



Q-tényező alkalmazása sziklarézsűk állékonyságvizsgálatánál

Bögöly Gyula, Vásárhelyi Balázs

Kivonat: A jelenleg kivitelezés előtt álló főutak tervezésénél és kivitelezésénél egyes szakaszok esetén sziklarézsű-állékonysági problémákra kell számítani. A több tíz méteres szikla-bevágások optimális megépíthetőségéhez kőzetmechanikai megfontolásokra, modellezésre van szükség. A hazai gyakorlatban a kisszámú ilyen irányú munkák miatt nem áll rendelkezésünkre kellő tapasztalat, ezért fontos, hogy a nemzetközi szakirodalom alapján tegyük meg az első lépéseket, melyeket majd a helyi viszonyok alapján kell továbbfejleszteni, aktualizálni.

Jelen cikk célja az alagútépítésben bevezetett Q-módszer alkalmazhatóságának ismertetése a legújabb szakirodalmi ismeretek alapján. A Q-módszer az egyik leggyakrabban alkalmazott kőzettest-minősítő eljárás, amelyet az építőmérnökök alagutak, üregek, bányajáratok fejtési módjának és megtámasztásának meghatározására, illetve fúrómagok és kőzetfelületek jellemzésére használnak. Az elmúlt évtizedben igény mutatkozott az eljárás más területeken való alkalmazására is, ezért a módszer egy módosított változata is kidolgozásra került. A Q_{slope} -módszer célja, hogy lehetővé tegye a mérnökök számára a fejtett sziklarézsűk stabilitásának gyors kiértékelését akár a helyszínen is, így a fejtés közben láthatóvá váló kőzettestek állapotának megfelelően optimalizálható a rézsűk dőlésszöge.

Kulcsszavak: Q-módszer, sziklarézsű, útbevágás, állékonyságvizsgálat, rézsűmeredekség

1. Bevezetés

A Q-tényezőt eredetileg alagútépítéshez fejlesztették ki, felhasználva a Norvég Geotechnikai Intézet nagyszámú alagútépítési tapasztalatait. A módszert Barton et al. (1974) munkája mutatja be. Az értékelés a kőzettestre ható feszültségi jellemzők jelzőszámait veszi figyelembe. Kidolgozása óta számos alagútépítésnél használták, mára már az egyik legfontosabb kőzettest-minősítő eljárás. A közelmúltban ezzel a módszerrel történt a Bábaapáti Nemzeti Radioaktív hulladék-tároló tervezése és kivitelezése is.

A szakmában igény mutatkozott a módszernek útbevágások, külszíni bányák, és egyéb sziklarézsűk állékonyságának számítására való megalkotására is. Barton & Bar (2015) ezért kidolgozta a Q_{slope} -módszert, melynek gyakorlati tesztelése még folyamatban van. A Q_{slope} -módszer megerősítés nélküli közúti vagy vasúti bevágásoknak, vagy külszíni bányák egyéni rézsűinek építés

1. Táblázat. A tagoltsági rendszerek mérőszámának meghatározása (Barton & Bar, 2015)

Tagoltsági rendszerek száma	J_n
Masszív tagolatlan kőzet, esetleg néhány tagoltsággal	0,5-1
Egy tagoltsági rendszer	2
Egy tagoltsági rendszer véletlen egyedi tagoltságokkal	3
Két tagoltsági rendszer	4
Két tagoltsági rendszer véletlen egyedi tagoltságokkal	6
Három tagoltsági rendszer	9
Három tagoltsági rendszer véletlen egyedi tagoltságokkal	12
Négy vagy több tagoltsági rendszer sok véletlenszerű egyedi tagoltsággal	15
Töredezett vagy talajszerű kőzet	20

közbeni ellenőrzésére szolgál. Nem alkalmazható nagy lejtők, közbenső rézsűlépcsők stabilitásának meghatározására, továbbá nem használható földkiemelés során létesített rézsűkre sem. A Q_{slope} -módszer kidolgozásának célja egy olyan eljárás megalkotása volt, amely fenntar-

