

# építőanyag

A Szilikátipari Tudományos Egyesület lapja

Journal of Silicate Based and Composite Materials

## A TARTALOMBÓL:

- Mathematical analysis of capillary elevation in porous limestone
- Static hardness testing of porous building materials
- Typical problems in push-rod dilatometry analysis
- Ásványtani és mechanikai elváltozások egy vörösiszap-tározó gátanyagában
- The effects of mineralogical and petrographical features of the Lake District rocks (Isparta, Turkey) on the quality of artificial marbles
- Betonszerkezetek korrózió-állóságának biztosítása innovatív szálerősítésű polimer (FRP) anyagokkal

2013/1

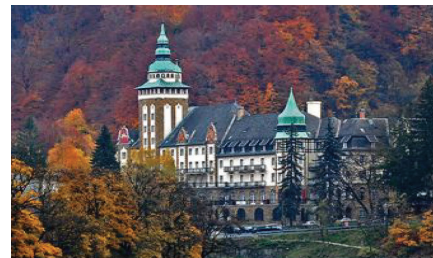




# ic-rmm1

1<sup>ST</sup> INTERNATIONAL CONFERENCE ON RHEOLOGY  
AND MODELING OF MATERIALS  
in Miskolc-Lillafüred, Hungary, 7-11 October, 2013.

**Welcome to ic-rmm1** We are pleased to announce the organization of the 1<sup>ST</sup> INTERNATIONAL CONFERENCE ON RHEOLOGY AND MODELING OF MATERIALS to be held near city **Miskolc** in mountain **Bükk** in one of the most beautiful places of **Hungary** in **Hunguest Hotel Palota Lillafüred, October 7-11, 2013**. The idea to organize in Hungary the **1<sup>st</sup> International Conference on Rheology and Modeling of Materials** we have received from prospective scientists, physicists, chemists, mathematicians and engineers from Asia, Europe, North and South America including China, India, Japan, Korea, Russia, Turkey, Estonia, France, Italy, United Kingdom, Chile, Mexico, USA. As organizers we hope that you will attend on **ic-rmm1** and we are looking forward to welcome you on this international conference in **Miskolc-Lillafüred, Hungary**. Event **ic-rmm1** is sponsored by several universities, scientific journals, societies and organizations around the World.



**The objectives** The **aims** of the **1<sup>st</sup> International Conference on Rheology and Modeling of Materials** are the fostering of interdisciplinary collaboration and interaction among scientists, researchers, PhD students as well as product and technology developer engineers. The international conference **ic-rmm1** provides a platform among leading international scientists, physicists, chemists, mathematicians, researchers, PhD students and engineers for discussing recent achievements in measurement, modeling and application of rheology in materials technology and materials science of liquids, melts, solids, powders, crystals and amorphous structures.

Among the major fields of interest are the influences of temperature, mechanical stresses, deformation speeds and times on rheological properties, material structures and phase transformation of foams, emulsions, suspensions, liquids, powders, crystals, foods, cosmetics, polymers, plastics, petrochemicals, melted metals, glass and competitive materials like nanomaterials, pharmaceuticals, medical- and biomaterials, ceramics, films and coatings, advanced metal alloys, composites, hetero-modulus, hetero-plastic and hetero-viscous complex material systems, hybrid materials, ... etc.

Multidisciplinary applications of rheology as well as mechanical and rheological modeling in material science and technology encountered in sectors like food, bio- and medical materials, ceramics, glass, thin films, polymers, clays, construction materials, energy, aerospace, automotive and marine industry. Rheology in physics, chemistry, medicine, biosciences, cosmetics, environmental and earth sciences and in engineering and industries are of particular interests.

Further information can be obtained from Prof. Dr. László A. Gömze by e-mail [femgomze@uni-miskolc.hu](mailto:femgomze@uni-miskolc.hu)



## Csepeli Papírcsőgyár Kft.

A zsalucső az építőipar speciális elvárásainak  
megfelelően kifejlesztett papírcső.

- A könnyebb kezelhetőség érdekében a zsalucsövek felületét hidrofób (víztaszító) bevonattal lehet ellátni.
- A kellően tömörített beton oszlop a zsalucső eltávolítása után szép, szabályos felületű sima henger.
- Beltéri alkalmazás esetén a zsalucső felülete szépen kasírozható, tapétázható.
- Belső zsalucső: monolit födémbe fektetett papírcső. Alkalmazásával könnyebb lesz a födém és kisebb teherbírású falat lehet alkalmazni. A semleges zónába papírcső beépítésére kerül sor, ezzel önsúlynövekedés nélkül, erőkarnöveléssel nagyobb lehetőség nyílik a monolit feszítáv növelésére, akár 12-13 méterig.
- Gyártható méretek: 152 / 180 / 215/ 250 / 280 mm belső átmérő.

1211 Budapest, Mansfeld Péter u. 27.

Tel.: +36 1/278-1010 • Fax: +36 1/278-1017

E-mail: [info@papircso.hu](mailto:info@papircso.hu)

**WWW.PAPIRCISO.HU**

### TARTALOM

- 2** A kapillaris vízfelszívás matematikai modellezése durva mészkő esetén  
JUHÁSZ Péter ■ BÉLA Szilvia ■ KOPECSKÓ Katalin
- 6** Porózus kőszerű építőanyagok statikus keménységvizsgálata  
SZILÁGYI Katalin ■ BOROSNYÓI Adorján ■ GYURKÓ Zoltán
- 11** Jellegzetes problémák nyomórudas dilatόμεteres vizsgálatnál  
Miroslav JANKULA ■ Peter ŠÍN  
Rudolf PODOBA ■ Ján ONDRUŠKA
- 15** Ásványtani és mechanikai elváltozások egy vörösiszap-tározó gátanyagában  
FÜGEDI Ubul ■ KALMÁR János
- 21** A Lake District kőzetek (Isparta, Törökország) ásványtani és kőzettani jellegzetességeinek hatása mesterséges márványok minőségére  
Ali BILGIN ■ Gurkan YUCETURK ■ Sonmez ARSLAN  
Nursev BILGIN ■ Suleyman POLAT
- 25** Folyóiratszemle
- 26** Betonszerkezetek korrózióállóságának biztosítása innovatív, szálerősítésű polimer (FRP) anyagokkal  
BOROSNYÓI Adorján

### CONTENT

- 2** Mathematical analysis of capillary elevation in porous limestone  
Péter JUHÁSZ ■ Szilvia BÉLA ■ Katalin KOPECSKÓ
- 6** Static hardness testing of porous mineral-based building materials  
Katalin SZILÁGYI ■ Adorján BOROSNYÓI ■ Zoltán GYURKÓ
- 11** Typical problems in push-rod dilatometry analysis  
Miroslav JANKULA ■ Peter ŠÍN  
Rudolf PODOBA ■ Ján ONDRUŠKA
- 15** Mineralogical and mechanical transformations in the bulk of a red mud tailing dam  
Ubul FÜGEDI ■ János KALMÁR
- 21** The effects of mineralogical and petrographical features of the Lake District rocks (Isparta, Turkey) on the quality of artificial marbles  
Ali BILGIN ■ Gurkan YUCETURK ■ Sonmez ARSLAN  
Nursev BILGIN ■ Suleyman POLAT
- 25** Journal review
- 26** Corrosion resistant concrete structures with innovative Fibre Reinforced Polymer (FRP) materials  
Adorján BOROSNYÓI

**A finomkerámia-, üveg-, cement-, mész-, beton-, téglá- és cserép-, kő- és kavics-, tűzállóanyag-, szigetelőanyag-iparágak szakmai lapja**  
**Scientific journal of ceramics, glass, cement, concrete, clay products, stone and gravel, insulating and fireproof materials and composites**

#### SZERKESZTŐBIZOTTSÁG • EDITORIAL BOARD

Prof. Dr. GÖMZE A. László – elnök/president  
Dr. BOROSNYÓI Adorján – főszerkesztő/editor-in-chief  
WOJNÁROVITSNÉ DR. HRAPKA Ilona – örökös tiszteletbeli felelős szerkesztő/senior editor-in-chief  
TÓTH-ASZTALOS Réka – tervezőszerkesztő/design editor

#### ROVATVEZETŐK • COLUMNISTS

Anyagtudomány • Materials science – Prof. Dr. SZÉPVÖLGYI János  
Anyagtechnológia • Materials technology – Dr. KOVÁCS Kristóf  
Környezetvédelem • Environmental protection – Prof. Dr. CSÓKE Barnabás  
Energiaigazdálkodás • Energetics – Prof. Dr. SZŰCS István  
Hulladékhasznosítás • Recycling - waste recovery – BOCSKAY Balázs  
Építőanyag-ipar • Building materials industry – Prof. Dr. TAMÁS Ferenc

#### TAGOK • MEMBERS

Prof. Dr. Parvin ALIZADEH, Prof. Dr. Katherine T. FABER, Prof. Dr. David HUI, Prof. Dr. GÁLÓS Miklós, Prof. Dr. Kozo ISHIZAKI, Dr. JÓZSA Zsuzsanna, KÁRPÁTI László, Dr. KOCSERHA István, Prof. Dr. Sergey N. KULKOV, MATTYASOVSKY ZSOLNAY Eszter, Dr. MUCSI Gábor, Prof. Dr. OPOCZKY Ludmilla, Dr. PÁLVÖLGYI Tamás, Dr. RÉVAY Miklós, Prof. Dr. Tomasz SADOWSKI, Prof. Dr. David S. SMITH

#### TANÁCSADÓ TESTÜLET • ADVISORY BOARD

FINTA Ferenc, KISS Róbert, Dr. MIZSER János

#### A folyóiratot referálja:

Cambridge Scientific Abstracts, ProQuest.  
A szakmai rovatokban lektorált cikkek jelennek meg.  
Kiadja a Szilikátipari Tudományos Egyesület  
1034 Budapest, Bécsi út 122–124.  
Telefon és fax: +36-1/201-9360  
E-mail: epitoanyag@szte.org.hu  
Felelős kiadó: ASZTALOS István SZTE ELNÖK  
Tördelőszerkesztő: NÉMETH Hajnalka

Címlapfotó/Cover photo by Ian SANE

Egy szám ára: 1250 Ft  
A lap az SZTE tagok számára ingyenes.

Belföldi terjesztés: SZTE  
Külföldi terjesztés: BATTHYANY KULTUR-PRESS KFT.

#### HIRDETÉSI ÁRAK 2013 / ADVERTISING RATES 2013:

B2 borító színes / cover colour	76 000 Ft	304 EUR
B3 borító színes / cover colour	70 000 Ft	280 EUR
B4 borító színes / cover colour	85 000 Ft	340 EUR
1/1 oldal színes / page colour	64 000 Ft	256 EUR
1/1 oldal fekete-fehér / page b&w	32 000 Ft	128 EUR
1/2 oldal színes / page colour	32 000 Ft	128 EUR
1/2 oldal fekete-fehér / page b&w	16 000 Ft	64 EUR
1/4 oldal színes / page colour	16 000 Ft	64 EUR
1/4 oldal fekete-fehér / page b&w	8 000 Ft	32 EUR

Az árak az áfát nem tartalmazzák. / Without VAT.  
Az előfizetési és hirdetési megrendelő letölthető a folyóirat honlapjáról.

Order-forms for subscription and advertisement are available on the website of the journal.

WWW.EPITOANYAG.ORG.HU

HU ISSN 00 13-970x INDEX: 2 52 50 • 65 (2013) 1–32

#### A SZILIKÁTIPARI TUDOMÁNYOS EGYESÜLET

##### TÁMOGATÓ TAGVÁLLALATAI

3B Hungária Kft. ■ Air Liquide Kft. ■ Anzo Kft.  
Baranya Téglá Kft. ■ Berényi Téglaiipari Kft.  
Budai Téglá Zrt. ■ Budapest Kerámia Kft. ■ Cemcut Kft.  
Cerlux Kft. ■ Colas-Északkó Kft. ■ Electro-Coord Kft.  
Fátyolüveg Kft. ■ G&B Elastomer Kft. ■ GE Hungary Zrt.  
Geoteam Kft. ■ Guardian Orosháza Kft. ■ Hunext Kft.  
Interkerám Kft. ■ KK Kavics Beton Kft. ■ KÓKA Kft.  
Kötés Kft. ■ KTI Kft. ■ Kvarc-Ásvány Kft.  
Lambda Systeme Kft. ■ Libál Lajos ■ Lighttech Kft.  
Maltha Hungary Kft. ■ Messer Hungarogáz Kft.  
MFL Hungária Kft. ■ Mineralholding Kft.  
MTA KK AKI O-I Manufacturing Magyarország Kft.  
OMYA Kft. ■ Pápateszéri Tégl. Kft. ■ Perlit-92 Kft. ■ Q&L Bt.  
RATH Hungária Kft. ■ Rockwool Hungary Kft.  
Speciál Bau Kft. ■ Szema Makó Kft. ■ SZIKKTI Labor Kft.  
WITEG Kőporc Kft. ■ Zalakerámia Zrt.



# Mathematical analysis of capillary elevation in porous limestone

**PÉTER JUHÁSZ** ■ Department of Construction Materials and Engineering Geology, Faculty of Civil Eng. BME ■ juhasz.p@eik.bme.hu

**SZILVIA BÉLA** ■ Department of Geometry, Institute of Mathematics, BME ■ belus@math.bme.hu

**KATALIN KOPECSKÓ** ■ Department of Construction Materials and Engineering Geology, Faculty of Civil Eng. BME ■ katalin@eik.bme.hu

Received: 09. 06. 2013. ■ Érkezett: 2013. 06. 09. ■ <http://dx.doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2013.1>

## Abstract

Absorption and transport of water in porous stone materials is an important issue, since it is often related to the durability and deterioration of the material. Traditional standardized tests are aimed to determine the rate of absorption or water-permeability by measuring the weight or volume of absorbed water through a given surface area with time. Nevertheless, in situations like wetting of stone or brick walls not only the quantity of the absorption is important, but also the maximum height and velocity of the water-front elevation should be considered. In present paper the relationship between the velocity of capillary elevation and height of capillary elevation is studied. The aim of the analysis was to find an equation which characterizes the measured absorption process adequately. Three types of power functions were used to approximate the velocity of the water-front elevation. These approximating functions were computed for 13 measurements made with porous limestone, and the accuracy of the approximations was evaluated. It was found, that equations in the form of  $v_{(h)} = c/h + d$  can be fitted to the measured data with high accuracy, and the possible range of the  $c$  coefficient was determined for porous limestone.

Keywords: capillary elevation, approximating function, velocity of capillary elevation, porous limestone

## 1. Introduction

Rate and intensity of capillary suction are important characteristics of porous stone materials, since momentary and local rate of saturation, as well as water-content are depending on these characteristics. Moreover, both the rate of saturation and the water-content has an effect on strength, load-bearing capacity and durability of the porous material [1]. Therefore, characteristics such as water permeability are often measured and evaluated in the geological and engineering practice [2].

In air-dry condition the most important factors which determine the rate of water-absorption are the apparent porosity and the pore structure, i.e. the pore size-distribution of the material. There are three main directions of water transport according to the orientation of the movement related to the influence of the gravity force: horizontal, vertical downward and vertical upward directions. In case of the horizontal water transport (such as horizontal underground sand layers surrounded by watertight clay layers) the effect of gravity can be ruled out. In case of the vertical downward water transport, absorption is enhanced by the gravity; on the other hand vertical upward water transport is hindered by the gravity force.

Vertical upward water transport is usually referred to as capillary elevation or capillary suction. The most important effects of capillary elevation on the construction materials and structures are related to the water and the solved components introduced into the stone by the water. Porous materials that became saturated or partly saturated with water by the capillary elevation will be exposed to deterioration due to freezing-thawing. When crystal-forming chemicals (salts) are introduced into the material, pressure by the forming of crystals might also deteriorate the material when it dries out.

Moreover, wetting of the foundation of a building due to the water absorbed from the soil often leads to the deterioration and loss of strength. Furthermore, continuous wetting of construction materials initiates biocolonisation by fungi.

Nevertheless, the theoretical background of the mathematical modelling of flow in porous media is well founded [3], according to the literature there are hardly any measurements on the evaluation of the capillary elevation process. In our research we evaluated the capillary elevation characteristics. The velocity of elevation and its dependence on the momentary height of elevation was evaluated by using data obtained from a capillary elevation test that was performed on porous limestone specimens.

