

Biominalizálás hatása sóskúti durva mészkőre

Juhász Péter

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, juhaszpit@gmail.com

Kopecskó Katalin

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, katalin@eik.bme.hu

ÖSSZEFOGLALÁS: A baktériumok előidézte kalcium-karbonát kiválást napjainkban széles körben vizsgálják, mivel lehetséges alternatívát kínál a hagyományos módszerekre. Ennek okán a téma kutatói alkalmazásorientált és helyszíni vizsgálatokat ajánlottak. A mi vizsgálatunk során a francia kutatócsoport (Calcite Bioconcept) által kidolgozott eljárást alkalmaztuk sóskúti durvamészkő próbatesteken. A mintákat szövetük és látszólagos porozitásuk alapján soroltuk négy csoportba, az eredményeket pedig csoportonként vizsgáltuk. A próbatesteken az eredeti és a kezelés utáni állapotokban vizsgáltuk a vízfelvétel és a kapillárisemelkedés, valamint a tömegösszetételei tulajdonságok változását. A kezelt próbatesteket kezeletlen, kontroll darabokkal összevetve vizsgáltuk továbbá az egyirányú nyomószilárdság eltéréseit. Az említett mérések során a kezelt próbatestekre kedvezőbb értékeket kaptunk. Ezen kívül direkt és indirekt módszerrel igyekeztünk megállapítani a baktériumok behatolási mélységét a kőanyagba.

Kulcsszavak: biomineralizálás, Bacillus cereus, biolerakódás, sóskúti durva mészkő

1 BEVEZETÉS

A biomineralizálás módszere azon a megfigyelésen alapszik, hogy egyes baktériumok életciklusuk során - megfelelő környezetben - képesek kalcium-karbonát kristályok előállítására. Ezt a jelenséget mikrobiológiai karbonát-kiválásnak nevezzük. Ezen jelenség építőipari alkalmazását immár húsz éve kutatják és fejlesztik, illetve ugyanennyi ideje alkalmazzák elsősorban homlokzati kőanyagok állagvédelmére és javítására. Az eljárás előnye, hogy a hagyományos módszerekkel ellentétben kizárólag organikus eredetű anyagok kerülnek felhasználásra, s a keletkezett kalcium-karbonát nagymértékben kompatibilis a javítandó anyaggal. Ezen felül a létrejött kristályok szerves részévé válnak a javított anyagnak, integrálódásuk tehát nagyon magas fokú (Le Metayer-Levrel et al., 1999).

A biomineralizálásnak eddig két főbb fajtája, irányvonala különült el, melyeknek céljai is különbözőek (De Muynck, W. et al. 2010). Az egyik csoportot azok az eljárások képviselik, amelyek során a baktérium-testek membránjuk külső felületén kalcium-karbonát kéreg képezve körbezárják magukat. A pórusok belsejére, illetve a külső felületre tapadva ezek a „kapszulálódott” baktériumok önmagukban csökkentik a pórusok méretét, ezáltal a vízfelvételt is. Mivel a pórusok kitöltése nem teljes, ezért a kőanyag páraáteresztése zavartalan marad. Az újonnan beépült „kapszulák” javítják a szemcsék kohézióját is, ez pedig kedvezően befolyásolja a kőanyag szilárdságát. Az újonnan képződött kalcitréteg extrém klimatikus viszonyok között is igen ellenállónak mutatkozott az erózióval szemben (Adolphe et al. 1990). Ezt az eljárást biolerakódásnak hívjuk. A másik eljárás a biocementálás, melynek lényege, hogy a baktériumok repedésekbe jutva nagy mennyiségű kalcium-karbonát állítanak elő (tehát nem csak egy vékony réteget a membránjukon) a tápanyagból, ezáltal kitömik a hézagokat. A baktériumok aktivitása a táplálék bevitelével szabályozható, így elkerülhető a túlzott kristályképződés, mely repedések kialakulásához vezethet. Ez a módszer mind kőanyagok, mind porózus építőanyagok (betonok, vakolatok) javítására is alkalmas. Emellett kísérletek folynak önjavító betonok előállítására is (Jonkers, H.M., et al. 2008).

Kísérletünk során az előbbi módszert, azaz a biolerakódást alkalmaztuk.

2 ANYAGOK ÉS MINTAELŐKÉSZÍTÉS

1.1. A vizsgált kőanyag

A kísérlet során vizsgált kőanyag sóskúti durva mészkő, azon belül két változat: ooidos (a), és durvább szemű, ooidos bioklasztos (b) szövetű (Török Á. 2007). Az előbbiből kettő, míg az utóbbiból öt kőtömb került feldolgozásra. A kialakított mészkő próbatestek tulajdonságait és darabszámait az **1. táblázat**. mutatja.

2.1 Alkalmazott mikroba és tápközeg

A kísérlet során a francia Calcite Bioconcept cég által kifejlesztett kezelőszert és eljárást alkalmaztuk. Az alkalmazott mikroba ennek megfelelően a *Bacillus cereus*, mely egy aerob, Gram-pozitív, nem patogén talajbaktérium. A baktérium 15-50°C között szaporodik (K. M. Johnson et al. 1983), tehát melegebb környezeti hőmérséklet mellett alkalmas kültéri kezelésre. A *B.cereus* spóráképző, tehát a tápanyag megvonását követően túlélő képletet képez a kezelt anyagban. Ennek megfelelően további tápanyag hozzáadásakor revitalizálódik, s ismét képes lesz kalcium-karbonát előállítására.