2. Táblázat. A repedésérdességi tényező meghatározása (Barton & Bar, 2015)

Repedésérdességi tényező	J_r
a) a kőzetfelületek érintkeznek, b) a kőzetfelületek mozgás hatására érintkeznek	
Nem folyamatos tagoltság	4,0
Durva vagy egyenetlen, hullámos felület	3,0
Síma, hullámos felület	2,0
Hullámos csuszamlási tükör	1,5
Durva vagy egyenetlen, sík felület	1,5
Síma, sík felület	1,0
Sík csuszamlási tükör	0,5
c) a kőzetfelületek mozgás hatására sem érintkeznek	
A tagoltság agyaggal kitöltött	1,0
A tagoltság homokos, kavicsos vagy töredezett anyaggal kitöltött	1,0

Megjegyzés: Ha a tagoltságok közti átlagos távolság a vizsgált tagoltsági rendszer esetén nagyobb, mint 3 méter, J_r értéke 1,0-val megnövelhető.

tás és erősítés nélküli állapotra a kőzettest tulajdonságainak függvényében megadja a hosszú távú stabilitás eléréséhez szükséges rézsűmeredekséget. A számítás csupán közelítő jellegű, viszont egyszerűsége és gyorsasága miatt alkalmazható az építés alatti irányítófolyamatokhoz; lehetővé teszi például a fejtés alatt álló sziklarézsűk meredekségének helyszíni szabályozását a felszínre bukkanó kőzettömeg minőségétől függően.

2. A módszer bemutatása

A Romana (1985, 1993) munkáiban bemutatott, valamint Magyarországon is sok esetben használt (Vásárhelyi 2003, Gálos & Vásárhelyi 2006) SMR (Slope Mass Rating) értékkel ellentétben a Q_{slope} -módszer a hatásokat figyelembe vevő jelzőszámokat nem összegzi, hanem a kőzettest szerkezetének, a tagoltságoknak, valamint a feszültségi paramétereknek a jelzőszámainak szorzatát, illetve hányadosát számolja. A Q_{slope} értéke minimálisan 0,001, maximálisan pedig 1000, azaz elméletileg kb. 300 000 különböző földtani kombinációt képviselhet (Gálos és Vásárhelyi, 2006).

A nyírószilárdsági paraméterek megadása hasonlóképpen történik az alagútépítésnél bemutatott Q-módszerhez, azonban alagutaknál sokkal érzékenyebb a módszer a tagoltság meghatározására és a megnyíltságra. Ezek

3. Táblázat. A tagoltsági rendszerek mérőszámának meghatározása (Barton & Bar, 2015)

A tagoltság mállottsági tényezője	J_a
a) a kőzetfelületek érintkeznek (nincs agyagkitöltés, legfeljebb bevonat)	
A Összecementálódott, kemény, nem lágyuló, impermeábilis kitöltő anyagok (pl.: kvarc, epidot)	0,75
B Változatlan tagoló kőzetfelület, legfeljebb felületbevonattal	1,00
C Enyhén módosult tagoló kőzetfelület, nem lágyuló ásványbevonattal, homokos, agyagásványokat nem tartalmazó kőzettörmelékkel	2,00
D Homokos- vagy iszaposagyag bevonat, alacsony agyaghányaddal (nem lágyuló)	3,00
E Kis súrlódású vagy lágyuló ásvány/agyag bevonat (pl.: kaolinit, csillámok, klorit, talk, gipsz, grafit, kis mennyiségű duzzadó agyag)	4,00
b) a kőzetfelületek mozgás hatására érintkeznek (vékony [kb. 1-5 mm] agyagkitöltés)	
F Homokos szemcsék, agyagmentes szétmállott kőzettörmelék	4,00
G Erősen túlkonzolidált, nem lágyuló agyagásvány kitöltés	6,00
H Közepesen vagy kissé konzolidált, lágyuló agyagásvány kitöltés	8,00
J Duzzadóagyag kitöltés (pl.: montmorillonit), J_a értéke a duzzadóagyagásvány-tartalomtól és a vízbeszivárgás mértékétől függ	8-12
c) a kőzetfelületek mozgás hatására sem érintkeznek (vastag agyag- vagy kőzettörmelék-kitöltés)	
M Agyag- és szétmállottkőzet- vagy kőzettörmelék-zónák/sávok, J_a értéke az agyag minőségétől függ (Lásd. G/H/J)	6/8/8-12
N Homokos- vagy iszaposagyag-zónák, alacsony agyaghányaddal (nem lágyuló)	5,00
O Vastag, folytonos agyagzónák vagy sávok, J_a értéke az agyag minőségétől függ (Lásd. G/H/J)	10/13/13-20

hatása a Q_{slope} -módszernél kevésbé jelentős, mivel rézsűknél általában nincs (vagy elhanyagolható) a normálfeszültség vagy merevség növekedése a nyírófeszültség kialakulásakor. A Q_{slope} -érték kiszámítása az alábbi módon történik:

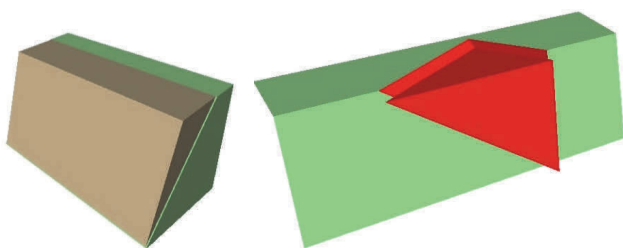
$$Q_{slope} = \frac{RQD}{J_n} \cdot \left(\frac{J_r}{J_a} \right)_0 \cdot \frac{J_{wice}}{SRF_{slope}} \quad (1)$$

ahol az RQD a kőzettest tagoltságára vonatkozó mérőszám, a J_n a tagoltsági rendszerek száma, J_r a repedésérdességi tényező, J_a a tagoltság mállottsági tényezője, J_{wice} a környezeti és geológiai állapotot jellemző tényező, SRF_{slope} a feszültségredukciós tényező. Az (1) összefüggés első hányadosa jellemzi a kőzettest szerkezetének milyenségét, a második tört írja le a tagoltságok állapotát, a harmadik hányados a feszültségi állapotokat reprezentálja.

4. Táblázat. A tagoltságok irányától függő tényező (0-tényező) (Barton & Bar, 2015)

A	B	Leírás
2,00	1,5	nagyon kedvező irányú
1,00	1,0	elég kedvező irányú
0,75	0,9	kedvezőtlen
0,50	0,8	nagyon kedvezőtlen
0,25	0,7	megtámasztás nélkül tönkremegy

Megjegyzés: Az „A” iránytényező alkalmazandó a rézsű legkedvezőtlenebb tagoltsági rendszere esetén. Ha keletkezhet potenciálisan instabil tagoltságok által kimetsződő ék, a „B” iránytényező is alkalmazandó a második tagoltsági rendszere.



1. Ábra. Tagoltságok által kimetszett, potenciálisan instabil kőzetek

Az RQD- (Rock Quality Designation) érték meghatározása megegyezik a Deere (1964) által definiáltakkal, de jelen számításhoz nagyságát elég 5 egészes pontossággal meghatározni. Ez a tényező reprezentálja a kőzettest tagoltságának mértékét. Fúrómagok osztályozásánál százalékban adja meg a 10 centiméternél hosszabb darabok arányát a teljes fúrómaghoz képest. Napjainkban a legtöbb kőzettest osztályozási módszer alapadatként használja. A tagoltsági rendszerek számát (J_n) az 1. táblázatban látható módon kell meghatározni. Ezek mennyiségét főként az adott kőzet keletkezése és az azt ért tektonikai hatások befolyásolják.

Sziklarézsűk állékonyságánál a kőzettestben található tagoltságoknak kiemelt szerepük van (1. ábra), mivel a tagoltságok irányától, érdességétől, mállottságától, a tagoltságot kitöltő anyag jellemzőitől függően több instabil ék keletkezhet a rézsűben, ami lokális tönkremenetelhez vezethet. A tagoltságok tulajdonságait a $(J_r/J_a)_0$ hányados jellemzi, ami üde állapotú, nem kitöltött, érdes érintkező felületeknél a legnagyobb. Ami-

