőzetest típus	Kőzet-terhelési érték magassága, H_p	Megjegyzés
I.	Ép kőzet	0	Gyenge megtámasztás szükséges csak abban az esetben, ha kőzetleválás vagy lepattogzás tapasztalható
II.	Rétegződött kőzet	$0-0,5B$	Gyenge megtámasztás főleg lehullás ellen. A terhelés kiszámíthatatlanul pontról-pontra változhat
III.	Mérsékeltlen tagolt kőzet	$0-0,25B$	Nincs oldalnyomás
IV.	Mérsékeltlen blokkos kőzetest	$0,25B - 0,35 (B + H_t)$	Nincs oldalnyomás
V.	Töredezett kőzetest	$(0,35 \dots 1,10) (B + H_t)$	Kicsi vagy nincs oldalnyomás
VI.	Teljesen töredezett, de kémiaileg egységes	$1,10 (B + H_t)$	Jelentékeny oldalnyomás. Folytonos megtámasztás szükséges.
VII.	Aprózódott kőzetest – átlagos mélység	$(1,10 \dots 2,10) (B + H_t)$	Nagy oldalnyomás, fordított merevítő-gerenda beépítése szükséges. Körgyűrű beépítése ajánlott.
VIII.	Aprózódott kőzetest – nagy mélység	$(2,10 \dots 4,50) (B + H_t)$	Nagy oldalnyomás, fordított merevítő-gerenda beépítése szükséges. Körgyűrű beépítése ajánlott.
IX.	Duzzadó kövek	80 méterig független a $(B + H_t)$ értékétől	Körgyűrű szükséges. Különleges esetekben alakváltozást-engedő megtámasztás szükséges

B : alagútátmérő (m-ben), H_t : Alagút magassága (m-ben), H_p : a figyelembe veendő kőzetest magassága (lásd 5-1. ábra)

5.2 RSR (Rock Structure Rating) módszer

Ezt a kvantitatív módszert a kőzettest minőségének meghatározására Wickham *et al.* (1972) vezette be, majd a tapasztalatok alapján 1974-ben korrigálták a megadott értékeiket. A módszer ismertetésénél a korrigált értékeket adjuk közre.

Az RSR osztályozást az angolszász mértékegységek figyelembe vételével határozták meg, ezért a bemutatott táblázatokban is így használjuk. Európában, Észak-Amerikával ellentétben, ez a módszer nem terjedt el, így annak megállapításait, leírásait nem is ültették át az SI mértékrendszerbe. Bemutatását mégis fontosnak tartjuk, mivel gondolkodásmódja erősen hatott a későbbi kőzettest-osztályozási módszerekre (Hoek, 2000).

A kőzettest minősítésének ezt a módszerét először löttbetonos megtámasztásra fejlesztették ki, de ma már a gyakorlatban csak a relatíve kis átmérőjű, acélhálóval erősített alagutaknál, feltáró táróknál használják az Egyesült Államokban.

Ez a kvázi-kvantitatív módszer három különböző csoportra osztja a kőzettestről összegyűjthető információkat, melyeket külön-külön vizsgál:

- a környezet földtani viszonyai (**A paraméter**),
- a tervezett alagút geometriája (**B paraméter**),
- víz jelenléte és mennyisége (**C paraméter**).

Az elmélet a csoportokhoz számértékeket rendel, és ezeknek az összege alapján adja meg megtámasztásra vonatkozó ajánlásait.

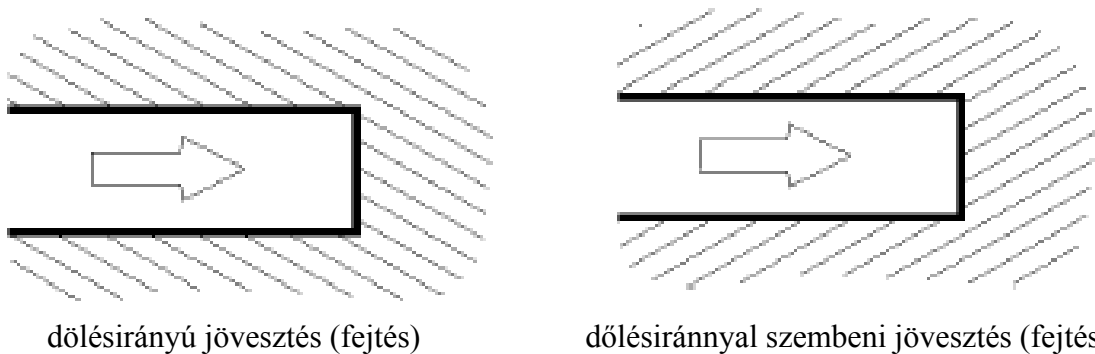
Mindhárom főcsoportban további alcsoportokat használ, melyekhez szintén számértékeket rendel. A fő és alcsoportok részletezve a következők:

1. **A paraméter** (földtani viszonyok): a geológiai szerkezet becslése a következők alapján:
 - a. Kőzet eredete (magma, üledékes, átalakult);
 - b. Kőzet szilárdsága (kemény, közepes, puha, töredezett);
 - c. Geológiai szerkezete (masszív, kissé-, közepesen, illetve erősen töredezett/gyúrt).
2. **B paraméter** (Geometria): A diszkontinuitás iránya és nagysága az alagút környezetében:
 - a. Tagolófelületek egymástól való távolsága;
 - b. Tagolófelület elhelyezkedése (iránya és szöge);
 - c. Az alagút kihajtásának az iránya.
3. **C paraméter** (talaj- ill. rétegvíz): A talajvíz folyásának hatása és a tagoltsági értékek:
 - a. A mindenre kiterjedő kőzettest minősítés az A és B kombinációjából;
 - b. Tagoltsági állapot (jó, elégséges, gyenge);
 - c. Vízbefolyás értéke (gallon / perc 100 láb hosszú alagút esetén).

Az RSR érték a három főcsoport összegeként jön létre:

$$RSR = A + B + C \quad (5.2)$$

Az RSR érték meghatározásánál első lépésként a kőzetet annak szilárdsága és típusa alapján négy különböző csoportba soroljuk (Típus I.-IV.). A földtani szerkezetnél e csoportok alapján adjuk meg a jellemző értéket, amint az 5-3. táblázatból kiolvasható (A paraméter). Ez az érték 6 és 30 között változhat, típustól és földtani szerkezettől függően. A B paraméter jelzőszámait az 5-4. táblázat alapján lehet felvenni. A tagoltságot itt kétféleképpen veszik figyelembe: egymástól mért távolságuk valamint a tervezett alagúttengely és a tagoltság csapásiránya közötti viszonytól függően. A csapásirány és az alagúttengely által bezárt szög alapján történik a besorolás. Ez az érték legrosszabb esetben 9, míg optimális esetben 40. Az 5-2. ábra a dőlésirányú és a dőlésiránnyal szembeni jövesztés esetét mutatja be. Amint az 5-2. ábrán jól érzékelhető, a biztosítások beépítése és a rájuk ható terhelési viszonyok szempontjából jóval kedvezőbb a dőlésirányú jövesztés, mint az azzal szembeni.



5-2. ábra. Jövesztés (fejtés) iránya és a tagoltságok dőlésszöge közötti kapcsolat (oldalnézet)

A C paraméter értékét az A és B összegének ismeretében lehet megállapítani (5-5. táblázat). Mind a gyengébb (azaz A + B értéke 13 és 44 között van), mind a jobb (A + B értéke 45 – 75 közötti) kőzettest minőség esetén előbb a tagoló felületek állapotát kell „jó”, „közepes”, illetve „gyenge” kategóriába besorolni, majd a befolyó víz mennyiségének ismerete alapján (melyet gallon/percben adnak meg) kell a C értékszámot meghatározni. Legrosszabb esetben ennek értéke 6, míg jó minőségű, száraz tagoló felületek esetén a maximális érték 25.

A fentiekből következik, hogy az RSR értéke minimálisan 19, maximálisan 100 lehet. A nagyobb értékek a jobb kőzettest-minőséget mutatják.

Alagútfúró gép (TBM) esetén a megtámasztás tervezésénél jobb kőzettest-osztályt lehet figyelembe venni, mint hagyományos jövesztési technológiáknál, ezért egy ún. korrekciós tényezőt (AF) vezettek be, amely az alagútmérő függvénye. Alagútfúró gép esetén ezért

$$RSR_{TBM} = RSR \times AF \quad (5.3.)$$

értékkel lehet számolni. Azaz például RSR = 60-as értékű kőzettest esetén 7,0 méter átmérőjű fúrásnál (AF = 1,150) RSR_{TBM} értéke 69, és a megtámasztást is ez alapján kell megtervezni.

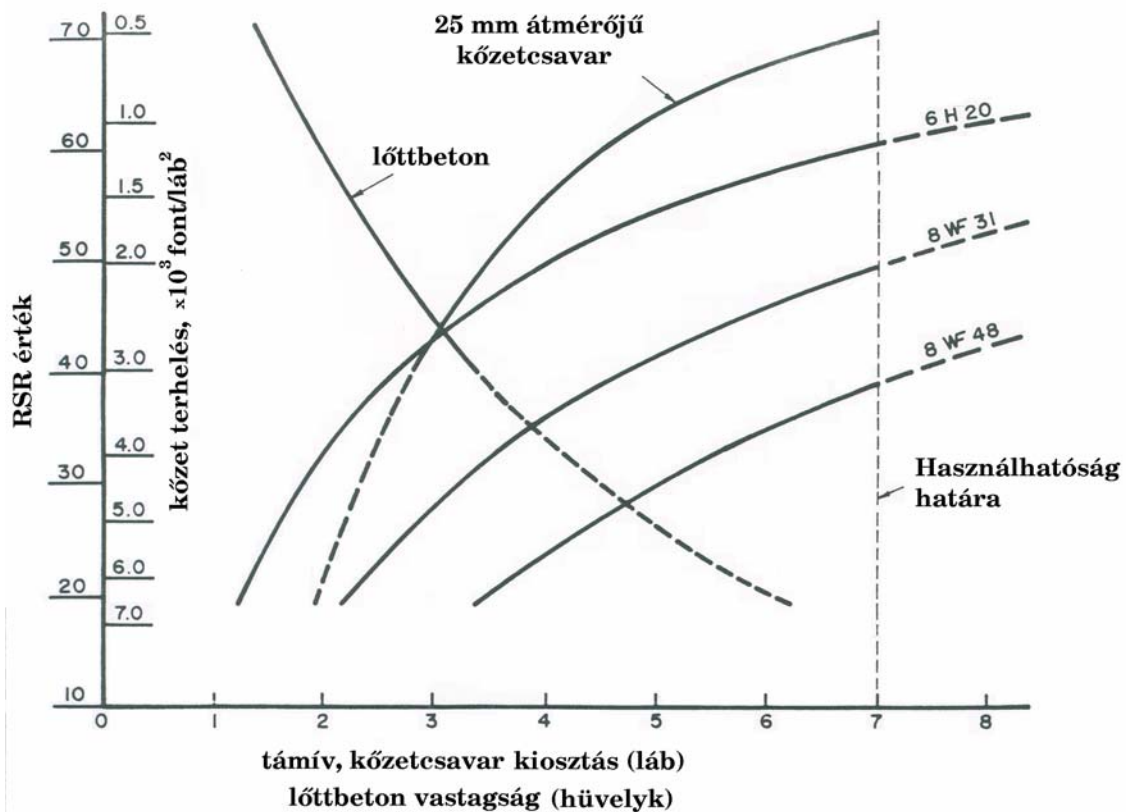
Wickham *et al* (1972) az RSR értékre alapuló összefüggést is ajánlottak a löttbeton vastagságának meghatározására:

$$t = 1 + \frac{W}{1,25} \quad (5.4.)$$

vagy

$$t = D \frac{65 - RSR}{150} \quad (5.5.)$$

ahol t a löttbeton vastagsága hüvelykben, W a kőzetterhelés (font/láb²), D az alagút átmérője (láb). Az 5-3. ábra egy 24 láb (7,3 méter) átmérőjű alagúthoz tervezhető megtámasztási diagramot mutat be.



5-3. ábra. RSR módszer: egy 24 láb (7,3 méter) átmérőjű alagút tervezéséhez figyelembe vehető biztosítási módok (Wickham *et al.*, 1974)

5-3. táblázat. A paraméter: Általános geológia

	Alap-kőzettípusba sorolás				GEOLOGIAI SZERKEZET			
	kemény	közepes	puha	töredezett				
<i>magmás</i>	I	II	III	IV	Masz-szív	Kissé gyűrt vagy töredezett	Közepesen gyűrt vagy töredezett	Erősen gyűrt vagy töredezett
<i>üledékes</i>	I	II	III	IV				
<i>átalakult</i>	II	III	IV	IV				
I. típus					30	22	15	9
II. típus					27	20	13	8
III. típus					24	18	12	7
IV. típus					19	15	10	6

5-4. táblázat. B paraméter: A tagoltság megjelenése és a kihajtás iránya

Átlag tagoltsági távolság	Csapásirány \perp a tengelyre a kihajtás iránya					Csapásirány \parallel a tengellyel a kihajtás iránya		
	Mindkettő	Dőlésirányú		Dőlés iránnyal szemben		Bármely irányban		
		A fő tagoltság dőlésszöge ^a						
	lapos	meredek	vertikális	meredek	vertikális	lapos	meredek	vertikális
Nagyon közeli < 2 hüvelyk	9	11	13	10	12	9	9	7
Közeli 2-6 hüvelyk	13	16	19	15	17	14	14	11
Közepesen tagolt 6-12 hüvelyk	23	24	28	19	22	23	23	19
Közepesen tömbösödött 1-2 l.	30	32	36	25	28	30	28	24
Szilárd tömbök 2-4 láb	36	38	40	33	35	36	24	28
Szilárd > 4 láb	40	43	45	37	40	40	38	34

^a: Dőlésszög: 0°-20°: lapos; 20°-50°: meredek; 50°-90°: vertikális.

5-5. táblázat. C paraméter: talajvíz és tagoltsági állapot.

Vízbefolyás az alagútba 100 láb hosszon gallon/percben	A + B összege					
	13 – 44			45 – 75		
	Tagoltsági állapot ^b					
	jó	közepes	gyenge	jó	közepes	gyenge
Nincs	22	18	12	25	22	18
Csekély < 200 gallon/perc	19	15	9	23	19	14
Mérsékelt 200-1000 gallon/perc	15	22	7	21	16	12
Erős > 1000 gallon/perc	10	8	6	18	14	10

^b: tagoltsági állapot: jó: szoros vagy cementálódott; közepes: kissé mállott vagy töredezett; gyenge: erősen mállott, töredezett vagy nyitott.

5-6. táblázat. Különböző átmérőjű alagútfúró gépek (TBM) esetén használható korrekciós tényezők

Átmérő		AF értéke
láb	méter	
30	9,15	1,058
	8,00	1,127
25	7,63	1,135
	7,00	1,150
20	6,10	1,168
	6,00	1,171
15	5,00	1,183
	4,58	1,186
10	4,00	1,192
	3,05	1,200

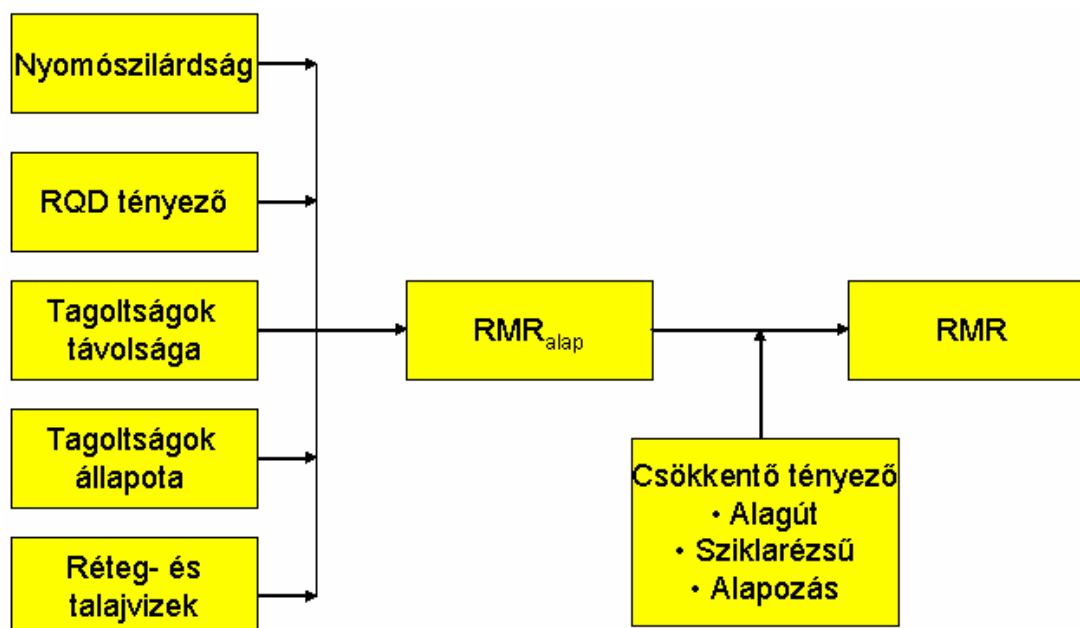
5.3 RMR (Rock Mass Rating) módszer

Az RMR módszert (melyet az angolszász szakirodalomban számos esetben Geomechanikai Osztályozásnak is neveznek) Bieniawski fejlesztette ki 1973-ban, Dél-Afrikában üledékes kőzetben (főleg mészkövekben), sekély mélységben vezetett alagutak építésére. Az eredetileg az üregállékonyság, üregbiztosítás érdekében kifejlesztett módszer kiválóan alkalmas telephely értékelésére is. Az RMR értékek megállapodásokon alapulnak, ezért csak összehasonlítást tesznek lehetővé telephelyen belül, illetve telephelyek között.

Az RMR módszer a kőzettest tulajdonságait a mérnöki létesítmény figyelembe vételével szuperponálja, azaz az alagút esetében a jövesztés irányát is figyelembe veszi. Az osztályozás az alábbi hat tényező figyelembe vételét tartja fontosnak:

1. A kőzet egyirányú nyomószilárdsága; (r_{σ})
2. RQD tényező; (r_{RQD})
3. A tagoltságok távolsága („sűrűsége”); (r_x)
4. A tagoltságok állapota; (r_a)
5. Réteg- és talajvizek; (r_G)
6. A tagoltságok iránya (r_d)

Az RMR érték a tényezőkhöz rendelt jelzőszámok összege. Ezeknek a tényezőknek az értékeinek meghatározásának első verziója óta számos jelentős változtatáson ment keresztül (pl.: Bieniawski, 1976, 1979, 1989). Az összeg 0 és 100 között változhat. Az első öt tényező adja az RMR alapértékét (RMR_{alap}), melyet a tagoltság irányával csökkentünk annak függvényében, hogy az a létrehozandó műtárgy fajtájával, orientációjával, kialakításának irányával milyen geometriai viszonyban van. A módszer használatának folyamatábráját az 5-4. ábrán adjuk meg.



5-4. ábra. Az RMR meghatározásának folyamatábrája

Jelen fejezetben az alagútépítés esetére mutatjuk be az RMR használatát, míg a következő fejezetekben sziklarézsűk, illetve alapozás esetére részletezzük felhasználási lehetőségeit.

5.3.1 Az osztályozás tényezői és meghatározásuk

Az RMR módszer alkalmazásához a létesítmény kőzetkörnyezetét olyan egységekre kell bontani, melyek szerkezeti tulajdonságai többé-kevésbé megegyeznek. Itt elsősorban azonos kőzetekre kell gondolni, illetve azonosan töredezettséggel, tagoltsággal rendelkező egységekre. Általában ezeknek az egységeknek a határai egybeesnek a főbb geológiai változásokkal, azaz pl. a nyírási zónákkal, jelentősebb tagoltsági határral, kőzethatárral, stb. Fontos, hogy ezeknél a módszereknél az intervallumhossz megválasztásakor figyelembe kell venni az alkalmazandó biztosítási szerkezet technológiai viszonyait, tehát az intervallum nem lehet rövidebb, mint az a hossz, amin belül módosítani lehet a biztosítási módot.

A tényezőkhöz tartozó jelzőszámok kiszámításának lehetőségét Sen és Sadagah (2003) alapján adjuk meg. Fel kell hívni a figyelmet arra, hogy Bieniawski által adott jelzőszámok intervallumokra vonatkozik, míg Sen és Sadagah (2003) képletei alapján folytonos függvényként értelmezi az RMR értéket.

- *Egyirányú nyomószilárdság*

A közettömb nyomószilárdságának mind laboratóriumi, mind helyszíni meghatározását a 2. fejezetben részletesen ismertettük. Bieniawski (1989) alapján ezen értékek osztályba-sorolását és az azokhoz rendelt jelzőszámokat mutatjuk be az 5-7. táblázatban.

Egyirányú nyomószilárdság (σ_c) ismeretében a jelzőszám a következőképpen határozható meg (Sen & Sadagah, 2003):

$$r_\sigma = 0,075 \sigma_c \quad (5.6)$$

A pont-terheléses vizsgálattal mért szilárdsági eredmény alapján (Sen & Sadagah, 2003):

$$r_\sigma = 1,67(1 + \sigma). \quad (5.7)$$

5-7. táblázat. Az ép kőzet nyomószilárdságához rendelhető RMR jelzőszám (Bieniawski, 1989)

Osztály	Minősítése	Egyirányú nyomószilárdság [MPa]	Pont-terheléses szilárdság [MPa]	Jelzőszám
I.	rendkívül szilárd	> 250	> 8	15
II.	nagyon szilárd	100 – 250	4-8	12
III.	szilárd	50 – 100	2-4	7
IV.	közepes szilárdságú	25 – 50	1-2	4
V.	gyenge	10 – 25	nem mérhető	2
VI.	nagyon gyenge	2 – 10	nem mérhető	1
VII.	rendkívül gyenge	1 – 2	nem mérhető	0

Megjegyzés: 0,6 MPa-nál kisebb nyomószilárdság esetén már talajról beszélünk.

