

KŐZETEK GEOLÓGIAI TULAJDONSÁGAINAK HATÁSA AZ APRÍTHATÓSÁGRA, ŐRÖLHETŐSÉGRE, KŐZETFIZIKAI ÉS MECHANIKAI TULAJDONSÁGRA

Doktori (PhD) értekezés tézisei

Készítette:

Márkus Izabella Rebeka
okl. földtudományi mérnök
okl. bányá- és geotechnikai mérnök

Tudományos témavezetők:

Dr. Rácz Ádám
egyetemi docens
Prof. Dr. habil Mucsi Gábor
egyetemi tanár

MIKOVINY SÁMUEL FÖLDTUDOMÁNYI DOKTORI ISKOLA

A doktori iskola vezetője: Prof. Dr. Szűcs Péter
egyetemi tanár, MTA levelező tagja

Miskolc 2025.

I. Az értekezés célja, tudományos előzményei

Az aggregátumok iránti globális kereslet folyamatos növekedése és a jó minőségű nyersanyagok elérhetőségének csökkenése komoly kihívást jelent az iparág számára. A 2022. évben Európa szinten 1809 millió tonna zúzottkővet állítottak elő, az egy főre eső felhasználás ~6 t/év, amely a közeljövőben növekvő tendenciát mutat. A zúzottkő-előállítás egyik legjelentősebb költségtényezője az aprítás, amely a teljes energiafelhasználás 30–70%-át is kiteheti. Figyelembe véve az aprítási folyamat energiaigényességét és a jó minőségű nyersanyag készletek csökkenését, az aprítási folyamatok optimalizálása a zúzottkő előállítás területén is. A folyamat energiaszükségletét két fő tényező befolyásolja: az alkalmazott aprító berendezés és a feldolgozott nyersanyag tulajdonságai. A hatékonyabb termelés és az energiafelhasználás optimalizálása érdekében elengedhetetlen a nyersanyag tulajdonságainak és a nyersanyag apríthatósága közötti kapcsolatok, valamint a végtermék minőségre gyakorolt hatásának ismerete.

Wills és mtsai. (2006) szerint a hatékony ásványelőkészítési technológiákhoz elengedhetetlen a feldolgozott nyersanyag kőzettani jellemzőinek pontos ismerete, az ásványos alkotók pontos ismerete, ezek eloszlása, társulása, alakja és térbeli szerkezete. A kőzettani jellemzők és az apríthatóság, őrlhetőség, valamint a termékminőség közötti összefüggés évtizedek óta foglalkoztatja a kutatókat. A magyar nyelvű szakirodalomban Beke (1974) és Csőke (1975, 1979) munkái már a 20. század második felében rámutattak a kőzetszövet és az apríthatóság kapcsolatára, szemben az akkori domináns szemlélettel, amely az apríthatóságot elsősorban a fizikai-mechanikai tulajdonságokkal (keménység, rugalmasság stb.) magyarázta.

A nemzetközi szakirodalomban a vizsgálatok többsége az érces ásványi nyersanyagokra irányul, ahol a kutatások elsődleges célja az értékes komponensek minél hatékonyabb feltárása és kinyerése (Abdelhaffez, 2020; Bonnici, 2012; Comakli & Cayirli, 2019; Kecec et al., 2006; Lois-Morales et al., 2022; Pérez-Barnuevo et al.,

2013; Petruk, 2000; Tugrul & Zarif, 1999). Az ásványos összetétel és a szöveti tényezők hatásának megítélése ugyanakkor eltérő a kutatók körében. Egyes szerzők (Yildirim, 2016; Abdelhaffez, 2020) kiemelik az ásványos összetétel, különösen az ásványok keménységének szerepét az őrlhetőség szempontjából, hangsúlyozva, hogy a másodlagos szulfátok és agyagásványok jelentősen rontják az őrlhetőséget. Wang (2015) szerint az egyes ásványok eloszlásának, valamint a kis és nagy keménységű ásványok arányának jelentős szerepe van a repedések kialakulásában, ugyanis a nagyobb keménységű ásványok feszültség hatására plasztikusan deformálódnak, míg a kisebb keménységgel rendelkező ásványokban valószínűbb a repedések megjelenése, ezért a kis keménységű, puhább ásványok aránya lényegesen befolyásolja a kőzet törési folyamatát. Ezzel szemben más kutatók (Kekceci et al., 2006; Oyarzún & Arévalo, 2011) eredményei arra utalnak, hogy a kőzetszövet hatása meghatározóbb: azonos ásványos összetétel mellett is jelentős különbség mutatkozik az apríthatóságban és őrlhetőségben a szöveti eltérések függvényében. Pérez-Barnuevo és munkatársai (2013) különösen a szemcsehatárok egyenetlenségeit és az ásványszemcsék összenövésének típusait tartják döntő tényezőknek a kőzet szilárdságát és így az apríthatóságot illetően.

Számos tanulmány (Esmailzadeh et al., 2017; Ozturk et al., 2004; Howarth & Rowlands, 1987; Comakli & Cayirli, 2019) foglalkozik a szöveti jellemzők – mint az ásványi alkotók mérete, alakja és irányítottsága – kőzetszilárdságra és apríthatóságra gyakorolt hatásával. E vizsgálatokban gyakran alkalmazzák a szöveti koefficiens (TC) mutatót, amely a szemcseméret, alak és irányítottság alapján számított komplex mérőszám. Minél nagyobb a TC értéke, annál összetettebb a kőzetszövet, ennek megfelelően a TC és az egytengelyű nyomószilárdság között pozitív, míg az apríthatóságot jellemző paraméterekkel negatív korreláció mutatható ki. Sun és mtsai. (2017) ezt a kapcsolatot megerősítették, ugyanakkor rámutattak, hogy a különböző kőzettípusokon végzett vizsgálatok validálását nehezíti a megfelelő mennyiségű és minőségű adat hiánya. Popov és mtsai. (2020) megállapította, hogy a szemcseméret

csökkenésével a szemcsék fajlagos felülete nő, ami a kohéziós erők növekedéséhez vezet, ezért a finomszemcsés kőzetek szilárdsága mindig jelentősen nagyobb, mint a közép- és durvaszemcsés kőzeteké. Ugyanakkor Liu és mtsai. (2018), Comakli és Cayirli (2019) rámutattak, hogy az eltérő szemcseméretű alkotókból álló kőzetek befolyásolják a repedésterjedést, így a kőzet szilárdságot is. Kecec és mtsai. (2006), rámutattak arra, hogy egyazon kőzettípus esetén megállapítható korreláció a szövet és a szilárdság, valamint az apríthatóság között, de eltérő kőzettípusokat összehasonlítva nem állapítható meg korreláció. Sun és mtsai. (2017) kiemelik, hogy ugyan számos kutatás foglalkozik a kőzetszövet és szilárdság kapcsolatával, az eredmények között sok a hasonlóság és átfedés, de a különböző típusú és eredetű kőzeteken végzett elegendő mennyiségű és minőségű adatgyűjtés hiánya nem teszi lehetővé az eredmények validálását.

A szakirodalom áttekintése arra utal, hogy a kőzetszövet befolyása jelentősebbnek bizonyul, mint az ásványos összetétel önmagában. Az aprítási energiaigényt elsődlegesen a kőzetalkotó ásványi szemcsék közötti kohézió, a szemcseméret-eloszlás heterogenitása, és az eltérő keménységű ásványfázisok aránya és eloszlása befolyásolja. Ugyanakkor a szerzők egy része kiemeli, hogy az eltérő módszertanok miatt a különböző tanulmányok eredményei gyakran nem összevethetők, és hiányoznak a nagy mérésszámú, homogén mintákon alapuló, szisztematikus kutatások.

Az utóbbi évtizedekben szintén megnőtt az érdeklődés a kőzettani jellemzők és a termékminőség, főként a kopásállóság, valamint az aprozódással szembeni ellenállás közötti kapcsolat vizsgálata iránt. Ezek főként a zúzottkő alapanyagként felhasznált kőzetekre koncentrálnak, de mivel ezen tanulmányok jelentős része észak-európai területekhez kötődik, így a földtani adottságok miatt nagyrészt gránit, serpentinit és mészkő a vizsgált anyag. Ezen kutatások célja annak feltárása, hogy a különféle ásványtani és szöveti tulajdonságok milyen módon befolyásolják a végtermék minőségét. A szakirodalom szerint a kőzetfizikai tulajdonságokat az ásványi

alkotók keménysége, szilárdsága, nyomószilárdsága és rugalmassági modulusa határozza meg (Lindqvist és mtsai., 2007). A kvarc- és földpáttartalom hatása ellentmondásos, Afolagboye és mtsai. (2016) szerint a magas kvarc, földpát vagy kettő együttesen hozzájárul a kőzetek kopással- és aprózódással szembeni ellenállásának növeléséhez. Faruk Apaydin és Yılmaz (2021) szintént bizonyította, hogy a földpáttartalom növekedésével a LA mutató értéke is nő bazaltokon esetében. Okogbue és Aghamelu (2013), Pomonis és mtsai. (2007) ugyanakkor bebizonyította piroklasztitokon és doleriteken végzett mérésekkel, hogy a mállott földpátok inkább csökkentik, mintsem növelik az aprózódással és a kopással szembeni ellenállást. Adomako és mtsai., 2021; Askaripour és mtsai., 2022; Strzałkowski & Kaźmierczak, 2021) inkább a kvarc és földpát arányának hatását emeli ki. Ademila (2019), Ajagbe és mtsai. (2015) arra a következtetésre jutottak, hogy a kvarc-földpát arány egyenesen arányosságot mutat a Los-Angeles mutatóval. Az amfibol- és piroxéntartalom általában kedvezőtlenül befolyásolja a kopás- és aprózódással szembeni ellenállást (Ajagbe és mtsai., 2015; Brattli, 1992; H. Liu és mtsai., 2005). A kőzetátalakulások és mállástermékek, például a smektit és illit csökkentik az ellenállást (Petrounias és mtsai., 2018), míg a csillámok hatása a szemcsemérettől és irányítottságtól függően változó (Lindqvist és mtsai., 2007; Nålsund, 2010; Tavares & das Neves, 2008). Ugyanakkor, Adomako és mtsai. (2021) szerint a mállási termékként megjelenő szerpentin ásvány hatása nem kimutatható ultrabázikus kőzetek esetében.