2.2 A próbatestek kialakítása és csoportosítása

A vizsgált mészkő próbatestek az MSZ EN 1926 szabvány (2007.április), szerint kerültek kialakításra, hengeres formában. A hengerek átmérője és magassága így 50±5 mm. A próbatestek hét darab különböző álló kőtömbből (A-G nagybetűkkel jelölve) lettek kifúrva, majd kivágva. A kőtömbök között két szövettípus figyelhető meg – 2.1 pont. Ez a tulajdonság, valamint a kőtömbökre jellemző testsűrűség lett a próbatestek csoportosításának alapja. Ennek megfelelően négy csoportot (I-IV. római számokkal jelölve) alakítottunk ki: I.-A és D tömbök; II.-B,C és E tömbök; III.- F tömb; IV.-G tömb. Az egyes csoportokhoz tartozó tömbök jellemző adatait, valamint az egyes csoportok vizsgált darabszámait az **1. táblázat**. mutatja. Az egy tömbhöz tartozó összes próbatest fele kezelve lett, míg másik fele kezeletlen kontrollként vett részt a vizsgálatban. Mivel a kezelés során véletlenül a B jelű tömb összes próbateste kezelve lett, így az F jelű tömbből csak az F1 számúra maradt kezelőszer. Emiatt az F és B jelű tömbök próbatestei kimaradtak az egyirányú nyomószilárdság vizsgálatából.

1. táblázat. A próbatestek csoportosítása

Tömb jele	Szövet	Próbatestek darabszáma, ebből		Testsűrűség átlaga [g/cm ³]	Csoport	Megjegyzés
		kezelt	kontroll			
A	ooidos (a)	5	5	1,6376	I.	-
B	bioklasztos (b)	10	0	1,6472	II.	-
C	bioklasztos (b)	5	5	1,6954	II.	-
D	ooidos (a)	5	5	1,6280	I.	-
E	bioklasztos (b)	3	3	1,6640	II.	-
F	bioklasztos (b)	1	9	1,5250	III.	minimum
G	bioklasztos (b)	5	5	1,7389	IV.	maximum
Σ	-	34	32			
Tömbök testsűrűségének átlaga (g/cm ³):				1,6480		
A testsűrűség szórása (g/cm ³):				0,0663		
Szórás alsó határa:				1,5818		
Szórás felső határa:				1,7143		

2.3 A kezelés körülményei

A kezelést a francia Calcite Bioconcept cég előírásai (Calcite Bioconcept, 2011) alapján, valamint a biomineralizálás kutatóinak ajánlására (De Muynck, W. et al. 2010) kültérben, tehát valós időjárási és környezeti viszonyok között végeztük el. Egyedüli különbséget az eredeti módszerhez képest a kezelőszer kőanyagra való felvitelénél tettünk. Annak érdekében ugyanis, hogy a kőhengerek teljes térfogatára kiterjedjen a kristályképződés, a kezelőszert nem felületre permetezéssel alkalmaztuk, hanem a próbatesteket merítettük a folyadékba 60 másodpercig. A próbatestek az Eötvös Lóránd Tudományegyetem Meteorológiai Tanszéke és az Országos Meteorológiai Szolgálat (OMSZ) mérőkertjében (Budapest, Pázmány Péter sétány 1.) lettek kihelyezve, a talajszinttől számított 45 mm magasságban,

rácsos műanyag tálcákra helyezve - **1. ábra**. A kezelést augusztus 23-29 között folytattuk le. A próbatetek a napok folyamán körülbelül 12.00-ig erős napsugárzásnak voltak kitéve, majd fokozatosan árnyékba kerültek. Az időszakhoz tartozó jellemző hőmérsékleti és relatív páratartalom-adatokat a **2. ábra**. tartalmazza. A kövek jellemző, napos oldali felszíni hőmérsékletei szárazon 36,6-39,7°C közötti (dél előtt 11:04), nedvesen pedig 25,0-42,5°C (dél előtt 11:50), illetve 22,9-26,8°C (este 19:30) közötti értékeket adtak.



1. ábra. A próbatetek kihelyezési módja

2. táblázat. Léghőmérsékleti és relatív páratartalom adatok; 2011.08.23-29. (OMSZ)

Dátum:		8. 23.	8. 24.	8. 25.	8. 26.	8. 27.	8. 28.	8. 29.
Léghőmérséklet [°C]	min.	22	22	23	23,5	22,5	16	17
	max.	34	34	36	35	31	24,5	27
	6:00	22	22,5	24	23	22,5	16	17
	14:00	33	33	34	33	20	23	26
	22:00	27	27,5	28	28	22	21	23
Relatív páratartalom %	min.	30	32	28	32	34	46	37
	max.	83	75	75	73	60	73	74
	6:00	80	72	70	70	58	72	70
	14:00	33	36	35	42	38	47	42
	22:00	50	55	44	46	47	52	44

3 VIZSGÁLATOK

A kezelés elvégzését követően több vizsgálatot folytattunk le. Összességében vizsgáltuk a tömegösszetételei tulajdonságok-, a vízfelvételi tulajdonságok- és az egyirányú nyomószilárdság változását, valamint ezek összefüggéseit. Ezeken felül elektronmikroszkópos megfigyeléssel igyekeztünk megállapítani a kezelés mélységi hatását. Ez utóbbit indirekt módszerekkel is teszteltük.

