

Az NRHT kamratérségében üzemelő szeizmoakusztikus mérőrendszer és az abból származó eredmények bemutatása

DEÁK F.^{1,*}, BAKAI J.², SZÜCS I.³

¹Óbudai Egyetem, Ybl Miklós Építéstudományi Kar, Építőmérnöki Intézet –
Geotechnikai és Tartószerkezeti Tanszék, Budapest 1146, Thököly út 74.

²Geopolita Kft., 2030 Érd, Platánfa utca 59.

³Pécsi Tudományegyetem, Műszaki és Informatikai Kar, Mérnöki és Smart Technológiák Intézet,
7624 Pécs, Boszorkány u. 2.

*E-mail: deak.ferenc@ybl.uni-obuda.hu

Az akusztikus emisszió (AE) vagy szeizmoakusztikus megfigyelések előnye, hogy a kőzettestben a tönkremeneteli csúcsérték előtti, csúcsérték és a tönkremenetel utáni (post failure) feszültségváltozások észlelésére is használható. Hasznos információkat szolgáltat a kőzettest viselkedésének jellemzésére a rideg vagy töréses tönkremenetel minden szakaszában, jóval a mérhető deformációk előtt.

Abból indulunk ki, hogy az AE-aktivitás szorosan összefügg a kőzettestben bekövetkező feszültségváltozásokkal, és az AE-események induláshoz szükséges feszültség szint a kőzettest egytengelyű nyomószilárdságához kapcsolódik (UCS). A rideg tönkremenetel ezen ismeretét felhasználhatjuk a kőzettestben lévő relatív feszültségállapot meghatározására. A kőzettestben lévő feszültségállapot és a kőzettest szilárdságának figyelembevételével egy objektív függvényt származtatunk az általánosított akusztikus emissziók kezdeti küszöbértékének segítségével.

A Bataapáti Nemzeti Radioaktív Hulladék-tárolóban (NRHT) alkalmazott szeizmoakusztikus szenzorok tartalmaznak egy PI-A-3-1 típusú gyorsulásérzékelőt, amely magyar szakemberek (Geopolita Kft.) saját fejlesztésű eszköze. A széles sávú, nagy érzékenységu piezoelektromos gyorsulásérzékelő jeleit kis zajú előerősítők fogadják. Az X, Y, Z irányú gyorsulásjeleket erősítés és szűrés után egy háromcsatornás analóg összegző-átalakító fogadja.

Ez a tanulmány a Bataapáti NRHT-ban alkalmazott AE-mérések elméleti hátterét és a mért adatbázis részletes visszamenőleges elemzését mutatja be, amely a kőzettest feszültség-alakváltozás viselkedésének leírását és a kőzettest rövid és hosszú távú szilárdságának előrejelzését teszi lehetővé.

A geotechnikai és kőzetmechanikai mérnöki tevékenységben a legtöbb háttérelmzés vizsgálat (background analysis) olyan módszereken alapul, amelyek a terepi elmozdulási adatokat használják fel. Ebben a tanulmányban a kőzettest szilárdságának vizsgálatát egy új módszer használatával mutatjuk be, amelyet a kőzettest szilárdsági paramétereinek visszaszámítására fejlesztettünk ki akusztikus emissziós (AE) megfigyelési adatokat felhasználva, véges elemes módszerrel (FEM) és peremelemes módszerrel (BEM) végzett feszültségelemzéssel kombinálva.

A kőzettest e módszerrel meghatározott szilárdsági paraméterei jól korrelálnak a geotechnikai terepi térképezésből kapott és a terepi vizsgálati adatok alapján előre jelzett szilárdsági adatokkal. Ez arra utal, hogy az eljárás hatékonyan alkalmazható a kőzettest szilárdsági paramétereinek AE-monitoring adatokból történő visszaszámítására.

Az elmozdulásmérések, mint például az extenzométerek és a konvergenciamérők rutinszerűen használt *in situ* mérések a legtöbb alagutazás és bányászati projektben. Az elmozdulás az egyik legmegbízhatóbban mérhető mennyiség a terepen. Mivel az alakváltozások is eseménysorozat- és/vagy időfüggőek, és ezek a legkönnyebben elérhető helyszíni mérések, ennek megfelelően a legtöbb kalibrációhoz felhasználhatók konkrét vagy rendellenes alakváltozási események visszamenőleges elemzésére.

A szokatlanul nagy deformációk azonban általában a kőzettest tönkremeneteléhez kapcsolódnak a csúcsérték utáni régióban. Gyakran a reziduális szilárdsági szint környékén a deformációs szabályozási intézkedések nem feltétlenül hatékonyak a nagy, rendellenes deformációk megelőzésére, ezért kulcsfontosságú az AE-monitorozás alkalmazása.

Deák, F., Bakai, J., Szűcs, I.: Presentation of the acoustic emission analysis results collected from the NRWR repository chamber's area

An advantage of acoustic emission (AE) monitoring is that it can be used to capture pre-peak, peak, and post-peak stress changes in the rock mass. It provides useful information for characterizing rock mass behaviour at all stages of fracturing, even prior to measurable deformation.

Based on the fact that AE activity is closely related to stress change in the rock mass and the stress level for AE initiation is associated with the uniaxial compressive strength of the rock mass, one can utilize this understanding of brittle failure

to determine the relative stress state in the rock mass. An objective function is derived from the consideration of stress in the rock mass and rock mass strength using the generalized AE initiation threshold.

The seismo-acoustic sensors used in the Bataapáti National Radioactive Waste Repository (NRWR) contains an acceleration sensor of type PI-A-3-1, which is a self-developed system by Hungarian specialists (Geopolita Ltd.), enabling acceleration measurement. High-bandwidth, high-sensitivity piezoelectric acceleration sensor signals are received by low-noise preamplifiers. After amplification and filtering, the X, Y, Z direction acceleration signals are received by a three-channel analog summing-converter. The summed signals are sent to the central unit via a shielded cable after the undercut filter.

This paper is presenting the theoretical background of AE measurements used in Bataapáti NRWR and a detailed back-analysis study on the measured database which provides the description of the stress-strain behaviour of rock mass and the prediction of the short- and long-term rock mass strength.

Most back-analysis in geotechnical engineering is based on methods that utilize field displacement monitoring data. In this paper, the investigation of the rock mass strength is examined using a novel method which was developed to back-calculate rock mass strength parameters from acoustic emission (AE) monitoring data in combination with finite element method (FEM) and boundary element method (BEM) stress analysis.

The rock mass strength parameters identified from this approach compare well with the strength data predicted from the geotechnical field mapping and field test data, suggesting that the procedure can be used effectively to back-calculate rock mass strength parameters from AE monitoring data.

Displacement measurements like extensometers and convergence meters are routinely conducted *in situ* measured movements. Displacement is one of the reliably measurable quantities in the field. Since deformations are also event-sequence and/or time-dependent and they are the most readily available field measurement for any kind of calibration, they can be used to back-analyze specific or abnormal deformation events. However, large abnormal deformations are usually associated with the failure of the rock mass in the post-peak region. Often, deformation control measures around the residual strength level are not necessarily effective in preventing large, abnormal deformations, so the use of AE monitoring is crucial.

Beérkezett: 2024. szeptember 22.; elfogadva: 2024. december 13.

1. Bevezetés

A Nemzeti Radioaktív hulladék-tároló (NRHT) akusztikus emissziós monitoring rendszerének feladata a tárolókamrákat magába foglaló kőzetkörnyezet megfigyelése. A rendszerek segítségével térben és időben követhetők a feszültségátrendeződési folyamatok, amelyek lehetővé teszik a biztonságot érintő, a kamrák állapotát veszélyeztető események megfigyelését is (Bakai, Káldi 2023, Szűcs 2016).

Az akusztikus emissziós megfigyelőrendszer 24 db állandóan telepített gyorsulásérzékelő jeleit észleli és rögzíti, amelyet 4 db 6-6 csatornás önálló egység lát el. Az egyes rendszerekhez tartozó érzékelők jeleit egy-egy 200 000 minta/sec gyorsaságú, 16 bites felbontású A/D konverter végzi el. A csatornánkénti 33 333 minta/s adatot 2 TByte-os HDD tárolják.

A szeizmoakusztikus monitoring rendszerek telepítési helyszínrajzát az 1. ábra mutatja be.

2. Az akusztikus emissziós rendszerek elméleti alapjai

A kőzettérfogot által magába foglalt inhomogén kőzetösszetétel különböző rugalmasságú és törésszilárdságú anyagokból áll. A vágatokat körülvevő kőzeteket a tektonikai folyamatok és az újabb vágatok, kamrák létrehozása követ-

keztében létrejövő, a törési szilárdságot meghaladó feszültségek összetörnek, a kialakuló litoklázis és repedésrendszer a kőzetösszetétel elemi térfogatokra bontja. A további kőzettönkremenési folyamatok során felszabaduló, egy ilyen elemi térfogatban tárolt rugalmas energia detektálása jelent egy szeizmoakusztikus impulzust. Amplitúdója arányos a kőzettönkremenés helyén vizsgálva az elemi kőzettérfogotban tárolt rugalmas energiával. A rezgés frekvenciaspektrumát a kőzet anyagi minősége és az elemi kőzetdarab geometriai mérete határozza meg (Bakai 1978).

Az észlelt impulzus amplitúdóját és frekvenciaspektrumát a hipocentrum és az észlelési hely között lévő kőzet abszorpciók tulajdonságai mint arányossági tényezők szabják meg.

A 2. ábrán akusztikus emissziós impulzusok láthatók.

Mivel az inhomogén kőzetösszetételben különböző törési szilárdságú anyagok találhatók, a feszültségnövekedés hatására ezek tönkremenése különböző időpontban megy végbe. Ezért a feszültségváltozás ütemét, energiatartalmát (teljesítményét), az impulzusok időegységre eső számával, a szeizmoaktivitással fejezhetjük ki. Az akusztikus emissziós aktivitás nagysága az alábbi egyszerűsített összefüggés alapján közelíthető meg:

$$S_a = \sum_0^T A^2. \quad (1)$$

A csillapítási együttható:



1. ábra A szeizmoakusztikus monitoring rendszerek telepítési helyszínrajza

Figure 1 Installation site map of the seismoacoustic monitoring systems

$$A = A_0 e^{-\alpha x}, \quad (2)$$

ahol

S_a – a mikroszeizmikus aktivitás,

A – az elemi hullámcsomag intenzitása a mérés helyén,

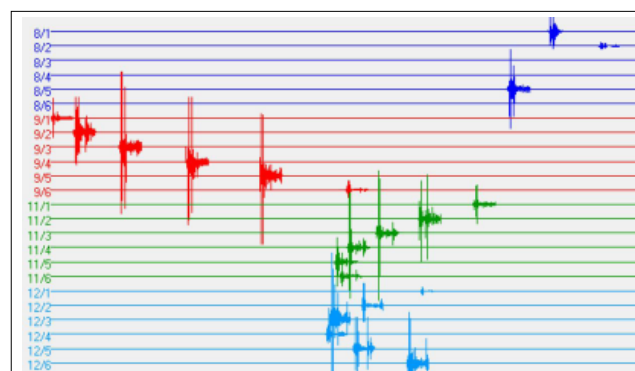
A_0 – az elemi hullámcsomag intenzitása a közettönkremenés helyén,

α – az elnyelési állandó,

x – az epicentrum és a mérési hely közötti távolság.

A szeizmoakusztikai vizsgálatoknál szükség van a mikroszeizmikus impulzus gócpontjának pontos meghatározására, amit a P hullámok első beérkezésének módszerére támaszkodva végezhetünk el. Ennek érdekében az impulzusokat több, célszerűen elhelyezett érzékelővel egyidejűleg szükséges regisztrálni. A szeizmoakusztikus impulzusokkal egy időben számunkra zavaró jelek, zajok is jelentkeznek. Ezeket a zajokat főleg a munkagépek okozzák. Célszerűen tehát úgy kell regisztrálnunk, hogy a zajokat a lehetőséghez képest a legjobban kiszűrjük. A szeizmoakusztikus impulzusok frekvenciatartománya 0-tól több száz kHz-ig terjed. Az NRHT akusztikus-emissziós rendszere csak az 500 Hz feletti tartományt vizsgálja, így csak az AE jelekből származó jeleket rögzíti.

A közettönkremeneteli folyamatok megfigyelésére olyan módszereket kell alkalmazni, amely egyaránt alkalmas a közettörések helyének és energiájának meghatározására. Az energia meghatározásának folyamatát a fentiekben ismertettük. Az AE impulzusok keletkezési helyének, azaz hipocentrumának helymeghatározásához a P hullámok első beérkezésének módszerét alkalmazzuk. Ennek érdekében az impulzusokat több, célszerűen elhelyezett érzékelővel egyidejűleg regisztráljuk.