The aim of this study was to set up an equation based on empirical data, which describes well the capillary elevation process up to the equilibrium condition. Furthermore, after finding the general form of the best fitting equation for the measured values, we determined the range of coefficients that are typical for porous limestone. Accuracy of the fitting was determined, as well.

## 2. Materials and methods

### 2.1. Stone material and preparation of the samples

Porous limestone was used in present experiments. The origin of the limestone is the Sós-kút quarry in Hungary. Sós-kút

**Péter JUHÁSZ**

(1985) architect (MSc, 2010). Graduated in 2010, at the Department of Construction Technology and Management, of the Budapest University of Technology and Economics. Started his research work in 2007 in the field of heritage conservation management. In 2006 and 2009 he received traineeship at the National Office of Cultural Heritage. Since 2010, he has been PhD student at the Budapest University of Technology and Economics, Department of Construction Materials and Engineering Geology. His field of research is biomineralization of porous stone materials.

**Szilvia BÉLA**

(1983) mathematician (PhD, 2011). Completed her MSc studies in mathematics in the field of geometry at the Faculty of Natural Sciences of Budapest University of Technology and Economics in 2007. Completed her Phd studies at the Department of Applied Geometry, Johannes Kepler University, Linz, Austria. She has been assistant professor at the Department of Geometry, Institute of Mathematics, Budapest University of Technology and Economics since 2012. Her field of research is applied and computational geometry, modelling, CAGD.

**Katalin KOPECSKÓ**

(1961) chemical engineer (PhD, 2000) associate professor at the Budapest University of Technology and Economics, Department of Construction Materials and Engineering Geology. Graduated in chemical engineering (1990) and has postgraduate studies in concrete technology (2004). Her fields of research are: deterioration processes of construction materials, durability of concrete and other materials, hydration of cement, diagnostics of historical buildings and ornamental stones, mineralogical properties of stones and soils, studies of physical and chemical changes by XRD and TG/DTG/DTA.

limestone has an oolitic-bioclastic fabric, which is highly porous, up to 40 v/v%. Altogether 13 cylindrical specimens were drilled out of blocks, with radius of  $36.84 \pm 0.07\%$  mm and height of  $89.8 \pm 0.78\%$  mm. Apparent density, real density and total porosity of the specimens were measured according to the MSZ EN 1936:2007 standard 'Natural stone test methods. Determination of real density and apparent density and of total and open porosity'. Apparent porosity was calculated by dividing the volume of the absorbed water with the volume of the specimen at the atmospheric water saturated condition. Measurements were carried out under 24.5 °C.

## 2.2. Capillary elevation test

Capillary elevation test was performed in vertical position by hanging the specimens on a hook of an Archimedes-balance (see Fig. 1). Two rulers with millimeter scale were mounted on the two sides of the specimens, along their length. This was necessary since the water-front of the absorption seldom raises parallel to the plane of the water surface. However, in case of a cylinder, average elevation height is the mean value of the two elevation heights measured on the two sides of the specimen. Capillary suction was initiated by pouring water into a bowl under the hanged specimen until it reached the bottom of the cylinder. Continuous water supply was either ensured by the layer of water attached to the bottom of the specimen due to surface tension linking the surface of water to the specimen. Moreover, sinking of the specimen hanged on the balance followed the decreasing water level. Surfaces of the cylinders were not protected against evaporation, since the gap between the wrapping material and the surface of the specimen could have acted as a macro pore, influencing the measurement.

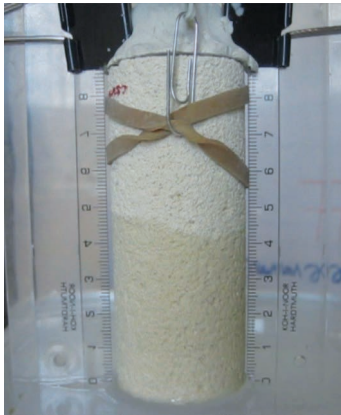


Fig. 1. Testing setup for the capillary elevation measurement  
1. ábra Kapilláris vízfelszívás vizsgálati elrendezése

The process was recorded to video by means of a digital camera (in 640×480 pixels resolution) until the water-front reached the top of the specimen. Momentary elevation heights were determined by the video recordings, and momentary velocities of capillary suction were calculated and evaluated in function of the elevation height. During the tests the measured values were the elevation height ( $h$  in mm) of the water-front in the limestone and the velocity of the water-front ( $v$  in mm/s). The measurements were taken about 30-40 times in different heights along the length of each limestone sample.

Elevation heights in time were read from the videos with an accuracy of 0.5 mm. Instants of the readings were dependent on the clear visibility of the edges of the water-front on the cylinder in the video.

According to the evaluation of previous measurements it was realized that the process of the capillary elevation in a complex pore-system can be described with a function.

## 2.3. Mathematical analysis of the measured data

In order to analyze the data ( $v$  and  $h$ ) obtained from the measurements, a guiding principle was the equation of the fluid front velocity in a capillary pore with given radius [4]:

$$v(h) = \frac{r^2}{8\eta h} \left( \frac{2\delta \cdot \cos\theta}{r} - g\rho h \right) \quad (1)$$

Here the radius of the capillary pore is denoted by  $r$ . The values of  $\eta$ ,  $\delta$  and  $\theta$  depend on the temperature of the fluid. The acceleration of gravity is given by  $g$  and the density of the fluid is  $\rho$ . Eq. (1) is derived from the Navier-Stokes equation, by considering vertical upward direction of the flow [5]. The equation also shows that the velocity and the height of the liquid front are in inverse proportionality, namely

$$v(h) = \frac{c}{h} + d,$$

where

$$c = \frac{r \cdot \delta \cdot \cos\theta}{4\eta}, \quad \text{and} \quad d = -\frac{r^2 g\rho}{8\eta}.$$

The measured data of the 13 different limestone samples were analyzed first with the help of commercial spreadsheet software. We have approximated each data set using a power function estimate, which is given in the general form of

$$v(h) = \frac{c}{h^\alpha}. \quad (2)$$

The approximating functions were generated with different  $c$  coefficients in the range of 15 to 48. The exponent  $\alpha$  was chosen in the range of 0.979 to 1.186. From the values of the exponent it is realized that the approximated velocity function behaves similarly as in Eq. (1) – in the case of capillary pore with given radius. Therefore, the further velocity approximating functions were computed with a similar form like that of Eq. (1). We generated two different approximation functions for the measured velocity of each limestone sample with using the program package of Wolfram Mathematica 8.

The first approximating function was given in the form of

$$v(h) = \frac{c}{h}, \quad (3)$$

where the value of the coefficient  $c$  was computed with the least squares method. The values were in the range of 16 to 25, they had a smaller deviation than the coefficients computed by the previous approximations.

According to the velocity equation for capillary pore with given radius Eq. (1), a second approximating velocity function was computed for each measurement. This function was searched in the form of

$$v(h) = \frac{c}{h} + d, \quad (4)$$

where the value of the coefficients  $c$ ,  $d$  were assigned by the least squares method.

After setting up the equations in the form of Eqs. (3) and (4), coefficients  $c$  and  $d$  were compared with those calculated from Eq. (1) in order to see if any equation belonging to one discrete pore-size can describe the elevation process. Moreover, coefficient  $c$  obtained from Eqs. (2), (3) and (4), as well as the accuracy of the approximation were also compared with each other in order to determine the best fitting form of equation.

### 3. Results and discussion

#### 3.1. Mass properties of the limestone specimens

Dry masses of the specimens were measured, and by dividing them with the volumes, mass densities were calculated to be  $1.56 \pm 0.45\%$  g/cm<sup>3</sup>. Real density of the limestone was measured to be  $2.69 \pm 0.89\%$  g/cm<sup>3</sup>, and the total porosity was calculated to be  $0.42 \pm 0.62\%$ . Apparent porosity of the specimens was calculated to be  $0.325 \pm 1.90\%$  corresponding to the atmospheric water saturated condition.

#### 3.2. Capillary elevation test

The specimens showed similar behaviour during the capillary elevation tests. The curves fitted to the measured points by commercial spreadsheet software were found to be very similar. Differences in the slopes of the curves can be contributed to the fact that porous limestone is not homogenous in its structure. This leads to local acceleration or slowdown in the capillary elevation along the specimen.

#### 3.3. Mathematical analysis of the measured data

The values of coefficient  $c$  for the three different approximating functions corresponding to each measurement data are compared in Fig. 2. It can be seen, that coefficient  $c$  was found in a wide range (13 to 47), when they were calculated by the in-built module of the commercial spreadsheet software in form of Eq. (2). The smallest deviation of the coefficient  $c$  was obtained by the approximating function of Eq. (3). However, the deviation of the coefficient  $c$  was larger in the case of Eq. (4) (between 15 and 31), the approximation of the measured data was improved compared to the results provided by Eq. (3).

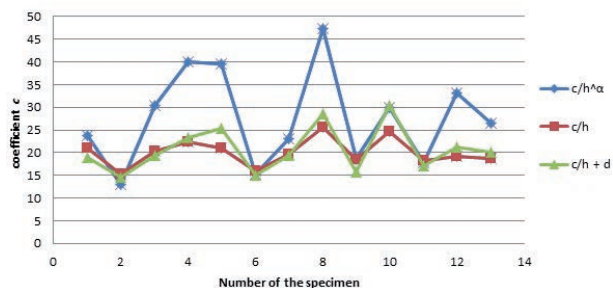


Fig. 2. Comparison of coefficient  $c$  in the approximated velocity functions  
 2. ábra A c együttható összehasonlítása a sebesség becsülő függvényekben

In case of the approximation given by Eq. (4), the constant  $d$  was chosen from a small range starting from -0.08 up to 0.06 computed by the least squares algorithm. These values are partly in line with Eq. (1), where the coefficient  $d$  is below zero. Physical explanation of this effect is that above a certain height the pores cannot retain the water, thus it starts to sink.

Consequently, the sign of the velocity of the capillary elevation turns to be negative. This occurs above a certain height, where the ratio  $-c/h$  is equal to coefficient  $d$ . Therefore, in practice coefficient  $d$  is expected to be negative, otherwise the velocity of the capillary elevation would not turn to be zero.

In Fig. 3. the approximation of the measured values are shown for sample No.13. The functions are generated either by Eq. (3), or by Eq. (4).

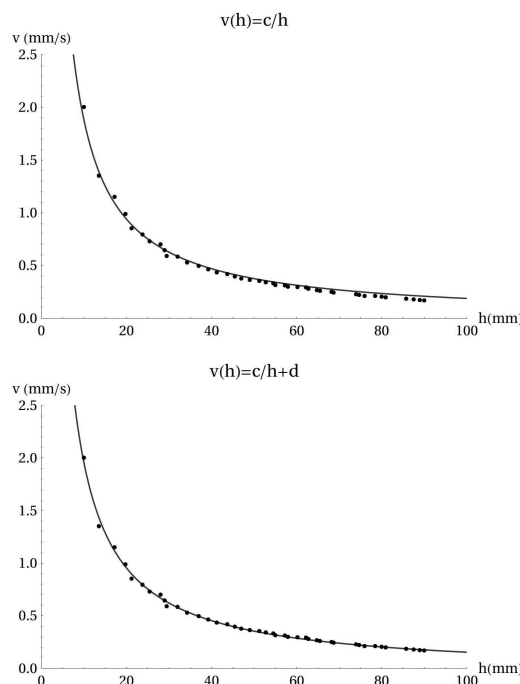


Fig.3. Approximated velocity functions for limestone sample No.13.  
 a) By Eq. (3) the function is  $v=18.7674/h$  and the coefficient of correlation is 0.99128  
 b) By Eq. (4) the function is  $v=19.9934/h-0.047$  and the coefficient of correlation is 0.9968  
 3. ábra A 13. sz. mészkő minta becsült sebesség függvényei  
 a) A (3) képlet szerint  $v=18.7674/h$  és a korrelációs együttható 0.99128  
 b) A (4) képlet szerint  $v=19.9934/h-0.047$  és a korrelációs együttható 0.9968

	Eq. (2)	Eq. (3)	Eq. (4)
No. of specimen	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup>
1	0.9834	0.95812	0.97351
2	0.9875	0.97357	0.97775
3	0.9767	0.96532	0.96780
4	0.9881	0.98056	0.98308
5	0.9963	0.94031	0.97820
6	0.9954	0.98171	0.98917
7	0.9914	0.98781	0.98789
8	0.9946	0.98217	0.99758
9	0.9858	0.90627	0.95067
10	0.9921	0.94311	0.99016
11	0.9884	0.96101	0.96961
12	0.9975	0.98451	0.99752
13	0.9963	0.99128	0.99688

Table 1. Coefficients of correlation (R<sup>2</sup>) by fitting the approximating functions given in Eqs. (2) to (4).

1. táblázat A (2)–(4) képletek szerint becsült függvények korrelációs együtthatói (R<sup>2</sup>)



Coefficients of correlation ( $R^2$ ) of the fitting by the three different formulae are given in *Table 1*. It can be seen, that the approximation by the function covering coefficient  $d$  enhances the correlation of the fitted function.

From the measurements and calculations it was realized, that capillary elevation in complex pore-systems cannot be described with an equivalent pore-size diameter belonging to one discrete pore-size, as it could be described by Eq. (1). The coefficients  $c$  and  $d$  in Eq. (4) are chosen from a different range than for velocity functions by Eq. (1) for equivalent pore size. However, the general form of the function is the same in Eqs. (1), (3) and (4).

#### 4. Conclusions

It was found, that equations in the form of  $v_{(h)} = c/h + d$  can be fitted on the measured ( $v;h$ ) points with high accuracy. For this form of equation, the possible range of the  $c$  coefficient was calculated to be between 14.5 and 30.43 for the porous limestone of Sós-kút. Coefficient  $d$  was found in the range of -0.08 to 0.06. If the level of the source of water (where  $h=0$ ) can be measured or estimated, then the velocity of the capillary elevation can be calculated for different heights in practice with the help of the proposed equation and the coefficient  $c$ . For the calculation of the maximum height of capillary elevation at the equilibrium point a coefficient  $d$  smaller than zero should be chosen. The model can be used for structural elements endangered by salt attack or freezing-thawing.

It can be realized from the measurements and calculations that capillary elevation in complex pore-systems cannot be described with an equivalent pore-size diameter belonging to one discrete pore-size. Approximation of the pore-size distribution based on the data obtained from the capillary suction test is aim of our future research. Further aim is the empirical determination of the velocity of capillary suction into the horizontal and vertical downward directions in porous stone materials.

#### 5. Acknowledgement

The work reported in the paper has been developed in the framework of the project „Talent care and cultivation in the scientific workshops of BME” project. This project is supported by the grant TÁMOP-4.2.2.B-10/1--2010-0009.

#### References

- [1] Török, Á. –Vásárhelyi, B.: *The influence of fabric and water content on selected rock mechanical parameters of travertine, examples from Hungary. Engineering Geology*, 2010, No. 115, pp. 237-245
- [2] Savoie, S. – Michelot, J.-L. – Matray, J.-M. – Wittebroodt, C. – Mifsud, A.: *A laboratory experiment for determining both the hydraulic and diffusive properties and the initial pore-water composition of an argillaceous rock sample: A test with the Opalinus clay (Mont Terri, Switzerland). Journal of Contaminant Hydrology*, 2012, No. 128, pp. 47-57
- [3] Szymkiewicz, A.: *Modeling Water Flow in Unsaturated Porous Media Accounting for Nonlinear Permeability and Material Heterogeneity*. Springer, 2013, 237 p.
- [4] Kríston, L.: *Basic knowledge on the restoration of plasters and stone materials (in Hungarian: A kő és vakolat restaurálás alapismeretei)*. Notes for the students of the Hungarian University of Fine Arts, Hungarian University of Fine Arts, 2000, 125 p.
- [5] Bear, J.: *Dynamics of fluids in porous media*. Dover Publications Incorporated, 1988, 764 p.