3.1 Egyirányú nyomószilárdság megállapítása

Kőanyagok esetében a nagyobb nyomószilárdság általában nagyobb időtállósággal párosul. Ennek okán a szilárdsági értékekben bekövetkezett esetleges pozitív változásból a kőanyag megnövekedett tartósságára lehet következtetni. Az egyirányú nyomószilárdság megállapítását az MSZ EN 1926 szabvány (a továbbiakban: szabvány) szerint előírt módszerrel, a BME Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék Anyagvizsgáló Laboratóriumának nyomóberendezésével végeztük el. A 2.3 pontban is ismertetett kialakítású próbatetek kezelt és kontroll darabjait különválasztva, a határfeszültségeket csoportonként átlagolva vetettük össze a kezeletlen és a biomineralizált próbatetek értékeit. A szabvány által előírt módon vizsgáltuk továbbá az egyes csoportok kisebb várható értékét (lower expected value) is. Eredményként a kezelt próbatetek esetében magasabb szilárdsági értékekre számítottunk a beépült többlet kalcium-karbonát miatt.

3.1 Vízfelszívás és kapilláris-emelkedés

A vízfelszívási és a kapilláris-emelkedés teszteket a kezelés előtt és után is elvégeztük a nem kontroll próbatesteken. A tesztek során a próbatesteket vízzel töltött tálcában egy rácsra helyeztük oly módon, hogy egyik alaplapjukon állva, 5 mm mélységig belemerüljenek a vízbe. A felszívás okozta vízszint-csökkenés a víz utánpótlásával lett ellensúlyozva. A nedves tömegeket 15, 30, 60 másodperc eltelte után két tized grammos pontossággal mértük, a próbatest felületéről csepegő víz letörlését követően. Ezzel a méréssel párhuzamosan a felszínen, a henger palástjának egy alkotója mentén alkoholos filccel jelöltük a víz felszívódási magasságát, mely távolságokat két tized milliméteres pontossággal mértünk le. A vízfelszívási, valamint az ezzel párhuzamos kapilláris-emelkedési tesztet addig folytattuk, amíg a víz a henger felső lapjáig fel nem szívódott. A biomineralizálást követően a próbatestek vízfelvételét és felületi vízszint-emelkedését a korábbival azonos oldalukon vízbe mártva, valamint azonos vonal mentén vizsgáltuk. A kezelés hatására alacsonyabb vízfelvételt, valamint a kapilláris-emelkedés sebességének csökkenését vártuk.

3.2 Tömegösszetételi tulajdonságok változása

A tömegösszetételi tulajdonságok vizsgálatok a kezelt próbatestek száraz- és (vízzel) telített tömegeit, látszólagos porozitásait és a testsűrűségeit hasonlítottuk össze a kezdeti, és a biomineralizálás utáni állapotban. Ezen vizsgálat során piknométeres anyagsűrűség-számítást, többszöri vízzel telítést, valamint tömegállandóságig szárítást alkalmaztunk. A biomineralizálás hatására a tömeg és a sűrűség növekedésére, valamint a porozitás csökkenésére számítottunk.

3.3 Pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálat és indirekt módszerek

Egy köfelület utólagos védelménél fontos szempont, hogy a kezelés csak a felület felszínére korlátozódik-e (kéreg képződése), avagy képes a kőanyag mélyebb, károsodott rétegében is javító hatást kifejteni. Ennek okán pásztázó elektronmikroszkóp (SEM-scanning electron microscope) segítségével egy kezelt és egy kontroll próbatest 3-3 darabját vizsgáltuk, megfigyelendő, hogy képződtek-e bakteriális eredetű CaCO_3 kristályok a hengerek belsejében. A mintadarabokat az eltört próbatestek oldalsó felszínéről, valamint belsejéből, így tengelyének belső pontjából és félsugárnyi mélységéből vettük ki, ügyelve az átporozódás elkerülésére.

A bejutási mélység indirekt becslésére két módszert alkalmaztunk. Az első esetben a próbatesteket 60 másodpercig metilénkékkel színezett vízbe merítettük, majd száradás után nyomógéppel az alkotók mentén kettéhasítottuk őket (brazilvizsgálat módszere). A metszet elszíneződése mutatta a folyadék bejutási mélységét. A második esetben vízben 10^7 db/ml koncentrációjú *Bacillus cereus*-szuszpenziót készítettünk, melyet ugyancsak 60 másodperces merítés során juttattunk a próbatest belsejébe. Az átítatott hengereket 1 napig 30°C -on szárítottuk, majd a fentebb leírt módon kettéhasítottuk. Az így létrehozott felületeket Petri-csészéken agar-agarral szilárdított, cereusszelektív tápközegre (MERCK, 2005) lenyomatoltuk. A mintákat 1 napig 30°C -on inkubáltuk, majd a lenyomat kontúrján belül kikelt telepek elhelyezkedéséből következtítettünk a baktériumok próbatesten belüli eloszlására. A két indirekt módszer tájékoztató jelleggel lett lefolytatva, így azok környezeti körülményeinek (például léghőmérséklet, víz pH-ja, relatív nedvességtartalom) reprodukálására nem törekedtünk. A vizsgálat eredményként azt vártuk, hogy a kezelőszerszám teljes átítatja a próbatesteket, s így a henger egészére kiterjed a kristályképződés.

