

Ásványtani és mechanikai elváltozások egy vörösiszap-tározó gátanyagában

FÜGEDI UBUL ■ Magyar Földtani és Geofizikai Intézet ■ fugedi.ubul@mfgi.hu

KALMÁR JÁNOS ■ Magyar Földtani és Geofizikai Intézet ■ johannkalmar@gmail.com

Érkezett: 2013. 06. 07. ■ Received: 07. 06. 2013. ■ <http://dx.doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2013.4>

Mineralogical and mechanical transformations in the bulk of a red mud tailing dam

Based on optical, SEM, X-ray and chemical analyses of dam samples, we intended to identify the natural and man-made components of this construction. The dam was built up mainly by slag, cinder and fly ash of coal based power plants, transported and deposited by hydraulic means, with or without cement slurry supply. Mineralogical, structural and textural changes were depicted in some components during sedimentation, dehydration and crystallization. The amorphous and highly hydrated material passes into (micro) crystalline bulk of calcite and sulphates, with sensible volumetric variations. Due to inhomogeneity of the materials, tension fields may be generated in the dam body, resulting consequences in mechanical stability.

Keywords: red mud tailing dam, power plant slag, ettringite, gypsum, calcite, shrinkage, crack network

Kulcsszavak: Vörösiszap-gát, hőerőmű salak, ettringit, gipsz, kalcit, zsugorodás, repedés-rendszer

1. Bevezetés

A különböző ipari eredetű zagy és iszap szabadtéri tározása gátakkal körülvett ún. kazettákban történik. A flotációs zagy esetében a tározót körülvéző gát a zagy ülepedése során kivált homokos törmelékből épül. Ahol ez nem lehetséges, a gátanyag nagy részét kívülről hozott ipari hulladékból, jelen vizsgálataink esetében pedig szénalapú hőerőművek melléktermékeiből képezték. Mivel a hőerőművekben keletkező salak, hamu és pernye alapvetően magas hőfokon, anhidrikus és redukív környezetben jött létre, a természetbe kikerülve várható, hogy jelentős fizikai és kémiai átalakulások következnek be. E változások követésére a földtani módszerek eszköztára a létrejött ásványi fázisok azonosításán túl a gátanyag szerkezetében-szövetében kimutatja azokat az összetevőket, amelyek a gát stabilitását befolyásolhatják.

2. Anyag és módszer

A gátanyag összetételének, szerkezetének és szöveti sajátosságainak megismerése céljából egy tározó gátanyagából 51 mintát vettünk, amelyekből vékony csiszolatokon optikai, pásztázó elektronmikroszkópos és mikroszondás vizsgálatokat végeztünk, 13 mintában elvégeztük az ásványi fázisok röntgendiffrakciós (XRD) meghatározását és kémiai elemeltünk 9 mintát.

A gátanyag nagy részében a természetes ásványok csak igen kis mennyiségben jelennek meg, ezért az azonosított komponenseket „ásványi fázis”-nak neveztük, jelezve ezzel, hogy – habár a természeti körülményekhez hasonló módon – de mesterséges úton keletkeztek.

Hogy a gátanyagban milyen intenzitással folytak le a változások, erre a friss minták röntgendiffrakciós analízise, a már kiszáradt mintákon néhány hónapra rá készült csiszolatok optikai kiértékelése és ezeken (szintén hónapokat követően) mért mikroszondás adatok közötti különbségek utalnak.

FÜGEDI UBUL

Ph.D., geokémikus (szül. 1953)
a Magyar Földtani és Geofizikai Intézet tud. főmunkatársa 1975-ben Moszkvában végezte tanulmányait. Itthon és külföldön érckutató programokban vett részt. Az 1990-es évektől fő tevékenysége a környezet állapotának vizsgálata. Munkatársaival megszerkesztette Magyarország geokémiai atlaszát (1997), a hegyvidéki területek geokémiai felvételét (2007). Számos nemzetközi együtműködésben vett részt, így Európa geokémia atlaszának elkészítésében is.

KALMÁR JÁNOS

Ph.D., a földtudományok kandidátusa, mineralógus (szül. 1937)
a Magyar Állami Földtani Intézet nyugalmazott tud. főmunkatársa. Tanulmányait 1959-ben Bukarestben végezte, érc- és ásványkutásban, földtani térképezésben tevékenykedett, itthon, Dél-Amerikában és Afrikában. Természetes kőzetek, üledékek és mesterséges anyagok ásvány-közvetlen kutatásait a környezetföldtan és régészet területén is hasznosította.

Vizsgálataink a következő kérdésekre keresnek választ:

- Melyek a minták anyagának (szemcséinek, kötő- és alapanyagának, másodlagos ásványi fázisainak) az ásványtanilag azonosítható alkotóelemei?
- A röntgendiffrakciós és kémiai vizsgálat mennyiben fedi az optikai (mikroszkópos) vizsgálat eredményeit? Azaz van-e különbség a „helyben lévő” és a kiemelt, később elemzett minták összetétele között?
- Milyen a vizsgált anyag szerkezete és/vagy szövete?
- Vannak-e az adott mintákban a gátat képező anyag mechanikai, fizikai vagy kémiai instabilitására utaló jelek?

Mivel a mintavétel elsődleges, informatív jellegű volt, az itt bemutatott eredmények nem tekinthetők véglegesnek és további, hasonló jellegű vizsgálatokra van szükség számos hasonló gátanyagban.

