Kőzettestek GSI szerinti osztályozásának lehetősége kvalitatív módszerrel

Készítette: Hideg Gergely

1. Bevezetés 2
2. Geológiai Szilárdsági Index (GSI) 4
3. A GSI értékének meghatározása kvantitatív módszerekkel 7
3.1 RMR alapú számítások: 7
3.2 Q alapú számítások: 7
3.3 RMi alapú számítások: 8
4. Integrál-geometriai módszer bemutatása 9
4.1 Mérési módszer 9
4.2 Tagoltság megnyílása, hézagtérfogat 13
4.3 Rés élének hossza 14
5. GSI értékének meghatározása az Intergrálgeometriai módszer segítségéve 21
6. Vizsgált területek geológiai bemutatása 25
6.1 Csobánka Csúcs-hegyi kőfejtő 25
6.2 Csobánka Csobánkai út felhagyott kőfejtője 27
6.3 Gánt Újfeltárás 29
7. A területeken mért GSI értékek ismertetése 32
7.1 Csúcs-hegyi kőfejtő 33
7.2 Csobánkai út felhagyott kőfejtő 36
7.3 Gánt Újfeltárás 39

1. Bevezetés

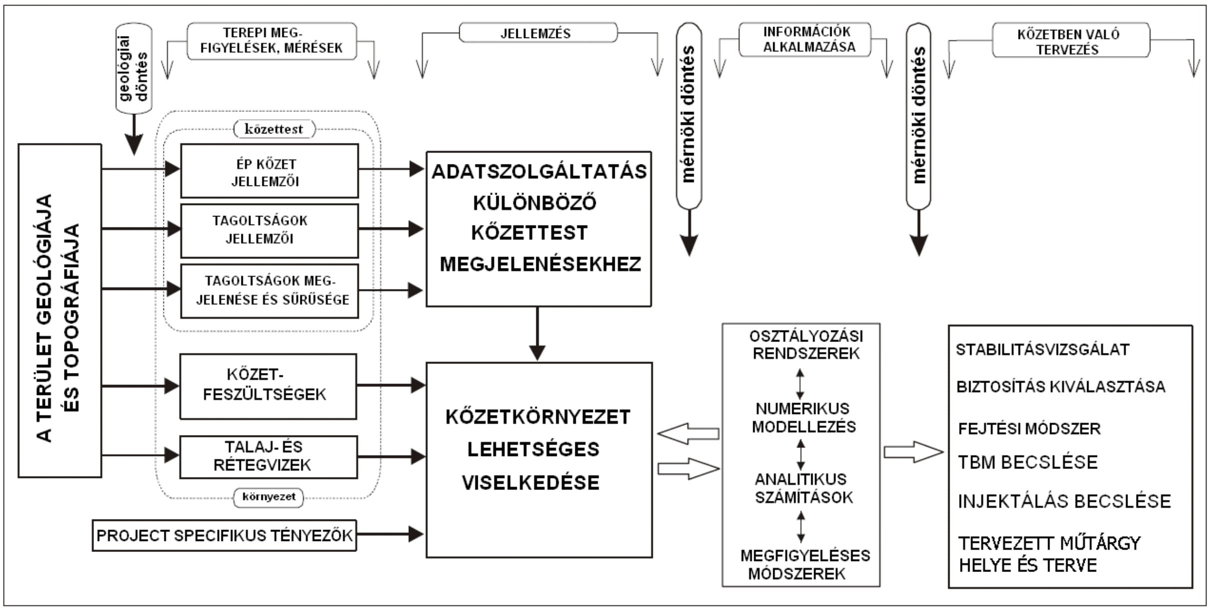
A mérnökgeológia egyik leginkább kutatott irányzata napjainkban a kőzettestek osztályozásának, minősítésének lehetősége. Erre azért van nagy szükség, mert míg az ép kőzetet (kőzettömböt) laboratóriumi körülmények között kellő mélységig lehet vizsgálni, tulajdonságait elemezni, addig a tagoltságokat, különböző okokból létrejött diszlokációkat tartalmazó kőzettest minősítése mai napig nem egyértelmű. Különböző terhelések hatására a sokszor erősen tektonizált szerkezetek, változékony alakváltozást mutatnak, ill. eltérő mechanikai tulajdonságok figyelhetőek meg. Mérnökgeológiai szempontból az ilyen heterogén kőzettestek osztályozása okoz nagy gondot. A különböző földtani paramétereket meghatározó módszer kidolgozása kulcsfontosságú mérnöki szempontból, az osztályozás segítségével következtethetünk a kőzettest mechanikai tulajdonságaira, melynek segítéségével a kőzetkörnyezetben tervezett mérnöki tevékenységek számolhatók, modellezhetőek.

Az utóbbi 50 évben számos módszert fejlesztettek ki a kőzettestek osztályozására, ilyen például a Bieniawski (1973) által bevezetett RMR-módszer, valamint a Norvég Geotechnikai Intézet által kifejlesztett Q-módszer (Barton et al. 1974). Ezen osztályozási módszerek kimondott célja a kőzettest minősítése az alagút építéséhez. A két módszer abban tér el jelentősen egymástól, hogy míg az RMR módszer sekély vezetésű tagolt kőzettest esetén alkalmazható jól, a Q módszer főleg mély vezetésű, nagy in situ feszültség viszonyok esetén optimális. Mivel kidolgozásuk a 70-es évek tapasztalatain alapult, nem vették, nem is vehették figyelembe, nem határozták meg a számítógépes modellezéshez szükséges paramétereket (Gálos és Vásárhelyi, 2006; Vásárhelyi 2016).

Ezt a hiányosságot próbálja orvosolni a Geológiai Szilárdsági Index (GSI), mely a heterogén kőzetkörnyezet leírására is jól alkalmazható (lsd: Hoek et al, 1998; Marinos és Hoek, 2000; Marinos és Hoek, 2001). Ezen kőzettest osztályozás elsődleges célja nem az alagútépítés empirikus módon való méretezése, mint az RMR és a Q-módszereknek, hanem a kőzet minőségének számszerűsített értékének a megadása.

A mérnökgeológia feladata, hogy a kőzetkörnyezet anyagi tulajdonságait ismertesse illetve azokra vonatkozóan a mérnöki munka számára használható értékeket írjon fel. Ezen kőzetkörnyezeti tényezők ismerete mutatja meg az adott terület földtani környezete és az oda tervezett mérnöki létesítmény kölcsönhatását. A kőzetkörnyezet számszerűsített értékének megállapításához a mérnöki és geológusi munka összehangolása elengedhetetlen. Az **1. ábra** a kőzetmechanikában használatos méréseket, megfigyeléseket és osztályozásokat tartalmazza, illetve az adott munkakörök fontosabb feladatait.

Látható, hogy az eredményes munka a különböző szakterületek együttes kezelését követeli meg.



1. ábra Megfigyelések, mérések és osztályozások alkalmazása a kőzetmechanikában

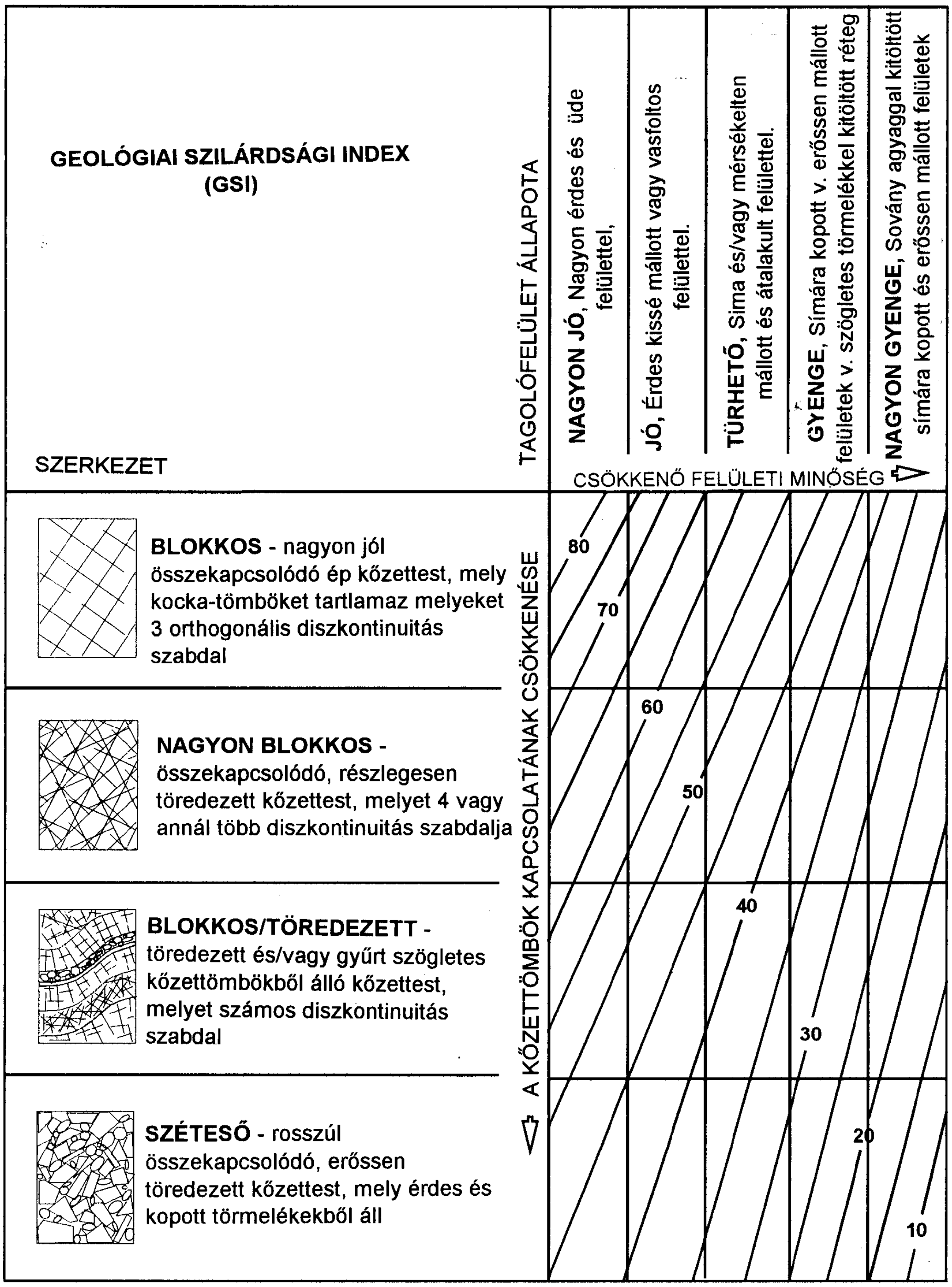
Fontos azonban elkülönítenünk a mérnöki feladatkört a geológus méréseitől és megfigyeléseitől. Egy adott terület topográfiájának meghatározása mindenképp a geológus munkakörébe tartozik, illetve terepi megfigyelések és mérések alapján adott kőzettest, kőzettömb jellemzőinek megadása. Fontos, hogy a környezeti viszonyokat is fegyelembe vegye, hiszen ezen adatok ismeretében hasznos következések vonhatóak le a kőzetkörnyezet jövőbeli viselkedésével kapcsolatban. A kapott adatok felhasználásával adott osztályozási rendszerek, számítások és numerikus modellezés a mérnöki munka fontos elemét képezi. Tervezés ezen szakaszában nyújtanak segítséget a különböző mérnöki vizsgálatok, illetve becslések.

2. 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 leírhassák (magyarul először: Vásárhelyi, 2001, valamint hazai alkalmazhatóságát részletesen Görög et al, 2010 tárgyalja). 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 töredezettek a határoló tagoló felületei.