4 EREDMÉNYEK

4.1 Egyirányú nyomószilárdság

Az egyirányú nyomószilárdság vizsgálatánál az F és B tömböket nem vizsgáltuk, mivel azokhoz a kezelés során nem készült kontroll, illetve megfelelő számú kezelt példány. Így 3 csoportot értékeltünk, ebből a 2.-at a B tömb nélkül. A teszt során a kezelt próbatestek esetében nagyobb határszilárdsági értékeket mértünk (**3. táblázat.**). Fontos megjegyezni azonban, hogy a durvamészkö próbatestek inhomogenitása nagyban befolyásolhatja mind a kezelt, mind a kezeletlen próbatestek határszilárdsági értékeit. Ezért mindenképpen javasolt a tesztet homogén próbatesteken (például habarcs, porózus beton) is elvégezni a szórás csökkentése érdekében. Emellett a szabvány által előírt módon meghatároztuk az egyes csoportok várható legkisebb értékét is. Ez utóbbi esetben – az esetenként igen nagy szórásnak betudhatóan – a kezeletlen próbatestek minden tömb esetében jobb tervezési értékeket értek el a kezelekhez képest. Mivel azonban esetünkben nem tervezési, hanem ellenőrzési vizsgálatról van szó, így a kapott értékek nem irányadóak. Valamint ezekre az értékekre is igaz a fent említett torzító körülmény.

3. táblázat. A határfeszültségek értékei

Tömb, csoport jele	Határfeszültség [N/mm ²]		Változás	Szórás [%]	
	Kezeletlen	Kezelt		kezeletlen	kezelt
A	6,42	7,99	24,59	7,44	30,75
C	3,84	4,54	18,38	24,97	30,68
D	6,35	6,53	2,78	22,50	10,50
E	3,40	3,55	4,40	14,34	18,85
G	4,21	4,54	7,99	18,44	26,74
Átlag	4,84	5,43	11,63	17,54	23,51
I.	6,39	7,26	13,74	14,97	20,63
II.b (B nélkül)	3,62	4,05	11,81	19,66	24,77
IV.	4,21	4,54	7,99	18,44	26,74

4.2 *Vízfelvétel és kapilláris vízfelszívás*

A biom mineralizálást követően mind a próbatetek vízfelvételében, mind a kapilláris-vízszintemelkedés sebességében kedvező változás következett be. A maximális vízfelvételt tömegszázalékban határoztuk meg, és a következő képlettel számítottuk mind a kezdeti, mind a kezelés utáni állapotokra:

$$Vízfelvétel_{max} = \frac{m_{nedves, kezelt} - m_{száraz}}{m_{száraz}} * 100 \quad [m/m \ %] \quad (1)$$

A maximális vízfelvételt csoportonként értékeltük ki, az egyes csoportokhoz tartozó tömbök értékeinek átlagolásával. Az így kapott értékeket, azaz a vízfelvétel csoportonkénti, valamint átlagolt változását az **4. táblázat.** mutatja.

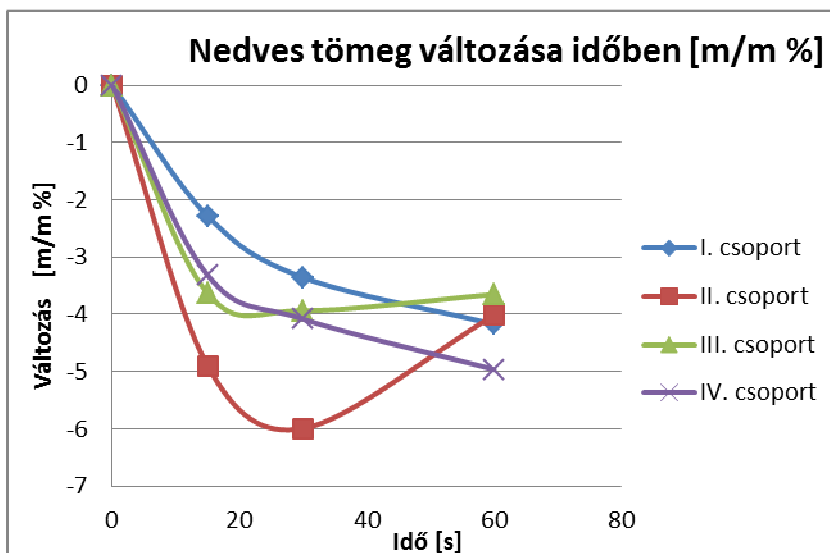
4. táblázat. A próbatetek tömegszázalékos vízfelvételének csoportátlagai

Csoport	Maximális vízfelvétel m/m %-ban		
	Eredeti	Kezelt	Változás
I.	18,20	15,50	- 2,69
II.	14,69	12,49	- 2,20
III.	19,98	15,85	- 4,13
IV.	12,77	10,64	- 2,13
Átlag			- 2,79