3. A vizsgálatok eredményei

A mikroszkópos vizsgálatok során az előzőekben bemutatott szempontokat figyelembe véve az ásványfázisokat, ezek időbeli sorrendjét, szerkezeti-szöveti jellegzetességeit és a stabilitást befolyásoló, már lezajlott vagy folyamatban lévő változásokat azonosítottuk, ott ahol ezeket a mintáinkban észlelni lehetett.

3.1. A minták ásványi fázisai

A vizsgált minták ásványi fázisai a következők voltak: természetes és mesterséges eredetű törmelékes szemcsék, alakzatok, alapanyag vagy kötőanyag, másodlagos ásványfázisok, porus- és repedéskitöltések.

3.1.1. Természetes eredetű törmelékes szemcsék

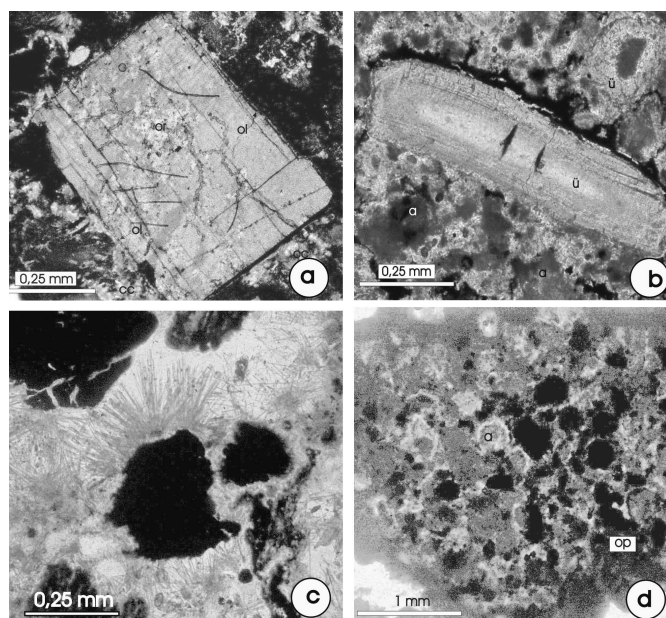
A mintákban a következő természetes eredetű törmelékes szemcséket azonosítottuk: kvarc, földpát, muszkovit, amfibol, közettörmelések.

A kvarc jellegzetes megjelenése a 0,2 mm alatti szemcseméret, gyengén lekerekített vagy szilánkos, hullámos kioltású, gyakran korrodált szemcsék. Találtunk néhány gömbölyű kvarckavicsot is. A hőhatás miatt a kvarc repedezett, esetenként olvadékos burokkal jelenik meg.

A földpát repedezett, gyengén szericitesedett szemcséket képez, gyakran részleges olvadással (1.a ábra). A csillámokat hajlított, üde muszkovit-lemezek és kloritosodott biotit lapocskák képviselik. Azonosítottunk néhány halványzöld, szálas, aktinolitós hornblende szemcsét is, valamint sajátalakú opak ásványokat (magnetit, hematit).

A természetes eredetű kőzettörmeléseket homokkő, vulkáni kőzet, szericites-kloritos pala törmelékei, kiégetett agyag és agyagpala képezi. Egyes bazalttöredékek körül üveges (izotróp) burok jelenik meg.

Valószínű, hogy a természetes eredetű törmelések a kőszénnel együtt járó meddőből, vagy a salaklerakóba került folyami homokból származnak. Részarányuk összességükben nem haladja meg az 5%-ot.



1. ábra Ásványi fázisok a gátanyagban. a. Repedezett ortoklász kristály (or) megolvadt szélekkel (ol), Vékony csiszolat, + nikolok. b. Zónás, széleken repedezett üveg (ü), alakzatok (a) és másodlagos karbonátos kiválás (c) az alapanyagban. Vékony csiszolat, II nikolok. c. Szálas-tűs gipszkristályok a széntöredékek körül. Vékony csiszolat, II nikolok. d. Alakzatok (a) és koromból összeálló opak halmazok (op). Látható az alakzatok körüli szintelen, átlátszó gyűrű.

Fig. 1. Mineral phases of dam material. a. Fissured crystal of orthoclase (or) with melted rim (ol). Thin section, + nichols. b. Zoned glass fragment, with fissured margins (ü), figured grains (a) and secondary carbonate separations (c) in groundmass. Thin section, II nichols. c. Need-like gypsum crystals around of coal fragments. Thin section, II nichols. d. Figured grains (a) and dark, agglomerated smooth particles (op). Around the figured particles, thin colorless ring may be seen. Thin section, II nichols.

3.1.3. Ipari eredetű törmelékes szemcsék

A gátanyag nagyrészt ipari hulladéknak minősülő salakból, hamuból és pernyéből épült, amelyre időszakosan cementtejet (esetleg oltott meszet tartalmazó folyadékot) locsoltak, hogy gyorsabban kössön [1]. Ezért a csiszolatokban igen változatos összetételű anyagot találtunk, de alapvetően a következő ásványi fázisokat tartalmazták: üveg, salak, műanyag-olvadék, vasoxidok és opak törmelék.