Ebből kiindulva szerkesztették meg először az 2. ábrát, ahol a mátrix oszlopában a kőzettest tagoltsági viszonyai szerepelnek, azaz, hogy milyen sűrűséggel vannak a tagoló felületek a kőzettestben. A tagoló felület állapotától függ a mátrix sora. A GSI értéke ezek alapján 0 és 100 között változhat: 0 esetén kohézió nélküli – azaz szemcsés – talajt kapunk, ahol az elmélet nem használható. GSI = 100 esetén nincs tagoló felület, tehát a kőzettest és a kőzettömb megegyeznek. Az osztályozásban sem a talajvizet, sem a helyszíni feszültségviszonyokat nem veszik figyelembe, mivel azok külön bemenő adatként szerepelnek a számítási modellekben. Tekintettel arra, hogy a GSI tényező a később bemutatásra kerülő Hoek-Brown töréselmélet egyik bemenő paramétere, ugyancsak figyelmen kívül hagyják az ép kőzet egyirányú nyomószilárdságát – az a törési képletnél külön szerepel.

A GSI érték meghatározását folyamatosan aktualizálták a különböző helyeken megvalósulásra kerülő projektek tapasztalatai alapján. A 3. ábrát gyenge szilárdságú kőzetekre fejlesztették ki, Magyarországon a GSI értékének meghatározását, eocén kori budai márgára való kiterjesztését Görög (2007) dolgozta ki.



2. ábra A GSI meghatározása kiegészítve a gyenge szilárdságú kőzetekre (Hoek et al., 1995 nyomán, Görög et al. 2010 alapján)

Az ábrán a sorokban a kőzettest tagoltsági viszonyai szerepelnek, azaz, hogy milyen gyakorisággal jelennek meg a tagoló felületek a kőzettestben, míg a tagoló felület állapotát az ábra oszlopai mutatják.

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

3. A GSI értékének meghatározása kvantitatív módszerekkel

Mivel a mérnöki számításokhoz szükséges a GSI értékének minél pontosabb ismerte, számos kiszámítási eljárást fejlesztettek ki, melyek alapja a fontosabb kőzettest osztályozási módszerek bemenő paramétereinek felhasználása. Az eddig ismert fontosabb eljárások az alábbiak:

3.1 RMR alapú számítások:

A kőzettömeg geológiai viszonyainak meghatározására szolgáló első megközelítésekben a Bieniawski et. al. (1989) RMR_{1989}-et használták:

$GSI_1 = RMR_{1989} - 5 = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5(=15) - 5$ (1)

ahol

- R_1 - Egyirányú nyomószilárdság (0-15)
- R_2 –RQD érték (3-20))
- R_3 – átlagos tagoltság távolsága (5-20)
- R_4 – repedés menti kőzetminőség (0-30)
- R_5 – víz. Definíció alapján az R_5 száraznak kell tekinteni (=15)

Az RMR_{1989} gyakorlatilag minimum 0 és maximum 100 értékek között változhat, csakúgy mint a GSI.

Így szükséges volt kapcsolatot találni az RMR és a GSI között. Számos tanulmány alapján Hoek et al. (2013) a következő egyszerű képletet javasolta a GSI számításhoz:

$GSI_2 = 1.5R_4 + 0.5RQD$ (2)

3.2 Q alapú számítások:

Barton által kifejlesztett Q alapú rendszerének alkalmazása, ahol a J_n mint rés szám, J_r rés érdessége és J_a a rés módosítási szám szerepel:

$GSI_3 = 15 \log\left(\frac{RQD}{J_n}\frac{J_r}{J_a}\right) + 50$ (3)

Hoek et al. (1995) munkássága alapján ezt az egyenletet a következőképpen kell felírni:

$$\mathrm{GSI}_4 = 9\ln\left(\frac{RQD}{Jn}\frac{Jr}{Ja}\right) + 44 \quad (4)$$

Később Hoek et al. (2013) továbbfejlesztette az egyenletet, és azt javasolta, hogy a Q rendszer Jr, Ja és RQD konstansainak alkalmazásával határozzák meg a GSI-t:

$$\mathrm{GSI}_5 = \frac{52 J_r/J_a}{\left(1+J_{r/J_a}\right)} + 0.5RQD \quad (5)$$

3.3 RMi alapú számítások:

Nem csak Hoek próbált pontosabb megoldást találni a GSI meghatározására. Shen és Barton (1997) kimutatták a kőzetblokkok méretének nagy hatását a kőzet tömegének mechanikai viselkedésére. Palmström elméletét (1995) használják, ahol jC az együttes állapotok együtthatója, Jp a rés térfogatszáma és Vb a réstérfogat. Ezen együtthatók szerint:

$$\mathrm{GSI}_6 = \frac{26.5+8.79\ln J_C+0.9\ln V_b}{1+0.0151\ln J_C-0.0253\ln V_b} \quad (6)$$

Ezek alapján Russo (2009) a következő egyenletet javasolta:

$$\mathrm{GSI}_7 = 153 - \frac{165}{\left[1+\left(\frac{Jp}{0.19}\right)^{0.44}\right]} \quad (7)$$

Ezek az egyenletek, sok laborban vizsgált próbatesteken végzett mérések eredményei, amikhez elengedhetetlen volt a helyszíni mintavétel, majd a későbbi különböző terheléses vizsgálatok. Jól látható, hogy ezen egyenletek egyik állandó eleme az RQD érték. A Harrison et al (2018) publikált cikk kimutatta, hogy a kőzettömeg tulajdonságaira irányuló objektív mérések alkalmasnak bizonyulnak a GSI probabilisztikus értelmezése alapján a valószínűségi tervezéshez. Ehhez a már korábban említett:

$$\mathrm{GSI} = \frac{52(J_r/J_a)}{\left(1+J_{r/J_a}\right)} + 0.5RQD \quad (8)$$

egyenletet vizsgálták. Később kimutatták, hogy a tagoltsági réstérfogat integrálgeometriai meghatározásával egyértelműen beskálázható a kőzettest blokkosodása. A tagoltságok állapota helyszíni csúszási vizsgálatokkal és Schmidt kalapáccsal lettek megállapítva. A helyszíni vizsgálatokkal és az RQD regisztrálásával ezek a mérések alkalmasak a GSI értékének meghatározására a tervezés korai szakaszában.

4. Integrál-geometriai módszer bemutatása

Szintén a kőzettest tulajdonságait vizsgáló kutatómunka a Beyer és Rolofs et. al. (1981) függetlenül az előbb említett publikációtól, kimutatta a réstérfogat és a blokkosodás közötti összefüggést. Ennek a módszernek hazai bevezetése Gálos (1985) nevéhez fűződik. Az ő méréseik, illetve azok levezetése kerül a következőkben leírásra. Megállapították, hogy lényeges a következők vizsgálata:

a) az egységnyi területre eső repedések hosszát (az egy területre jutó átlagos törések egydimenziós értékét),

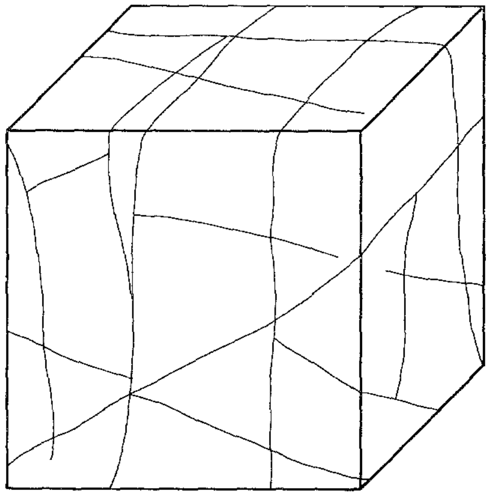
b) a repedés felületét és annak térfogatát

c) a rés nyílását és a rés térfogatát

d) figyelembe kell venni a töréses testek térfogat-függő él hosszát, amelyeket általánosságban lineárisnak tekintünk.

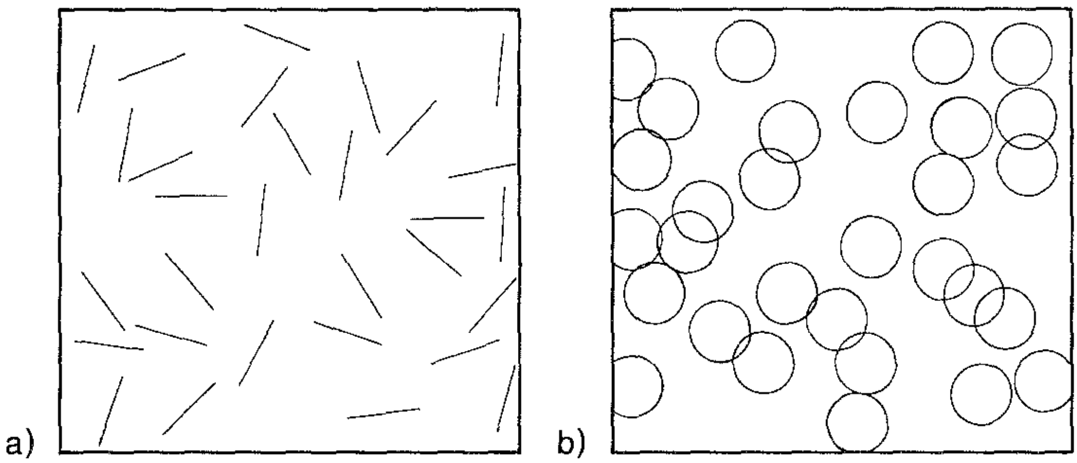
4.1 Mérési módszer

A próbatesten a repedéseket/töréseket, körkörös illetve egyenes szakaszok rácshálózatának beiktatásával kell vizsgálni.



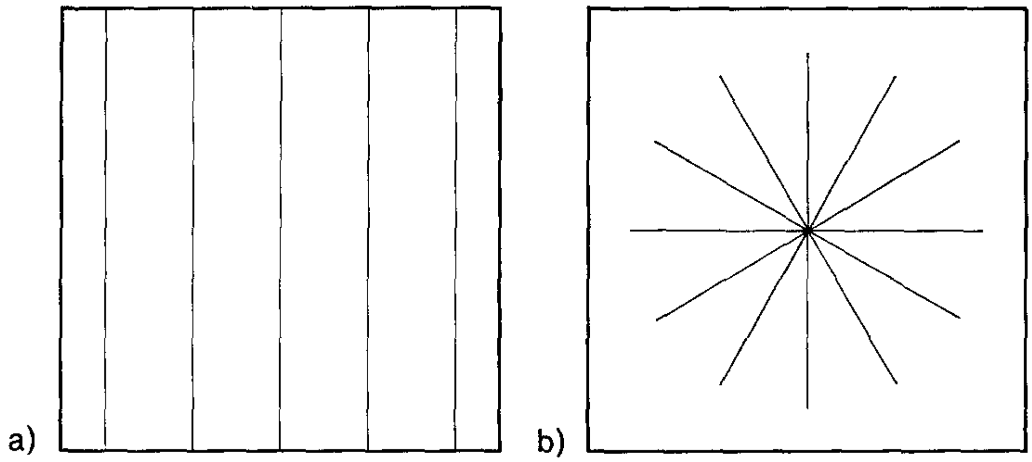
4. ábra Repedezett kőzettest

A repedéseket az előbb említett egyenes szakaszokkal (a) vagy az analóg módon előállított körgyűrűkkel (b) lehet helyettesíteni, később ezekből a repedések tulajdonságaira lehet következtetni. Azonban ezek a rácshálózatok nem teszik lehetővé az anizotrópia kimutatását.



5. ábra Egyenes szakaszok (a) és körgyűrűk (b) rácshálózata

Ehelyett az anizotrópiát egy vonalhálóval (a) illetve annak forgatásával (b) mutathatjuk ki, ahol a vonalak egymáshoz képest 30^0 –os szöget zárnak be.