2. ábra Jellegzetes AE jelalakok

Figure 2 Characteristic AE signals

Alkalmasan elhelyezett érzékelőkkel az emissziókat de-
tektálva és azok tér- és időbeli paramétereit meghatározva
lehetőség nyílik egyes feszültségátrendeződési folyamatok
monitoring célú leképezésére.

Az érzékelőket a megfigyelésre kijelölt térségben az ész-
lelési pontok számától függően úgy helyezzük el, hogy a
kérdéses térfogatot magukban foglalják. Egy adott P pont-
ban, melynek koordinátái ismeretlenek, szeizmoakusztikus
impulzus pattan ki. A szeizmikus hullám homogén izotróp
közegről lévén szó, gömbfelület mentén terjed. T_0 idő múl-
va eléri az E_1 érzékelőt. Mivel az impulzus kipattanási ideje
is ismeretlen, T_0 -t sem ismerjük. Az E_2 , E_3 és E_4 észlelési
pontban az E_1 -be való első beérkezés után t_2 , t_3 , t_4 idővel jut
el a hullám. A további számításoknál ezekre az időkülönbsé-
gekre kell hagyatkoznunk. Az E_1 , E_2 , E_3 , E_4 érzékelők
koordinátái ismertek. Az i -edik érzékelőhöz a P pontból
kiinduló hullámút egyenlete így írható fel:

$$v^2 (T_0 + t_i)^2 = (x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y_i)^2 + (z_0 - z_i)^2, \quad (3)$$

a csillapítási együttható, ahol

v – a longitudinális hullám sebessége,

T_0 – a jel keletkezésétől az első észlelésig eltelt idő,

x_i , y_i , z_i az i -edik érzékelő koordinátái,

t_i – az első beérkezéstől eltelt idő.

A térben táguló gömb alakú hullámút egyenlete:

$$2v^2 T_0 (t_i - t_j) = 2(x_i - x_j)x_0 - (y_i - y_j)y_0 - (z_i - z_j)z_0 - x_i^2 + x_j^2 + y_i^2 - y_j^2 - z_i^2 + z_j^2 - v^2 (t_i^2 - t_j^2). \quad (4)$$

Vezessük be az alábbi jelöléseket!

$$t_{ij} = t_i - t_j,$$

$$x_{ij} = \frac{x_i - x_j}{v^2},$$

$$y_{ij} = \frac{y_i - y_j}{v^2},$$

$$z_{ij} = \frac{z_i - z_j}{v^2},$$

$$c_{ij} = \frac{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2 - x_j^2 - y_j^2 - z_j^2}{2v^2} - \frac{t_i^2 - t_j^2}{2}.$$

Ezeket felhasználva az (1) és (2), a (2) és (3), valamint a
(3) és (4) egyenleteket kivonva egymásból kapjuk:

$$\begin{bmatrix} x_{12} & y_{12} & z_{12} \\ x_{23} & y_{23} & z_{23} \\ x_{34} & y_{34} & z_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_0 t_{12} - c_{12} \\ T_0 t_{23} - c_{23} \\ T_0 t_{34} - c_{34} \end{bmatrix}.$$

Az alábbi egyenletrendszer megoldása adja a hipocent-
rum térbeli koordinátáit, valamint a kipattanás és az első
beérkezés között eltelt időt. A hipocentrum koordinátái-
nak meghatározásához szükséges mátrix:

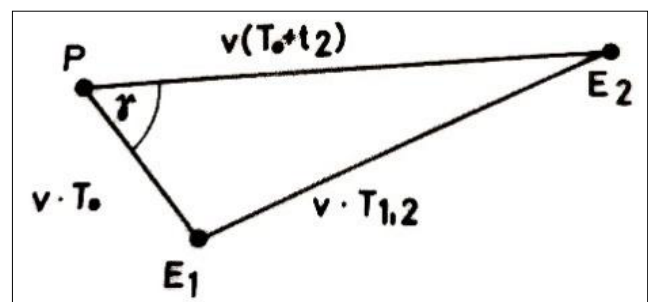
$$\begin{bmatrix} x_{12} & y_{12} & z_{12} \\ x_{23} & y_{23} & z_{23} \\ x_{34} & y_{34} & z_{34} \\ x_{45} & y_{45} & z_{45} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ T_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -c_{12} \\ -c_{23} \\ -c_{34} \\ -c_{45} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Tételezzük fel, hogy a beérkezések időkülönbségei közül
az egyik adat valamilyen oknál fogva hamis, illetve egy
vagy több csatornán egynél több impulzus jelentkezik.

Ha hat indikátornál többet használunk, kimutatható,
hogy hibás adatunk van. A hat beérkezés közül ötöt hatfé-
leképpen tudunk kiválasztani. Ha bármely beérkezés hibás,
mind a hat eredményünk különböző lesz. Ezek alapján
megállapítható, hogy legalább egy adatunk hibás. Ennek
kiszűrésére ad lehetőséget hét érzékelő. Ebben az esetben
21-féleképpen választhatunk ki öt adatot. Így 21 eredményt
kapunk, amelyekből egy hibás adat esetén hat eredmé-
nyünk lesz helyes, 15 pedig téves. Természetesen nem kell
minden esetben kiszámítani az összes lehetséges kombiná-
ciót. Elegendő az adatok kétféle kombinációjával számolni.
Amennyiben a két eredmény egyezik – illetve az általunk
megállapított hibahatáron belül van, mivel a teljes egyezés
csak ideális körülmények között lehetséges –, nem szüksé-
ges tovább számolni, az eredmény helyes. Természetesen
lehetséges ebben az esetben is, hogy valamelyik adatunk
hibás, és csak a véletlen folytán választottunk olyan kombi-
nációt, amelyik csak helyes adatokat tartalmaz. Ennek el-
lenőrzése azonban felesleges, mivel feladatunk a hipocent-
rum meghatározása, és ezt megoldottuk.

Amennyiben a két először számított eredmény nem
egyezik meg, addig számolunk az adatok más kombiná-
cióival, amíg két egyező eredményt nem kapunk, melyeket
az előzőek alapján a hipocentrum koordinátáiként foga-
dunk el. Az előző gondolatmenet szerint legalább hat he-
lyes adat birtokában, N számú érzékelőt használva $N - 6$
hibás adat szűrhető ki.

Mind ez ideig, olyan esetet tárgyaltunk, amelynél a beér-
kező jelek egyazon hipocentrumban és azonos időpontban
keletkeztek. Vegyünk egy olyan esetet, amikor két közel
azonos időben keletkezett mikroszeizmikus impulzusokat
regisztrálunk! Ebben az esetben a csatornákon egymás-
után jelenik meg két-két jel. Amennyiben keletkezési he-
lyük különböző volt, nem valószínű, hogy az előbb kelet-
kezett impulzus jelenik meg minden csatornán elsőnek.



3. ábra | Szeizmikus hullámok elsőbeérkezésének számítása
Figure 3 | Calculation of the first arrival of seismic waves

A beérkezési sorrend szerint tehát a jelek nem választhatók szét. A feladat megoldásának első lépéseként az alábbi megfontolás alapján meghatározhatunk egy, az első beérkezéshez tartozó időkaput, amely megszabja azt a maximális időkülönbséget, amelyen belül az egyes csatornákon megjelenő impulzusok még összetartozhatnak.

A 3. ábra az E_1 és E_2 érzékelő helyzetét mutatja. A P pontból kiinduló szeizmikus hullám először E_1 -ben észlelhető T_0 , E_2 -nél pedig $T_0 + T_2$ idő múlva. Azt az időt, amely alatt a szeizmikus hullám az E_1 – E_2 utat megteszi, jelöljük T_{12} -vel. A PE_1E_2 háromszögre a koszinusztétel értelmében felírható:

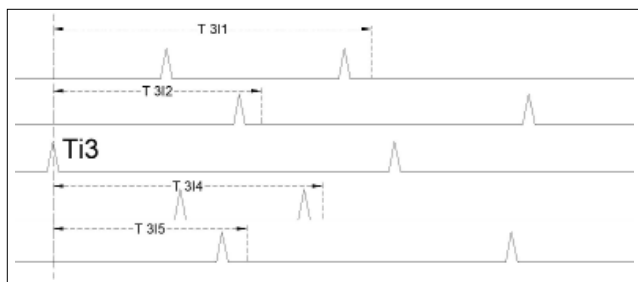
$$v^2 T_0^2 + v^2 (T_0 + t_2)^2 - 2 \cos \alpha v^2 T_0 (T_0 + t_2) = v^2 T_{12}^2,$$

ezt v -vel egyszerűsítve határozzuk meg az időkaput:

$$2T_0^2 + 2T_0 t_2 + t_2^2 - 2 \cos \alpha (T_0^2 + T_0 t_2) = T_{12}^2. \quad (6)$$

Az egyenletből kitűnik, hogy t_2 maximális értéke T_{12} lesz, amelyet $\alpha = 0$ -nál vesz fel. Tehát a maximális időkülönbség, amely egyazon szeizmoakusztikus impulzus két érzékelőn való megjelenése között eltelhet, éppen az az idő, amely alatt a szeizmikus hullám a két indikátor közötti utat megteszi. Ez az idő bármely két érzékelőre megállapítható.

A 4. ábrán öt csatornán két-két beérkezés látható. Ti3 a harmadik érzékelőhöz tartozó időkapukat jelenti ($i = 1-5$).



4. ábra A szeizmikus hullámok első beérkezése számításának schematikus ábrázolása

Figure 4 Schematic representation of the seismic waves first arrival calculation

A feldolgozás menete a következő. Az összes csatornát figyelembe véve mindig az időben legelőször megjelenő jelhez kell megkeresnünk a hozzá tartozó beérkezéseket. Ezzel T_0 -ra a negatív megoldások eleve kizárhatók, valamint az időkapukat is csak pozitív irányba kell felvennünk, amivel a szóba jöhető impulzusok számát jelentősen csökkentjük. Az összetartozó beérkezések kiválogatása csak ötnél több érzékelő esetén lehetséges.

3. Szeizmoakusztikus (AE) mérések értelmezésének kőzetmechanikai vonatkozásai

A feszültség alatt álló kőzetek hallható tartományba eső kisugárzásainak érzékszervi megfigyelése egyidős a bá-

nyászattal, a felszín alatti épített objektumok kialakításához szükséges térképezéssel. A kőzetmozgást megelőző rezgésszerű jelenségek figyelmeztethetnek – bár gyakran későn – a veszélyhelyzetre. Bizonyára nem véletlen, hogy éppen azon a területen indult leginkább fejlődésnek a jelenség kutatása, ahol a szem mint a megfigyelés legközvetlenebb eszköze nem szolgáltat elegendő információt, és előtérbe kerül – az érzékszervi rangsorban egyébként második helyre szorult – hallás. Az emberi fül felbontóképessége azonban véges, a 20 Hz – 20 kHz tartományon kívüli, illetve a hallásküszöb alatti mechanikai rezgésekre érzéketlen. Az akusztikus emisszió jelensége ennél sokkal szélesebb frekvencia- és dinamikatartományt tölt ki folyamatosan, a néhány század Hz frekvenciájú földrengésektől kiindulva a MHz feletti, laboratóriumi törésvizsgálatoknál észlelhető frekvenciáig.

Mivel az észlelt frekvencia- és dinamikusávok különbözősége elsősorban a tönkremeneteli jelenség méretével, a megfigyelés távolságával, illetve az alkalmazott műszerrel van összefüggésben, az akusztikus emisszióval foglalkozó kutatások elkülönültek egymástól (szeizmológia, szeizmoakusztika, nagyfrekvenciás anyagvizsgálatok).

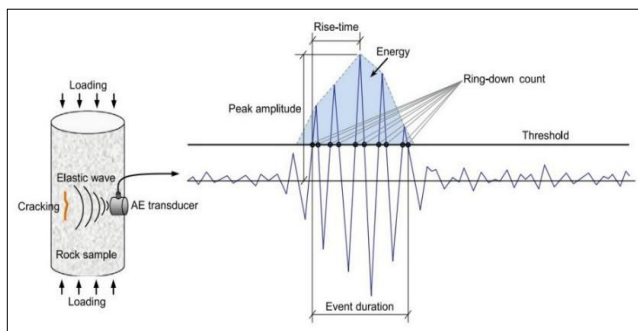
A szeizmoakusztikus (AE) emissziók kutatása több mint fél évszázados múltra tekint vissza, bebizonyítva, hogy vizsgálatuk egyedülálló lehetősége kínál a kőzetek mechanikai tulajdonságainak, deformációinak, törésének tanulmányozására.