- *RQD érték*

Az RQD meghatározásának módját részletesen a 3.6.2. fejezetben mutattuk be. Az 5-8. táblázatban az RMR tényezőnél használatos osztályba sorolást és az azokhoz rendelt jelzőszámokat adjuk meg.

Az RQD ismeretében a jelzőszám lineáris függvény alapján is meghatározható (Sen & Sadagah, 2003):

$$r_{RQD} = 0,2 RQD \quad (5.8)$$

5-8. táblázat. RQD osztályai és jelzőszáma az RMR osztályozáshoz

Minősítése	RQD (%)	Jelzőszám
Kitűnő	90 – 100	20
Jó	75 – 90	17
Megfelelő	50 – 75	13
Gyenge	25 – 50	8
Nagyon gyenge	< 25	3

- *A tagoltságok közötti távolságok*

A tagoltságok közötti távolság meghatározásánál két tagoló felület közötti lineáris távolságot kell mérni. A számításnál a több mérés alapján meghatározott távolságok közül a legkisebb értéket kell figyelembe venni. A besorolást az 5-9. táblázatban adjuk meg, illetve a jelzőszám meghatározható az alábbi lineáris egyenlet alapján (Sen & Sadagah, 2003):

$$r_x = 24 - 15,1 \log(\lambda), \quad (5.9)$$

ahol λ az egy folyóméterre eső tagoltságok száma.

5-9. táblázat. A tagoltságok közötti távolságok osztályozása és a hozzá rendelhető jelzőszáma

Minősítése	Távolság [m]	Jelzőszám
<i>Nagyon messzi</i>	> 2	20
<i>Messzi</i>	0,6 – 2	15
<i>Közepesen távoli</i>	0,2 – 0,6	10
<i>Közeli</i>	0,06 – 0,2	8
<i>Nagyon közeli</i>	< 0,06	5

- *Tagoltságok állapota*

Az RMR osztályozásnál használt tényezők közül ez az egyik legösszetettebb paraméter. Az eredeti leírás alapján ennek a jelzőszámnak a meghatározását az 5-10. táblázat szerint tehetjük meg. Érdemes azonban a tagoltság állapotát több szempont szerint is figyelembe venni, mégpedig a tagoló felületek érdessége és kitöltöttsége, annak megnyíltsága, folytonossága valamint mállottsága szerint. Az ezekhez rendelhető jelzőszámok összegével adható meg a tagoltság állapota. A használandó táblázatokat Romana (1993) ajánlásai alapján közöljük.

5-10. táblázat. A tagoltságok állapota szerinti osztályozás

Leírás	Jelzőszám
Nagyon érdes és üde állapotú, a kőzettestek szorosan érintkeznek, nincs szétválás	30
Érdes és kissé mállott, a szétválás kisebb mint 1 mm.	25
Kissé érdes és közepesen vagy erősen mállott, a szétválás kisebb, mint 1 mm.	20
Csúszós felület vagy 5 mm vastag. Kitöltés, vagy 1-5 mm folytonos szétnyílás	10
A szétválás nagyobb, mint 5 mm, puha anyaggal kitöltött, a folytonos diszkontinuitás legalább 5 mm széles	0

a) érdesség és kitöltöttség (5-11. táblázat)

A tagoltságok érdességét terepi megfigyeléssel határozzuk meg szabad szemmel. A táblázat tartalmazza az ajánlott osztályozási rendszereket és a hozzájuk rendelhető értékeket.

5-11. táblázat. A tagoló felülettől illetve kitöltöttségétől függő tényező és számszerű értéke

Érdesség/ Kitöltöttség	Leírása	Jelzőszám
<i>Nagyon érdes</i>	Lépcsőzetes felület, barázdák előfordulása	10
<i>Érdes</i>	Néhány barázda van, a kopás jelei láthatók	9
<i>Kissé érdes</i>	Néhány kopásjel látható az érdes felületen	8
<i>Sima</i>	Nincs semmi kopásjel a sima felületen	6
<i>Síkos</i>	Szemmel láthatóan síkos felület	5
<i>Puha kitöltött</i>	Puha, csúszós anyaggal kitöltött	0

b) megnyíltság (5-12. táblázat).

A kinyíltság a tagoló felületek merőleges eltávolodása. Belátható, hogy 5 mm-nél nagyobb kinyílás esetén a tagoló felületek közötti súrlódás elhanyagolható. Megjegyezendő, hogy a megadott osztályozási módszer nem egyezik meg az ISRM (1978) osztályozási módszerével. Az ISRM módszer 0-10 mm között állítja fel kategóriáit, az RMR tényezőnél már 5 mm-nél nagyobb tágasság esetén elhanyagoljuk az egymásra hatást.

5-12. táblázat. A tagoltság megnyíltságától függő tényező értékei

Leírás	Megnyíltság [mm]	Jelzőszám
<i>Zárt</i>	< 0,1	9
<i>Kissé megnyílt</i>	0,1 – 1	7
<i>Nyitott</i>	1 – 5	5
<i>Nagyon nyitott</i>	> 5	0

c) folytonossága (5-13. táblázat)

A folytonosság meghatározza, hogy a tagoló felületek milyen hosszan követhetők, valamint mennyire kapcsolódnak (kapcsolódhatnak) össze.

5-13. táblázat. A tagoló felületek folytonosságához rendelhető értékek

Folytonosság	Leírása	Jelzőszám
<i>Folytonos</i>	Folytonos, összekapcsolódó tagoló felület	0
<i>Fél-folytonos</i>	Nem folytonos, de a tagoló felületek formájából látható, hogy összekapcsolódásra van lehetőség.	3
<i>Nem folytonos</i>	Nincs semmiféle folytonosság a tagoló felületeknél	5

d) mállottság (5-14. táblázat)

A mállottsági fokra az ISRM (1978) által ajánlott osztályozás alapján (3.4. fejezet), az RMR tényezőknél az alábbi öt kategóriába kell a kőzetet besorolni, és ehhez jelzőszámot rendelni.

5-14. táblázat. A tagoló felületek mállottsági foka és az ahhoz rendelt érték közötti kapcsolat

Mállottság	Jelzőszám
<i>Üde</i>	6
<i>Kissé mállott</i>	5
<i>Közepesen mállott</i>	3
<i>Erősen mállott</i>	0
<i>Teljesen mállott</i>	0

- *Talaj- és rétegvíz figyelembe vétele*

Az osztályozási módszer külön veszi figyelembe a talaj- és rétegvíz jelenlétét a kőzetkörnyezet és a létesítmény kölcsönhatásánál, pl. az alagútépítésnél. A 10 m hosszan történő vízbeszivárgás mértékével határozzák meg ezt az RMR jelzőszámot. A vízbefolyáson kívül meghatározható (és adott esetben meg is kell határozni) a tagoló-felületben lévő víznyomás mértéke, valamint általánosságban a felületen várhatóan megjelenő vízmennyiséget. Az 5-15. táblázat az osztályozás rendszerét mutatja be a felvehető jelzőszámmal együtt.

5-15. táblázat. Víz jelenlétének értékelése az RMR módszernél

10 m-es alagúthosszon vízbefolyás (l/perc)	Nincs	< 10	10-25	25-125	> 125
pórusvíznyomás/ főfeszültség	0	0-0,1	0,1-02	0,2-05	> 0,5
Leírás	teljesen száraz	párás	Nedves	csepegés	folyás
Jelzőszám	15	10	7	4	0

A lineáris modellel a következő összefüggés is megadható (Sen & Sadagah, 2003):

$$r_G = 10 - 2,9 \log(G) \quad (5.10.)$$

ahol G a befolyó víz mennyisége l/perc –ben.

Romana (2003) ezt az értéket a vertikális feszültség (σ_v) és a víznyomás (u) ismeretében ajánlja meghatározni. E két érték hányadosának ismeretében ($r_u = u/\sigma_v$) a felvehető értékszám:

$$r_G = 10 \log (1/r_u) - 1,5 \quad (5.11)$$

- *Tagoltság irányától függő tényező*

A fenti tényezők összeadásával (az 5-7.–5-15. táblázatokból kiválasztott jelzőszámok alapján) kapjuk meg az ún. RMR_{alap} értéket. Ez az érték még független a tervezett műtárgy és a tagoltsági irányok közötti kapcsolattól. Fontos, hogy a tagoltság irányától függő tényezőt figyelembe vegyük. Ehhez ismernünk kell a tagoltságok csapásirányát, dőlésirányát és dőlésszögét. Azt, hogy az alagút kihajtásának iránya kedvező, vagy kedvezőtlen-e, a tagoltságok térbeli elhelyezkedésének ismeretében lehet meghatározni (lásd 5-16. táblázatot).

A besorolás alapján az RMR_{alap} értéket csökkentjük az 5-17. táblázatban megadott jelzőszámokkal. A táblázatban megadjuk a föld alatti létesítményeken kívül a sziklarézsúkre, valamint alapozásra vonatkozó csökkentő tényezőket is, de ezekkel pontosabban a következő fejezetekben foglalkozunk.

5-16. táblázat. RMR érték meghatározásához a tagoltság irányának figyelembevétele (Bieniawski, 1989)

A TAGOLTSÁG DŐLÉSSZÖGÉNEK ÉS IRÁNYÁNAK HATÁSA AZ ALAGÚTRA			
A csapásirány merőleges az alagúttengelyre		A csapásirány párhuzamos a műtárgytengellyel	
Kihajtás dőlésszög-irányban, dőlésszög: 45°-90°	Kihajtás dőlésszög-irányban, dőlésszög: 20°-45°	Dőlésszög: 45°-90°	Dőlésszög: 20°-45°
<i>Nagyon kedvező</i>	<i>Kedvező</i>	<i>Nagyon kedvezőtlen</i>	<i>Elégséges</i>
Kihajtás dőlésszög-iránnyal szemben, Dőlésszög: 45°-90°	Kihajtás dőlésszög-iránnyal szemben, dőlésszög: 20°-45°	Dőlésszög 0-20° csapásiránytól függetlenül	
<i>Megfelelő</i>	<i>Kedvezőtlen</i>	<i>Megfelelő</i>	

5-17. táblázat. Az RMR_{alap} értéket csökkentő tényezők a tagoltságok besorolása alapján

	Nagyon kedvező	Kedvező	Megfelelő	Kedvezőtlen	Nagyon kedvezőtlen
Alagutaknál	0	-2	-5	-10	-12
Sziklarézsúknél*	0	-5	-25	-50	-60
Alapozásnál**	0	-2	-7	-15	-25

lásd bővebben: *: 5.4 fejezetet, **: 5.5 fejezetet

5.3.2 Osztályba sorolás RMR érték alapján

Amint az az 5-18. táblázatból látszik, a kőzettestet az RMR érték ismeretében öt kategóriába lehet sorolni, melyhez alagutak esetén hozzárendelhető az a várható megmaradási idő, ami az alagút állékonyságát megtámasztás nélkül prognosztizálja. Ehhez lehet rendelni a szükséges megtámasztási módokat. Hangsúlyozni kell azonban, hogy az így kapott eredmény csak előzetes becslésnek tekinthető, ezzel nem lehet elhagyni a későbbi *in situ* vizsgálatokat, valamint a ma már használatos, az állékonyság értékelésére kidolgozott numerikus programok alkalmazását sem.

5-18. táblázat. Példa egy ajánlott fejtési és biztosítási módszerre a kőzettest RMR osztályának ismeretében sekély mélységben, max. 15 méter átmérővel épülő alagút esetén (Bieniawski, 1989).

RMR érték	Fejtési hossz	Megtámasztás módja		
		Közethorgonyzás	Lőttbeton	Acéltámiv
<i>I.</i> Nagyon jó 81-100	Teljes felületen 3 m hosszán	Általában nem szükséges, néha helyi erősítés		
<i>II.</i> Jó 61-80	Teljes felületen 1,0-1,5 m hosszán. Teljes megtámasztás a vājvégától 20 m-en belül	Helyileg, 3 m hosszán, 2,5 m-ként, helyileg acélhálóval	50 mm vastagságban a főténél, ahol szükséges	Nem szükséges
<i>III.</i> Megfelelő 41-60	Részlegesen 1,5 – 3,0 m-es előrehaladással. Általános megtámasztás minden vājvég után. Teljes megtámasztás 10 m-rel a fejtés mögött.	Rendszeresen elhelyezve 4 m hosszú, 1,5-2 m-es közönként a főténél és a falban, a főténél acélhálóval.	50-100 mm a főténél és 30 mm az oldalaknál	Nem szükséges
<i>IV.</i> Gyenge 21-40	Részlegesen 1,0-1,5 m hosszú előrehaladás. 10 m-re a jövesztés után azonnal biztosítás elhelyezése	Rendszeresen közethorgonyzás 4-5 m hosszán, 1-1,5 m-ként a főténél és acélháló a falakon	100-150 mm a főténél és 100 mm az oldalakon	Könnyű vagy közepes ívek 1,5 m-ként, ahol szükséges
<i>V.</i> Nagyon gyenge <20	Összetett fejtés 0,5-1,5 m hosszán. Biztosítás elhelyezése azonnal a jövesztés után. Lőttbetonos biztosítás amilyen gyorsan csak lehetséges.	Rendszeresen horgonyzás 5-6 m hosszán, 1-1,5 m sűrűséggel a főténél és a falban acélhálóval	150-200 mm a főténél, 150 mm az oldalaknál és 50 mm a fejtésnél	Közepes és nehéz ívek 0,75 m-enként béléssel és ha szükséges elötűzéssel. Zárt ellenívvel

A vizsgálat eredménye nem tartalmazza (nem is tartalmazhatja) az esetleges robbantásból adódó új törések kialakulását. Különböző fejtési módok esetén esetlegesen a kapott értéket még növelni is lehet. Alagútfúró gép alkalmazása esetén (TBM) a meghatározott RMR értékhez pl. 10-es érték hozzáadását ajánlják, illetve amennyiben jól kontrollálható robbantás történt, úgy 3-5 értéket lehet még ehhez hozzáadni.

Az RMR_{alap} meghatározásánál 5.3.1 pontban részletezett első öt tényező figyelembe vételével az egyes hatótényezők befolyása (súlya %) az 5-19. táblázat szerint alakul.

5-19. táblázat. A különböző paraméterek súly %-a az RMR_{alap} kiszámításánál az adott kőzetosztályon belül

Paraméter		I		II		III		IV		V	
		Érték	%	Érték	%	Érték	%	Érték	%	Érték	%
1	r_{σ}	15	15	12	16	7	13	4	12	2	16
2	r_{RQD}	20	23	15	19	10	19	8	23	5	42
3	r_x	20	20	15	19	10	19	8	24	5	42
4	r_a	30	30	25	33	20	36	10	29	0	0
5	r_G	15	15	10	13	7	13	4	12	0	0
Σ		100	100	77	100	54	100	34	100	12	100

5-19. táblázatból látható, hogy:

- az egytengelyű nyomószilárdság (σ_c) 12-16 %, átlag 14 %, súllyal
 - az RQD 19-42 %, átlag 30 % súllyal
 - a tagoltság távolsága (r_x) 19-42 %, átlag 30 % súllyal
 - a tagolófelületek állapota (r_a) 0-36 %, átlag 18 % súllyal
 - vízviszonyok (r_G) 0-15 %, átlag 7 % súllyal
- szerepelnek az összpontszámokban.

A legnagyobb súllyal RQD és tagolófelületek távolsága szerepel a minősítésben, tehát nagyrészt a tagoltság, repedezettség sűrűségét jellemzi az RMR érték és csak kevésbé ezek minőségét. A közettömböt, mint építő elemet jellemző egytengelyű nyomószilárdság súlya csak mintegy fele a tagoltság sűrűségét jellemző paramétereknek, azaz csak kisebb befolyással bír. Döntően a repedéssűrűség és kevésbé a repedésminőség, kőzetminőség alapján történik az RMR osztályozás, de ezzel együtt megbízható képet ad a repedezett kőzetről.

5.3.3 Kőzetterhelés mértéke, megtámasztás nélküli idő és szabad fejtési hossz

Unal (1983) ajánlása alapján a főtére jutó kőzetterhelés nagysága az alábbi összefüggés alapján határozható meg:

$$P = \frac{100 - RMR}{100} \gamma B \quad (5.12.)$$

ahol P a terhelés nagysága (MPa), B az alagút átmérője (m) és γ a kőzet sűrűsége (kg/m^3).

Az RMR érték alkalmas arra, hogy értékeljük a kőzettest viselkedését az alagútépítés alatt: várhatóan mennyi ideig áll meg az alagút megtámasztás nélkül, mekkora szabad fejtési hosszal lehet számolni.

Természetesen az adott kőzettestet soha nem lehet egy értékkel jellemezni, hanem az egyes jellemzőknél intervallumot kell megadni. Ehhez a m érnöki gyakorlat és tapasztalat érvényesítése is szükséges.

A megtámasztás nélküli idő minden esetben a föld alatti létesítmény fesztávolságától függ. Itt a fesztávolság alatt a megnyitott vágat átmérőjét vagy az utolsó biztosítás és a fejtésfront közötti távolságot értjük attól függően, melyik a kritikusabb. Természetesen egy ívesen nyitott vágat jóval tovább áll meg, mint egy sík főtéjű, továbbá jelentősen befolyásolja még ezt az időt a fejtés módja is: jól megtervezett robbantás esetén az idő inkább növekszik, amennyiben viszont a robbantás jelentősen károsítja a kőzet környezetét, jelentősen csökkenhet.

Kör szelvényű alagutak esetén az RMR érték függvényében a megtámasztás nélküli időt osztályonként az 5-20. táblázatban adjuk meg. Grafikusan az 5-5. ábra szemlélteti az összefüggést a fejtési hossz és a megtámasztás nélküli idő között, melyet a gyakorlati tapasztalatok alapján grafikus ábrázolással adtak meg.

Şen és Sadagah (2003) által megadott analitikus egyenletek a következők:

- Szabad fejtési hosszra az RMR érték függvényében (S – méter):

$$S = \text{RMR}/18 \quad (5.13.)$$

- A megtámasztás nélküli időre az RMR érték függvényében (t – óra):

$$t = 1,19e^{0,178\text{RMR}} \quad (5.14.)$$

5.3.4 A kőzettest belső súrlódási szöge és kohéziója

Abból a feltételezésből kiindulva, hogy a kőzettest tönkremenetele a Coulomb törési feltétel szerint jön létre, a kőzettest állékonysága annak belső súrlódási szögétől (ϕ) és kohéziójától (c) függ. Természetesen mindkét tényező eltérő a reziduális (maradó) és a csúcs (maximális) értéknél. Az 5-20. táblázatban az értékeket a csúcsra vonatkoztatóan adták meg, melyeket *in situ* mérésekkel határoztak meg. Az így megadott kohézió értékek sziklarézsűk esetén csak telített és mállott kőzettestre igazak, míg alagutak esetén sokszor egy nagyságrenddel nagyobb értékek használata is megengedett.

Lineáris egyenletet használva a következő összefüggés adható meg az RMR érték és a nyírási paraméterek között:

a kőzettest kohéziója (c – kPa):

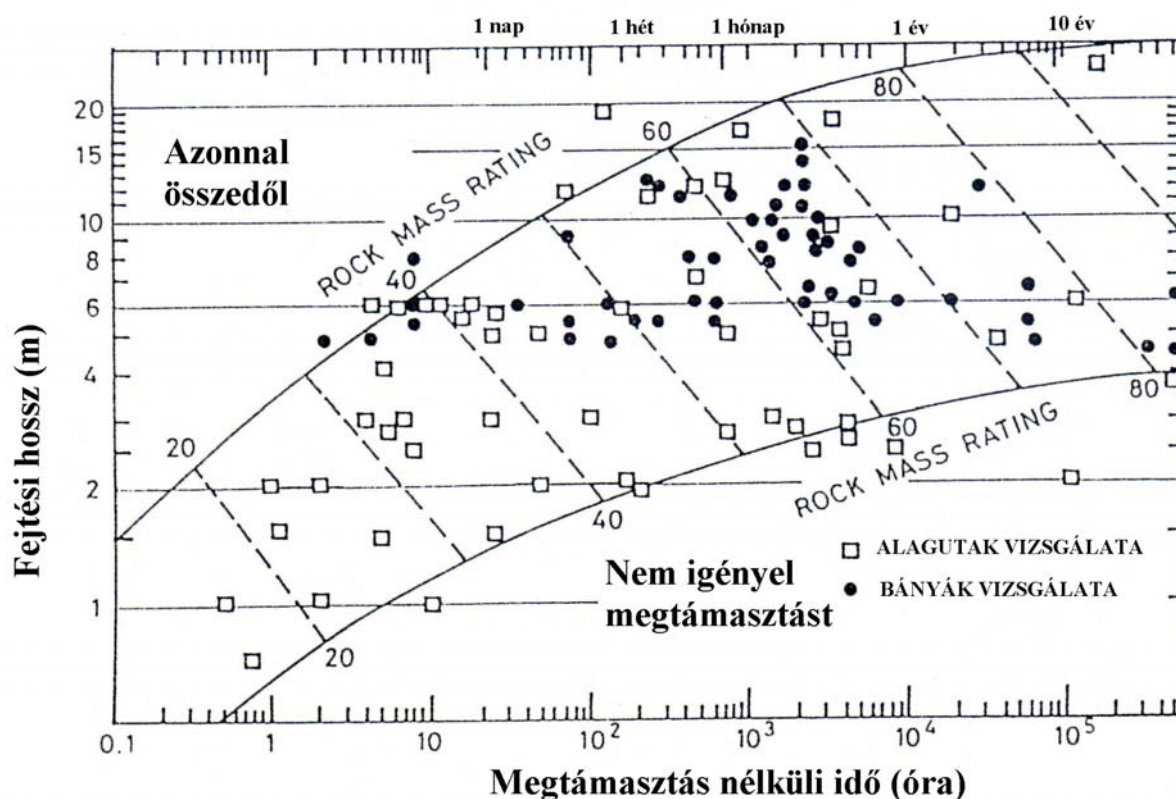
$$c = 3,625 \text{ RMR} \quad (5.15.)$$

a kőzettest belső súrlódási szöge (ϕ):

$$\phi = 25[1 + 0,01 \text{ RMR}], \quad \text{ha } \text{RMR} > 20 \quad (5.16.)$$

és

$$\phi = 1,5 \text{ RMR}, \text{ ha } \text{RMR} < 20. \quad (5.17.)$$



5-5. ábra. A megtámasztás nélküli idő és a fejtési hossz az RMR ismeretében (Bieniawski, 1989).