A szövet hatása, akárcsak a törés esetén, igen jelentős és legtöbb szerző erősebb kapcsolatot állapított meg a szövet és a kőzetfizikai tulajdonságok között (Brattli, 1992). Adomako és mtsai. (2021), Åkesson és mtsai. (2001) szerint az átlagos szemcseméret és a szemcsék közötti méretkülönbség, valamint a finomszemcsés mátrix jelenléte jelentősen befolyásolja a repedésterjedést és ezáltal a mechanikai tulajdonságokat. Török és Czinder (2017) eredményei alapján a finomporfíros szövetű andezit jobban ellenállt a kopásnak, mint a durvaporfíros szövetű andezit. A szemcsehatárok komplexitása, illetve a szemcsék alakja és felületi egyenetlensége

szintén meghatározó a kopás- és aprózódásállóság szempontjából (Török & Czinder, 2017; Lindqvist és mtsai., 2007; G. Liu és mtsai., 2018). Åkesson és mtsai. (2003). eredményei alapján az idomorf szövet, amelyben az ásványok saját alakúak és egyenletes felülettel rendelkeznek, kisebb keménységet és aprózódással szembeni ellenállást mutat, mint a xenomorf szövet, amelyben a szemcsék felülete egyenetlen.

A szakirodalmi áttekintés alapján a következő hiányterületeket azonosítottam:

- A nem érces ásványi nyersanyagok – különösen a zúzottkő alapanyagául szolgáló közetek – esetében a közettani tulajdonságok és a törési viselkedés közötti kapcsolat vizsgálata eddig nem számít szisztematikusan feltárt kutatási területnek.
- Különösen hiányoznak az andezit típusú közetekre vonatkozó vizsgálatok: a szakirodalom általában eltérő összetételű és szövetű közetek (pl. gránit, mészkő, gneisz) eredményeit hasonlítják össze, amelyek lényegesen különböznek az andezit finomszemcsés, inekvigranuláris szövetétől.
- Nem áll rendelkezésre olyan szisztematikus kutatás, amely egyetlen közzet típuson – például andeziteken – belül, egy bányából, homogén közzettestből származó mintákon vizsgálná a közettani tulajdonságok hatását a törési viselkedésre.
- Az eddigi tanulmányok gyakran egy-egy paraméterre (pl. őrlhetőség – BWi, egytengelyű nyomószilárdság, kopásállóság, aprózódási ellenállás) fókuszálnak, miközben a komplex, több tényezőt együttesen értékelő megközelítések szinte teljesen hiányoznak.
- Kevés adat áll rendelkezésre a porozitás, repedezettség és a mállottság hatásáról, különösen andezitek esetében, ahol e tényezők részletes elemzésére eddig nem született átfogó tanulmány.
- Nem található olyan kutatás, amely átfogó módon vizsgálná a közettani jellemzők, a törési tulajdonságok, az őrlhetőség, az egytengelyű nyomószilárdság és a közzetfizikai paraméterek közötti összefüggéseket egyidejűleg.

A tudományos munka célkitűzése

A kutatásom elsődleges célja, hogy egy adott kőzettípuson, nevezetesen a Magyarországon zúzottkő előállítására legnagyobb volumenben használt andeziten végezzen szisztematikus vizsgálatokat a földtani tulajdonságok törési viselkedésre és a termékminőségre gyakorolt hatásának feltárása érdekében.

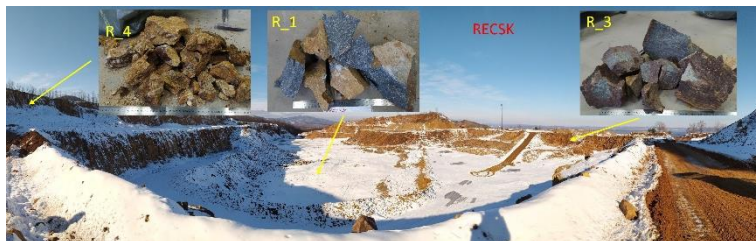
II. Anyag és vizsgálati módszerek

Vizsgálati minták:

A mintavételezés a Colas Északkő Kft. két bányájában történt, Tállya bányáüzemben és Recsk bányáüzemben. Mindkét bányáüzem által termelt nyersanyag piroxénandezit, de a bányák földrajzi elhelyezkedése és a kőzettestek tömegét adó vulkanizmusok időbeli eltolódása, eltérésre enged következtetni az ásványos összetételben és a szövet-szerkezetben. Az egyes bányákon belül a termelt nyersanyag minőségében is észlelhető eltérés, ami összhangban van a kőzettani változásokkal. A mintavételezés során az elsődleges célom olyan minták vételezése volt, amelyek eltérő minőségű kőzeteket reprezentálnak. Ennek megfelelően mindkét bánya esetében egy üde, mállás nyomait nem mutató andezitet (T_1, R_1), egy enyhe mállási nyomokat mutató (T_2, R_3) és egy erősen mállott mintatípust vételeztem (T_3, R_4) (1. ábra, 2. ábra).



1. ábra: Mintavételi helyek és minták a tállyai bányából



2. ábra: Mintavételi helyek és minták a recski bányából

Vizsgálati módszerek:

A kutatásaim során alkalmazott vizsgálati módszerek két nagy csoportba sorolhatók: az egyik módszercsoport a kőzettani tulajdonságok számszerűsítését hivatott szolgálni, míg a másik módszercsoport az igénybevétellel szembeni ellenállás mérését és számszerűsítését.

A kőzettani tulajdonságok számszerűsítése számos módszer együttes alkalmazásával végeztem:

- Kvalitatív és kvantitatív ásványos összetétel meghatározása röntgenpordiffrakciós vizsgálattal.
- A teljes kémiai összetétel meghatározása röntgenfluoreszcens spektroszkópiával (XRF), amely adatait a mállás számszerűsítéséhez használtam fel.
- A szöveti jellemzők megfigyelésére és kvantifikálása: polarizált optikai mikroszkópos (OM) megfigyelések és mérések alapján a szöveti elemek kvantifikálása, kiegészítve pásztázó elektronmikroszkópos (SEM-EDX) mérésekkel és mikro-komputertomográfiai (μ -CT) vizsgálatokkal.
- A porozitás meghatározása He-piknométeres módszerrel történt, melyet szintén μ -CT mérések egészítettek ki

Az igénybevétellel szembeni ellenállás meghatározását több, eltérő elven alapuló vizsgálati módszerrel végeztem. A módszerek kiválasztásánál alapvető szempont volt, hogy az alkalmazott eljárások különböző típusú mechanikai igénybevételeket reprezentáljanak, ezáltal a kőzetek viselkedésének komplex értékelését tegyék lehetővé. Az alkalmazott módszerek:

- Az egyszemcse-törési vizsgálatok közül az esősúlyos eljárás (Drop Weight Test) elvén működő módszert alkalmaztam, amelyhez a szükséges berendezés fejlesztése és építése a Nyersanyagelőkészítés és Környezettechnológia Intézet műhelyében történt a doktori kutatás részeként. A módszer széles szemcsefrakció-tartományban alkalmazható; saját méréseimhez az alábbi frakciókat választottam: 8–11,2 mm, 12,5–16 mm, 20–22,5 mm, 25–31,5 mm és 40–45 mm. A módszerre jellemző fő igénybevétel az ütés, amely két ütköző felület között megy végbe.
- Az őrlhetőségi vizsgálatok csoportjából a Hardgrove-őrlhetőségi vizsgálatot alkalmaztam.
- A kőzetfizikai vizsgálatok köréből – melyek elsődleges célja a termékminőség jellemzése – a kopásállóságot mikro-Deval-, míg az aprózódással szembeni ellenállást Los Angeles-vizsgálattal határoztam meg.
- A kőzetmechanikai vizsgálatok csoportjából az egytengelyű nyomószilárdság (UCS) meghatározását végeztem el.

