

## Az EDZ kőzetmechanikai felosztása

### Rock mechanical subdivision of the EDZ

Deák Ferenc

MVM Paks II. Atomerőmű fejlesztő Zrt., deakf@mvmpaks2.hu

Kovács László

Kőmérő Kft., kovacsolaszlo@kometro.hu

**ÖSSZEFOGLALÁS:** A Bábaapátiban épülő Nemzeti Radioaktív Hulladék-tároló (NRHT) építésénél is, úgy mint más földalatti üreghálózatok jövesztésénél, kiemelt fontosságú a jövesztés során tönkrement vagy roncsolt zóna, az EDZ kutatása. Kutatásaink során numerikus modellek segítségével az újabb elméleteknek megfelelően az EDZ különböző részekre osztottuk fel és vizsgáltuk az adott zónák kőzetmechanikai tulajdonságait, ezen eredményeket mutatjuk most be. Részletesebb leírásokat közzeltünk a 2012-es geotechnikai értelmező jelentésben (Kovács et al. 2012), illetve összefoglalást a Deák et al. 2013 cikkben. A Bábaapátiban folyó munkát az Radioaktív Hulladékokat Kezelő Közhasznú Kft. (RHK Kft.) irányítja.

*Kulcsszavak:* EDZ, numerikus modellezés, lepattogzás, tárolókamra, Bábaapáti

**ABSTRACT:** The program for the final disposal of low and intermediate level radioactive waste was established by Paks Nuclear Power Plant, Hungary. Preparation for final disposal of radioactive wastes has been done as part of a national program since 1993. The Central Nuclear Financial Fund and the Public Limited Company for Radioactive Waste Management (Puram) have been established to coordinate organizations and activities for all tasks in connection with nuclear waste treatment. The project started with a geological screening in order to find the most suitable formation for the radioactive waste disposal. The selected potential host rock is a granite complex in the Mórággy Granite Formation in the south-western part of Hungary, close to the village of Bábaapáti. The goal of this paper is to present the newest modeling results of the Excavation Damaged Zones around the Bábaapáti radioactive waste repository. The following zones are thoroughly investigated and modeled in both 2D and 3D: EdZ: Excavation disturbed Zone; EDZ: Excavation Damaged Zone and HDZ: Highly Damaged Zone.

These Excavation Damaged Zones (EDZs) are very important for understanding the hydromechanical and geomechanical behavior. Therefore the EDZs were analyzed by hydrogeological, field-survey, geophysical and borehole television (BHTV) methods. Our modeling was using both high number of laboratory rock tests and the field measurements. The correlation between the computed and measured values, were verified.

*Keywords:* EDZ, numerical modeling, spalling, repository chamber, Bábaapáti

### 1 BEVEZETÉS

Az EDZ kifejezést először Svédországban, a Stripa Mine nukleáris hulladéktároló telephely kutatásai során használták a vágathajtás hatásaként a vágat környezetében megváltozott fizikai és kémiai adottságú térrész leírására (Andrássy et al. 2012). Egészen a közelmúltig ezt a megváltozott állapotú térrészt két részre osztották (Tsang et al. 2005):

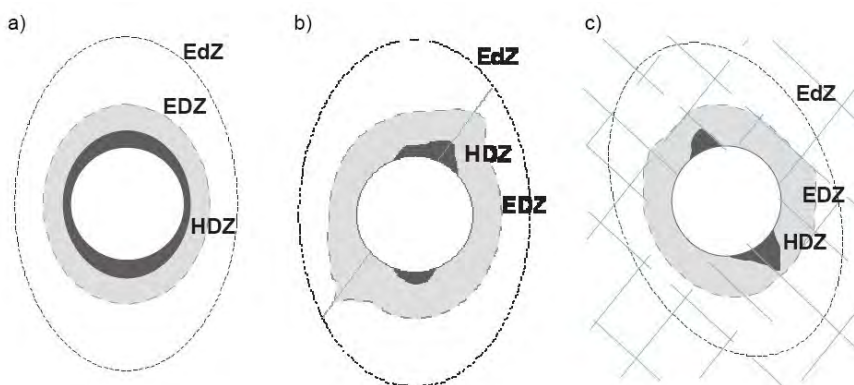
- az EdZ-re (Excavation Disturbed Zone – a jövesztés által megzavart zóna), amin belül még bármely környezeti (mechanikai, hidraulikai-hidrodinamikai, termikus és geokémiai) paraméter megváltozása kimutatható, és
- az EDZ-re (Excavation Damaged Zone – a jövesztés által roncsolt zóna), amin belül a jövesztés hatására új tönkremeneteli jelenségek és ezzel új áramlási útvonalak alakulnak ki.

Az újabb felosztásban már három zónát különítenek el, amelyek az üregfelület felé közeledve az alábbiak szerint írhatók le (ld. Az 1., 2. és 3 ábrákon) (Perras et al. 2012):

Az EIZ (Excavation Influenced Zone), ami gyakorlatilag megegyezik a régi, általános EdZ fogalommal (Tsang et al. 2005). Mechanikai értelemben e zónán belül feszültségváltozások mennek végbe és ennek hatására elasztikus alakváltozások lépnek fel. A kőzettestben nem jelenik meg tönkremenetel, de a pórustérfogatot és a meglévő repedések apertúráját (ezzel kisebb mértékben a hidrodinamikai paramétereket is) befolyásolhatja az elasztikus alakváltozás.

Az EDZ definíciója ebben a felosztásban kisebb mértékben leszűkült: ez egy olyan zóna, amelyben a hidromechanikai és geomechanikai átalakulások következtében a szivárgási tulajdonságok megváltozása tapasztalható. Ebben a zónában a szemcseméret skáláján új tönkremeneteli jelenségek már megjelenhetnek, repedések és kisebb határfelületek kinyílhatnak, tágulhatnak az EdZ-EDZ átmenettől kezdődően egészen az EDZ-HDZ átmenetig. Ezt a zónát a későbbiekben tárgyalandó elméleti mechanikai megközelítések miatt még két részre lehet osztani: külső EDZ ( $EDZ_o$ ) és belső EDZ ( $EDZ_i$ ).

HDZ (Highly Damaged Zone – Erősen roncsolt zóna), ahol már makro-léptékű új, technogén repedeztség jelenhet meg. A repedések tipikusan összekapcsolódnak, ennek hatására ebben a zónában a vízvezető képesség jelentős növekedés észlelhető. (Látható, hogy a régebbi EDZ meghatározásnak az új kategorizálási rendszerben leginkább a HDZ feleltethető meg).



**1. ábra.** Az EdZ (v. EIZ), EDZ és HDZ sematikus bemutatása különböző esetekben: homogén kőzettestben (a), egy létező törés (b), illetve törésrendszer (c) befolyása a zónákra (Lanyon et al. 2011) (Schematic view of the EDZs, a – extension of HDZ due to local fracturing around a blast hole or tunnel, b – modification of EDZ and HDZ due to re-existing fracture, c – modification of EdZ, EDZ and HDZ in jointed rock)

A vágathajtás hatására megváltozott tulajdonságú kőzetkörnyezet kiterjedésére és jellemzésére irányuló vizsgálatoknak valamennyi radioaktív hulladék-lerakó építése kapcsán – így Bábaapátiban is – kiemelt jelentősége van. (A fentiekben ismertetett felosztások ellenére a Bábaapáti NRHT kutatási és beruházási fázisaiban ezek a munkák – kissé leegyszerűsítve –, „EDZ-vizsgálati programok” összefoglaló név alatt folytak. Ezért a továbbiakban mi is élünk ezzel a kissé pongyola megfogalmazással, de a vágathajtás által befolyásolt teljes hatásövegetet összefoglalóan „módosult zónák”-ként említjük.)

A kezdeti időszakban a módosult zónák mechanikai jellemzése háttérbe szorult. Az első két, 2006-ban kialakított hosszú fúrólukas vizsgálati szelvényben pakkeres és geofizikai vizsgálatok folytak (Tildy 2009). A későbbiek során kialakított rövid fúrólukas EDZ-szelvényekben először csak pakkeres vizsgálatok folytak, majd ezeket kiegészítették optikai lyukkamerás vizsgálatokkal, és – az EDZ-6 szelvénytől kezdődően – megtörtént a magvéttellel lemélyített EDZ-fúrások repedeztségelemzése és geotechnikai minősítése is. Ez utóbbi vizsgálatok alapján számos fontos következtetést lehetett levonni. Egyértelművé vált például az, hogy a fúrás maganyag, illetve a vágatdokumentálásból származó adatok eltérése mégsem szisztematikus, minden kőzetosztályban azonos jellegű (mint ahogy azt korábban feltételezték), hanem kőzetállapot-függő; mégpedig oly módon, hogy a nagyobb eltérések az alacsonyabb geotechnikai minősítő értékekhez tartoznak. Ez a felismerés igen fontosnak bizonyult a fúrásokból megadható vágatprognózisok minőségének javításához. Ennek ellenére az elvégzett vizsgálatok azt mutatták, hogy a robbantásoknak a környező kőzetköpenyre gyakorolt közvetlen roncsoló hatása a tárgyi fúrás szelvényben a standard repedeztségelemzési, illetve geotechnikai minősítő módszerek felbontóképessége mellett nem számszerűsíthető. A természetes repedeztség hatása általában elfedi a technogén, tehát a robbantások hatására létrejövő repedéseket, vagy másképp fogalmazva: a Mórágyi Gránitban a kőzetek természetes változékonyságának mértéke általában (különösen kedvezőtlenebb kőzetkörnyezetben) felülírja az EDZ-hatásokat.

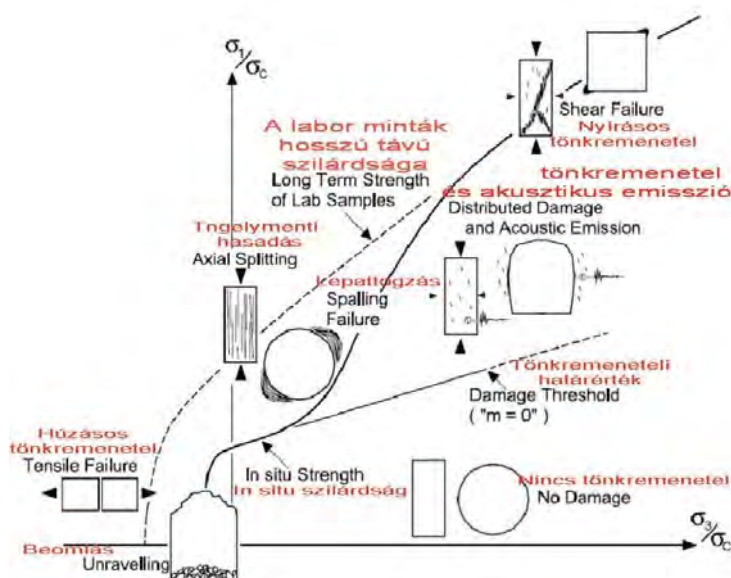
Sem a 2006-ban elvégzett geofizikai mérések, sem pedig a későbbi optikai lyukkamerás vizsgálatok nem adtak arra vonatkozólag egyértelmű útmutatást (különösen a vágatnál esetében nem), hogy mechanikai értelemben hol húzódhat az EDZ határa. Az optikai lyukkamerás mérések felbontóképessége mellett általában 30-40 cm mélységben húzódott az az utolsó olyan repedés, amit technogénnek lehe-

tett minősíteni, de ez a megállapítás is jelentős bizonytalanságot hordozott. Ezzel némiképp ellentmondásban álltak a 21 – 33 m<sup>2</sup> szelvényű vágatok EDZ-fúrásaiban végzett pakkeres mérések is. Pontos adatok hiányában a 2010-ben elkészült, a tárolókamra tervezését előkészítő Geotechnikai értékelő jelentés (GÉJ) (Kandi et al. 2010) – rendkívül konzervatív szemlélettel – a vágatköpeny 0,7 m sugarú zónájában  $D = 0,5$  ( $D$  a generalizált Hoek-Brown károsodási érték), míg a vágattalp 1,5 m sugarú környezetében  $D = 0,8$  károsodási tényező felvételét javasolta. Ezek az értékek a vonatkozó szakirodalom szerint rendkívül magasak egy olyan, optimalizált, kőzetköpeny-kímélő robbantástechnológia mellett, mint amit az NRHT-ban alkalmaztak. A tárolókamrákban elvégzett in situ mérések ugyancsak nem támasztották alá ezen értékek megfelelőségét.