5-20. táblázat. Az RMR érték osztályozása és értékelése

KŐZETTEST OSZTÁLYOZÁS A TELJES ÖSSZEGBŐL					
Érték	81-100	61-80	41-60	21-40	0-21
Osztályozás	I	II	III	IV	V
Leírás	Nagyon jó	Jó	Megfelelő	Gyenge	Nagyon gyenge
KŐZETTEST OSZTÁLY ÉRTÉKELÉSE					
Osztályozás	I	II	III	IV	V
Megtámasztás nélkül megáll: átlag idő (átmérő)	20 év (15 m)	1 év (10 m)	1 hét (5 m)	10 óra (2,5 m)	30 perc (1 m)
Kohézió - c (kPa)	> 400	300-400	200-300	100-200	< 100
Súrlódási szög - ϕ	> 45°	35°-45°	25°-35°	15°-25°	< 15°

5.3.5 Alakváltozási modulus és az RMR érték közötti kapcsolat

A meghatározott RMR érték és az *in situ* körülmények közötti alakváltozási modulus kapcsolatát számos szerző vizsgálta. Az 5-6. ábra Bieniawski (1978) és Serafim és Pereira (1983) mérései alapján meghatározott összefüggéseket mutatja be. Bieniawski kemény kőzetek esetén ($\sigma_c > 100$ MPa) az RMR érték és az alakváltozási modulus között a következő összefüggést adja meg:

$$E_m = 2 \text{ RMR} - 100 \quad (\text{ha } \text{RMR} > 50) \quad [\text{GPa}]. \quad (5.18.)$$

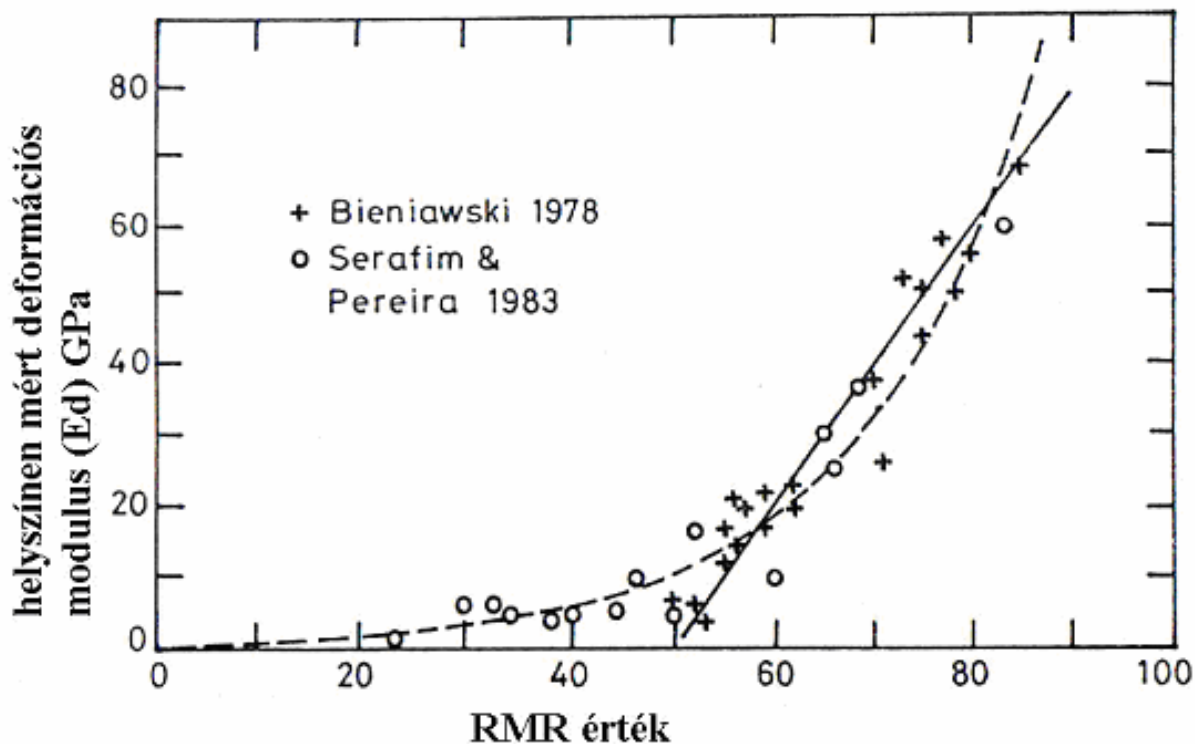
Az RMR ismeretében a helyszíni (*in situ*) alakváltozási modulus kiszámolásának lehetőségére Serafim és Pereira a következő összefüggést ajánlja:

$$E_m = 10^{(\text{RMR}-10)/40} \quad (\text{alkalmazható, ha } \text{RMR} < 50 \text{ is!}) \quad [\text{GPa}]. \quad (5.19.)$$

Napjainkban Hoek és Brown (1997) foglalkozott az RMR érték és az alakváltozási modulus közötti kapcsolattal: 100 MPa-nál kisebb szilárdságú ép kőzetek esetén a következő összefüggés használatát javasolják abban az esetben, ha $\sigma_c < 100$ MPa:

$$E_m = \sqrt{\frac{\sigma_c}{100}} 10^{(\text{RMR}-10)/40} \quad [\text{GPa}] \quad (5.20.)$$

Megjegyezzük, hogy a későbbiekben részletesen bemutatott GSI értéknél használatos deformációs modulus kiszámítási képletek általában itt is alkalmazhatók (lásd 5.7. fejezet).



5-6. ábra. A helyszínen (*in situ*) mért alakváltozási modulus a meghatározott RMR érték ismeretében (lásd 5.19. és 5.20. közelítő egyenleteket)

5.3.6 Kőzettest törési határgörbéje RMR ismeretében

Az első törési határfeltételt a kőzettest osztályozás értékének ismeretében Yudhbir (1983) empirikus alapon írta fel az alábbi formában:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_c} = A + B \left[\frac{\sigma_3}{\sigma_c} \right]^\alpha \quad (5.21.)$$

ahol: $\alpha = 0,75$ -nek vehető fel általános esetben, σ_c pedig a kőzet egyirányú nyomószilárdsága. A tényező a kőzettest töredezettségét reprezentálja, azaz kőzetosztály függő, és kiszámítására az alábbi képletet ajánlja:

$$A = \exp [(RMR-100)/14]$$

A képletben B kőzettípustól függő anyagállandó. Értéke néhány kőzetnél: mészkő: $B = 2$; agyagkő: $B = 3$; homokkő: $B = 4$; gránit és norit: $B = 5$. Szén esetén $\alpha = 0,6$ és $B = 4$ felvételét ajánlják.

Ramamurthy (1986) helyszíni méréseire illesztett határgörbét, és a kőzettest RMR értékének ismeretében az alábbi összefüggést írta fel:

$$(\sigma_1 - \sigma_3)/\sigma_3 = B_m(\sigma_{cm}/\sigma_3)^\alpha \quad (5.22.)$$

ahol:

$$\sigma_{cm} = \sigma_c \exp[(RMR - 100)/18,75] \text{ és}$$

$$B_m = B \exp [(RMR - 100)/75,5]$$

Az egyenletben B kőzettípus függő. Néhány kőzetnél ez az érték: homokkő: $B = 2,2$; mészkő: $B = 2,4$; bazalt: $B = 2,6$; márvány: $B = 2,8$; gránit: $B = 3,0$. α tényező a $\log(\sigma_c/\sigma_3)$ és $\log(\sigma_1 - \sigma_3)$ függvény meredeksége. Értéke 0,75 és 0,85 között van, általában 0,8.



5.4 RMR osztályozási módszer alkalmazása sziklarézsúknél – SMR módszer

Az előző fejezetben ismertettük az RMR_{alap} meghatározását, mely nem tartalmazza a kőzettest tagoltságának és az alagút fejtésének irányának geometriai viszonyait. Ennek a tényezőnek ismeretében lehetőség van a sziklarézsúk állékonyságának számítására is. Ezt a módszert Romana (1985, 1993) fejlesztette ki, és SMR-nek (Slope Mass Rate) nevezte el (lásd még: Vásárhelyi, 2003b). A sziklarézsúk osztályozását és tönkremenetelük módját Kertész (1985) részletesen összefoglalja.

Kiszámításánál négy különböző módosító tényezőt vesz figyelembe:

$$SMR = RMR_{alap} + (F_1 F_2 F_3) + F_4 \quad (5.23.)$$

Az egyenletben az F_1 , F_2 és F_3 a tagoltság-sziklarézsú közötti geometriai viszonyoktól függő tényezők, míg az F_4 az emberi beavatkozástól függ. Az 5-7. ábra a módosító tényezőknél felhasznált geometriai viszonyokat mutatja be.

F_1 a sziklarézsú és a tagoltság csapásirányától függő tényező. Amennyiben egymással párhuzamosak, ez az érték 1,00, míg a minimális értéke 0,15 amikor a csapásirányok között bezárt szög több mint 30° , azaz a törés lehetősége igen kicsi. E két érték között a következő összefüggéssel lehet közelítőleg az értéket kiszámolni:

$$F_1 = (1 - \sin A)^2 \quad (5.24.)$$

ahol A a tagoltság és a sziklarézsú csapásiránya közötti szög fokban.

F_2 tényező a tagoltság dőlésszögétől függ, azaz ez a tényező a nyírási szilárdsági valószínűségi érték. Amennyiben a dőlésszög 45° -nál nagyobb, akkor az értéke 1,00, míg 20° -nál kisebb dőlésszög esetén 0,15. E két érték között a következő egyenlettel lehet kiszámítani a tényező értékét:

$$F_2 = \operatorname{tg}^2 \beta \quad (5.25.)$$

ahol β a tagoltság dőlésszöge. Csúszási tönkremenetel esetén F_2 értéke 1,00.

F_3 a sziklarézsú és a tagoltság dőlésszögétől függő tényező. Kétféle tönkremeneteli állapotot különböztethetünk itt meg: a „csúszási”, illetve a „kibillenő” tönkremenetelt.

- Csúszási tönkremeneteli állapotban F_3 a sziklarézsúnek a tagoltságból nézve vett meredekségétől függő valószínűség. Jó akkor, ha a tagoltság párhuzamos a sziklarézsúvel, míg ha a sziklarézsú dőlésszöge 10° -nál nagyobb, mint a sziklarézsúé, kedvezőtlen állapotról beszélünk.
- A kibillenési tönkremeneteli módot Hoek és Bray (1981) részletesen elemzi: megállapításuk szerint ez alapján a mállott és a lecsökkent nyírószilárdságú (5° körüli súrlódási szöggel) sziklarézsúknak növekszik meg a tönkremenetel esélye. Ebben az esetben kedvezőtlen illetve nagyon kedvezőtlen állapotról nem beszélhetünk.

A fenti tényezőket foglalja össze az 5-21. táblázat.

F_4 a sziklarézsú emberi beavatkozásától függő tényező. A tényező felvételénél a következő megfontolásokból indultak ki (lásd az 5-22. táblázat):

- a természetes sziklarézsú a legstabilabb, a hosszú idejű erózió és a rátelepülő mechanikai védelem (pl.: vegetáció, kergesedés, stb.) okból kifolyólag: $F_4 = +15$.
- hasadás előtti állapot szintén növeli a sziklarézsú állékonyságát: $F_4 = +10$.
- egyenletes robbantás esetén szintén nő a sziklarézsú stabilitása: $F_4 = +8$.

- d) normál robbantás esetén nem változik a sziklarézsű stabilitása: $F_4 = 0$.
- e) mechanikai bányászat esetén (általában hasítással, sokszor előkészítő robbantással), mikor a sziklarézsű síkját nehéz meghatározni. Ebben az esetben általában sem nem nő, sem nem csökken a sziklarézsű stabilitása: $F_4 = 0$.
- f) rosszul koordinált robbantás esetén $F_4 = -8$.

A fentiek szerint meghatározott SMR érték alapján az osztályozást az 5.-23. táblázat mutatja. A kapott érték alapján fogalmat alkothatunk a szükséges beavatkozás nagyságáról és a sziklarézsű biztonsági tényezőjéről, valamint az esetleges tönkremenetel módjáról. Az 5-24. táblázatban az ajánlott beavatkozási, megtámasztási módokat foglaltuk össze. Ki kell hangsúlyozni, hogy a meghatározott SMR érték, illetve az ez alapján történő osztályba sorolás, valamint a megtámasztás tervezése csak az állapotfelvétel idejére vonatkozik. A sziklarézsűk időjárásnak jelentősen ki vannak téve, ezért a méréseket el kell végezni mind a fejtés utáni üde kőzettestnél, majd később, az esetlegesen mállott állapotú kőzettesten. Számos esetben a fejtés után stabil, jó minőségű kőzettest instabillá válik néhány éven belül. Ugyancsak fontos a felvétel ideje, télen és tavasszal, amikor sok csapadék esik, rosszabb kőzettest-minőséget mérhetünk, mint nyáron. Ezért a vizsgálatnál mindig a lehető legrosszabb állapotot kell figyelembe venni.

5-21. táblázat. A módosító tényezők jelzőszáma a kőzettömb várható csúszása, illetve kibillenése esetén

<i>Csúszási tönkremenetel</i>	nagyon kedvező	kedvező	megfelelő	kedvezőtlen	nagyon kedvezőtlen
$\alpha_j - \alpha_s$	$> 30^\circ$	$30-20^\circ$	$20-10^\circ$	$10-5^\circ$	$< 5^\circ$
F_1	0,15	0,40	0,70	0,85	1,00
β_j	$< 20^\circ$	$20-30^\circ$	$30-35^\circ$	$35-45^\circ$	$> 45^\circ$
F_2	0,15	0,40	0,70	0,85	1,00
$\beta_j - \beta_s$	$> 10^\circ$	$10-0^\circ$	0°	$0^\circ - -10^\circ$	$< -10^\circ$
F_3	0	0	-25	-50	-60
<i>Kibillenési tönkremenetel</i>					
$(\alpha_j - \alpha_s) - 180^\circ$	$> 30^\circ$	$30-20^\circ$	$20-10^\circ$	$10-5^\circ$	$< 5^\circ$
F_1	0,15	0,40	0,70	0,85	1,00
F_2	1	1	1	1	1
$\beta_j + \beta_s$	$< 110^\circ$	$110 - 120^\circ$	$> 120^\circ$	-	-
F_3	0	0	-25	-	-

α_j : a tagoltság dőlésiránya; α_s : a sziklarézsű dőlésiránya; β_j : a tagoltság dőlésszöge; β_s : a sziklarézsű dőlésszöge

5-22. táblázat. F_4 értéke különböző fejtési módok esetén SMR tényező számításához

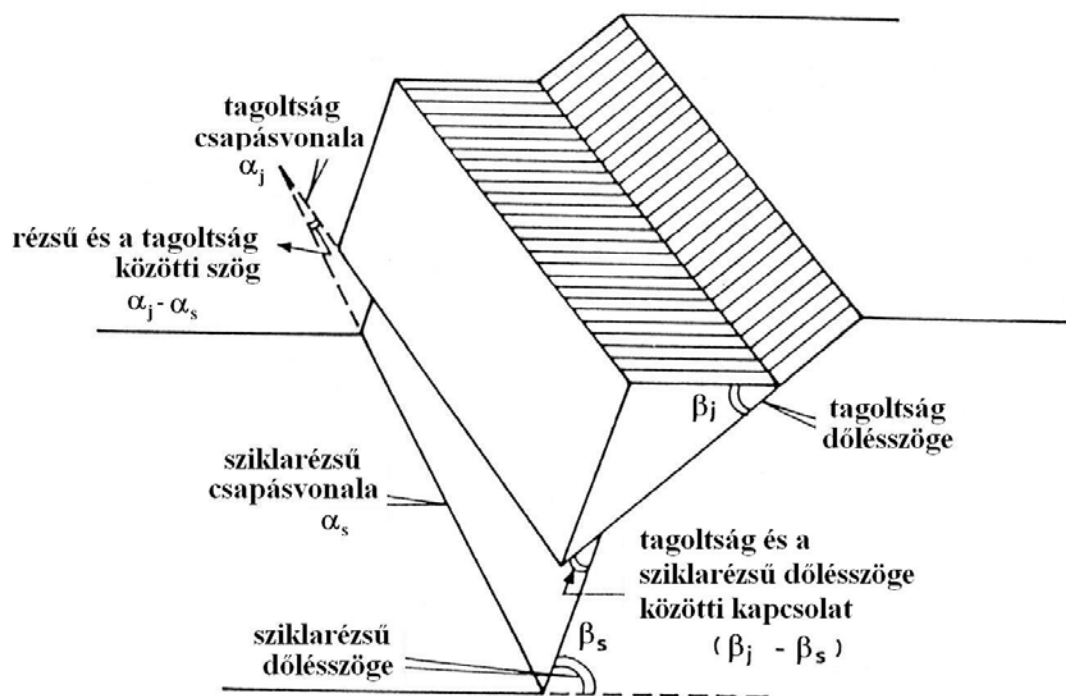
Fejtési módszer	F_4 érték
<i>természetes rézsű</i>	+ 14
<i>hasítás-előtti</i>	+10
<i>jól kontrolált robbantás</i>	+8
<i>normál robbantás vagy mechanikai fejtés</i>	0
<i>rosszul kontrolált robbantás</i>	-8

5-23. táblázat. Az állékonyság (tönkremenetel) és a meghatározott SMR érték közötti kapcsolat

SMR	Osztály	Leírás	Állékonyság	Tönkremenetel	Biztonsági tényező
81 – 100	I	Nagyon jó	Teljes mértékben stabil	Nincs	10
61 – 80	II	Jó	Stabil	Néhány tömb	5
41 – 60	III	Megfelelő	Részlegesen stabil	Néhány tagoló felület v. sok hasadék	2,5
21 – 40	IV	Rossz	Instabil	Csúszás v. nagy hasadék	1,6
0 – 20	V	Nagyon rossz	Teljes mértékben instabil	Nagy csúszás v. talajszerű	1,1

5-24. táblázat. Ajánlott megtámasztási módok a különböző SMR osztályokhoz

SMR érték	SMR osztály	Ajánlott biztosítási mód
91-100	Ia	Nem kell megtámasztás
81-90	Ib	Nem kell megtámasztani, helyenkénti leválasztások
71-80	IIa	Pontszerű kőzetcsavarozás
61-70	IIb	Pontszerű vagy rendszeres kőzetcsavarozás
51-60	IIIa	Pontszerű vagy rendszeres kőzetcsavarozás, helyenkénti löttbetonozás
41-50	IIIb	Rendszeres kőzetcsavarozás/horgonyzás, rendszeres löttbetonozás, előfalazás és/vagy betonozás
31-40	IVa	Kihorgonyzás, rendszeres löttbetonozás, előfalazás és/vagy betonozás (vagy újrafajtás), drénezés
21-30	IVb	Kihorgonyzás, rendszeres löttbetonozás, előfalazás és/vagy betonozás, újrafajtás), mély drénezés
11-20	V	Súly- vagy hátra-horgonyzott támfal, újrafajtás



5-7. ábra. Csúszási törés esetén a mérendő csapásirány és dőlésszögek



5.5 Építmények alatti kőzettest teherbírásának meghatározása RMR módszerrel

A kőzettest sokkal heterogénebb, mint a talaj, ezért számos esetben az épületek, gátak, létesítmények alapozásánál főleg feltöredezett, gyenge vagy hullámos kőzetfelszín esetén számos probléma merülhet fel, például jelentős süllyedésbeli különbségekkel kell számolni. Fokozottan kell ügyelni abban az esetben, ha az alaptest részben kőzettesten, részben talajon áll. A különböző kőzettestek alakváltozási modulusai jelentősen eltérhetnek, amit szintén számításba kell venni. Jelen fejezetben csak az RMR módszer alkalmazhatóságát mutatjuk be – teljes részletességgel e témával Wyllie (1992) foglalkozik.

Az alapozás megtervezése függ a felszínen lévő kőzettest minőségétől, mely szoros összefüggésben van annak határteherbírásával. Nagyobb műtárgyak esetén itt is ajánlott a helyszíni próbaterhelés végzése.

Az RMR_{alap} érték alapozási munkák tervezése esetén is használható. A tagoltság térbeli elhelyezkedésének ismeretében ún. csökkentő tényezők vezethetők be a „nagyon kedvező”-től a „nagyon kedvezőtlen” esetig. A tapasztalatok alapján megállapítható, hogy a határteherbírás drasztikusan lecsökken függőleges irányú tagoltsági rendszer esetén. Ilyenkor mély határmélységgel kell számolni. Az 5-25. táblázatban a RMR_{alap} értékét módosító csökkentő tényezőket adjuk meg.