Üveg: A gátanyag törmelékes szemcséinek jelentős hányada változatos alakú, szerkezetű és koptatottságú üvegdarab: rövid éles hasábok, csövek, szálak, a szintelentől a sötét barna színűig, gyakran zónás szerkezettel, egyes szemcsék szélein jellegzetes kontrakciós mikrorepedésekkel (1.b ábra). Az üvegszemcsék mikroszondás vizsgálata azt mutatta, hogy ezeket uralkodóan kalciumot tartalmazó anyag képezi. Oxidokra és az oxidok alapján normatív ásványokra átszámítva az üveg kalcium-karbonáttól, kevés egyéb karbonáttól és szilikáttól áll; ez jelenik meg a pásztázó elektronmikroszkópos felvételeken 0,5-1,0 µm-es romboéderekben a már részben lebontott üveg anyagában.

Salak: Egyes mintákban az alapanyagban több mm-es, hólyagos szemcsék láthatók, amelyek üvegszemcsékből és szálakból, alakzatokból és opak fázisból állnak. Ez az égés folyamán a már létező hamuból és egyéb anyagokból keletkezett olvadék töredéke.

Műanyag: Szórványosan megjelenő, cseppszerű, max. 0,2 mm-es méretű, rózsaszínű, élénkpiros vagy lilás, optikailag izotróp szemcsék, igen alacsony törésmutatóval, valószínűleg a szénbe vagy a forró salakba belekerült műanyag-maradványok olvadéka.

Vasoxidok: Több helyen élénkvörös, mikronos nagyságú lemezekből összeálló szabálytalan alakú szemcsék láthatók, anyaguk valószínűleg hematitá égett fémes vas.

A fekete, opak szemcsék kőszénből, koromból és kátránycseppekből állnak.

Kőszén: A leggyakoribb opak komponens, szegletes szabálytalan alakú, 0,1-5,0 mm szemcseméretben (1.c ábra). A szélein vagy a túlsziszolt, vékonyított részeken megjelenik a szén barna színe, leveles szerkezete, haránttörésekkel, jellegzetes figuratív elemekkel. Ahol felszaporodik, a gátanyagban több mm-es sötét sávok, lencsék jelennek meg.

Korong: 2,0-5,0 µm átmérőjű opak szemcséket képez, amelyek a SEM-felvételeken ezüstös gömbökként láthatók. E gömbök halmazából szabálytalan vagy kerekded, laza szemcsék, sötét sávok képződtek.

Kátrány: Több csiszolatban különálló, vagy fészkekbe csoportosuló, opak, széleiken áttetsző, 0,05-0,2 mm-es szabályos korongok jelennek meg, vöröses-borostyánkő színű reflexekkel, sarlós kéregleválásokkal, belsejükben finom üvegtöredékek. Ezek a korongok gömb alakú kátránycseppek szelvényei. Ugyancsak gömbös kátránycseppekből álló anyag tölti ki a szabályos hálózatot képező repedéseket is (3.b ábra).

3.1.4. Alakzatok és kötőanyag

A természetes és ipari eredetű törmelék kis része egymáshoz tapadva, de főleg egy alapanyagba helyezve képezi a gátanyag szilárd fázisát. Maga az alapanyag korántsem egynemű: az apró, mikronos méretű, optikailag azonosíthatatlan törmeléken kívül lényeges összetevőjét az alakzatok képezik.

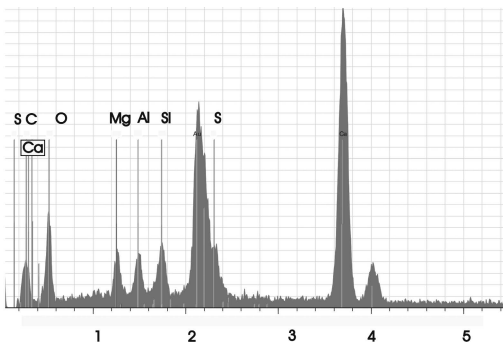
Alakzatok: A mikronos méretű, izotróp szemcsékből szederszemszerűen összeálló, korong, ellipszis, lencse vagy amőba alakú ásványfázis nevezhető alakzatnak (1.d ábra), ha a színe és a szemcsézete különbözik a környező alapanyagétól. Az alakzat és az alapanyag között az átmenet század mm-es sávban folyamatos. A pernyéből összeálló mintákban az ásványi aggregátum 0,2-0,6 mm-es átmérőjű, egymáshoz tapadt, op-

tikailag izotróp szemekből áll, az alakzatok szorosan egymáshoz tapadnak, helyenként több mm-es, lencsés mezőkbe olvadnak össze [2]. Egyes mintákban az alakzatok az alpanyagban úsznak vagy a törmelékes szemcsékhez tapadnak.

Alapanyag/kötőanyag: Az ásványi fázis, amely a törmelékeket és az alakzatokat magába foglalja vagy egymáshoz köti, a mintákban igen tág határok közötti részarányban jelenik meg. Optikailag izotróp, színtelen vagy zavaros, szürkés, sárgás vagy barnás színű, homogénnek látszó anyagból áll.

A pásztázó elektronmikroszkópos felvételeken az alapanyag és az alakzatok között a különbség az átkristályosodás fokában látható. Míg az alapanyag 3-10 μm -es levelekből, pikkelyekből tevődik össze (3.a ábra), amelyek anyaga nagyrészt amorf (üveg), az alakzatok szabályosan rendezett, 1-3 μm -es karbonát romboéderekből épülnek fel. Ezek alapján feltételezhető, hogy az alakzatok (egy jelentős része) az alapanyag csomósodása révén keletkezett, s csak kis hányadát képezi az eredetileg is gömb alakú pernye-részecske.