A kérdés megfelelő kezelése érdekében az alábbiakban részletesebben is áttekintjük a pakkeres EDZ-vizsgálati program eredményeit; különös tekintettel a tárolókamrák építése kapcsán elvégzett, 2010-ben még rendelkezésre nem álló információkra. Ezt követően – amellet, hogy megadjuk a hagyományos, Hoek-féle károsodási elméleten alapuló tervezési megoldásokhoz a javasolt értékeket – a nemzetközi szakirodalom legújabb eredményei és saját, az NRHT viszonyaira vonatkozó, numerikus modellezési módszereket is alkalmazó kutatásaink alapján egy újszerű, kőzetmechanikai alapokon nyugvó megközelítés bevezetésére is javaslatot teszünk.

## 2 A VÁGATHAJTÁS HATÁSÁRA A VÁGATFAL KÖRNYEZETÉBEN MÓDOSULT ZÓNÁK KŐZETMECHANIKAI MEGKÖZELÍTÉSE

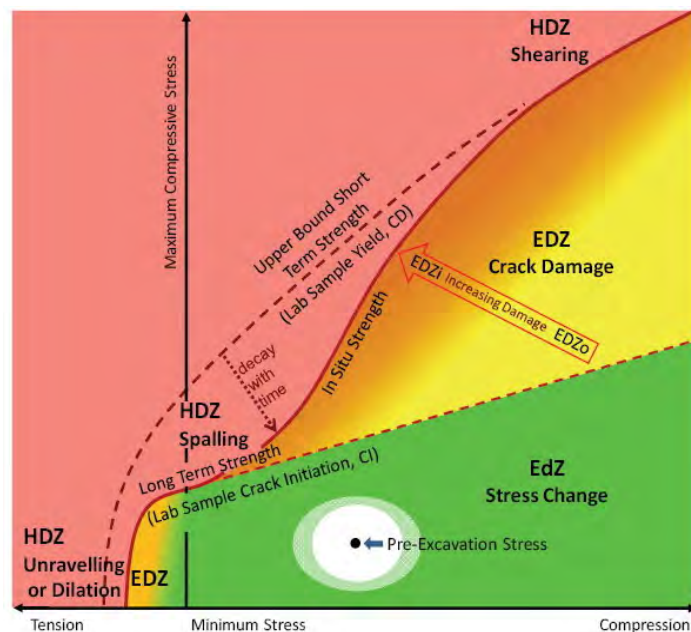
A 2. ábra sematikus mutatja be a rideg tönkremenetel határgörbáját, egyúttal azonosítva a laboratóriumi magmintákon, illetve az alagutakban a különböző terhelési tartományokban bekövetkező tönkremeneteli mechanizmusokat. Az ábrán jól látható, hogy a laboratóriumban meghatározható tönkremeneteli határgörbe alatt (tehát a korábbi elméleti megközelítések szerint tönkremenetel-mentes tartományban) egy olyan, viszonylag széles terhelési tartomány húzódik, amelyben a felszín alatti üregek kőzetköpenyében különböző típusú tönkremeneteli folyamatok hosszabb távon már lejátszódhatnak. Ezt a felismerést továbbfejlesztve Diederich és Martin 2010-ben megalkotta új EDZ-konceptióját, amelyben a rideg tönkremenetel mechanizmus elemzése alapján elkülöníthető különböző határállapotokat alkalmazza a módosult zónák felosztására (3. ábra).



2. ábra. A rideg tönkremenetel határgörbájének sematikus bemutatása (Diederich 2007 alapján)  
(Schematic of the brittle damage's threshold)

A tapasztalatok azt mutatták, hogy az alagutakban észlelt tönkremenetel akkor korrelál jól a UCS mérésnél megállapított határértékekkel, ha az alagút környezetében kis oldalnyomás tapasztalható. Magasabb oldalnyomásnál egy átmenet látszik a szilárdsági határgörbén egészen a stabil repedésterjedés (CD) határértékig. Ez az átmeneti viselkedés egy „S” alakot formáz (Diederich et al. 2004). Ahogy az a 3. ábrán látható, a CI határgörbe alatt tönkremenetel nem jelenik meg, ellenben feszültségváltozások igen (Excavation Influence Zone – EIZ – üregnyitás által befolyásolt zóna). Az említett határgörbe fölött mikrorepedések jelennek meg a szemcseméret skáláján. A CI határgörbe feletti tartományban – magas oldalnyomás mellett – ezek a mikro-repedések gyorsan stabilizálódnak, ahogy tovaterjednek a képződési gócpontjuktól (Excavation Damaged Zone – EDZ – üregnyitás által roncsolt zóna). A felső határszilárdságot (CD határgörbe) a nyírási törések kialakulása jelenti, melyek a mikrorepedések összeolvadásából keletkeznek. Alacsony oldalnyomás mellett, közel az üregnyitáshoz, a CI fölötti fe-

szültségtartományban megjelenik a lepattogzásos tönkremenetel, ahogyan az új és régi repedések instabil módon tovaterjednek. Az in situ szilárdság ebben a lepattogzást magába foglaló zónában alacsonyabb, mint a laboratóriumi mérések előrejelzése.



**3. ábra.** A rideg tönkremenetel mechanizmusai alapján elkülöníthető különböző határállapotok alkalmazása a módosult zónák felosztására (Diederich et al. 2010) (*Conceptual model of damage, spalling and confined yield in non-porous rocks, showing EIZ=Excavation influence zone, EDZ=Exc. Damage Zone and EFZ=Exc.Fracture Zone*)

A valóságos szilárdság értéke az alacsony oldalnyomás mellett le fog romlani a CD felső határától egészen a CI alsó határáig. Ez a szilárdságcsökkenés létrejöhet azonnal, illetve előfordulhat bizonyos idő elteltével is (CI alacsony oldalnyomásnál megfelel a hosszú távú szilárdságnak). Jelentős repedezettség (Excavation Fracture Zone – EFZ – üregnyitás repedezett zónája) jelenik meg az in situ szilárdsági burkológörbe által definiált feszültség szinteknél (folytonos vonal az 2. és 3. ábrán).

Összegezve: az alagúthajtás, vagy egyéb üregnyitás hatására a kőzettestben módosult zónák jönnek létre. A jövesztett üregtől távolodva a következőképpen különíthetjük el ezeket: nagyon károsodott zóna (Highly Damaged Zone – HDZ), belső EDZ ( $EDZ_i$ ) és külső EDZ ( $EDZ_o$ ). Az EDZ-n túl van egy feszültség/vagy alakváltozás által befolyásolt zóna, amely csak a rugalmas alakváltozásokat foglalja magába (EIZ vagy EdZ) (Perras et al. 2012).

### 2.1 Mértékadó tönkremeneteli mód

Ahhoz, hogy modellezni lehessen a módosult zónákat a bemenő paraméterekből, szükség van az egytengelyű nyomószilárdság (UCS), Brazil húzószilárdság, valamint a triaxiális mérésekből származó nyomószilárdság értékeire. Így – a Hoek-Brown tönkremeneteli elmélet alapján – meghatározható a valódi ép kőzet szilárdsága ( $\sigma_{ci}$ ) és az ép kőzet  $m_i$  értéke (Hoek et al. 2002). A GSI-t használva lehetőség van a kőzettest tulajdonságait bemenő paraméterként felvenni a modellezésben.

Nem minden kőzet fog azonban hasadni nagy feszültségnél. Magas porozitású és agyagban gazdag kőzeteknél leggyakrabban morzsolódás, vagy nyíródás a jellemző tönkremeneteli mechanizmus. Azon kőzettestek, amelyek nagyfokú mállottsággal rendelkező törésrendszereket foglalnak magukba, ugyancsak morzsolódás útján, illetve beomlásos tönkremenetelt szenvednek a vágathajtás következtében. Fő szabályként rögzíthető, hogy a GSI-alapú megközelítés csak  $GSI < 75$  esetében működik. Diederich 2007 kifejlesztett egy eljárást, hogy kifejezze Hoek-Brown elmélet csúcs és reziduális paramétereit a rideg viselkedés során, mivel ezek standard bemenő paraméterek a mérnöki tervezésben. A módszernek a „tönkremenetel kezdete és lepattogzási határ” (Damage Initiation and Spalling Limit) nevet adta (rövidítése a DISL). A módszer alkalmazásához szükség van a CI, UCS határértékekre és a húzószilárdságra (a továbbiakban T, azaz Tensile strength), mint bemenő tulajdonságokra. A különböző kőzetminőségi tartományokban általában a UCS/T arány mutatja meg, hogy az adott esetben a GSI-alapú megközelítést, vagy a lepattogzási, vagy hasadási potenciál (SP – Spalling Potential) elvet kell-e alkalmazni (ld. az 1. táblázatban).

2.2 A lepattogzási (spalling) potenciál empirikus meghatározása

Ha ismert a CI, akkor lehetséges a lepattogzás meghatározása és lokalizálása. A CI határérték alapján lehetőség van a túljövesztés kiterjedésének előzetes becslésére a következő képlettel:

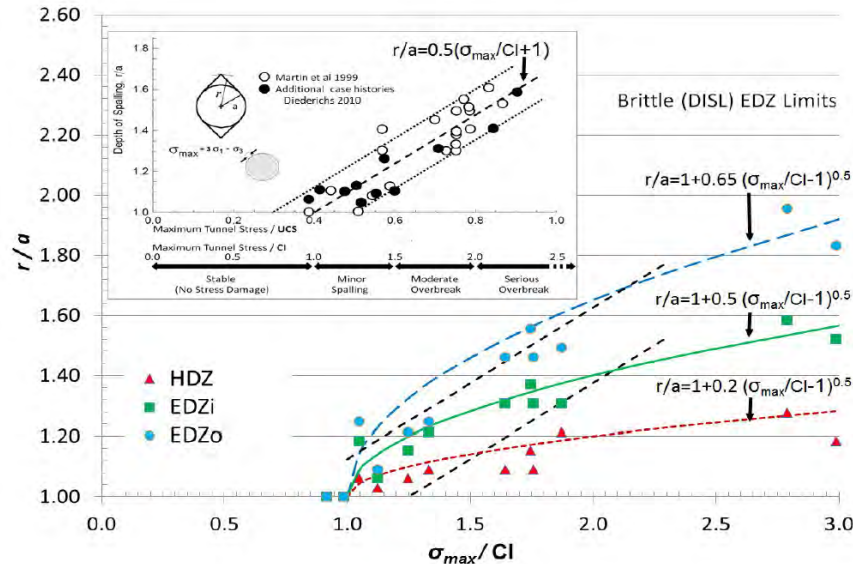
$$\frac{r}{a} = 0,5 \left( \frac{\sigma_{\max}}{CI} + 1 \right), \text{ ha } \sigma_{\max} > CI \quad (1)$$

ahol  $r$  az alagút sugara,  $a$  a lepattogzás határa az alagút szelvényének középpontjától számítva.