3.1. A módszer elvi alapjai

A földalatti üregkiképzés következtében a bányatérsegek, vágatok környezetében levő kőzetekben a rétegterhelés hatására a kőzetminőségtől és a földtani szerkezettől függő, differenciált eloszlású feszültségtartományok alakulnak ki. A nyitott térségeket különböző mértékben lazult zónák, ezeket pedig nagyobb feszültségű zónák veszik körül. A megnőtt feszültség hatására az adott minőségű kőzet rugalmas tartományát meghaladó deformációk jönnek létre, így mikro- és makroméretű kőzettönkremeneteli jelenségek játszódnak le. A differenciált eloszlású feszültségek az inhomogén kőzetkörnyezetben, a különböző szilárdságú kőzetelemekben különböző időpillanatokban töréseket és elmozdulásokat okoznak, ezáltal az üreget körülvevő kőzetek kúszni kezdenek a nyomásárnyékok, általában a nyitott felszín alatti térségek irányába.

A kőzettönkremeneteli folyamatban a rugalmasság határáig igénybe vett kőzet a tárolt rugalmas energia egy részét akusztikus energia formájában a környezetének adja át, amelynek a tovaterjedő hullámai rezgésérzékelőkkel észlelhetők és tanulmányozhatók. A rugalmassági határon túllépő kőzettönkremeneteli események hatásai is akusztikus impulzus formájában detektálhatók, így a kőzetkörnyezet szeizmoakusztikus megfigyelésével a föld alatti térség állékonyságát befolyásoló kőzettörések előtti és alatti folyamatok egyaránt leképezhetők.

A kőzettönkremeneteli folyamathoz akusztikus emissziós (AE-) impulzus tartozik. Ennek jellemzőit (frekven-



5. ábra Egy ép kőzetmintán mért AE hullámforma jellemzői (Zhao et al. 2013)

Figure 5 Characteristics of an AE waveform measured on a intact rock sample

cia és energia) a tönkremenő kőzetben előzőleg tárolt rugalmas energia, illetve a közvetítő közettartomány anyagi és szerkezeti jellemzői határozzák meg. A tovaterjedő rugalmas hullám a különböző fizikai jellemzővel rendelkező (terjedési sebességű és szerkezetű) közegben megtörik, visszaverődik, diszperziót szenved és abszorbeálódik.

Mind laboratóriumi, mind nagyobb anyagtartományok törési kísérleteinek akusztikus emissziós megfigyelésénél általános tapasztalat, hogy a vizsgálati tárgy tönkremenésig menő terhelésekor már csekély terhelés esetén megjelennek az AE-impulzusok. A feszültség növekedésével az időegységre eső impulzusok száma exponenciálisan nő, majd a törés bekövetkeztével megszűnik. Szakaszos terhelés esetén az AE-aktivitás csak onnantól jelentkezik ismét, amikor a terhelés eléri az előbbi szintet.

A felszín alatti fizikai környezetben lejátszódó minden egyes törés során nagyszámú fizikai kötés szakad fel, a teljes tönkremeneteli folyamat pedig ezen törések nagyszámú sorozata alkotja, amelyben az AE-impulzusok a rugalmas hullámok törvényszerűségein megfelelően összeadódnak. Az eredő AE-impulzusokat is az észlelési távolságtól, az összegjel energiájától és a közvetítő közeg (frekvenciaszelektív) abszorpciós tulajdonságaitól függően nagy frekvenciák (1–100 kHz) jellemzik.

Az 5. ábrán látható jellegzetesen exponenciálisan lecsengő jelalak jellemzi az AE-méréseket.

3.2. A módszer gyakorlati alapjai

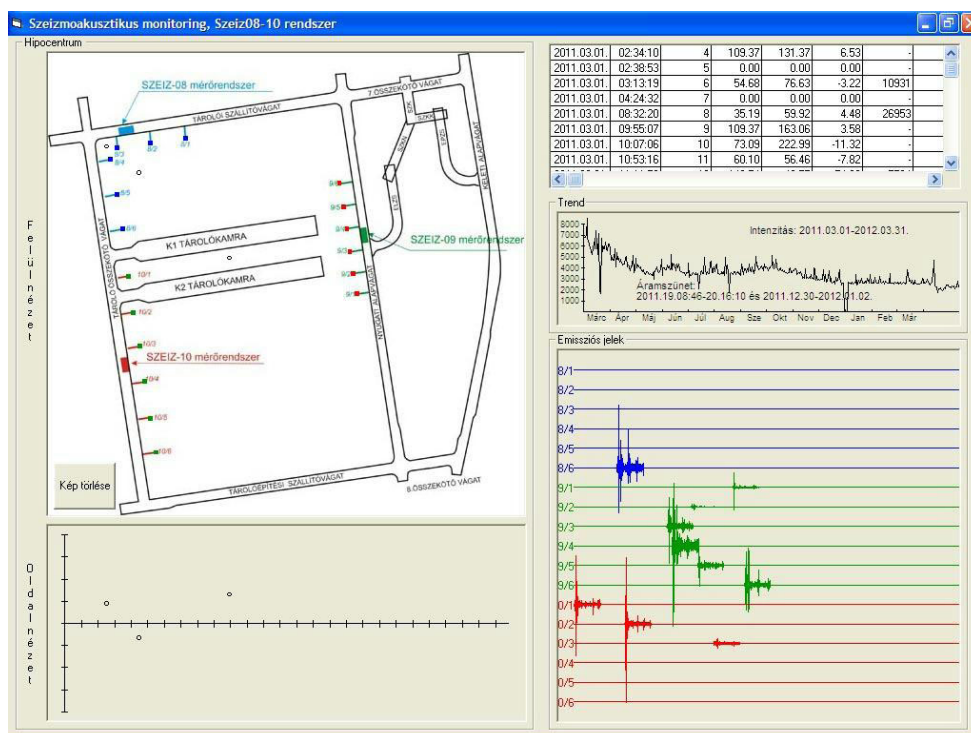
Alkalmasan elhelyezett érzékelőkkel az emissziókat detektálva és azok tér- és időbeli paramétereit meghatározva lehetőség nyílik egyes feszültségátrendeződési folyamatok monitoring célú leképezésére.

4. A térbeli paraméterek meghatározása

Az előző fejezetben bővebben kifejtettük ezt a témakört, ezért a jelen fejezetben eltekintünk ettől.

A régi rendszernél a következő mintavételezés volt jellemző (2011–2014-ből van nagyszámú felvételünk): A 6 csatornás adatgyűjtők összesen 100 000 Hz, azaz csatornánként 16 666 Hz mintavételi frekvenciával dolgoztunk.

A 3 mérőrendszer alkalmazásánál 1/16 666 sec a két szomszédos minta közötti időkülönbség, azaz 0,06 ms.

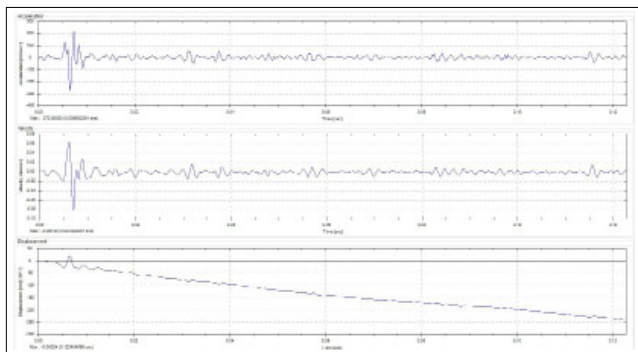


6. ábra A saját fejlesztésű szoftverben látható akusztikus emissziók megjelenítései a különböző csatornákon

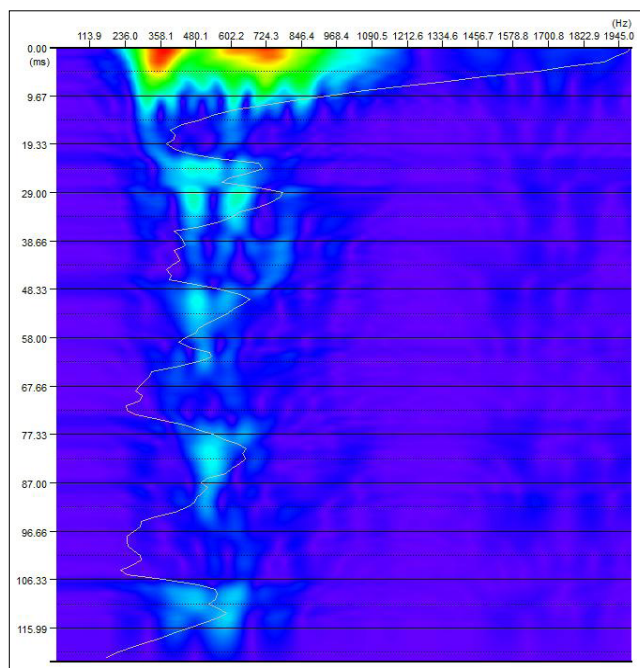
Figure 6 Displays of acoustic emissions in different channels in the self-developed software

(Ez a mintavételi frekvencia megduplázódott a jelenleg is üzemelő 4×6 csatornás új monitoring rendszerénél).

A 7. ábrán a 9/4-es csatorna felvétele látható, feldolgozva és megvizsgálva (az idősorok különböző megjelenítése által, valamint a spektrogram, melyen a fehér vonal mutatja az amplitúdó maximumának lefutását. Ezen látható, hogy a legnagyobb energiafelszabadulás 360 Hz és 730 Hz környékén történt).



7. ábra | A 9/4 csatorna egyik felvételének idősorai
Figure 7 | Time series of the channel 9/4 registration



8. ábra | A 7. ábrán bemutatott 9/4 csatorna felvételének spektrogramja
Figure 8 | Spectrogram of the channel 9/4 registration presented in Fig 7.

5. Kőzetmechanikai szempontú feldolgozások

A feldolgozás során az AE hipocentrumok lokális megjelenítését, valamint intenzitásvizsgálatát végeztük el. Ezt követően egy modern, a nemzetközi gyakorlatban is gyakran használt megjelenítési platformmal dolgoztunk (InSite Lite). Sajnos ez az ingyenesen felhasználható szoftver nem teszi lehetővé a bonyolultabb eloszlás-, illetve klaszteranalízis-vizsgálatokat.

Ezt követően megvizsgáltuk a kamratárság kőzetmechanikai viselkedését a szeizmoakusztikus tapasztalatokra hagyatkozva. Majd az ebből kapott következtetéseket összevetettük az eddig meglévő szakirodalmi, illetve helyszínspecifikus tapasztalatokkal.

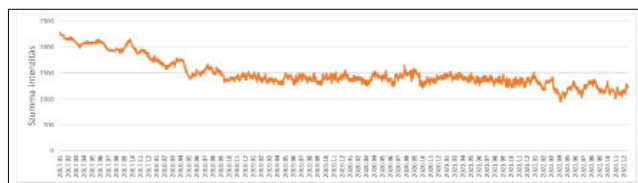
A munka során 3D-s numerikus modellezéseket végeztünk el (kapcsolt modellekkel, amelyek során a statikus viselkedés mellett vizsgáltuk a kőzettest dinamikus terhelésekre adott válaszait is), majd saját kidolgozású eljárással kiemelten a vizsgált időszakot – de összesítve a teljes adatbázis alapján a teljes monitoring időszakot is – figyeltük és következtetéseket vontunk le a kőzettest mechanikai viselkedésével kapcsolatban a teljes tönkremeneteli határgörbéjét alapul véve.

5.1. Régebbi vizsgálataink eredményei

Egy régebbi elemzés során már az előző időszakok feldolgozását elvégeztük, melyek a kamratárság vizsgálatára irányultak. E munka során a következő időszakot vizsgáltuk: 2011. 3. 1. 0:06 – 2015. 12. 31. 21:54; ez összesen 19 141 AE megjelenés, mely mért magnitúdóval rendelkezett, ám a hipocentrumok térbeli meghatározása ezek közül 8 329 esetben történt meg (ennek feltétele a megfelelő számú beérkezés volt). Tehát a teljes körű vizsgálat során 8 329 AE hipocentrummal dolgoztunk az intenzitásbeli és időbeli eloszlásvizsgálatok során.

Később a numerikus peremelemes vizsgálatoknál már csak 7 402 hipocentrummal dolgoztunk. Ennek oka, hogy a teljességében kihajtott kamratárság geometriáját egyben vizsgáltuk időfüggvény nélkül, illetve a hipocentrumok térbeli meghatározásának pontatlanságából is származtatható esetleges hiba miatt, ha valamely hipocentrum a felszín alatti üregrendszer kibányászott térségébe esett, az a szűrés során törlésre került.