A mikroszondás mérések normatív oxidokra történő átszámítása alapján mind az alakzatok, mind az alapanyag összetétele 80–90% kalcium-karbonát, kis mennyiségű magnéziummal és vassal, néhány százalék szilíciummal, alumíniummal és kénnel (2. ábra).



2. ábra Üvegesnek látszó alapanyag mikroszonda-spektruma
Fig. 2. Electron sampling spectre of optically amorphous groundmass.

3.2. Másodlagos ásványfázis

Másodlagosnak minősül a gátanyag megszilárdulását követő ásványi fázisképződés, amely a csiszolatokban azonosítatlan hintésként, mikropátitos és pátos karbonát valamint szulfátok alakjában jelenik meg. Ugyancsak másodlagos fázisnak számít az opál és limonit repedéskitöltés is.

Optikailag azonosítatlan hintés: A minták nagy hányadában, az alapanyagban, az alakzatokban és a nagyobb üvegtöredékek anyagában egy igen finom szemű, anizotróp ásványfázis látható, amely lehet a hamuból újra összeállt agyagásvány, szulfát, vagy finoman eloszló karbonát. Részaránya egyazon mintán belül is néhány százaléktól 10–15%-ig változhat.

A pásztázó elektronmikroszkópos felvételeken a hintés nagy részén a lemezes alapanyagban szabályos karbonát romboéderekből álló halmazok tornyosulnak, de jelen vannak a 0,2–0,5 μm -es, rücskös, féregszerű szulfát-szemcsék is. A mikroszonda ezekben a képen kívül kalciumot és alumíniumot is kimutatott.

Pátos karbonát: Egyes mintákban pórusok és repedések kitöltésében, szabálytalan mezőkben optikailag azonosítható,

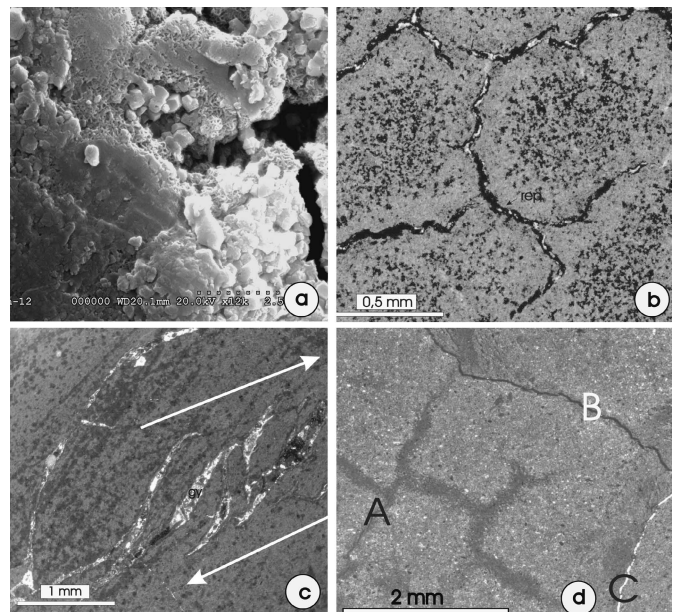
finom- és durvakristályos (pátos) kalcit jelenik meg, a mikroszondás mérés alapján néhány százalékos magnézium tartalommal.

Szulfátok: A kékeszöld színű, szálás hasábokban és szabálytalan kristályhalmazokban megjelenő Al-Ca szulfát, amelyet optikai paraméterek alapján az etringittel azonosítottunk [3], az alapanyagba és/vagy az alakzatok anyagába van beágyazva, kiszorítja ezek szemcséit, az opak anyagot és az anizotróp hintést is beleértve.

Egyes póruskitöltésekben, főleg a széntöredékek között jelen van a sugaras, szálás-lándzsás hasábokat képező gipsz is (1.c ábra).

Opál és limonit: Hajszalereket, pórusokat töltenek ki (3.d ábra), úgy, hogy a repedés szegélye 0,2–0,5 mm-es sávban elszíntelenedett. Részarányuk a vizsgált anyagban nem haladja meg a 3%-ot.

Ugyancsak másodlagos képződmény a gátanyagba beszivárgó vörös iszap is, amely a pórusos részt kirajzoló sávokban, szabálytalan foltokban követhető. A pásztázó elektronmikroszkópos felvételeken a beszüremlett vörös iszap 0,1–0,3 μm -es gömbökből összeálló szederszerű vagy szabálytalan halmazokat képez.



3. ábra a. A lapos üveglemezekből romboéderekes karbonát és féregszerű szulfát válik ki. Pásztázó elektronmikroszkópos felvétel. b. Kátránycseppek és kátránnyal kitöltött, poligonális repedések. Vékony csiszolat, II nikolok. c. Gipszrel (gy) kitöltött, elnyírt pórusok. Vékony csiszolat, II nikolok. d. Három repedés-generáció. A: száradási (zsugorosási) repedések; B: Limonittal kitöltött szakítási repedés; C: gipszrel kitöltött, szintén szakítási repedés. Vékony csiszolat, II nikolok.