Az így meghatározott RMR érték segítségével lehetőség van az alaptest alatti kőzettest osztályozására és a határteherbírásának (σ_H) megadására is a

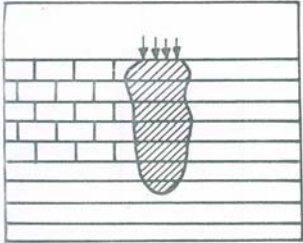
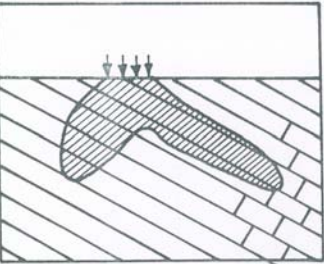
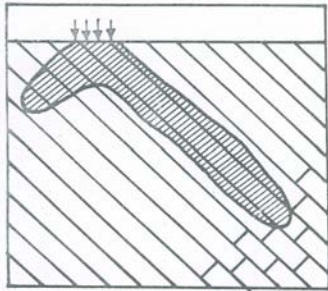
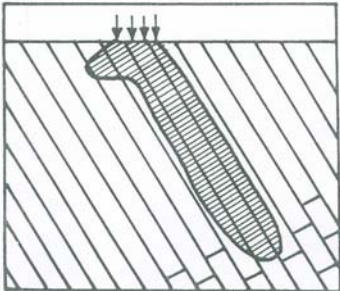
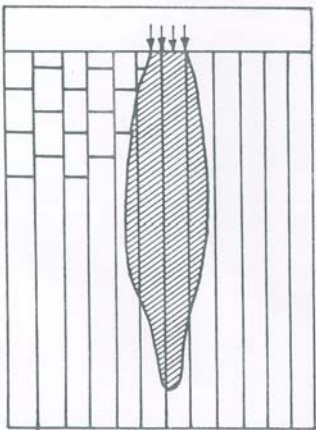
$$\sigma_H = 3,4 RMR^{1,6} \quad [\text{kN/m}^2] \quad (5.26.)$$

összefüggés alapján, illetve az 5-26. táblázat felhasználásával. Fontos kiemelni, hogy a táblázat csak abban az esetben használható, ha az alaptest alatti kőzettest minősége állandónak tekinthető. Abban az esetben, ha a felső zóna RMR tényezője az alaptest szélességének kb. negyedének megfelelő zónájában az RMR tényező kisebb értékű, akkor számításnál vagy ezt kell figyelembe venni, vagy pedig ezt a gyengébb réteget ki kell váltani. Az 5-24. táblázatban megadott határ teherbírási értékek 12 mm-es süllyedés feltételezésével használhatók.

Főleg Ibériai gátak károsodását vizsgálva, Romana (2003) felhívja a figyelmet a gátak szerkezete, magassági mérete ismeretében mely RMR értékzónákban kell fokozott figyelemmel eljárni (lásd 5-27. táblázat).

Romana kimutatta, hogy nagy vízzáró gátak tönkremenetelét sok esetben a beton és a kőzettest különböző alakváltozási modulusa okozza. Az 5-28. táblázatban e két tényező hányadosának a gátra gyakorolt hatását mutatjuk be Romana (2003) alapján.

5-25. táblázat. A tagoltság és az alaptest helyzetétől függő besorolás szerint meghatározható csökkentő tényezők az RMR érték számításához

	Tagoltság helyzete	Csökkentő tényező
	Nagyon kedvező $\delta = 0^\circ$	0
	Kedvező $\delta = 30^\circ$	-2
	Megfelelő $\delta = 45^\circ$	-7
	Kedvezőtlen $\delta = 60^\circ$	-12
	Nagyon kedvezőtlen $\delta = 90^\circ$	-25

5-26. táblázat. Az alaptest alatti kőzettest RMR értéke alapján való osztályozás és az ahhoz felvehető határfeszültségi értékek (q_a) az RMR érték ismeretében

Osztály	I	II	III	IV	V
leírás	nagyon jó	jó	elégséges	gyenge	nagyon gyenge
RMR érték	100-81	80-61	60-41	40-21	20-0
σ_H (kN/m ²)	6000-4400	4400-2800	2800-1350	1350-450	450-300

5-27. táblázat. Alakváltozás megítélése az RMR érték ismeretében (Romana, 2003)

Gáttípus	Magasság (m)	Nincs probléma	Problémás	Jelentősen problémás
<i>súlygát</i>	< 50	> 40	25-40	< 25
	50-100	> 50	40-50	< 40
	100-150	> 60	50-60	< 50
<i>ívgát</i>	< 100	> 45	35-45	< 35
	100-150	> 60	45-55	< 45
	150-200	> 70	55-70	< 55

5-28. táblázat. A beton (E_c) és a kőzettest (E_m) alakváltozási modulus hányadosának hatása (Romana, 2003)

E_c/E_m	A gátra gyakorolt hatás	Problémák
< 1	elhanyagolható	nincs
1-4	alacsony hatás	nincs
4-8	fontos hatás	néhány
8-16	nagyon fontos hatás	számos
> 16	különleges mérések szükségesek	nagyon veszélyes



5.6 Q index (Alagútépítési kőzetminősítő érték)

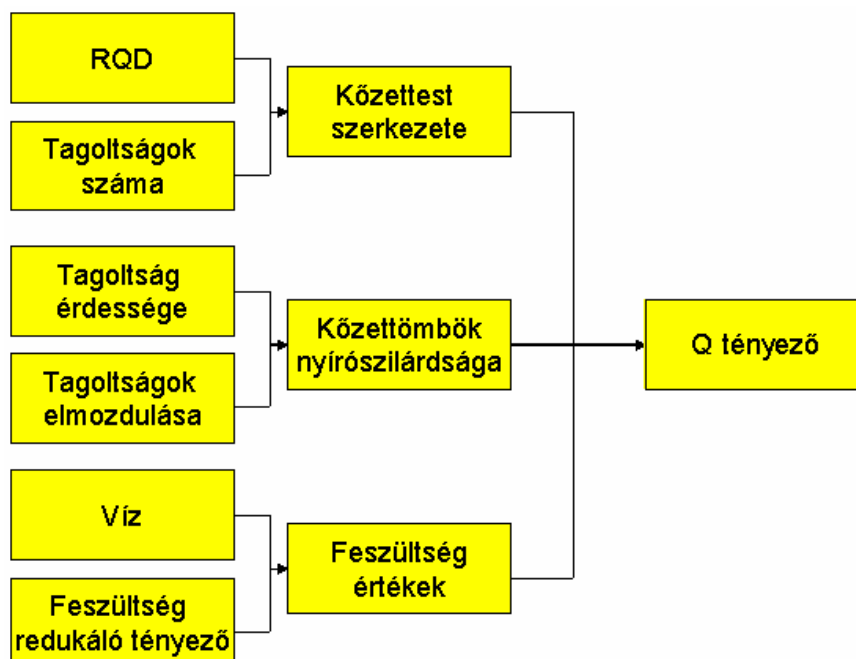
A Norvég Geotechnikai Intézet (NGI) az addigi nagyszámú alagútépítési tapasztalatokat felhasználva, Barton vezetésével 1974-ben foglalta össze vizsgálódásaik eredményeit, és állította össze kőzetminősítési módszerét kifejezetten alagutak építésre. Az általuk bevezetett módszert a szakirodalom Q módszerként ismerteti (Q: quality). Kidolgozása óta számos alagút építésénél használták, és ma már az egyik legfontosabb kőzettestet minősítő eljárás.

A Q módszer az RMR-rel ellentétben a hatásokat figyelembe vevő jelzőszámokat nem összegzi, hanem a kőzettestet szerkezete, a tagoltságok érdekességének és töredezettségének, valamint a feszültségi paraméterek jelzőszámainak szorzatát, illetve hányadosát számolja. A Q értéke minimálisan 0,001, a maximálisan pedig 1000, azaz elméletileg kb. 300 000 különböző földtani kombinációt képviselhet. A Q értékének meghatározása a következő (folyamatát az 5-8. ábrán mutatjuk be):

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF} \quad (5.27.)$$

ahol:

- RQD**: az RQD érték (lásd 3.6.4. fejezet)
a képlet csak RQD > 10 % esetén használható
- J_n**: a tagoltság csoportjainak számát kifejező számérték,
- J_r**: a tagoltság érdekességének mérőszáma,
- J_a**: a tagoltság felületi mállottsága,
- J_w**: a tagoltságban megjelenő víz,
- SRF**: a feszültség redukáló tényező (SRF = Stress Reduction Factor).



5-8. ábra. Az alagútépítési minősítő-érték – Q-tényező – számításának folyamatábrája

5.6.1 A kőzettest szerkezete

A kőzettest szerkezetét az RQD/J_n (azaz a tagoltság mérőszáma/a tagoltság csoportjainak száma) hányadosa mutatja. Maximális értéke 200 (100/0,5) és a minimális 0,5 (10/20). Az RQD értékét itt 5 egészre kerekítve kell felvenni (azaz 100, 95, 90, stb.).

J_n értékét az 5-29. táblázat alapján lehet meghatározni. Ez az érték nagyjából a tagoltságcsoportok számának négyzetével egyezik meg. A repedéscsoportok számát (J_n) gyakran befolyásolja a leveledés, a palásodás, a palás töredezettség vagy rétegzettség, stb. A párhuzamos repedések egy része nem látszik, és csak esetenként jelenik meg a fűrómagon törés formájában, de a repedéscsoportok számának meghatározásához „véletlen törés”-ként figyelembe lehet venni.

5-29. táblázat. A tagoltság mérőszámának meghatározása

TAGOLTSÁG	J_n
Ha a kőzet masszív, nincs repedés vagy csak kevés repedés van	0,5-10
Egy repedéscsoport	2
Egy repedéscsoport + véletlen törés	3
Két repedéscsoport	4
Két repedéscsoport + véletlen törés	6
Három repedéscsoport	9
Három repedéscsoport + véletlen törés	12
Négy vagy több repedéscsoport + véletlen törés	15
Töredezett kőzetre	20

Megjegyzés: Alagút-keresztveződéseknél a kapott értéket 3,0-val, a portáloknál 2,0-val kell felszorozni.

5.6.2 A kőzettömbök nyírószilárdsága

A J_r/J_a hányados a tagoltság érdességét és töredezettségét, továbbá mállottságát leíró tényező, és így a kőzettömbök közötti nyírószilárdságról ad információt. Ez az érték az üde állapotú, nem kitöltött, érdes érintkező felületnél a legnagyobb, mivel ebben az esetben a maximális a nyírófeszültséghez a legnagyobb megnyílás tartozik, ami az alagútépítéshez a legszerencsésebb. Amikor agyagkitöltés található a tagoltságban, a nyírófeszültség jelentősen csökken. A J_r értékeit adjuk meg az 5–30. táblázatban, míg az 5-31. táblázatban a J_a lehetséges értékeit mutatjuk be.

5-30. táblázat. A repedezettségi tényező meghatározása

REPEDÉSÉRDESSÉGI TÉNYEZŐ ^a	J_r
Nem folyamatos lépcsős repedés	4,0
Durva vagy rendszertelenül hullámos felület	3,0
Sima vagy egyenletesen hullámos felület	2-1,5
Durva vagy rendszertelen sík felület	1,5
Sima felület	1,0
Egyenletesen sík felület	0,5

^a: J_r repedésérdeességi tényező értéke abban az esetben, ha a felületek között nincs rés, illetve a rés záródik a mozgások alatt. Amennyiben a tagoltság agyagos, homokos vagy töredezett anyaggal kitöltött, valamint mozgások alatt nem záródik, ez az érték: 1,0.

5-31. táblázat. A tagoltság elmozdulási tényezőjének (J_a) meghatározása

A TAGOLTSÁG MÁLLOTTSÁGI TÉNYEZŐJE			
<i>Zárt repedések esetén</i>			J_a
Összementálódott, kemény, nem lágyuló impermeábilis kitöltő-anyagoknál (pl.: kvarc, epidot)			0,75
Csak felületbevonat képződött			1,5
Agyagászványokat nem tartalmazó közettörmelék esetén			2,0
Iszapos vagy agyagos rétegek esetén			3,0
Lágyuló v. kevésbé sűrűlő agyagrétegek (kaolinit, csillám, gipsz, grafit, stb.) esetén, max. 2 mm résvastagságnál			4,0
<i>Nyitott repedések esetén</i>			
<i>10 cm-en belül záródnak mozgás alatt</i>	J_a	<i>Nem záródnak mozgás alatt</i>	J_a
Homokszemeknél v. közettörmeléknél	4,0	Homokos vagy iszapos (nem lágyuló) agyagnál	5,0
Erősen konszolidált, nem lágyuló agyagászvány kitöltésnél (folyamatos 5 mm vastagságú)	6,0	Közzettörmelékes kitöltésnél	6-8
Közepesen vagy kissé konszolidált agyagászványnál (folyamatos 5 mm vastagságú)	7,0	Agyagos törmelékkitöltésnél	8-12
Duzzadó agyagnál (folyamatos 5 mm vastagságú)	8-12	Agyagkitöltés esetén	10-20

5.6.3 Feszültség-értékek

A feszültségérték két tényezőtől tevődik össze: a tagoltságban lévő víz (J_w) és az ún. feszültség-redukciós tényezőtől (SRF), melyek hányadosát (J_w/SRF) kell kiszámolni. Az összefüggésben szereplő két érték a következő:

- A J_w a mért víznyomás értéke, mely fordítottan arányos tényezője a tagoltság nyírási szilárdságának, mivel az az effektív feszültséget csökkenti. A víz (ezen túlmenően) lágyulást, és agyag-kitöltés esetén kimosódást is okozhat. A közzettömbök közötti effektív feszültség kapcsolatában eme két tényezőnek a kombinálása szinte lehetetlen, mivel paradox módon a nagyobb effektív normálfeszültség a nagyobb nyírási szilárdság ellenére kevésbé stabil lehet, mint az alacsonyabb feszültségértékű értéknél (lásd 5-32. táblázat).
- Az SRF érték az alagút mélységbeli helyzetéből és a környezeti feszültség viszonyoktól függő tényező. Értéke mérhető 1) a szabad teher a fejtésen keresztül a nyírási zónákban 2) a feszültsége az adott kőzetnek és 3) az összenyomódási terhe a képlékeny nem szabad kőzeteknek. Ezt az értéket, mint egy összes feszültség paramétert kell figyelembe venni. Ezeket az értékeket az 5-33. táblázat tartalmazza.

5-32. táblázat. A repedés-víz redukción tényező

Repedés-víz redukción tényező	J_w
Száraz üreg vagy max. 5 l/perc vízszivárgás esetén	1,0
Mérsékelt vízbeáramlásnál, amely esetenként kimossa a kitöltő anyagot	0,66
Nagy mennyiségű vízfolyás, nagy nyomáson (0,25-1,0 MPa), amely nem zárt repedéseken vagy a réskitöltés kimosásával áll elő	0,5-0,33
Nem csökkenő, nagy mennyiségű vízfolyás, nagy nyomáson (1,0 MPa)	0,2-0,05

5-33. táblázat. A feszültségi redukción tényező (SRF) értékei.

Feszültségi redukción tényező ^a	SRF
Gyengült zóna, agyagos v. kémiailag bontott kőzetekben (bármely mélységben)	10,0
Egyetlen gyengült zóna esetén, mely agyagot és kémiailag bontott kőzetet tartalmaz (mélység < 50 m)	5,0
Egyetlen gyengült zóna esetén, mely agyagot és kémiailag bontott kőzetet tartalmaz (mélység > 50 m)	2,5
Vetős zóna többszöri előfordulás esetén, szilárd kőzetekben (bármely mélységben)	7,5
Egyetlen gyengült agyagmentes zóna esetén (mélység < 50 m)	5,0
Egyetlen gyengült agyagmentes zóna esetén (mélység > 50 m)	2,5
Nyitott és erősen töredezett kőzet esetén (bármely mélységnél)	5,0

^a:A felsorolt értékek 25-50 %-kal csökkentendők, ha a gyengült zóna nem esik az üreg szelvényébe, hanem csak hatással van az üreg állékonyságára.

FESZÜLTSEGI REDUKCIÓS TÉNYEZŐ ^b			SRF
Szilárd kőzetben kihajtott üreg esetén			
	σ_c/σ_1	σ_t^*/σ_1	
Alacsony feszültségek, felszínközeli mélység	> 200	> 13	2,5
Közepes feszültség	200-10	13-0,66	1,0
Nagy feszültség, tömör szerkezetű kőzet	10-5	0,66-0,33	0,5-2
Közepes kőzetnyomás (szilárd kőzet)	5-2,5	0,33-0,16	5-10
Nagy kőzetnyomás (szilárd kőzet)	< 2,5	< 0,16	10-20
Képlékeny kőzetben való kihajtás esetén			
Közepes kőzetnyomás esetén			5-10
Nagy kőzetnyomás esetén			10-20

^b: Ahol σ_c , σ_t és σ_v a kőzet nyomó- és húzószilárdsága, valamint az üregnyitás előtt a kőzettestben lévő függőleges feszültség.

5.6.4 Súlyozott Q-érték meghatározása

A Q tényező meghatározásánál törekedni kell arra, hogy „-tól -ig” határon belül állapítsuk meg az értékeket. Az így meghatározott bemenő adatok súlyozott figyelembe vételével lehet a Q tényezőt számítani. A számítási módot Barton (1993) alapján mutatjuk be; hogy vehetjük figyelembe a Q tényező súlyozott értékének kiszámításánál a mért minimális, maximális, illetve jellemző értéket. Ezeket az alábbi súllyal kell számolni:

<i>Legrosszabb érték:</i>	10 %
<i>Általános érték:</i>	60 %
<i>Maximális érték:</i>	30 %

Az 5-34. táblázatban a súlyozott Q érték kiszámításának módját mutatjuk be egy példán keresztül.

5-34. táblázat. Példa a súlyozott Q érték meghatározására

Q érték	Legrosszabb (10 %)	Általános (60 %)	Maximális (30 %)	Súlyozott érték
RQD	25	65	85	67
Jn	12	9	-	9,42
Jr	1,5	3	4	2,05
Ja	4	2	1	1,9
Jw	0,66	1	1	0,966
SRF	7,5	5	2,5	4,5

5.6.5 Q tényező meghatározása geofizikai méréssel

Barton (1991) több mint 2 000 mérési eredmény alapján állította fel azt az összefüggését, mely a geofizikai módszerekkel mért longitudinális (P) hullám sebesség és a Q tényező közötti kapcsolatot adja meg:

$$Q = 10^{(V_p - 3500)/1000} \quad (5.28.)$$

ahol V_p a P-hullám sebessége m/sec-ban.

Ennek az összefüggésnek az a nagy előnye, hogy geofizikai mérés segítségével a teljes földtani szelvény Q értékét meg lehet határozni, ezáltal a várható biztosítási módokat meg lehet tervezni, ami a várható költségek becsléséhez jelentős segítséget adhat. Az 5-35. táblázatban a mért V_p hullámsebesség és a Q érték közötti kapcsolatot mutatjuk be.

5-35. táblázat. A mért P-hullám sebessége és a várható Q tényező közötti kapcsolat

V_p [m/s]	500	1500	2500	3500	4500	5500	6500
Q	0,001	0,01	0,1	1	10	100	1 000

5.6.6 Osztályozás Q-tényező alapján

A Q tényező alapján történő osztályba sorolás lehetőségét az 5-36. táblázatban mutatjuk be. A kapott Q érték ismeretében lehetőség nyílik annak meghatározására, hogy mekkora átmérőjű, illetve magasságú üreget lehet kinyitni. Ehhez bevezették az *egyenértékű dimenziót* (D_e), mely a megnyitás dimenziója és a fejtés alatti megtámasztás minőségének (Excavation Support Ratio – ESR) a hányadosa, azaz:

$$D_e = \frac{\text{Fejtési hossz, átmérő vagy magasság (m)}}{\text{Megtámasztási érték (ESR)}} \quad (5.29.)$$

5-36. táblázat. Közvettest osztályozása Q érték alapján

Osztály	érték	Leírás
I	0,001 – 0,01	különlegesen gyenge
II	0,01 – 0,04	rendkívül gyenge
III	0,04 – 0,4	nagyon gyenge
IV	0,4 – 4	gyenge
V	4 – 10	közepes
VI	10 – 40	jó
VII	40 – 100	nagyon jó
VIII	100 – 400	rendkívül jó
IX	400 – 1000	különlegesen jó

A fejtés alatti megtámasztási érték természetesen függ a megkívánt biztonságtól is. Az ez alapján ajánlott ESR értékeket mutatja be az 5-37. táblázat Barton *et al.* (1974) alapján. Abban az esetben, ha az alagút szélessége B (méterben), a biztosítás nélkül fejthető hossz (l – méter) az alábbi alapján számolható ki:

$$l = (2 + 0,15 B)/\text{ESR} \quad (5.30.)$$

Az ajánlott megtámasztási módokat az 5-9. ábrán mutatjuk be Grimstad és Barton (1993) alapján.