#### Ref.:

Péter Juhász – Szilvia Béla – Katalin Kopecskó: *Mathematical analysis of capillary elevation in porous limestone. Építőanyag*, 65. évf. 1. szám (2013), 2–5. p.  
<http://dx.doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2013.1>

#### A kapilláris vízfelszívás matematikai modellezése durva mészkő esetén

A porózus kőanyagok vízfelszívása és a bennük zajló transzportfolyamatok gyakran összefüggésbe hozhatóak az anyag tartósságával és tönkremenetelével. A hagyományos, szabványos vizsgálatok célja a vízfelvétel intenzitásának és a vízátteresztési képességnek a meghatározása. Ezek során az adott idő alatt felvett vagy átáramlott víz tömegét mérik. Gyakorlati szempontból azonban nemcsak a nedvességtartalom vagy a felvett víz tömegének ismerete fontos, hanem a vízfelvétel magassága és a vízfelvétel sebessége is. Jelen cikk a vízfelvétel magasságának és sebességének összefüggését vizsgálja. A vizsgálat célja egy olyan függvény meghatározása, amely kellő pontossággal leírja a kapilláris vízfelvétel sebességét. A magasságtól függő kapilláris-emelkedési sebesség értékek függvényrel történő közelítésére három különböző típusú hatványfüggvény vizsgálata történik meg. A közelítések során 13 darab hengeres mészkő próbatesten mért értékek alapján történik a függvények illesztési pontosságának elemzése. A cikk rámutat, hogy legjobban a  $v_{(h)} = c/h + d$  alakban megadott függvények írják le a kapilláris vízfelvétel sebességét, és ezekhez meghatározható a  $c$  együtthatók lehetséges érték-tartománya is durva mészkő esetére. Megállapítható, hogy a durva mészkő anyaghoz tartozó  $v_{(h)}$  függvény nem feleltethető meg egyetlen, konkrétan adott pórusmérethez tartozó  $v_{(h)}$  függvénynek sem. Ebből az következik, hogy a komplex pórus-hálózat vízfelvételi sajátságai eltérnek az egy adott pórusra jellemző vízfelvételi sajátságoktól.

Kulcsszavak: kapilláris felszívás, becslő függvény, vízfelszívás sebessége, durva mészkő

#### INTERNATIONAL CONFERENCES

- **SB13 Graz – International Conference on Sustainable Buildings “Construction Products and Technologies”**  
2013 September 25–28  
Organiser: TU Graz and ITTB  
<http://www.sb13.org/index.php/en/>
- **3<sup>rd</sup> International RILEM Workshop on Concrete Spalling due to Fire Exposure**  
2013 September 25–27  
Organiser: CSTB, TU Delft and MFPA  
<http://www.firespalling2013.fr/>
- **RILEM-fib-AFGC International Symposium on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete (UHPFRC)**  
2013 October 1–3  
Organiser: AFGC, RILEM and fib  
<http://www.afgc.asso.fr/index.php/uhpfrc2013>
- **SB13 Guimarães - Sustainable Building Contribution to Achieve the EU 20-20-20 Targets**  
2013 October 30–November 1  
Organiser: University Minho and University Lisbon  
<http://www.iisbeportugal.org/portugalsb13/pt/index.html>

# Static hardness testing of porous building materials

**KATALIN SZILÁGYI** ■ BME Department of Construction Materials and Engineering Geology  
 ■ szilagyi.k@gmail.com

**ADORJÁN BOROSNYÓI** ■ BME Department of Construction Materials and Engineering Geology  
 ■ adorjan.borosnyoi@gmail.com

**ZOLTÁN GYURKÓ** ■ BME Department of Construction Materials and Engineering Geology  
 ■ zoligyrko@gmail.com

Received: 05. 05. 2013. ■ Érkezett: 2013. 05. 05. ■ <http://dx.doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2013.2>

## Abstract

Hardness testing is considered to be the earliest method of material testing. For the measurement of hardness of stones and other porous solid materials mostly dynamic testing devices are applied in practice, however for scientific purposes indentation hardness tests are more suitable methods. In present research Brinell macro hardness tests and depth-sensing indentation (DSI) tests (aka. instrumented indentation tests, IIT) were performed on 15 different types of porous solid building materials, recording the complete loading-unloading responses. The studies have shown that earlier observations found in the literature for the Brinell hardness of concrete can be extended to all porous solid building materials.

Keywords: Brinell hardness, depth-sensing indentation test, strength, Young's modulus, porous solids

**Katalin SZILÁGYI**

Civil engineer (MSc), PhD candidate at the Department of Construction Materials and Engineering Geology, Budapest University of Technology and Economics. Main fields of interest: diagnostics of concrete structures, non-destructive testing of concrete, concrete technology, shrinkage compensation of concretes. Member of the Hungarian Group of fib, RILEM TC ISC and the SZTE Concrete Division.

**Adorján BOROSNYÓI**

Civil engineer (MSc), PhD, Associate Professor at BME Dept. of Construction Materials and Engineering Geology. Main fields of interest: cracking and deflection of reinforced concrete, application of non-metallic (FRP) reinforcements for concrete structures, bond in concrete, non-destructive testing of concrete. Secretary of the fib Task Group 4.1 „Serviceability Models” and Chairman of the SZTE Concrete Division.

**Zoltán GYURKÓ**

Civil engineer (BSc), MSc student at Budapest University of Technology and Economics. Main fields of interest: hardness of porous solid building materials, numerical modelling of concrete structures.

## 1. Introduction

In the technical literature limited number of results can be found for porous solid building materials by the Brinell method or the depth-sensing indentation method and most of the studies applied only one or two load levels trying to find a relationship between the Brinell hardness and the compressive strength of concrete. Own earlier studies [1] demonstrated that the power in the Meyer relationship [2] is apparently constant for concrete, independently of the water-cement ratio and the age at testing, while the multiplier in the Meyer relationship is very sensitive to both influencing factors. The results disproved the hypothesis of the power function relationship between the residual indentation diameter and the compressive strength of concrete with a power of -4.0 published earlier in the technical

literature. The results confirmed the existence of a linear general model for the relationship between the compressive strength and the Brinell hardness of concrete [3]. During the experiments a special observation was made that clearly illustrates the elastic-plastic behaviour of concrete under the ball indenter as well as the mechanism of local densification and the formation of cone cracking. It was found that Brinell hardness results show an apparent peak value represented as a function of the testing load (Fig. 1.a). If the hardness values are represented as a function of the residual indentation diameter then the same increasing-decreasing tendencies are resulted (Fig. 1.b). Main aim of present experiments was to analyze if the earlier findings for concrete can be extended to further porous solid building materials as well as to study the static hardness behaviour by depth-sensing indentation tests.

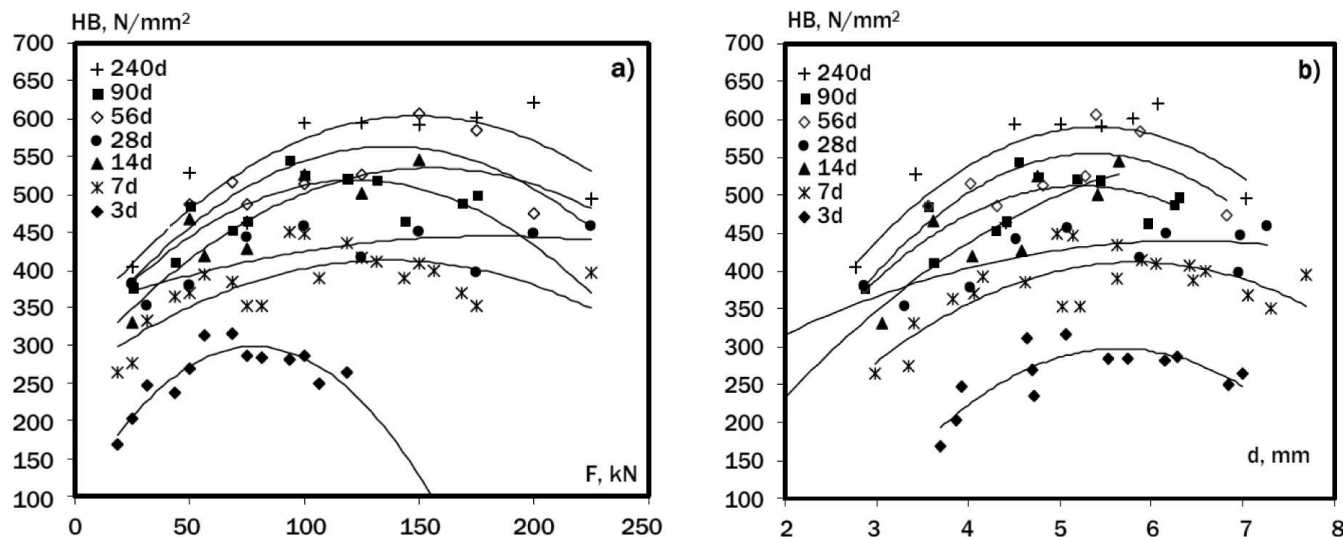


Fig. 1. The relationship of the Brinell hardness, the load and the indentation diameter  
 1. ábra A Brinell keménység, a terhelőerő és a benyomódási átmérő kapcsolata



## 2. Hardness testing with depth sensing indentation tests

The depth sensing indentation (DSI) test (aka. instrumented indentation test, IIT) is a widely used indentation test to determine the mechanical properties of materials. The DSI test has two phases (Fig. 2). During the loading period, the indenter body penetrates into the surface of the sample at a constant rate until reaching the maximum value of the load. During the unloading period, the indenter body moves away from the sample with the same rate. Elastic deformation of the material occurs during unloading and displacements are formed in the opposite direction than formed during loading. It is theoretically possible to find the elastic properties, including the Young's modulus, of materials from the unloading curve of the indentation characteristics [4]. In the literature only a few suggestions can be found for the calculation of the Young's modulus based on indentation hardness and most of them applies the Boussinesq problem expressed by Sneddon [5]. Sneddon defined the load vs. indentation depth functions for a linear elastic half-space for various types of indenter bodies.

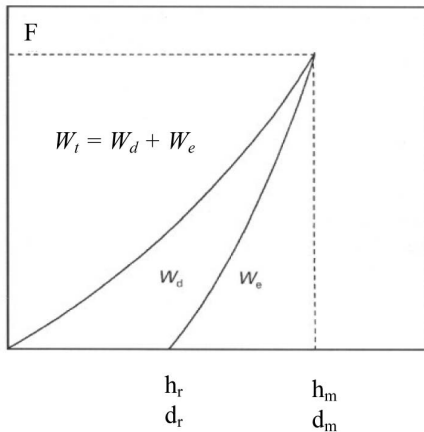


Fig. 2. Schematic relationship between the indentation depth/indentation diameter and the load

2. ábra A terhelőerő és a benyomódási mélység/benyomódási átmérő sematikus kapcsolata

The relationship between the value of  $d_r$  (residual indentation diameter) and  $h_r$  (residual indentation depth) can be written as:

$$h_r = 0,5 \cdot \left( D - \sqrt{D^2 - d_r^2} \right) \quad (1)$$

$$d_r = \sqrt{D^2 - (D - 2h_r)^2} \quad (2)$$

The area under the loading curve of Fig. 2 accounts for the work that is introduced until the maximum penetration depth is reached. This work is called total indentation work:

$$W_t = \int_0^{h_m} F_1 \cdot dh \quad (3)$$

Where  $W_t$  the total indentation work,  
 $h_m$  maximum indentation depth,  
 $F_1$  the value of the load during the loading phase.

The area under the unloading curve of Fig. 2 accounts for the amount of work that is recovered during unloading. This work is called elastic indentation work:

$$W_e = \int_{h_r}^{h_m} F_2 \cdot dh \quad (4)$$

Where  $W_e$  the elastic indentation work,  
 $h_m$  maximum indentation depth,  
 $h_r$  residual indentation depth,  
 $F_2$  the value of the load during the unloading phase.

The difference between the two works gives the dissipated energy during the test:

$$W_d = W_t - W_e \quad (5)$$

After rearrangement the following expression can be given:

$$\frac{W_d}{W_t} + \frac{W_e}{W_t} = 1 \quad (6)$$

The depth sensing indentation (DSI) test is suitable for an energy based examination of the entire loading-unloading process.

## 3. Materials selected for evaluation

Main purpose of the experiments was to provide a wide range of porous solid building materials for an extended static indentation analysis in terms of both Brinell and DSI tests to be able to confirm or disconfirm the validity of earlier findings for concrete to further porous solid materials. The investigations covered *elastic* (clinker tile and clinker brick), *elastic-plastic* (compact limestone, high strength and normal strength concrete, polymer concrete, clay brick, rhyolite tuff) and *plastic* (sandlime brick, soft limestone, aerated concrete) materials, based on their stress-strain behaviour. Three metal samples (reinforcing steel, mild steel, aluminium) were also studied as control materials.

Both indentation tests were carried out by a  $D = 10$  mm diameter hard steel indenter. Maximum loads by the Brinell tests were taken in the range of 1.5 kN to 30.0 kN and for the DSI tests were taken in the range of 0.5 kN to 30.0 kN. For comparison, rebound surface hardness measurements (Leeb- and Schmidt-type) were also carried out (results are not detailed in present paper). Compressive strength, Young's modulus, body density, apparent porosity and total porosity were also measured for all the materials tested.

## 4. Results on mechanical properties

Figs. 3 to 5 represent the uniaxial compressive strength, the Young's modulus and the theoretical sound propagation velocity of the examined materials as a function of the total porosity. The representation confirms the literature findings between mechanical properties and porosity that is usually given in power function form (as an example for the compressive strength as follows):

$$f_c = f_{c,o}(1 - p)^n \tag{7}$$

where  $p$  is the total porosity,  $f_c$  is the compressive strength,  $f_{c,o}$  is the theoretical value of the compressive strength at zero porosity, and  $n$  is a constant [6,7]. The relationship can be written in an exponential form as well:

$$f_c = f_{c,o}e^{-kp} \tag{8}$$

where  $k$  is a constant; further parameters of the formula are the same as above [8].

Results summarised in Figs. 3 to 5 demonstrate that the selection of the materials for present studies cover a wide range of performance, therefore, suitable for a general analysis.

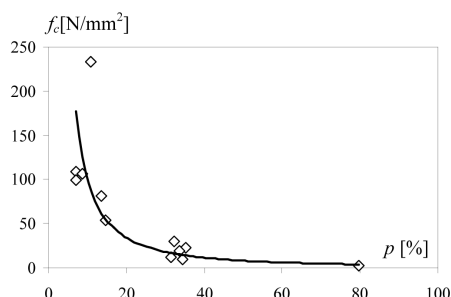


Fig. 3. Relationship of total porosity ( $p$ ) and uniaxial compressive strength ( $f_c$ )  
 3. ábra A teljes porozitás ( $p$ ) és az egytengelyű nyomószilárdság ( $f_c$ ) kapcsolata

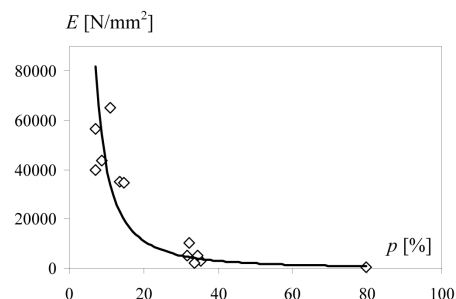


Fig. 4. Relationship of total porosity ( $p$ ) and Young's modulus ( $E$ )  
 4. ábra A teljes porozitás ( $p$ ) és a rugalmassági modulus ( $E$ ) kapcsolata

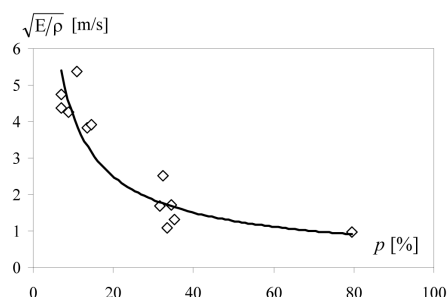


Fig. 5. Relationship of total porosity ( $p$ ) and sound propagation velocity ( $\sqrt{E/\rho}$ )  
 5. ábra A teljes porozitás ( $p$ ) és a hang terjedési sebesség ( $\sqrt{E/\rho}$ ) kapcsolata

### 5. The loading-unloading characteristics of the depth-sensing indentation test

Experimental results indicated that the elastic, elastic-plastic and plastic porous solid building materials can be distinguished easily by the indentation loading-unloading characteristics. Typical examples are shown in Figs. 6 to 9. One

can clearly realize the differences between the total and elastic indentation works represented as areas under the specific loading-unloading curves.