Fig. 3. From the flat glass plate, carbonate rombohedrons and worm-like sulfate grains are separated. SEM photo. b. Goudron drops and goudron filled polygonal cracks. Thin section, II nichols. c. Sheared pores filled with gypsum (gy). Thin section, II nichols. d. Three generation of fissures. A: Drying, contraction fissures; B: Tensional fissure filled with limonite; C: Tensional fissure filled with gypsum. Thin section, II nichols.

3.3. Röntgendiffrakciós azonosítású ásványi fázisok és kémiai összetétel

A gátanyagból vett „friss” (2-3 napos) minták röntgendiffrakciós analízise számos olyan ásványi fázis jelenlétét mutatta ki, amelyeket a későbbiekben sem optikai módszerekkel, sem a

Sorszám	Minta	kvarc	kalcit	dolomit	ettringit	vaterit	gehlenit	wollastonit	portlandit	gipsz	hidrotalcit	Kristályos fázis összege	Amorf fázis(ok) összege
8	GÁT-20	4	29		40		6		13		2	94	6
2	GÁT-21	5	14		35	6	7	8	9	2		86	14
3	GÁT-22	3	30	2	40			12				87	13
4	GÁT-23	5	16	1	50	5	6	5	4			92	8
5	GÁT-24	1	21		31		6	5		3		67	33
6	GÁT-25	6	30		27		10	6	8	2		89	11
7	GÁT-26	6	29		30		6		20		2	93	7
1	GÁT-27	3	21		47		8		7		1	87	13

1. táblázat Röntgendiffrakciós ásvány meghatározás egyes gátanyag-mintákban
Table 1. X-ray diffractometric analyze of some samples of the dam material

mikroszonda eredményeinek normatív átszámítása során részben vagy egyáltalában nem voltak azonosíthatók (1. táblázat). Néhány ezek közül:

Az *ettringit* [$\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}\cdot 26\text{H}_2\text{O}$] részaránya a röntgendiffrakciós mintákban az 50%-ot is eléri, de a közvetlen módszerekkel vizsgált gátanyagban, mint másodlagos ásványi fázis, ennek csak a töredéke jelenik meg. Ha a száradás és a légköri széndioxid hatására át is alakult más ásványokká, a mintákban jelentős mennyiségű alumínium oxid kellene, hogy keletkezzen, de ezt esetleg csak az amorf fázisban találhatjuk meg.

A *vaterit* (CaCO_3) a kalcium karbonátnak a metastabil polimorf változata, amely a természetben egyes termálvizekből csapódik ki. E folyamatokhoz hasonlóan a gátban kalcitá alakul, főleg ha a környezet pH-értéke magas. Ezért nem valószínű, hogy a légköri hatásoknak kitett gátanyagban huza-mosabb ideig megmaradjon.

A *gehlenit* [$\text{Ca}_2\text{Al}(\text{AlSiO}_7)$] a *melilit*-csoportba tartozó, magas hőmérsékleten keletkezett szilikát, amely feltételezhető, hogy a hőerőmű tűzterében állt össze a kőszén szervesetlen komponenseiből. Ezt az ásványi fázist sem tudtuk azonosítani az optikailag vizsgált vagy mikroszondás mintákban.

A *wollastonit* (CaSiO_4) ugyancsak magas hőmérsékleten keletkezik a magmás kontakt-zónákban és a kerámiában egyaránt. A röntgendiffrakció által azonosított fázis feltehetően a tűzterben keletkezett, s valószínű, hogy mikronos nagyságrendű kristályokat képez. Légköri karbonátosodásnak a valószínűsége csekély: a természetben a wollastonit ellenáll a lebontásnak, és a felszabaduló SiO_2 -nak is meg kell jelennie valamilyen formában.

A *portlandit* [$\text{Ca}(\text{OH})_2$] részaránya egyes mintákban jelentős. A természetben vulkáni fumarolákban, magas pH értékű termálvízből kicsapódó üledékekben, a széntelepek öngyulladás során jelenik meg [3]. Ugyancsak azonosították a portlanditot a Salgótarján körüli szénbányák hányójában is. A vizezett cementpor [5], az oltott mész és a vizes hamu részben portlanditból áll, amely a levegőn meglehetősen gyorsan kalcitá alakul át. Ezért nem jelent meg az általunk vizsgált vékony csiszolatokban.

A *hidrotalcit* [$(\text{Mg}_4\text{Al}_2(\text{CO}_2)_2(\text{OH})_{10}\cdot 4\text{H}_2\text{O})$] szintetikus ásvány, amelynek a vizsgált mintákban a szemcsemérete jóval az optikai észleléshatár alatt van, minden bizonnyal az anizotróp hintésben.

A *gipsznél* ($\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$) az optikailag észlelt mennyiség jóval meghaladja a röntgendiffrakciós eredményeket és jelenlétét bizonyítottuk a mikroszondás mérések alapján a finom szemű fázisban is.

Végül megjegyzendő, hogy a röntgenamorf fázis részaránya nagyjából megegyezik az optikailag amorfnak minősített ásványi fázisok összességével, de az elektronmikroszkópos képeken – amelyek 8 hónappal a csiszolatkészítést követően lettek felvéve – sok esetben az amorfnak látszó üveges fázisból szorosan egymáshoz tapadó, tized mikronos karbonát-romboéderek keletkeztek.