Egy későbbi munkában numerikus modellezéssel megállapították az EDZ felosztásában előzőleg tárgyalt zónák határait körszelvényű alagút esetében (Perras et al. 2012), (ld. a 4. ábrán). Az ábrán látható trendvonalak a megváltoztatott határértékeket mutatják, melyek segítségével az összefüggések kiterjeszhetőek magasabb feszültségállapotokra is.

**1. táblázat.** Javasolt tervezési megközelítések különböző kőzetminőségi tartományokban, különböző UCS/T arányok mellett (Diederich et al. 2010) (*Suggested approach for different rock mass qualities at different USC/T ratios*)

UCS/T	GSI<55	GSI 55-65	GSI 65-80	GSI>80
<8	GSI	GSI	GSI	GSI
9-15	GSI	GSI	GSI	GSI/SP
15-20	GSI	GSI/SP	SP/GSI	SP
>20	GSI	GSI/SP	SP	SP

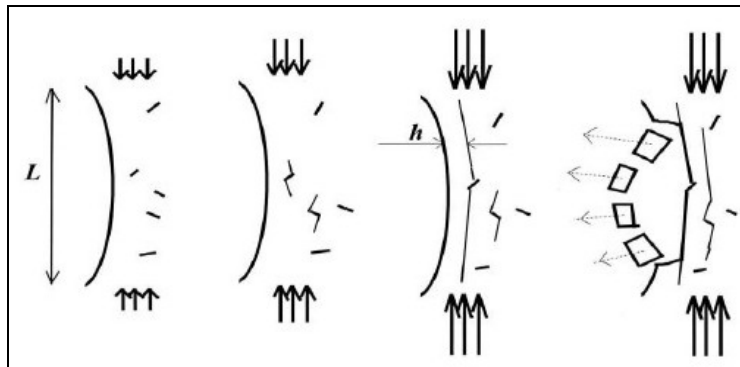


**4. ábra.** Különböző feszültségállapotban levő modellek futtatása során kapott eredmények bemutatása (a DISL-t használva Perras et al. 2012) és összehasonlítása az empirikus úton meghatározott eredményekkel (bal felső sarok – Diederich et al. 2010) (*Interpreted results from numerical modeling – using DISL – for different stress levels. Predicted limits of the EDZs are shown with comparison to the empirical limits from Diederich and martin 2010. The coloured trenf lines indicate modified limits for extrapolation to higher stress leveles*)

A bemutatott empirikus megközelítések nagy hátránya, hogy csak körszelvényű alagutak esetében lehetséges azokat használni. Mivel ez a feltétel a legtöbb gyakorlati esetben nem teljesül (így Bábaapáti-ban sem), a fenti ábrán bemutatott eredmények alapján numerikus megoldásokat kezdtünk keresni. Először kalibrációs modellezéseket végeztünk a Phase<sup>2</sup> végeselemes szoftver segítségével. Az első fázisban a tárolókamrák környezetére jellemző kőzetmechanikai paramétereket figyelembe véve egy elméleti – 2,5 m sugarú, körszelvényű – alagút segítségével azonosítottuk be az EDZ-k határait. Az esetleges méretfüggés ellenőrzése érdekében elvégeztük még más körszelvények estében is a vizsgálatot, ezek alapján elenyésző különbségek látszódtak. Később az így kapott értékeket és tapasztalatokat alkalmaztuk a már megépült tárolókamrák környezetére, így határoztuk meg a vágathajtás következtében bekövetkező feszültségátalakulások hatására a kamrákban létrejövő EDZ-k kiterjedését és térbeli elhelyezkedését. A modellezés során a vizsgált szelvények síkjában változtattuk a horizontális/vertikális feszültségek értékeit, azaz a  $k$  értéket. A 2D-s vizsgálatok esetében a Phase<sup>2</sup> (végeselemes), a 3D-s vizsgálatoknál az Examine<sup>3D</sup> (peremelemes) szoftvereket használtuk.

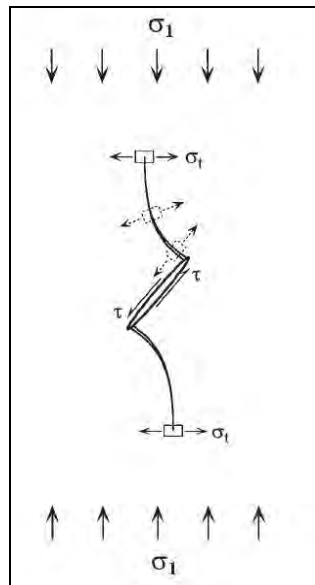
A vágathajtás során (függetlenül attól, hogy milyen módon történik a kőzet jövesztése), a feszültségváltozásból adódó azonnali hatásra kisebb kiemelkedések, illetve a kőzetpergés és kőzethasadás követ-

keztében lepattogzás történik. Ha a kisebb-nagyobb kiemelkedéseket nem a kőzettestet szabdaló törésszerek síkjai határolják, akkor a kőzetre jellemző túljövesztések, illetve a kitörési szelvény túljövesztéseit az azonnali lepattogzás (spalling) és robbantás hozzáadott roncsoló hatása együttesen okozzák. Ezek a törések, melyek a vágathajtás következtében létrejövő feszültségváltozások és a terhelésnövekedés következtében rideg tönkremenetel során keletkeznek, mind párhuzamosan helyezkednek el az alagút falával (5. ábra).

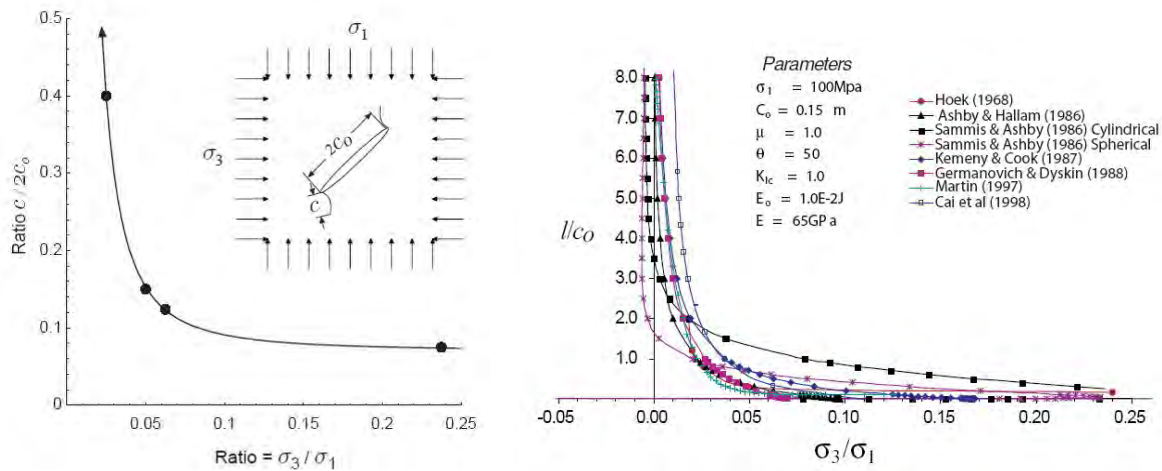


**5. ábra.** A vágathajtás hatására az alagút falzatának környezetében létrejövő rideg töréses tönkremenetel sematikus rajza (Ghazvinian et al. 2011) (*Evolving of the brittle failure around a tunnel*)

A vágatok palástkörnyezetében keletkező rideg lepattogzás, illetve a repedések keletkezésének folyamata egy Hoek professzor által elvégzett kísérlet tapasztalatai alapján írhatók le. Hoek először üveglemezekon végzett kísérleteket, és ezeken vizsgálta a repedésnövekedés és a  $\sigma_3/\sigma_1$  kapcsolatát (Hoek 1968). A kísérletből kiderült, hogy az oldalfeszültség ( $\sigma_3$ ) csökkenésével egyidejűleg ún. szárnyrepedések (wing crack) kezdtek kialakulni, majd kiterjedni, növekedni. Egy bizonyos értéktől kezdve ( $\sigma_3/\sigma_1 < 0,05$ ) a szárnyrepedések hosszúságukban számottevően növekednek (erről bővebb leírást tartalmaz a Hoek 1994). A jelenséget az 5. 6. és 7. ábrák mutatják be.



**6. ábra.** Az oldalfeszültség ( $\sigma_3$ ) nélküli rideg repedésfejlődés elméleti rajza – az elsődleges repedés mentén nyírásos deformáció, míg a szárnyrepedéseknél húzásos deformáció (dilatáció) jön létre (Eberhardt et al. 1998) (*Model of internal crack extension toward the major principal stress – along the main crack appear shear deformation and at the wing cracks roll up the dilation*)

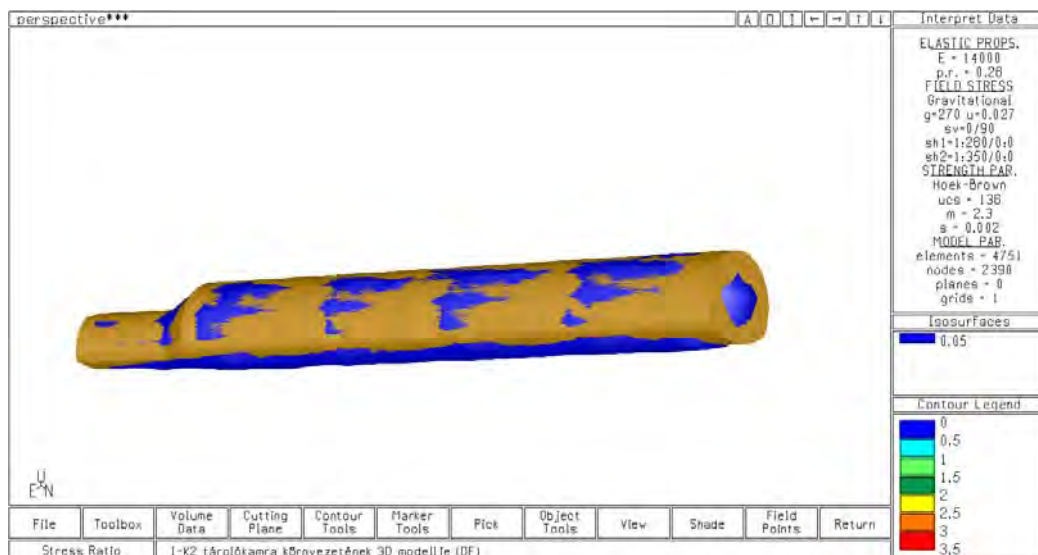


7. ábra. Az oldal feszültség ( $\sigma_3$ ) és a repedéshosszúság közti kapcsolat (bal oldalon az elméleti megközelítés, illetve jobb oldalon a különböző kőzeteken mért eredmények (Cho et al. 2002) (*Relationship between confinement stress and the crack length*))