III. Tudományos eredmények, tézisek

A kőzettani tulajdonságok számszerűsítése alapján megállapítható, hogy a két bányában termelt piroxén-andezitek alapvetően hasonló kőzettani jelleget mutatnak.

A fő ásványos alkotók tekintetében nem volt kimutatható jelentős eltérés, azonban arányuk változó volt, valamint a másodlagos kőzetátalakulási folyamatokhoz kapcsolódó ásványtársulások jelenléte különbségeket eredményezett. Az optikai mikroszkópos vizsgálatok mindkét lelőhely esetében porfíros, holokristályos szövetet jeleztek, idiomorf és hipidiomorf fenokristályokkal. A mátrix mikrokristályos, helyenként kriptokristályos, míg a fenokristályok és a mátrix szemcsemérete mindkét lelőhelyen hasonló tartományba esik. A mállás előrehaladása jól nyomon követhető, és két eltérő típus különíthető el: a tállyai minták esetében a mállás előrehaladtával a porozítás növekedése és a szmektit, valamint a karbonát ásványok megjelenése figyelhető meg, míg a recski minták esetében az Fe mobilizációjával járó mállási folyamatok dominálnak.

A pásztázó elektronmikroszkópos megfigyelések jelentős mikroszöveti eltérésekre mutattak rá. A tállyai mintákban a mafikus ásványok (amfibol, piroxén) mállásával keletkezett pórusokat szmektitből és karbonátokból álló másodlagos ásványtársulások töltik ki részlegesen, továbbá a kőzetképződés során a kigázosodás eredményeként kialakult porozitás is megfigyelhető. A recski minták esetében a mállást az Fe mobilizációja és új, Fe-gazdag fázisok megjelenése jellemzi, bár a legerősebben mállott R_4 mintában a szmektit is előfordul.

A porozitásmérések – a kvantifikáláson túl – a mikro-CT vizsgálatokkal kiegészítve rávilágítottak arra, hogy egyes tállyai minták esetében a zárt porozitás jelentős hányadot képvisel.

Az andezitminták igénybevétellel szembeni ellenállásának értékelésére több, eltérő elven alapuló vizsgálati módszert alkalmaztam, amelyek együttesen átfogó képet adnak a kőzetek mechanikai viselkedéséről.

Tézisek

1. Az andezit jellegű kőzetek törési tulajdonságainak szisztematikus vizsgálatára kifejlesztettem egy az esősúlyos törőberendezés (Drop Weight Tester, DWT) elvén működő vizsgálati berendezést, amely lehetőséget teremtett a kőzetek $A \times b$ mutatóval jellemzett aprózódási hajlamának laboratóriumi körülmények közötti értékelésére.

2. Bizonyítottam, hogy az andezitváltozatok törési viselkedésének meghatározásához a teljes mintahalmazra illesztett egyetlen törési mutató ($A \times b$) nem képes pontosan leírni a kőzettani paraméterek hatását. Ezt kiegészíteni szükséges a szemcseméret és az andezitváltozatok szerinti tagolásával, aminek figyelembevételével kell értelmezni a mérési eredményeket. Kimutattam, hogy minden vizsgált szemcsefrakció esetében eltérő kőzettani paraméter dominál a törési mechanizmusban: a porozitás főként a nagyobb (40–45 mm, 25–31,5 mm), a mállottság a közepes (20–22,5 mm, 12,5–16 mm), míg a mikroszöveti (optikai mikroszkóp, mikro-CT, SME) jellemzők a legkisebb (8–11,2 mm) frakcióban bizonyultak meghatározónak.

A törési hajlam értékelésére az esősúlyos vizsgálatok során a t_n -modell illesztését alkalmaztam, melynek eredményeként egyetlen $A \times b$ mutatóval jellemezhető a kőzetek törési hajlama. A kőzettani paraméterek törésre gyakorolt hatásának vizsgálata során a választott értékelési egység – legyen az a teljes kőzet, különböző frakciók kőzettípustól függetlenül, vagy frakciók egyes kőzettípusok szerint – meghatározó szerepet játszhat az egyes kőzettani jellemzők hatásának feltárásában és az eredmények értelmezésében. Az egyes mintákra illesztett modell az egész minta törési hajlamát egyetlen $A \times b$ mutatóval jellemzi. Ebben a megközelítésben az egyes kőzettani jellemzők hatása kevésbé markánsan jelentkezett, de a mállás és a hozzá kapcsolódó szemzettartalom szerepe egyértelműen kimutatható volt. Az egyes mintatípusok mellett a frakciókat is figyelembe véve, frakciónként illeszthető egy t_n modell, amely minden frakció minden

mintájára külön $A \times b$ mutatót eredményez. A frakciónként meghatározott $A \times b$ mutató részletesebb képet ad a közzetani jellemzők hatásáról, ugyanakkor az értelmezési egység megválasztása ebben az esetben is meghatározó jelentőségű. Ha a közzetani paraméterek hatását kizárólag frakciók szerinti bontásban vizsgáljuk, az eredmények azt mutatják, hogy az egyes paraméterek jelentősége frakciónként eltérő. Ugyanakkor ebben a megközelítésben is kiemelkedőnek bizonyult a mállás és a szmektttartalom hatása, valamint az átlagos keménység befolyása is azonosítható volt. A legrészletesebb információt a frakciók egyes közzet típusok szerinti megközelítés adott, itt jól kirajzolódott, hogy az egyes frakciók esetében melyek a meghatározó hatással bíró közzetani paraméterek: a porozitás főként a nagyobb (40–45 mm, 25–31,5 mm), a mállottság a közepes (20–22,5 mm, 12,5–16 mm), míg a mikroszöveti (optikai mikroszkóp, mikro-CT, SME) jellemzők a legkisebb (8–11,2 mm) frakcióban bizonyultak meghatározónak.

3. Vizsgálataim alapján megállapítottam, hogy az optikai mikroszkópos elemzéseken alapuló, a szakirodalomban széles körben használt szöveti paraméterek – különösen a szöveti koefficiens (Texture Coefficient, TC) – nem alkalmazhatók andezit típusú, részben mikrokristályos kőzetek esetében a szöveti paraméterek és az igénybevétellel szembeni ellenállás kapcsolatának vizsgálatára. A mikrokristályos mátrix jelentős aránya akadályozza a szöveti jellemzők kvantitatív értékelését, az optikai szöveti jellemzők csak mikroszöveti jellemzéssel együtt vehetők figyelembe a törési tulajdonságok előrejelzésénél.

A kőzetek szövete és a szilárdság kapcsolatát vizsgáló tanulmányokban gyakran a szövet számszerűsítése az alkotók paramétereinek felhasználásával számolt mutatók formájában történik (Askari pour és mtsai., 2022). Az egyik leggyakrabban használt mutató a szöveti koefficiens (texture coefficient, továbbiakban TC) (Esmailzadeh és mtsai., 2017; Howarth & Rowlands, 1987; Ozturk és mtsai., 2004). A szöveti

koefficiens meghatározáshoz a szöveti alkotók legkisebb és legnagyobb átmérője, a szemcse területét, valamint a szög tényezőjének irányának felhasználásával számolható:

$$TC = AW \left\{ \frac{N_0}{N_0 + N_1} * \frac{1}{FF_0} \right\} + \left\{ \frac{N_1}{N_0 + N_1} * AR_1 * AF_1 \right\}$$

ahol

AW- terület súlyozás, a szemcsék összterületének a vizsgált terület határain belül és a vizsgált terület összterületének a hányadosa, üregeket is tartalmazó üledékes kőzet esetén értelmezhető, magmás és más típusú kőzetek esetében értéke 1.

N0- azon szemcsék száma, amely oldalaránya 2.0-nál kisebb (a maximális Feret átmérő vagy hossz viszonyítva a max. átmérőhöz vagy szélességhez)

N1- azon szemcsék száma, amely oldalaránya 2.0-nál nagyobb (a maximális Feret átmérő vagy hossz viszonyítva a max. átmérőhöz vagy szélességhez)

FF0- N0 szemcsék számtani középértéke

AR1- N1 szemcsék számtani középértéke

AF1- N1 szemcsék szög tényezőjének iránya (angle factor orientation).

A szakirodalomban közölt példák (Askaripour és mtsai., 2022; Esmailzadeh és mtsai., 2017; Räisänen, 2004) alapján bizonyos kőzettípusok – különösen a gránit – esetében a mutató szoros korrelációt mutat a kőzet szilárdsági jellemzőivel. Ugyanakkor Ozturk és mtsai. (2004, 2014) rámutattak, hogy összetett szövettű kőzeteknél nehéz egyértelmű összefüggést találni a szövet és a szilárdság között. A számítások eredményei azt mutatták, hogy a szöveti koefficiens (TC) andezit típusú, részben mikrokristályos kőzetek esetében nem alkalmas a szöveti paraméterek és az igénybevétellel szembeni ellenállás kapcsolatának értékelésére, mivel a jelentős arányú mikrokristályos mátrix megnehezíti a szöveti jellemzők kvantitatív meghatározását. Az optikai mikroszkópos módszerrel meghatározott szöveti jellemzők csak az elektronmikroszkópos megfigyeléssel feltárt mikroszvöeti jellemzőkkel együtt vehetők figyelembe a törési tulajdonságok előrejelzésénél.