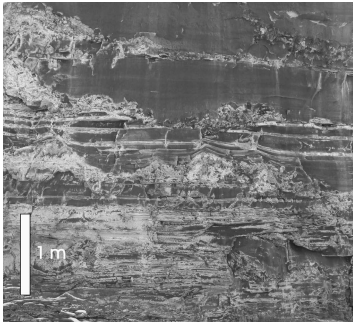
A gátanyag „friss” mintáin teljes kémiai elemzést is végeztünk. A 10%-ot is meghaladó higroszkópikus ($\text{H}_2\text{O}^{105^\circ}$) víz levonása után átszámított oxidokból (2. táblázat) jelentős mennyiségű normatív szulfátot kaptunk – és jóval kevesebb kalcitot, mint amit a mikroszkópos és mikroszondás vizsgálat kimutatott. Ez is arra utal, hogy a gátanyagban történő változások igen rövid idő alatt is tetten érhetők. Fennmarad továbbra is a kérdés, hogy mi történt a karbonátba be nem épülő oxidokkal, pl. az ettringit lebomlása során megmaradt alumíniummal?

4. Szerkezet, szövet, alak- és térfogatváltozás

4.1. Szerkezeti és szöveti sajátosságok

Szerkezet: Mivel a minták anyagának jóval több, mint 75%-a optikailag amorf, izotróp ásványfázis, a minták alapszerkezete *hialin* (üvegtöredékes minták) ill. *kollomorf*. Az utóbbiakban az amorfnak látszó alapanyag dominál. Ahol a törmelék van túlsúlyban, az üledékes kőzeteknél használt *aleuritos*, *pszammitos* szerkezet van jelen.

Szövet: A minták több mint felénél az alakzatok és szemcsék véletlenszerűen helyezkednek el, ezek *tömeges* szövetűeknek minősülnek. Az alakzatok csoportosulása, a törmelékes szemcsék helyi feldúsulása helyenként *gumós* szövetet eredményez. Az alakzatok és a törmelékes szemcsék hossz tengelyének egy irányú elhelyezkedése az egész mintában *irányított* szövetet eredményez. Ez átmenetet képez a tömeges és a réteges szövet között. Hat mintában különböző méretű és összetételű, irányított szemcsékből álló sávok váltakozását azonosítottuk, a szövet *réteges*, helyenként fokozatos szemcseméret-változással, *gradációval*, amely folyadékból történő ülepedésre utal (4. ábra).



4. ábra Réteges, üledékes szövet a gát anyagában.
Fig. 4. Stratified, sedimentary texture in material of the dam

Pórusok: A szerkezeti-szöveti elemekhez tartoznak a mintaanyagban megfigyelhető pórusok is, amelyek két mérettartományban jelennek meg.

A főleg törmelékes mintákban a szemcsék egymásra helyezkedése miatt max. 1 mm-es szabálytalan alakú, szegletes pórusok alakulnak ki. Ezeket a gát testében valószínű, hogy levegő és/vagy víz töltötte ki. Ott, ahol vörös iszappal vannak kitöltve, feltételezhető, hogy kommunikáltak egymással, ill. a gát belső felületével.

A pórusok nagy hányada max. 0,25 mm átmérőjű, a kollomorfi anyagban és a szemcsés zónákban egyaránt követhető: gömbölyded vagy kulcslyuk-alakúak, sima belső felülettel. Egy részüket másodlagos gipsz-kristályok töltik ki. Feltételezhető, hogy ezek a pórusok az eredetileg folyékony közegben maradt gázbuborékokból jöttek létre és még a gélben deformációt szenvedtek (3.c ábra).

Az eddig bemutatott eredményekből az következik, hogy szerkezetileg és szövetileg a gátanyag a természetes kőzetekhez hasonló, ezért hasonló módon vizsgálható genetikai és kőzetmechanikai vonatkozásban.

4.2. Deformációk

A vizsgált gátanyagban plasztikus és töréses deformációkra utaló jeleket találtunk.

Plasztikus deformációk: A gát anyagában felismerhető az anyagnak a saját súlya alatt történő tömörödése, még amikor az

anyag képlékeny állapotban volt. A tömörödés a szálak-lemezes üvegrészek meghajlítását, egyes alakzatok és a gázbuborékok deformálását és helyenként a széntörédek egymásba hatását eredményezte. Valószínű, hogy a (még meleg, képlékeny) kátránycseppek a tömörödési nyomás hatására az egyes repedésekbe hatoltak és ott kitöltéseket képeztek.

Töréses deformációk: A vizsgált mintákban a töréses deformációk három típusát lehet megkülönböztetni:

Mikrorepedések a törmelékes szemcséken: az üvegdarabok peremén, a széntörédekeken, az égetett agyag-pelleteken és egyes megpörkölt kvarc- ill. földpátszemcséken. Ezek a repedések nem lépik túl a szemcse határát, rendszerint az amorfi alapanyag tölti ki őket és a gát kiépítése előtt, az égetés során, vagy a vízben történt áztatás idején jöhetnek létre.

Sokszögű repedéshálózat a kollomorfi anyagban (3.b ábra). Tipikus zsugorodási deformáció, amely az anyagot 0,2–0,5 mm átmérőjű poliéderekre tagolja és a gát anyagának a megszilárdulásával egyidős. Egyes mintáknál a térfogatcsökkenés eléri a 10%-ot, valószínűleg nedvességvesztés, kiszáradás következtében, amit részben kompenzált a repedéseket kitöltő másodlagos anyag: kátrány, szulfátok, limonit vagy opál.