### 3 NUMERIKUS MODELLEZÉSEK EREDMÉNYEI A BÁTAPÁTI TÁROLÓKAMRÁK EDZ-VISZONYAINAK TISZTÁZÁSÁRA

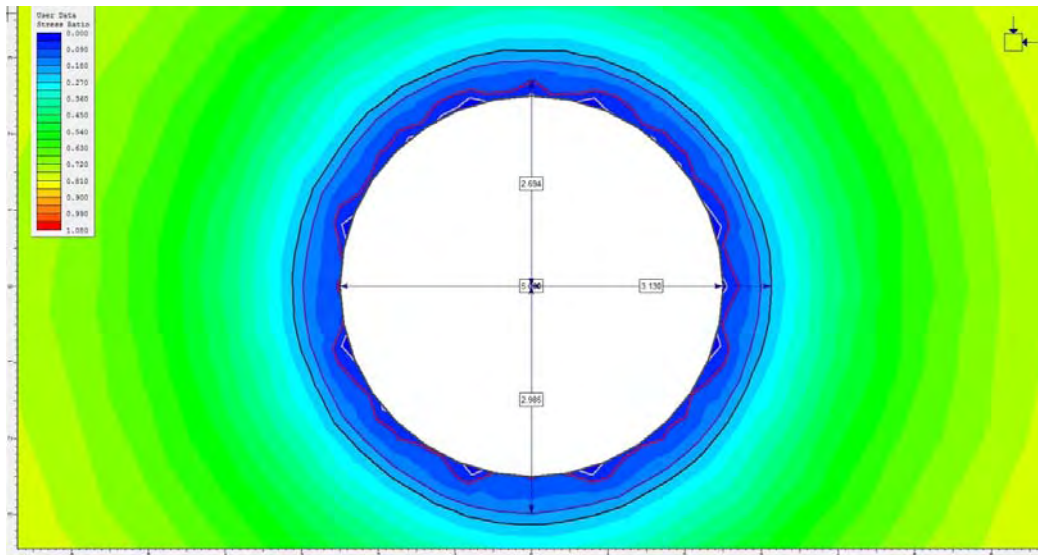
#### 3.1 Numerikus modellezési eredmények a $k=1$ feltételezésével

Az Examine3D szoftver segítségével – az I-K2 tárolókamra tényleges geometriáját alapul véve – különböző oldalnyomás-tényezők feltételezésével próbafuttatásokat végeztünk annak meghatározására, hogy a tárolókamra körül hol húzódik a fentiek szerint egyértelműen kritikusnak tekinthető  $\sigma_3/\sigma_1 = 0,05$  határfelület. A modellezés eredményét – a 2010-es GÉJ (Kandi et al. 2010) által alkalmazni javasolt  $k = 1$  oldalnyomás-tényező feltételezése mellett – a 8. ábra mutatja be.



8. ábra. A  $\sigma_3/\sigma_1 = 0,05$  határfelület alakulása az I-K2 tárolókamra körül ( $k=1$  esetében) (*The  $\sigma_3/\sigma_1 = 0.05$  threshold around the I-K2 repository chamber,  $k = 1$* )

A 2D-s megközelítés során először az említett körszelvényű alagút esetében vizsgáltuk az EDZ-k kiterjedését (9. ábra). Az empirikus módszerek alapján meghatároztuk az adott EDZ határra jellemző  $\sigma_3/\sigma_1$  értékeket, és később ezek alapján határoztuk le a kamra szelvények esetében is a különböző zónahatárokat. Az eredményeket a 2. táblázat foglalja össze. A táblázat szerint bármilyen méretű körszelvényű vágat esetében a  $\sigma_3/\sigma_1$  arány értéke alapján meg lehet határozni a jellemző zónák kiterjedését numerikus modellezés segítségével.

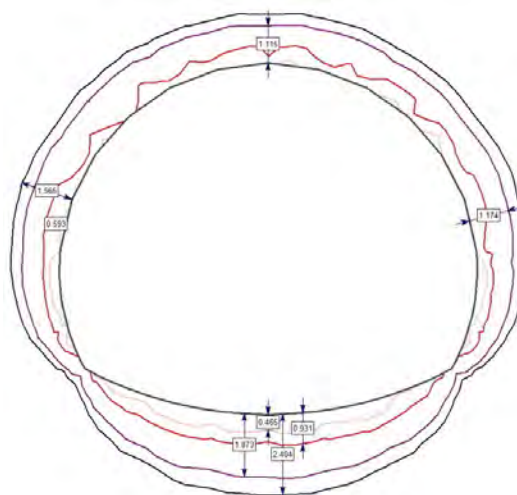


**9. ábra.** A jellemző módosult zónák kiterjedése körszelvényű üreg esetén  $k=1$  mellett (kontúrok: rózsaszín az azonnali lepattozás – spalling, piros a HDZ, lila az  $EDZ_i$  és fekete az  $EDZ_o$  határa) (Extension of the EDZs at a circular tunnel with similar input parameters like as the repository area – threshold contours: spalling with pink, HDZ with red,  $EDZ_i$  with violet and  $EDZ_o$  with black –  $k=1$  – in metric scale)

**2. táblázat.** A jellemző módosult zónák kiterjedésének empirikus meghatározása során és a körszelvényű vágat numerikus modellezése során keletkezett eredmények összefoglalása ( $k=1$ ) (Characteristic EDZs at the analysed circular tunnel –  $k=1$ )

$\sigma_{\max} = 60 \text{ MPa}$		
$\sigma_{\max} / CI = 1,15$		
Jellemző zónák	r/a	$\sigma_3/\sigma_1$
HDZ	1,07	0,084
$EDZ_i$	1,19	0,176
$EDZ_o$	1,25	0,221

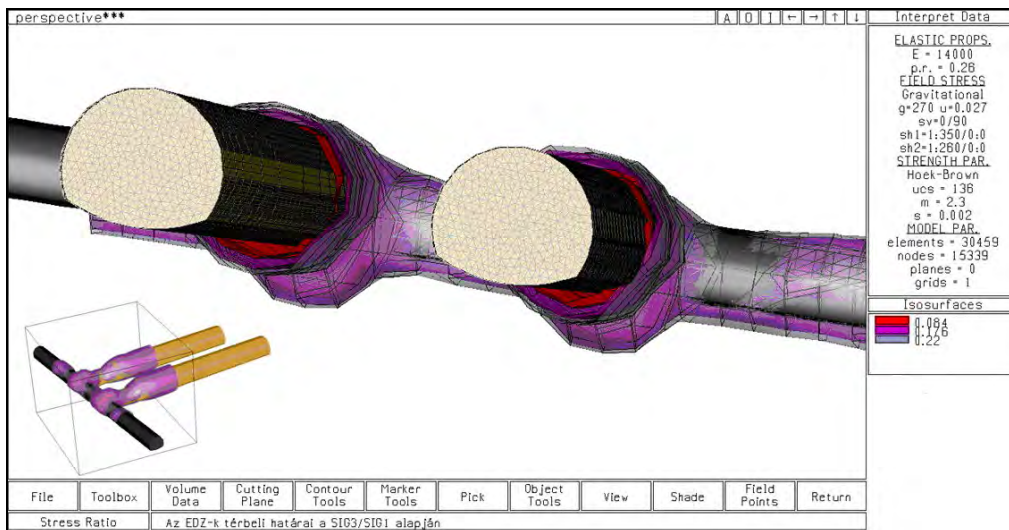
A körszelvényű vágat modellezése után az előzőekben említett feszültségarányok alkalmazásával megvizsgáltuk a tárolókamra szelvény jellemző zónáinak térbeli elhelyezkedését is (10. ábra).



**10. ábra.** A jellemző módosult zónák kiterjedése a tárolókamrák esetében –  $k=1$  (a távolságok m-ben) (Extension of the EDZs around the repository chamber – threshold contours: spalling with pink, HDZ with red,  $EDZ_i$  with violet and  $EDZ_o$  with black –  $k=1$  – metric scale)

A 2D-s numerikus modellezés után futtatásokat végeztünk 3D-ben is, hogy ellenőrizzük az EDZ-k térbeli kiterjedését a megépült két tárolókamra esetében. A kamraszelvényeket vizsgálva, szinte azonos módon alakultak a megfigyelt zónák, míg a kamraelágazásoknál az adott szelvényekre alkalmazhatóknál sokkal nagyobb kiterjedésű jellemző módosult zónát tapasztaltunk. Ez a jelenség, ami az elágazások geometriájából adódó többletterhelés miatt jön létre, gyakorlati tapasztalatok alapján jól ismert volt számunkra. Ennek vizsgálata csak 3D-s szoftverek alkalmazásával lehetséges. Az Examine3D eredményeket a következő 11. ábra, valamint a 3. táblázat foglalja össze.





11. ábra. A jellemző módosult zónák térbeli kiterjedése a nyaktagok és az elágazások környezetében (k=1) (EDZs in 3D around the repository chambers – k=1)

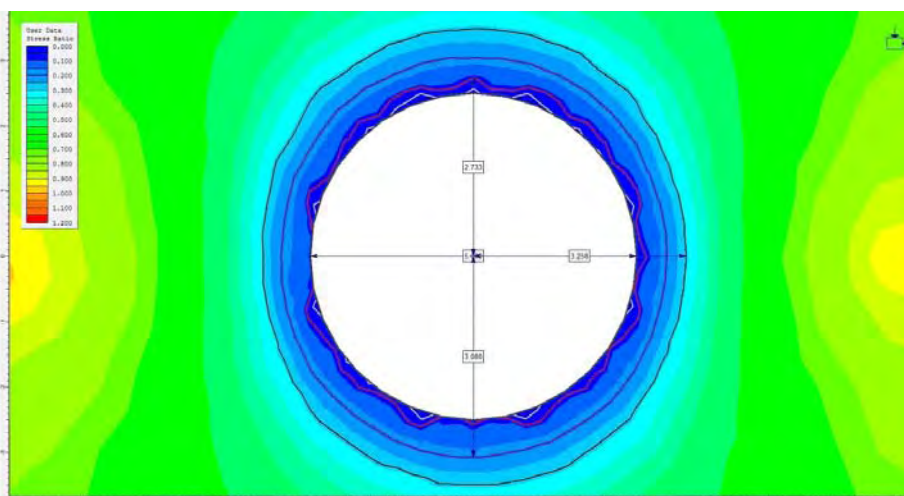
3. táblázat. A jellemző módosult zónák legnagyobb kiterjedése a kamraelágazások környezetében (k=1) (EDZs extension at the tunnel and repository chambers intersection – k=1)

$\sigma_3/\sigma_1 = 0,05$	főte	2,9 m
	talp	4,4 m
HDZ	főte	3,2 m
	talp	4,6 m
EDZ <sub>i</sub>	főte	3,6 m
	talp	5,2 m
EDZ <sub>o</sub>	főte	4,4 m
	talp	5,6 m

### 3.2 Numerikus modellezési eredmények a k=1,35 feltételezésével

Az I. kamramezőben elvégzett primer feszültségmérések alapján a tárolókamrák tengelyére merőleges síkban a k=1,35 oldalnyomás tényező alkalmazását javasoltuk. Így ezzel az értékkel is elvégeztük a fentiekben bemutatott modellek futtatásait. A horizontális/vertikális feszültségárány változtatásával a várt eredményeket kaptuk, azaz a főte és a talp környékén nagyobb kiterjedésben jelentek meg az jellemző módosult zónák.