6. ábra Anizotrópia függőleges (a) és elforgatott (b) mérővonalai

Saltykov et. al. (1970) szerint a lineáris töredezettség, a repedések területéhez kötődik, amit a L_A fog jelölni:

$$L_A=\frac{\pi}{2}\cdot\frac{N_N}{\sum_{i=1}^{r} Li}\left[\frac{m}{m^2}\right] \qquad (9)$$

r a vonalak száma

Li, i$\in \{1,2,\dots.,r\}$ az i-dik vonal hossza [m]

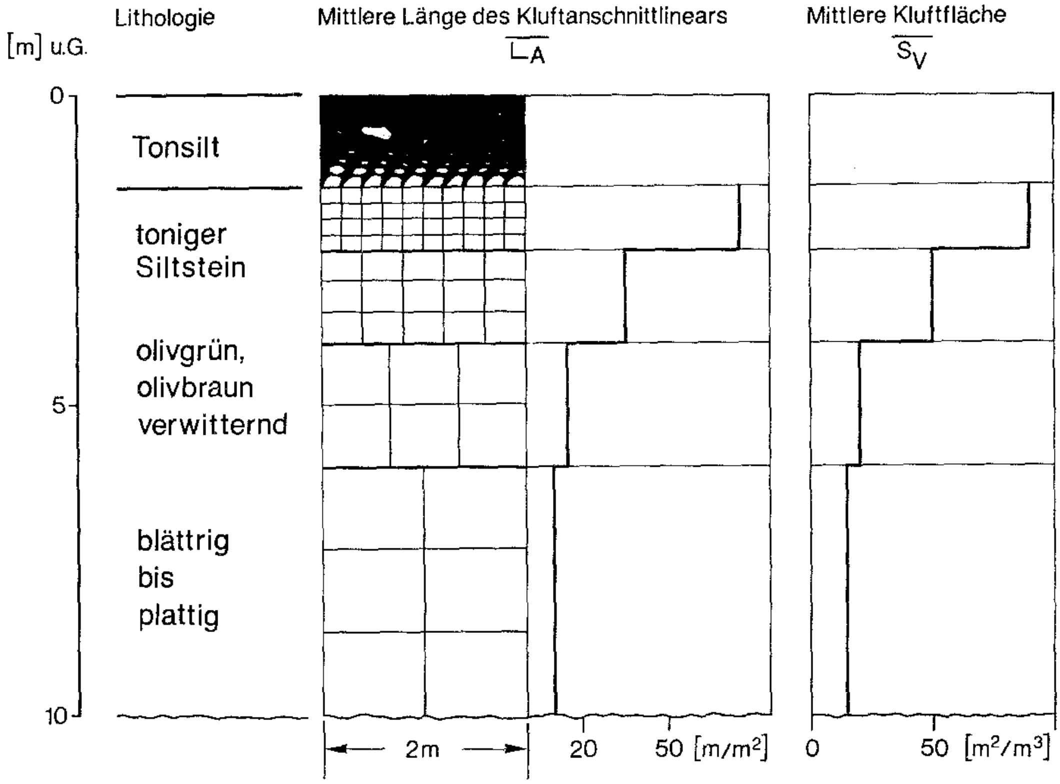
N_N A mérési vonalak és a résvonalak közötti metszéspontok száma, ahol a törések felületnek számítanak

A **7. ábrán** a vizsgált feldarabolódási profil a lineáris L_A hossz átlagát veszi figyelembe, az $\overline{L_A}$-t. A repedés(ek) felületként tekintendők. A $\overline{L_A}$-n alapuló mérések két közel merőleges felületet, ss és (ac), használnak, amely felületeket minden egyes lépésben fokozatosan 30 ° -kal elforgatunk. Ha a mérőfelületek nem egyenlők, akkor a repedés(ek) vetítősíkban ábrázoljuk.

$$\overline{L_A}=\frac{\frac{1}{6}\cdot\sum_{j=0}^{5} L_a^{(ac)}(j)+\frac{1}{6}\cdot\sum_{j=0}^{5} L_a^{(ss)}(j)}{2} \qquad (10)$$

A réseket/repedéseket egydimenziós struktúraként fogalmazták meg, ám a repedések maguk is felületek. Másrészt a repedéseket három dimenzióban, realisztikusabban lehet kezelni. Ezután a vágott felületen lévő minden rés két kapcsolódó résvonalat hoz létre. Az így kapott N'_N szám kétszer olyan nagy lesz, mint a felületi résvonalak és a mérési vonalak metszéspontjainak a száma:

N'n = 2 Nn. (11)



7. ábra A repedés vonal hossza és a résfelület kapcsolata

Divízió és megosztási felületek

Amint az már az előbbiekben említésre került, a repedések felszínnek vagy háromdimenziósnak tekinthetők. A kétdimenziós modellben a térfogategységhez kapcsolódó csúcs Sv, Saltykov et. al. (1970) alapján kiszámítható.

$$S_V = \frac{2N_N}{\sum_{i=1}^{r} L_i}\ [m^2/m^3] \tag{12}$$

Három dimenzióban a törések és a törésszervek két különböző fázist hoznak létre Az S’v közös felületük:

$$S'_V = \frac{2N'_N}{\sum_{i=1}^{r} L_i}\ [m^2/m^3] \tag{13}$$

Az Sv és S'v közötti összefüggés a következő eredményből származik:

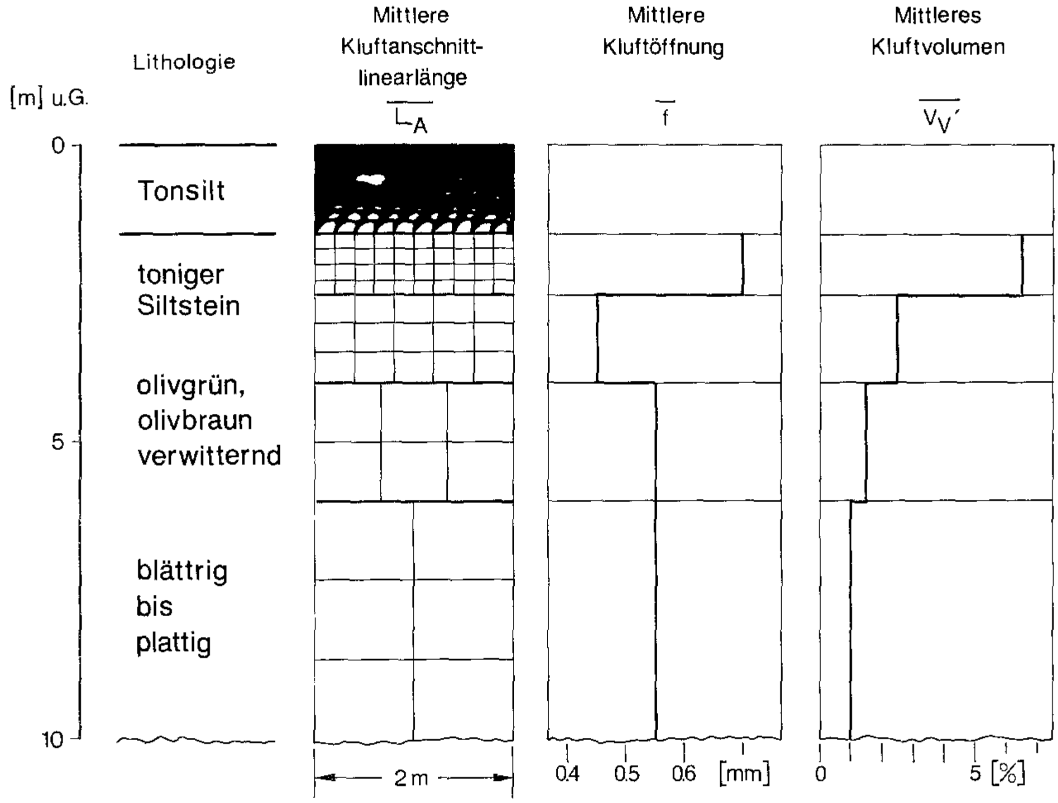
$$S'_v = 2S_v \tag{14}$$

4.2 Tagoltság megnyílása, hézagtérfogat

A réstérfogat (azaz a tagoltság megnyílása) az egységnyi térfogathoz viszonyítva:

$$V'_V = \bar{f} \cdot \frac{1}{2} S'_V \; [m/m^3] \tag{15}$$

ahol $\bar{f}$ az átlagos normál résnyílás



8. ábra A résnyílás és hézagtérfogat kapcsolata

Az **8. ábra** az átlagos résnyílás és az átlagos réstérfogat kapcsolatát szemlélteti. A mérési felületekre az átlag résnyílást egyes irányokban a

$$\overline{f^+} = \frac{1}{k} \cdot n \sum_{i=1}^{n} f_p(i) \tag{16}$$

egyenlet határozza meg.

4.3 Rés élének hossza

A térfogatfüggő él hosszt a következő képlettel lehet kiszámolni:

$$L_V = \frac{2\,N_n}{A}\ [m/m^3] \tag{17}$$

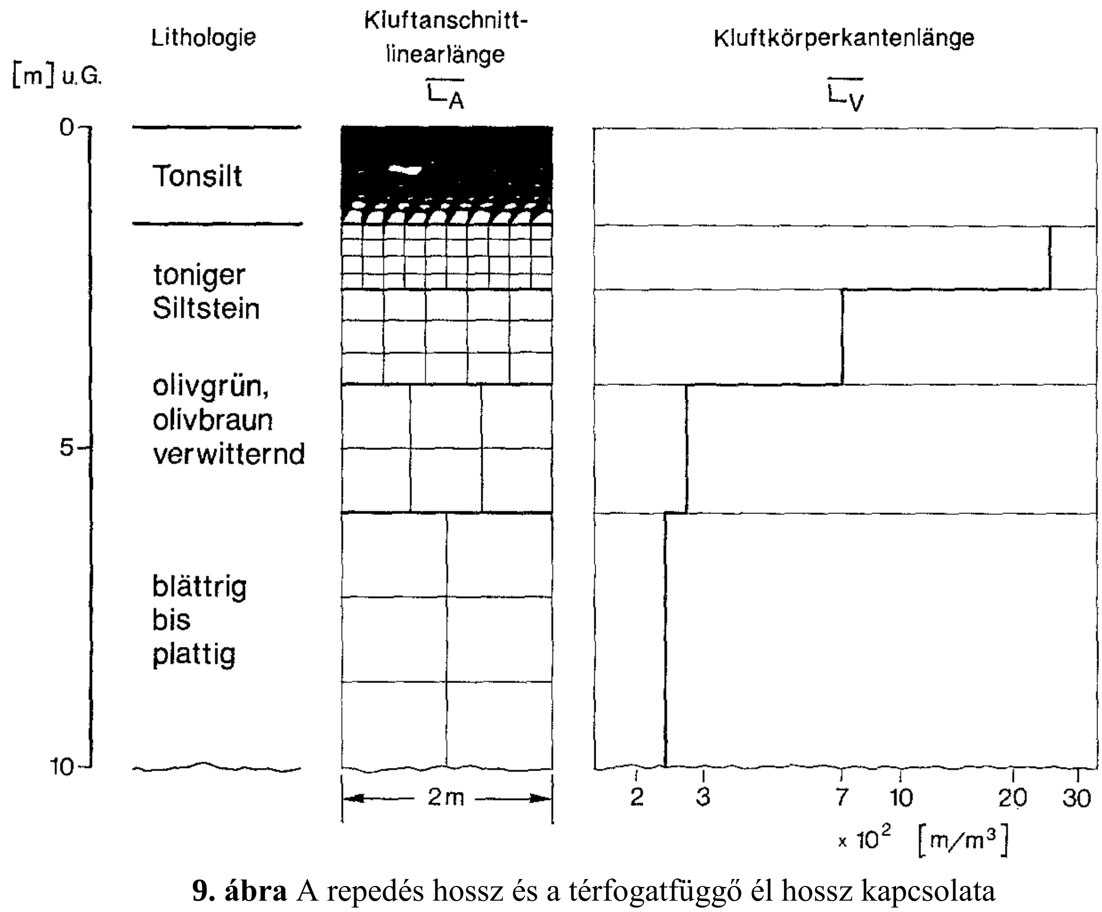
A – a vágott felület mérete

N_n - A törési élek és a vágási felület közötti metszéspontok száma

Ez viszont csak a kétdimenziós repedezettséget mutatja. A háromdimenziós modellt a