Szabálytalan, szerteágazó hajszálrepedések, amelyek átszelik (vagy kikerülik) a törmelékes szemcséket, a kollomorfi zónákat és a bennük kifejlődött poligonális repedésrendszert (3.d ábra). Ezek a repedések legtöbbször nem kitöltöttek, a szélesebbeket részben opál, szulfát és kevés limonit tölti ki. Ezek a már megszilárdult gátanyagban fellépő húzófeszültségek során keletkeztek. A csiszolatok felületén a részarányuk mindössze néhány százalékra becsülhető.

4.3. Alak- és térfogatváltozás a gátanyagban

A gátanyag vizsgálata azt mutatta, hogy az eredetileg felvett anyagban – a földtörténet időskálájához mérten – igen rövid idő alatt jól követhető változások észlelhetők. Ezek a változások jelenleg is folytatódnak, és a mintáinkon láthattuk, hogy csaknem a szemünk előtt mennek végbe. A gátanyagban végbemenő változások három fázisba sorolhatók: a vízfelvétel, a vízleadás és a karbonátosodás fázisaiba. Érdekes megjegyezni,

Oxidok	GÁT-20	GÁT-21	GÁT-22	GÁT-23	GÁT-24	GÁT-25	GÁT-26	GÁT-27
SiO ₂	11,15	12,76	10,00	10,56	8,17	12,39	8,53	9,31
TiO ₂	0,32	0,37	0,31	0,32	0,37	0,34	0,27	0,26
Al ₂ O ₃	7,40	7,65	6,32	7,36	5,71	6,40	5,35	5,91
Fe ₂ O ₃	2,88	3,63	3,29	3,19	4,03	2,70	2,16	2,18
FeO	0,55	0,50	0,31	0,68	0,43	0,62	0,39	0,50
MnO	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,03
CaO	41,00	41,04	41,28	39,63	40,76	41,83	47,34	45,84
MgO	3,19	3,02	3,01	3,14	2,48	2,64	2,84	2,78
Na ₂ O	0,07	0,12	0,28	0,62	0,53	1,10	0,24	0,14
K ₂ O	<0,20	<0,20	0,39	0,50	0,37	1,21	<0,20	<0,20
H ₂ O+	12,05	12,29	10,30	10,97	18,95	9,58	12,59	13,48
CO ₂	10,89	10,32	15,89	11,62	10,08	14,72	14,05	11,00
SO ₃	10,45	8,28	8,59	11,38	8,08	6,43	6,21	8,57
Összeg	99,99	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

2. táblázat Gátanyag-minták kémiai összetétele.
Table 2. Chemical composition of some samples of the dam material

hogy ezek a folyamatok hasonlóak a természetes közegben történő üledékképződéshez, pl. az agyagos-márgás kőzetek keletkezéséhez, csak ott az igénybe vett idő lényegesen hosszabb.

Vízfelvétel: A hőerőművek tűzterében magas hőfokon keletkezett üvegszerű (amorf), nagy fajlagos felülettel rendelkező anyagot gyakran még melegen hordták fel a tározók gátjaira. A gátanyag vizsgálatából kiderült, hogy a gátépítés során salakanyagból és vízből álló (esetenként cementtejjel kevert) zagyot terítettek a gát felületére. Még ha a zagy ülepedése során a víz nagy része el is folyt vagy elpárolgott, mégis maradt belőle elegendő, hogy a salak erre alkalmas komponenseit hidratálja és a vízben oldható komponenseket az anyagból kivonja. Itt főleg a finom szemű üvegtöredék és a pernye üvegszálakból álló gömbjei voltak képesek vízfelvételre [4], oly módon, hogy a törmelék szemcséket a laboratóriumi kísérletek során megfigyelt módon [6] kocsonyás gél fogta egybe, és a felhordott rétegben önálló lencsákat, sávokat is képzett. Egyes csiszolatokban látható, amint a zavaros, szürke kötőanyag betüremkedik a darabos üveg- és szén szemcsék közé.

Fontos tudni, hogy a finom szemű, diszperz anyagok hidratálása során jelentős mennyiségű hő szabadul fel [6], amelyhez a szintén kémiai (exoterm) hidratációs hő is hozzáadódik (pl. a $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} = \text{Ca}(\text{OH})_2$ reakció). Másrészt a vízfelvétel (legyen az egyszerű fizikai vagy hidratációs, kémiai folyamat), jelentős térfogatnövekedéssel jár. Ha ez a gát legfelső rétegében megy végbe, a hő a szabadba szétsugárzik és a térfogatnövekedéshez elegendő hely áll rendelkezésre. Ha viszont a hidratálás a gát testében is folytatódik (pl. a nagyobb üvegszilánkok esetében), akkor a keletkező feszültségeket elsősorban a törmeléken látható harántrepedések vezetnek le, de összeadódva kihatnak a gát teljes tömegére is.

Vízvesztés: A zagyként felhordott gátanyag, miután a gravitációs mozgású vizét (és vele együtt a benne oldott sókat) elveszítette, még jelentős vízmennyiséget tart megkötvé, főként a gélekben. Ezekben egyrészt a saját súlya alatti tömörödés, másrészt a légköri kiszáradás folytán megkezdődik a víz eltávozása.