A maximális megtámasztás nélküli ívnyílás kiszámítása az alábbi képlet alapján lehetséges:

$$\text{Maximális ívnyílás} = 2 (\text{ESR}) Q^{0,4} \quad (5.31.)$$

A Q érték alapján a főtére ható állandó nyomás is meghatározható:

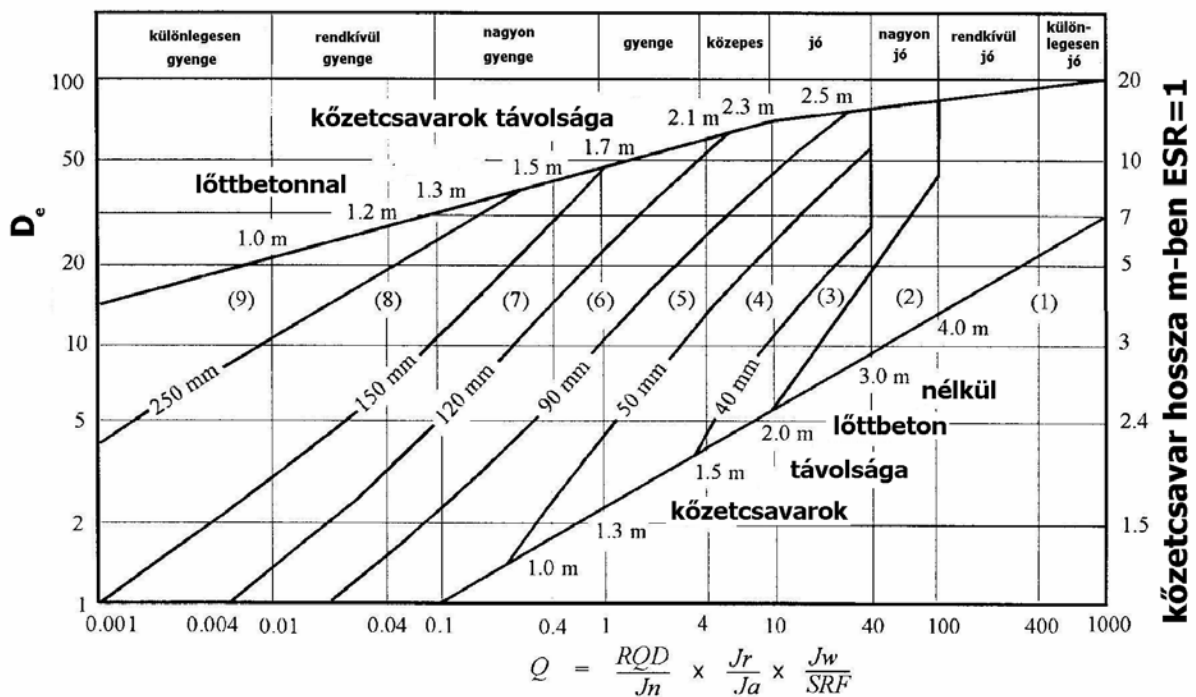
$$P = \frac{2,0}{J_r} Q^{-1/3} \quad (5.32.)$$

Amennyiben a tagoltsági rendszerek száma háromnál kevesebb, a következő egyenlet használata ajánlott:

$$P = \frac{2}{3} J_n^{1/2} J_r^{-1} Q^{-1/3} \quad (5.33.)$$

5-37. táblázat. Megtámasztási érték (ESR) felvétele a biztonság alapján Q módszerrel

FEJTÉSI MÓD	ESR
Időleges bányászati megnyitás	3-5
Állandó bányamegnyitás, vizeztető alagút vízerőműhöz (ide tartozik a nagynyomású csatornák is), tárók, vágatok és aknák nagy fejtésekhez.	1,6
Raktárhelyiségek, másodrendű közúti és vasúti alagutak, bevezető-utak, gépészeti alagutak.	1,3
Erőművek, főbb közúti és vasúti alagutak, polgári védelmi, útcsatlakozások.	1,0
Föld alatti nukleáris erőművek, vasútállomások, sport és tömegrendezvények helyei.	0,8



5-9. ábra. Az ajánlott megtámasztási kategóriák Q érték ismeretében (Grimstad & Barton, 1993)

(1): biztosítás nélküli, (2): helyenkénti kőzetcsavar; (3): szisztematikus kőzetcsavar; (4): szisztematikus kőzetcsavar 40-100 mm vastag vasatlan löttbetonnal; (5): szálerősítésű löttbeton (50-90 mm vastag) és kőzetcsavar; (6): szálerősítésű löttbeton (90-120 mm vastag) és kőzetcsavar; (7): szálerősítésű löttbeton (120-150 mm vastag) és kőzetcsavarral; (8): szálerősítésű löttbeton (> 150 mm) acélhálóval és kőzetcsavarral; (9): előregyártott betonelemmel megtámasztva

5.6.7 Alakváltozási modulus meghatározása Q tényező ismeretében

Abban az esetben, ha $Q > 1$, összefüggés írható fel az alakváltozási modulus és a Q tényező között:

$$E_m = a \log Q \quad [\text{GPa}] \quad (5.34.)$$

ahol az a tényező értéke a különböző alagutaknál végzett mérések alapján minimálisan 10, maximálisan 40, és átlagosan 25 (Barton *et al*, 1992).

Indiai alagutak vizsgálatánál Singh arra az eredményre jutott, hogy ha az alagutat 50 méternél mélyebben vezetik, az alábbi összefüggés áll fenn:

$$E_m = H^{0,2} Q^{0,36} \quad [\text{GPa}] \quad (5.35.)$$

ahol H az alagút feletti takarás méterben.

Az egyenlet alapján az alakváltozási modulus értéke kis szilárdságú kőzeteknél nyomásfüggő. Felszíni nagylétesítményeknél (gátak, épületek, stb. esetén) ezért megvizsgálták, a kőzettest (E_m) és a kőzettömb (E) rugalmassági modulusa közötti kapcsolatot is:

$$E_m = 1,5 Q^{0,6} E^{0,14} \quad [\text{GPa}] \quad (5.36.)$$

A vizsgálati eredmények alapján ez a képlet mind száraz, mind vízzel telített kőzettestre igaz.



5.7 Geológiai Szilárdsági Index (GSI) és a Hoek-Brown törési határállapot

5.7.1 A Geológiai Szilárdsági Index (GSI)

A Geológiai Szilárdsági Indexet (Geological Strength Index – GSI) Hoek (1994), illetve Hoek *et al.* (1995) vezették be azzal a céllal, hogy a különböző geológiai állapotban lévő kőzettesteket leírassák (magyarul: Vásárhelyi, 2001). Ezen érték bevezetését az indokolta, hogy rossz minőségű kőzetek leírására az eddigi módszerek nem voltak megfelelőek – az RMR érték a gyakorlat alapján 30 alatt nem adott jó eredményt, illetve a kis tartományban meghatározása nagyon nehéz volt. Mind az RMR, mind a Q tényezőnél az RQD érték bemenő adatként szerepel, ami azt eredményezi, hogy nagyon töredezett kőzettest esetén 0-t kell felvenni, míg a helyszíni tapasztalatok alapján jóval jobb szilárdsági tulajdonsággal rendelkeztek. Ismeretes, hogy a tagolt kőzettest szilárdsága függ az ép kőzet anyagtulajdonságaitól, továbbá a kőzettömbök szabadsági fokától (azaz csúszási és elfordulási lehetőségétől). Ezt a szabadsági fokot befolyásolja mind a kőzettömb geometriai alakja, mind a határoló tagoló felületek minősége, azaz egy tiszta, érdes tagoló felületekkel rendelkező kőzettest jóval nagyobb szilárdsággal rendelkezik, mint amelynek mállottak és töredezték a határoló tagoló felületei.

Ebből kiindulva szerkesztették meg az 5-10. ábrát, ahol a mátrix oszlopában a kőzettest tagoltsági viszonyai szerepelnek, azaz az, 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 ugyanaz. Az osztályozásban sem a talajvizet, sem a helyszíni feszültségviszonyokat nem veszik figyelembe, mivel azok külön bemenő adatként szerepelnek a számítási modellekben. Heterogén kőzettest esetén (pl. flis) a GSI értéke az 5-11 ábra alapján határozható meg.

A GSI értéke megalkotásakor megegyezett az 1976-ban bevezetett RMR értékkel, amennyiben az 18-nál nagyobb:

$$GSI = RMR_{1976} \quad (5.37.)$$

Az érték számításánál természetesen nem szabad figyelembe venni az irányítottságot (0 pont), valamint teljesen száraz állapotot kell feltételezni (10 pont). Könyvünkben Bieniawski 1989-es, legutolsó, legjobban elterjedt változatát ismertetjük.

RMR₁₉₈₉ > 23 esetén:

$$GSI = RMR_{1989} - 5 \quad (5.38.)$$

23-nál kisebb RMR értéknél a két osztályozási rendszer nem feleltethető meg egymással. Ebben az esetben a módosított Q tényező használatát ajánlják (Hoek *et al.*, 1995).

A módosított Q-tényezőt (jele: Q') a feszültségi értékek – azaz a talajvíz és a feszültség-redukciós tényező – figyelmen kívül hagyásával lehet meghatározni:

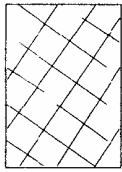
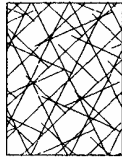
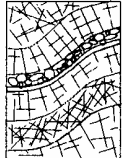
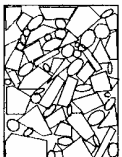
$$Q' = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \quad (5.39.)$$

A betűjelek magyarázatát jelölést lásd a 5.27. egyenletnél. Átszámításra Bieniawski (1989) RMR-re vonatkozó képletét ajánlja:



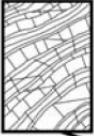


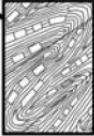
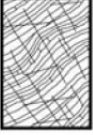

$$GSI = 9 \ln Q' + 44$$

(5.40.)

Q' legkisebb értéke 0,0208 lehet, mely GSI = 9-nek felel meg. Ez vastag, agyaggal kitöltött nyírási vagy vetőzónának felel meg.

<p style="text-align: center;">GEOLOGIAI SZILÁRDSÁGI INDEX (GSI)</p> <p style="text-align: center;">SZERKEZET</p>		<p style="text-align: center;">TAGOLÓFELÜLET ÁLLAPOTA</p> <p style="text-align: center;">NAGYON JÓ, Nagyon érdes és üde felülettel, JÓ, Érdes kissé mállott vagy vasfoltos felülettel. TÜRHETŐ, Sima és/vagy mérsékelten mállott és átalakult felülettel. GYENGE, Símára kopott v. erősen mállott felületek v. szögletes törmelékekkel kitöltött réteg NAGYON GYENGE, Sovány agyaggal kitöltött símára kopott és erősen mállott felületek</p> <p style="text-align: center;">CSÖKKENŐ FELÜLETI MINŐSÉG ▾</p>				
 <p>BLOKKOS - nagyon jól összekapcsolódó ép kőzettest, mely kocka-tömböket tartalmaz melyeket 3 orthogonális diszkontinuitás szabdal</p>	<p style="text-align: center;">80</p> <p style="text-align: center;">70</p>	<p style="text-align: center;">60</p> <p style="text-align: center;">50</p>	<p style="text-align: center;">40</p>	<p style="text-align: center;">30</p>	<p style="text-align: center;">20</p> <p style="text-align: center;">10</p>	
 <p>NAGYON BLOKKOS - összekapcsolódó, részlegesen töredezett kőzettest, melyet 4 vagy annál több diszkontinuitás szabdalja</p>	<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">A KŐZETTÖMBÖK KAPCSOLATÁNAK CSÖKKENÉSE ▾</p>	<p style="text-align: center;">30</p>	<p style="text-align: center;">20</p> <p style="text-align: center;">10</p>			
 <p>BLOKKOS/TÖREDEZETT - töredezett és/vagy gyűrt szögletes kőzettömbökből álló kőzettest, melyet számos diszkontinuitás szabdal</p>		<p style="text-align: center;">20</p> <p style="text-align: center;">10</p>				
 <p>SZÉTESŐ - rosszul összekapcsolódó, erősen töredezett kőzettest, mely érdes és kopott törmelékekből áll</p>						

5-10. ábra. A Geológiai Szilárdsági Index (GSI) meghatározása és értékei

GSI meghatározása heterogén kőzetest esetén a nyilak a fő tektonikai hatásra bekövetkező alakváltozást jelölik		TAGOLTSÁGI FELÜLET ÁLLAPOTA	NAGYON JÓ, nagyon érdes és tude felülettel	JÓ, érdes, kissé mállott felülettel	TÜRHETŐ sima, mérsékelten mállott és átalakult felülettel	GYENGE nagyon sima, helyileg csiszos felületek törmelékekkel kitöltve	NAGYON GYENGE, nagyon sima vagy nagyon mállott felület puha agyaggal kitöltve
ÖSSZETÉTEL ÉS SZERKEZET							
	A. Vastagon települt, nagyon tömbös homokkő.		70	60	A		
	B. Homokkő vékony iszapkő rétegekkel			50	B	C	D
	D. Iszapkő vagy iszap-pala homokkő rétegekkel			40			E
C, D, E és G - többékevésbe az ábrának megfelelően gyűrtek. A tektonikai deformáció hatására töredezik és folytonossága megszakad - lásd F. és H.				30			F
	G. Zavartalan iszap- v. agyag-pala esetlegesen kevés nagyon vékony homokkő rétegekkel			20			G
				10			H

5-11. ábra: Geológiai Szilárdsági Index (GSI) heterogén kőzetest esetén – példa filisre (Marinos & Hoek, 2000)

5.7.2 Hoek-Brown törési kritérium

Hoek és Brown 1980-ban vezetett be empirikus úton kiszámolt törési határfeltételt rideg kőzetekre, melyeket napjainkban már átmeneti kőzetekre (puha kőzetekre – kemény talajokra) is használnak. Az egyenlet általános alakban az alábbi:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s \right)^a \quad (5.41.)$$

ahol σ_1 , σ_3 és σ_c a maximális és a minimális fő feszültség a törési állapotban és a kőzettömbnek az egyirányú nyomószilárdsága, m_b a kőzetest Hoek-Brown állandója, s és a a kőzetest feltöredezettségétől függő állandók. Az (5.41.) egyenlet két esetben használható:

- ép kőzeteknél (azaz kőzettömböknél); valamint
- jelentősen tagolt kőzetestnél (ekkor a vizsgált kőzetesten belül a tagoló felületek száma minimálisan 3).

Kőzettömb esetén az (5.41.) képlet a következő egyszerűbb alakban írható le:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \left(m_{\acute{e}p} \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + 1 \right)^{0,5} \quad (4.42.)$$

A fenti összefüggésből következik, hogy a törés állapotában fellépő főfeszültségek közötti összefüggés az egyirányú nyomószilárdságtól (σ_c) és a Hoek-Brown állandótól ($m_{\acute{e}p}$) függ.

Az ép kőzet Hoek-Brown állandójának meghatározása triaxiális kísérletekkel történik. Hoek és Brown (1980) a következő összefüggést adja az egyirányú nyomószilárdság (σ_c) függvényében az általuk bevezetett állandók és a főfeszültségek (σ_1 ; σ_3) között:

$$(\sigma_3 - \sigma_1)/2 = m \sigma_c \sigma_3 + \sigma_c, \quad (5.43.)$$

Az m állandót különböző környezeti nyomáson végzett vizsgálatokkal lehet pontosan meghatározni.

Az 5-38. táblázat a gyakran előforduló fontosabb kőzetek Hoek-Brown állandóját ($m_{\acute{e}p}$) adja meg. Ezek az értékek nagyban függenek a kőzet mállottsági viszonyától is: ugyan annak a kőzetnek üde állapotban Hoek-Brown állandója akár kétszerese is lehet, mint mállott állapotban. Természetesen e táblázatok adatai nem pótolják a laboratóriumi vizsgálatokat, melyekkel a fenti állandók pontosabban meghatározhatók.

A Geológiai Szilárdsági Index (GSI) ismeretében lehetőség van az ép kőzetre meghatározott Hoek-Brown állandó ($m_{\acute{e}p}$) átszámítására a kőzetestre (m_b). Az átszámolást a Q tényező ismeretében is megadjuk:

$$m_b = m_{\acute{e}p} \exp\left(\frac{GSI - 100}{28}\right) = 0,135 m_{\acute{e}p} (Q)^{1/3} \quad (5.44.)$$

Jó minőségű kőzetest esetén, ha $GSI > 25$:

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9}\right) = 0,002 Q \quad (5.45.)$$

$$a = 0,5 \quad (5.46.)$$

Nagyon rossz minőségű kőzetest esetén ($GSI < 25$):

$$s = 0 \quad (5.47.)$$

$$a = 0,65 - GSI/200 \quad (5.48.)$$

Különböző minőségű és típusú kőzetestek RMR és Q tényezőinek ismeretében felvehető m és s Hoek-Brown állandóit az 5-39. táblázatban mutatjuk be. A megadott Hoek-Brown képlet segítségével lehetőség van adott kőzetben a kőzetosztály és az egyirányú nyomószilárdság ismeretében a főfeszültségi állapot leírására.

Abban az esetben, ha a jövesztés hatását is figyelembe akarjuk venni, akkor a fejtés, illetve robbantás hatására bekövetkező kőzetest károsodás mértékét is meg kell becsülni. Bevezették a D értéket, amely az úgynevezett „károsodást” mutatja. Értéke 0 és 1 között vehető fel:

$D = 0$: semmilyen károsodás nem történt,

$D = 1$: nagy mértékű a károsodás.

A D érték felvételére néhány példát mutatunk be az 5-40. táblázat, amely Hoek *et al.* (2002) által megadott ajánlásait tartalmazza (magyarul megjelent: Vásárhelyi, 2003a). A károsodás mértékét is figyelembe véve a (4.29.) és (4.30.) egyenleteket az alábbi formában kell használni:

$$m_b = m_{ép} \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right) \quad (5.49.)$$

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right) \quad (5.50.)$$

5-38. táblázat. Jelentősebb kőzetek $m_{ép}$ Hoek-Brown anyagállandói

Üledékes kőzetek	$m_{ép}$	Magmás kőzetek	$m_{ép}$	Átalakult kőzetek	$m_{ép}$
Agyagkő	3,4	andezit	18,9	amfibolit	31,2
Anhidrit	13,2	bazalt	17	amfibolitos gneisz	31
Szén	8-21	dácit	17	csillámpala	4-8
Breccsa	20	diabáz	15,2	kvarcit	23,7
Dolomit	10,1	diorit	27	talk pala	10
Gipszkő	16	gabbró	25,8	fillit	13
Grauwacke	18	gránit	32,7	gneisz	29-31
Homokkő	19	granodiorit	20	márvány	9,3
Iszapkő	9,6	monzonit	30	milonit	6
Konglomerátum	22	norit	21,7	mika pala	15
Krétakő	7,2	obszidián	19	zöldpala	20
Mészkő (mikrites)	8,4	riolit	20		
Mészkő (pátitos)	10	szienit	30		
		tufa	15		

5.7.3 Mohr-Coulomb paraméterek meghatározása

Jól ismert, hogy a Mohr-Coulomb törési határfeltételt kőzettestek esetén a következő alakban lehet felírni:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_c^M + A \sigma_3 \quad (5.51.)$$

ahol σ_c^M a kőzettest egyirányú nyomószilárdsága, σ_1 és σ_3 pedig a maximális és minimális effektív főfeszültségek. Az A tényező a belső súrlódási szög (ϕ) ismeretében számítható ki:

$$A = 2 \sin\phi(1 - \sin\phi) \quad (5.52.)$$

A kőzettest egyirányú nyomószilárdsága a kohézió (c) és a belső súrlódási szög (ϕ) ismeretében:

$$\sigma_c^M = 2c \cos\phi / (1 - \sin\phi) \quad (4.53.)$$

A Hoek-Brown és a Mohr-Coulomb törési határgörbe közötti különbséget jól mutatja az 5-12. ábra. A legtöbb esetben a számítógépes modellezésnél szükség van a kohézió (c) és a belső súrlódási szög (ϕ) ismeretére. Ezek meghatározásának módját mutatja be az 5-13. ábra. Geológiai Szilárdsági Index (GSI) és az ép kőzet m Hoek-Brown állandójának ismeretében grafikus úton lehetőség van ezek meghatározására.

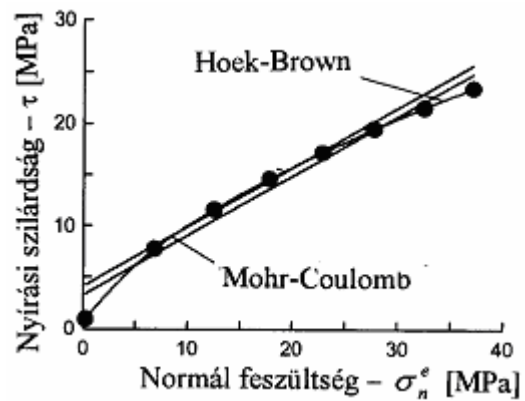
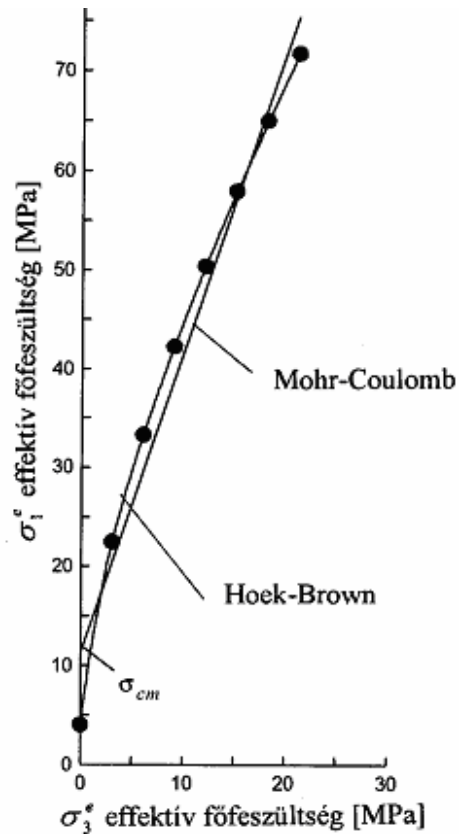
5-39. táblázat. RMR és Q tényezők ismeretében felvehető m és s Hoek-Brown állandók különböző típusú kőzeteknél

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sqrt{m \sigma_c \sigma_3' + s \sigma_c^2}$$