$$L'_V = \frac{2\,N'_n}{A} \tag{18}$$

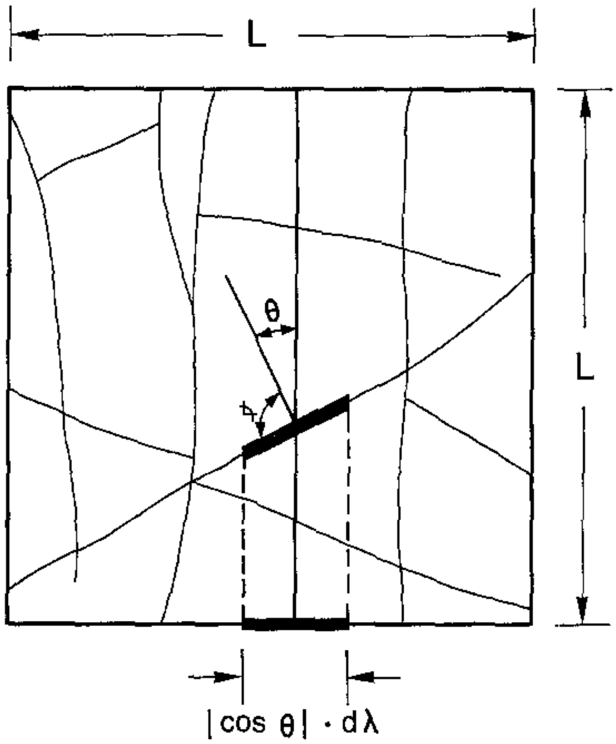
képlet adja. Míg S'_V *és* S_V között van kapcsolat, addig L_V *és* L'_V között nincs. Ez azért van, mert a kétdimenziós kép egyik éle a háromdimenziós modellben kettős és többszöri él attól függően, hogy hány frakció van egymással összefüggésben.



9. ábra A repedés hossz és a térfogatfüggő él hossz kapcsolata

4.4 A főbb képletek

Vegyünk egy négyzet alakú felületet, melynek él hossza legyen L, és amelynek az oldala az egyik mérővonallal párhuzamosan van elhelyezve. A rés hossza λ



10. ábra Résvonal hossz

A P_θ valószínűséget, hogy a dλ a mérési vonal mentén elvágódik:

$$P_\theta = \frac{d\lambda|\cos\theta|}{L} \tag{19}$$

ahol θ a mérővonal és a dλ szakaszra vett normálvektor által bezárt szög.

Ha az összes lehetséges szögre átlagoljuk θ-t, akkor megkapjuk azt a P valószínűséget ahol dλ egy önkényesen kiválasztott mérővonaltól levágódik:

$$P = \frac{\int_0^\pi P_\theta d\theta}{\int_0^\pi d\theta} = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{d\lambda}{L} \tag{20}$$

Itt azért integrálunk 0 és π között, mert nem teszünk különbséget θ és $\theta + \pi$ között. A korábbiakban taglaltak szerint, a mérési felület felszínével azonos irányba és helyzetbe egyenletesen elosztjuk az r mérővonalakat, így $d\lambda$ esetén megadható a metszéspontok száma $r \cdot 2d/\pi \cdot L$, amit ha integrálunk, a következő formában kapunk meg:

$$N_N = \frac{2r\lambda}{\pi L} \tag{21}$$

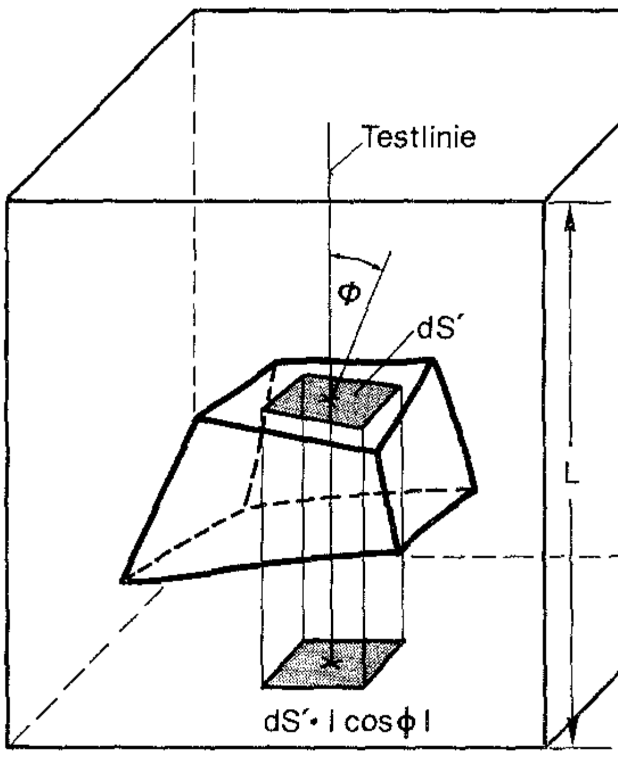
La, a felületfüggő rés hosszúság pedig:

$$L_A = \frac{\lambda}{L^2} \tag{22}$$

És ezekből az adódik:

$$L_A = \frac{\pi L N_N}{2rL^2} \tag{23}$$

Vegyünk egy tetszőleges térfogatú, és L él hosszúságú kockát, ahol a repedés felszíne S', az egyik mérővonallal párhuzamos:



11. ábra Repedésfelület

Egy tetszőleges szelete a repedés felületének, a mérővonal valószínűségével

$$P_\phi = \frac{dS' \cdot |\cos\phi|}{L^2} \tag{24}$$

számítható, ahol ϕ a testvonal és a dS' normált felülete között bezárt szög. A dS' minden irányban vett irányultságának átlagolásával, megkapjuk azt a P valószínűséget, hogy egy tetszőlegesen orientált mérővonalat a dS' felület metsz-e.

$$P = \frac{\int_0^{\pi/2}\int_0^{2\pi} P_\phi d\theta \sin\phi d\phi}{\int_0^{\pi/2}\int_0^{2\pi} d\theta \sin\phi d\phi} = \frac{2\pi\int_0^{\pi/2}|\cos\phi|\sin\phi d\phi}{2\pi}\cdot\frac{dS'}{L^2} = \frac{dS'}{2L^2} \quad (25)$$

Mivel a térben az ellentétes irányok között nem teszünk különbséget, így a csak a térszög felét kell integrálnunk.

Egy r tesztvonal esetén a $r \cdot dS'/2L^2$ metszéspont a dS' ismeretében kiszámítható. Az egész S' törésfelületre integrálva megkapjuk a,

$$N'_N = \frac{rS'}{2L^2} \quad (26)$$

metszéspontot.

A törésfelület egységnyi térfogatát a következő képlettel írhatjuk le:

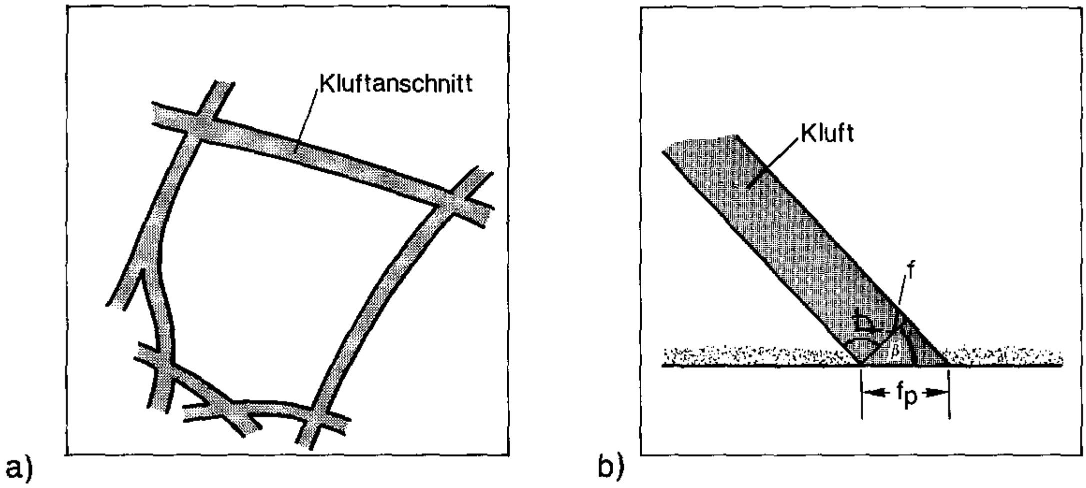
$$S'_V = S'/L^3 \quad (27)$$

amit a $N'_N = \frac{rS'}{2L^2}$ és $S'_V = \frac{2N'_N}{\sum_{i=1}^{r} L_i}$ képletek összevonásából kapunk.

Helyettesítsük a repedés térfogatát egy kocka alakú, L él hosszúságú próbatest térfogatával:

$$V' = V'_V \cdot L^3 \quad (28)$$

A hézagtérfogat kiszámításához elképzeljük, hogy az egész repedés egyetlen testet képvisel. Kiválasztunk egy olyan prizmát, melynek alapja l^2 és magassága f.



12. ábra Rés (a) és annak helyettesítése (b)

Megmutatható, hogy ez a választás nem befolyásolja jelentősen az eredményt. Használhatunk kör alakú hengert vagy forgási ellipszoidot is. A lényeg, hogy a test lapos legyen, és hogy

$$f \ll l \tag{29}$$

igaz legyen rá.

Így a prizma felülete és térfogata megadható az alábbi módon:

$$2l^2 + 4l \cdot f = S'_V \cdot L^3 \tag{30}$$

$$V'_p = f \cdot l^2 \tag{31}$$

Ezeket az egyenleteket l-re rendezve megadható, hogy

$$V'_P = \frac{1}{2} f \cdot S'_V \cdot L^3 - 2f^2 \sqrt{\frac{1}{2} S'_V \cdot L^3 + f^2} + 2f^3 \,, \tag{32}$$

amely közelítőlegesen:

$$V'_P = \frac{1}{2} f \cdot S'_V \cdot L^3 \tag{33}$$

A vágási felületen mért látszólagos hézagok $f_p$általában nagyobbak, mint az igazi hézagok f, így felírható a

$$f_p = \frac{f}{\cos\beta} \tag{34}$$

ahol β a vágási felület és a repedés alapfelülete közt bezárt szög. Minden lehetséges β szöget átlagolva 0 és π/2 között:

$$\frac{\int_0^{\pi/2} \frac{f}{|\cos\beta|} d\beta}{\int_0^{\pi/2} d\beta} \tag{35}$$

Ebből meghatározható egy átlagos látszólagos hézag:

$$\bar{f_p} = \frac{\int_0^{\beta^*} \frac{f}{|\cos\beta|} d\beta}{\int_0^{\beta^*} d\beta} = \frac{\bar{f}}{\beta^*} \ln\left(\frac{1}{\cos\beta^*} + \tan\beta^*\right) \rightarrow \bar{f} = \frac{\bar{f_p}\beta^*}{\ln\left(\frac{1}{\cos\beta^*} + \tan\beta^*\right)} = \frac{1}{k} \cdot \bar{f_p} \tag{36}$$

A β^* a szög felső határa a vágási felület és a normál a vágási felület között. A β^*-nak kisebbnek kell lennie mint π / 2. β^* -t úgy kell megadni, hogy a mért látszólagos rés nem több, mint tízszerese legyen az igazi résnyílásoknak:

$$f_p \leq f \cdot 10 \tag{37}$$

Ez körülbelül $\beta^* \approx 85°$ estében teljesül.