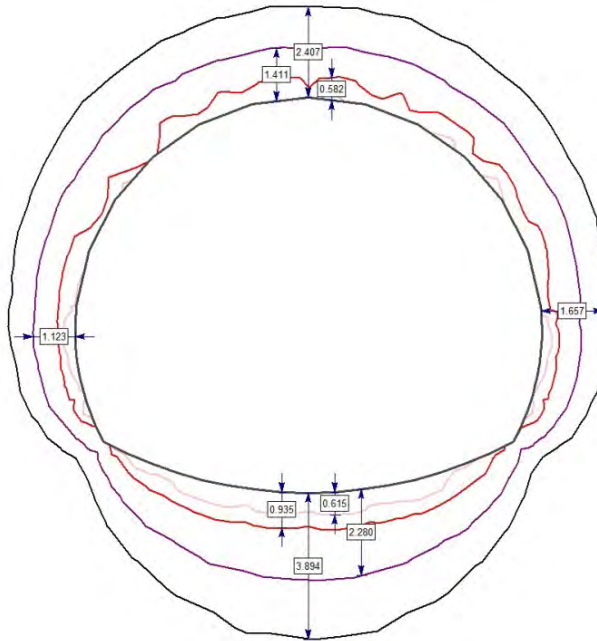
Az így kapott eredményeket az előzőekben közölt rendszerrel analóg módon a 12., 13., 14., és 15. ábrák, illetve a 4. és 5. táblázat mutatja be.



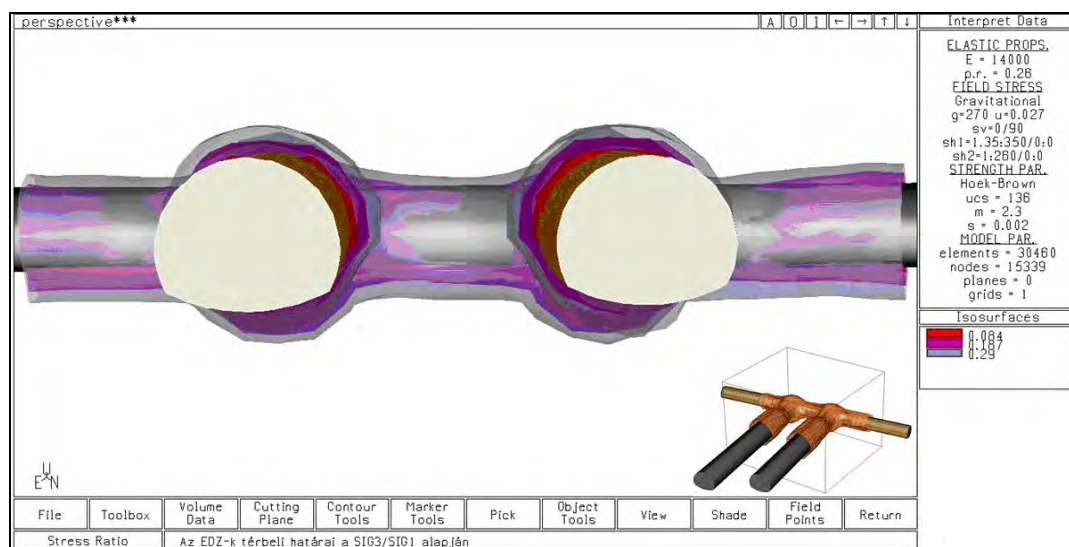
12. ábra. A jellemző módosult zónák kiterjedése körszelvényű üreg esetén – k=1,35 (kontúrok: rózsaszín az azonnali lepattozás – spalling, piros a HDZ, lila az EDZ<sub>i</sub> és fekete az EDZ<sub>o</sub> határa) (Extension of the EDZs at a circular tunnel with similar input parameters like as the repository area – threshold contours: spalling with pink, HDZ with red, EDZ<sub>i</sub> with violet and EDZ<sub>o</sub> with black – k=1.35 – in metric scale)

4. táblázat. A jellemző módosult zónák kiterjedésének empirikus meghatározása során és a körszelvényű vágat numerikus modellezése során keletkezett eredmények összefoglalása ( $k=1,35$ ) (*Characteristic EDZs at the analysed circular tunnel –  $k=1.35$* )

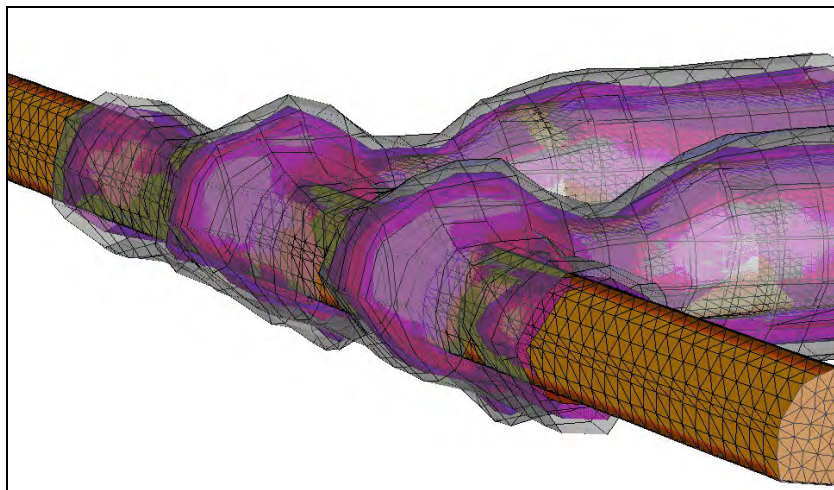
$\sigma_{\max} = 65,3 \text{ MPa}$		
$\sigma_{\max} / CI = 1,31$		
Jellemző zónák	r/a	$\sigma_3/\sigma_1$
<b>HDZ</b>	1,10	0,084
<b>EDZ<sub>i</sub></b>	1,25	0,187
<b>EDZ<sub>o</sub></b>	1,32	0,290



13. ábra. A jellemző módosult zónák kiterjedése a tárolókamrák esetében –  $k=1,35$  (kontúrok: rózsaszín az azonnali lepattozás, piros a HDZ, lila az EDZ<sub>i</sub> és fekete az EDZ<sub>o</sub> határa – a távolságok m-ben értendők) (*Extension of the EDZs around the repository chamber – threshold contours: spalling with pink, HDZ with red, EDZ<sub>i</sub> with violet and EDZ<sub>o</sub> with black –  $k=1.35$  – metric scale*)



14. ábra. A tárolókamra-szelvény jellemző módosult zónáinak kiterjedése 3D-s peremelemes modellben vizsgálva ( $k=1,35$ ) (*EDZs in 3D around the repository chambers –  $k=1.35$* )



15. ábra. A jellemző módosult zónák térbeli kiterjedése a tárolókamrák elágazásának környezetében ( $k = 1,35$ )  
(EDZs in 3D at the access tunnels repository chambers intersection –  $k=1$ )

5. táblázat. A jellemző módosult zónák legnagyobb kiterjedése a kamraelágazások környezetében ( $k = 1,35$ )  
(EDZs extension at the tunnel and repository chambers intersection –  $k=1,35$ )

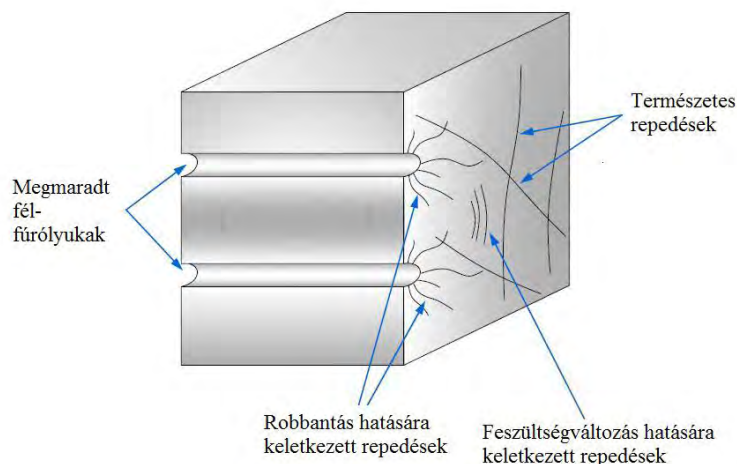
$\sigma_3/\sigma_1 = 0,05$	főte	2,9 m
	talp	4,6 m
HDZ	főte	3,3 m
	talp	4,9 m
EDZ <sub>i</sub>	főte	3,6 m
	talp	5,2 m
EDZ <sub>o</sub>	főte	4,7 m
	talp	6,3 m

### 3.3 A vágatfal környezetében robbantás hatására létrejövő tönkremenetelek

A robbantás vágatköpenyre gyakorolt roncsoló hatása geometriai megközelítés alapján elkülöníthető a feszültségváltozás által indukált tönkremeneteli jelenségektől. Míg a feszültség által kontrollált tönkremenetel a vágatfal környezetében a vágat irányával párhuzamos repedéseket, repedésrendszereket hoz létre, addig a robbantás hatására a robbantólyukakból kiindulva a vágat irányára merőlegesen, radiálisan kiterjedő repedésrendszerek jönnek létre (16. ábra). A detonáció következtében a robbanóanyag a robbantólyukban nagy térfogatú gázt termel, magas hőmérséklettel (2000-5000 °C) és magas nyomással (10 – 40 GPa) (Dinis et al. 2002). Ezek a hatások a henger alakú robbantólyuk felszínén egyfajta nyomófeszültség-impulzust okoznak, mely révén a környező kőzet kisebb-nagyobb mértékben károsodik.

A robbantás hatására keletkezett repedések hossza függ magától a robbanóanyagtól, a robbanó töltet, illetve a robbantólyuk átmérőjétől és hosszától, a késleltetési időktől, a kőzettestben jelenlévő természetes töréshálózatoktól és a víz jelenlététől (Olsson et al. 2004). A víz jelenléte növelheti a repedések tovaterjedési távolságát (3-4-szer is hosszabb repedések jöhetnek így létre, mint száraz körülmények között). Ezek a repedések a vágatkontúrhoz közlelről indulnak, de nem a robbantólyukkal kapcsolódnak össze. A kőzettestben meglévő természetes repedések lehetnek nyitottak, illetve kitöltöttek, ezek a robbantások hatására felnyílnak és továbbterjednek.

A kőzetköpenyt elsősorban a vágatszervény peremén lemélyített kontúrozó robbantólyukakból adódó mechanikai hatások roncsolják. Amennyiben ezekből a kialakult új vágatszervényben még láthatók maradnak az ún. fél-fúrólyukak (ehhez egyidejűleg kell teljesülniük a jobb minőségű kőzettest és a megfelelő robbantástechnika követelményeinek), úgy ezeknél általában az is megfigyelhető, hogy a robbantási repedések ezekből sugárirányban indulnak ki (ld. a 16. ábrán). A talp esetében a robbantás során visszahulló anyag fojtása miatt (ami 1 m vastag jövesztett anyag esetében elérheti a 20 kPa-t is Cho et al. 2002) sokkal nagyobb roncsolást végeznek a töltetek, így ezek a lyukmaradványok nagyon ritkán látszanak.