A tömegvesztés egyik lényeges összetevője az oldatba került sók eltávozása. Ha ugyanis összehasonlítjuk a gátanyag mintáin végzett elemzésünket különböző publikált értékekkel [7], a kálium- és nátriumoxidból 3–5%-al, az SO_3 -ból 2–3%-al kevesebb maradt a gátanyagban, mint amennyi a „száraz” salakban kellene, hogy legyen. Ha ez a veszteség folytatódik a gát testében, ez is hozzájárulhat a tömeg- ill. térfogatcsökkenéshez.

A gélben a dehidratáció a kristályos ásványi fázisok kiválásával kezdődik, ugyanis még a sok kristályvizet (26 molekulát) tartalmazó ettringit is kevesebb vizet köt meg, mint a karbonátos-szilikátos-szulfátos gél. Az így létrejött térfogatcsökkenés, zsugorodás a polygonális repedéshálózat keletkezésében nyilvánul meg.

Karbonátosodás: A gátanyag vizsgálata kimutatta, hogy az ásványi fázisokban végbement változások végterméke a kristályokban megjelenő karbonát, azaz a kevés magnéziumot és vasat tartalmazó kalcit. Mivel az egységnyi kalciumot tartalmazó kalcitnak kisebb a térfogata, mint az egységnyi kalciumos gipsz, így a karbonátosodás egyértelműen a befogadó anyag zsugorodásához vezet. Ez a térfogatcsökkenés az amorf komponensek esetében még jelentősebb. A mintáinkban a kalcit kiválása az amorf alapanyagból az alakzatok keletkezése során az elektronmikroszkópos felvételeken is követhető alak- és térfogatváltozással jár, és optikailag is látható az egyes alakzatok körül lévő átlátszó, szintelen gyűrű.

Ugyancsak térbeli következményei vannak a szulfátok mozgásának. Egyrészt a gélből eltávozó szulfát zsugorodást, másrészt a pórusok, repedések kitöltése tömörödés által feszültséget eredményez.

Mindezek ismeretében megállapítható, hogy a hasonló gátak anyagában jelenleg is folyamatban lévő ásványi változások szerkezeti-szöveti következményekkel járnak és közvetlenül, vagy közvetve térfogatváltozásokat indukálnak. A gáttömeg összességében lehetséges, hogy a zsugorodás és a tömörödés hatásai kompenzálják egymást. Viszont, ha figyelembe vesszük, hogy a gát anyaga jelentős mértékben inhomogén és e változások időben is elhúzódnak, magyarázatot kaphatunk a lokális feszültségeket levezető repedések, repedéses zónák kifejlődésére.

5. Következtetések

Vizsgálataink során földtani módszerek alkalmazásával tanulmányoztuk egy vörösiszap tározására szolgáló gát anyagának az ásványi-kőzettani összetételét, szerkezeti és szöveti sajátosságait. A főleg hőerőmű-salakból (pernyéből) megépített gát anyaga törmelékes szemcsékből (természetes ásvány, ill. kőzet, üveg, salak, kőszén), optikailag amorf kötő-, ill. alapanyagból és másodlagos ásványi fázisokból áll. Szerkezete üveges vagy kollomorf, szövege tömeges, irányított vagy réteges. A természetes kőzetekkel való hasonlóság indokolja az üledékföldtanban használt vizsgálatok alkalmazását.

A gátra felvitt zagy ülepedése és az anyag megszilárdulása időben elhúzódó folyamat. A szemcsék elrendeződése, az ásványi fázisok és alakzatok keletkezése, ill. elváltozása tömeg- és térfogatváltozással jár, amely mikroszkópos vizsgálattal nyomon követhető.

Az inhomogén gátanyagban a tömörödés és a zsugorodás feszültségeket vált ki, amelyeket különböző korú, irányú és méretű repedések vezetnek le. Hogy ezek a repedések milyen kockázati tényezőket jelentenek a gáttest állapotát illetően, azt további kutatások hivatottak pontosítani.

Felhasznált irodalom

- [1] Mucsi, G. – Debreczeni, Á. – Máday, V. – Dudok, T. – Csöke, B.: *Development of hydraulic binder using industrial wastes*. Építőanyag, 2011/1-2, pp. 28-32.
- [2] Opczky, I.: *Silicate-chemical properties of fly ash*. „Tiszta környezetért” szénerőművi pernyék hasznosítása konferencia, Miskolci Egyetem, 55. pp. 97-108. 2001
- [3] Pallace, C. – Berman, H. – Frondel, A.: *Dana's System of Mineralogy (VII. ed.)*. Wiley, V., 1., Ettringite: pp. 641-642., Portlandite: pp. 924-930. 1944
- [4] Reményik K.: *Pernyeelválasztó. Korszerű kazánberendezések*. Műszaki Kiadó, pp. 319-324. 1977
- [5] Taylor, H.F.W.: *Composite cements. Cement chemistry*. Telford, pp. 262-272. 2004
- [6] Yeheyish, M.B. – Shang J.Q. – Yanful E.K.: *Chemical and mineralogical transformations of coal fly ash after landfilling*. World of Coal Ash Conference, Lexington, Kentucky, pp. 223-234. 2009
- [7] CRR: *Modes opératoires. Essai de contrôle à base de cendres volantes de charbon broyé*. Centre Régionale de Recherche, Bruxelles, 170 p. 1992

Ref.:

Fügedi Ubul – Kalmár János: *Ásványtani és mechanikai elváltozások egy vörösiszap-tározó gátanyagában*. Építőanyag, 65. évf. 1. szám (2013), 15–20. p.
<http://dx.doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2013.4>