For the clinker tile material one can observe that the deformations are mostly elastic and both the depths and diameters of the residual indentations are approximately one order of magnitude smaller than that of the maximum indentations. The loading-unloading curve has only a limited linear part; resulting the limited residual deformation.

In the case of the elastic-plastic materials one can generally observe that the dissipating (plastic) indentation energy and the elastic indentation energy have similar magnitudes, however, the ratios are very sensitive to the actual stiffness and strength of the material. Comparing the experimental results of the compact limestone (Fig. 7) and the rhyolite tuff (Fig. 8) it can be realized that the slopes of the unloading branches of the curves as well as the ratios of the maximum and residual indentation depths/diameters sensitively follow the differences in the stiffnesses and strengths of the two elastic-plastic materials.

The soft limestone sample was found to be almost completely plastic; the residual indentation depths/diameters are almost equal to that of corresponds to the maximum load. For the plastic solids one can realize the opposite behaviour in the ratios of indentation work than that was found for the elastic solids: the elastic indentation work accounts for an almost negligible part of the total indentation work.

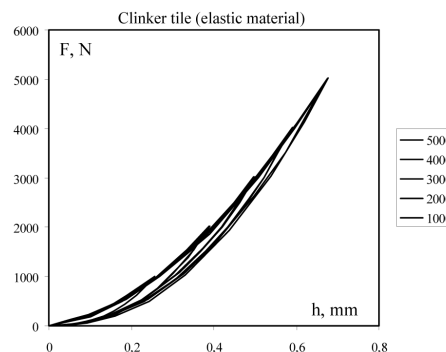


Fig. 6.a. Relationship between the indentation depth ( $h$ ) and load ( $F$ )  
 6.a ábra A benyomódási mélység ( $h$ ) és a terhelőerő ( $F$ ) kapcsolata

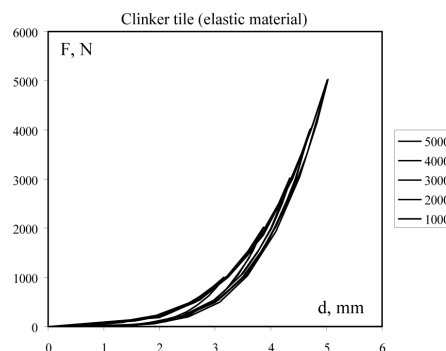


Fig. 6.b. Relationship between the indentation diameter ( $d$ ) and load ( $F$ )  
 6.b ábra A benyomódási átmérő ( $d$ ) és a terhelőerő ( $F$ ) kapcsolata



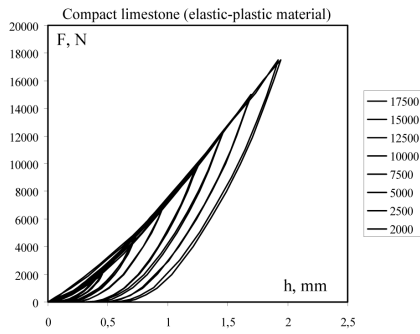


Fig. 7.a. Relationship between the indentation depth ( $h$ ) and load ( $F$ )  
7.a ábra A benyomódási mélység ( $h$ ) és a terhelőerő ( $F$ ) kapcsolata

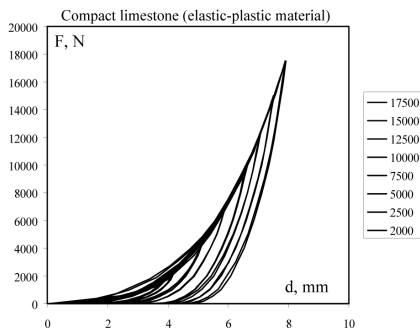


Fig. 7.b. Relationship between the indentation diameter ( $d$ ) and load ( $F$ )  
7.b ábra A benyomódási átmérő ( $d$ ) és a terhelőerő ( $F$ ) kapcsolata

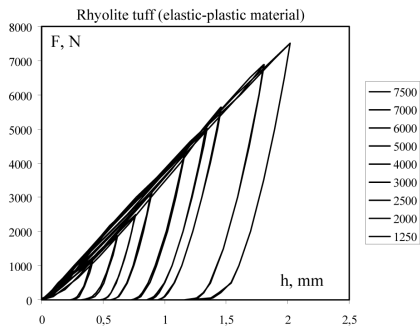


Fig. 8.a. Relationship between the indentation depth ( $h$ ) and load ( $F$ )  
8.a ábra A benyomódási mélység ( $h$ ) és a terhelőerő ( $F$ ) kapcsolata

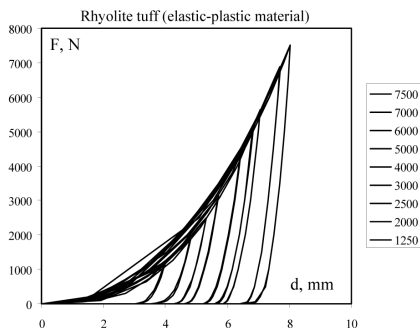


Fig. 8.b. Relationship between the indentation diameter ( $d$ ) and load ( $F$ )  
8.b ábra A benyomódási átmérő ( $d$ ) és a terhelőerő ( $F$ ) kapcsolata

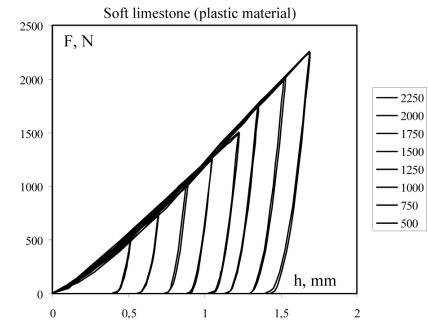


Fig. 9.a. Relationship between the indentation depth ( $h$ ) and load ( $F$ )  
9.a ábra A benyomódási mélység ( $h$ ) és a terhelőerő ( $F$ ) kapcsolata

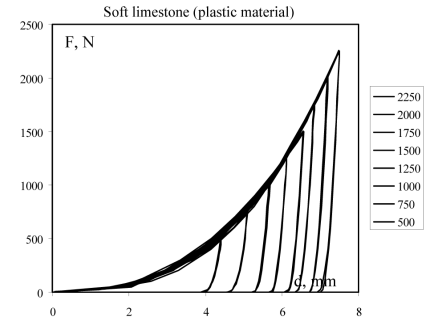


Fig. 9.b. Relationship between the indentation diameter ( $d$ ) and load ( $F$ )  
9.b ábra A benyomódási átmérő ( $d$ ) és a terhelőerő ( $F$ ) kapcsolata

## 6. Brinell hardness in the function of the load

Figs. 10 to 13 indicate the calculated Brinell hardness results represented as a function of the testing load during the DSI tests. The two series of data correspond to the maximum and residual indentation diameters, respectively. It can be studied that apparent peak hardness values are showing on each response. The observed performance confirms the specific behaviour of porous solids noticed earlier for concrete under the ball indenter and indicates the existence of the mechanism of local densification and the formation of cone cracking [1]. At lower loads no full plastic response of the porous solids can be developed and the densification of the material under the ball indenter is not pronounced. Increasing load results increasing hardness values. At higher loads the local collapsing of the capillary walls in the porous solids and the local micro-crushing of the material near the contact area results more pronounced densification; that can be realized in the apparent peak hardness when full plastic response is utilized.

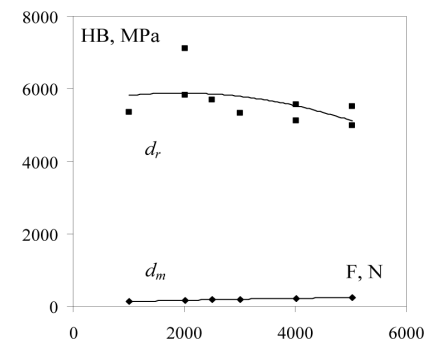


Fig. 10. Relationship between the Brinell-hardness and the load (clinker tile)  
10. ábra A Brinell keménység és a terhelőerő kapcsolata (klinker burkolólap)

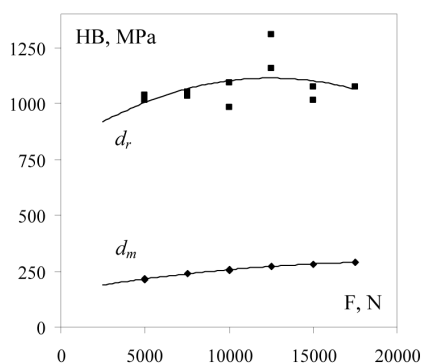


Fig. 11. Relationship between the Brinell-hardness and the load (compact limestone)  
11. ábra A Brinell keménység és a terhelőerő kapcsolata (tömött mészkő)

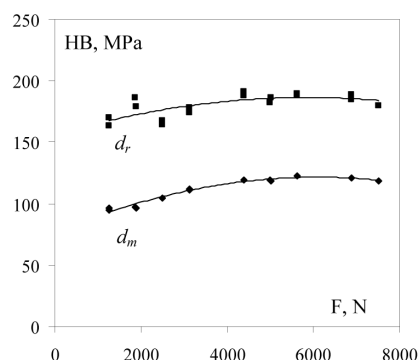


Fig. 12. Relationship between the Brinell-hardness and the load (ryolith tuff)  
12. ábra A Brinell keménység és a terhelőerő kapcsolata (riolituffa)

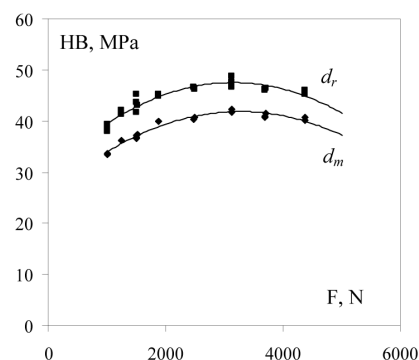


Fig. 13. Relationship between the Brinell-hardness and the load (soft limestone)  
13. ábra A Brinell keménység és a terhelőerő kapcsolata (durva mészkő)

## 7. Conclusions

The hardness tests have been used for several centuries to determine the qualitative and quantitative characteristics of materials. The most suitable test method for scientific purposes is the indentation method to study the hardness of minerals, natural stones or artificial porous solid building materials. Present research utilized the Brinell macro hardness tests and the depth-sensing indentation (DSI) tests on 15 different types of porous solid building materials. The indentation hardness tests were completed by the investigations of uniaxial compressive strength, Young's modulus, total porosity, apparent porosity, body density and rebound hardness tests. The laboratory experiments were aimed to analyze whether the experiences of previous investigations on concretes can be extended to further

porous solid building materials. It was observed that the Brinell hardness tests and the DSI tests have almost equal outcome in respect of the load vs. residual indentation diameter ( $F - d_r$ ) response for identical testing loads (only slight differences are observable due to the slightly different load histories). The DSI test can reveal a relationship between the residual indentation diameter ( $d_r$ ) and the maximum indentation diameter ( $d_m$ ). The studies have shown that the earlier observations found for the Brinell hardness of concrete is correct and it can be extended to the tested porous solid building materials as well.

## References

- [1] Szilágyi, K. – Borosnyói, A. – Dobó, K.: *Static indentation hardness testing of concrete: A long established method revived*. *Építőanyag*, Volume 63, Issue 1-2, 2011, pp. 2-8.
- [2] Meyer, E.: *Untersuchungen über Harteproofung und Harte*. *Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure*, Vol. 52, No. 17, April 1908, pp. 645–654, 740–748, 835–844.
- [3] Steinwede, K.: *Über die Anwendung des Kugelhärteversuches zur Bestimmung der Festigkeit des Betons*. Doctoral Thesis, University of Hannover, Faculty of Civil Engineering, 20 Feb 1937, Gebrüder Jänecke, Hannover, 69 p.
- [4] Gubicza J. – Juhász A. – Arató P. – Szommer P. – Tasnádi P. – Vörös G.: *Elastic modulus determination from depth sensing indentation test*. *Journal of Materials Science Letters*, Vol 15., 1996, Chapman & Hall, pp. 2141–2144.
- [5] Sneddon, I. N.: *The Relation between Load and Penetration in the Axisymmetric Boussinesq Problem for a Punch of Arbitrary Profile*. *International Journal of Engineering Science*, Volume 3, Issue 1, May 1965, pp. 47–57.
- [6] Mindess, S. – Young, J. F.: *Concrete*. Prentice-Hall, 1981, 671 p.
- [7] Neville, A. M.: *Properties of concrete*. John Wiley & Sons, 1996, 844 p.
- [8] Mehta, P. K. – Monteiro, P. J. M.: *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*. McGraw Hill, 2006. 2006, 659 p.

## Ref.:

Katalin Szilágyi – Adorján Borosnyói – Zoltán Gyurkó: *Static hardness testing of porous building materials*. *Építőanyag*, 65. évf. 1. szám (2013), 6–10. p.  
<http://dx.doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2013.2>

## Porózus kőszertű építőanyagok statikus keménységvizsgálata

A keménységmérést évszázadok óta alkalmazza az anyagvizsgálat a kőszertű anyagok kvalitatív, illetve kvantitatív jellemzőinek meghatározására. Tudományos vagy anyagvizsgálati célra legalkalmasabbak a benyomódási keménységmérési vizsgálatok. A cikkben bemutatott kutatás során 15-féle porózus (természetes és mesterséges) kőszertű anyagokon történt Brinell-féle makrokeménység vizsgálat és mélységérzékeny benyomódás (Depth Sensing Indentation, DSI) vizsgálat a teljes terhelési-tehermentesítési karakterisztika felvételével, eltérő terhelő erőkkel. A vizsgálatok során 10 mm átmérőjű, gömb alakú alaktestet használtak. A vizsgálatok igazolták, hogy a szakirodalomban fellelhető megfigyelés, amely szerint a betonok Brinell keménysége függ a terhelőerő nagyságától, valamint, hogy létezik a Brinell keménységnek egy legnagyobb értéke, amely a terhelő erő vagy a benyomódás átmérőjének függvényében megadható, kiterjeszthető valamennyi vizsgált porózus kőszertű anyagra. A vizsgálatok arra is rámutattak, hogy a porózus kőszertű anyagok mechanikai viselkedése markánsan elkülöníthető egymástól a mélységérzékeny benyomódás vizsgálat terhelési-tehermentesítési karakterisztikái alapján rugalmas, rugalmas-képlékeny és képlékeny anyagokra.

Kulcsszavak: Brinell keménység, mélységérzékeny benyomódásvizsgálat, szilárdság, rugalmassági modulus, porózus szilárd anyag



# Typical problems in push-rod dilatometry analysis

**MIROSLAV JANKULA** ■ Department of Physics, Constantine the Philosopher University in Nitra, Slovakia  
 ■ miroslav.jankula@ukf.sk

**PETER ŠÍN** ■ Department of Physics, Constantine the Philosopher University in Nitra, Slovakia  
 ■ peter.sin@ukf.sk

**RUDOLF PODOBA** ■ Department of Physics, Constantine the Philosopher University in Nitra, Slovakia, and Department of Physics, Slovak University of Technology in Bratislava, Slovakia  
 ■ rudolf.podoba@ukf.sk

**JÁN ONDRUŠKA** ■ Department of Physics, Constantine the Philosopher University in Nitra, Slovakia  
 ■ jondruska@ukf.sk

Received: 21. 01. 2013. ■ Érkezett: 2013. 01. 21. ■ <http://dx.doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2013.3>

## Abstract

The paper deals with thermodilatometry of green and fired ceramic samples. Problems connected with the measurements in dilatometric practice are described in detail, namely a) the influence of the pressing force of the push-rod, b) the effect of an improperly placed sample and improper measuring range, c) the influence of the volume of a sample, d) the influence of the heating rate, and e) the influence of the grounding and AD transducer on the results of the thermodilatometric analysis.