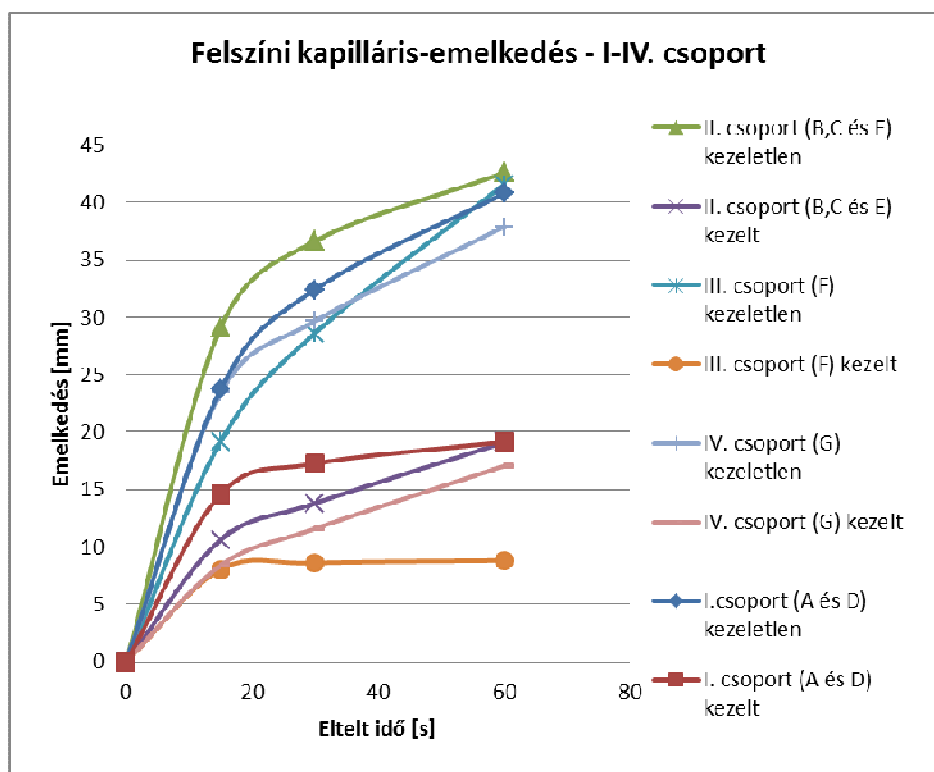
A vízfelvétel időbeni változásának értékelésénél az eredeti és a kezelt állapotok azonos időpillanataihoz (0, 15, 30, 60 másodperc) tartozó nedves tömegeket vetettük össze a (2) képlet segítségével. A különbség minden esetben negatív volt, tehát a kezelés csökkentette a kőanyag vízfelvevő képességét. Az eredményeket az **2. ábra.** mutatja.

$$Vízfelvétel_{(t)} = \frac{m_{nedves, eredeti(t)} - m_{nedves, kezelt(t)}}{m_{nedves, eredeti(t)}} * 100 \quad [m/m \ %] \quad (2)$$

A felszíni kapillárisemelkedés változását a **3. ábra.** mutatja. Az felső, meredekebb görbék a próbatetek kezeletlen -, míg az alsó, laposabbak a kezelt állapotaihoz tartoznak. A görbék meredeksége (mm/s) pedig az emelkedés sebességével egyenlő. Látható tehát, hogy a kezelésnek köszönhetően nemcsak a felszívódási magasság, hanem a felszínin vízfelszívás sebessége is jelentősen lecsökkent.



2. ábra. A nedves tömeg m/m százalékos megváltozása



3. ábra. A felszíni kapillárisemelkedés változása

4.3 Tömegösszetélteli tulajdonságok változása

A tömegösszetélteli tulajdonságok változásának oka, hogy a baktérium-testek az újonnan képződött a kalcium-karbonát kristályokba kapszulálódtak, és feltapadtak a pórusok belső felszínére. A Calcite Bioconcept cég által rendelkezésünkre bocsátott, és felhasznált por alakú kezelőszer összes mennyisége 125 gramm volt. Ez a mennyiség 34 db próbatest és 3 db kisebb mézskódarab kezelésére lett felhasználva. A por pontos összetétele ugyan ipari titok, az azonban tudható, hogy a kristályok felépítéséhez szükséges kalciumot és karbonátion-forrást (feltehetően kalcium-ureát), valamint tápanyagokat tartalmaz a baktériumok számára. Elkerülendő, hogy az esetlegesen bennmaradt, fel nem használódott szemcsék befolyásolják a méréseket, a bakteriális aktivitás – így a kapszulálódás - lezárulta után a próbatestek kádba helyezve, víztelítéssel át lettek öblítve.

A szállítás és mérés közbeni tömegveszteségek (kisebb szemcsék lepattogzódása) tízezrelékes nagyságrendűek, ezért azokat elhanyagoltuk.

A próbatestek tömegösszetélteli tulajdonságainak megváltozását a kezdeti állapotra vonatkoztatva adtuk meg. A tömegek változása m/m % -ban, a testsűrűség és a porozitás pedig %-ban értendőek. A mért értékeket a **5. és 6. táblázatok**. tartalmazzák.