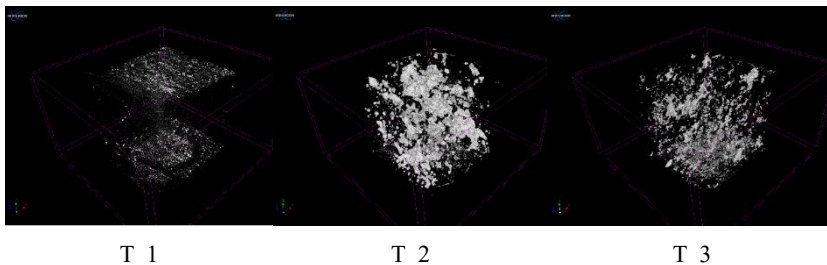
4. Igazoltam, hogy a vizsgált andezit típusú kőzetek esetében a porozitás hatásának értelmezéséhez a mikro-CT és He piknométeres vizsgálatok együttes alkalmazása szükséges, mivel ezek adják meg a teljes porozitás releváns értékét és típus szerinti arányait. A He-piknométeres és mikro-CT mérések együttes értelmezése alapján kimutattam, hogy a zárt porozitás aránya számottevő, így kizárólag a piknométeres módszer alkalmazása esetén a teljes porozitás jelentős alábecslése történik, míg a mikro-CT módszer nemcsak a pórusok térfogati arányát képes meghatározni, hanem lehetőséget ad a nyílt és zárt pórusok elkülönítésére is.

A minták porozitását több módszerrel határoztam meg. Elsőként He-piknométeres mérést végeztem, amelynek eredményeit a 2. táblázat foglalja össze.

2. táblázat: A He piknométeres porozitás mérés eredményei.

Minta neve	T 1	T 2	T 3	R 1	R 3	R 4
Porozitás [%]	0,39	1,4	1,8	0,9	1,08	4,62

A módszer pontossága a porozitás meghatározásban a kőzet pórusszerkezetétől és a porozitás jellegétől függ. A módszer pontosan méri a sűrűséget és a nyílt porozitást, azonban nem feltétlenül megbízható a teljes porozitás meghatározásában, különösen jelentős zárt pórusokkal rendelkező magmás kőzetek esetében. Kiegészítésképpen a mikro-CT méréseket végeztem (3. ábra), amelyek rámutattak, hogy a minták tartalmaznak olyan zárt pórusokat, amely a He-piknométeres mérések során nem voltak mérhetőek.



3. ábra: A tállyai minták porozitásának leképezése μ -CT módszerrel:

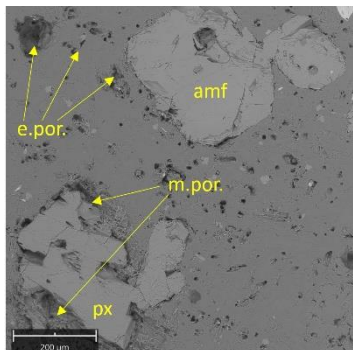
A 3. táblázatban látható a minta térfogata, amely a mérés során beszkenelt és a szoftveres rekonstrukció során megjelenítette térfogat. Ebből a térfogataból határoztam meg a porozitás össztérfogatát és a százalékos arányát. A táblázat utolsó két sora tartalmazza százalékban kifejezve a nyílt porozitást és a zárt porozitást. A T_2 minta esetében jól látható, hogy a mikro-CT mérések alapján a mért teljes porozitáson belül a zárt pórusok 2,29 %-os aránya jelentősen nagyobb, mint a többi minta esetében, ahol a zárt porozitás jellemzően 0,61 és 0,03 % között van.

3. táblázat: A μ -CT mérésekből származó porozitás adatok

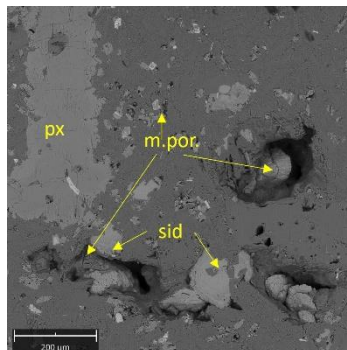
Minta neve	T 1	T 2	T 3	R 1	R 3	R 4
Minta térfogata [mm ³]	3309,1	3134,6	3094,5	3538,1	3198,35	3556,20
Pórus össztérfogat [mm ³]	7,84	124,83	43,56	9,09	6,19	37,7
Porozitás [%]	0,23	3,98	1,40	0,26	0,20	1,06
Nyitott porozitás [%]	99,81	97,59	99,21	99,84	99,91	99,52
Zárt porozitás [%]	0,12	2,29	0,61	0,09	0,03	0,30

A kétfélele genetikájú porozitás jelenlétét továbbá az elektronmikroszkópos megfigyelések is alátámasztották. A 4. ábrán látható a T_2 mintára jellemző elsődleges

és másodlagos pórusok jelenléte, míg a T₃ mintát (5. ábra) inkább a nagyméretű másodlagos pórusok jelenléte jellemezte



4. ábra: A T₂ mintában megjelenő elsődleges (e. por) és másodlagos pórusok (m. por) (px- piroxén, amf- amfibol)

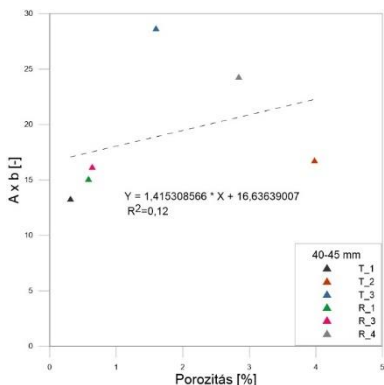


5. ábra: A T₃ mintában megjelenő nagy méretű másodlagos pórusok (m. por) (sid- sziderit, px- piroxén)

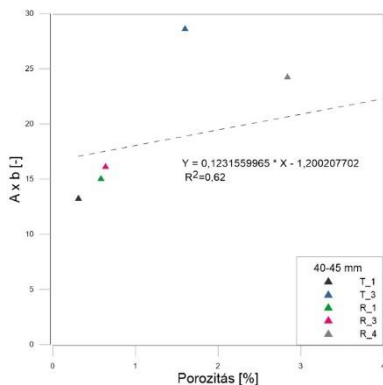
5. Vizsgálataim alapján megállapítottam, hogy az andezit porozitás esetében nem az teljes porozitás mennyisége, hanem a porozitás genetikája, azaz annak primer, a kőzetképződés során kialakult, vagy szekunder, azaz mállási folyamatokhoz köthető eredete befolyásolja a kőzet törési viselkedését. Az elsődleges, kigázosodási pórusok mérete és aránya nincs jelentős hatással a törési hajlamra, míg a mállási eredetű, másodlagosan kialakult porozitás jelentős hatást gyakorolt a törési tulajdonságokra. A kialakulási mechanizmusa tehát kulcsfontosságú tényező a kőzetek aprózódással szembeni ellenállásának értékelésében.

A különböző kőzettypusok szemcseméret szerinti értékelése alapján a porozitásnak nem volt kimutatható hatása az A×b mutatóval jellemzett törési hajlamra. Az eredmények az illesztett függvénnyel mindössze gyenge kapcsolatot mutattak ($R^2 = 0,05-0,25$) (6. ábra, 8. ábra). Ugyanakkor a porozitás eredmények rámutattak, hogy a T₂ minta

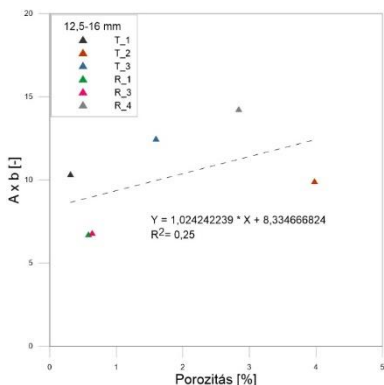
esetében jelentősen nagyobb a zárt porozitás hányada a többi mintához viszonyítva. A T_2 minta kihagyásával végzett elemzés alapján a porozitás és a törési hajlamot jellemző $A \times b$ mutató között közepes erősségű monotonon növekvő lineáris kapcsolat írható le az illetett egyenesek alapján minden egyes frakció esetében (7. ábra, 9. ábra).