Keywords: thermodilatometry, errors, sample, measurement

## 1. Introduction

For the needs of qualitative and quantitative characteristics of the structure and microstructure of ceramics different techniques are used in order to examine their properties, which enables an interpretation of the results of measurements from different points of view. One of these methods is the thermodilatometry. The thermodilatometric analysis (TDA) is based on measuring the volume change of a ceramic sample during heating [1]. Two reasons for the volume change are present in a dry ceramic sample: a) the common thermal expansion due to asymmetric thermal vibrations of the ions in the crystalline lattice, and b) the phase transformation connected with the rearrangement of ions in the crystalline lattice. If we record dilatation changes in a proper way in dependence on the temperature, we can allocate important phase transitions from anomalies of the thermal expansion. The TDA plays an important role in ceramic research. It allows the prediction of the changes in a sample made from known raw materials [2, 3]. It is also possible to determine the kinetic parameters from thermodilatometry [4]. The effect of texture on thermodilatometry is examined in [5, 6]. The TDA also plays a very important role in the experimental study of the sintering process [7, 8, 9].

The thermal volume expansion of materials is characterized by the coefficient [10, 11]

$$\beta = \frac{1}{V_0} \frac{\Delta V}{\Delta t}, \quad (1)$$

where  $V_0$  is the sample volume at the temperature  $t_0$  (mostly room temperature),  $\Delta V$  is the change of the sample volume over a small temperature interval  $\Delta t = t - t_0$ . If the sample is made from an isotropic material and has, for simplicity, a cubic form, then the length of the cube is  $l_0$  at the temperature  $t_0$  and  $l = l_0(1 + \alpha \Delta t)$  is its length at the

**Miroslav JANKULA**

(03.12.1959, Slovakia)

Received his MSc degree from the Military College in Liptovský Mikuláš, Faculty radiolocation and automated systems in 1982. Post graduated studies at the Catholic University in Ruzomberok, Faculty of Education (graduated in 2009). PhD student at the Constantine the Philosopher University in Nitra, condensed matter physics and acoustics since 2010. Field of research: Thermo-physical properties of building ceramics.

**Peter ŠÍN**

(12.11.1985, Slovakia)

Received his BSc degree from the Constantine the Philosopher University in Nitra, physics and astrophysics in 2007. Received his MSc degree from the Constantine the Philosopher University in Nitra, condensed matter physics and acoustics in 2009. Field of research: Thermo-mechanical and thermo-physical properties of ceramic materials.

**Rudolf PODOBA**

(24.9.1984, Slovakia)

Received his MSc degree from the Constantine the Philosopher University in Nitra, physics and computer science in 2009. Since then he is a

PhD student at the Constantine the Philosopher University in Nitra, condensed matter physics and acoustics. Field of research: Thermal analyses of the green clay ceramic materials.

**Ján ONDRUŠKA, PhD.**

(19.11.1982, Slovakia)

Received his MSc degree from the Constantine the Philosopher University in Nitra, physics and computer science in 2007. Received his PhD degree from the Constantine the Philosopher University in Nitra, condensed matter physics and acoustics in 2011. Field of research: Thermo-mechanical and thermo-physical properties of composite materials.

temperature  $t$ . The sample volume at the temperature  $t$  is  $V = V_0(1 + \beta \Delta t) = l_0^3(1 + \alpha \Delta t)^3 \approx l_0^3(1 + 3\alpha \Delta t)$ , if we neglect small terms proportional to the second and third power of  $\Delta t$ . It results that  $\beta = 3\alpha$ . Consequently, it is sufficient to measure the length change  $\Delta l$  of only one dimension of the sample, and then to calculate the linear coefficient of thermal expansion (CTE) from the formula

$$\alpha = \frac{1}{l_0} \frac{\Delta l}{\Delta t} \quad (2)$$

The CTE belongs to the most important parameters of solid materials used in industry design and research [1]. As it is commonly known, a dilatometer directly measures the quantities  $\Delta l$  and  $t$  during heating/cooling/isothermal regime. The initial sample length  $l_0$  is measured before inserting the sample into the dilatometric cell.

An ideal thermodilatometric analysis (TDA) requires zero mechanical load on the sample, which is unrealizable in practice. Even if no external force acts on the sample, it can be deformed by its own weight. Some non-contact dilatometers, which are suitable to measure  $\Delta l$  of soft ceramic samples at high temperatures, use optical methods to record  $\Delta l$  [12, 13]. Unfortunately, the non-contact dilatometers have some drawbacks, such as the complicated device for recording  $\Delta l$ .

Most dilatometers apply mechanical contact between the sensor and the sample [14] and employ the differential principle. All contact dilatometers involve an intermediary member (called

the push-rod) to transmit the dimensional change (caused by subjecting the sample to a temperature change) to the sensor [7].

The areal differential dilatometer works with two samples – a reference and a test sample. It compares changes of dimensions of the samples. The reference sample is mostly made from fused silica (suitable for temperatures up to 900 °C) or alumina (suitable for temperatures up to 1500 °C) [7].

A push-rod dilatometer is more frequent. Its principle is basically also differential, but the dilatometric cell which is parallel with the measured sample plays the role of the reference sample. The parts of the dilatometric cell are made, in general, from alumina or fused silica and their dependence of the length changes on the temperature is known.

Dilatometers usually use linear variable differential transducer (LVDT) as linear displacement sensor, although one may also use a capacitance sensor (it has high sensitivity but very low range of  $\Delta l$ ), optical sensor (based on the interferometer principle; it has a complex construction but high accuracy), digital optical sensor (it is very stable but with the resolution of only 1  $\mu\text{m}$ ), and mechanical sensor (it is usually of simple construction with the resolution of 1  $\mu\text{m}$ ). Usually, dilatometers need 25 to 50 mm length samples. This contributes substantially to the measurability and reliability of the data and, therefore, to the overall accuracy of the measured value of  $\Delta l/l_0$  [15].

Another criterion to distinguish dilatometers is the position of the sample in the dilatometric cell. Most dilatometers employ horizontal position of the sample. A major advantage of the horizontal configuration is its superior thermal uniformity and easy handling with the sample. Moreover, a horizontal furnace is not subjected to convection parallel with the sample [16]. The disadvantage of the horizontal dilatometer is that the push-rod must exert a reasonable force on the sample to overcome the friction between it and the groove. For the trapped end plate, this pressure must also be sufficient to keep the plate pressed against the far side of the groove and does not allow it to move at all [16]. Samples that soften, shrink, or sinter may shorten rather than expand when heated. In this case it is advisable to use a vertical system for shrinkage or sintering investigation. There is no friction between the sample and the dilatometric cell and the force acting on the sample can be decreased to a very small value with the help of a counterweight [16]. A disadvantage is the problematic homogeneity of the temperature field and the necessity to use relatively short and thick samples.

A push-rod dilatometer, as every differential system, needs the calibration by a reference sample [13, 17]. The forthcoming changes always require recalibration: a replacement of the pushrod, dilatometer tube, or thermocouple, or aging of parts of the dilatometric cell (buckling, cracks, discoloration). Besides, the LVDT is a relatively sensitive device which overall performance depends on the stability and linearity of the signal conditioning network. This fact also requires frequent calibration [18].

The aim of present paper is to describe some typical influences and factors which lead to differences in dilatometric results.

## 2. Dilatometry

The results presented in this contribution were obtained with the help of the push-rod dilatometer described in [19, 20]. It is a horizontal alumina dilatometer with an LVDT sensor. A

constant force assigning reliable mechanical contact between the push-rod, sample, and supporting rod is developed by a weight. The displacement  $\Delta l$  of the push-rod is proportional to the change of the output electric signal  $\Delta U$ ,

$$\Delta l = k \Delta U = \Delta l_s - \Delta l_{ar}, \quad (3)$$

where  $\Delta l_s$  is the change of the sample length and  $\Delta l_{ar}$  is the change of the carrier alumina rod length at the temperature  $t$ . If one uses  $l_0$  to denote the initial sample length, then

$$\frac{\Delta l_s}{l_0} = \frac{k \Delta U}{l_0} + \frac{\Delta l_{ar}}{l_0}. \quad (4)$$

The calibration was performed by a reference sample (steel X10NiCrMoTiB 1515) provided by the Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Berlin. We used the  $\Delta l(t)/l_0$  relationship [21] for the reference dilatometric curve in the interval 20 to 1000 °C. The polynomial expression of the relationship is

$$\left( \frac{\Delta l(t)}{l_0} \right)_{ref} = -4 \times 10^{-22} t^3 + 2 \times 10^{-7} t^2 + 0.0018 t - 0.045, \quad (5)$$

where  $t$  is the temperature in °C and the relative thermal expansion is given in %.

## 3. Influence of different factors on the TDA

### 3.1 Mechanical pressure on the sample

Reliable mechanical contacts between the push-rod and the sample as well as between the sample and the supporting rod guarantee correct dilatometric results. The push-rod must be pressed against the sample and the supporting rod, i.e., the sample is under the pressure load. The force acting on the sample is relatively small and does not cause contraction if the sample is solid and firm. However, the pressing force significantly influences the TDA at higher temperatures if the sample contains glassy phase or if sintering takes place. For example, it is well known that the bending of the dilatometric curve of glass above the transformation point is caused by the pressing force [22].

If the pressing force is created by spring then the force is not the same when samples of different lengths are used (see Fig. 1). The longer the sample, the larger is the force of the spring. A ceramic sample which contains glassy phase softens above ~900 °C and contracts under the pressing force. The same behaviour can be confirmed by the dilatometer when the constant pressing force was realized by a weight (see Fig. 2). As Fig. 1 and Fig. 2 indicate, the dilatometric curves for all the samples are identical if their temperatures are under the transformation point of the glassy phase.

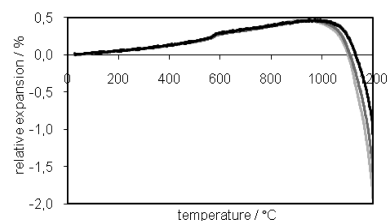


Fig. 1. TD curves of porcelain samples with different lengths: 45 mm, (light grey), 43.5 mm (grey), 42 mm (black)

1. ábra Különböző méretű porcelán minták TD görbéi: 45 mm, (világosszürke), 43.5 mm (szürke), 42 mm (fekete)



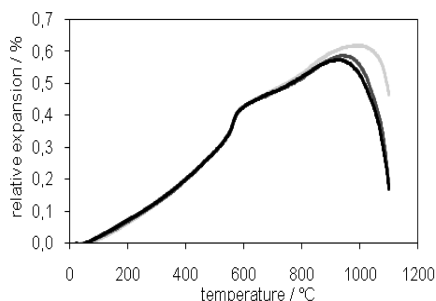


Fig. 2 TD curves of fired brick samples. Pressing force: 0.3 N (light grey), 0.4 N (grey), 0.5 N (black)

2. ábra Kiégetett téglák TD görbéi. Nyomóerő: 0.3 N (világosszürke), 0.4 N (szürke), 0.5 N (fekete)

### 3.2 Sample position

If the sample is not exactly parallel with the alumina rods, it can lead to higher friction and sudden small movements of the sample during the measurement. The results are disruptions on the dilatometric curve, as illustrated in Fig. 3.

For all dilatometers, some routine maintenance and inspection is required to assure proper operation and, therefore, accurate results. The sample chamber for any dilatometer must be free of earlier deposits or debris prior to loading the sample and running a test. The transducers require periodic maintenance depending on the cleanness of the environment in which the instrument is operated [23, 24]. Otherwise, results similar to those showed in Fig. 3 can be obtained.

### 3.3. Measuring interval

If the measuring interval is improperly set, it can cause a loss of the mechanical contact between the push-rod and the sample or the movement of the push-rod can be out of the range of the LVDT. It may occur when the contraction of the sample is too high (see Fig. 4). For correct measurements the operator has to predict the behaviour of the measured sample.

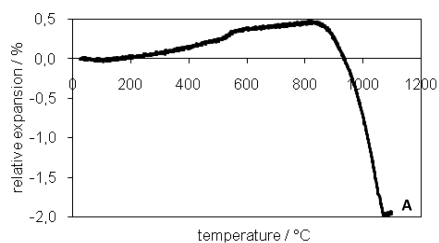


Fig. 3. Shifts of the TD curve caused by sudden movement of the sample due to improper sample insertion to the dilatometer

3. ábra A TD görbe lépcsőzetessége a minta elmozdulása miatt, amelynek oka a dilatometerben történő helytelen elhelyezés

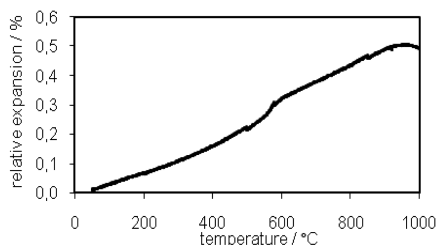


Fig. 4. Loss of mechanical contact between the push-rod and the sample at point A.

4. ábra Érintkezés megszűnése a minta és a támasztórúd között az A pontban

### 3.4. Heating rate

The effect of the heating rate on the TDA produces shifts between TD curves (see Fig. 5). This effect is typical for thermal analyses and can be found in the DTA, TGA, and others [2]. The shifts are visible in Fig. 5 at different heating rates caused by the change in the heating rate. At a higher heating rate the temperature is no more uniformly distributed in the complete sample, so one can observe some delay in the relative expansion.

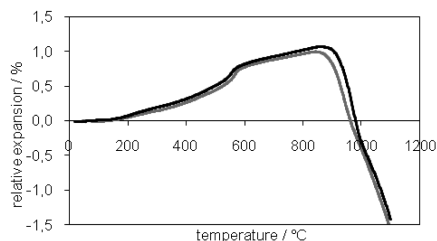


Fig. 5. TD curves of green brick samples at different heating rates: 2.5 °C/min (grey) and 10 °C/min (black).

5. ábra Ki nem égetett téglák TD görbéi eltérő felfűtési hőmérséklet mellett: 2.5 °C/perc (szürke) és 10 °C/perc (fekete).

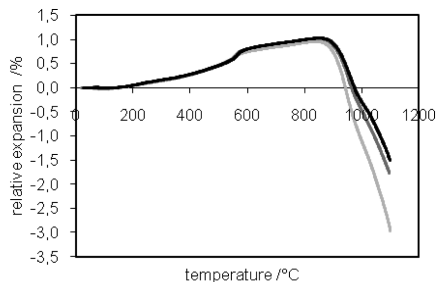


Fig. 6. TD curves of green brick samples with different diameters: 5 mm (light grey), 8 mm (grey) and 12 mm (black)

6. ábra Eltérő átmérőjű, ki nem égetett téglák TD görbéi: 5 mm (világosszürke), 8 mm (szürke) és 12 mm (fekete)

### 3.5. Size of the sample

Fig. 6 shows the influence of the sample diameter on TDA results. The larger is the diameter, the more delayed is the start of the high temperature reaction in the sample. Consequently, the curves for larger samples are shifted to higher temperatures. The explanation is similar as in Chapter 3.4, i.e. the changes in the sample volume are faster in the sample with a smaller diameter. In these samples one may observe the high temperature reactions at lower temperatures than at samples with a larger diameter.

### 3.6 Electronic circuits

Differences of the voltage signal from the LVDT are relatively small ( $\sim 10^{-5}$  V), therefore, a linear amplifier is necessary. It is evident that correct operation of all electronic devices is essential for obtaining correct results. For example, an incorrect grounding between the LVDT and the amplifier causes noise which is revealed in the dilatometric curve, the latter becoming thick.

Another important influence on the measured data is due to the AD transducer. If it has small bit resolution then the amount of measured data are represented as the same digital

number. On the other hand, near the bit boundary a small change of measured data is attended by a large change of the displayed data. As a result, the dilatometric curve contains altering thick parts.

#### 4. Conclusions

In this paper, thermodilatometry of green and fired samples made from kaolinitic and illitic clays was performed. Detailed analysis of the dilatometer operation led to the following conclusions.

1. The pressing force does not influence the dilatometric results if the sample volume is solid. Above the temperature at which liquid phase is formed, the pressing force can shorten the sample and significantly influence the dilatometric results.
2. If the pressing force is produced by spring then longer samples are subjected to larger pressing force than shorter samples.
3. If the sample is not properly placed (if it is not parallel and coaxial), it causes "jumps" in the dilatometric curve.
4. Phase changes are registered at lower temperatures if low heating rate is used.
5. Phase changes are registered at lower temperatures if thin sample is used.