5. Táblázat. A tagoltsági rendszerek mérőszámának meghatározása (Barton & Bar, 2015)

J_{wice}	Száraz környezet	Nedves környezet	Trópusi vihar	Jegesedés
Stabil szerkezet, megfelelő szikla	1,0	0,7	0,5	0,9
Stabil szerkezet, nem megfelelő szikla	0,7	0,6	0,3	0,5
Instabil szerkezet, megfelelő szikla	0,8	0,6	0,1	0,3
Instabil szerkezet, nem megfelelő szikla	0,5	0,3	0,05	0,2

Megjegyzés: Vízvezetés alkalmazása esetén $J_{wice} \times 1,5$ érték alkalmazandó. Lejtő megerősítés esetén $J_{wice} \times 1,3$ érték alkalmazandó. Vízvezetés és megerősítés esetén mindkét tényező alkalmazandó: $J_{wice} \times 1,3 \times 1,5$

kor agyagkitöltés található a tagoltságban, a nyírófeszültség jelentősen lecsökken. J_r és J_a értékét arra a tagoltságra vagy tagoltsági rendszerre kell meghatározni, ami a stabilitás szempontjából legkedvezőtlenebb, mind az irányultság, mind a nyírási ellenállás (τ) tekintetében, ahol $\tau = \sigma_n \cdot \tan^{-1} \left(\frac{J_r}{J_a} \right)$. A tényezőket a 2. és 3. táblázat alapján kell meghatározni, majd a 4. táblázat iránytényezőinek segítségével módosítani. Mivel a tagoltságok menti viselkedéseknél többnyire a nyírófeszültségek érvényesülnek, a következő táblázatokban (2-4. táblázat) a mozgás szó főként nyírást jelent. Az érdességi és mállottsági tényező hányadosát a tagoltságok irányától függően módosítja a módszer. Két jellemző tagoltsági rendszer esetén erre a következő példa szemlélteti az O-tényező alkalmazását:

Az „A” tagoltsági rendszer a meghatározó és legkedvezőtlenebb, a következő tényezők jellemzik: $J_r = 1,5$ és $J_a = 2,0$. A „B” tagoltsági rendszer kevésbé domináns, melyet a következők jellemeznek $J_r = 2,0$ és $J_a = 1,0$. A tagoltságok által kimetsződő ékek e két tagoltsági rendszer és a rézsűfelület által metsződnek ki. „A” tagoltság esetén O-tényező értéke a 4. táblázat alapján 0,5 (nagyon kedvezőtlen). „B” tagoltság esetén O-tényező értéke táblázatból = 0,9 (kedvezőtlen). A teljes rézsűre nézve így a Q_{slope} számításánál $(J_r/J_a)_0$ értéke:

$$(1,5/2,0) \times 0,5 \times (2,0/1,0) \times 0,9 = 0,68$$

6. Táblázat. SRF_{slope} értékének meghatározása (Barton & Bar, 2015)

SRF_a – Fizikai állapot

A	2,5	Enyhén fellazult állapot a feszíni közelség miatt
B	5,0	Laza blokkok, húzási repedések és a kapcsolatok elnyíródásának jelei, időjárás hatásokra érzékeny
C	10	Mint a B eset, de az időjárás hatásokra nagyon érzékeny
D	15	A lejtő előrehaladott eróziós és fellazult állapotban van az időszakos vízerózió és/vagy jegesedési hatások miatt
E	20	Málló lejtő, rajta jelentős anyagmozgásokkal

SRF_b – Feszültség

F	2,5–1	Mérsékelt feszültség-szilárdság arány	$(\sigma_c/\sigma_1 \approx 50 - 200)$
G	5–2,5	Nagy feszültség-szilárdság arány	$(\sigma_c/\sigma_1 \approx 10 - 50)$
H	10–5	Lokális kőzet-tönkremenetel	$(\sigma_c/\sigma_1 \approx 5 - 10)$
J	15–10	Összezúródás vagy képlékeny tönkremenetel	$(\sigma_c/\sigma_1 \approx 2,5 - 5,0)$
K	20–15	Lágy anyag képlékeny kúszása	$(\sigma_c/\sigma_1 \approx 1,0 - 2,5)$

SRF _c – Fő diszkontinuitás		DISZKONTINUITÁSI IRÁNY			
		Kedvező	Kedvezőtlen	Nagyon	Kedvező
L	Fő diszk. kevés agyaggal vagy nélküle	1	2	4	8
M	Fő diszk. RQD ₁₀₀ -zal agyag és zúzott kő miatt	2	4	8	16
N	Fő diszk. RQD ₃₀₀ -zal agyag és zúzott kő miatt	4	8	12	24