A maximális szögfüggvény β^*mintáról mintára változhat, ezért egy átlagos kifejezés kell a réstérfogat értékére vonatkozóan:

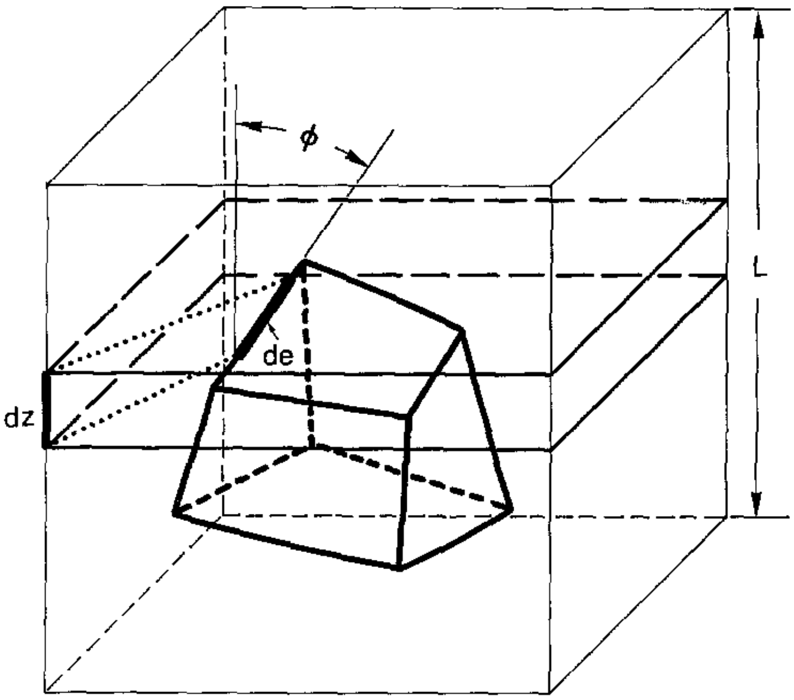
$$V'_V = \frac{1}{k} \cdot \bar{f_p} \frac{1}{2} S'_V \tag{38}$$

ahol *k* korrekciós faktort minden esetben figyelembe kell venni.

β^* [°]	k	$1/k$
45	1,12	0,89
60	1,26	0,80
70	1,42	0,70
80	1,74	0,57
85	2,11	0,47
86	2,23	0,45
87	2,40	0,42
88	2,64	0,38
89	3,05	0,33
89,9	4,49	0,22

13. ábra A k korrekciós faktor

A kocka alakú vizsgálati test térfogatát, az L él hosszúságú kocka oldalával párhuzamos vágófelületnek tekintjük. A test teljes él hosszúságát jelölje E (és E' ha a repedéseket/töréseket háromdimenziósnak tekintjük).



14. ábra Repedés él hossz

A vizsgált él hossz egy töredékével, jelölje *de*, megadható az a P_ϕ valószínűség (ϕ függvényében, ami a *de* és a tesztfelület normálja közt bezárt szög), hogy a test a repedés mentén elválik.

$$P_\phi = \frac{de \cdot |\cos\phi|}{L} \tag{39}$$

A fél tér feletti integrációval a tájékozódási függőség megoldható. A fél tér elégséges a probléma már említett szimmetriája miatt. A tájékozottságtól független átlagos valószínűség

$$P = \frac{\int_0^{\pi/2}\int_0^{2\pi} P_\phi d\theta \sin\phi d\phi}{\int_0^{\pi/2}\int_0^{2\pi} d\theta \sin\phi d\phi} = \frac{\frac{de}{L} \cdot 2\pi \int_0^{\pi/2} |\cos\phi| \sin\phi d\phi}{2\pi} = \frac{de}{2L} \tag{40}$$

Ami az összes él hosszra integrálva, megadható a

$N_n = \frac{E}{2L}$ metszéspont. Ebből megadható az egységnyi térfogat él hossza.

$$\frac{E}{L^3} = \frac{2N_n}{L^2} \tag{41}$$

Itt az L^2-et helyettesíthetjük a már korábban említett A-val, amely a vágott felület nagysága.

$$L_V = \frac{E}{L^3} = \frac{2N_n}{A} \tag{42}$$

Ezek a vizsgálatok megmutatták, hogy a geotechnikailag fontos tulajdonságokat hogyan lehet geometrikusan meghatározni. Egyszerű számítások alkalmazásával történtek az elemzések, melyek gyakorlatilag minden megfigyelés és vizsgálat esetében alkalmazható. A rés tulajdonságainak kiszámításához egyszerű képleteket használhatók, amelyek hagyományos zsebkalkulátorral is elvégezhetők. Ezenkívül a tagoltsági távolság és a résméret-eloszlás, valamint az anizotrópia nagyobb arányú átlagolása is kimutatható.

5. GSI értékének meghatározása az Intergrálgeometriai módszer segítségéve

Ahogy az Beyer és Rolofs et. al. (1981) cikkéből kiderül, összefüggés van a kőzet blokkosodása és a réstérfogat között. A terepen végzett mérések és egyszerű számítások ezt igazolnak alátámasztani. Ehhez szükséges ismernünk a mérővonal hálózat vonalainak számát *r*, az i-dik mérővonal hosszát illetve a mérővonalak és résvonalak metszéspontjainak számát. Ezen adatok ismeretében megállapítható az RQD értéke.

$$RQD = \frac{\sum h_{10}}{h_b - h_a} \cdot 100\ [\%] \tag{43}$$

h_{10} - a 10 cm-nél hosszabb darabok hossza

h_b és h_a különbsége jelöli a mérővonal hálózat magasságát

Mérővonal hálózat segítségével az eredetileg fúrómagokból mért RQD értéket, terepi körülmények között is meg lehet határozni, az ismert és mért adatok megfelelő helyre való beillesztésével.

A 1. képen egy 100x100 cm-es mérővonal hálózattal való mérés látható, ahol a mérővonalak száma ismert, 6, minden i-dik mérővonal hossza megállapítható, illetve megfigyelhetők a mérővonalak és a résvonalak metszéspontjai.

1. kép Példa mérővonal hálózatos mérésre

Harrison et. al. (2018) alapjául véve ahol a GSI értékét a

$$GSI=\frac{52(J_r/J_a)}{(1+J_{r/J_a})}+0.5RQD \tag{44}$$

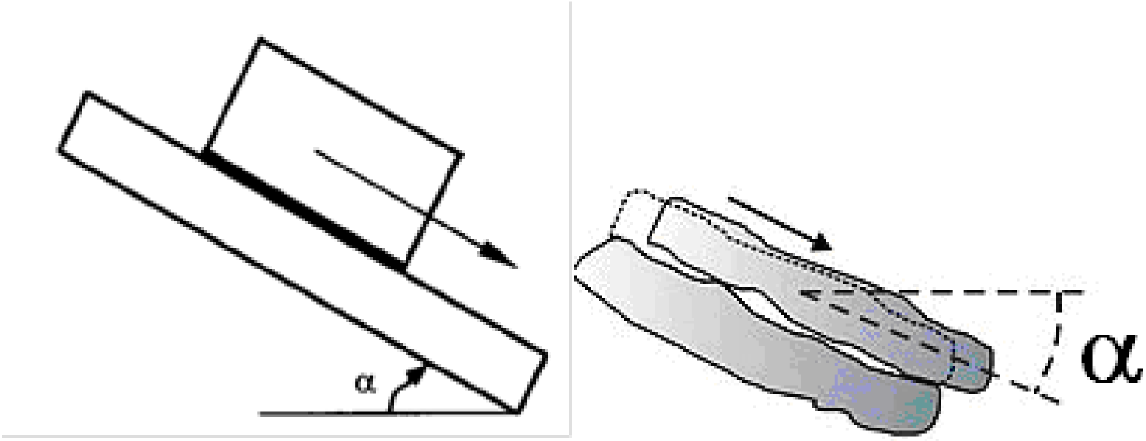
egyenlettel, illetve annak átírásával kívánták elérni. Az ő átiratukban a képlet a következőképp szerepel:

$$GSI=\frac{52+\tan\phi_a}{1+\tan\phi_a}+\frac{RQD}{2} \tag{45}$$

ahonnan

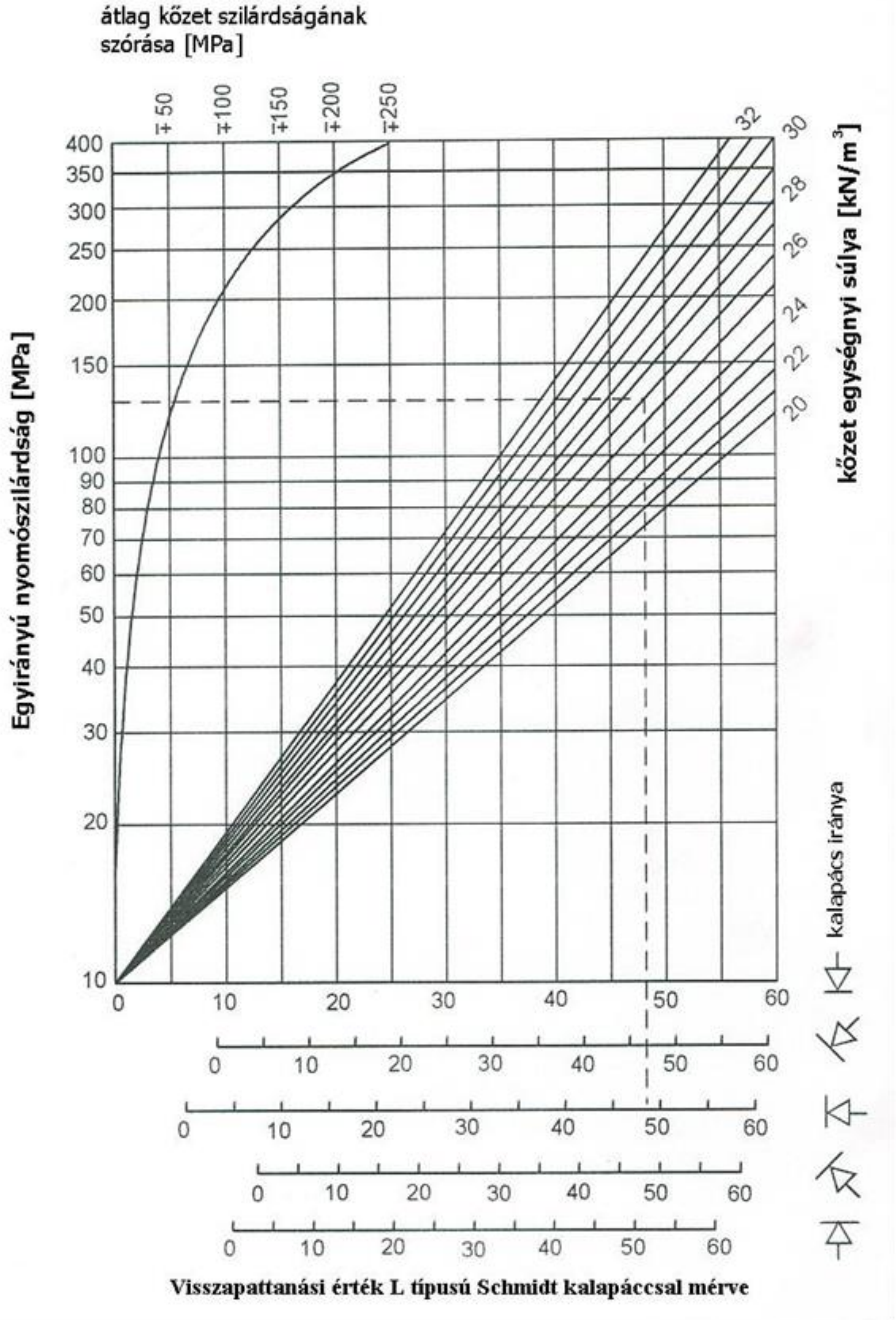
$$\phi_a = JRC\log_{10}(\frac{JCS}{\sigma_n})+\phi_r \tag{46}$$

Barton és Choubey et. al. (1977) alapján tudjuk, hogy így a (44), (45) képlet első tagja meghatározható a csúszási szög illetve az L-típusú Schmidt kalapáccsal mért visszapattanási érték ismeretében.