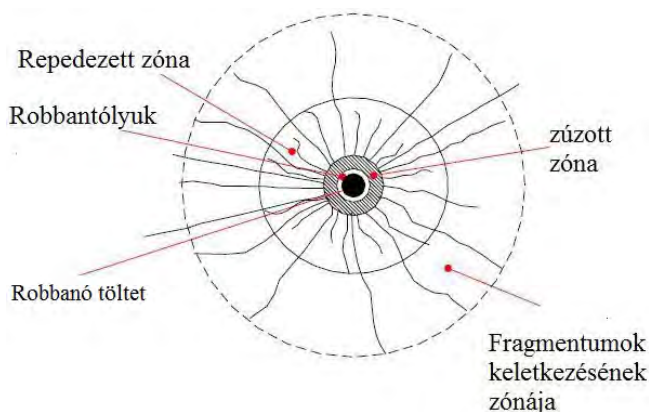


**16. ábra.** A robbantólyukak körül kialakult tönkrementeli zónák (Olsson et al. 2004 alapján) (*Damaged zones around the blast holes*)

Mivel Bátaapátiban nem történtek a módosult zónák kiterjedését és jellegét vizsgáló bemetszések („slot” Olsson et al. 2004, Saiang 2008) vizsgálatok, vagy egyéb tesztek, így nincs számszerű információk arról, hogy az NRHT-ban milyen mérvű roncsolást okoz az alkalmazott robbantástechnológia. Eppen ezért áttekintettük a vonatkozó szakirodalmat, melyek közül itt csak kétőt említünk meg.

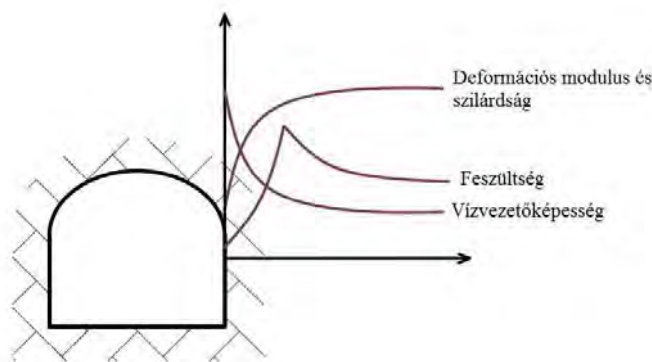
Egy orosz robbantási kísérletből, melyet kiterjedt gránit tömbökön végeztek TNT robbanóanyaggal, a következő információk keletkeztek (Palmström et al. 2001, Vovk et al. 1974):

- A zúzott (crushed) zóna az adott fűrőlyuk átmérőjének kb. 5-17-szeres távolságáig terjedt.
- A repedezett (fractured) zóna az adott fűrőlyuk átmérőjének kb. 12-szeres távolságáig terjedt.
- A zavart zóna az adott fűrőlyuk átmérőjének kb. 25-35-szörös távolságáig terjedt (17. ábra).



**17. ábra.** A robbantólyukak körül kialakult tönkrementeli zónák (Saiang et al. 2008 alapján) (*Damaged zones around the blast holes*)

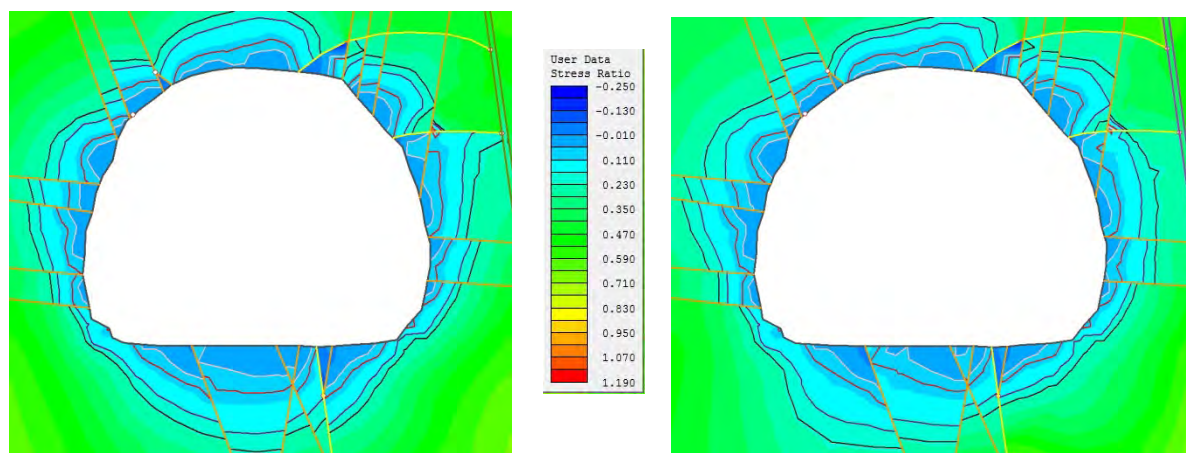
A svéd gránitok esetében (kirunai gránitok) a tönkrementeli zóna maximális távolsága az adott vágatfalhoz képest ellenőrzött robbantás esetében elérte a 0,7 m, míg kevésbé ellenőrzött robbantás esetében az 1,2 m-t. A robbantások hatására keletkezett repedések hossza átlagosan 0,3 m volt. A robbantás hatására keletkezett roncsolt zónában a vágatfaltól a kőzettest mélyebb és egyben zavartalan részei felé haladva a deformációs modulus és a szilárdsági értékek nőnek, míg a vízvezető képesség csökken (18. ábra).



**18. ábra.** A különböző kőzetfizikai tulajdonságok változásának trendjei a vágatfaltól távolodva (Saiang 2008 alapján) (*Theoretical behavior of the usually assessed parameters around a tunnel boundary*)

### 3.4 A kőzettestben meglévő diszkontinuitások befolyása a módosult zónák kialakulására

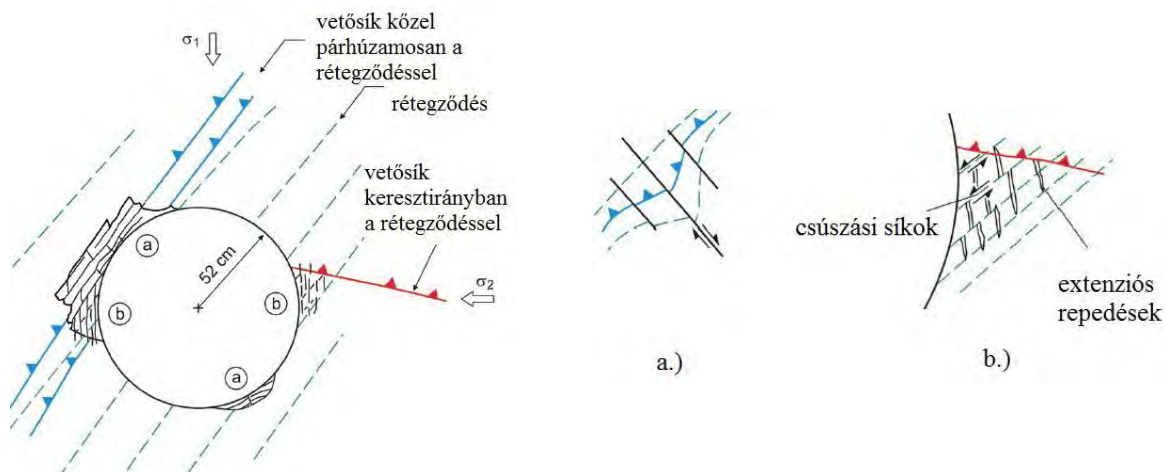
A kőzettestben a vágathajtást megelőzően jelen vannak különböző törésrendszerek, rétegződés, vagy szerkezeti gyengülést okozó közethatárok. Ezek a szerkezeti elemek teljesen megváltoztatják a módosult zónák kialakulását ahhoz képest, ahogy azt tiszta kontinuummechanikai megközelítés alapján láthatnánk. A szóban forgó diszkontinuitások mentén feszültségátboltozódás történik, ezáltal a jövesztési szelvény alakjától teljesen eltérő módon alakulhatnak ki az módosult zónák határai (még a  $k = 1$  esetében is). A 19. ábrán látható Phase<sup>2</sup>-modellek – a robbantás roncsoló hatását figyelmen kívül hagyva – mutatják be az EPZS030\_0045 fogás szelvényében dokumentált fontosabb törések módosító hatásait a feszültségváltozási viszonyokra, és ezzel egyúttal az EDZ kiterjedésére.



**19. ábra.** Az EPZS030\_0045 fogás szelvényében dokumentált fontosabb törések módosító hatása a jellemző módosult zónák kiterjedésére (bal oldalon  $k = 1$ , jobb oldalon  $k = 1,35$  – kontúrok: rózsaszín: a  $\sigma_3/\sigma_1 = 0,05$  határ, piros a HDZ, lila az EDZ<sub>i</sub> és fekete az EDZ<sub>o</sub> határa) (*Extension of EDZs in the EPZS030\_0045 advance, considering the documented fractures without blast damages – threshold contours:  $\sigma_3/\sigma_1 = 0,05$  or spalling with pink, HDZ with red, EDZ<sub>i</sub> with violet and EDZ<sub>o</sub> with black –  $k=1$  at left;  $k=1.35$  at right*)

Egyértelmű megállapítás, hogy a kőzettestben jelenlévő diszkontinuitások befolyásolják a vágatok állékonyságát, a vágatfali tönkremeneteleket, ezáltal a jellemző módosult zónák kiterjedését is. Az 20. ábrán néhány alapvető tönkremeneteli mechanizmust mutatunk be, melyek a jövesztett üreg körül jelenhetnek meg a vágathajtást követően a meglévő diszkontinuitások következtében.

A röviden bemutatott diszkontinuitások EDZ-re gyakorolt hatásait nagyon jó hatásfokkal lehet vizsgálni a Phase<sup>2</sup> szoftverben. Erre végzett egy kiemelkedően jó összefoglaló kutatást Salina Yong, aki az Opalinus Clay formáció kutatólaboratóriumában vizsgálta a vágathajtás hatására keletkezett töréseket, együtt a régebbi törésrendszerekkel (Yong et al. 2008).

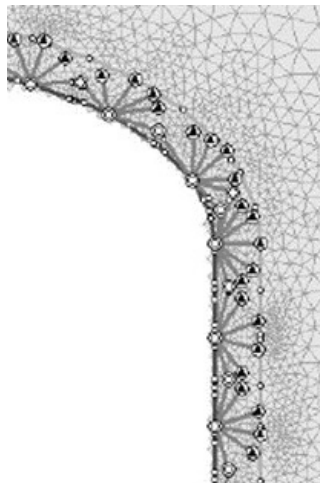


**20. ábra.** A kőzettestben jelenlévő diszkontinuitások tönkremeneteli mechanizmusokat befolyásoló hatásai (Bal oldalon fent: táblás tönkremenetel, illetve lepattogzás, míg a jobb oldalon ékszerű tönkremenetel, vagy kiékelődés, Lanyon 2011 alapján) (*Key process and features that affect excavation stability – pre-existing discontinuities*)

### 3.5 Az EDZ-probléma lehetséges kezelési módjai a numerikus modellekben

A problémakör szokásos megközelítési módja szerint EDZ-ként csak a robbantások roncsoló hatása által közvetlenül érintett térrészt szükséges azonosítani. A feszültségváltozásból adódó lepattogzás, kőzethullás jelensége – amennyiben a fentiekben bemutatott elveket, adatokat és eljárásokat a numerikus modellezés során alkalmazzuk – a futtatási eredményekben automatikusan megjelenik. Ennek oka az, hogy az e vonatkozásban is tesztelt kódok a bennük foglalt algoritmusokkal kezelik a feszültség hatására létrejövő kőzetkárosodást, valamint a rideg-képlékeny deformációkat.