Megjegyzés: RQD₁₀₀ = 1 méteres diszkontinuitási merőleges minta; RQD₃₀₀ = 3 méteres diszkontinuitási merőleges minta; σ_c a nyomószilárdság, σ_1 a legnagyobb főfeszültség

A rézsűk stabilitását a környezeti és geológiai adottságok is befolyásolják, ezek figyelembevételére a J_{wice} paraméter használja a módszer (5. táblázat), amely figyelembe veszi a különböző környezeti hatásokat a hosszú távon szabadon álló sziklalejtőkre. Ezek a környezeti hatások tartalmazzák a szélsőséges eseteket is, mint például az intenzív esőzés hatására bekövetkező eróziót és az időszakosan előforduló jegesedést is.

A rézsűre jellemző feszültségi viszonyokat az SRF_{slope} tényező veszi figyelembe, amit a 6. táblázatban közölt SRF_a , SRF_b , ill. SRF_c -értékek közül a maximális határoz meg. Ezek a látható fizikai állapotot, a mért feszültségviszonyokat és a fő diszkontinuitás tulajdonságait vizsgálják. A három közül a nagyobb érték figyelembevételével a számítás a biztonság javára közelít.

3. Kapcsolat a rézsűállékonysággal

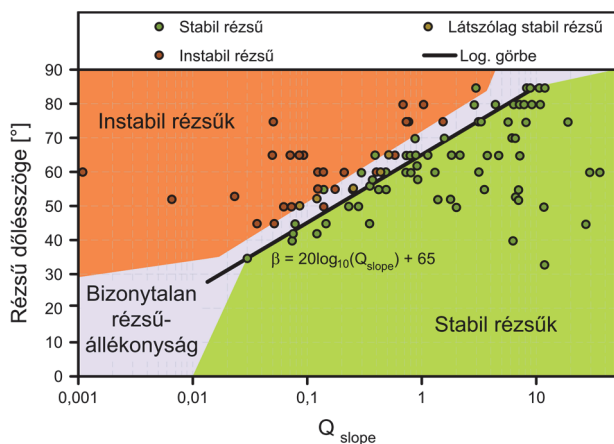
Barton&Bar (2015) kutatása számos 30 méternél kisebb megtámasztás nélküli sziklarézsű esetén vizsgálta a rézsű szögének és a fentebb bemutatott Q_{slope} -értékének

kapcsolatát. Vizsgálataikban ausztráliai, új-guineai, laoszi és panamai autópálya-bevágások, útbevágások, és külszíni bányák tapasztalatait felhasználva fektették le megállapításaikat. Az eredmények a 2. ábrán láthatók, melyen a rézsűk megfigyelt hosszú távú stabilitásának tükrében különböző kategóriák kerültek elkülönítésre. Elemzésük alapján az alábbi területeket határozták meg:

- zöld területrészt: stabil lejtők – háromszöggel jelölt tapasztalati eredmények;
- szürke területrészt: kvázistabil lejtők (több mint valószínű, hogy sokáig tartó esőzések esetén lecsúsznak) – négyzettel jelölt tapasztalati eredmények;
- piros területrészt: összeomlott lejtők – kereszttel jelölt tapasztalati eredmények.

A stabil rézsűket jelölő területrészt lehatároló határértékekhez az alábbi Q_{slope} -értékeket és azokhoz tartozó kritikus lejtésszögeket kapták:

- $Q_{slope} = 0,01$ lejtésszög 25°
(a legközelebbi 35° -os értékből extrapolálva)



2. Ábra. Tapasztalati adatok a rézsűk Q_{slope} -értékének és dőlésszögének összefüggésével, a rézsűmagasságok minden esetben 30 méter alattiak (Barton&Bar, 2015)

- $Q_{slope} = 0,10$ lejtésszög 45°
- $Q_{slope} = 1,00$ lejtésszög 65°
- $Q_{slope} = 10,0$ lejtésszög 85°