15. ábra Csúszásos vizsgálat elve

2. kép Mérés L-típusú Schmidt kalapáccsal



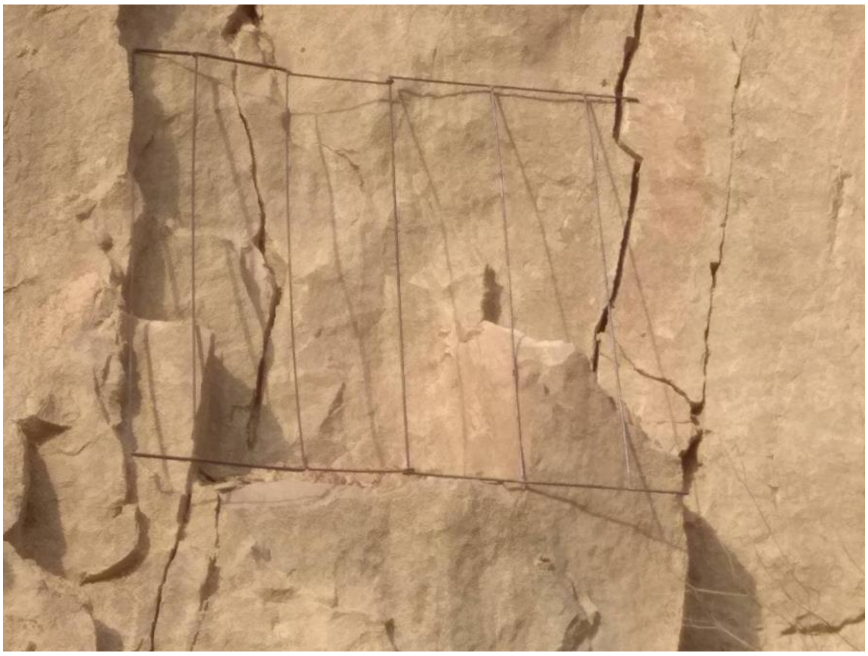
16. ábra Az L-típusú Schmidt kalapács visszapattanási érték és a tagoló felület nyomószilárdsága közötti kapcsolat (Barton & Bandis, 1982)

6. Vizsgált területek geológiai bemutatása

6.1 Csobánka Csúcs-hegyi kőfejtő

3. kép Csobánka Csúcs-hegyi kőfejtő

A Csúcs-hegyen lévő, felhagyott kőfejtőben helyenként meszes, máshol vasas cementáltságú, vörös színű, finom szemcsés, jól osztályozott oligocén homokkő található. A kőzet erősen repedezett, a repedések nagy részben főleg függőlegesek, illetve hidrotermális kitöltések figyelhetők meg bennük. A kitöltések elsősorban baritot és vasoxidokat tartalmaznak. Kivételes barit kristályok találhatók a bánya tetején lévő sziklapillérből, illetve a körülötte lévő törmelékből. A barit főként vastagtáblás formában jelenik meg, helyenként csoportba rendeződött vékony táblák fedezhetők fel. A barit mellett goethit található, mely apró gumók formájában jelenik meg. Habár a terület repedezett a kőzettömbök szilárdsága nem csak a mérések alapján bizonyítható, komoly fizikai munka szükséges egy-egy darab letöréséhez kalapáccsal. A kőfejtő a Táncsics-út végéből induló tanösvényről érhető el. A kőfejtő ÉK-i oldalán fekvő homokkőfal remek mérési felületet biztosított mérővonal hálózatos mérésre.



4. kép Csobánka Csúcs-hegyi kőfejtő RQD érték meghatározása

5. kép Csobánka Csúcs-hegyi kőfejtő felülnézetből

6.2 Csobánka Csobánkai út felhagyott kőfejtője

6. kép Csobánka Csobánkai út felhagyott kőfejtő

A Csobánkai út mentén található felhagyott kőfejtő, erősen lepusztult és helyenként dolomitosodott triász korú mészkövet tartalmaz. Méréseink során a meszes cementáltságú, mikrites kőzet alacsony GSI értéket eredményezett.

7. kép Felhagyott kőfejtő falának vizsgálata

8. kép Csobánkai út felhagyott főfejtőjének felülnézete

A kőfejtő területe valószínűsíthetően a környező hegyek, mint például az Oszoly-csúcs lepusztulásának eredménye. A 7. képen jól észrevehetők a különböző ülepedési rétegek, illetve hogy maga a kőzet erősen és minden irányban repedezett. A terület K-i része tartalmazza a kevésbé töredezett kőzetfelszíneket, a Ny-i oldalon ellenben néhol kézzel is könnyedén bontható a kőfal. Alacsony szilárdsági értéke az előbb említett lepusztulási eredetének, illetve a különböző természeti tényezők eróziójának köszönhető. A beszivárgó esővíz folyamatosan erodálja a területet, sok helyen pedig felfedezhetőek a fagyaprózódás nyomai is.

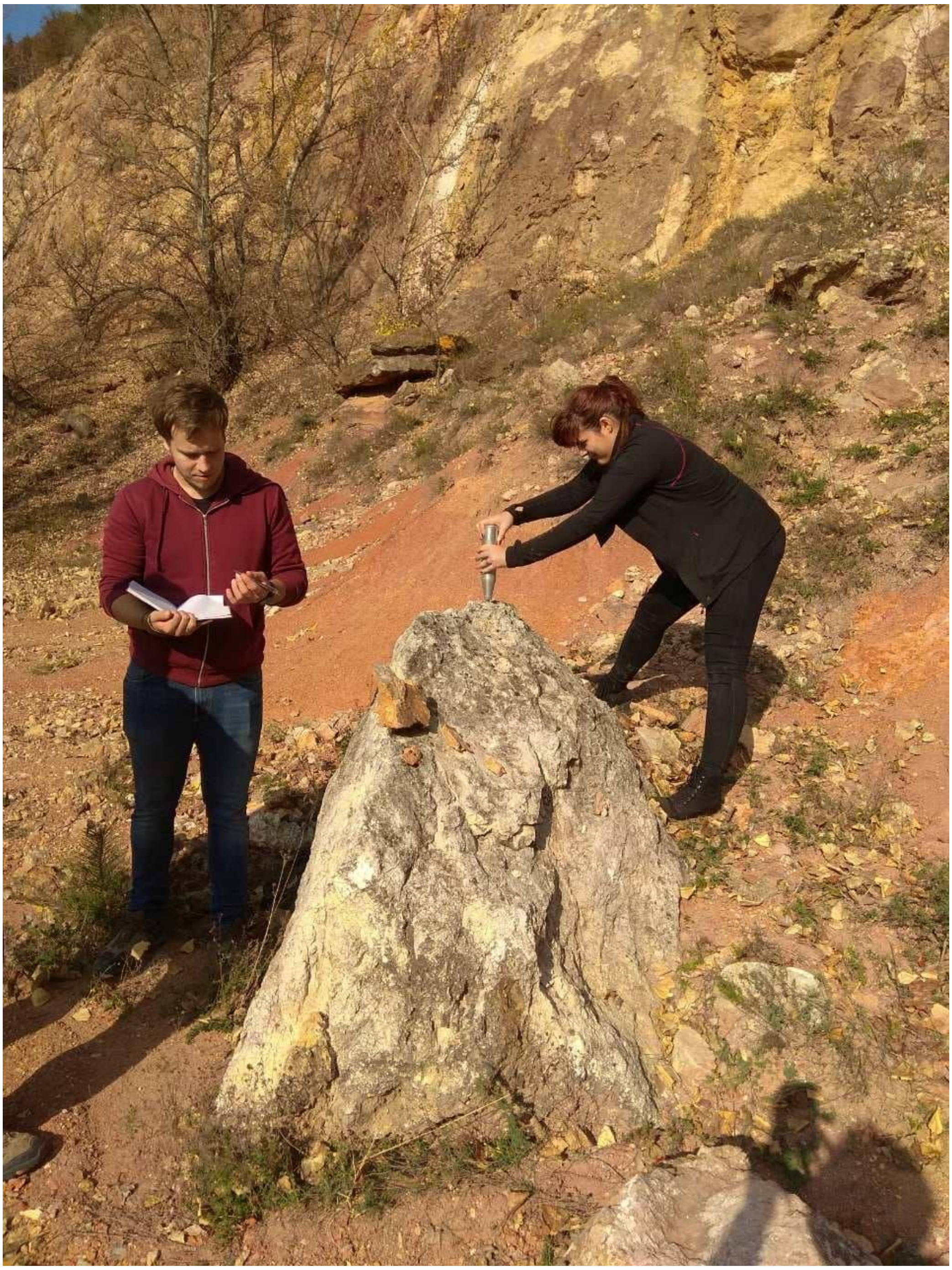
A helyzeten az sem segít, hogy egy ideje a volt kőfejtő területét szemétlerakónak használják.

6.3 Gánt Újfeltárás

9. kép Gánt Újfeltárás

A Gánti bauxitbánya feküjét triász korú dolomit képezi, a törésvonalak mentén medencék alakultak ki, melyekben helyenként több méteres vastagságban rakódott le a felső-kréta korú bauxit, bauxitos agyag. Erre eocén korú mészkő, mészmárga és agyag települt, az Újfeltárás K-i oldalán vékony széntelepek találhatók, melyek szabályos, sík rétegeket alkotnak. Ezen a területen igen mállékony a kőzet, bontása védett földtani alapszelvény jellegén kívül ezért sem ajánlatos. Az Újfeltárás meredek szilafala ÉNy-tól DK-i irányban húzódik amely mentén jól látható a mészkő, mészmárga és a bauxitos agyag közt húzódó határvonal.

Alulról felfelé haladva gyengül a kőzet szilárdsága, ez következtethető a heterogenitásból, illetve a felszínt érő természetes eróziós folyamatokból. Ennek köszönhetően a repedések helyenként kitágulnak, ahol különböző ásványkiválásokat fedezhetünk fel, mint például gipszet és kalcitot.



10. kép Helyszíni L-típusú Schmidt kalapácsos mérés

L-típusú Schmidt kalapács mérési hatékonyságát bizonyítandó, grafikus kolléganő mérései szolgáltattak adatokat a kőzet felszíni tulajdonságaival kapcsolatban.

11. kép Gánti rácsvonalas mérés

12. kép Újfeltárás felülnézetből

7. A területeken mért GSI értékek ismertetése

A három helyszínre a Geológiai Szilárdsági Indexeket a bemutatott módon külön-külön is ismertetem. Mindegyik helyen elvégeztem előbb szemrevételezéssel a GSI meghatározását, majd az Intergrálgeometriai módszer segítségével függetlenül újraszámoltam azokat.

Barton et. al. (1977) képlete alapján a Schmidt kalapáccsal történő mérések az alábbi módon lettek kiértékelve

$$\log JCS \approx 0{,}88\ \gamma\ R_{n(L)} + 1{,}01 \qquad (47)$$

és Zhang et. al. (2005) gyűjtése alapján a különböző kőztek visszapattanási értékei:

Kőzet típusa	$\boldsymbol{R}_{\mathbf{n(L)}}$	**Kőzet típusa**	$\boldsymbol{R}_{\mathbf{n(L)}}$
Agyagkő	15	Kréta	10 – 29
Andezit	28 – 52	Kvarcit	39
Bazalt	35 – 58	Márga	18 – 39
Diabáz	36 – 59	Márvány	31 – 47
Dolomit	40 – 60	Mészkő	16 – 59
Gabbró	49	Pala	29 – 41
Gipsz	30 – 44	Peridotit	45
Gneisz	48	Prazinit	41
Gránit	45 – 56	Kősó	23
Homokkő	30 – 47	Szerpentinit	45
Iszapkő	47	Tufa	13 – 40

Ez alapján került meghatározásra a terület kőzetkörnyezeti viszonyainak számszerűsítése.