A robbantás roncsoló hatásával kapcsolatos helyszínspecifikus információk hiányában a modellezés során a szakirodalomban fellelhető megközelítések használatát javasoltuk a tervezés során. Ezek alapján a következőket célszerű tenni: a kiválasztott és modellezésnél használt üregszelvény esetében a robbantási kontúrlyukaktól indulva  $15^\circ$  kiosztásban kell a repedéseket felvenni, maximálisan 0,5 m hosszal. Azokat a repedéseket, amelyek metszik egymást, a végüknél zártaknak kell definiálni a szoftverekben (Saiang et al. 2008 és Saiang 2008), (21. ábra).



**21. ábra.** Szelvények kontúrozó robbantólyukaiból kinduló repedésrendszerek a Phase<sup>2</sup> szoftverben, zárt végekkel (*Modeling possibility of the artificial fractures from the blast holes*)

A Phase<sup>2</sup> modellezés során használható törésrendszereket definiálva a modellfuttatás során a robbantás által roncsolt zóna az egyéb mechanikai tulajdonságok gyengítése nélkül, csupán a diszkontinuitások jelenlétével már létrehoz a kőzettestben egy gyengült zónát az így létrejövő hibrid modellben. Így ezzel a megoldással a károsodási tényező bevezetése és alkalmazása szükségtelenné válik.

A 2D-s diszkrét elemes modelleknél hasonló módon ajánljuk a robbantás által roncsolt zóna kezelését, ahogyan azt a Phase<sup>2</sup> modell esetében bemutattuk. A törésrendszerek 3D-s alkalmazhatóságát az említett roncsolt zóna esetében még vizsgáljuk.

Amennyiben a tervezés olyan végeselemes, véges differenciás, illetve peremelemes módszereket alkalmazó szoftverekkel folyik, amelyekben nincs lehetőség a fent bemutatott mesterséges repedésrendszerek bevezetésére, a károsodási tényező alkalmazása nem elkerülhető. Ehhez a Bábaapátiban eddig is alkalmazott, meglehetősen leegyszerűsített zóna-lehatárolásokat kell pontosítani. Részben a tárolókamrákban kialakított EDZ-szelvények pakkeres vizsgálati eredményei, részben pedig a nemzetközi szakirodalmi utalások, illetve az azokra alapozott, a fentiekben bemutatott numerikus mechanikai modellezések eredményei alapján ez a korábbiaknál megalapozottabb módon tehető meg. Mindezek alapján a további tárolókamrák tervezéséhez a kamrák palástján a  $D=0,15$ ; míg a kamrák talpán a  $D=0,3$  károsodási tényezőt javasoltuk alkalmazni (Hoek et al. 2002 és Hoek 2012 bővebben faji ki a  $D$  érték használatát). Az EDZ sugárirányú kiterjedését a palást mentén egységesen 0,5 m-nek, míg a talpon 1,0 m-nek javasoltuk felvenni. (Megjegyezzük, hogy a talpi EDZ kiterjedése és károsodási értéke a tárolókamrában csak abban az esetben vehető fel ilyen alacsonynak, ha a továbbiakban is két-szeletes jövesztési mód kerül alkalmazásra.)

#### 4 AZ EDZ IDŐFÜGGVÉNYŰ VISELKEDÉSE

Alagútépítési szempontból a reológiai hatásokat a vágat (alagút, kamra, stb.) közvetlen kőzetkörnyezetének megváltozott, módosult adottságú külső zónájából és a biztosítószerkezetekből álló komplex rendszerben kell vizsgálni és értelmezni. (Az előző fejezetben leírtak szerint ezt a rendszert az EDZ-vel, illetve – tágabb értelemben – az EdZ-vel is azonosíthatjuk. A vágathajtás lezárását követően a vágat körüli módosult zónák időfüggő fejlődésében a következő hatások, illetve folyamatok játszhatnak szerepet (Lanyon 2011):

Kúszás (creep), mind kompressziós, mind nyírásos jelleggel; a rövid távú folyamattól a nagyon hosszú távú folyamatokig;

- a tönkrement kőzet relaxációja;
- a biztosítószerkezetek korróziója, degradációja;
- a kőzetköpeny anyagának kémiai átalakulása;
- a pórusnyomás változása.

Egy radioaktív hulladék-tároló létesítéséből és üzemeltetéséből adódó specifikus, hosszú időtávú változások:

- a kőzetet érő intenzív hőmérsékleti, illetve besugárzási hatások következtében létrejövő feszültség-változás (a L/ILW tárolók, így az NRHT esetében ez elhanyagolható);
- a kémiai kölcsönhatások, melyek a befogadó kőzet és a mérnöki gátak között aktiválódhatnak;
- a tároló lezárásával járó esetleges olyan bányászati tevékenységek, melyek a feszültségtér megváltozásához vezethetnek a vágatfalak környezetében.

Kőzetmechanikai szempontokra leszűkítve a fenti felsorolást, időfüggő deformációkat relaxációs, kőzetkúszási, illetve késleltetett EDZ-viselkedési folyamatok is okozhatnak. Az említett folyamatok eredményeként – alapértelmezésben – a megváltozott adottságú zónában folyamatos extenzió megy végbe. Az arra hajlamos képződmények esetében folyamatos extenzió és sok esetben az oldalfeszültség csökkenése miatt rideg tönkremenetelre is sor kerülhet az EDZ-ben. Az  $EDZ_i$  és  $EDZ_o$  zónákban az elkezdődött makro-, illetve mikro-repedések továbbfejlődhetnek, illetve egyesülhetnek. A HDZ zónában a vágathajtással egy időben, illetve azt követően rövid idő alatt keletkeznek a repedések. Itt a repedés továbbfejlődés több hétig, míg az megváltozott adottságú zóna külsőbb részeiben akár több évig, vagy akár több tíz évig is eltarthat. A repedések jelenlétének lokális léptékben is feszültségmódosító hatása van. Így az említett repedésterjedési folyamatok révén a zóna terhelési viszonyai és deformációs képe is folyamatosan változhatnak.

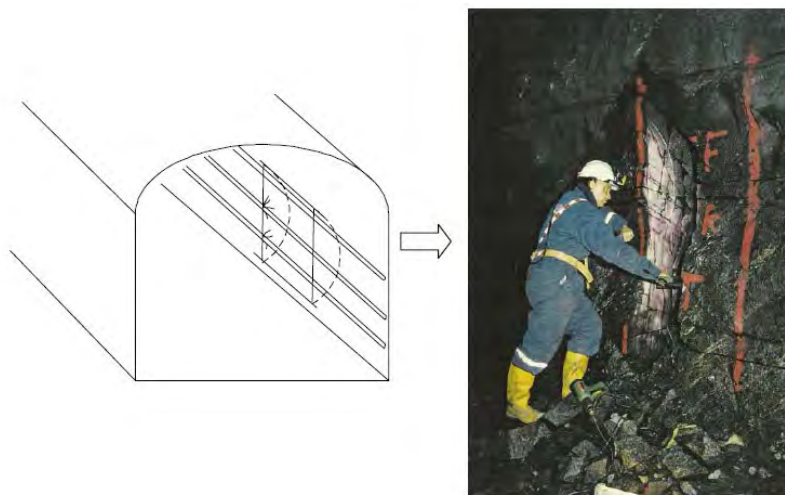
A vonatkozó szakirodalom szerint a különféle tulajdonságú kőzetek reológiai viselkedésének elméleti leírására rendkívül sokféle összetett, pl. viszko-elasztikus, viszko-plasztikus, viszko-elasztó-plasztikus, stb. mechanikai modell született. Néhány általánosan elfogadott modell: a Poynting – Thomson-féle ún. standard modell, Kelvin-Voigt, Lemaitre viszkoplasztikus tönkremeneteli törvény stb. (Pellet et al. 2006 és 2009, Kovács et al. 2012)

#### 5 AJÁNLÁSOK AZ EDZ KUTATÁSÁRA

Bár a Bábaapátiban folyó EDZ kutatások eddig is nagyon sok eredményt hoztak, ezek alapján nem lehetséges a jellemző módosult zónák határainak megállapítása, illetve azok részletes kőzetmechanikai jellemzése. Az eddigi kutatásokra elsősorban a hidraulikai, hidrodinamikai jellemzésre koncentráltak, illetve a kutatásban alkalmazott egyéb módszereket is ezeknek a kutatási területeknek rendelték alá.

Amint az a bemutatottakból is jól érzékelhető, a fentiekben, elméleti és tapasztalati módszerekkel leírt megközelítések kőzetmechanikai szempontból is jelentősen emelhetik a témakörben rendelkezésre álló ismeretek szintjét, másrészt hatékony módon egészíthetik ki, támogatják a hidrogeológiai értelmezéseket.

A fentiekben bemutatott megközelítések és modellezések eredményeit szükséges lenne a terepen is ellenőrizni. A meglévő radiális irányú fúrások (sugaras EDZ, extenzométer fúrások) maganyagának további vizsgálata, illetve a BHTV adatainak mélyebb elemzése nagy segítség lehetne. Emellett hasznos lenne még az ún. ragasztó beinjektálásos módszer – resin injection study – alkalmazása is, amely révén az így előkezelt fúrólukokban UV fényben vizsgálva sokkal nagyobb hatásokkal lehetséges a repedésrendszerek felmérése (Saiang 2008) (22. és 23. ábrák).



**22. ábra.** Bevágásos-szeleteléses (slotting) módszer (Saiang 2008) (In situ inspection of the EDZ's fractured zone with slotting method)



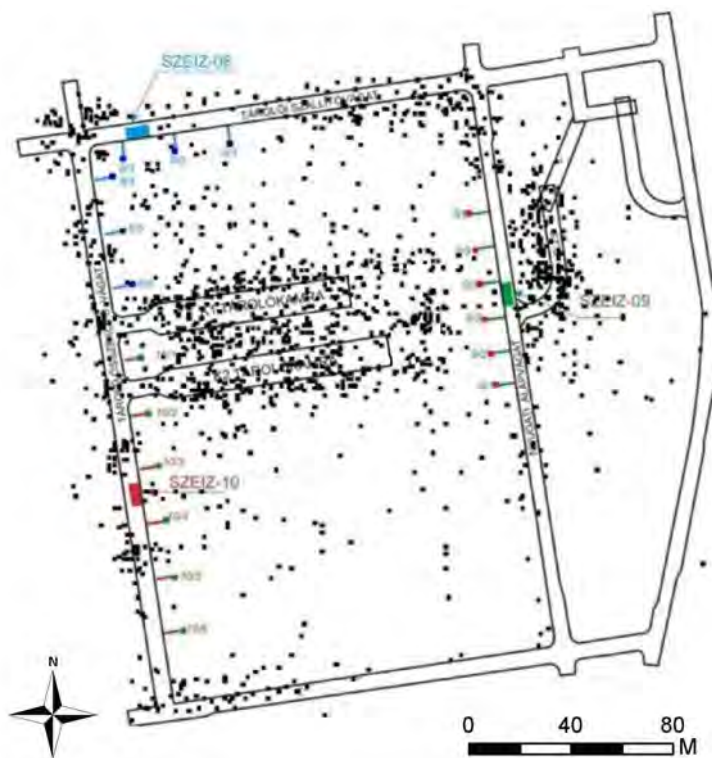
**23. ábra.** EDZ vizsgálati bevágások gránit befogadó kőzetben, Aspö HRL (Slotting remains in the Aspö HRL)

A geofizikai módszerek során alkalmazása során nagyon jó hatásokkal lehet használni szeizmoakusztikus mérések eredményeit. Az elkészült adatbázis egy speciális szoftver környezetben vált elérhetővé, melynek környezetében lehetséges időbeli, intenzitásbeli stb. szűrés. Ellenben nagy hátránya, hogy a fészekmechanizmus lokalizálására csak egy 2D-s térképi megjelenítést tesz lehetővé (24. ábra). A meglévő adatbázist vizsgálva, az akusztikus zajforrások koncentrációi jól korrelálnak az általunk meghatározott EDZ-k kiterjedésével.