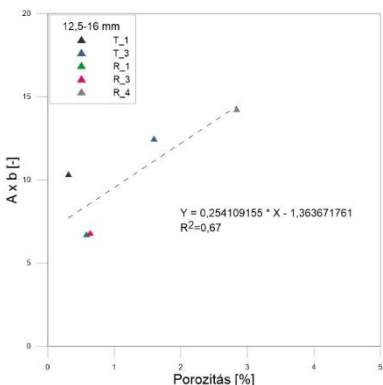
6. ábra: Az $A \times b$ értékek és a porozitás kapcsolata 40-45 mm-es frakció esetében



7. ábra: Az $A \times b$ értékek és a porozitás kapcsolata a T_2 minta nélkül 40-45 mm-es frakció esetében



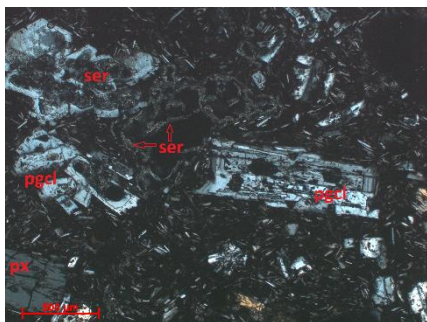
8. ábra: Az $A \times b$ értékek és a porozitás kapcsolata 12,5-16 mm-es frakció esetében



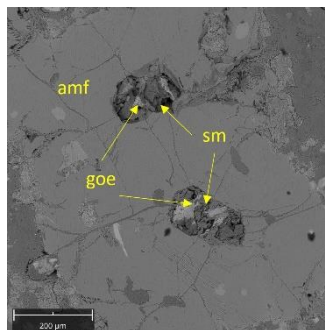
9. ábra: Az $A \times b$ értékek és a porozitás kapcsolata a T_2 minta nélkül 12,5-16 mm-es frakció esetében

6. Vizsgálataimmal igazoltam a mállás jelentős hatását a törési viselkedésre és a kőzetfizikai tulajdonságokra. A szmektit a mállás során keletkező hidratált agyagásvány, jelenléte tükrözi a kőzet mállottsági állapotát. Mivel a mállás a szmektit tartalomtól, más átalakulási termékek formájában is megjelenhet, a mállás számszerűsítésére a Chemical Index of Alteration (CIA) vezettem be, amely andezit típusú kőzetek esetében lehetővé tette a mállottság törési és kőzetfizikai tulajdonságokra gyakorolt hatásának kvantitatív értékelését.

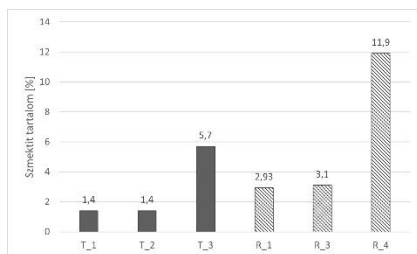
A szmektit jelenléte helyenként már optikai (10. ábra) és elektronmikroszkópos vizsgálatokkal (11. ábra) is azonosítható volt, elsősorban a mállás eredményeként kialakult üregek másodlagos ásványkitöltéseiben. Kvalitatív meghatározása röntgenpordiffrakciós módszerrel történt, az egyes minták szmektit tartalmát a 12. ábra mutatja be.



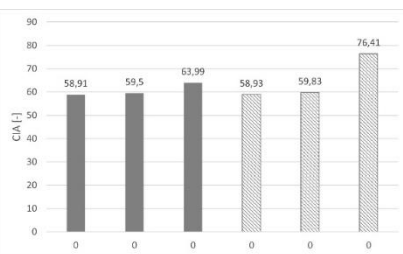
10. ábra: Az optikai mikroszkópos megfigyelések során azonosított szmektit a T_3 mintában (pgcl- plagioklász, px- piroxén, sm- szmektit)



11. ábra: A pásztázó elektronmikroszkópos mérések során azonosított szmektit az R_4 mintában (sm- szmektit, goe- goethit)



12. ábra: A minták szmektit tartalma



13. ábra: A minták CIA értéke

Mivel a mállás a szmektittartalom mellett más átalakulási termékek formájában is megjelenhet – például a recki minták esetében goethite formájában, az R_4-es mintában pedig kaolinitként –, a mállás számszerűsítésére a Chemical Index of Alteration (CIA) (Nesbitt & Young, 1982) mutatót alkalmaztam:

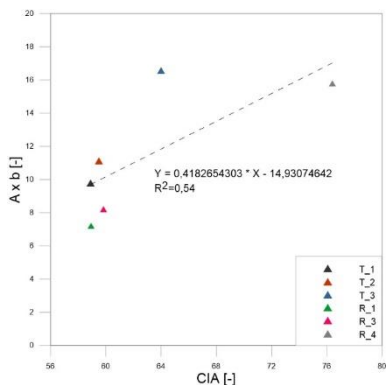
$$CIA = \left[\frac{Al_2O_3}{Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O} \right] * 100$$

ahol CaO^* a szilikát ásványokban beépülő CaO mennyisége, kizárva az egyéb Ca -forrásokat, például karbonátok vagy apatit. A mállási index számításához az XRF-mérésekkel meghatározott kémiai összetételt használtam, az egyes minták CIA értékeit pedig a 13. ábra mutatja be.

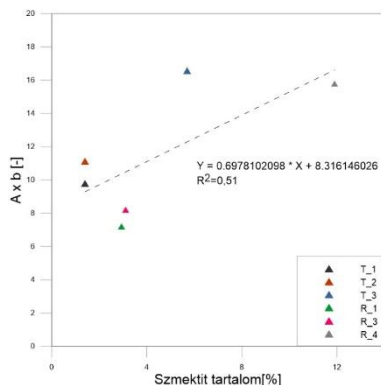
a). A CIA értékek, valamint a szmektit tartalom és a törési hajlam között szignifikáns kapcsolat volt azonosítható, amely azt jelzi, hogy a mállási folyamat előrehaladottsága megbízhatóan tükröződik a kőzet törési hajlamában.

A vizsgált egységtől függetlenül – legyen szó a teljes mintáról, a frakciók szerinti értékelésről vagy a minta és frakció szerinti értékelésről – a mállás és a szmektittartalom hatása minden esetben egyértelműen azonosítható volt. Az egyes minták szintjén az összes paraméter közül a mállás (CIA) (14. ábra) és a szmektittartalom (15. ábra) bizonyult a legmeghatározóbbnak. A szemcseméret szerinti vizsgálatokban e két

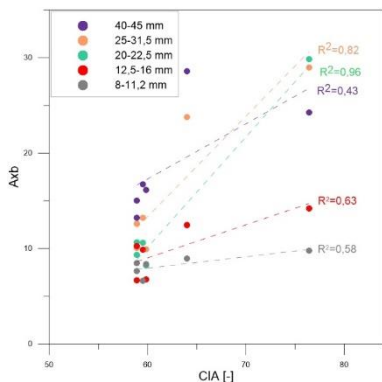
tényező hatása szintén kiemelkedőnek mutatkozott, a CIA esetében, amely az egyes frakciókban (20-22,5 mm és 25-31,5 mm) még hangsúlyosabban érvényesült (16. ábra). A szemkittartalomnál a durvább szemcseméret-tartományban az adatok alapján illesztett exponenciális modell jelezte a szorosabb kapcsolatot.



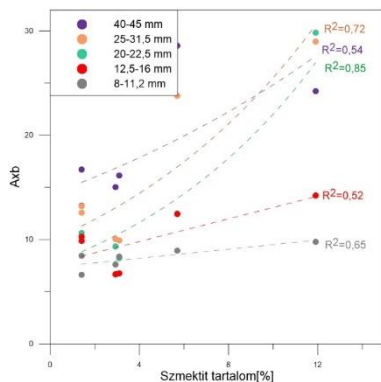
14. ábra: Az Axb érték és a mállás kapcsolata az egyes mintatípusok esetében



15. ábra: Az Axb érték és szemkitt tartalom kapcsolata az egyes mintatípusok esetében

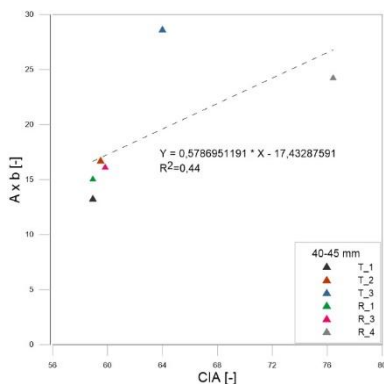


16. ábra: Az Axb érték és CIA kapcsolata a szemcseméret függvényében

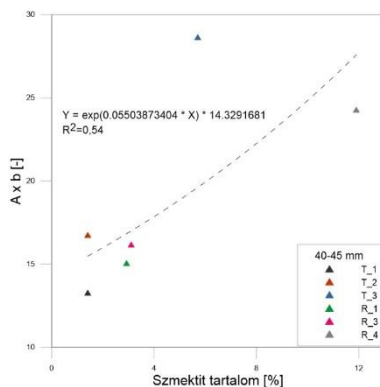


17. ábra: Az Axb érték és szemkitt tartalom kapcsolata a szemcseméret függvényében

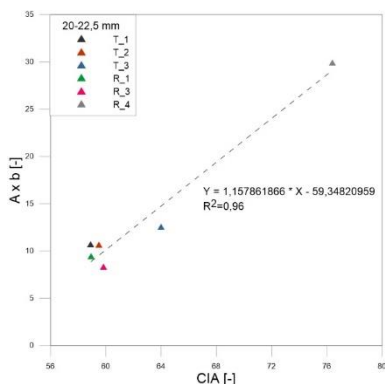
A minta és szemcseméret szerinti megközelítésben szintén jelentősnek bizonyult a CIA és a szmektit tartalom hatása, az illesztett lineáris modell monoton növekvő tendenciát mutatott minden egyes frakció esetében, és a determinációs együtthatók (R^2) 0,44 és 0,96 közötti értékeket vettek fel, ami közepes és jó illeszkedést jelez. A mállási index változása a vizsgált minták esetében jól magyarázza az aprozódási hajlamot, azaz a kőzettani paraméterek hatása mérhető és értékelhető az $A \times b$ mutató segítségével. Példaként a 40-45 mm-es frakció esetében a törésre gyakorolt hatását a CIA mutatónak a 18. ábra, a szmektit hatását pedig a 19. ábra mutatja be, míg a 20-22,5 mm-es frakció esetében a CIA hatását a 20. ábra és a szmektit tartalom hatását a 21. ábra.