Ezen számítások az alábbiak:

7.1 Csúcs-hegyi kőfejtő

Az L-típusú Schmidt kalapácsos mérések adatait a következő táblázat foglalja magába.

L-típusú Schmidt kalapács mérései:

$R_{1(L)}$	40	$R_{11(L)}$	59
$R_{2(L)}$	44	$R_{12(L)}$	49
$R_{3(L)}$	49	$R_{13(L)}$	52
$R_{4(L)}$	53	$R_{14(L)}$	55
$R_{5(L)}$	42	$R_{15(L)}$	50
$R_{6(L)}$	45	$R_{16(L)}$	48
$R_{7(L)}$	46	$R_{17(L)}$	54
$R_{8(L)}$	46	$R_{18(L)}$	49
$R_{9(L)}$	38	$R_{19(L)}$	50
$R_{10(L)}$	44	$R_{20(L)}$	45

Amely adatokból került kiszámításra az átlagos felületi szilárdság, illetve annak minimuma és maximuma.

$R_{20(L)\text{átlag}} = 48$

$R_{20(L)\min} = 38$

$R_{20(L)\max} = 59$

Csúszási szög mérései[°]:

ϕ_{a1}	41	ϕ_{a6}	39
ϕ_{a2}	36	ϕ_{a7}	40
ϕ_{a3}	37	ϕ_{a8}	41
ϕ_{a4}	42	ϕ_{a9}	37
ϕ_{a5}	38	ϕ_{a10}	39

Ahonnan szintén az átlagolt érték mellett kimutathatjuk a minimum illetve maximum csúszási szöget.

$\phi_{a\,10\text{átlag}} = 39°$

$\phi_{a\,10min}$= 36°

$\phi_{a\,10max}$= 42°

A rácshálóval mértem a kőfal RQD értékét és a következő eredményeket kapta.

RQD értékek vonalhálózatos mérés alapján[%]:

RQD_1	86	RQD_7	92	RQD_{13}	89
RQD_2	90	RQD_8	87	RQD_{14}	91
RQD_3	91	RQD_9	90	RQD_{15}	88
RQD_4	89	RQD_{10}	87	RQD_{16}	88
RQD_5	86	RQD_{11}	91	RQD_{17}	90
RQD_6	92	RQD_{12}	88	RQD_{18}	87

$RQD_{18átlag}$= 89 %

RQD_{18min}= 86 %

RQD_{18max}= 92 %

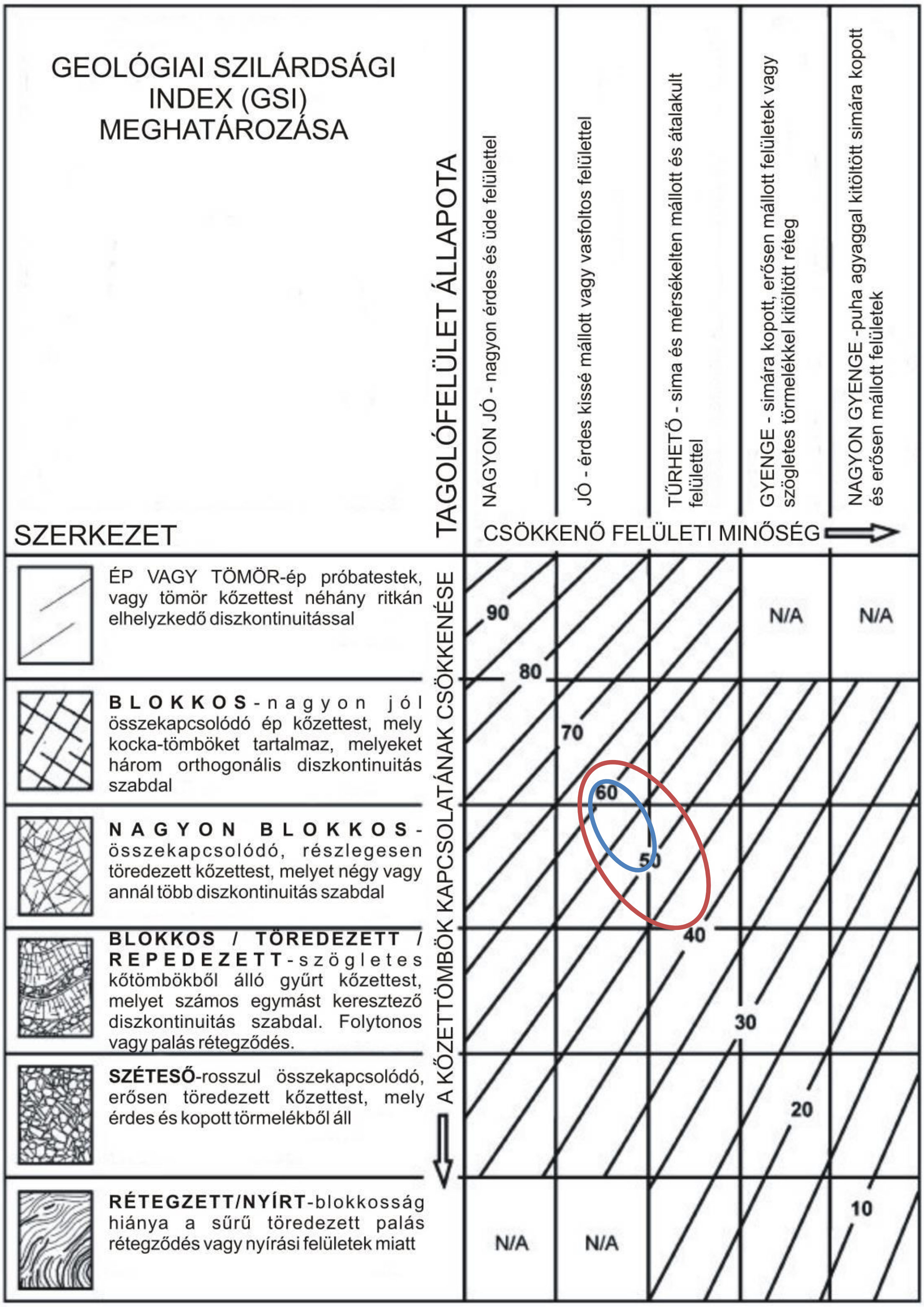
Ezen adatok alapján került meghatározásra:

$GSI_{átlag}$= 57

GSI_{min}= 50

GSI_{max}= 63

A 17. ábra jól mutatja hogy s szemrevételezett GSI tartomány magába foglalja a tényleges, mért tartományt a területre vonatkozóan.



17. ábra GSI mért (kék) és szemrevételezett (piros) tartománya a Csúcs-hegyi kőfejtőnél

7.2 Csobánkai út felhagyott kőfejtő

A terület nagy mértékben mállott felszínei miatt nehéz volt megfelelő helyet találni a mérésre, ahol sikerült, az onnan szerzett adatok alább lettek rögzítve.

L-típusú Schmidt kalapács mérései:

$R_{1(L)}$	16	$R_{11(L)}$	31
$R_{2(L)}$	12	$R_{12(L)}$	49
$R_{3(L)}$	14	$R_{13(L)}$	23
$R_{4(L)}$	19	$R_{14(L)}$	48
$R_{5(L)}$	40	$R_{15(L)}$	43
$R_{6(L)}$	42	$R_{16(L)}$	40
$R_{7(L)}$	48	$R_{17(L)}$	20
$R_{8(L)}$	24	$R_{18(L)}$	13
$R_{9(L)}$	48	$R_{19(L)}$	15
$R_{10(L)}$	32	$R_{20(L)}$	13

$R_{20(L)átlag}= 29.5$

$R_{20(L)min}= 12$

$R_{20(L)max}= 49$

A csúszási szög érése alapján meghatározásra került annak átlaga, valamint alsó és felső határa.

Csúszási szög mérései[°]:

ϕ_{a1}	39	ϕ_{a6}	39
ϕ_{a2}	36	ϕ_{a7}	40
ϕ_{a3}	41	ϕ_{a8}	37
ϕ_{a4}	38	ϕ_{a9}	37
ϕ_{a5}	42	ϕ_{a10}	41

$\phi_{a\,10átlag}$= 39°

$\phi_{a\,10min}$= 36°

$\phi_{a\,10max}$= 42°

RQD értékek vonalhálózatos mérés alapján[%]:

RQD_1	37	RQD_7	43	RQD_{13}	40
RQD_2	41	RQD_8	37	RQD_{14}	42
RQD_3	44	RQD_9	41	RQD_{15}	39
RQD_4	40	RQD_{10}	38	RQD_{16}	39
RQD_5	37	RQD_{11}	42	RQD_{17}	41
RQD_6	43	RQD_{12}	39	RQD_{18}	37

A mérések után a következőket lehetett levonni:

$RQD_{átlag}$= 40%

RQD_{min}= 37%

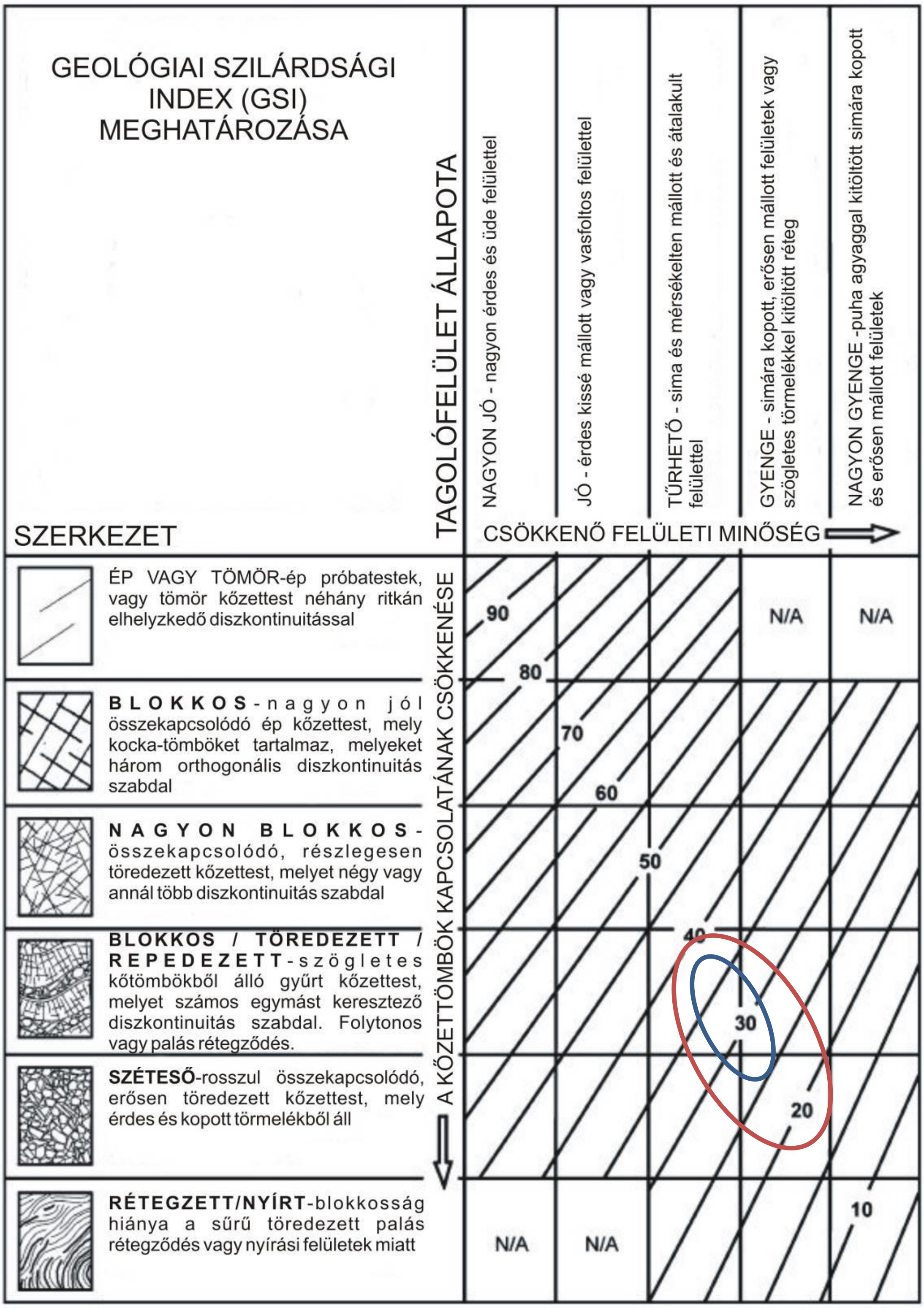
RQD_{max}= 44%

Ahogy arra számítani lehetett a terepi szemrevételezésből, a kőzet alacsony GSI értékeket mutatott, ezt az összefüggést a 18. ábra is jól példázza.