Először a hipocentrumvizsgálat során több variációt végeztünk időbeli és intenzitásbeli szűrésekkel. Az újabb vizsgált időszak intenzitásbeli változásokat mutatja be a 9. ábra.



9. ábra | Szumma intenzitás a vizsgált időszak során
Figure 9 | Sum intensity over the period under review

5.2. Jelenlegi vizsgálatok

A jelenlegi vizsgálat során elsősorban a kijelölt időszakot vettük figyelembe. A munkát rögtön azzal kezdtük, hogy csak azokat az adatsorokat hagytuk meg az adatbázisunkban, melyek rendelkeznek XYZ koordinátával. Ennek megfelelően a 2016. 01. 01. 2:48 – 2022. 12. 31. 20:03 időszakban 3 966 hipocentrummal dolgoztunk. Ezek közül ki-

szűrtük azokat a hipocentrumokat, melyek a kibányászott üregeken belülre estek. Ennek megfelelően az adott időszakban 1 111 hipocentrum maradt, melyeket később felhasználtunk a peremelemes numerikus vizsgálatokhoz.

Végül vizsgáltuk az összerakott teljes adatbázisunkat, melyben 12 296 olyan hipocentrum szerepel, és amelyeknek megvan az XYZ koordinátájuk. Ebből a numerikus modellezésekhez a kiszűrés után 8 510 hipocentrum maradt.

5.3. 3D-s kitörési geometria elkészítése

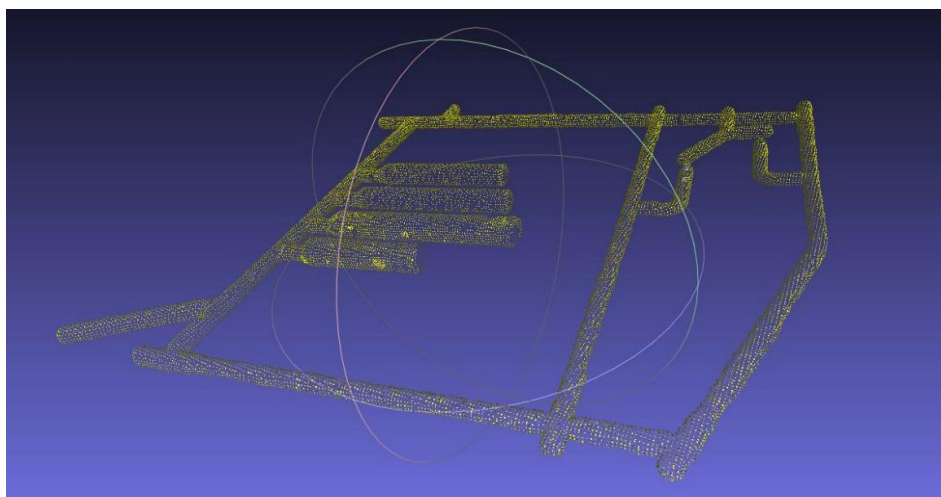
Kezdetben a Mecsekérc Zrt. Geodéziai osztályának a munkatársaival átnéztük és összeraktuk az összes bemért kitörési szelvényt. Ezt a munkát folytatva a megkapott és ellenőrzött kitörési szelvényeket zártuk (zárt vonalláncként), majd pontfelhőt és ebből geometriai zárt testet készítettünk. Ehhez a következő szoftvereket használtuk fel: AutoCad, Rhinoceros és MeshLab. Több geometria is kialakításra került, de végül több simítást alkalmazva létre-

hoztunk egy aktuálisan véglegesnek tekintett geometriát, melyet a jelenlegi munkához is felhasználtunk. Az NRHT projekt esetében is használt JMX és SMX geometriákkal szemben ennél a megoldásnál annyi előny mutatkozik, hogy a kitakarított végleges kitörési talp is a valósághoz jobban közelítve jelenik meg. A 10. és 11. ábra két munkafázist mutat be a sok közül a geometria felépítésében.

5.4. Időbeli szűrések

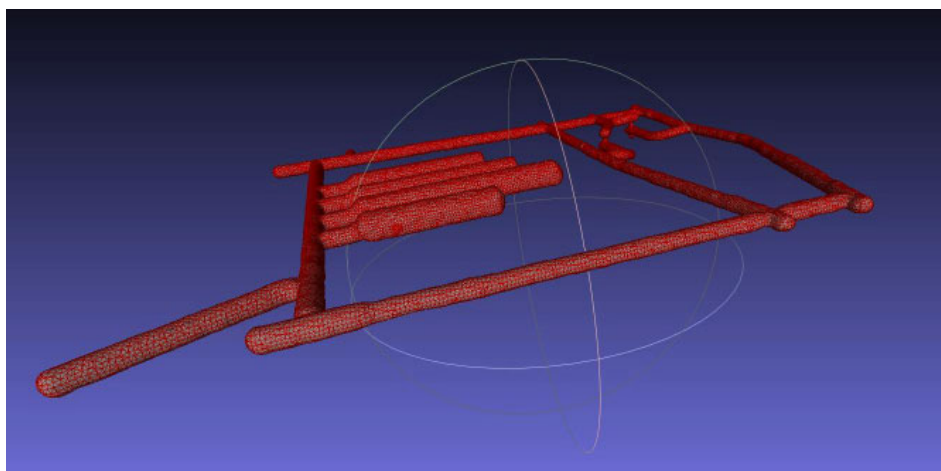
Az időbeli szűrésekhez, időbeli intenzitásvizsgálathoz, az emissziók intenzitásbeli megjelenítéséhez és az AE hipocentrumok 3D-s megjelenítéséhez első körben az InSite Lite megoldásait használtuk fel.

Először a kijelölt 2016–2022-es időszakot összefoglaló 12–17. ábráit mutatjuk (Moment Magnitude-ként az adatbázis azon oszlopa jelenik meg, amely az összegzett átlag amplitúdó értéket tartalmazza mm/s^2 mértékegységgel). Végül a teljes vizsgált 2011–2022-es időszak összefoglaló ábrái láthatóak alább.



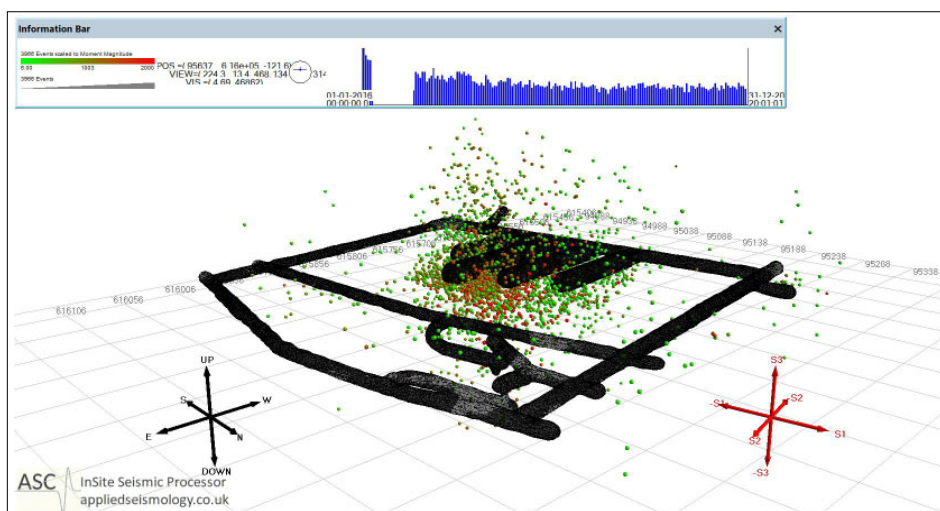
10. ábra | MeshLab pontfelhőszerkesztése

Figure 10 | Processing of the point cloud in MeshLab

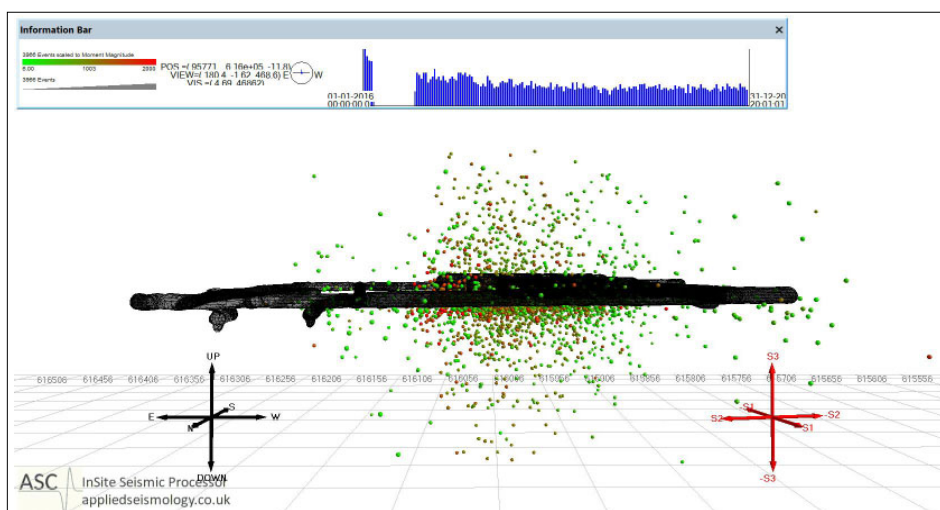


11. ábra | MeshLab véglegesített háló- és testmodell

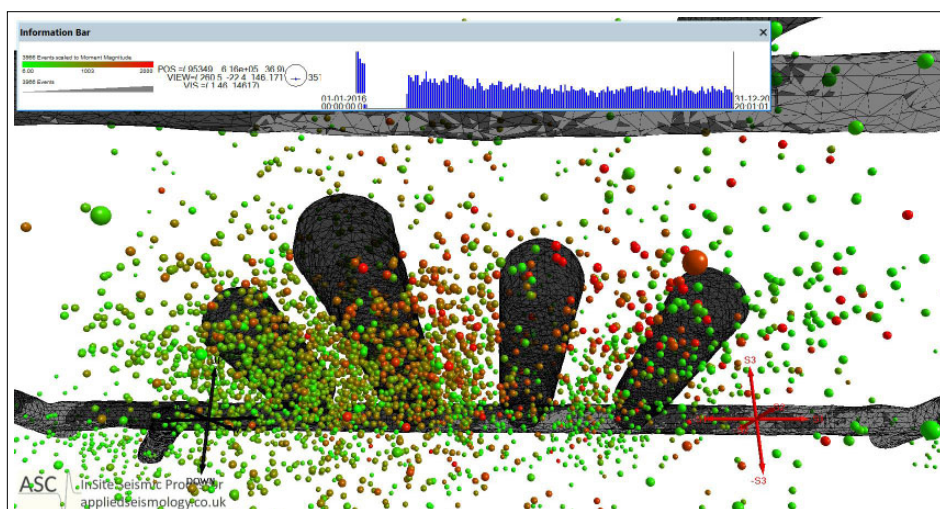
Figure 11 | The finalized mesh and solid body model in MeshLab



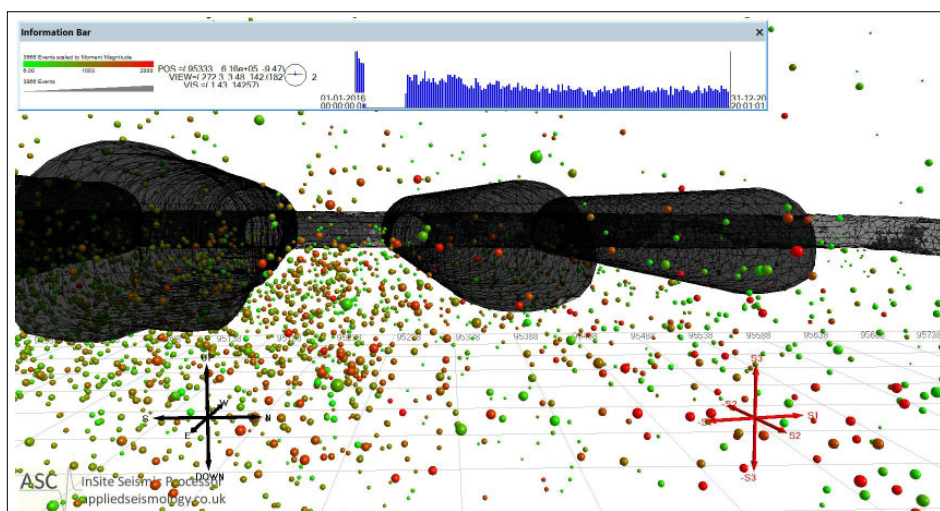
12. ábra AE hipocentrumok megjelenítése ÉK-i irányból, fentről nézve – 2016–2022 időszak
Figure 12 Appearance of AE hypocentres from the NE, seen from above – period 2016–2022