#### Acknowledgements

The work was supported by the grant VEGA 1/646/12.

#### References

[1] Naofumi, Y. – Remi, A. – Masahiro, O.: *A calibration method for measuring thermal expansions with a push-rod dilatometer*. Measurement Science and Technology 12 (2001) pp. 2121-2129.

[2] Rath J. – Pospíšil, Z. et al: *Jemnákeramika – metodikaměření a zkoušek*. SNTL/Alfa, Praha, 1988.

[3] Hanykýř, V. – Kutzendorfer, J.: *Technologie keramiky*. Silis Praha a Vega, Hradec Králové, Praha, 2000.

[4] Feng, K. – Lombardo, S. J.: *Kinetic analysis from dilatometry and mass spectrometry measurements of the decomposition and sintering of calcium carbonate*. Journal of Ceramic Processing Research 3 (2002) pp. 101-108.

[5] Štubňa, I. – Trnovcová, V.: *The effect of texture on thermal expansion of extruded ceramics*. Ceramics-Silikáty 42, 1 (1998) pp. 21-24.

[6] Štubňa, I. – Vozár, L. – Smetanková, G.: *Thermodilatometry of Textured Electroceramic Material*. Thermophysics 2001, UKF Nitra, 2001, pp. 105-109.

[7] Technical Note 69 *Principles of the push-rod dilatometry*, available online: HUhttp://www.yeonjin.com/xe/index.php?listStyle=gallery&page=5&document\_srl=133UH

[8] Porat, R. – Berger, S., Rosen, A. (1996) "Dilatometric study of the sintering mechanism of nanocrystalline cemented carbides", HNanostructured MaterialsH 7, 4 (1996) pp. 429-436.

[9] Holková, Z. – Pach, L. – Kovár, V. – Svetlík, Š.: *Kinetic study of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sintering by dilatometry*. Ceramics-Silikáty 47, 1 (2003) pp. 13-19.

[10] Brož, J.: *Základy fyzikální chměření*. SPN, Praha, 1983

[11] Kittel, C.: *Introduction to the Solid State Physics*. Wiley, New York, 1953

[12] Paganelli, M.: *Using the optical dilatometer*. American Ceramic Society Bulletin 81, 11, pp. 25-30. 2002

[13] Watanabe, H. – Yamada, N. – Okaji, M.: *Development of a Laser Interferometric Dilatometer for Measurements of Thermal Expansion of*

*Solids in the Temperature Range 300 to 1300 K*. International Journal of Thermophysics 23, 2002/2, pp. 543-554.

[14] James, J. D. – Spittle, J. A. – Brown, S. G. R. – Evans, R. W.: *A review of measurement techniques for the thermal expansion coefficient of metals and alloys at elevated temperatures*. Measurement Science and Technology 12, 2001, pp. R1-R15.

[15] Technical Note 58 *Use of thermo-mechanical analyzers (tma) for dilatometric measurements*, available online: HUhttp://www.yeonjin.com/xe/?module=file&act=procFileDownload&file\_srl=22068&sid=ef750717e686f196cc54b07947050a2UH

[16] Technical Note 106 *Horizontal vs. vertical dilatometers*, available online: http://thermophysical.tainstruments.com/PDF/technotes/TPN-106%20Horizontal%20vs.%20Vertical%20Dilatometers.pdf

[17] Yamada, R. A. – Masahiro, O.: *A calibration method for measuring thermal expansion with a push/rod dilatometer*. Measurement Science and Technology 12, 2001, pp. 2121-2129.

[18] Technical Note 105 *The advantages of digital displacement transducer over LVDT*, available online: HUhttp://www.yeonjin.com/xe/?module=file&act=procFileDownload&file\_srl=22063&sid=277eccb8660f9736c032d2b17c75b5cdUH

[19] Karafa, B. – Štubňa, I. – Vozár, L.: *High-temperature horizontal dilatometer*. Proc. Calorimetric seminar 2002, Ostravskáuniv., Ostrava, 2002, pp. 57-60. (in Slovak)

[20] Štubňa, I. – Vozár, L.: *High-temperature Alumina Rod Dilatometer*. Proc. of Meeting of the Thermophysical Society THERMOPHYSICS 2000, UKF Nitra, 2000, pp. 77-81.

[21] Štubňa, I. – Važanová, A. – Varga, G. – Hrubý, D.: *Simple push-rod dilatometer for dilatometry of ceramics*. Research and teaching of physics in the context of university education, SPU Nitra 2007, pp. 69-74.

[22] Hlaváč, J.: *Základy technologie silikátů*. SNTL, Praha, 1981

[23] Technical Note 61 *General dilatometer maintenance*, available online: HUhttp://www.yeonjin.com/xe/?module=file&act=procFileDownload&file\_srl=22067&sid=5b01eee94f585d94bab2e2a21187b2bbUH

[24] Technical Note 109 *General dilatometer maintenance*, available online: HUhttp://www.yeonjin.com/xe/?module=file&act=procFileDownload&file\_srl=22061&sid=ee47d3b428c0c6618d41405ed84333c5UH

#### Ref.:

Miroslav Jankula – Peter Šín – Rudolf Podoba – Ján Ondruška:  
*Typical problems in push-rod dilatometry analysis*.  
 Építőanyag, 65. évf. 1. szám (2013), 11–14. p.  
<http://dx.doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2013.3>

#### Jellegzetes problémák nyomórudas dilatométeres vizsgálatnál

A cikk ki nem égetett és kiégetett kerámia minták termodilatometriai mérésének jellegzetességeit elemzi és részletesen bemutatja a méréshez kapcsolódó egyes jellegzetes mérés technikai nehézségek következményeit. Bemutatásra kerül a minta támasztó rúd nyomásának a hatása, a nem megfelelően elhelyezett minta hatása, a nem megfelelő méréshatár választásának a hatása, a minta térfogatának a hatása, a felfűtés sebességének a hatása, a nem megfelelő földelés hatása és a mérőátalakító hatása. A vizsgálatok igazolják, hogy abban az esetben, ha cseppfolyós fázis jön létre a vizsgálat közben, a minta támasztó rúd nyomása jelentős hatást gyakorol a termodilatometriai mérés eredményére. Amennyiben a nyomást rugó fejtí ki, úgy a vizsgálati minta mérete jelentősen befolyásolja a mérési eredményt. Ha a vizsgálati minta elhelyezése nem párhuzamos és központos, akkor a mérési eredmények hibásak lehetnek. A termodilatometriai mérés eredményét jelentős mértékben befolyásolhatja a felfűtés sebessége a vizsgálat során, illetve a vizsgálati minta vastagsága. Kulcsszavak: termodilatometria, mérési hiba, vizsgálati minta, mérés

# 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 voltak 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 közetek, 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, közettörmelékek.

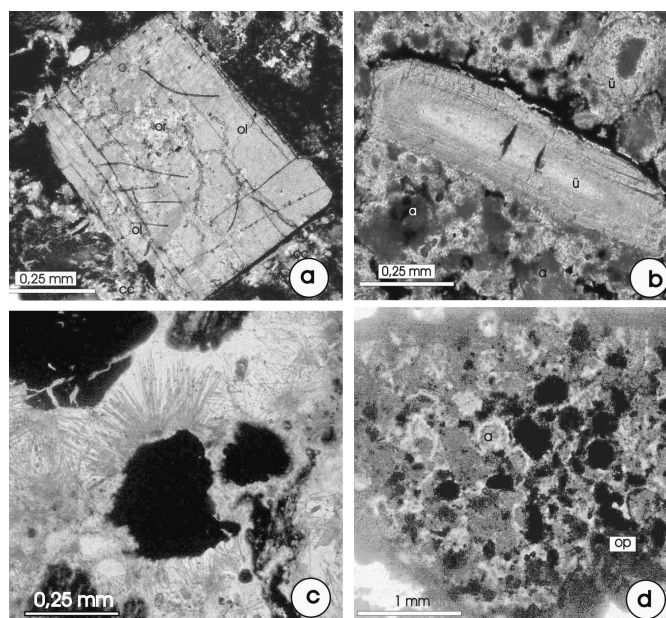


A kvarc jellegzetes megjelenése a 0,2 mm alatti szemcseméret, gyengén lekerekített vagy szilánkos, hullámos kioltású, gyakran korrodált szemcsék. Találtunk néhány gömbölyű kvarckavicsot is. A hőhatás miatt a kvarc repedezett, esetenként olvadékos burokkal jelenik meg.

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, szálás, aktinolitós hornblende szemcsét is, valamint sajátalakú opak ásványokat (magnetit, hematit).

A természetes eredetű kőzettörmeléseket homokkő, vulkáni kőzet, szericites-kloritos pala törmelékei, kiégetett agyag és agyapala 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. Szálás-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.

Korom: 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 egyszemű: az apró, mikronos méretű, optikailag azonosíthatatlan törmeléken kívül lényeges összetevőjét az alakzatok képezik.

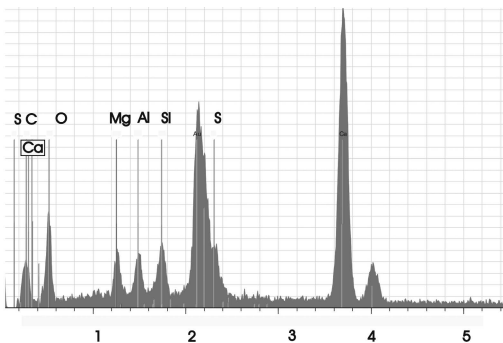
Alakzatok: A mikronos méretű, izotróp szemcsékből szederszemszerűen összeálló, korong, ellipszis, lencse vagy amőba alakú ásványfázis nevezhető alakzatnak (1.d ábra), ha a színe és a szemcsézete különbözik a környező alapanyagétól. Az alakzat és az alapanyag között az átmenet század mm-es sávban folyamatos. 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  $\mu\text{m}$ -es levelekből, pikkelyekből tevődik össze (3.a ábra), amelyek anyaga nagyrészt amorf (üveg), az alakzatok szabályosan rendezett, 1-3  $\mu\text{m}$ -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  $\mu\text{m}$ -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,

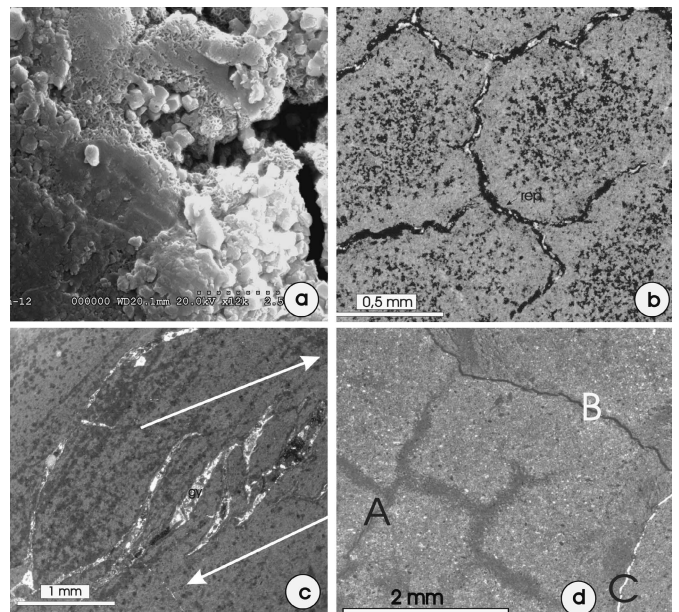
finom- és durvakristályos (pátos) kalcit jelenik meg, a mikroszondás mérés alapján néhány százalékos magnézium tartalommal.

**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  $\mu\text{m}$ -es gömbökből összeálló szederszerű vagy szabálytalan halmazokat képez.



3. ábra a. A lapos üveglemezekből romboédere 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* ( $\text{CaCO}_3$ ) 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* ( $\text{CaSiO}_4$ ) 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  $\text{SiO}_2$ -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* [ $(\text{Mg}_4\text{Al}_2(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_{10}\cdot 4\text{H}_2\text{O})$ ] 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?

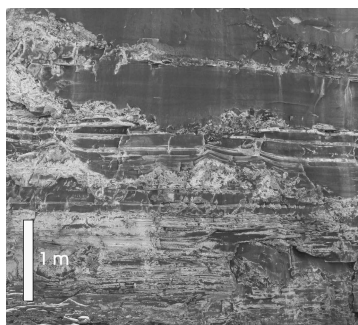
## 4. Szerkezet, szövet, alak- és térfogatváltozás

### 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 hossztengeyének 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 szerkezeti és szövetileg a gátanyag a természetes kőzetekhez hasonló, ezért hasonló módon vizsgálható genetikai és kőzetmechanikai vonatkozásban.

## 4.2. Deformációk

A vizsgált gátanyagban plasztikus és törés deformációkra utaló jeleket találtunk.

**Plasztikus deformációk:** A gát anyagában felismerhető az anyagok saját súlyát alatti 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) kátránycepppek a tömörödési nyomás hatására az egyes repedésekbe hatoltak és ott kitöltéseket képeztek.

**Törés deformációk:** A vizsgált mintákban a törés deformációk három típusát lehet megkülönböztetni:

**Mikrorepedések** a törmelékes szemcséken: az üvegdarabok peremén, a széntörédekeken, az égetett agyag-pelletéken és egyes megpörkölt kvarc- ill. földpátszemcséken. Ezek a repedések nem lépik túl a szemcsé határát, rendszerint az amorfi alanyag 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 kikerülnek) 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 <sub>2</sub>	11,15	12,76	10,00	10,56	8,17	12,39	8,53	9,31
TiO <sub>2</sub>	0,32	0,37	0,31	0,32	0,37	0,34	0,27	0,26
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,40	7,65	6,32	7,36	5,71	6,40	5,35	5,91
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	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 <sub>2</sub> O	0,07	0,12	0,28	0,62	0,53	1,10	0,24	0,14
K <sub>2</sub> O	<0,20	<0,20	0,39	0,50	0,37	1,21	<0,20	<0,20
H <sub>2</sub> O+	12,05	12,29	10,30	10,97	18,95	9,58	12,59	13,48
CO <sub>2</sub>	10,89	10,32	15,89	11,62	10,08	14,72	14,05	11,00
SO <sub>3</sub>	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 vízfelvétele [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  $\text{SO}_3$ -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 porusok, 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>

# The effects of mineralogical and petrographical features of the Lake District rocks (Isparta, Turkey) on the quality of artificial marbles

**ALI BILGIN** ▪ Sırnak University, Department of Mining, Batman, Turkey

**GURKAN YUCETURK** ▪ Suleyman Demirel University, Department of Geology, Isparta, Turkey

**SONMEZ ARSLAN** ▪ Batman University, Department of Chemistry, Batman, Turkey

**NURSEV BILGIN** ▪ Middle East Technical University, Department of Materials Science, Ankara, Turkey

**SULEYMAN POLAT** ▪ Batman University, Department of Geology, Batman, Turkey

Érkezett: 2013. 03. 27. ▪ Received: 27. 03. 2013. ▪ <http://dx.doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2013.5>

## Abstract

Large quantities of marble blocks are produced from many new marble quarries which were opened around Isparta (Turkey) and its surrounding region. The opened quarries are also affected negatively by weathering as a result of karstification. Therefore, block efficiency of the quarries is low which results in a lot of waste materials that can be used in cultured marble production. The production of artificial marble from marble waste materials around Isparta is the main purpose of the study. The cultured marble is an attractive, healthy and homogenous building material. It has a wide application in the building construction sector. Artificial marble which is composed of mineral dusts and polyesters has high mechanical strength and they are durable to various chemical and high temperature environmental conditions. Based on physico-mechanical properties, cultured marbles are accepted by Turkish Standards (TS). The materials used for the production of qualified cultured marble are directly related to the hardness of the minerals used as filler in the polyester resin. Physico-mechanical properties of cultured marble depend on the physical properties of the filler minerals. The compressive strength of the cultured marble material is controlled by the physical properties of the filler minerals, therefore, the hardness of the cultured marble is determined by the hardness of the filler mineral. The following analyses were carried out: wet unit volume analysis, dry unit volume analysis, compressive strength of the materials, capillary water absorption analysis, analysis of ultrasound velocity (P-wave) and the marble wastes bulk chemical analyses were investigated and the results of the data were evaluated and discussed. In addition, natural and artificial marbles were compared with respect to physico-mechanical properties.