$GSI_{átlag}$= 32

GSI_{min}= 25

GSI_{max}= 39



18. ábra GSI mért (kék) és szemrevételezett (piros) tartománya a Csobánkai út felhagyott kőfejtőjében

7.3 Gánt Újfeltárás

A Gánton mért eredmények táblázatos formában kerültek ábrázolásra. L-típusú Schmidt kalapács mérései:

$R_{1(L)}$	30	$R_{11(L)}$	36
$R_{2(L)}$	45	$R_{12(L)}$	48
$R_{3(L)}$	32	$R_{13(L)}$	30
$R_{4(L)}$	48	$R_{14(L)}$	44
$R_{5(L)}$	36	$R_{15(L)}$	42
$R_{6(L)}$	42	$R_{16(L)}$	45
$R_{7(L)}$	44	$R_{17(L)}$	30
$R_{8(L)}$	22	$R_{18(L)}$	32
$R_{9(L)}$	30	$R_{19(L)}$	22
$R_{10(L)}$	22	$R_{20(L)}$	22

A méréseket követően a következő megállapítások kaptak helyet:

$R_{20(L)\text{átlag}} = 34$

$R_{20(L)\min} = 22$

$R_{20(L)\max} = 48$

A terület egyenetlenségéből és abból adódóan, hogy a kőzet igen egyenetlenül törik, nehéz olyan példányokat találni, melyeken elvégezhető a csúszási szög mérése.

Végül a törmelékben talált két minta szolgáltatta a következő adatokat.

Csúszási szög mérései[°]:

ϕ_{a1}	37	ϕ_{a6}	38
ϕ_{a2}	36	ϕ_{a7}	39
ϕ_{a3}	41	ϕ_{a8}	36
ϕ_{a4}	38	ϕ_{a9}	37
ϕ_{a5}	40	ϕ_{a10}	38

A kapott értékekből megállapításra kerültek a következő eredmények:

$\phi_{a\,10\text{átlag}}$= 38°

$\phi_{a\,10\text{min}}$= 36°

$\phi_{a\,10\text{max}}$= 41°

RQD értékek vonalhálózatos mérés alapján[%]:

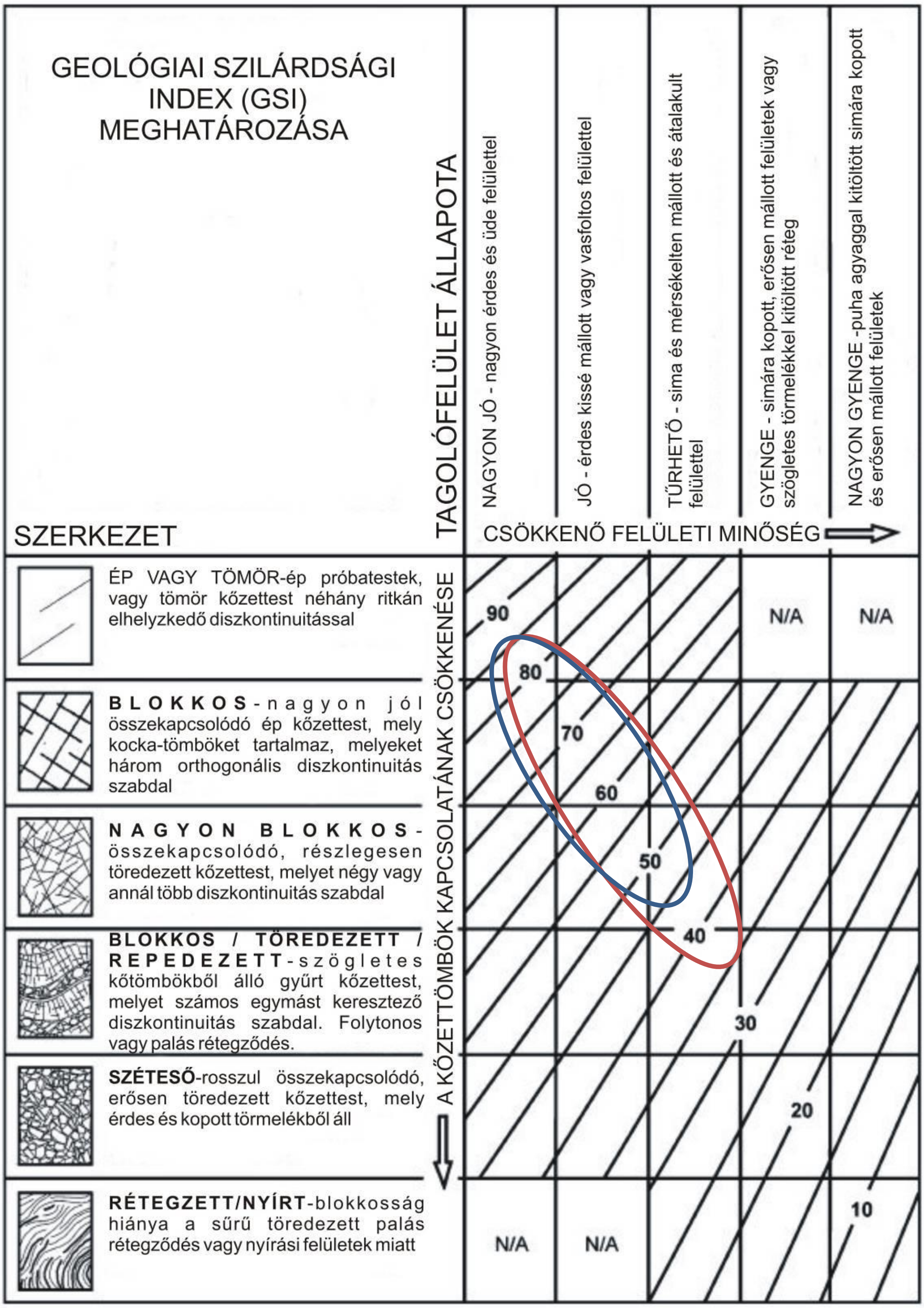
RQD_1	75	RQD_7	79	RQD_{13}	77
RQD_2	84	RQD_8	80	RQD_{14}	85
RQD_3	82	RQD_9	84	RQD_{15}	81
RQD_4	79	RQD_{10}	85	RQD_{16}	79
RQD_5	78	RQD_{11}	74	RQD_{17}	78
RQD_6	83	RQD_{12}	75	RQD_{18}	82

Az így kapott értékekből lett megadva az átlag, valamint a minimum és maximum értéke a kőzet minőségi tényezőjének.

$RQD_{\text{átlag}}$= 80%

RQD_{min}= 74%

RQD_{max}= 84%



19. ábra GSI mért (kék) és szemrevételezett (piros) tartománya Gánt Újfeltárás területén

Gánt Újfeltárásnál mért GSI értékek nem teljesen fedik a szemrevételezés tartományát, ez abból adódik, hogy a mérések a sziklafal alján zajlottak, ahol a szilárdabb kőzet található, míg a szemrevételezésnél az egész alapszelvényre lett megállapítva egy szilárdsági tartomány.

$GSI_{átlag}$= 80

GSI_{min}= 44

GSI_{max}= 87

8. Összefoglalás

Napjainkban a kőzettestek minősítése a legtöbb esetben a Geológiai Szilárdsági Index (GSI) segítségével történik. A kőzetkörnyezetben való tervezésnél ezen értéket a geológus (mérnökgeológus) biztosítja a tervező mérnöknek, aki az erre épülő Hoek-Brown törési határgörbét alkalmazva készíti el terveit. Az optimális tervezéshez szükséges a a GSI minél pontosabb, minél jobb meghatározása. A cél az volt, hogy a tervezés korai szakaszában, a geológus terepi mérések és megfigyelések alapján adatot tudjon szolgáltatni a mérnök részére, az adott terület GSI értékének megadásával.

Jelen dolgozat célja volt egy olyan módszer kidolgozása, melynek segítségével a GSI értéke pontosabban meghatározható. Az ún. Integálgeometriai módszer segítségével lehetőség nyílik a GSI tagoltságának töredezettségének pontos számszerűsítésére.

Két egymástól független cikk összehangolásával (Harrison et al, 2018, valamint Beyer és Rolofs, 1981) bebizonyítottuk, hogy a GSI érték pontosan számítható a terepi mérések megadásával, illetve a hézagtérfogat és a blokkosodás közti összefüggés megállapításával.

Három, egymástól független területen végzett mérési eredmény összevetése azt mutatja, hogy a bemutatott eljárás jól használható a jövőben is.

Irodalom:

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

Beyer F.; Rolofs F. 1981: Integralgeometrische Bestimmung geotechnisch wichtiger Kulfteigenschaften. *Rock Mech*. **14**(1): 43-56.

Bieniawski Z.T. 1973: Engineering classification of rock masses. *Trans S. African Inst. Civil Engs*. **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.

Deere D.U. 1964: Technical description of rock cores for engineering purposes. *Rock Mech. & Engng. Geol*. **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 kőzettagoltság meghatározásának és ábrázolásának módszerei. *Mélyépítéstudományi Szemle*, **33**(4): 171-176.

Gálos M,; Vásárhelyi B. 2006: *Kőzettestek osztályozása az építőmérnöki gyakorlatban*. Műegyetemi kiadó.

Görög P.; Vámos M.; Török Á.; Vásárhelyi B. 2010: A Geológiai Szilárdsági Index (GSI) magyarországi alkalmazhatósága. *Földtani Közlöny* **140**(1): 445-468.

Hoek E.; Marinos P.; Benissi M. 1998: Applicability of the geological strength index (GSI) classification for weak and sheard rock masses – the case of the Athens schist formation. *Bull. Eng. Geol. Env*. **57**(2): 151-160.

Hoek E.; Marinos P.; Marinos V. 2005: Characterization and engineering properties of tectonically undisturbed but lithologically varied sedimentay rock masses. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* **42**(2): 277-285.

Marinos P.; Hoek E. 2000: *GSI: a geologically friendly tool for rock mass strength estimation.* In: Proc. GeoEng2000, Melbourne, Technomic Publ. Lancester, 1422-1446.

Marinos P.; Hoek E. 2001: Estimating the geotechnical properties of heterogenous rock masses such as flysch. *Bull. Eng. Geol. Env*. **60**: 82-92.

Marinos V.; Marinos P.; Hoek E. 2005: The geological strength index: applications and limitations. *Bull. Eng. Geol. Env.* **64**: 55-65.

Stille H., Palmström A. 2003: Classification as a tool is rock engineering. *Tunneling & Underground Space Techn*. **18**: 331-345.

Saltykov, C.A. 1970: Stereometritscheskaja Metallografia. Moskwa: *Isdatelstwo Metallurgija*.

Vásárhelyi B. 2016: *Az alkalmazott kőzetmechanika alapjai*. Hantken kiadó.