13. ábra AE hipocentrumok megjelenítése É-i irányból nézve – 2016–2022 időszak
Figure 13 Appearance of AE hypocentres, viewpoint from N – period 2016–2022

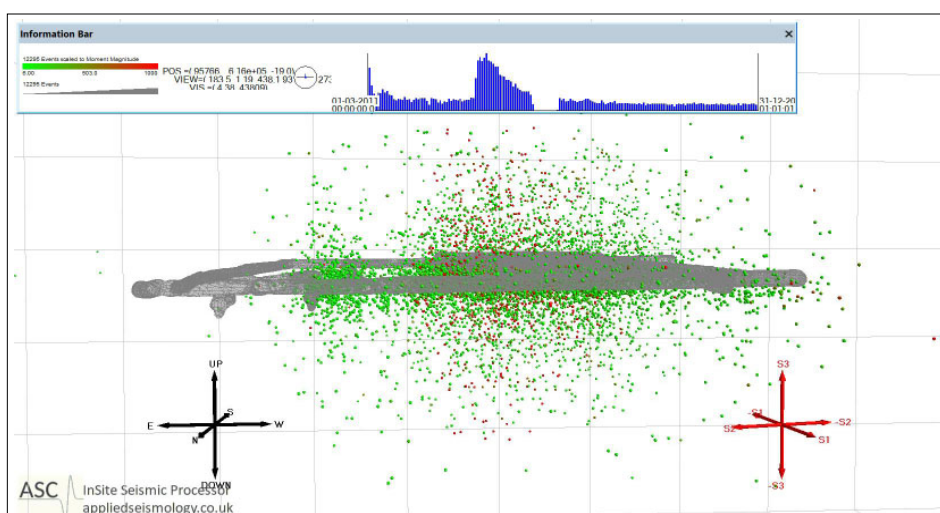


14. ábra AE hipocentrumok megjelenítése K-i irányból, lentől nézve – 2016–2022 időszak
Figure 14 Appearance of AE hypocentres, viewpoint from the E-direction, from below – 2016–2022 period



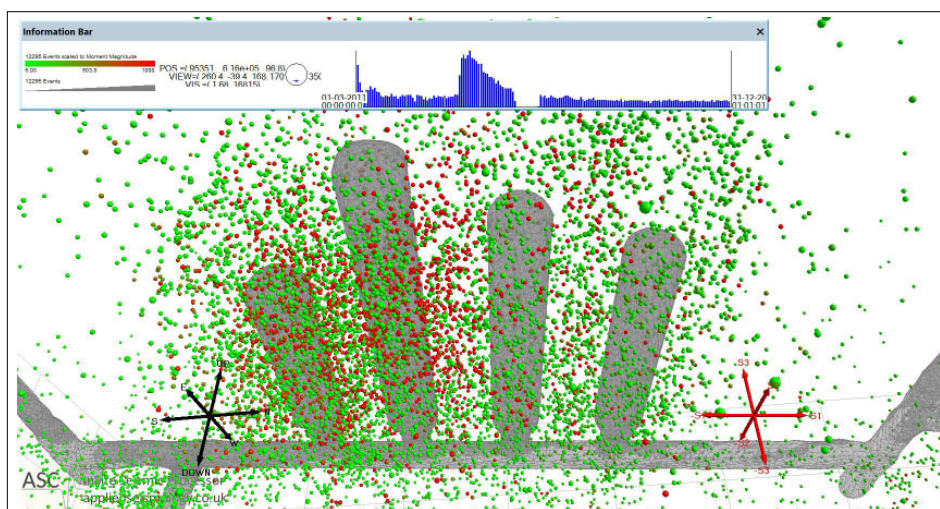
15. ábra AE hipocentrumok megjelenítése K-i irányból nézve – 2016–2022 időszak

Figure 15 Appearance of AE hypocentres, viewpoint from E – period 2016–2022



16. ábra AE hipocentrumok megjelenítése É-i irányból nézve – 2011–2022 időszak

Figure 16 Appearance of AE hypocentres, viewpoint from the N-direction – 2011–2022 period



17. ábra AE hipocentrumok megjelenítése K-i irányból, lentől nézve – 2011–2022 időszak

Figure 17 Appearance of AE hypocentres, viewpoint from the E-direction, from below – 2011–2022 period

5.5. Numerikus modellezés eredményei

A numerikus modellezés során EX3 peremelemes (BEM) kód került felhasználásra. Több feszültségi és alakváltozási variációt is lefuttattunk, de a kőzettest szilárdsági viszonyaira utaló többletinformációt a differenciális feszültségek alakulása nyújt, éppen ezért a következőben ezek kerülnek bemutatásra.

A 18., 19., 20. ábrán látható a hipocentrumok az intenzitásnak megfelelően vannak színezve, ennek skálája a kivágatok alján található (Gyorsulás – mm/s^2). A numerikus modellezéshez dátumok nincsenek feltüntetve, éppen ezért a szoftver egy az adatbázis betöltésének napját jelöli ki abban az esetben, ha nem történik a dátumokra vonatkozó vizsgálat. Először a kijelölt 2016–2022-es időszak összefoglaló 18., 19., 20. ábráit mutatjuk.

A hipocentrumok feszültségállapota szerinti megjelenítését mutatjuk be a következő ábrákon. Ezeket a fe-

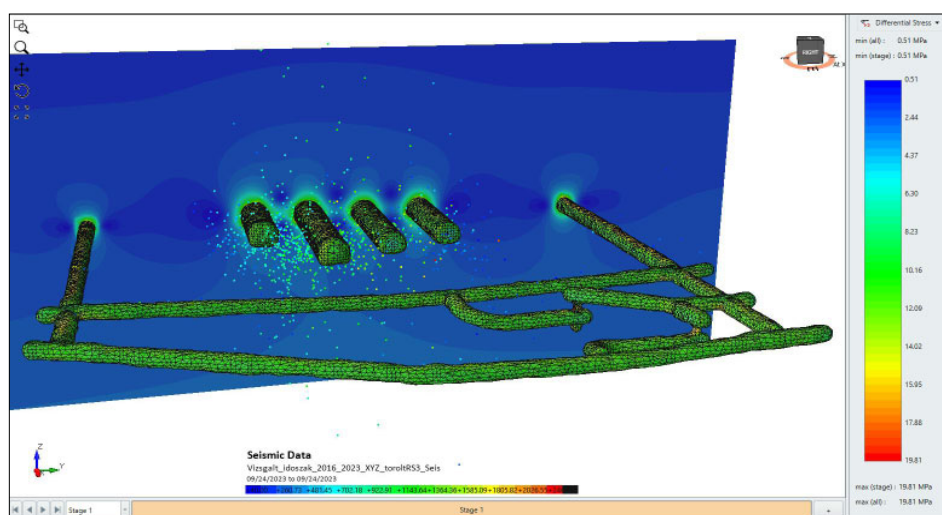
szültségállapot pontokat, melyek a hipocentrumok pozíciójának megfelelő XYZ koordinátával rendelkeznek, a későbbiekben exportáltuk, és ezeket a feszültségállapotokat tovább vizsgáltuk statisztikai módszerekkel.

A teljes időszak eredményei – a 2011–2022-es időszak – összefoglalva a 21–22. ábrán láthatóak.

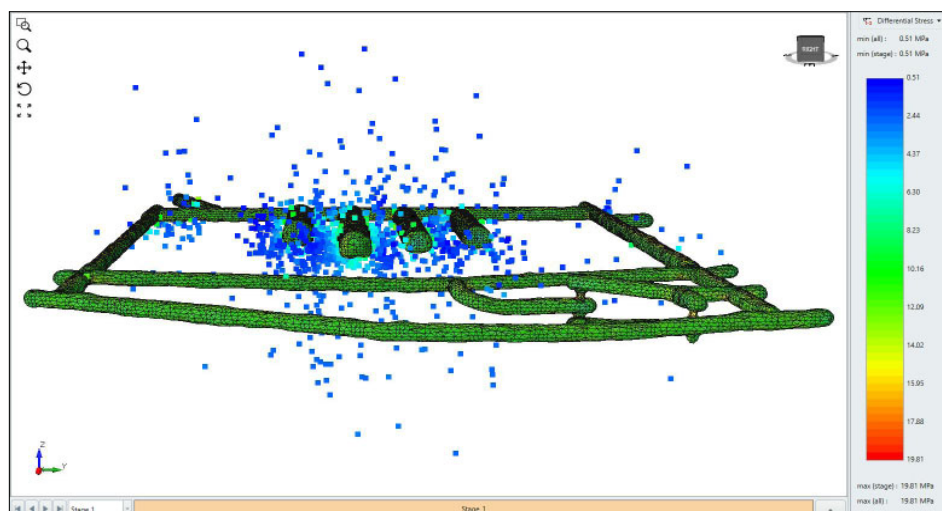
5.5.1. Klaszteranalízis a 2016–2022 vizsgált időszak adatain

Az amplitúdó vizsgálatok alapján az látszik, hogy a nagyobb magnitúdóval rendelkező hipocentrumok az I-K3 kamra középső részénél és az I-K4 kamra eleje és végének környezetében jelentek meg (23. ábra).

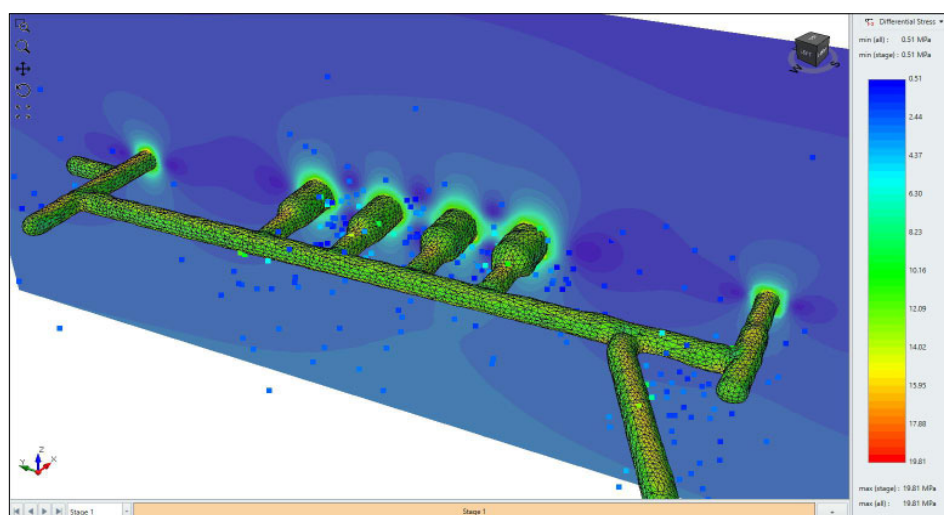
A hipocentrumok megjelenésének gyakorisága alapján is egy elég hasonló képet kaptunk, amelyet a 24. ábra mutat be.