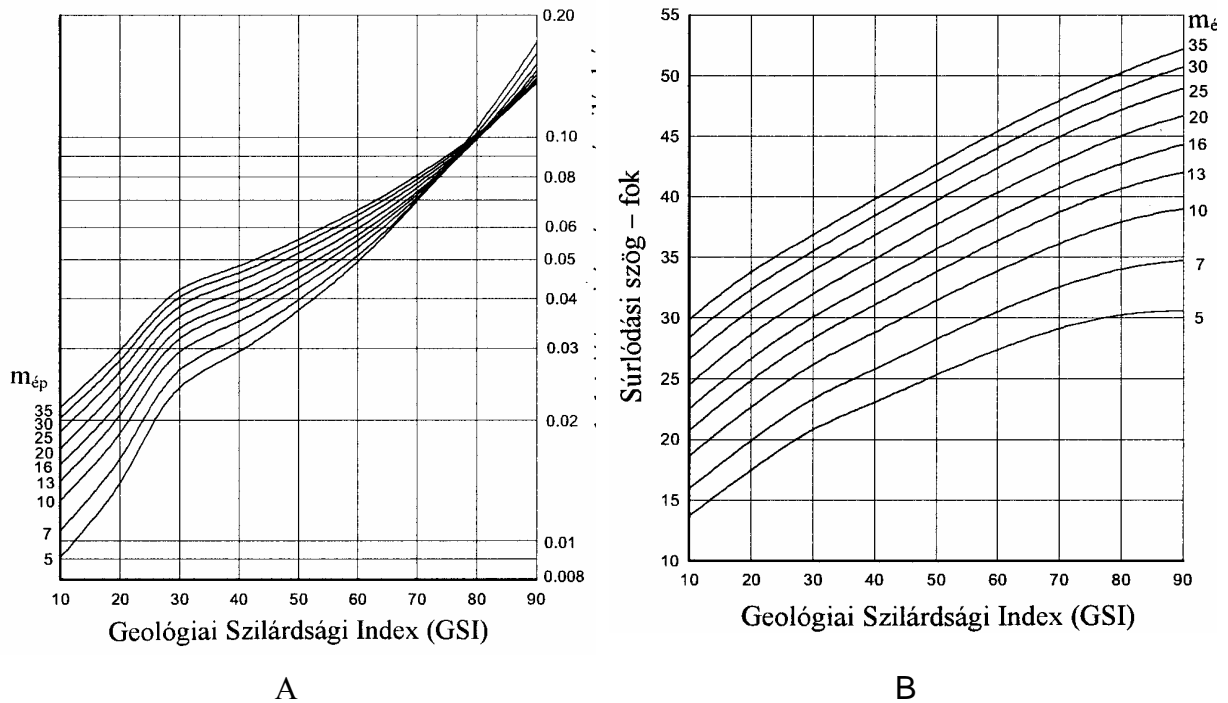
			KARBONÁTOS KŐZETEK JÓL KIFEJLETT KRISTÁLYOKKAL (dolomit, mészkő, márvány)	AGYAGTARTALMÚ KŐZETEK (agyagkő, iszapkő, agyagpala)	HOMOKTARTALMÚ KŐZETEK ERŐS KRISTÁLYOKKAL (homokkő, kvarcit)	PORFÍROS SZÖVETŰ KIÖMLÉSI KŐZETEK (andezit, dolerit, diabáz, riolit)	MÉLYSÉGI MAGMÁS ÉS ÁTALAKULT KRISTÁLYOS KŐZETEK (amfibolit, gabbró, gneisz, gránit, norit)
<i>Kőzettömb</i>	RMR = 100	m	7	10	15	17	25
	Q = 500	s	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
<i>Nagyon jó minőségű kőzettest</i>	RMR = 85	m	2,40	3,43	5,14	5,82	8,56
	Q = 100	s	0,082	0,082	0,082	0,082	0,082
<i>Jó minőségű kőzettest</i>	RMR = 65	m	0,575	0,821	1,231	1,395	2,052
	Q = 10	s	0,00293	0,00293	0,00293	0,00293	0,00293
<i>Elégséges minőségű kőzettest</i>	RMR = 44	m	0,128	0,183	0,275	0,311	0,458
	Q = 1	s	0,00009	0,00009	0,00009	0,00009	0,00009
<i>Rossz minőségű kőzettest</i>	RMR = 23	m	0,029	0,041	0,061	0,069	0,102
	Q = 0,1	s	0,000003	0,000003	0,000003	0,000003	0,000003
<i>Nagyon rossz minőségű kőzettest</i>	RMR = 3	m	0,007	0,010	0,015	0,017	0,025
	Q = 0,01	s	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001

5-40. táblázat. A kőzettest plusz töredezettségének (károsodásának) változása fejtés-robbantás hatására (Hoek *et al.* 2002 alapján)

A kőzettest megjelenése	A kőzettest jellemző leírása	Ajánlott D érték
	<p>Nagyon jó minőségű kontrollált robbantás vagy alagútfúró géppel (TBM) történő fúrás eredményeként az alagút körüli kőzettest minimális károsodása</p>	<p>$D = 0$</p>
	<p>Rossz minőségű kőzettestben (nincs robbantás) gépi vagy kézi fejtés eredményeként a környező kőzettest minimális károsodása</p> <p>Duzzadás esetén, amikor a talp karakteresen megemelkedik, károsodás jelentkezhet, hacsak időleges megtámasztást nem alkalmazunk</p>	<p>$D = 0$</p> <p>$D = 0,5$ Nincs alsó megtámasztás</p>
	<p>Kemény kőzetben nagyon rossz minőségű robbantás számos lokális károsodást okozhat, mely akár 2-3 m mélységű is lehet a környező kőzettestben</p>	<p>$D = 0,8$</p>
	<p>Sziklarézsú robbantása: a kép bal oldalán jól koordinált, míg a jobb oldalán rosszul kontrollált robbantás eredménye látható</p>	<p>$D = 0,7$ Jó minőségű robbantás</p> <p>$D = 1,0$ Rossz minőségű robbantás</p>
	<p>Nagy nyíltzíni bányáknál robbantásos fejtés hatására bekövetkező károsodás, melynél a fejtés következtében bekövetkezett terhelés-csökkenést is figyelembe kell venni.</p> <p>Néhány puhább kőzet esetén, hasítással történő fejtés esetén a károsodás mértéke csökkenthető</p>	<p>$D = 1,0$ Robbantásos fejtés esetén</p> <p>$D = 0,7$ Mechanikai fejtés esetén</p>



5-12. ábra. Ugyanazon ép kőzet Hoek-Brown és Mohr-Coulomb határgörbéi a mérési eredményekkel (Hoek, 2002)



5-13. ábra. A: Az ép kőzet kohéziója valamint a kőzettest egyirányú nyomószilárdsága közötti kapcsolata a GSI és $m_{ép}$ ismeretében és B: Súrlódási szög különböző GSI és $m_{ép}$ ismertében (Hoek & Brown, 1997)

5.7.4 Alakváltozási modulus meghatározása GSI ismeretében

A helyszíni (*in situ*) alakváltozási modulus kiszámításának lehetőségét Serafim és Pereira (1983) határozták meg, amint azt az 5.2.5. fejezetben részletesen bemutattuk. Ezt a kapcsolatot számos elkészült műtárgy vizsgálati tapasztalatai alapján állították fel, és jó minőségű kőzetek esetén jól használható, viszont rosszabb kőzetminőség esetén a valóságosnál jóval nagyobb alakváltozási modulus-értéket számíthatunk ki. Ezért az általuk javasolt egyenlet az alakváltozási modulus meghatározására 100 MPa-nál kisebb nyomószilárdság esetén a következő:

$$E_m = \sqrt{\frac{\sigma_c}{100}} 10^{((GSI - 10)/40)} \quad (5.54.)$$

Robbantás után, a károsodás mértékének ismeretében ez a képlet az alábbi alakban írható fel:

$$E_m = \left(1 - \frac{D}{2}\right) \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} 10^{((GSI - 10)/40)} \quad (5.55.)$$

Ezen egyenletek csak 100 MPa nyomószilárdság (σ_c) alatt alkalmazhatók. Legújabb kutatásaik eredményeként, Hoek és Diederchs (2005) kínai és tajvani alagútépítések tapasztalatai alapján a geológiai szilárdsági index (GSI) és a károsodás mértékének (D) ismeretében a kőzettest alakváltozási modulusát (E_m), az alábbi formában javasolják felvenni:

$$E_m = 100 \left(\frac{1 - D/2}{1 + e^{(75 + 25D - GSI)/11}} \right) \text{ [GPa]} \quad (5.56.)$$

illetve abban az esetben, ha a kőzettömb alakváltozási modulusa (E) is ismert:

$$E_m = E \left(0,02 + \frac{1 - D/2}{1 + e^{(60 + 15D - GSI)/11}} \right) \text{ [GPa]} \quad (5.57)$$

5.8 Az RMI (Rock Mass index) tényező

Palmström 1995-ben vezette be az ún. kőzettest index (Rock Mass index – RMI) fogalmát, amelynek segítségével kőzettest egyirányú nyomószilárdságának meghatározására, és ezáltal annak osztályba sorolására van lehetőség (lásd: Vásárhelyi, 2005). Bár maga a módszer nem tartozik a szorosan vett kőzettest-osztályozások közé (mint pl. az RMR vagy Q-módszer), ennek ellenére a kőzettest leírására, jellemzésére is jól használható. Főleg bemenő adatként használható jól az eddigi módszerekhez (RMR, Q módszer), valamint numerikus modellezésnél a kőzettest nyomószilárdságának megadására alkalmazható.

Palmström, Hansági (1964, 1986) abból a megfigyeléséből indult ki, hogy a kőzettömb (kőzetblokk) szilárdságát a kőzettest tagoltságát (méretét, állapotát) figyelembe véve kell redukálni (lásd bővebben a 3.6.5 fejezetet). A kőzettest index (RMI) értékét a fentiekből adódóan a következőképpen ajánlja meghatározni:

$$RMI = J_p \sigma_c \quad (5.58.)$$

ahol J_p a tagoltsági paraméter, mely 4 fő tényezőből tevődik össze:

- a kőzetblokk térfogata (vagy a tagoltságok sűrűsége),
- a tagoltság érdessége
- tagoltság mállottsága,
- valamint a tagoltság méretei.

Ez a redukációs tényező reprezentálja a tagoltság hatását a kőzettestre. J_p értéke 0 (töredezett kőzettest) és 1 (ép kőzet) között változik; σ_c a kőzettömb (kőzetblokk) egyirányú nyomószilárdsága (MPa-ban), és RMI az ún. „kőzettest index”, mely a kőzettest egyirányú szilárdsága (MPa-ban).

5.8.1 Az RMI-nél használatos paraméterek

Palmström (1995) figyelembe vette Hoek *et al.* (1992) azon véleményét, mely szerint a kőzettest szilárdságát befolyásolja a kőzetblokkok alakja, mérete, valamint tagoló felületek állapota – azaz a szilárdsági tulajdonságok meghatározásához ezeket a tényezőket kell megmérni és hatásukat megvizsgálni. Ez nem jelenti azt, hogy az ép kőzet anyagának a tulajdonságát figyelmen kívül lehetne hagyni a kőzettest osztályozásánál – sőt, éppen hogy számos esetben az ép kőzet szilárdsága karakterisztikusabban befolyásolja a kőzettestét, mint a tagoló felületek. A kőzet anyaga szintén nagyon fontos abban az esetben, ha a tagoltságok nem folytonosak, ugyanis a folytonosság jelentős hatással van a tagoló felületek kialakulására, esetleges terjedésére, illetve összekapcsolódására.

A mérnökgeológiai leírások a tervező számára sokszor csak a geológiai, kőzettani adatokat tartalmazzák, ugyanakkor a kőzettest tulajdonságát a legtöbb esetben a tagoltságok minősítik. Ebből született az a gondolat, hogy a kőzettestek tulajdonságának egy mélyebbre ható ismerete szükséges, továbbá a formációk és a tagoltságok kialakulásának a hatását is figyelembe kell venni. Ebből a gondolatmenetből kiindulva, Palmström (1995) számos alagútépítés tapasztalatait elemezte és az alábbi bemenő adatokat adja meg az RMI meghatározásához:

- (1) a tagoltságok által körbefogott kőzettömbök méreteit kőzettömb-térfogattal értelmezve (jele: V_b);
- (2) a kőzettömb anyagának szilárdsága, egyirányú nyomószilárdsággal meghatározva, (σ_c);

- (3) a közettömbök felületének nyírási szilárdsága – a tagoltság felületének érdességének és mállottságának ismeretében megadva (jelük: jR és jA, értékük az 5-41. táblázat és az 5-43. táblázat alapján);
- (4) a tagoltságok méretei és határai – megadva azok hosszúsága és folytonossága (jele: jL, értékét az 5-42. táblázat tartalmazza).

5-41. táblázat. A tagolófelület érdességének (jR) mérőszáma

Kis léptékben a tagoltsági felület érdessége*	Nagy léptékben a tagoltsági 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
Sima	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.

5-42. táblázat. A tagoltság hosszának és folytonosságának a mérőszáma (jL)

Tagoltság hossza (m)	Meghatározása	Típusa	jL	
			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 közettestben van

5-43. 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	Nincs burkolat vagy kitöltés a tagoltsági felületen, a szennyeződések kivételével	1
Üde kőzetfalak		
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

5-43. táblázat. (folytatás)

B. Részlegesen kitöltött vagy nincs kapcsolat a felületek között

A kitöltő anyag típusa	Leírás	Részleges fal- érintkezés (vékony kitöltés < 5 mm)	Nincs fal érintkezés (vékony kiöltöttség 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

5.8.2 Az R_{Mi} meghatározása

Az ép közet egyirányú nyomószilárdságának vizsgálata laboratóriumi körülmények között jól ismert, szabványosított eljárás, ezért ennek bemutatásától eltekintünk. A redukációs tényező, az ún. tagoltsági paraméter (J_p) a következő tényezőkből épül fel:

- a közettömb térfogata (V_b), melyet helyszíni méréssel határozhatunk meg;
- valamint a tagoltság állapotát leíró tényezőből (j_C), mely három független paramétert tartalmaz: érdesség, mállottság és méret.

Számos helyszíni vizsgálat és nagymintákon végzett kísérlet alapján határozták meg azt, hogy milyen módon van kapcsolatban a tagoltságot leíró tényező (j_C) és a közettömb térfogata (V_b) a tagoltsági paraméterrel (J_p). A kapott eredmények alapján készült el az 5-14. ábra, melyen J_p értékének grafikus meghatározását mutatjuk be a V_b és a j_C ismeretében. Analitikus alakban az alábbi képlettel lehet számolni:

$$J_p = 0,2 \sqrt{j_C} (V_b)^D \quad (5.59.)$$

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

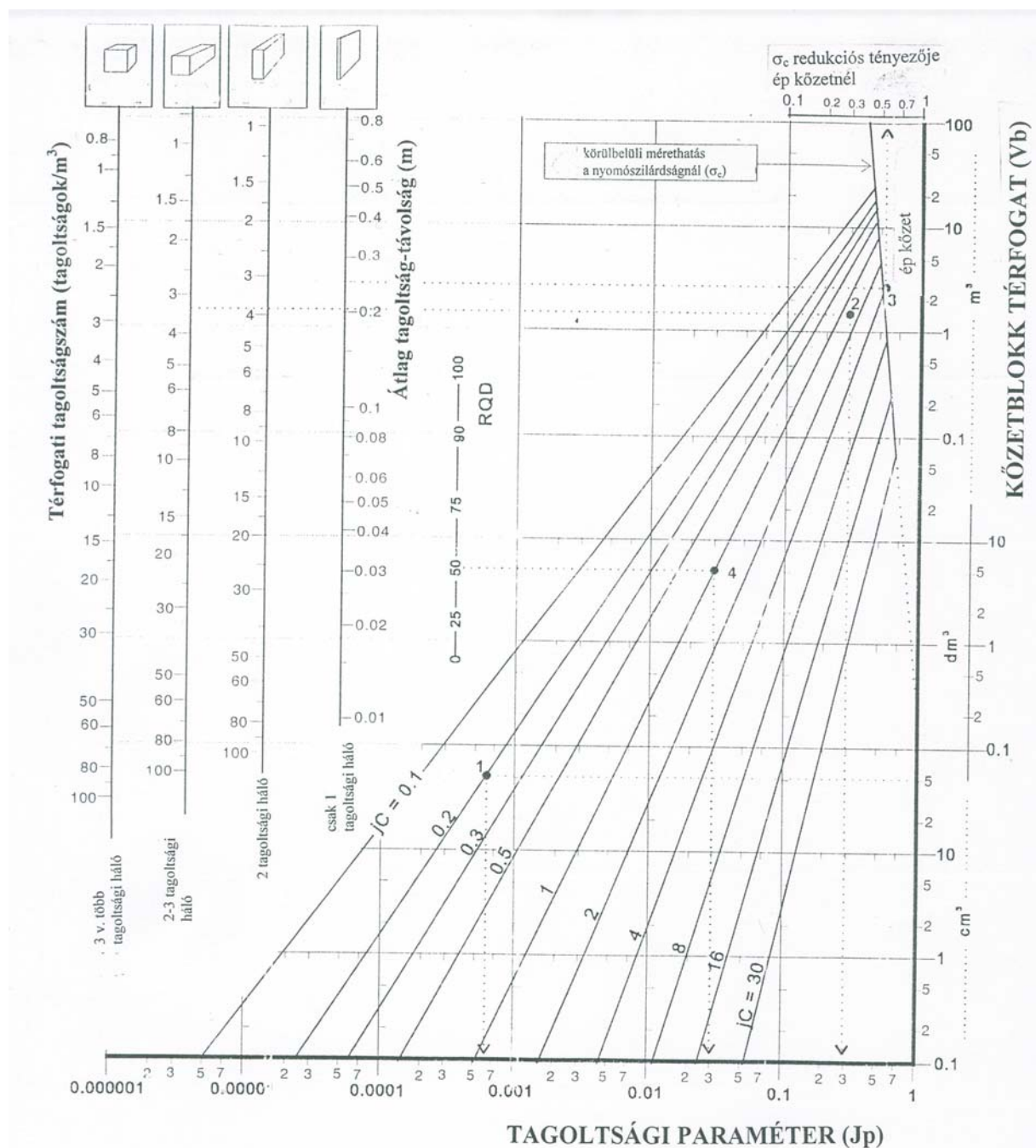
A tagoltság állapotát leíró tényező (j_C) a következő három taggal van összefüggésben: tagoló felület érdessége (j_R), mállottsága (j_A) és mérete (j_L), a következő összefüggés alapján:

$$j_C = j_L(j_R/j_A). \quad (5.60.)$$

Az 5-15. ábrán az R_{Mi} kiszámításának elvét mutatjuk be. Az 5-41. táblázatban a tagoltsági érdesség (j_R), az 5-42. táblázatban a tagoltsági méret (j_L) javaslatát, valamint az 5-43. táblázatban a tagoltsági mállottság (j_A) számértékeit adjuk meg Palmström (1995) alapján.

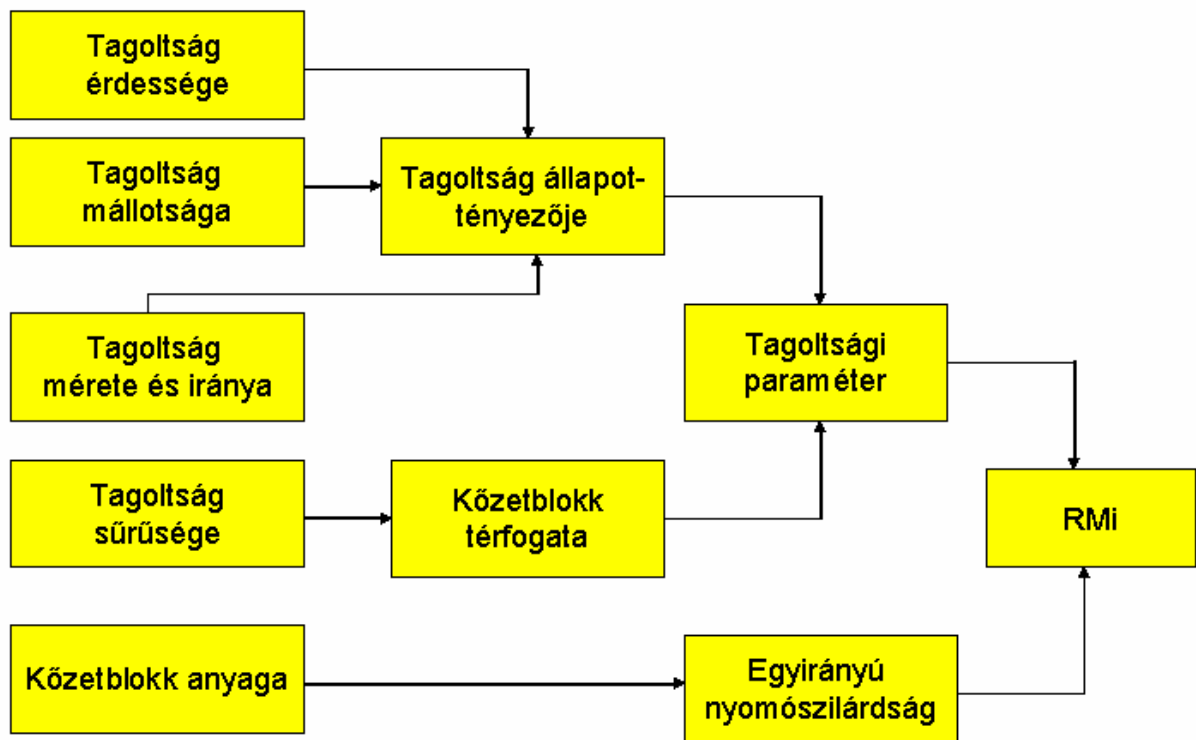
Az 5-14. ábra jól mutatja a javasolt módszer alkalmazhatóságának határait: jól használható abban az esetben is, ha fűrómag alapján meghatározott RQD tényező áll a rendelkezésünkre, de ennek méréstartományán kívül (azaz 10 cm-nél kisebb, illetve 1 m-nél nagyobb tagoló felület távolságok esetén) is lehetőség van vele számolni az ún. térfogati tagoltságszám segítségével. A térfogati tagoltságszám (definíció szerint) megadja azt, hogy 1 m^3 -nyi közettömbben 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 közettömbjeink vannak).



5-14. ábra. A tagoltsági paraméter (jP) meghatározása a tagoltsági állapot (jC) és a tagoltságok különböző sűrűsége (Vb, Jv, RQD) alapján

Amint az 5-14. ábrán jól látszik, a grafikus ábrázolás figyelembe veszi a mérethatást is: 1 dm³-nél nagyobb térfogatú tömbök esetén már jelentős eltérés van a laboratóriumban, szabványos próbatesten meghatározott nyomószilárdsági érték és a tagolatlan kőzettest szilárdsági értéke között. Ezt felismerve külön kell foglalkozni a laboratóriumban meghatározott egyirányú nyomószilárdság és a közettömb nyomószilárdsága közötti kapcsolattal, az ún. mérethatással is.



5-15. ábra. A különböző paraméterek kombinációja az RMI érték meghatározásához

5.8.3 Mérethatás

A mérethatást akkor kell figyelembe venni, ha a kőzetblokk mérete jelentősen eltér a laboratóriumi vizsgálatnál használt próbatest méretétől. A módszer alapján RMI értékében a J_p értéke tartalmazza a mérethatást, mivel szerepel benne a j_L tényező. Tagolatlan kőzettest esetén ez azt jelenti, hogy a tagoltsági paraméter (J_p) 1-gyel egyenlő, azaz az elmélet alapján ilyenkor a kőzettest egyirányú nyomószilárdsága megegyezik az 50 mm átmérőjű szabványos próbatest szilárdságával – ami természetesen nem igaz. Számos vizsgálatot feldolgozva, Barton (1990) az alábbi egyenletet ajánlja ebben az esetben:

$$\sigma_c = \sigma_{c0} (50/d)^{0,2} = \sigma_{c0} (0,05/Db)^{0,2} = \sigma_{c0} f, \quad (5.61.)$$

ahol σ_{c0} a szabványos (50 mm átmérőjű) próbatesten végzett vizsgálat eredménye, d az átszámításba figyelembe vett kőzettömb mérete.