Keywords: artificial marble, polyester resin, marble quarry, compressive strength.

## 1. Introduction

Wastes of rocks similarly to all kinds of construction materials and industrial raw materials used in our daily life may adversely influence the environment. Evaluation of the waste materials and turning into economic value has important issue at present time. Large quantities of marble blocks are produced from many new marble quarries which were opened around Isparta-Burdur (Turkey) which has rich marble fields in its surrounding region (Fig. 1). The opened quarries are also negatively affected by weathering as a result of karstification. Therefore block efficiency of the quarries is low and they produce a lot of waste materials [1]. There are many ways to evaluate these produced wastes [2]. Granulated artificial marble dusts in micron size in mills mixing and molding in different ratios with resins have been evaluated as cultured marble artificial construction material [3]. One of the evaluation methods of waste marble is using them in production of cultured marble. The production of artificial marble from natural marble waste materials around Isparta-Burdur area is the main purpose of this research.

## Ali BILGIN

Received his BSc degree in 1972, Middle East Technical University Faculty of Engineering Department of Geological Engineering, Ankara, Turkey. Received his PhD degree in 1978, Ataturk University, Faculty of Natural Sciences, Department of Geology, Erzurum, Turkey. He is currently full Professor at Sırnak University Faculty of Engineering Department of Mining Engineering.

## Gurkan YÜCETÜRK

Received his MSc degree from the Süleyman Demirel University, Turkey. Received his PhD degree from the Süleyman Demirel University, Turkey. He is currently project manager at Ekinçiler Co, Turkey.

## Sonmez ARSLAN

Received his PhD degree in 2008, Istanbul Technical University, Department of Chemistry, Istanbul, Turkey. He is currently Assistant Professor at Batman University, Faculty of Arts and Science, Department Of Chemistry, Batman, Turkey.

## Nursev BILGIN

Received his BSc and MSc degrees from Yildiz Technical University Faculty, Istanbul, Turkey. Received his PhD degree in 2011, Middle East Technical University, Ankara, Turkey. He is currently Research Assistant at Middle East Technical University, Ankara, Turkey. Research Interests: Solar cells, DSSCs, TiO<sub>2</sub>, clay minerals.

## Suleyman POLAT

Received his MSc degree in 2012, Suleyman Demirel Middle University Faculty of Engineering, Department of Geological Engineering, Isparta, Turkey. He is currently Research Assistant at Batman University, Faculty of Engineering and Architecture Geological Engineering Department, Batman, Turkey.



Fig. 1. Location map of the study area.

1. ábra A vizsgálati helyszínek térképvázlata

Marble blocks produced at marble quarries leave huge quantities of marble wastes which results waste marble hills with visual pollution (Fig. 2) [2]. Wollastonite, quartz and other silicate minerals are significant materials used for artificial marble production as well, additional to marble waste. Calcite and dolomite are considered in carbonate group minerals and the effect of the ratios of the resins and additive materials on cultured marble materials is still under discussion [4].





Fig. 2. Waste marble hills in Isparta-Burdur area which cause visual pollution  
2. ábra Vizuális szennyezést okozó hulladék márvány dombok az Isparta-Burdur területen

## 2. Materials and methods

### 2.1. Samples location

There are many marble deposits around Isparta and Burdur area. We have collected 12 samples from waste marbles; locations are indicated in Fig. 3.

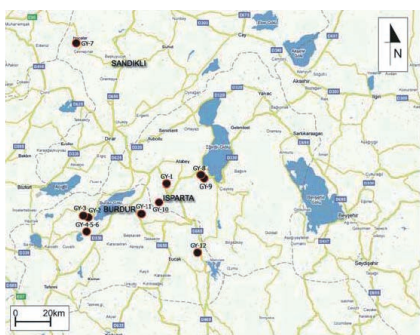


Fig. 3. Waste marble sample locations around Burdur and Isparta.  
3. ábra Hulladék márvány mintavételi helyek Burdur és Isparta környékén

### 2.2. Used materials for artificial marble production

Artificial marbles have been produced from calcite, quartz, feldspar and wollastonite that can be found in waste marble dusts mixing with polymer resin materials. Resins are used as binder, calcite, dolomite, quartz and wollastonite minerals are used as aggregate/filler for cultured marbles and waste glass is also used for artificial marble production as additive material [5].

## 3. Results and discussions

### 3.1. Texture of artificial marbles

Polarization microscopy analysis was made first to study the texture of artificial marble raw materials. For the inspection, sections of 30  $\mu\text{m}$  thickness were prepared to identify the mineral composition of the waste marble samples. Some of the samples could not be determined by means of polarization microscopy due to the grain size smaller than 2  $\mu\text{m}$ . Those samples were investigated by differential thermal analysis (DTA) and scanning electron microscope (SEM). The texture of sedimentary marbles was found to be micritic texture; the andesites have porphyritic texture which has phenocrysts in glass. The scanning electron microscope investigation of the texture of the produced cultured marble is shown in Fig. 4. It has clastic texture where the grains are marble surrounded

by the resin. The resin is amorphous material, therefore, the light cannot be transmitted through it (appears in dark colour in Fig. 4). Calcite grains are transparent and permit the light transmitting through them (appear in light colour in Fig. 4).

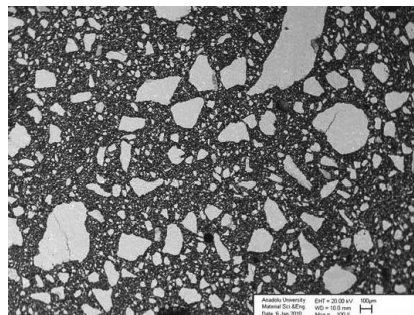


Fig. 4. Clastic texture of artificial marble through secondary electron SEM images of calcite grains (Sample-1, Söbudağ Limestone, North of Isparta).  
4. ábra Mesterséges márvány klasztikus szövete, kalcit szemcsék pászttázó elektronmikroszkópos felvételén (1. sz. minta, Söbudağ mészkő, Észak-Isparta).

### 3.2. Characterization of the artificial marble

For the characterization of the calcite and dolomite minerals, SEM and DTA analyses were carried out (Fig. 4 and 5). Sedimentary marbles have micritic texture containing micritic types of calcite and dolomite minerals depending on their composition. They could not be determined by polarization microscopy, therefore, we applied differential thermal analysis (DTA) to study the mineralogical composition, by preparing powder sample. The sample was heated up to 1200°C and exothermic and endothermic peaks were noted at certain points. Endothermic peaks between 800 and 900°C belong to calcite and dolomite. The obtained results were evaluated by ASTM cards which confirmed the composition of minerals being a mixture of dolomite and calcite.

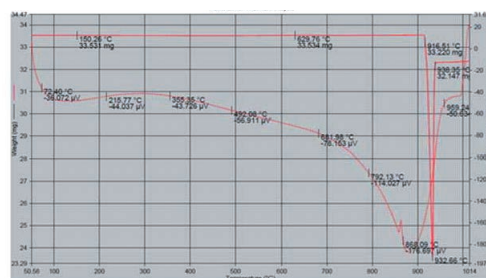


Fig. 5. DTA diagram of carbonate mineral (Söbudağ, North of Isparta).  
5. ábra Karbonátos ásvány DTA diagramja (Söbudağ, Észak-Isparta).

### 3.3. Properties of the artificial marbles

Chemical composition of marble is changing with respect to the type of marbles. Igneous marbles have high  $\text{SiO}_2$ , but sedimentary types of marbles have higher  $\text{Ca-Mg-CO}_3$  (Table 1).

Mineralogy of the minerals used as an additive in artificial marbles controls the quality of the cultured marbles. Therefore, mineralogy of the used additive materials has to be investigated in detail with respect to physical properties. These are especially hardness, grain size and morphology and thermal properties. Raw waste marble samples contain calcite, dolomite, quartz, mica, feldspar, serpentine group minerals and wollastonite.

Sample	Limestone								Trachy-andesite		Travertine	
	GY1	GY2	GY3	GY4	GY5	GY6	GY7	GY8	GY9	GY10	GY11	GY12
Number	GY1	GY2	GY3	GY4	GY5	GY6	GY7	GY8	GY9	GY10	GY11	GY12
SiO <sub>2</sub>	0.11	0.09	0.02	0.16	0.07	0.01	0.1	0.02	0.07	57.6	0.21	0.03
TiO <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.43	0.00	0.00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.04	0.01	0.04	17.1	0.02	0.01
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.06	0.04	0.03	0.05	0.04	0.02	0.09	0.02	0.07	4.14	0.20	0.05
MnO	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.13	0.04	0.01
MgO	0.61	0.56	0.74	0.54	18.4	0.43	0.5	0.44	0.47	1.33	0.40	0.47
CaO	53.3	54.1	53.8	54.8	33.8	54.7	53.5	54.8	54.5	4.89	53.70	54.7
Na <sub>2</sub> O	0.52	0.5	0.49	0.49	0.51	0.47	0.53	0.47	0.5	5.0	0.46	0.50
K <sub>2</sub> O	0.58	0.56	0.56	0.57	0.55	0.53	0.6	0.52	0.57	4.86	0.57	0.58
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.02	0.02	0.02	0.03	0.04	0.01	0.03	0.02	0.02	0.24	0.02	0.01
Ignition lost	43.7	43.1	43.4	43.2	46.5	43.2	43.2	43.2	42.8	3.21	43.90	43.30
Total	98.9	98.9	99.2	99.8	99.8	99.5	98.6	99.6	99.2	98.9	99.60	99.70

Table 1. Chemical composition of natural marbles which used for artificial marble production.  
1. táblázat A mesterséges márvány készítésére használt márványok kémiai összetétele

Calcite and dolomite belong to carbonate group minerals. Their hardness values are 3 and 4 with respect to Mohs hardness scale, respectively. When artificial marble is produced by using carbonate minerals its compressive strength is lower. As hardness of the minerals increases, its compressive strength increases too. On the other hand, trachy-andesites containing feldspar and quartz which belong to silicate group minerals give higher compressive strength and have higher hardness value between 6 and 7 with respect to Mohs hardness scale.

In artificial marble production, grain size morphology is important if high temperature resistant material is intended to be produced. Wollastonite has fiber grain morphology and is resistant to high temperature [6]. It has a unique property with fibrous morphology and also refractory feature (Fig. 6). The materials containing wollastonite can be used effectively in high temperature conditions. It has also high corrosion resistance. When it is used as an additive material in artificial marbles it may result higher compressive strength, higher durability, refractory feature and corrosion resistance.



Fig. 6. Fibrous structure of wollastonite (<http://www.google.com.tr/imgres>)  
6. ábra Wollastonit szálas szerkezete (<http://www.google.com.tr/imgres>)

Sample Number	Dry Weight (g)	After 24 Hours (g)	After 48 Hours (g)	After 72 Hours (g)	Water Absorption (%)
GY-1	250.70	250.70	250.70	250.73	0.03
GY-2	250.70	250.70	250.80	250.80	0.04
GY-3	250.57	250.57	250.60	250.60	0.03
GY-4	249.53	249.53	249.57	249.57	0.01
GY-5	253.70	253.70	253.77	253.77	0.03
GY-6	233.67	233.67	233.83	233.83	0.07
GY-7	246.00	246.00	246.00	246.00	0.00
GY-8	247.83	247.83	247.97	247.97	0.05
GY-9	243.43	243.43	243.43	243.43	0.00
GY-10	245.30	245.40	245.50	245.50	0.08
GY-11	250.70	250.73	250.83	250.83	0.05
GY-12	248.93	249.00	249.10	249.10	0.07

Table 2. Water absorption of cultured marble samples according to Turkish Standards (TS)

2. táblázat A mesterséges márvány minták vízfelvétele a Török Szabványok (TS) szerint vizsgálva

Grain morphology also controls the quality of artificial marble. Wollastonite and chrysotile have fibrous grain morphology. They contribute to higher strength of the materials similarly to steel rebar in concrete. Although wollastonite and chrysotile are useful for the best quality of the artificial marble but chrysotile is considered to be carcinogenic so it is not preferred for the production of the cultured marble [7,8].

Weights of wet unit volume (WWUV) of artificial marble cubic samples were evaluated (Table 3). Natural marbles have some porosity which adversely affects the quality of the marble. When natural marbles have porosity of percolated capillaries, water may be absorbed into the material and cause the weathering physically and chemically. Therefore, porosity

of the marbles should be close to zero (Table 3). The water absorption was found to be low (values vary between 0.00 % and 0.08 %) for the cultured marble samples tested (Table 3). It means that the products are compact and have negligible amount of porosity. The low porosity can make the material durable against water and air.

Sample Number	WDUV (kg/m <sup>3</sup> )	WWUV (kg/m <sup>3</sup> )	Porosity (n) %
GY-1	1993.12	2004.01	5.32
GY-2	2015.24	2021.15	4.12
GY-3	2012.89	2014.83	5.36
GY-4	1994.60	1997.34	6.68
GY-5	2044.84	2060.28	5.08
GY-6	1903.50	1888.97	3.88
GY-7	1976.40	1972.66	3.88
GY-8	2010.73	2011.22	2.40
GY-9	1989.50	1996.51	6.80
GY-10	1908.49	1908.40	10.00
GY-11	2026.56	2024.98	10.00
GY-12	1971.53	1981.90	11.72

Table 3. Weights of dry unit volume (WDUV), weights of wet unit volume (WWUV) and apparent porosity of artificial marble cubic samples

3. táblázat A mesterséges márvány próbakockák mért nedves testsűrűsége, száraz testsűrűsége és látszólagos porozitása

Table 4 summarizes the compressive strength, the ultrasound pulse velocity and the rebound index values corresponding to the artificial marbles produced.

Sample Number	Compressive strength N/mm <sup>2</sup>	Ultrasound pulse velocity Vp (m/s)	Rebound index
GY-1	106.13	3555	34
GY-2	98.69	3509	34
GY-3	91.21	3478	34
GY-4	72.17	3503	34
GY-5	64.93	3406	34
GY-6	83.51	3271	34
GY-7	82.29	3440	34
GY-8	97.11	3461	34
GY-9	71.86	3426	34
GY-10	61.16	3399	34
GY-11	76.32	3516	34
GY-12	68.88	3601	34

Table 4. Compressive strength, ultrasound pulse velocity and rebound index of artificial marble cubic samples

4. táblázat A mesterséges márvány próbakockákon mért nyomószilárdság, ultrahang terjedési sebesség és visszapattanási érték

Construction materials should have some physico-mechanical values required in building industry. Required values for natural building stones are summarized in Table 5

[9]. When we compared cultured marble with natural building stone, our results were found above the required values. Therefore, our produced artificial marbles can be safely used in the building industry as a constructional material.

TS	Standard Name	Used Place	Uniaxial compressive strength N/mm <sup>2</sup>
11137	Limestone	Floor covering	50 N/mm <sup>2</sup>
		Wall covering	30 N/mm <sup>2</sup>
10835	Andesite	Floor covering	100 N/mm <sup>2</sup>
		Wall covering	60 N/mm <sup>2</sup>
11135	Trachyte	Floor covering	80 N/mm <sup>2</sup>
		Wall covering	50 N/mm <sup>2</sup>
10449	Marble (calcium carbonate)	Floor covering	50 N/mm <sup>2</sup>
		Wall covering	30 N/mm <sup>2</sup>
11143	Travertine	Floor covering	48 N/mm <sup>2</sup>
		Wall covering	30 N/mm <sup>2</sup>

Table 5. Minimum values required by the uniaxial compressive strength (TS EN 1926) 5. táblázat Egytengelyű nyomószilárdság előírt legkisebb értékei (TS EN 1926)

#### 4. Conclusions

Large quantities of marble blocks are produced from many new marble quarries which were opened around Isparta (Turkey) and its surrounding region. Block efficiency of the quarries is low which results in a lot of waste materials that can be used in cultured marble production. The cultured marble is an attractive, healthy and homogenous building material. It has a wide application in the building sector. Artificial marble which is composed of mineral waste materials and polyester resins has high compressive strength, durable to various chemical and high temperature environmental conditions. Based on physico-mechanical properties, cultured marbles are accepted by the Turkish Standards (TS). Physico-mechanical properties of cultured marble depend on the physical properties of the filler minerals. The following analyses; wet unit volume analysis, dry unit volume analysis, compressive strength of the materials, capillary water absorption analysis, ultrasound pulse velocity analysis and the marble wastes bulk chemical analyses were carried out and the results were evaluated and discussed with respect to the physico-mechanical properties.