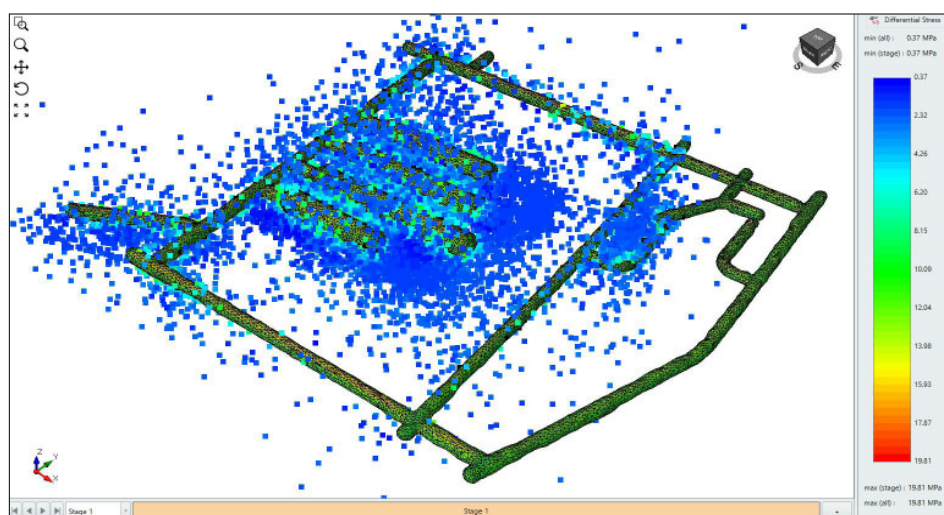
18. ábra | Differenciális feszültségek az AE hipocentrumok környezetében KDK-i irányból nézve
Figure 18 | Differential stresses in the vicinity of AE hypocentres, viewpoint from ESE direction



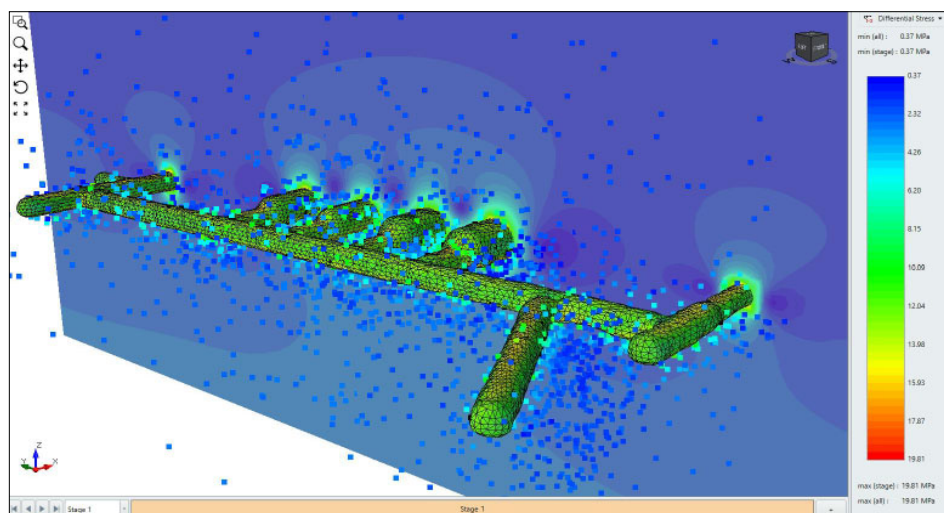
19. ábra | Differenciális feszültségek az AE hipocentrumok környezetében K-i irányból nézve
Figure 19 | Differential stresses in the vicinity of AE hypocentres, viewpoint from E direction



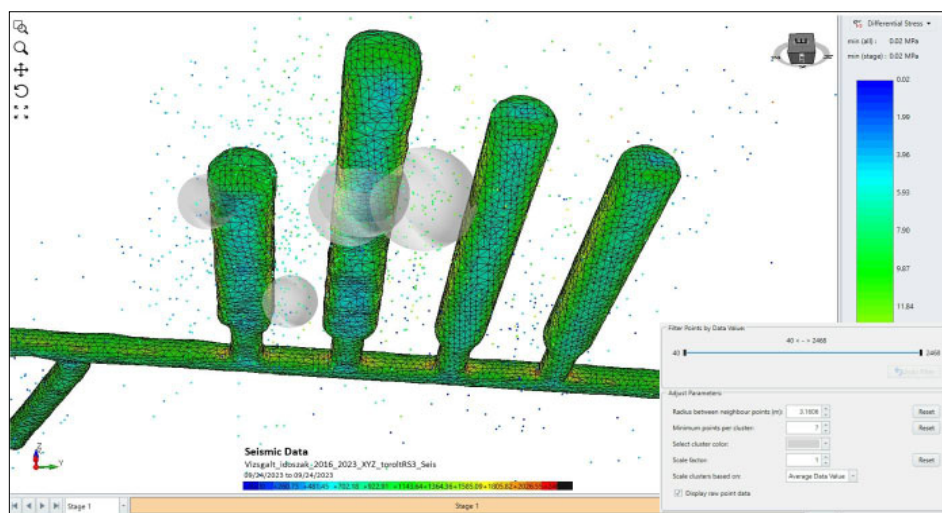
20. ábra Differenciális feszültségek az AE hipocentrumok környezetében DNY-i irányból, fentről nézve
Figure 20 Differential stresses in the vicinity of AE hypocentres, viewpoint from SW direction from above



21. ábra Differenciális feszültségek az AE hipocentrumok környezetében DK-i irányból, fentről nézve (a teljes vizsgált időszak: 2011–2022)
Figure 21 Differential stresses in the vicinity of AE hypocentres, viewpoint from SE direction, from above – 2011–2022 period

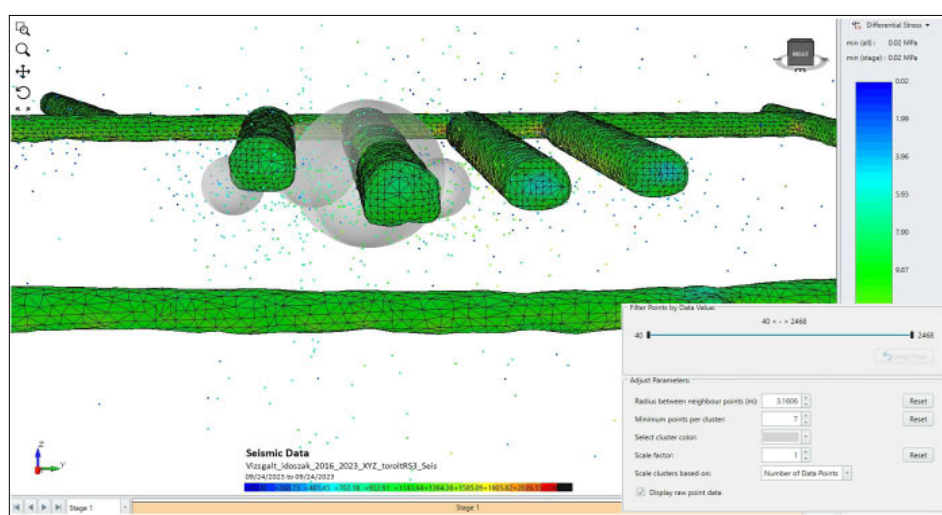


22. ábra Differenciális feszültségek az AE hipocentrumok környezetében DNY-i irányból, fentről nézve (a teljes vizsgált időszak: 2011–2022)
Figure 22 Differential stresses in the vicinity of AE hypocentres, viewpoint from SW direction, from above – 2011–2022 period



23. ábra Klaszteranalízis a differenciális feszültségállapotokkal (a kamratárság alulról nézve)

Figure 23 Cluster analysis with differential stress states – repository chambers area seen from below



24. ábra Klaszteranalízis a differenciális feszültségállapotokkal (a kamratárság felülről nézve)

Figure 24 Cluster analysis with differential stress states – repository chambers area seen from above

5.6. Elméleti háttér

Az AE és kőzetmechanikai vizsgálatokra alapozva a kőzettest viselkedésére egy már meglévő sematikus modellt alakítottunk át még régebben (Deák 2023), mely egyszerű áttekintést ad a kőzettest viselkedéséről (alapozva a kőzettestet alkotó ép kőzet tulajdonságaira is) egy feszültség-alakváltozási diagramon (25. ábra). Ezzel a megközelítéssel leírható a felszín alatti üregek közvetlen környezetének (pl. EDZ) és ezzel egy időben a távol eső kőzettestnek a kőzetmechanikai viselkedése.

Ming Cai (Cai et al. 2004) hosszabb tanulmányozás után hasonló eredményeket publikált, mint amelyeket mi is észleltünk a Bábaapáti NRHT esetében. Azaz a Derek Martin által megalkotott rideg-képlékeny átmenet, valamint a töréses tönkremenetel keletkezésének és fejlődésének határállapotait kőzettest esetében (kiváltképpen a gyengébb kőzetminőség, GSI <65 mellett) át kell gondolni, és az ép

kőzetre vonatkozó értékeket csökkenteni kell. Ehhez Cai azt ajánlotta, hogy a kőzettest szilárdsági értékeit *in situ* értékként vegyük figyelembe. A CI határérték:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = A \sigma_{cm}, \quad (7)$$

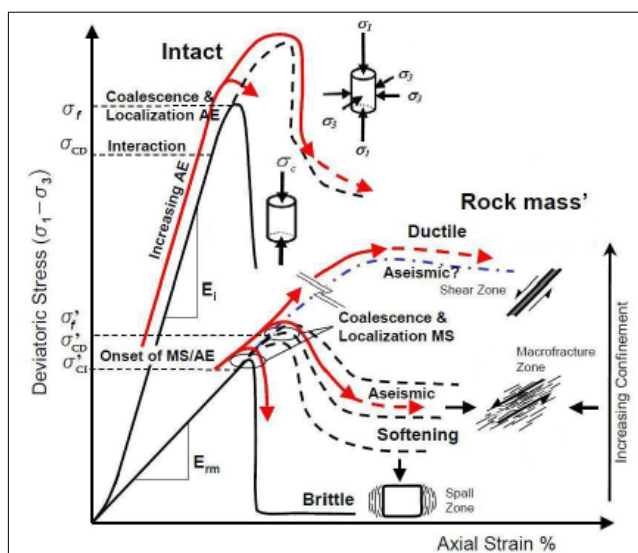
ahol $A = 0,4-0,6$, a CD határérték pedig:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = B \sigma_{cm}, \quad (8)$$

ahol $B = 0,8-1,0$.

A háttéranalízis során Cai megfigyeléseire támaszkodtunk (Cai et al. 2004), majd a saját megfigyeléseinkre (Deák et al. 2023).

A kőzettest tönkremenetelének folyamatát több különböző deformációs szakasz jellemzi, amelyek magukban foglalják a repedés iniciálását vagy repedésfejlődés kezdetét (CI), a repedés terjedését és összeolvadását vagy összekapcsolódását (koaleszcenciáját) (CD). Fontos tudni, hogy a mérnöki tervezés során ezek a deformá-



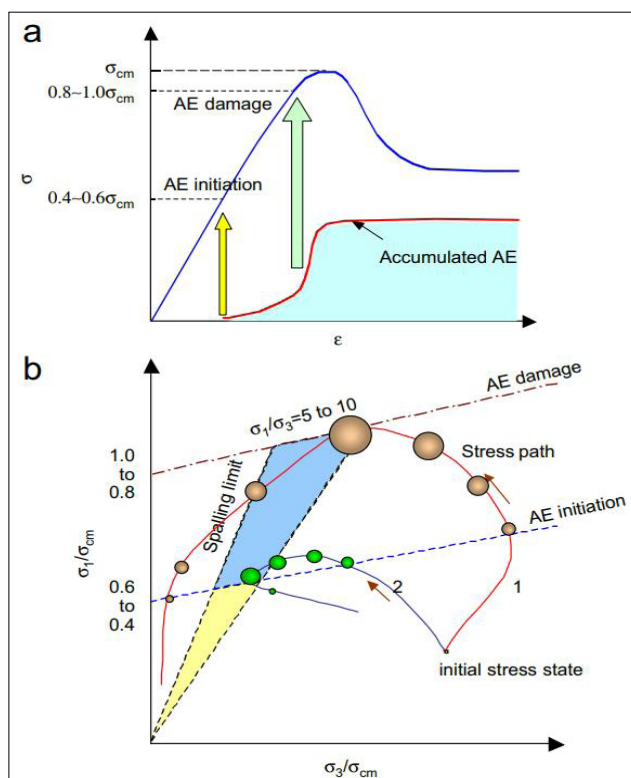
25. ábra A kőzettest viselkedésének sématis rajza a befogás függvényében, összehasonlítva egy ép kőzetminta eredményével és a kőzettest modulusával, minden esetben ábrázolva a mikroszeizmikus és AE-aktivitás tartományát, a kapcsolódó tönkremeneteli módokat és az így meggyengült szerkezeteket is (Coulson 2009 után)

Figure 25 Schematic draw on the rock mass behaviour as a function of confinement comparison with an intact rock sample's result and rock mass modulus, in each case depicting the range of microseismic and AE activity, the associated failure modes and the resulting weakened structures

ciós szakaszok milyen feszültség-szintekkel járnak a gyakorlatban.

Átfogó elméleti, kísérleti és numerikus vizsgálatok léteznek az ép kőzetek tönkremeneteli folyamatáról. Általában érthető, hogy a repedés keletkezése (CI) a tönkremeneteli csúcs (UCS) egytengelyű nyomószilárdság 0,3–0,5-szöröse. A befogott állapotban lévő minták esetében egy állandó deviatorikus feszültségkritériumot írtak le a repedés keletkezése (CI) feszültség szintjének megállapítására.