Az effektív átmérőt (Db) a blokkterfogat (V_b) ismeretében lehet meghatározni:

$$Db = (V_b)^{0,33}. \quad (5.62.)$$

Ez az összefüggés néhány méteres nagyságú kőzettömbökig, a gyakorlati tapasztalatok alapján, biztonsággal használható.

5.8.4 Alakváltozási modulus meghatározása RMI ismeretében

Palmstöm és Singh (2001) helyszíni mérések alapján az alábbi összefüggéseket kapták az RMI és az alakváltozás közötti kapcsolat vizsgálatokor abban az esetben, ha $1 < RMI < 30$:

$$E_m = 7 RMI^{0,5} \quad (5.63.)$$

valamint, ha $RMI > 30$

$$E_m = 7 RMI^{0,4} \quad (5.64.)$$

5.8.5 Az RMI használhatósága, előnyei és hátrányai

Palmström (1996) után elkészített 5-16. ábra az RMI alkalmazásának lehetőségeit mutatja be. Az RMI módszert nem lehet közvetve osztályozási módszerként használni, mint a fentebb bemutatott RMR vagy Q módszereket. Mivel néhány bemenő paraméter megegyezik a többi osztályozási módszernél használt értékkel, így azoknál többé-kevésbé közvetlenül is felhasználható, figyelembe vehető. Az 5-44. táblázat a lehetséges osztályozási módot mutatja be a kapott RMI érték ismeretében.

Az RMI előnyeit pontokba foglalva mutatjuk be:

- növeli a bemenő adatok pontosságát, továbbá segíti a kőzettest osztályozás szisztematizálását is;
- könnyen használható durva közelítéseknel, amikor a tervezési területről kevés adat áll rendelkezésünkre (pl. előtervezésnél, amikor még közelítéssel kell megbecsülni a számításnál a bemenő adatokat);
- jól alkalmazható a különböző helyekről nyert információk összevetésénél;
- az egymásra épülő rendszer filozófiája jól illeszkedik a mérnöki gondolkodásmódhoz;
- jóval szélesebb kőzettest változatosságot lehet ezzel vizsgálni, mint a többi, tradicionális osztályozási karakterizálási módszernél, ebből adódóan szélesebb alkalmazási lehetősége van;
- bemenő paraméterként jól használható a többi osztályozási módszernél valamint az új osztrák alagútépítési eljárásnál (NATM ill. NÖT-nél).

5-44. táblázat. Az RMI alapján történő osztályozás

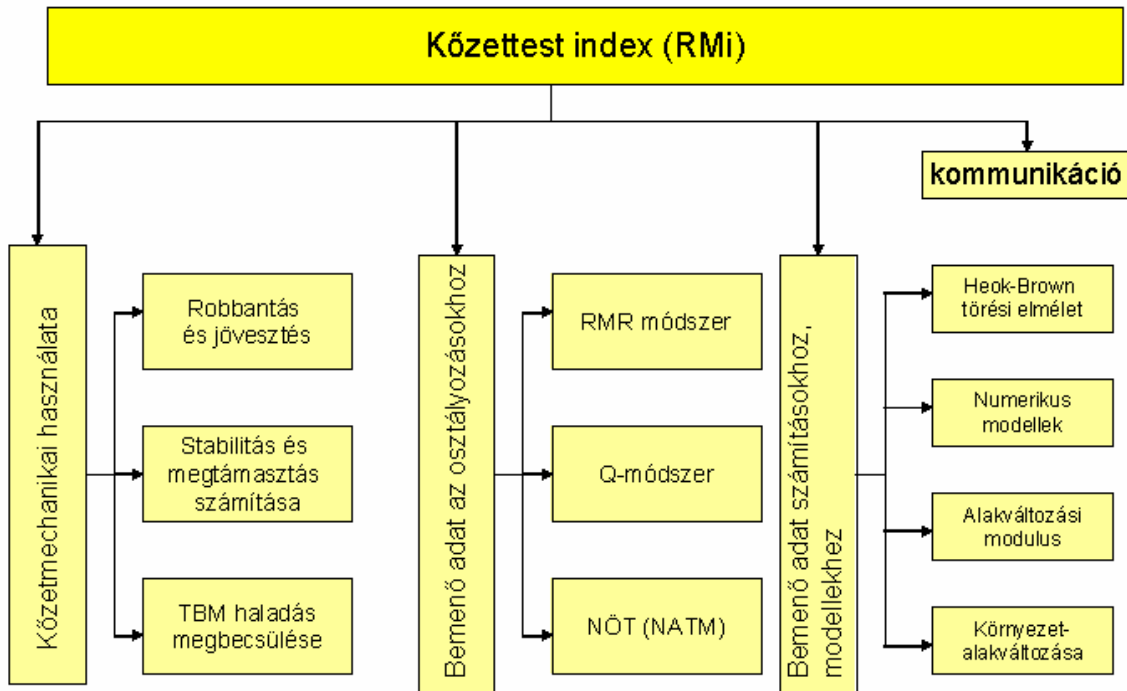
Osztályba sorolás	Kőzettest szilárdsága	RMI érték (MPa)
Rendkívül alacsony	rendkívül gyenge	< 0,001
Nagyon alacsony	nagyon gyenge	0,001 – 0,01
Alacsony	Gyenge	0,01 – 0,1
Közepes	Közepes	0,1 – 1,0
Magas	Szilárd	1,0 – 10,0
Nagyon magas	nagyon szilárd	10,0 – 100
Rendkívül magas	rendkívül szilárd	> 100

A módszer természetesen számos hátrányt illetve hiányosságot is tartalmaz. Mivel az RMI-vel a kőzettest egyirányú nyomószilárdságának meghatározására van csak lehetőség, így nem használható általános törési elméletként. Általánosságban, mint minden más elméletnél, itt is meg kell jegyezni, hogy mind az ép kőzet, mind a tagoltságok hatalmas összetevőjű és szerkezeti változatossággal rendelkeznek, melynek hatására megszámlálhatatlan összetételű és tulajdonságú kőzettest jöhet létre. Természetesen nem lehet mindezekhez a kombinációkhoz csupán egyetlen számot rendelni, továbbá itt is „-tól –ig” határokat kell felállítani, mely reprezentálja a kőzettestet.

Az alábbiakban a főbb hibaforrásokra hívjuk fel a figyelmet:

- az RMI pontosságát döntően befolyásolja a laborkísérlettel meghatározott egyirányú nyomószilárdság értéke. Mivel ez az érték függ a próbatest víztartalmától, valamint igen sokszor nagy szórása van az ugyanabból a kőzettömbből vett mintának is, így a végső értéknél is nagy különbségek adódhatnak.

- A tagoltsági paramétert (J_p) természetesen kevés nagyminta-kísérlettel határozták meg. Ebből adódódik, hogy az elmélet pontosságára (ill. pontatlanságára) nincs kellő információnk. A mérések alapján számos hiba „kioldhatta” egymást, melyekre csak a további mérések deríthetnek fényt.
- Az RMI bemenő paramétereinek változása jelentős mértékben befolyásolja a kapott eredményt, ami szubjektivitásból adódó hibát okozhat.
- Természetesen az elméletet lehatárolja még a kőzettest típusa is: az egy adott tagoltsági rendszer felett már nem használható (ill. nagyon nagy hibával terhelt).



5-16. ábra. Az RMI érték fő alkalmazási lehetőségei



5.9 A különböző kőzettest osztályozások egymásba való átszámíthatósága

A kőzettest leírásához, osztályozásához, a biztosítási mód helyes megválasztásához a lehetőség szerint minél több osztályozási mód használata ajánlatos.

5.9.1 RMR-Q közötti kapcsolat

Jelenleg a leginkább használatos kőzettest-osztályozási mód a Bieniawski által megalkotott RMR módszer és Barton Q index. Mindkét módszer egyesíti a földtani, geometriai és tervezési/mérnöki paramétereket ahhoz, hogy kvantitatív értéket adhasson a kőzettest minőségéről. A legjelentősebb különbség az RMR és a Q között a különböző hatások súlyozásában van. Azaz, míg az RMR a hatások összegzésével számol, addig a Q azok szorzatát veszi. Míg az RMR a laboratóriumi nyomószilárdságból számol, addig a Q a helyszíni (*in situ*) szilárdságot veszi figyelembe. Mindkettő figyelembe veszi a víz jelenlétét, és azt, hogy ez jelentősen befolyásolja a kőzet szilárdságát. Bodonyi *et al.* (1986) megállapításai alapján az RMR tényezőnél sokkal nagyobb hatása van a szubjektív döntésnek, mint a Q tényezőnél.

Természetesen mindkét módszernél felvetődik a kérdés a további kőzetmechanikai tényezők bevonására is, de a gyakorlati tapasztalatok azt mutatták, hogy a kívánt pontosságon már nem javítanak. Elmondható viszont, hogy a kemény kőzeteknél végzett fejteéseknél, főleg amennyiben az mélyen is történik, a kőzet mállottsága és a víz hatása általában nem jelentős és így elhanyagolható.

Számos kutató foglalkozott az egyes módszerek egymással való megfeleltetésével. Az RMR és a Q tényezők közötti kapcsolatot az 5-45. táblázatban foglaltuk össze.

Amint az a táblázatból kitűnik, nincs pontos átszámolási lehetőség az RMR és a Q tényezők között. Ennek oka az, hogy a két módszer néhány bemenő adata jelentősen eltér egymástól, illetve különböző hatások más-más súllyal esnek latba.

5-45. táblázat. Az RMR és a Q tényezők közötti kapcsolat különböző szerzők ajánlásai alapján

Szerző	RMR =	Korrelációs együttható
Bieniawski (1989)	$9 \ln Q + 44$	0,77
Rutleger & Preston (1978)	$5,9 \ln Q + 43$	0,81
Moreno (1980)	$5,4 \ln Q + 55,2$	0,55
Cameron-Clarke & Budavari (1981)	$5 \ln Q + 60,8$	-
Abad <i>et al.</i> (1984)	$10,5 \ln Q + 41,8$	0,66
Barton (1995)	$15 \log Q + 50$	-

Ebből kiindulva Goel *et al* (1995a) a kőzettest-szám – N (Rock Mass Number) és a kőzettest állapot-érték – RCR (Rock Condition Rate) bevezetését ajánlja.

A kőzettest-szám (N) a Q tényező SRF (feszültség redukciós tényező) nélküli értéke, mivel ennek megadása, illetve meghatározása a legkevésbé objektív paraméter:

$$N = [RQD/J_n][J_r/J_a][J_w] \quad (5.65.)$$

A közettest állapot-értéket (RCR) az RMR tényezőből lehet kiszámolni, melyben nem vesszük figyelembe az ép kőzet nyomószilárdságát és a tagoltságok irányát:

$$RCR = RMR - (\text{nyomószilárdság} + \text{tagoltság irányja}) \quad (5.66.)$$

Goel *et al.* (1995b) 63 különböző alagútépítésnél szerzett tapasztalataikat feldolgozva a két tényező között az alábbi összefüggést határozták meg :

$$RCR = 8 \ln N + 30 \quad (R = 0,92) \quad (5.67.)$$

5.9.2 RSR-RMR közötti kapcsolat

A bemutatott osztályozási módszerek közül az RSR és az RMR tényező közötti kapcsolatra alagutakat vizsgálva Rutledge és Preston (1978) a következő összefüggést határozta meg:

$$RSR = 0,77 RMR + 12,4 \quad (5.68.)$$

5.10 Irodalom

- Abad, J.; Caleda, B.; Chacon, E.; Gutierrez, V.; Hidlgo, E. (1984): *Application of geomechanical classification to predict the convergence of coal mine galleries and to design supports*. 5. ISRM Cong. 15-19.
- Barton, N. (1990): *Scale effects or sampling bias?* In.: Pinto da Cunha (Ed.) Proc. Scale effect in rock masses, 1. Int. workshop, Loen, 31-55.
- Barton, N. (1993): *Application of Q-system and index tests to estimate shear strength and deformability of rock masses*. Workshop on Norwegian Method of Tunneling, New Delhi, 66-84.
- Barton, N. (1995): *The influence of joint properties in modelling jointed rock masses*, Keynote lecture – 8. ISRM Cong. 1023-1032.
- Barton, N.; By, T.L.; Chryssanthakism P.; Tunbridge, L.; Kristiansen, J.; Loset, F.; Bhasin, R.K.; Westerdahl, H.; Vik, G. (1992): *Comparison of prediction and performance for a 62 m span sports hall in jointed gneiss*. In: Barla, G. (Ed) 4. Int. Cong. Rock Mech. Rock Engng. Torion, 17.1-17.15.
- Barton, N.; Lien, R.; Lunde, J. (1974): Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mech. Rock Engng.* 7: 183-236.
- Barton, N.R. (2000): *TBM tunneling in jointed and faulted rock*, Balkema, p. 184.
- Bieniawski, Z.T. (1973): Engineering classification of rock masses. *Trans S. African Inst. Civil Engng.* 15: 335-344.
- Bieniawski, Z.T. (1976): *Rock mass classification in rock engineering*. In: Bieniawski, Z.T. (Ed.), Exploration for rock engineering, 1: 97-106.
- Bieniawski, Z.T. (1979): *The geomechanics classification in rock engineering applications*. Proc. 4. ISRM Cong. Montreux, 2:41-48.
- Bieniawski, Z.T. (1989): *Engineering rock mass classification* Wiley 251 p.
- Bodonyi J.; Hullán Sz.; Illés G. (1986): A kőzetöszlet tagoltságának kvantitatív meghatározása és a hazai alkalmazás néhány példája. *BKL – Bányászat*, 119: 159-166.
- Cameron-Clarke, I.S.; Budavari, S. (1981): Correlation of rock mass classification parameters obtained from borecore and insitu obaervation. *Engng. Geol.* 17: 19-53.
- Goel, R.K.; Jethwa, J.L.; Paithankar, A.G. (1995a): Indian experience with Q and RMR systems. *J. Tunneling and Undreground Space Techn.* 10: 97-109.
- Goel, R.K.; Jethwa, J.L.; Paithankar, A.G. (1995b): Correlation between Barton's Q and Bieniawski's RMR – A new approach. *Int. J. Rock Mech, Min. Sci. & Geomech. Abst.* 33: 179-181.
- Grimstad, E.; Barton, N. (1993): *Updating the Q-System for NMT*. In: Kompen, Opsahl, & Berg (Eds.) Int. Symp. Sprayed Concrete – Modern use of wet sprayed concrete for underground support. Oslo.
- 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. (2000): *Practical rock engineering*. PhD thesis, Univ. Oslo. (www.rocsience.com)
- Hoek, E. (1994): Strength of rock and rock masses. – *ISRM News Journal*, Vol. 2(2): 4-16.
- Hoek, E.; Bray, J.W. (1981): *Rock Slope Engineering* Inst. Mining & Met., London, p. 402.
- Hoek, E.; Brown, E.T. (1980): *Underground excavations in rock*. London, Inst. Min. Metall.
- Hoek, E.; Brown, E.T. (1997): Practical estimates of rock mass strength. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abst.*, **34**: 1165-1186.
- Hoek, E.; Diederichs, M. S. (2006): Empirical estimation of rock mass modulus. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, **43**: 203-215.
- Hoek, E.; Kaiser, P.K.; Bawden, W.F. (1995): *Support underground excavations in hard rock*. Balkema, Rotterdam.
- Hoek, E.; Wood, D.; Shah, S. (1992): A modified Hoek-Brown criterion for jointed rock masses. – In: Hudson, J.A. (Ed.), *Rock Characterisation, ISRM Symp. – Eurock '92*: 209-214.
- Moreno Tallon, E. (1980): Application de Las Clasificaciones Geomechanicas a Los Tuneles de Parjares, II Cursode Sostenimientos Activosen Galeriasy Tunnels. (hivatkozás Sing & Goel, 1999-ből)
- Palmström, A. (1995): RMI – a rock mass characterization system for rock engineering purposes. Univ. Oslo, Norway, p. 400. (www.rockmass.net)
- Palmström, A. (1996a): Characterizing rock masses by the RMI for use in practical rock engineering – Part 1: The development of Rock Mass index (RMI). *Tunneling & Underground Space Techn.* **11**: 175-188; Part 2: Some practical applications of the Rock Mass index (RMI). *Tunneling & Underground Space Techn.* **11**: 287-303.
- Palmström, A. (1996b): RMI – A system for characterizing rock mass strength for use in rock engineering. *J. Rock Mech. Tunn. Techn.* **1**:69-108.
- Palmström, A.; Singh, R. (2001): The deformation modulus of rock masses – comparisons between in situ tests and indirect estimates, *Tunnelling & Underground Space Technology* **16**: 115–131.
- Ramamurthy, T. (1986): Stability of rock masses. *Indian Geotechn. J.* **16**: 1-74
- Romana, M.R. (1985): New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes. *Int. Symp. Rock Mech., Zacatecas*, 49-53.
- Romana, M.R. (1993): A geomechanical classification for slopes: Slope Mass Rating. In: Hudson, J.A. (Ed.) *Comprehensive Rock Engineering*, Pergamon Press, **3**: 575-599.
- Romana, M.R. (2003): *DMR (Dam Mass Rating). An adaptation of RMR geomechanics classification for use in dams foundations*. ISRM 2003 – Technological roadmap for rock mechanics, South Africa, CD-Rom.
- Rutledge, J.C.; Preston, R.L. (1978): *Experience with engineering classification of rock*. Proc. Int. Tunnelling Symp. A3.1-A3.7.
- Şen, Z.; Sadagah, B.H. (2003): Modified rock mass classification system by continuous rating. *Engng. Geol.* **67**: 269-280.
- Serafim, J.L.; Pereira, J.P. (1983): Consideration of the geomechanical classification of Bieniawski. *Int. Symp. Engineering Geology & Underground Constructions.* **1/III**: 33-44
- Singh, B.; Goel, R.K. (1999): *Rock mass classification – A practical approach in civil engineering*. Elsevier.
- 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. (2003a): A módosított Hoek-Brown törési kritérium, *BKL – Bányászat*. **136**(5): 276-283.
- Vásárhelyi B. (2003b): Sziklarézsük állékonyságának számítása SMR-módszerrel. *Közúti és Mélyépítési Szemle* **53**(4): 191-195.
- Vásárhelyi B. (2004): Köztest-osztályozási módszerek összefoglalása *Földtani Közöny* **134**(1): 109-129.
- Vásárhelyi B. (2005): A köztest értékelése RMI (Köztest index) alapján, *BKL – Bányászat*, **138**(6): 20-24.
- Wickham, G.E.; Tiedemann, H.R.; Skinner, E.H. (1972): *Support determination based on geologic predictions*. Proc. Conf. Rapid Excavation and Tunneling, AIME: 43-64.
- Wickham, G.E.; Tiedemann, H.R.; Skinner, E.H. (1974): *Ground support prediction model – RSR concept*. In: Conf. Rapid Excavation and Tunneling, AIME: 691-707.
- Ydhibir, E.T. (1983): *An empirical failure criterion for rock masses*. Proc. 5. ISRM Cong. **1**: B1-B8.

F1. Függelék: Adatgyűjtés

A terepi vizsgálatoknál történő adatgyűjtésre, továbbá az adatok kezelésére először 1964-ben Coates tett javaslatot, melyet fokozatosan pontosítottak. 1981-ben az addig összegyűlt tapasztalatok alapján a Nemzetközi Kőzetmechanikai Társaság (ISRM) az adatok gyűjtésére és dokumentálására ajánlást állított össze, melyet az F1-1. és F1-2. táblázatok tartalmaznak. A táblázatok célja az adatgyűjtés megkönnyítése és a későbbi felhasználhatóság segítése. Ezek a táblázatok mindegyik bemutatott módszernél felhasználhatók, mivel a bemenő adatok azokból megállapíthatók. Megjegyezzük, hogy mindegyik osztályozási módszer javaslatot tesz az adatgyűjtésre is, melyek az adott osztályozási módszerhez készültek. Az ISRM előbb 1978-ban, majd 1981-ben egységesítette a tagoltság és a szilárdságméréseket is, hogy a szubjektív tényezőt minél inkább kiiktathassa.

Az adatok esetleges ellenőrzése érdekében ajánlatos a vizsgált felszínről fényképet is készíteni. A dokumentációhoz minden esetben vázlatrajz is csatolandó. Ezt figyelembe véve készültek el a Bátaapáti alagútfúrás adatlapjai, melyeket az F1-3. és F1-4 táblázatokban mutatunk be.

A fűrőmagok vizsgálatához használatos adatfelvételi lapokat az F1-5. és F1-6 táblázatok tartalmazzák.