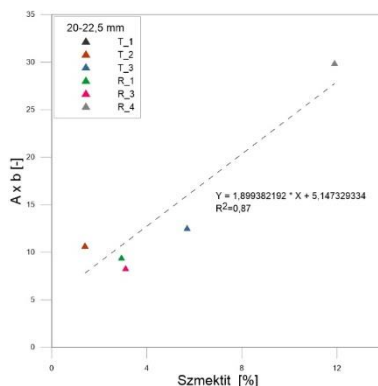
18. ábra: Az $A \times b$ értékek és a mállás kapcsolata 40-45 mm-es frakció esetében



19 ábra: Az $A \times b$ értékek és a szmektit tartalom kapcsolata 40-45 mm-es frakció esetében



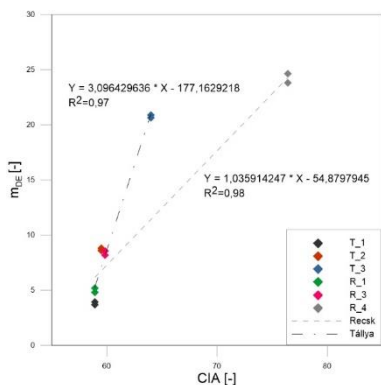
20. ábra: Az Axb értékek és a mállás kapcsolata 20-22,5 mm-es frakció esetében



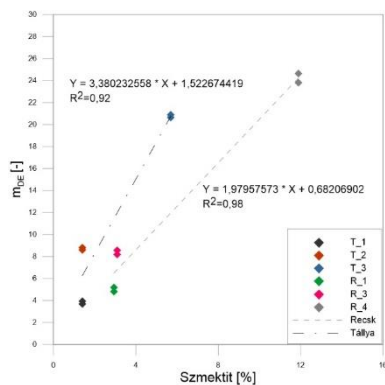
21. ábra: Az Axb értékek és a szmektit tartalom kapcsolata 20-22,5 mm-es frakció esetében

b). A vizsgált andezit típusú kőzetek esetében a kopásállóságot és az aprózódással szembeni ellenállást leginkább a mállottság mértékét kifejező CIA, valamint az ehhez kapcsolódó szmektit tartalom befolyásolja.

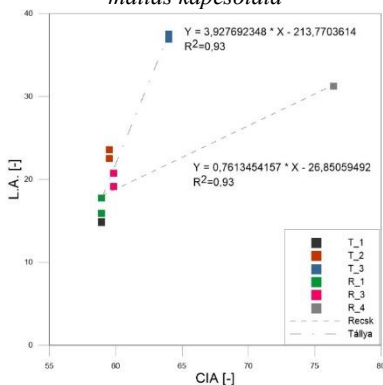
Az andezit típusú kőzetek vizsgálata azt mutatta, hogy a kopásállóságot és az aprózódással szembeni ellenállást elsősorban a mállottság mértéke határozza meg, amelyet a CIA érték jól kifejez, továbbá az ehhez szorosan kapcsolódó szmektittartalom is jelentős befolyással bír. Az adatok alapján illesztett egyenes minden esetben monoton növekvő tendenciát jelez. A kapcsolat szorosságát jól tükrözik a determinációs együtthatók: a micro-Deval–CIA esetében $R^2 = 0,97\text{--}0,98$ (22. ábra), míg a micro-Deval–szmektittartalomnál $R^2 = 0,92\text{--}0,98$ (23. ábra); a Los Angeles mutató és a CIA között $R^2 = 0,93$ (24. ábra), a Los Angeles mutató és a szmektittartalom között pedig $R^2 = 0,87\text{--}0,93$ (25. ábra) értékek adódtak. Ezen két tényezőn túl más kőzettani paraméter hatása nem volt kimutatható, így kijelenthető, hogy hasonló ásványos összetételű és szövetű kőzetek esetében a másodlagos kőzetátalakulási folyamatok hatása meghatározó



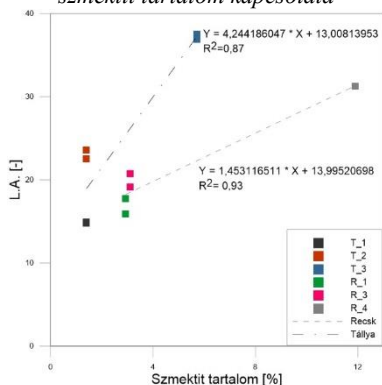
22. ábra: A mikro-Deval érték és a mállás kapcsolata



23. ábra: A mikro-Deval érték és a szmektit tartalom kapcsolata



24 ábra: A L.A. mutató és a mállás kapcsolata mintánként

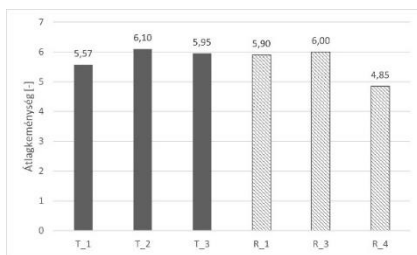


25. ábra: A L.A. mutató és a szmektit tartalom kapcsolata

c). Bár a kopásállóság (nedves közeg, fő igénybevétel a dörzsölés) és az aprózódás (száraz közeg, fő igénybevétel ütés, ütközés) különböző igénybevételi mechanizmust képvisel, mégis kimutatható, hogy a mállás és a szmektit tartalom mindkét vizsgálati módszernél eredményt befolyásoló jelentőséggel bírnak

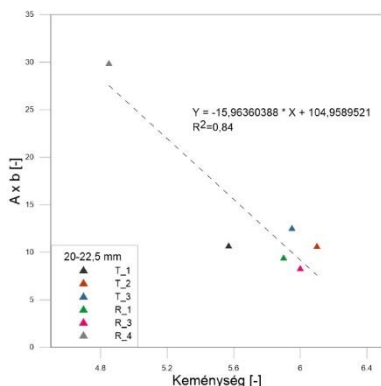
7. Megállapítottam, hogy az egyes ásványfázisok – például kvarc vagy földpátok – mennyisége és a törési hajlam, valamint az őrlhetőség között nem volt kimutatható kapcsolat, viszont az ásványos összetételből számított átlagkeménység és a törési, valamint őrlhetőségi tulajdonságok között kimutatható egyértelmű kapcsolat az andezit típusú kőzetek esetén.

Az egyes ásványos alkotók – például a kristályos SiO_2 (kvarc + cristobalit), a kálföldpát és a plagioklász földpát – hatása az andezitek törési hajlamára és őrlhetőségére nem volt egyértelműen kimutatható. Az ásványos összetétel alapján minden minta esetében meghatároztam az átlagos keménységet, amelyet a 26. ábra szemléltet.

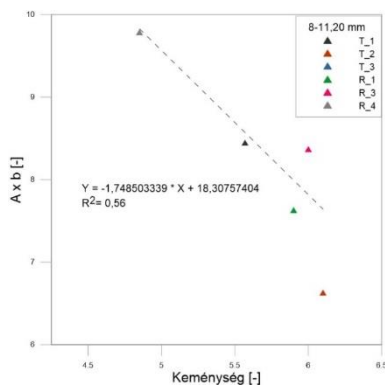


26. ábra: A minták számolt átlagos keménysége

a). Az ásványos összetételből számított átlagkeménység és a törési viselkedés között – különösen a közepes szemcseméret-tartományban – közepes erősségű, monoton csökkenő tendencia volt kimutatható. Ez arra utal, hogy az összetétel alapján meghatározott átlagkeménység az egyes ásványfázisok közvetlen hatásának hiányában is értékes információt nyújthat az andezit típusú kőzetek aprózódási hajlamának előrejelzésében.