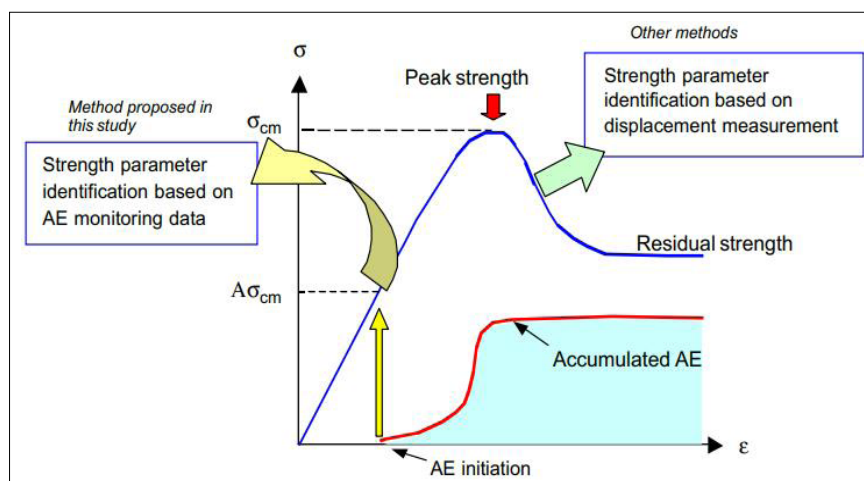
Törésszrendszerek nélküli masszív kőzettest esetén a kőzettest szilárdsága megegyezik az intakt kőzet CD-értékével ($\sigma_{cm} = \sigma_{CDi}$); az ép kőzet hosszú távú egytengelyű szilárdsága. Az ép kőzetek és a kőzettestek adatainak vizsgálata után megállapítható volt, hogy masszív vagy közepesen töredezett kőzettestek esetében az A és B anyagállandók a 0,4–0,5, 0,8–0,9 tartományban vannak, illetve erősen és közepesen töredezett kőzettestek esetében A és B a 0,5–0,6, 0,9–1,0 tartományba esnek. Az általános repedéskeletkezési és repedés-összekapcsolódási tönkremenetel (CI- és CD-) küszöbértékek egyszerű lineáris elasztikus feszültség-egyelemzéssel kombinálva segítenek az értékelés-



26. ábra Generalizált feszültség-alakváltozás diagram (a), feszültség állapotokat és a lepattogzást (spalling) bemutató határgörbe (b) kőzettestek esetére, mely mutatja az AE események kezdetét és az AE tönkremenetelt a hozzájuk tartozó feszültségállapottal. A gömbök mérete az AE aktivitását számszerűsíti (Cai et al. 2007)

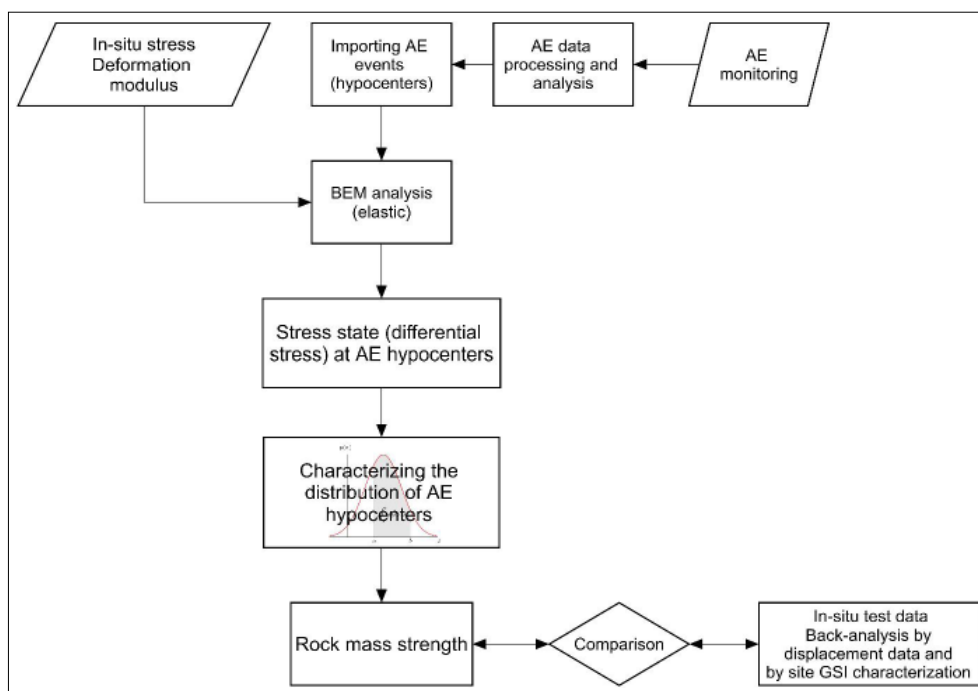
Figure 26 Illustration of (a) generalized stress-strain diagram and (b) stress paths and spalling limit for rock masses, showing the AE initiation and AE damage (propagation) stress levels. The ball size in (b) indicates the number of AE activities

ben, hogy a kőzettest integritása jellemezhető legyen alacsony szintű befogási (confinement) körülmények között, ami jelentősen csökkenti a szükséges erőfeszítést az anyag-állandók megállapításában a felszín alatti létesítmények mérnöki tervezéséhez.



27. ábra Sématis ábra, amely a különböző tönkremeneteli állapotokat és azoknak a műszeres észlelési módjait mutatja be (Cai et al. 2007)

Figure 25 Scheme of using AE monitoring data for rock mass strength determination



28. ábra Folyamatábra a kőzettest szilárdságának háttéranalíziséről (Deák et al. 2023)

Figure 28 Rock mass strength back-analysis flowchart)

A 26., 27. ábra mutatja be azt az eljárási sémát, melyet mi is követtünk a vizsgálatok során.

Egy alapvető eltérést alkalmaztunk Cai által bemutatott módszertől, melynek során elemzést végeztünk a differenciális feszültség eloszlásának vizsgálatára az exportált hipocentrumok esetében (28. ábra). A végső cél az volt, hogy ennek az újonnan bevezetett elemzési folyamatnak a révén (Deák et al. 2023) megjósoljuk a kőzettest szilárdságát (UCS_{mass}). A kőzettest tulajdonságainak jobb megértésével megbízhatóbb előremenő elemzések végezhetők a kőzettest viselkedésének előrejelzésére a tervezett jövőbeli felszín alatti üregek körül.

A kőzettest AE megjelenéseinek kezdete vagy AE-kezdés (AE initiation) és AE-tönkremeneteli (AE damage) feszültségének az előremenő elemzéssel összefüggésben fontos, hogy megbízható értékelést kapjunk a kőzettest szilárdságáról. Ezt megfelelő helyszíni vizsgálatokkal vagy alternatívaként a GSI rendszer alkalmazásával lehet elérni. Mindkét esetben szükséges a terepi vizsgálati adatok vagy a GSI rendszerből kapott tervezési értékek háttéranalízissel történő ellenőrzése is. Mindazonáltal az AE-monitoring-megközelítés kevésbé invazív és kevésbé költséges, mint az egyéb alkalmazható helyszíni vizsgálatok. Ezenfelül az AE-monitorozás a teljes kőzettestre kiterjed, ami lehetővé teszi a tulajdonságok változásának jobb térbeli megértését anélkül, hogy fúrásokat kelljen végezni.

Az általános AE-kezdeti küszöbérték alapján megállapítható, hogy az AE-indulási feszültség a kőzettest szilárdságával függ össze. Ha a feszültségeket a föld alatti feltárások körül egy rugalmas modell segítségével becsüljük meg, és az AE-aktivitást nyomon követjük, akkor ezek az adatok felhasználhatók a kőzettest szilárdságának

meghatározására egy háttéranalízis alapján végzett módszerrel.

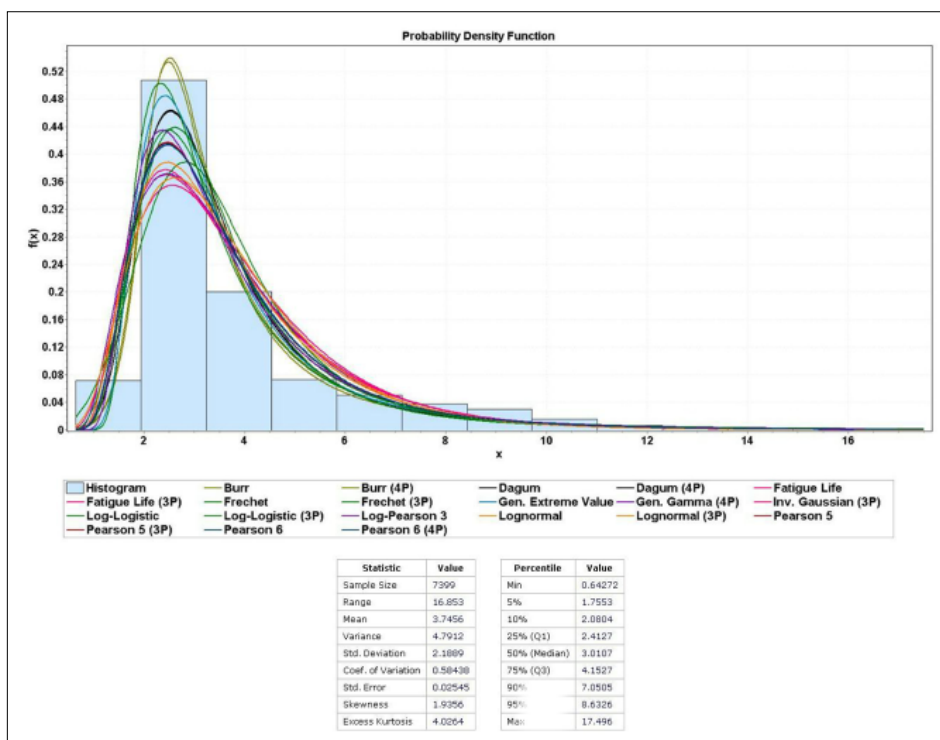
5.7. Eredmények a vizsgálat időszakról

A BEM-modellekből lehetővé vált az egyes hipocentrum-pontok differenciálfeszültség értékeinek exportálása egy komplex adatbázisba. Az adatbázist komplex statisztikai elemzésnek vetettük alá, amelynek során az AE-események differenciálfeszültség eloszlására vonatkozó görbét több különböző megközelítéssel illesztettük (29., 30. és 31. ábra). A transzformációkat a fenti egyenletekkel oldottuk meg, a σ_{cm} -re pedig Hoek alapegyenletét használtuk (Hoek et al. 2002):

$$\sigma_{cm} = s^a \sigma_{ci}. \quad (9)$$

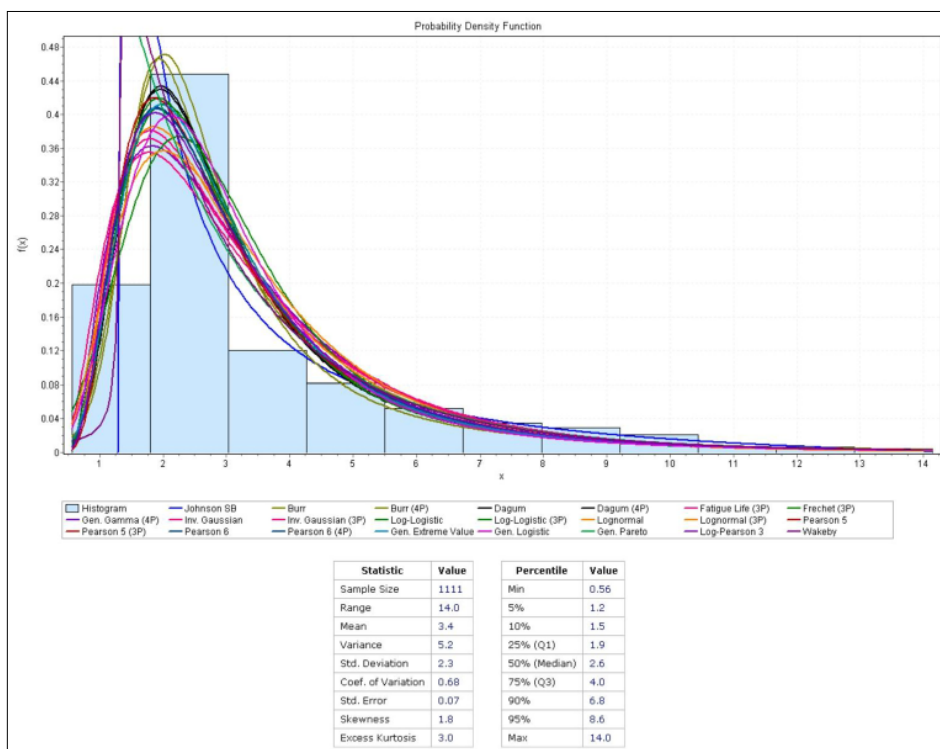
A (9) egyenlet segítségével az ép vagy intakt $USC = 129$ MPa értéket feltételezve, UCS_{mass} vagy $\sigma_{cm} = 7,8$ MPa értéket eredményez (ha $GSI = 50$). Ebből következik, hogy a jellemzett mérsékelt töredezett kőzettest általános repedéskezdeti (AE) küszöbértéke $\sigma_{ci} \approx 3,9$ MPa lenne (ha $A = 0,5$).