Látható, hogy a száraz tömeg növekedésével együtt csökkent a felvehető víz mennyisége, így a telített tömeg is. A próbatestekbe átlagosan 0,459 gramm anyag épült be, mely 0,22 m/m % tömegnövekedésnek felel meg. A próbatestek testsűrűsége ugyanilyen nagyságrendben növekedett meg, a porozitás szempontjából azonban ez nagyobb – 9,18 %-os - változást jelent.

5. táblázat. A próbatest-csoportok száraz- és nedves tömegei

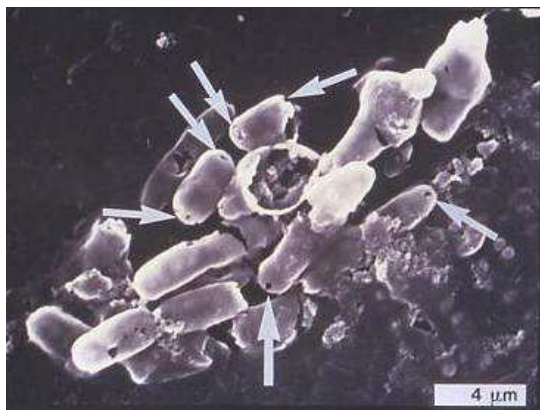
Tömbök, csoportok jele	Száraz tömeg átlaga [g]			Telített tömeg átlaga [g]		
	Eredeti	Kezelt	Változás [%]	Eredeti	Kezelt	Változás [%]
A	194,90	195,41	0,26	230,53	228,11	-1,05
B	197,91	198,34	0,22	229,09	227,73	-0,59
C	205,24	205,71	0,23	233,67	231,29	-1,02
D	196,44	196,99	0,28	231,84	229,15	-1,16
E	200,43	200,87	0,22	229,38	227,79	-0,69
F	188,28	188,55	0,14	221,43	221,36	-0,03
G	210,37	210,78	0,20	237,23	235,13	-0,89
I.	195,67	196,20	0,27	231,19	228,63	-1,11
II.	201,19	201,64	0,22	230,71	228,94	-0,77
III.	188,28	188,55	0,14	221,43	221,36	-0,03
IV.	210,37	210,78	0,20	237,23	235,13	-0,89

6. táblázat. A próbatest-csoportok testsűrűségei és látszólagos porozitásai

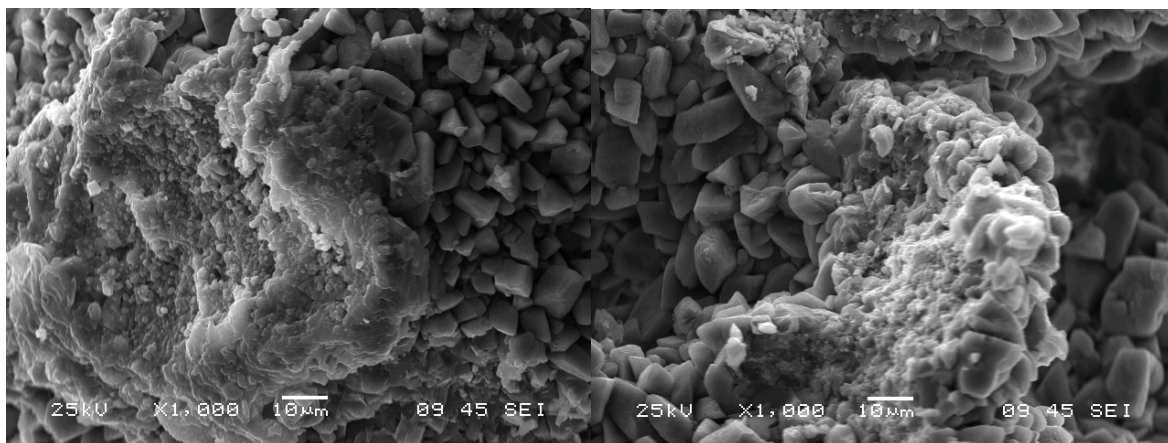
Tömbök, csoportok jele	Testsűrűség átlaga [g/cm ³]			Látszólagos porozitás átlaga		
	Eredeti	Kezelt	Változás [%]	Eredeti	Kezelt	Változás [%]
A	1,638	1,643	0,33	0,30	0,28	-8,37
B	1,647	1,651	0,21	0,26	0,25	-5,72
C	1,695	1,699	0,23	0,24	0,21	-10,04
D	1,628	1,633	0,29	0,29	0,27	-9,15
E	1,664	1,668	0,22	0,24	0,22	-7,00
F	1,525	1,535	0,67	0,31	0,27	-11,00
G	1,739	1,742	0,20	0,22	0,20	-9,36
I.	1,633	1,638	0,31	0,30	0,27	-8,76
II.	1,669	1,673	0,22	0,25	0,23	-7,59
III.	1,525	1,535	0,67	0,31	0,27	-11,00
IV.	1,739	1,742	0,20	0,22	0,20	-9,36