A jövőben célunk ezen adatbázis több éves adatbázisának megjelenítése az EXAMINE3D-ben együtt az EDZ zónákkal és annak ellenőrzése, hogy ezek hogyan korrelálnak.



A jövőbeni EDZ-kutatásoknál a legfontosabb szempont a multidiszciplinaritás kell legyen. Úgy értékeljük, hogy az EDZ kiterjedése és jellemzése kizárólag hidrogeológiai megközelítésekkel nem végezhető el kielégítő módon. Különböző helyszíneken, de azonos mérési kampányban, összehangolt, párhuzamosan végzett kutatási módszereket lenne célszerű alkalmazni, és azok eredményeit összevetni (pl. a hidrodinamikai paraméterek időbeli változásait és a vágat környezetében kialakuló EDZ deformációs folyamatait mindenképpen közösen, azonos rendszerben kellene meghatározni és értelmezni).



**24. ábra.** A tárolótérben kialakított szeizmoakusztikus (AE) hosszú távú monitoring rendszer elemei és egy két hónapos időtartam alatt regisztrált szeizmoakusztikus aktivitás 2D-s ábrázolása (Bakai et al. 2012) (*The seismoacoustic monitoring system and AE activity recorded around the repository area in Bataapáti*)

## 6 ÖSSZEFOGLALÁS

Az EDZ kutatás nagy fontossággal bír nemcsak a radioaktív hulladék-tárolók kutatásában, hiszen a földalatti üregek körüli kőzetköpeny a fűrópajzsos, vagy egyéb bányászati kialakítás során és utána időben elnyúló tönkremenetele gyengítheti az alkalmazott kőzetbiztosítást, ezáltal kérdésessé válhat az üregek hosszú távú állékonysága. Egy másik fontos szempont a radioaktív hulladék-tárolók esetében annak lehetősége, hogy az EDZ-k bizonyos zónáiban felgyorsulnak a transzport folyamatok a nagyfokú repedezettség következtében. Néhány esetben az időfüggvényű deformáció során ezek a tulajdonságok változhatnak mindkét irányban, éppen ezért fontos az EDZ hosszú távú kutatása.

Vizsgálataink során több numerikus modellezést végeztünk el és a kapott eredményekkel a nemzetközi elvárásoknak megfelelően sikeresen különítettük el az EDZ zónákat. Az elkülönített EDZ-k és kiterjedésük azonosak úgy a 2D, mint a 3D modellezési eredményekben és azok egybe vágnak az eddigi terepi megfigyeléseinkkel. Az előbbi megállapítások nem érvényesek a különböző elágazásokra (pl. tárolókamra elágazás), amelyeket csak 3D-ben lehet megfelelően vizsgálni. Ezen vizsgálatok eredményeként megállapíthattuk, hogy az eredeti koncepció mely szerint a beton záródugó rögtön az elágazásnál lenne kialakítva, nem biztonságos. Jelen kutatási eredmények arra engednek következtetni, hogy a végleges lezárás során a beton műtárgyat a nyaktagnak nevezett kamrarész felbővítéshez közeli részén ajánlott kialakítani.

## 7 IRODALOM

- Andrássy M., Darvas K., Korpai F., Ludmann L. (2012). Az EDZ kiterjedése, tulajdonsága a tárolókamrák környezetében. Golder, Kézirat – RHK-K-004/12 – RHK jelentés, 2012. június, 101 p.
- Bakai J., Kardos J., Szűcs I. (2012). Aktív szeizmoakusztikus rendszer üzemeltetése (Szeiz-08, Szeiz-09, Szeiz-10), Kézirat – RHK-K-045/12 – RHK jelentés, 2012. június, 47 p

- Bossart P., Meier P. M., Moeri A., Trick T., Mayor J. C. (2002). Geological and hydraulic characterization of the excavation disturbed zone in the Opalinus Clay of the Mont Terri Rock Laboratory. *Engng Geol.* **66**: 19-38.
- Carlsson 1986. The international Stripa project. IAEA Bulletin, Spring 25:28.
- Cho N., Martin C. D., Christiansson R. (2002). Suppressing fracture growth around underground openings. Hammah R. (Ed): Proc. 5th North Am. Rock Mech. Symp. 17th Tunneling Ass. Canada Conf., Toronto, 130-138.
- Deák F., Kovács L., Vásárhelyi B. (2013). Modeling the Excavation Damaged Zones in the Bataapáti radioactive waste repository. *Rock Mechanics for resources, energy and Environment – Kwasniewski and Lydsba (eds), Taylor & Francis Group, 603-608.*
- Diederich M. S. (2007). Mechanistic interpretation and practical application of damage and spalling prediction criteria for deep tunneling. *Canadian Geotechnical Journal* 44(9): 1082-1116.
- Diederich M. S., Kaiser P. K., Eberhardt (2004). Damage initiation and propagation in hard rock during tunneling and the influence of near-face stress rotation. *Int. J. Rock Mech. & Mining Sci.* 41: 785-812.
- Diederich M. S., Martin C. D. (2010). Measurement of spalling parameters from laboratory testing. *Rock Mechanics in Civil and environmental Engineering – Zhao, Labiouse, Drudt & Mathier (eds) – EUROCK2010, ISRM, Taylor & Francis Group, London, pp. 323-326.*
- Dinis D. G. C., Navarro T. V (2002). Prediction of EDZ (Excavation Damaged Zone) from explosive detonation in underground openings. *ISRM International Symposium on Rock Engineering from Mountainous Regions – EUROCK2012, Funchal, 8 p.*
- Eberhardt E., Stead D., Stimpson B., Read R. S. (1998). Identifying crack initiation and propagation thresholds in brittle rock. *NRC Canada, Canada Geotech J.* 35: 222-223.
- Ghazvinian E., Diederich M., Archibald J. (2011). Challenges related to standardized detection of crack initiation thresholds for lower-bound or ultra-long-term strength prediction of rock. *Pan-Am CGS Geotechn. Conf.* 8 p.
- Hoek E. (1968). Brittle failure of rock. *Rock mechanics in engineering practice, K. G. Stagg; O. C. Zienkiewicz eds., Wiley & Sons Ltd., London, pp. 99-124.*
- Hoek E. (2012). Blast damage factor D. Technical note for Rocscience by evert Hoek, 2. february 2012, 7 p.
- Hoek E., Carranza-Torres C., Corkum B. (2002). Hoek-Brown criterion – 2002 edition. *Proc. NARMS-TAC Conference, Toronto, 2002, 1, pp. 267-273.*
- Hoek E., Kaiser P. K., Bawden W. F. (1995). *Support of Underground Excavations in Hard Rock, Balkema, Rotterdam, Reprinted in 2005, 215 p.*
- Kandi E., Hersvik D., Váró Á., Bicskei D., Viszolyai R., Arató P. (2010): *Geotechnikai értelmező jelentés. Kézirat – Mott MacDonald Magyarország Kft., Budapest, 2010. április. RHK Kft. Irattár. RHK-K-059/10.*
- Kovács L., Deák F., Mészáros E., Somodi G., Máté K., Jakab A.; Vásárhelyi B.; Geiger J.; Dankó Gy., Korpai F., Mező Gy., Darvas K.; Ván P., Fülöp T., Asszonyi Cs. (2012). *A Geotechnikai Értelmező Jelentés (GÉJ) felülvizsgálata és kiterjesztése. Kézirat – Kőmérő Kft. Pécs, 2012. december. RHK-K-032/12., 312 p.*
- Lanyon G. W. (2011). *OPG's Deep Geologic Repository for Low & Intermediate Level Waste – Excavation Damaged Zones Assessment. Report prepared by Fracture System Ltd. March 2011, 95 p.*
- Lanyon G. W., Marschall P., Trick T., Vaissiere R., Shao H., Leung H. (2009). Hydromechanical evolution and self-sealing of damage zones around a microtunnel in a claystone formation of the Swiss Jura mountains. *43<sup>rd</sup> U. S. Rock Mechanics Symposium & 4th U. S. – Canada Rock Mech. Symp. paper 09-152.*
- Olsson M., Niklasson B., Andersson C., Christiansson R. (2004). Aspö HRL – Experiences of blasting of the TASQ tunnel. *SKB Report, R-04-73, 2004. November, 77 p.*
- Palmström A., Singh R. (2001). The deformation modulus of rock masses - comparisons between in situ tests and indirect estimates. *Tunnel. Underg. Space Technol.* 16, pp. 115-131.
- Pellet F., Roosefield M., Deleruyelle F. (2009). On the 3D numerical modelling of the time-dependent development of the damage zone around underground galleries during and after excavation. *Tunneling and Underground Space Technology* 24: 665-676.
- Pellet F., Zerfa Z. (2006). Modelisation numerique du comportement differe des ouvrages souterrains. *Journées Nationales de Geotechnique et de Géologie de l'Ingénieur – JNGG' 2006 Lyon (France), pp. 65-71.*
- Perras M., Langford C., Ghazvinian E., Diederich M. (2012). Numerical delineation of the excavation damage zones: From rock properties to statistical distribution of the dimensions. *ISRM, EUROCK2012, Stockholm, 14.*
- Saiang D. (2008). Behavior of blast-induced damaged zone around underground excavations in hard rock. *Diploma Thesis, Lulea University of Technology, 110 p.*
- Saiang D., Nordblund E. (2008). Numerical analyses of the influence of blast-induced damaged rock around shallow tunnels in brittle rock. *Rock Mech. Rock Eng.* 27 p.
- Tildy P. (2009). *Jelentés az EDZ zóna geofizikai vizsgálatáról. ELGI, Kézirat – RHK-K-069/09 – RHK jelentés, 2009. június, 16 p*
- Tsang C-F., Bernier F., Davies C. (2005). Geohydromechanical processes in the Excavation Damaged Zone in crystalline rock, rock salt and indurated and plastic clays – in the context of radioactive waste disposal. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 42: 109-125.

- Vovk A. A., Mikhalyuk A. V., Belinski I. V. (1974). Development of fracture zones in rocks during camouflet blasting. Soviet Mining Science.
- Yong S., Kaiser P. K., Loew S., Fidelibus C. (2008). The role of heterogeneity ont he development of excavation-induced fractures int he Opelinus Clay. Canadian geotechnical Conference, Edmonton, Canada, 8 p.