A sziklarézsű legmeredekebb szögét (β), melynél még nem szükséges megerősítés, a fentiek alapján a (2) egyenlet mutatja. A képlet értelmezési tartománya a tapasztalati adatok tartományával egyezik meg, így 35° -nál nagyobb, de 85° -nál kisebb lejtésszög esetén értelmezhető.

$$\beta = 20 \cdot \log_{10} Q_{slope} + 65^\circ \quad (2)$$

4. Konklúzió

Már több kőzetmechanikai feladatnál is bebizonyosodott (Deák et al. 2014), hogy a különböző kőzettest-osztályozási módok egyidejű alkalmazása nagyban növeli a tervezés és kivitelezés biztonságát. Az egymástól eltérő módszerek segítségével a kőzettest mechanikai paraméterei, viselkedése, várható tönkremenetele jobban megállapítható. Jelen cikkben a már elterjedt SMR módszer mellett a nemzetközileg is mind jobban használt Q_{slope} tényező alkalmazását mutattuk be a legújabb szakirodalmi összefoglalás alapján. Ezek tükrében javasoljuk, hogy azokon a helyeken, ahol sziklarézsű-állékonysági problémákkal kell számolni, ezt a módszert is használják mind a tervezésnél, mind a kivitelezésnél.

5. Felhasznált irodalom

Barton, N., Bar, N. (2015): Introducing the Q-slope method and its intended use within civil and mining engineering projects, in: Proceedings of the ISRM Regional Symposium EUROCK 2015 & 64th Geomechanics Colloquium - Future Development of Rock Mechanics, Schubert, W. & Kluckner, A. (Eds.), Salzburg, Austria, 7.-10. October 2015. Austrian Society for Geomechanics, Salzburg.

Barton, N., Lien, R., Lunde, J. (1974): Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. Rock Mech. 6, 189–236.

Deák F., Kovács L., Vásárhelyi B. (2014): Geotechnical rock mass documentation in the Bábaapáti radioactive waste repository. Central Eur. Geol. 57(2):197–211.

Deere, D.U. (1964): Technical description of rock cores for engineering purposes. Rock Mech. Eng. Geol. 1, 17–22.

Gálos, M., Vásárhelyi, B. (2006): Kőzettestek osztályozása az építőmérnöki gyakorlatban. Műegyetemi Kiadó, Budapest

Romana, M. R. (1985): New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes. Presented at the Int. Symp. on the Role of Rock Mechanics, Zacatecas, pp. 49–53.

Romana, M. R. (1993): A geomechanical classification for slopes: slope mass rating, in: Comprehensive Rock Engineering: Principles, Practice & Projects. Pergamon Press, Oxford; New York, pp. 575–599.

Vásárhelyi B. (2003): Sziklarézsűk állékonyságának számítása SMR-módszerrel. Közúti és Mélyépítési Szemle 53(4): 191–195.

Application of Q-factor in stability analysis of rock slopes

Abstract: Rock slope stability problems may occur in certain cases of current highway designs and construction works. For optimal construction of rock cuttings more than ten meters there is a need for rock mechanical considerations and modelling. In the domestic practice, there is less experience because of the small number of available works therefore it is important to take the first steps based on international literature and methods to be developed and actualized taking into account local conditions.

The aim of the paper is to present the application possibilities of the Q-method used in tunnel construction based on a review of the recent literature. The Q-method is one of the most frequently applied method for characterizing rock masses used by civil engineers for determination of excavation techniques and reinforcement of tunnels, pits and mine benches as well as describing borehole cores and rock surfaces. In recent decades, there has been a demand for application of the method on other fields therefore a modified variant of the method has been developed. The aim of the Q-slope-method is to provide for engineers a quick assessment of the stability of rock slope exposures even in situ, consequently slope angles can be optimized according to the condition of rock masses becoming visible at exposure.

Keywords: Q-method, rock slope, road cutting, stability analysis, slope steepness

Bögöly Gyula

Okl. építómérnök, BME, Geotechnika és Mérnökgeológia Tanszék

e-mail: bogoly.gyula@epito.bme.hu

Vásárhelyi Balázs

Okl. építómérnök, BME, Geotechnika és Mérnökgeológia Tanszék

e-mail: vasarhelyi.balazs@epito.bme.hu