27. ábra: Az Axb értékek és a keménység kapcsolata 20-22,5 mm-es frakció esetében

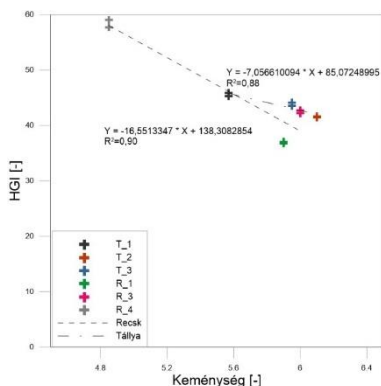


28 ábra: Az Axb értékek és a hasadás kapcsolata 8-11,2 mm-es frakció esetében

A közepes szemcseméret-tartományban (20–22,5 mm) a keménység befolyása markánsabban volt azonosítható (27. ábra), míg a 40–45 mm-es frakcióban nem mutatkozott kimutatható összefüggés. A többi frakcióban hatása mérsékelt maradt, amit az $R^2 = 0,45\text{--}0,60$ értékek is jeleznek (28. ábra). Fontos kiemelni, hogy a keménység befolyása kizárólag a frakciók szerinti és minták szerinti bontásban volt kimutatható. Mindez arra utal, hogy kellő számú validáló mérés elvégzése után a keménység – az egyes ásványfázisok közvetlen hatásának hiányában is – értékes információt nyújthat az andezit típusú kőzetek aprózódási hajlamának előrejelzéséhez.

b). Az ásványos összetételből számított átlagkeménység és a Hardgrove-féle őrlhetőségi index (HGI) között monoton csökkenő kapcsolat azonosítható, amely alapján az átlagkeménység megfelelő indikátora lehet az őrlhetőségnek andezit típusú kőzetek esetében is. Ehhez viszont szükséges a nem kristályos alkotók, mint kőzetüveg vagy mállástermékek megfelelő kvantitatív meghatározása is, hogy az átlagkeménység számolási alapját adó kristályos fázisok mennyisége minél pontosabb legyen.

Az átlagkeménység hatása a Hardgrove-őrölhetőségre egyértelműen kimutatható volt: a keménység növekedésével a minták őrlhetősége csökkent (29. ábra). Az adatokra illesztett lineáris függvény magas R^2 értékei alátámasztják, hogy a keménység meghatározó tényező az őrlhetőség szempontjából. Ugyanakkor a hatás mértéke lelőhelyenként eltér, ez feltehetően az eltérő típusú másodlagos kőzetátalakulásoknak köszönhető.

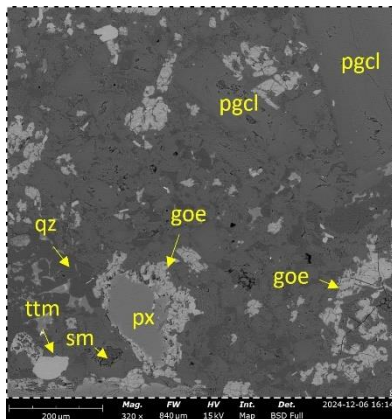


29. ábra: A HGI és a keménység kapcsolata mintánként

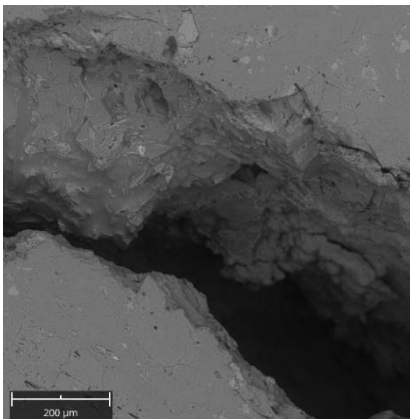
c). A Hardgrove őrlhetőség nem kizárólag az egyes kristályos összetevők keménységével vagy mennyiségével van összefüggésben, hanem jelentős befolyással bírnak a kőzetet ért másodlagos átalakulások, különösen a mállás következtében kialakuló szöveti módosulások és ásványi fázisváltozások.

A két lelőhelyről, Tállya és Recsk, származó minták őrlhetőségét befolyásoló paraméterek eltérő tendenciát mutattak. A recski bányából származó minták esetében szinte az összes vizsgált paraméterrel mutatott korrelációt. Ugyanakkor az R_4 minta esetében az XRD elemzések 21 % kaolinit tartalmat mutattak, amely kizárólag csak ebben az egy mintában volt jelen, így valószínűleg ez hatással van a minta őrlhetőségére. A recski minták esetében a másodlagos kőzetátalakulásokat elsősorban a mafikus kőzetalkotókban (amfibol, piroxén) található Fe fokozatos mobilizációjával

és új, Fe-dús fázisok kialakulásával járt (30. ábra). Ennek eredményeként a szövetre kevésbé jellemző a porozitás.



30 ábra: Fe dús másodlagos ásványok kialakulása a mállás eredményeként az R_3 mintában (px- piroxén, goe- goethit, pgcl- plagioklász, qz. kvarc. ttm- titanomagnetit, sm-szektit)



31 ábra: Nagy kiterjedésű szövet-szerkezeti hézag saját alakú karbonát kitöltéssel, felületén agyagásvány bevonattal (T_2 minta)

A tállyai minták esetében a komplex porozitás, mállási folyamatok és az ezzel járó ásványi átalakulások árnyaltabbá tették az összképet, így ezen minták esetében csak a keménységgel és a mátrix átlagos szemcseméretével volt kimutatható egyértelmű korreláció. A mállás során itt nagy méretű pórusok keletkeztek, amelyet az utólagos alacsony hőmérsékletű hidrotermás oldatok eredményeként másodlagos karbonátból és szmektitből álló ásványtársulás tölt ki részlegesen (5. ábra, 31 ábra).

Irodalomjegyzék:

- Abdelhaffez, G. S. (2020). Studying the effect of ore texture on the bond work index at the mahd ad dahab gold mine: A case study. *Rudarsko Geolosko Naftni Zbornik*, 35(1), 111–121. <https://doi.org/10.17794/rgn.2020.1.9>
- Ademila, O. (2019). Engineering geological evaluation of some rocks from Akure, Southwestern Nigeria as aggregates for concrete and pavement construction. *Geology, Geophysics and Environment*, 45(1), 31. <https://doi.org/10.7494/geol.2019.45.1.31>
- Adomako, S., Engelsen, C. J., Thorstensen, R. T., & Barbieri, D. M. (2021). Review of the relationship between aggregates geology and Los Angeles and micro-Deval tests. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 80, 1963–1980. <https://doi.org/10.1007/s10064-020-02097-y>/Published
- Afolagboye, L. O., Talabi, A. O., & Akinola, O. O. (2016). Evaluation of selected basement complex rocks from Ado-Ekiti, SW Nigeria, as source of road construction aggregates. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 75(2), 853–865. <https://doi.org/10.1007/s10064-015-0766-1>
- Ajagbe, W. O., Tijani, M. A., & Oyediran, I. A. (2015). Engineering and geological evaluation of rocks for concrete production. *LAUTECH Journal of Engineering and Technology*, 9(2), 67–79.
- Akesson, U., Stigh, J., Lindqvist, J. E., & Göransson, M. (2003). The influence of foliation on the fragility of granitic rocks, image analysis and quantitative microscopy. *Engineering Geology*, 68, 275–288. www.elsevier.com/locate/enggeo
- Apaydın, F. Ö., & Yılmaz, M. (2021). Correlation of petrographic and chemical characteristics with strength and durability of basalts as railway aggregates determined by ballast fouling. *Bulletin of Engineering Geology and The Environment*, 80, 4197–4205. <https://doi.org/10.1007/s10064-019-01654-4>/Published

- Askaripour, M., Saedi, A., Mercier-Langevin, P., & Rouleau, A. (2022). A Review of Relationship between Texture Characteristic and Mechanical Properties of Rock. *Geotechnics*, 2(1), 262–296. <https://doi.org/10.3390/geotechnics2010012>
- Beke, B. (1974). Anyagok őrlhetősége és az őrlhetőség mérőszáma. *Építőanyag*, XXVI (12), 449–455.
- Bonnici, N. K. (2012). *The mineralogical and textural characteristics of copper-gold deposits related to mineral processing attributes*. PhD disszertáció, School of Earth Sciences, University of Tasmania, 281
- Comakli, R., & Cayirli, S. (2019). A correlative study on textural properties and crushability of rocks. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78(5), 3541–3557. <https://doi.org/10.1007/s10064-018-1357-8>
- Csőke, B. (1979). *Bauxitdúsítás, NIMDOK (1979)*, 107 p
- Csőke, B., (1976) *A bauxitdúsítás gazdaságossági és ásványvagyon-gazdálkodási kérdései, Bányászati és Kohászati Lapok- Bányászat*, 105(5), 336-339
- Esmailzadeh, A., Behnam, S., Mikaeil, R., Zare Naghadehi, M., & Saci, S. (2017). Relationship between Texture and Uniaxial Compressive Strength of Rocks. *Civil Engineering Journal*, 3(7), 480–486. <https://doi.org/10.28991/cej-2017-00000106>
- Howarth, D. F., & Rowlands, J. C. (1987). Quantitative Assessment of Rock Texture and Correlation with Drillability and Strength Properties. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 20, 57–85.
- Kecec, B., Unal, M., & Sensogut, C. (2006). Effect of the textural properties of rocks on their crushing and grinding features. *Journal of University of Science and Technology Beijing: Mineral Metallurgy Materials (Eng Ed)*, 13(5), 385–392. [https://doi.org/10.1016/S1005-8850\(06\)60079-0](https://doi.org/10.1016/S1005-8850(06)60079-0)
- Lindqvist, J. E., Åkesson, U., & Malaga, K. (2007). Microstructure and functional properties of rock materials. *Materials Characterization*, 58(11-12 SPEC. ISS.), 1183–1188. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2007.04.012>