4.4 Pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálat és indirekt módszerek

Az elektronmikroszkópos vizsgálat során nem sikerült egyértelműen, a **4. ábrán**. láthatóval azonos formában kapszulálódott baktériumokat találni. A nagyított felszíneken azonban helyenként felfedezhetőek voltak az alapszerkezettől eltérő, pontszerű, szabálytalan alakú kristálycsoportok, amelyek feltehetően a kezelés következményei – **5. a. és 5. b. ábrák**. Ugyanezek a mintázatok a kezeletlen kődarabon nem voltak láthatóak. A minták közül a tengely belső pontján elhelyezkedőn már nem találtunk az alapszerkezettől eltérő formájú kristályokat, így a biomineralizáció feltehetően nem terjedt ki a próbatestek belső magjára. A metilénkéssel végzett vizsgálat alapján a bemeztett próbatest nem tud teljesen telítődni folyadékkal, mivel képes az összes légbuborék eltávozni, ami gátolja a kezelőszer bejutását. Feltehető tehát, hogy az alkalmazott, baktérium-tápanyag szuszpenzió nem jutott be a hengerek belsejébe.



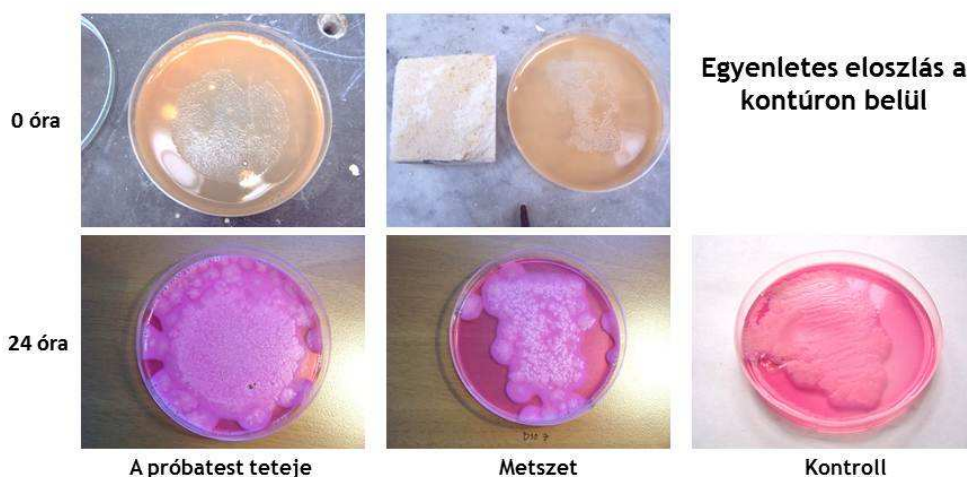
4. ábra. Membránszinten CaCO₃-ba kapszulálódott baktériumok (Castanier et al. 1999)



5.a. ábra. A minta felszíne: jobbra az eredeti felszín, balra a lerakódások 1000X-es nagyítás mellett

5.b. ábra. A minta felszíne a pontszerű kristálycsoportokkal 4000X-es nagyítás mellett

Az előző kettővel ellentétes eredményt mutatott a baktérium-szuspenzióba merített, majd kiszáritott és félbehasított, táptalajra lenyomatolt felület rajzolata. A lenyomatozás és a 24 órán át 30°C-on való inkubálást követően a teljes felületen képződtek telepek – **6. ábra.**



6. ábra. A lenyomatok frissen és 24 óra elteltével

Ez azt mutatja, hogy a próbatestek teljes mélységéig képesek behatolni a baktériumok és a tápanyag. Feltehető azonban, hogy a hengerek kettéhasítását követően a felületek kiegyenlítése átporozta a minta felületét, szétterítve a baktériumokat a teljes metszeti síkon. Ezáltal lehetséges, hogy a harmadik vizsgálat az előző kettővel ellentétes eredményt mutat.

5 ÉRTÉKELÉS

A francia kutatócsoport műemléki kőanyagokon in-situ alkalmazásnál nem vizsgálta a kőzetfizikai, tömegösszetételei és hidrotechnikai tulajdonságokat. A mi célunk a biomineralizáció hatását ezeken igazolni. A kísérlet egyik törekvése volt, hogy – elsősorban a nyomószilárdsági tesztek számára – teljes térfogatában kezelt próbatesteket állítsunk elő. Ezt a célt, figyelembe véve a 3.4. pont eredményeit, nem sikerült elérni. Ennek megfelelően a töréstesztek során olyan inhomogén mészkőhengereket vizsgáltunk, melyeknél a biolerakódás szilárdító hatása a belső magban nem érvényesült. Ehhez járultak az esetenként igen nagy, egy tömbön belüli szórásértékek, melyek a kőzet inhomogenitásaira (kívülről nem látható belső repedés, üreg, nagyobb bioklaszt) vezethetőek vissza.

Fontos megjegyezni azonban, hogy a mért határszilárdságok értékei párhuzamot mutatnak a szöveti szerkezettel. A tömöttebb, ooidos szerkezetű próbatestek (I. csoport) nagyobb értékeket értek el, mint a bioklasztos, durvább mészkövek (II. és IV. csoport). Emellett összefüggés fedezhető fel a testsűrűség és a szilárdság megváltozásai között is. A csoportok értékelésénél a legkisebb, közepes és legnagyobb testsűrűség-növekedéshez sorrendileg ugyanilyen mértékű határfeszültség-növekedések tartoznak (**7. táblázat.**). A nagy szórásértékek és szerkezeti hibák elkerülése, és ezáltal a jobb értékelhetőség érdekében fontos, hogy a kísérletet azonos testsűrűségű és szerkezetű (például habarcs), valamint nagyobb darabszámú próbatesten is elvégezzük. Ezen felül a kísérletet érdemes lenne fagyás-olvadási- és sókikristályosodási ciklikus tesztekkel kiegészíteni.