F1-1. táblázat Adatgyűjtési táblázat (ISRM 1981 alapján)

Projekt neve: Helyszín: Készítette: Dátum	SZERKEZETI RÉGIÓ	KŐZET TÍPUSA ÉS EREDETE			
RQD TÉNYEZŐ FŰRÓMAGBÓL		TAGOLTSÁG ÁLLAPOTA			
Nagyon jó: 90 – 100 %		Üde			
Jó: 75 – 90 %		Kis mértékben mállott			
Közepes 50 – 75 %		Közepesen mállott			
Gyenge 25 – 50 %		Nagyon mállott			
Nagyon gyenge < 25 %		Teljesen mállott			
		Talaj jellegű			
TALAJVÍZ		ÉP KŐZET SZILÁRDSÁGA			
Vízbefolyás 10 m hosszú			Egyirányú nyomó- szilárdság, MPa	Pont-terheléses szilárdság, MPa	
alagút esetén l/perc		Nagyon nagy	> 250	> 10	
VAGY		Nagy	100 - 250	4 – 10	
Víznyomás kPa		Közepes	50 - 100	2 – 4	
VAGY		Elégséges	25 - 50	1 – 2	
ÁLTALÁNOS ÁLLAPOT (teljesen száraz, csepegős, nedves, vízbefolyás, stb.):		Kicsi	5 – 25	< 1	
		Nagyon kicsi	1 – 5		
		<i>Mért érték:</i>			
A TAGOLTSÁGOK TÁVOLSÁGAI					
		1. csoport	2. csoport	3. csoport	4. csoport
Nagyon távoli > 2 m		.....	.....	.....	.....
Távoli 0,6 – 2 m		.....	.....	.....	.....
Közepesen 20 – 60 cm		.....	.....	.....	.....
Közeli 6 – 20 cm		.....	.....	.....	.....
Nagyon közeli < 6 cm		.....	.....	.....	.....
<i>Megjegyzés: Ezen értékeket a helyszínen állapítjuk meg, nem a fűrőmagból!</i>					
DŐLÉSIRÁNY ÉS DŐLÉSSZÖG					
	átlag	-tól	-ig	Átlag	-tól -ig
1. csoport Dőlésirány	.....	.....	.....	Dőlésszög:	.....
2. csoport Dőlésirány	.....	.....	.....	Dőlésszög:	.....
3. csoport Dőlésirány	.....	.....	.....	Dőlésszög:	.....
4. csoport Dőlésirány	.....	.....	.....	Dőlésszög:	.....
<i>Megjegyzés: Irányok a mágneses északról értendők!</i>					

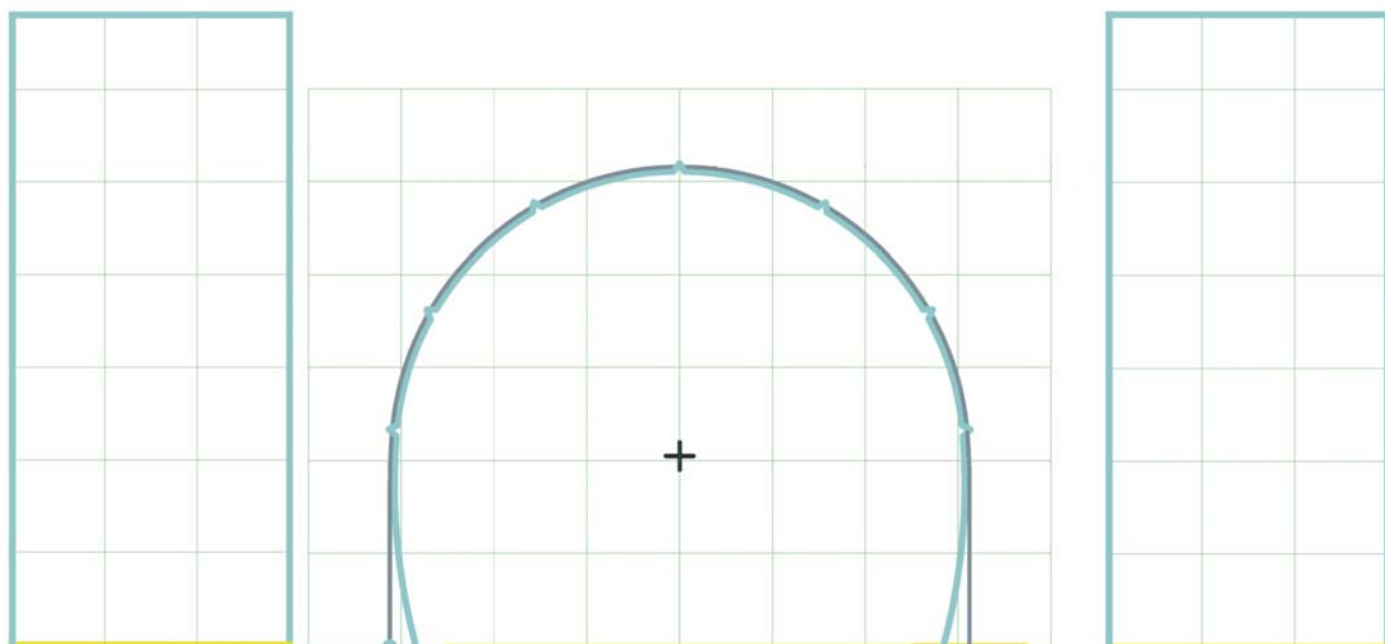
F1-2. táblázat Adatgyűjtési táblázat (ISRM 1981 alapján)

A TAGOLTSÁG ÁLLAPOTA					
FOLYTONOSSÁGA:		1. csoport	2. csoport	3. csoport	4. csoport
Nagyon közeli	< 1 m	.....	.....	.....	.....
Közeli	1 – 3 m	.....	.....	.....	.....
Közepes	3 – 10 m	.....	.....	.....	.....
Messzi	10 – 20 m	.....	.....	.....	.....
Nagyon messzi	> 20 m	.....	.....	.....	.....
ELVÁLTSÁGA:					
Zárt	< 0,1 mm	.....	.....	.....	.....
Közeli	0,1 – 0,5 mm	.....	.....	.....	.....
Kissé nyitott	0,5 – 2,5 mm	.....	.....	.....	.....
Nyitott	2,5 – 10 mm	.....	.....	.....	.....
Szélesen megnyílt	> 10 mm	.....	.....	.....	.....
FELÜLETI ÉRDESSÉGE:					
Nagyon érdes		.....	.....	.....	.....
Érdes		.....	.....	.....	.....
Kissé érdes		.....	.....	.....	.....
Sima		.....	.....	.....	.....
Csúszós		.....	.....	.....	.....
KITÖLTÖTTSEGE:					
Típusa		.....	.....	.....	.....
Vastagsága		.....	.....	.....	.....
Egyirányú nyomószilárdság, MPa		.....	.....	.....	.....
Megjegyzés:		.....	.....	.....	.....
FŐBB TÖRÉSEK ÉS GYŰRŐDÉSEK					
A főbb törések és gyűrődések leírása, azok elhelyezkedésével, irányával és jellemzőikkel.					
ÁLTALÁNOS MEGJEGYZÉSEK ÉS TOVÁBBI ADATOK					

F1-3. táblázat. Vájtég dokumentációja a bátaapáti feltáró alagútnál

VÁJTVÉG GEOTECHNIKAI DOKUMENTÁCIÓJA		K/Ny lejtősakna (21 m²)
Dátum, idő:	Dokumentálta:	Jóváhagyta:
Fogás sorszáma:	Vájtég pozíciója:	Fénykép azonosítója:
Felszíntől számított mélység (m):	Az ép kőzet szilárdsági intervalluma:	A kőzet mállottsági osztálya:
A kőzet(ek) megnevezése, leírása:	Vízbeáramlási viszonyok (l/perc):	Megjegyzés:

Repedés-csoport	Típus	Dőlés-irány	Dőlés-szög	Repedések közti távolság (m)		Síktól való eltérés (planaritás)		Felületi érdesség	Megnyíltság (mm)	Kitöltőanyag	Kitöltőanyag vastagsága (mm)	Felületi mállottság
				Min.	Max.	Max. merőleges távolság (cm)	Hossz (m)					



F1-4 táblázat: Vájvég kőzetosztályba sorolásának adatlapja a bátaapáti alagútépítésnél

$RQD = 115 - 3,3 J_v$	véletlenszerű repedések száma (N_r):
$J_v = \sum \frac{1}{S_i} + \frac{N_r}{5} =$	
RQD =	

*Tagoltsági állapot meghatározása (RMR értékhez)

érdesség	nyitottság	folytonosság	Mállottság
Állapot értéke:			

RMR érték		Q-tényező	
	Érték		Érték
Nyomószilárdság		RQD	
RQD		J_n	
Távolság		J_r	
Állapot*		J_a	
Vízbeáramlás		J_w	
Orientáció		SRF	
$RMR = \sigma_c + RQD + \text{távolság} +$ $\quad + \text{állapot} + \text{víz} + \text{irányítottság.}$		$Q = \frac{RQD}{J_n} * \frac{J_r}{J_a} * \frac{J_w}{SRF}$	
RMR =		Q =	
Osztály:		Osztály:	
Alkalmazott biztosítás/megjegyzés:			

F1-5 táblázat: Adatlap a fúrómag tagoltságának vizsgálatához

Fúrólyuk jele:				EOV X:				EOV Y:				Z (mBf):								
Sor- szá m	Szakas z kezdet e (fm)	Szakas z vége (fm)	Szakas z hossza (m)	Fragmentumok származási helye (fm)										Láda- szám	Átmér ő (mm)	Deere- módszer		Hansági- módszer		
				Fragmentumok hossza (cm)												Lp (m)	RQD (%)	Cp (-)	Cm (-)	C (-)
1																				
2																				
3																				
4																				
5																				
6																				
7																				
8																				
9																				
10																				

2. Függelék: Példa a kőzettest osztályozások számítására

Puha üledékes kőzetben (durva mészkőben) alagút építését tervezzük, melynek átmérője fejtés, illetve robbantásos jövesztés esetén 8,0 méter, míg alagútfúró gép (TBM) alkalmazása esetén 7,4 méter. Szilárdsági vizsgálat alapján a kőzet egyirányú nyomószilárdsága $\sigma_c = 40\text{-}50$ MPa. A feltáró fúrások magmintáinak értékelése alapján RQD 72 %-os értéket kaptunk. A kőzet sűrűsége: 2660 kg/m^3 . A tervezett alagút kihajtásának és a tagoltságok iránya egymásra várhatóan közel merőlegesek lesznek, a tagoltságok dőlésszöge 20° körüli. Méréskelt vízbefolyásra számítani kell.

Alábbiakban előbb az osztályba sorolás lehetőségét mutatjuk be Terzaghi-módszere, RSR, RMR és Q módszerek alapján, majd a kapott értékeket figyelembe véve a szükséges biztosítási módokat, illetve felvehető fizikai paramétereket elemezzük.

F2.1 Osztályba sorolás

a) *Osztályozás Terzaghi módszere szerint*

Mérsékeltén tömbös és töredezett: IV. osztály

b) *Osztályozás RSR módszer szerint*

Kőzettípus: puha töredezett üledékes kőzet: IV. típus, Kisé gyűrt és töredezett: A = 15

Tagoltság: közepesen blokkosodott;

Alagút kihajtása közel merőleges a tagoltság csapásirányára. Lapos dőlésszög ($0\text{-}20^\circ$): B = 30

Vízbefolyás: mérsékelt, Tagoltság állapota: közepes, $A + B = 45$; C = 16

RSR = A + B + C = 30 + 15 + 16 = 61

c) *Osztályozás RMR módszer szerint*

Ép kőzet szilárdsága (σ_c): 40-50 MPa, Értéke: 4

RQD = 72 % (átlagban); Értéke: 13

Tagoltságok egymástól mért távolsága: 50 mm-től 0,9 méterig változó, Értéke: 10

Tagolófelületek állapota: megnyíltság: 0,8-1,1 mm; kissé mállott, érdes felület, Értéke: 25

Talajvíz: csepegő talajvíz, kis nyomás, mért vízmennyiség: 25-125 l/perc, Értéke: 4

RMR_{alap} = 4 + 13 + 10 + 25 + 4 = 56 – ez az érték nem tartalmazza a tagoltságok irányát
Tagoltságok iránya: csapásirány merőleges az alagút kihajtásának irányára, dőlésszög: 20° .
Értéke: -5

RMR = 56 – 5 = 51 (III. kőzetosztály: megfelelő)

d) Osztályozás Q-módszer szerint

$$RQD = 72 \%$$

$$J_n = 6 \text{ (két tagoltsági rendszer + véletlenszerűek)}$$

$$J_r = 1,5 \text{ (érdes, sík tagolófelületek)}$$

$$J_a = 1,0 \text{ (zárt tagoltságok, kismértékben mállott)}$$

$$J_w = 0,5 \text{ (lehetőség van nagyobb mennyiségű vízbeáramlásra)}$$

$$SRF = 1,0 \text{ (közepes feszültség - } \sigma_c/\sigma_1 = 50/0,91 = 55)$$

$$Q = RQD/J_n J_r/J_a J_w/SRF = 72/6 \cdot 1,5/1,0 \cdot 0,5/1,0 = 9 \text{ (V. kőzetosztály, közepes minőségű)}$$

F2-1. táblázat: a különböző módszerrel számolt kőzetosztályok összefoglalva

Osztályozási módszer	Érték	Osztály	Minősítés
<i>Terzaghi</i>		V.	Mérsékeltten blokkos
<i>RSR</i>	61		
<i>RMR</i>	51	III.	Megfelelő
<i>Q</i>	9,0	V.	Megfelelő

F2.2. Kőzet terhelés meghatározása

A kőzet-terhelés nagysága függ a választott jövesztési technológiától, valamint az alagút átmérőjétől. F2-2. táblázatban a különböző osztályozási módszerek kapott eredményei alapján határoztuk meg a várható kőzetterheléseket.

F2-2. táblázat: A kőzetosztályok ismeretében a kőzetterhelések meghatározása

Módszer	Fejtett és robbantott	TBM
Terzaghi	$h_p = 0,35$ $C = 0,7$ $B = 0,7 \times 8,0 = 5,6$ m Kőzetterhelés: $P = \gamma h_p = 2660 \times 5,6 = 0,146$ MPa	$h_p = 0,45$ $B = 0,45 \times 7,4 = 3,3$ m $P = 0,09$ MPa
RSR 61	$P = 0,067$ MPa (1,2 kfont/láb ²)	TBM átszámítás: $AF = 1,14$ $RSR = 61 \times 1,14 = 69,5$ $P = 0,034$ MPa (0,7 kfont/láb ²)
RMR 51	$h_p = \frac{100 - RMR}{100} B = \frac{100 - 51}{100} 8,0 = 3,92$ m $P = \gamma h_p = 2660 \times 3,92 = 0,102$ MPa	RSR_{TBM} értékből kiszámolt RMR érték: 74 $P = 0,049$ MPa
Q 9	$P = \frac{2,0}{J_r} Q^{-1/3} = \frac{2,0}{1,5} 9^{-1/3} = 0,64$ kg/cm ² = 0,0628 MPa vagy: $P = \frac{2J_n^{1/2}}{3J_r} Q^{-1/3} = \frac{2 \times \sqrt{6}}{3 \times 1,5} 9^{-1/3} = 0,52$ kg/cm ² = 0,0513 MPa	RSR_{TBM} értékből kiszámolt Q érték: 54 $P = 0,0321$ MPa

F2-3. táblázat: A kőzet-terhelések összefoglalva kPa-ban:

Módszer	Fejtett és robbantott	TBM
<i>Terzaghi</i>	146	90
<i>RSR</i>	67	34
<i>RMR</i>	102	49
<i>Q</i>	63	32

F2.3. Megtámasztás nélküli idő és maximális jöveszthető átmérő

Megtámasztás nélküli idő értékére csak az RMR módszer ad javaslatot. Ez alapján az 51-es érték, 8,0 m átmérőjű alagút esetén kb. 70 óra (3 nap).

F2-4. táblázat. Megtámasztás nélküli idő és a maximális fejtési hossz meghatározása

	RMR = 51	Q = 9 (ESR = 1,6)
Megtámasztás nélküli átmérő	2,4 m	
Maximális jöveszthető átmérő	10,5 m	8,0 m

F2.4 Alakváltozási modulus, kohézió és súrlódási szög értéke

A kőzettest alakváltozási modulusának meghatározását RMR és Q tényezők ismeretében számítottuk ki. Tudjuk, hogy ép próbatesten mért rugalmassági modulus értéke: 11 GPa. A kapott eredményeket a F2-5. táblázatban foglaltuk össze.

F2-5. táblázat. Alakváltozási modulusa a kőzettestnek

RMR (56-os értékkel számolva)	Q
<ul style="list-style-type: none"> $E = 2 \text{ RMR} - 100 = 2 \times 56 - 100 = 12 \text{ GPa}$ $E_m = \sqrt{\frac{\sigma_c}{100}} 10^{(RMR-10)/40} =$ $\sqrt{\frac{50}{100}} 10^{(56-10)/40} = 9,99 \text{ GPa}$ 	<ul style="list-style-type: none"> $E = 25 \log Q = 25 \log (9) = 23,9 \text{ GPa}$ (minimum: 9,5, maximum: 38,2 GPa) $E_m = 1,5 Q^{0,6} E^{0,14} = 1,5 \times 9^{0,6} \times 11^{0,14} = 7,8 \text{ GPa}$

A kőzettest súrlódási szögét és kohézióját csak RMR-ből lehet meghatározni:

- Kohézió (c): 192 kPa
- Belső súrlódási szög (ϕ): 39°

F2.5 Összefoglalás

A vizsgált kőzettestben tervezett alagút tervezéséhez szükséges alapadatokat az F2-6. táblázatban foglaltuk össze. Természetesen tervezéskor ezen eredmények mérlegelése szükséges.

F2-6. táblázat. A kapott eredmények összefoglalása

	Terzaghi	RSR	RMR	Q
Kőzetosztályba sorolás	Mérsékelten blokkos	61	51	9,0
Kőzetterhelés magassága (m)	5,6	-	3,9	-
Kőzetterhelés (kPa)	146	67	102	63
Alakváltozási modulus (GPa) – átlag	-	-	11	23,5 (7,8)
Megtámasztás nélküli idő	-	-	3 nap	-
Kohézió/ súrlódási szög			192 kPa/ 39°	
Szükséges biztosítás	Horgonyzás 1,5 méterenként, betonelemek	Horgonyzás 2,0 méterenként, betonelemek	3,5 m-es kőzetcsavar 1,5 m.-ént, 50-100 mm vtg. lőt beton, acélháló	3,0 méteres kőzetcsavarok 1,5 m.-ként, 50 mm vtg. lőt beton



F3. Ajánlott irodalom

A könyvben ismertetésre kerülő elgondolások a mérnökgeológia új, napjainkban rohamosan fejlődő területe. Ezért elkerülhetetlen, hogy a szakma iránt mélyebben érdeklődők naprakész tudással rendelkezzenek. A fejeztek tartalmazzák a fejezetekhez tartozó részletes irodalomjegyzéket. Itt a fontosabb összefoglaló jellegű irodalmat gyűjtöttük össze. Az olvasó elsősorban ezekből a könyvekből, de főleg az alábbi folyóiratokból, konferencia kiadványokból frissítheti a tudását.

Magyar nyelven megjelent irodalom:

- Ábrahám K. (1982): *Metró kézikönyv. Tervezés, építés, üzemeltetés*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest.
- Asszonyi Cs., Gálos M., Kertész P., Richter R. (1980): *A bányászat mechanikai rendszere I: Kőzetmechanika anyagszerkezeti és reológiai alapjai* VEAB, Veszprém
- Asszonyi Cs., Kapolyi L. (1981): *A bányászat mechanikai rendszere 2: Kőzetkontinuumok mechanikája*. VEAB, Veszprém
- Egerer F., Kertész P. (1993) *Bevezetés a kőzetfizika*. Akadémiai Kiadó, Budapest.
- Gálos M., Kertész P. (1989): *Mérnökgeológia – Kézirat*, Tankönyvkiadó, Budapest.
- Hansági I. (1986): *Gyakorlati kőzetmechanika az ércbányászatban*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest
- Juhász J. (1999, 2002, 2003): *Mérnökgeológia I-III*. Miskolci Egyetemi Kiadó.
- Mosztov V.M. (1978): *Nagyszelvényű föld alatti létesítmények*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest
- Somosvári Zs. (1987): *Geotechnika I*. Egyetemi jegyzet, Tankönyvkiadó, Budapest.
- Széchy K. (1961): *Alagútépítéstan*, Tankönyvkiadó, Budapest

Angol nyelvű irodalom:

- Barton, N.R. (2000): *TBM tunneling in jointed and faulted rock*, Balkema, p. 184.
- Bieniawski, Z.T. (1989): *Engineering rock mass classification* Wiley p.251.
- 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.
- Hoek, E.; Bray, J.W. (1981): *Rock Slope Engineering* Inst. Mining & Met., London, p. 402.
- Hoek, E.; Brown, E.T. (1980): *Underground excavations in rock*. London, Inst. Min. Metall.
- Singh, B.; Goel, R.K. (1999): *Rock mass classification – A practical approach in civil engineering*. Elsevier, p.267.
- Wyllie, D.C. (1992): *Foundation on rock*. E&FN Spon. p. 401.

Valamint: J.A. Hudson főszerkesztésében 1995-ben megjelent 5 kötetes *Comprehensive Rock Engineering* (Pergamon Press)

A témával kapcsolatban főleg az alábbi folyóiratokban jelennek meg tudományos cikkek:

- *Rock Mechanics and Rock Engineering* (Springer kiadó). 1968-ót megjelenő elméleti és gyakorlati tapasztalatokat bemutató kőzetmechanikai folyóirat.
- *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* (Springer kiadó). A nemzetközi mérnökgeológiai szövetség (IAEG) hivatalos lapja.

- *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* (Elsevier kiadó) 1964-óta megjelenő folyóirat, mely kőzetmechanika bányászati és mérnöki tudományával foglalkozik.
- *Engineering Geology* (Elsevier kiadó). A mérnökgeológiával, kőzetben való tervezéssel foglalkozó, mind gyakorlati, mind elméleti kutatásokat közlő havi folyóirat.
- *Tunneling and Underground Space Technology* (Elsevier) A nemzetközi alagútépítési szövetség (ITA) hivatalos lapja.

valamint az alábbi konferenciákon megjelent előadások nyomtatott publikációi:

- Nemzetközi Kőzetmechanikai Társaság (ISRM) világkongresszusai (4 évente)
- Nemzetközi Mérnökgeológiai Szövetség (IAEG) világkongresszusai (4 évente)
- Nemzetközi Alagútépítési Szövetség (ITA) világkonferenciái (évente)
- Európai kőzetmechanikai konferenciák (évente)
- Észak-amerikai és Egyesült államokbeli kőzetmechanikai konferenciák (felváltva évente)
- Ázsiai kőzetmechanikai konferencia (évente)
- valamint egyéb, az ISRM, IAEG vagy ITA által szervezett vagy szponzorált tematikus konferenciák.