- Liu, G., Cai, M., & Huang, M. (2018). Mechanical properties of brittle rock governed by micro-geometric heterogeneity. *Computers and Geotechnics*, 104, 358–372. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2017.11.013>
- Liu, H., Kou, S., Lindqvist, P.-A., Lindqvist, J. E., & Åkesson, U. (2005). *Microscope Rock Texture Characterization and Simulation of Rock Aggregate Properties*.
- Lois-Morales, P., Evans, C., & Weatherley, D. (2022). Analysis of the size–dependency of relevant mineralogical and textural characteristics to particles strength. *Minerals Engineering*, 184. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107572>
- Narayanan, S., & Whiten, W. J. (1983). Breakage characteristics for ores for ball mill modelling. *Australas Inst. Min. Metall. Bull. Proc*, 286, 31–39. <https://www.researchgate.net/publication/284704439>
- Nesbitt, H. W., & Young, G. M. (1982). Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major chemistry of lutites. *Nature*, 299, 715–717.
- Okogbue, C. O., & Aghamelu, O. P. (2013). Performance of pyroclastic rocks from Abakaliki Metropolis (southeastern Nigeria) in road construction projects. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 72(3–4), 433–446. <https://doi.org/10.1007/s10064-013-0489-0>
- Oyarzún M, & Arévalo A. (2011). Rock Texture and BWi Relationships, El Teniente Ore Deposit, Chile. *The First Ausim International Geometallurgy Conference, 5-7 September 2011 Brisbane, Australia*, 181–186.
- Ozturk, C.A., Nasuf, E., & Bilgin, N. (2004). The assessment of rock cutability, and physical and mechanical rock properties from a texture coefficient. *The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*, 397–402.
- Pérez-Barnuevo, L., Pirard, E., & Castroviejo, R. (2013). Automated characterisation of intergrowth textures in mineral particles. A case study. *Minerals Engineering*, 52, 136–142. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2013.05.001>
- Petrounias, P., Giannakopoulou, P. P., Rogkala, A., Lampropoulou, P., Koutsopoulou, E., Papoulis, D., Tsikouras, B., & Hatzipanagiotou, K. (2018). The impact of

- secondary phyllosilicate minerals on the engineering properties of various igneous aggregates from greece. *Minerals*, 8(8).
<https://doi.org/10.3390/min8080329>
- Petruk, W. (2000). *Applied Mineralogy in the Mining Industry*. Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-444-50077-9.X5000-7>
- Pomonis, P., Rigopoulus, I., Tsikouras, B., & Hatzipanagiotou, K. (2007). Relationship between petrographic and physicommechanical properties of basic igneous rocks from the Pindos Ophiolitic Complex, NW Greece. *Bulletin of the Geological Society of Greece*, 40(2), 947, <http://dx.doi.org/10.12681/bgsg.16778>
- Popov, O., Talovina, I., Lieberwirth, H., & Duriagina, A. (2020). Quantitative Microstructural Analysis and X-ray Computed Tomography of Ores and Rocks—Comparison of Results. *Minerals*, 10(2), 129.
<https://doi.org/10.3390/min10020129>
- Strzałkowski, P., & Kaźmierczak, U. (2021). Wear and fragmentation resistance of mineral aggregates— a review of micro-deval and los angeles tests. *Materials*, 14(18). <https://doi.org/10.3390/ma14185456>
- Sun, W., Wang, L., & Wang, Y. (2017). Mechanical properties of rock materials with related to mineralogical characteristics and grain size through experimental investigation: a comprehensive review. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 11(3), 322–328. <https://doi.org/10.1007/s11709-017-0387-9>
- Török, Á., & Czinder, B. (2017). Relationship between density, compressive strength, tensile strength and aggregate properties of andesites from Hungary. *Environmental Earth Sciences*, 76(18). 639, <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6977-y>
- Tugrul, A., & Zarif, I. H. (1999). Correlation of mineralogical and textural characteristics with engineering properties of selected granitic rocks from Turkey. *Engineering Geology*, 51(51), 303–317.

- Wang, Y. (2015). Numerical modelling of heterogeneous rock breakage behaviour based on texture images. *Minerals Engineering*, 74, 130–141. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.12.030>
- Wills, B. A., & Napier-Munn, Tim. (2006). *Wills' mineral processing technology : an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery*. Elsevier Science & Technology Books.
- Yildirim, B. G. (2016). *Development of a correlation between mineralogy, rock strength measures, and breakage of Copper Porphyries Sustainable Minerals Institute*. University of Queensland.

IV. Az értekezés témakörében készült publikációk jegyzéke:

Tudományos folyóirat cikk:

Márkus, I. R; Rácz, Á., Mucsi, G. (2025) A preliminary study of the effect of alteration on breakage properties of andesites from Tállya and Reesk (Hungary), *Rudarsko-geološko-naftni zbornik- The Mining-Geology-Petroleum Engineering Bulletin*, Kézirat elfogadva, megjelenés alatt

Márkus, I. R; Rácz, Á. (2024) Andezitek törési- és anyagtulajdonságai közötti összefüggések vizsgálata egyszemcse törési módszerrel, *Az aszfalt: A Magyar Aszfaltipari Egyesület (HAPA) hivatalos szakmai lapja*, 31(1), pp. 47-51, 5 p.

Márkus, I. R; Rácz, Á. (2024) Investigation of the petrological properties of andesites from Tállya quarry, Hungary and their influence on the resistance to wear and fragmentation, *Geoscience and Engineering*, 10(15), pp. 125-137., 13 p. <https://doi.org/10.33030/geosciences.2022.15.125>

Márkus, I. R; Rácz, Á. (2022) Assessing Single Particle Breakage Characteristics of Andesites from Tállya, *Új eredmények a műszaki föld- és környezettudományban 2022, Miskolci Egyetem, Műszaki Földtudományi Kar.* pp. 344-350., 7 p

Márkus, I. R; Rácz, Á., Mucsi, G. (2021) A nyersanyagelőkészítés területén alkalmazott egyszemcse törési vizsgálatok kritikai áttekintése, *Bányászati és Kohászati Lapok-Bányászat*, 154(3) pp. 12-18, 7 p.

Márkus, I.R. (2021) The interrelation of petrographical properties of rocks and their crushing and grinding features: a literature review, *Multidiszciplináris tudományok: A Miskolci Egyetem Közleménye*, 11(2), pp. 17-24, 8 p

Márkus, I.R. (2020) A szövet-szerkezet és az apríthatóság, őrlhetőség közötti összefüggések kutatása során alkalmazott vizsgálati módszerek áttekintése, *Műszaki Földtudományi Közlemények*, 89(2), pp. 42-49, 8 p

Márkus, I. R; Rácz, Á., Mucsi, G. (2020) Pofástörők fejlesztési irányainak áttekintése, *Műszaki Földtudományi Közlemények*, 89(1), pp. 424-433, 10 p.

Konferencia kiadványokban megjelent publikációk:

Márkus, I. R.; Bediako, J. Rácz, Á. (2024) Effect of the andesite geological properties on the breakage behaviour, *Book of Extended Abstracts of the 18th European Symposium on Comminution & Classification: ESCC 2024*. ISBN:9786156018250, pp. 46-49, 4 p,

Márkus, I. R; Rácz, Á. (2023) Esősúlyos törési vizsgálatok alkalmazása kőbányászati anyagokon, *XXIV. Nemzetközi Bányászati, Kohászati és Földtani Konferencia 2023*, ISSN 2784 093X, pp. 42-47, 6 p.

Márkus, I. R; Rácz, Á. (2022) The influence of geological properties of andesites on the mechanical properties and breakage characteristics, *XXII Conference of PhD Students and Young Scientists: Interdisciplinary topics in mining and geology: Book of Abstracts*, pp. 72-73., 2 p.

Konferencia előadások:

Márkus, I.R., Bediako, J. W., Rácz, Á: Effect of the andesite geological properties on the breakage behaviour, 18th European Symposium on Comminution & Classification: ESCC 2024, June 24th - 26th 2024, Miskolc

Márkus, I. R., Rácz, Á: Esősúlyos törési vizsgálatok alkalmazása kőbányászati anyagokon, XXIV.Bányászati, Kohászati és Földtani Konferencia, 2023. március 30-április 2. Resicabánya

Márkus, I. R., Rácz, Á: The influence of geological properties of andesites on the mechanical properties and breakage characteristics, XXII Conference of PhD Students and Young Scientists, June 29 – July 01, 2022, Wrocław, Poland

Márkus, I.R., Rácz, Á: Egyszemcse törési kísérletek alkalmazása hazai kőbányászati anyagokon. Kő- és Kavicsbányásznapok 2022 április 9-11, Siófok

Márkus, I.R., Rácz, Á: A tállyai andezitek közzetani jellemzőinek vizsgálata és azok hatása a kőanyagalmazok mechanikai tulajdonságaira, Doktoranduszok Fóruma 2021. november 18. Miskolci Egyetem