7. táblázat. Változások a határfeszültségben és testsűrűségben

Csoport jele	Határszil. változása [%]	Testsűrűség változása [%]
I.	13,74	0,31
II.	11,81	0,22
IV.	7,99	0,2

A vízfelvétel és kapillárisemelkedés értékei, illetve intenzitása jól láthatóan csökkentek, tehát a biomineralizálás útján kezelt durva mészkövek várhatóan kevésbé lesznek kitéve a fagyás-olvadásnak és a sókivirágzás okozta károsodásoknak. Ezeket az értékeket azonban célszerű lenne összevetni a hagyományos, tehát inorganikus eredetű kezelőszerek eredményezte értékekkel. Azokkal összefüggésben jobban értékelhető lenne, hogy az eljárás miben, és mennyiben versenyképes a létező termékekkel és technológiákkal szemben.

6 ÖSSZEFOGLALÁS

A kísérlet során a Calcite Bioconcept cég által rendelkezésünkre bocsátott kezelőszert és eljárást alkalmaztuk sóskúti durvamészke próbatesteken in-situ. A mérések során igazoltuk, hogy a biomineralizáció lejátszódott, és ez változásokat okozott a próbatestek tömegösszetételei tulajdonságaiban. Ennek megfelelően a vízfelvételi tulajdonságok és a határfeszültségek is kedvező irányban módosultak.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A munka szakmai tartalma kapcsolódik a "Minőségorientált, összehangolt oktatási és K+F+I stratégia, valamint működési modell kidolgozása a Műegyetemen" c. projekt szakmai célkitűzéseinek megvalósításához. A projekt megvalósítását az Új Széchenyi Terv TÁMOP-4.2.1/B-09/1/KMR-2010-0002 programja támogatja. A segítőképzés konzultációért és a vitás kérdések tisztázásáért szeretnék köszönetet mondani Willem de Muycknak (Ghent University) és Jean-Francois Loubiérenak (Calicte Bioconcept). A kísérlet biotechnológiai vonatkozású részében való aktív segítségért Dr. Suhajda Ágnesnek (BME-VBK), a pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálatok lehetővé tételéért pedig Dr. Koczka Bélának (BME-VBK). A helyszíni kivitelezésben nagy segítségemre volt Kapcsos Ádám egyetemi hallgató (BME-ÉMK). Szeretném megköszönni a Calcite Bioconcept cégnek, hogy kezelőszertüket és eljárásukat a rendelkezésünkre bocsátották. A mérőkeret rendelkezésre bocsátásáért szeretném megköszönni Dr. Weidinger Tamás (ELTE-Meteorológiai Tanszék) közbenjárását.

HIVATKOZÁSOK

- Adolphe, J.P., Loubièvre, J.F., Paradas, J., Soleilhavoup, F., 1990. Procédé de traitement biologique d'une surface artificielle. European patent 90400G97.0. (after French patent 8903517, 1989).
- Calcite Bioconcept. 2011. Conseils d'utilisation. A Calcite Bioconcept által küldött kezelési utasítás, és konzultáció elektronikus levelezés útján J-F Loubiérrel
- Castanier, S., Le Métayer-Levrel, G., Perthuisot, J-P. 1999. Ca-carbonates precipitation and limestone genesis – the microbiogeologist point of view. *Sedimentary Geology* **126**: 9–23.
- De Muynck, W., De Belie, N., Verstraeteb, W., 2010. Microbial carbonate precipitation in construction materials: A review. *Ecological Engineering* **36**: 118–136.
- Jonkers, H.M., Thijssen, A., Copuroglu, O., Schlangen, E., 2008. Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete. Proc. of First International Conference on BioGeoCivil Engineering, Delft, Hollandia, 25.
- Johnson, K. M., Nelson, C. L., Busta, F. F. 1983. Influence of temperature on germination and growth of emetic and diarrheal strains of *Bacillus cereus* in a broth medium and in rice. *Journal of Food Science* **48**(1): 286–287.
- Le Metayer-Levrel, G., Castanier, S., Oriol, G., Loubiere, J.F., Perthuisot, J.P., 1999. Applications of bacterial carbonatogenesis to the protection and regeneration of limestones in buildings and historic patrimony. *Sedimentary Geology* **126**(1–4): 25–34.
- MERCK 2005. *Cereus Selective Agar Base* acc. To MOSSEL – Mannitol-Egg-yolk-Polymyxine-Agar (M.Y.P.-Agar), Kat. szám 1.05267.0500 (500g) *Mikrobiológiai kézikönyv*
- MSZ EN 1926 szabvány. 2007
- Országos Meteorológiai Szolgálat (OMSZ) mérőállomásának honlapja – a napi diagramok alapján; <http://nimbus.elte.hu/varosklima/> (2012.01.17.-én érvényes verzió)
- Török Á. 2007. *Geológia mérnököknek*. Műegyetemi Kiadó, Budapest. 383p.