Az eredmények azt mutatják, hogy az eloszlás csúcsa a 25%-os percentilisének (Q1) van, ami azt jelenti, hogy a CI_{mass} küszöbérték annak közvetlen közelében lehet. Az, hogy ez alatt is vannak értékek, annak tulajdonítható, hogy a modelterületen a kitermelt üregektől távol hipocentrumok vannak, ahol a modellezés alapján nyugodt feszültségmező található. Ez azonban nem jelenti azt, hogy a közelükben nem lehet olyan törés vagy törésrendszer, amely lehetővé teszi, hogy az adott hipocentrumok feszültségállapota meghaladja a CI_{mass} határértéket. Mivel



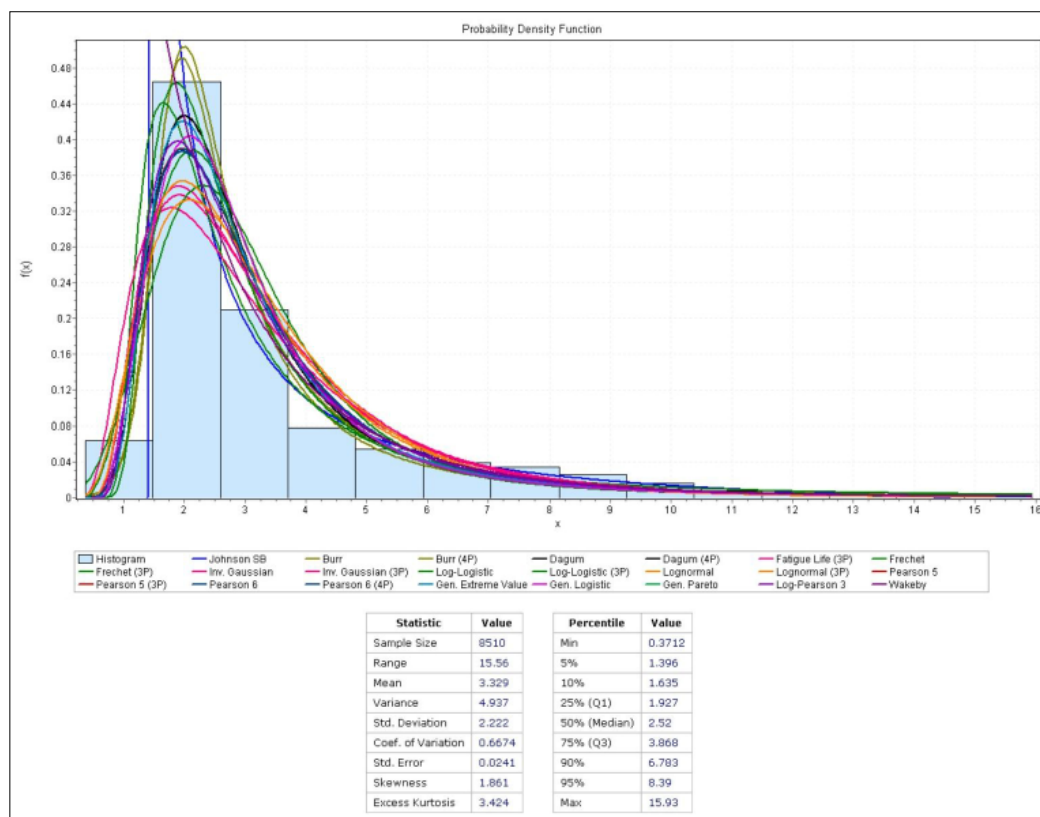
29. ábra | Statisztikai eredmények az AE hipocentrumok elemzéséről – 2011–2015 időszak (az x tengely a differenciális feszültség MPa-ban)

Figure 29 | Statistical results on the AE hypocenters analysis – 2011–2015 period (x axis is the differential stress in MPa)



30. ábra | Statisztikai eredmények az AE hipocentrumok elemzéséről – 2016–2022 időszak (az x tengely a differenciális feszültség MPa-ban)

Figure 30 | Statistical results on the AE hypocenters analysis – 2016–2022 period (x axis is the differential stress in MPa)



31. ábra | Statisztikai eredmények az AE hipocentrumok elemzéséről – 2011–2022 időszak (az x tengely a differenciális feszültség MPa-ban)

Figure 31 | Statistical results on the AE hypocenters analysis – 2011–2022 period (x axis is the differential stress in MPa)

a jelen tanulmányban nem volt lehetséges a jól dokumentált fő törésrendszerek meghatározására a BEM-modellekben, ezért a hozzájuk esetlegesen kapcsolódó AE-események vizsgálata elmaradt. Az eloszlások alapján a mediánérték is nagyszámú hipocentrumot tartalmaz, ezért ebben a tanulmányban is megemlíjtük az értékét.

A fenti statisztikai vizsgálatok eredményei alapján a következő megállapításainkat alább foglaltuk össze.

5.7.1. A 2011–2022 időszak vizsgálatának eredményei

- Ha $GSI = 50$: $UCS_{mass} \approx 7,8$ MPa és $\sigma_{ci} \approx 3,9$ MPa – ez a variáció megfelel a modellezett eredményeknek. De ugyanakkor a statisztikai elemzésből kapott átlagértékekkel is jól korrelál:
 - 2011–2015 időszak: átlag $\sigma_{ci} \approx 3,75$ MPa
 - 2016–2022 időszak: átlag $\sigma_{ci} \approx 3,4$ MPa
 - 2011–2022 időszak: átlag $\sigma_{ci} \approx 3,3$ MPa
- Ha $GSI = 42$: $UCS_{mass} \approx 4,8$ MPa és $\sigma_{ci} \approx 2,41$ MPa, ez a variáció megfelel a statisztikai elemzésből kapott 25%-os percentilis (Q1) értékeknek a 2011–2015 időszak esetében. Míg a 2016–2022 és a 2011–2022 időintervallumok esetében az 50%-os percentilis (median-) értékekhez közelít a legjobban a σ_{ci} érték. Az itt említett esetekben egy tényezőt változtattunk meg a várt statisztikai adatok elérése érdekében, és ez nem más, mint a GSI.

A kamratárság geológiai dokumentálása során a kőzettest jellemzően a $GSI = 42$ – 50 közötti kategóriába volt sorolható. A numerikus modellezések során a leggyakrabban mi a $GSI = 50$ értéket szoktuk beállítani a kamratárság esetében.

6. Következtetések

Ki kell hangsúlyozni, hogy az AE mérésekre támaszkodó megfigyelések időben és térben is nagyon hasznos információval szolgálnak és maguk az AE események jóval a kőzettest tönkremenetele előtt jelennek meg (a repedésfejlődés kezdeti szakaszában a CI határértéktől), és ezek további fejlődése nyomon követhető egészen a tönkremeneteli pontig, majd később a reziduális szilárdság is monitorozható.

A konvencionális geotechnikai mérőrendszerek mérésin alapuló (elmozdulás- és alakváltozás-mérések) háttéranalízis megközelítés alkalmazása főleg elmozdulás mérésalapú. Ebben az esetben a kőzettestszilárdsági paraméterek azonosításához a kőzettestnek el kell érnie vagy meg kell haladnia a tönkremeneteli csúcserőértéket, és be kell lépnie a csúcserő utáni régióba a nagymértékű alakváltozások vagy elmozdulások kialakulásához.

Jelenlegi vizsgálatban nem nyílt lehetőség a nagyobb geológiai szerkezetekhez köthető AE-aktivitásokat részle-

tesen megvizsgálni. Itt egy nagyon fontos példa a kamratérsgében lévő vizes pászta, mely törési övhöz nagyon jellemző AE-aktivitás tartozik térben, időben és intenzitásában. Ezt egy régi vizualizációval vizsgáltuk, ám a mostani esetben az üregképzéshez köthető hipocentrumokra koncentráltunk.

Az AE hipocentrumok időbeli eloszlását figyelve azt láthatjuk, hogy vágathajtási időszakokban a mikroszeizmikus és akusztikus emissziók száma számottevően megnő, míg a vágathajtási időszakok között is egy meghatározott szinten, de folyamatosan látunk kisebb intenzitású hipocentrum-megjelenéseket, melyek köthetők a kőzettest hosszútávú deformációjához. Ezek későbbi vizsgálata nagy fontossággal bír, hiszen időben, térben és intenzitás alapján is vizsgálni lehet az időfüggvényű deformációkat, illetve – ha a későbbiekben – ezekben a megfigyelt térszésekben újabb vágathajtás történik, akkor összességében van mód a kőzettest szilárdságának időfüggvényű degradációját is megfigyelni.

A folyamatos aktivitás mellett az elkövetkező évtizedek során (az üzemidő alatt is, de a bezárást követően biztosan) várható, hogy megjelennek észlelhető deformációk a felszín alatti létesítmény vágatfalain. Pontosabb előrejelzés megadásához további elemzések szükségesek.

A háttéranalízis (back-analysis) során kapott eredményekre támaszkodva megállapíthatjuk, hogy a modellezéshez felhasznált bemenő paraméterek, peremfeltételek, valamint az eredmények alapján a kőzettest CI-értékéből, majd a szilárdságából visszaszámított kőzettest osztályozási értékekre átlagosan a $GSI = 42\text{--}50$ intervallum feleltethető meg. Ez tükröződik vissza terepi dokumentációkból is, tehát azok jelentős alul- vagy felülbecslése jelen munka során nem volt megállapítható.

Az is megállapítható, hogy a legtöbb emisszió a CI-értékhez köthető, és térben a legnagyobb részük ezeknek a vágatfalaktól távolabbi pontokban helyezkedik el. A vágatok EDZ zónáinak környezetében ($\sim 3\text{--}17,5$ MPa differenciális feszültségek tartománya) már sok esetben a kőzettest CD határétékén túli feszültségállapotok is megjelennek, ami jelentős irreverzibilis deformációkhoz vezet. Ugyanakkor ebben a zónában már maga a vágathajtás hatására a statikus és dinamikus terhelések miatt nagyfokú deformációs folyamatok játszódtak le.

További érzékenységi vizsgálatokat tervezünk még elvégezni a teljes összefüggő háttéranalízisben, melyet majd a későbbiekben tovább vizsgálunk.

A tanulmány szerzői:

Deák Ferenc, Bakai János, Szűcs István

Hivatkozások

- Bakai J. (1978): Javaslatok a mikroszeizmikus impulzusok keletkezési helyének és energiájának meghatározására. Miskolc
- Bakai J., Kádi Z. (2023): Értékelő jelentés – Az NRHT szeizmoakusztikus rendszer 2022. évi észlelési adatainak feldolgozása, kézirat, RHK-K-001/23, 42 o.
- Cai M., Kaiser P.K., Tasaka Y., Maejima T., Morioka H., Minamic M. (2004): Generalized crack initiation and crack damage stress thresholds of brittle rock masses near underground excavations. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 41/5, 833–847.
- Cai M., Morioka H., Kaiser P.K., Tasaka Y., Kurose H., Minami M., Maejima T. (2007): Back-analysis of rock mass strength parameters using AE monitoring data. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 44/4, 538–549.
- Deák F. (2023): Excavation damage zone behaviour under static and dynamic loading: Case studies from Bábaapáti radwaste repository. PhD thesis, Budapest University of Technology and Economics, Pál Vásárhelyi Doctoral School of Civil Engineering and Earth Sciences, 134 p.
- Deák F., Perras M. A., Szűcs I., Török Á. (2023): Back-analysis of rock mass strength at a radioactive waste disposal site using acoustic emission monitoring data and 3D numerical modelling. *Energies*, 16, 4686.
- Hoek E., Carranza-Torres C., Corkum B. (2002): Hoek-Brown failure criterion – 2002 edition. In: *Proceedings of NARMS-TAC Conference*, Toronto, Canada.
- Szűcs I. (2016): Zárójelentés – a Bábaapáti Nemzeti Radioaktív-hulladék-tároló (NRHT) 3. vizsgálati kamra, Nyugati feltáró vágat, I-K3 és I-K4 kamra nyaktagok (létesítés III. ütem, 1. szakasz) részfeladataival összefüggésben létesített és üzemeltetett szeizmoakusztikus monitoring rendszerhez kapcsolódó alábbi feladatok teljesítéséről: I. Aktív szeizmoakusztikus észlelőrendszer telepítése, meglévő rendszer, módosítása; II. Aktív szeizmoakusztikus észlelőrendszer üzemeltetése. Kézirat, 2016. március, LADINI Mérnöki Tanácsadó és Szolgáltató Kft. Mecsekérc Adattár, LA-PRO01-MÉ-2014-16.
- Zhao X. G., Cai M., Wang J., Ma L. K. (2013): Damage stress and acoustic emission characteristics of the Beishan granite. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 64, 258–269.