Tensile Strength	45	MPa	ISO 527
Breaking Elongation	1.3	%	ISO 527
Tensile Modulus	3800	MPa	ISO 527
Bending Strength	70	MPa	ISO 178
Bending Modulus	3900	MPa	ISO 178
HDT	95	°C	ISO 75A
Hardness	45	Barcol	934-1

Table 6. Various physico-mechanical values of resins 6. táblázat Műgyanták különféle fizikai/mechanikai jellemzői



Construction materials should have important physico-mechanical values required in building industry. When we compared our artificial marbles with natural building stones, our results all met the requirements. Therefore, our artificial marbles can be safely used in the building industry as a construction material. The artificial marbles are resistant to acids, alkalis and they are cheap and durable so there is a huge potential in them to be used in harsh environments. Artificial marble has anti-bacterial property so it has been widely used in baths, hospitals, hotels, restaurants. Artificial marble production has positive effect on environmental concerns by elimination of marble wastes as well.

## 5. Acknowledgments

Authors are thankful to Prof. Dr. Lütfullah Gündüz in Pumice Applied Research Center Manager of Suleyman Demirel University for the analyses of all of the physico-mechanical properties of the artificial marbles.

### References

- [1] Bilgin, A. – Özkahraman, T.: *Marble potential of Isparta and some related problems*. International Symposium on Engineering and Architectural Sciences, Balkan Caucasus and Turkic Republics. I, 22-24 October, Isparta, Turkey, pp. 231-237. 2009
- [2] Bilgin, N. – Yeprem, H. A. – Arslan, S. – Bilgin, A. – Günay, E. – Marşoğlu, M.: *Use of Waste Marble Powder in Brick Industry*. Construction and Building Materials, Issue 4, Vol. 29, pp. 449-457. 2012
- [3] Hussin, K. – Baharin, S. – Ghazali, Ç. M. R. – Idris, M. S. – Salleh, M. N. I. K. N.: *The Development Of Artificial Marble From Dolomite (Batu Reput) In Perlis*. KUKUM Engineering Research Seminar, 2006
- [4] Aruniit, A. – Kers, J. – Tall, K.: *Influence of filler proportion on mechanical and physical properties of particulate composite*. Agronomy Research Biosystem Engineering Special Issue 1, pp. 23-29. 2011
- [5] Lee, M. Y.: *Anti-bacterial self-cleansing stone slab and its manufacturing method*. TW Patent 189048. 2004
- [6] Berry, L. G. – Mason, B. – Dietrich, R. V.: *Mineralogy*. Freeman and Company, San Francisco, p. 459. 1983
- [7] Chen, T. W. – Ding, Y. C. – Chiu, J. P.: *A study of synthetic forsterite refractory materials using waste serpentine cutting*. Minerals Engineering, 15, pp. 271-275. 2002

- [8] Lee, M-Y. – Ko, C-H. – Chang, F-C. – Lo, S-L. – Lin, J-D. – Shan, M-Y. – Lee, J-C.: *Artificial stone slab production using waste glass, stone fragments and vacuum vibratory compaction*. Elsevier, Cement & Concrete Composites, 30, pp. 583-587. 2008
- [9] Yüçeturk, G.: *Yapay mermerde kullanılan kuvar ve kalsit minerallerinin fiziksel mekanik özellikleri*. Constructional Technology, V.2, 3, pp. 72-80. 2010

### Ref.:

A. Bilgin – G. Yuceturk – S. Arslan – N. Bilgin – S. Polat: *The effects of mineralogical and petrographical features of the Lake District rocks (Isparta, Turkey) on the quality of artificial marbles*. *Építőanyag*, 65. évf. 1. szám (2013), 21–25. p. <http://dx.doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2013.5>

### A Lake District kőzetek (Isparta, Törökország) ásványtani és kőzettani jellegzetességeinek hatása mesterséges márványok minőségére

Törökországban, Isparta város környezetében számos márványbánya nyílt az elmúlt évtizedekben. A helyenként számottevő karsztosodás miatt a kőzettömbök kitermelésének hatékonysága nem optimális, és nagy mennyiségű hulladék márvány töret keletkezik. A hulladék anyag depóniák jelentős vizuális szennyezést eredményeznek. A hulladék márvány alkalmas mesterséges márvány készítésére, poliészter gyantával kombinálva. A mesterséges márvány nagy tartósságú építőanyag, ellenáll agresszív kémiai hatásoknak és esetenként magas hőmérsékletnek is, ezért a Török Szabványok (TS) elfogadják a mesterséges márvány építőanyagként történő alkalmazását. A mesterséges márvány fizikai/mechanikai jellemzői elsősorban a márvány zúzalék és por jellemzőitől függenek, így azok kémiai elemzése kiemelt jelentőségű. A cikk az Isparta közelében elhelyezkedő egyes márványbányákból származó hulladék márvány felhasználásával készített mesterséges márvány minták vizsgálatát mutatja be. Elemzi a vízfelvételi, tömegeloszlási, porozitási, nyomószilárdsági, ultrahang terjedési és felületi keménységi vizsgálatok eredményeit, illetve bemutatja a vizsgálatokhoz kapcsolódó termogravimetriai és pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálatok egyes eredményeit. A bemutatott eredmények alátámasztják a megvizsgált mesterséges márványok építőipari alkalmazhatóságát.

**Kulcsszavak:** mesterséges márvány, poliészter gyanta, márványbánya, nyomószilárdság

## FOLYÓIRATSZEMLE

### A. Hellebois, A. Launoy, C. Pierre, M. De Lanève, B. Espion: 100-year-old Hennebique concrete, from composition to performance

Construction and Building Materials (Elsevier) ISSN 0950-0618, Volume 44 (2013) pp. 149-160.

A belga szerzők angol nyelvű cikke egy 1904-ben épült, 2010-ben elbontott vasbeton vasúti híd beton anyagának a vizsgálatát mutatja be. A híd (Viaduc Colo-Hugues) Belgiumban, Braine-l'Alleud városában épült Hennebique eredeti szabadalma alapján. A híd eredetileg egy 13-nyílású, 73 m hosszú, 3,80 m széles szerkezet volt, amelyet az 1960-as évektől nem használtak, és a vizsgálatok időpontjában már csak öt nyílása volt meg. A 106 éves szerkezet korához képest jó állapotban volt a vizsgálatok időpontjában annak ellenére, hogy a Hennebique-féle kivitelezési technológia (pl. távtartókat nem használtak a betonacélok elhelyezésekor) következtében már a kivitelezés során kialakultak káros elváltozások (kis betonfedés a pontatlan betonacél elhelyezés miatt; fészkes, rosszul bedolgozott beton stb.). Elvégezték a nyomószilárdság, hasító-húzószilárdság, rugalmassági modulus, testsűrűség, vízfelvétel, karbonátosodási mélység, klorid-ion tartalom, cement tartalom

vizsgálatát. Az adalékanyag feltárását követően annak szemeloszlási és petrográfiai jellemzőit is meghatározták. Az eredmények szerint a szerkezeti elemek cement tartalma ( $c$ ,  $\text{kg/m}^3$ ) és nyomószilárdsága ( $f_{cm}$ , MPa) változott volt: pillérek  $c = 131-144 \text{ kg/m}^3$  és  $f_{cm} = 19,7 \text{ MPa}$ ; gerendák  $c = 247-273 \text{ kg/m}^3$  és  $f_{cm} = 34,6 \text{ MPa}$ ; lemezek  $c = 291-308 \text{ kg/m}^3$  és  $f_{cm} = 54,2 \text{ MPa}$ . A petrográfiai vizsgálatok szerint az adalékanyag egy, a közelben megtalálható, nagy szilárdságú, de erózióra hajlamos, andezit-dácit típusú, porfiros kőzetanyagból készülhetett. A szemeloszlási vizsgálatok szerint az adalékanyag 0,5 mm/2,0 mm frakciója csaknem teljesen hiányzott a keverékből, ezzel szemben a 0,25 mm/0,5 mm frakció a napjainkban megszokottnál nagyobb mennyiségben került a betonba. A karbonátosodás átlagos mélysége 18,6 mm volt a pilléreknél, 18,7 mm volt a gerendáknál és 8,3 mm volt a lemezeknél. A betonacélokat a karbonátosodás mélysége csak kevés helyen érte el. A szerkezeti beton klorid-ion tartalma a kritikus klorid-ion tartalom (0,4 m%/cement) egy tizedét sem érte el, amely a korabeli kalcium-klorid adalékszerből származott. A vizsgálatok bizonyították, hogy a XX. század elején elérhető anyagokkal és technológiákkal is lehetett nagy tartósságú betonszerkezeteket építeni abban az esetben, ha az anyagválasztás, a tervezés és a kivitelezés megfelelő és gondosan ellenőrzött volt.

# Betonszerkezetek korrózióállóságának biztosítása innovatív szálerősítésű polimer (FRP) anyagokkal

**BOROSNYÓI Adorján** ■ BME Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék  
 ■ adorjan.borosnyoi@gmail.com

Érkezett: 2013. 04. 11. ■ Received: 11. 04. 2013. ■ <http://dx.doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2013.6>

## Corrosion resistant concrete structures with innovative Fibre Reinforced Polymer (FRP) materials

Development and application of Fibre Reinforced Polymer (FRP) reinforcements in concrete structures have been accelerated in the last three decades. Durability of FRP reinforcements is expected to exceed that of conventional steel reinforcements as FRP reinforcements do not tend to corrode. Present paper intends to review experiences on characteristics of fiber reinforced polymers (FRP) for civil engineering applications and to discuss design considerations by applying FRP bars or tendons embedded in concrete as prestressed or non-prestressed reinforcement. Test results on FRP indicate high tensile strength, high fatigue strength as well as low relaxation and creep. Design recommendations are based on work carried out more than fifteen years ago on first generation reinforcing products. Design guidelines are necessary to enable the use of new materials, they should be made flexible enough to accommodate future developments and facilitate the quick adoption of innovative products. Present paper, therefore, introduces the most recent European research action (COST TU1207) that aims to develop a new generation of design guidelines for FRP materials based on European Standards.

Keywords: durability of concrete structures, Fibre Reinforced Polymers, FRP, COST TU1207

Kulcsszavak: vasbeton szerkezetek tartóssága, szálerősítésű polimerek, FRP, COST TU1207

## 1. Bevezetés

A szálerősítésű polimerek (FRP) építőmérnöki alkalmazása rendkívüli mértékben felgyorsult az elmúlt 15-20 évben. Ennek egyik oka, hogy a szálerősítésű polimerek (FRP) anyagai és előállítási költségei egyre alacsonyabbak évről-évre, illetve, hogy a szálerősítésű polimerek (FRP) számos nagyon kedvező tulajdonsággal rendelkeznek a hagyományos építőanyagokkal szemben. A leggyakrabban említett kedvező tulajdonságok, elsősorban az acéllal összehasonlítva a következők:

- teljes mértékű ellenállás az elektrokémiai korrózióval szemben,
- kedvezőbb szilárdság-önsúly arány,
- kiemelkedő tartósság a környezeti hatások legszélesebb skáláján,
- könnyű és gyors építhetőség, flexibilitás,
- nem mágnesezhetőség,
- kiemelkedő fáradási szilárdság, különösen a szénszálal anyagok esetén,
- kis hőtágulás és kis hővezető képesség,
- a mechanikai jellemzők változtatásának széles körű lehetősége különféle szálak és ágyazóanyagok kombinációjával.

Ezek az előnyök a szálerősítésű polimer (FRP) anyagok egyre szélesebb körű elterjedését eredményezik az építőiparban is, és a következő alapvető szerkezeti alkalmazások kifejlesztéséhez vezettek:

- szálerősítésű polimer (FRP) rudak bebetonozott betétként történő felhasználása nem-feszített vagy feszített betonszerkezetek építéséhez,

- szálerősítésű polimer (FRP) szalagok, lemezek, szövetek és betétek külsőleg, utólagosan elhelyezett felhasználása szerkezetek megerősítéséhez kő, beton, vasbeton, feszített vasbeton, acél, fa és falazott szerkezetekhez,
- szálerősítésű polimer (FRP) elemek és panelek felhasználása teljes egészében kompozit, vagy betonkompozit, acél-kompozit, fa-kompozit öszvér szerkezetekhez.

Azt is fontos felismerni, hogy az előnyös tulajdonságaik mellett a szálerősítésű polimer (FRP) anyagoknak kedvezőtlen tulajdonságai is vannak, amelyek az építőmérnöki alkalmazások erőteljes terjedésének az akadályát jelenthetik. Ezek között elsőként a magasabb anyagárat szokták említeni, amely valóban többszöröse a szerkezeti acél árának. Azonban, ha egy szerkezet teljes élettartam költségeit vizsgáljuk meg, akkor a szálerősítésű polimer (FRP) anyagok kiemelkedő tartósságának köszönhetően gyakran ezekkel az anyagokkal valósítható meg a leggazdaságosabb megoldás. Ezen kívül további megtakarítások érhetők el a gyorsabb építés lehetőségén keresztül, amely a kifejezetten idő-kritikus munkák esetén fontos tényező, elsősorban javításoknál és megerősítésekénél, ahol az üzemszünet vagy az ennek következtében létrejövő termelés kiesés költségei nagyon jelentősek is lehetnek. Hátrányként lehet még említeni, hogy a szálerősítésű polimer (FRP) anyagok hosszú távú tartósságáról viszonylag kevés vizsgálati adat áll rendelkezésre, hogy a szálerősítésű polimer (FRP) anyagok tűzállósága rendszerint gyenge, illetve, hogy az általános építőmérnöki gyakorlat számára a szálerősítésű polimer (FRP) anyagok viszonylag különlegesnek és kevésbé elfogadottnak számítanak. A tapasztalatok bővülésével azonban egyes, jelenleg még hátrányosnak ítélt tulajdonságok átértékelhetőek lesznek a jövőben.

**BOROSNYÓI Adorján**

Okl. építőmérnök, PhD, egyetemi docens a BME

Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszékén.

Főbb kutatási területei: vasbetonszerkezetek használhatósági határállapotai, szálerősítésű

polimer (FRP) anyagok alkalmazása

betonszerkezetekhez, tapadás betonban,

roncsolásmentes anyagvizsgálatok.

Az építőanyag folyóirat felelős szerkesztője.

Az SZTE Beton Szakosztály elnöke. A fib TG4.1

„Serviceability Models” munkabizottság titkára.

## 2. A vasbeton tartóssága

A vasbeton szerkezeti anyag, illetve elődje a *ferrocement* (acélhuzal háló erősítésű cementkő), több mint 150 éves múlt-ra tekint vissza. 1849-ben Joseph *Monier* francia virágkertész acélhuzallal erősített cementkőből készített virágtartó edényeket. 1852-ben Francois *Coignet* francia iparos acélbetétekkel erősített betonnal kísérletezett, majd 1853-ban Párizsban megépített – a világon elsőként – egy vasbeton tartószerkezetű lakóházat. Módszerét egy évvel később szabadalmaztatta. Ugyancsak 1854-ben William Boutland *Wilkinson* Nagy-Britanniában jegyeztette be szabadalmát vasbeton szerkezetekre, és Newcastle környékén épített lakóházakat módszerével. Az 1855. évi párizsi *Exposition Universelle* világiállításon nyilvánosan is bemutatkozott az új építőanyag: *Coignet* szabadalma mellett Louis *Lambot* francia gazdálkodó is megmutatta ferrocement csónakját. *Monier* csak az 1867. évi világiállításon jelent meg különféle ferrocement tárgyakra vonatkozó szabadalmával. Bár e feltalálók némelyike nem is volt mérnök, megfigyeléseikkel és kiváló műszaki érzékükkel megalkottak egy új, összetett építőanyagot, amelyből napjainkra a legnagyobb tömegben használt szerkezeti anyag lett. *Monier* szabadalmában kiemelte, hogy a cement megvédi az acélt az oxidációtól és *korlátlan tartósságot* jósolt a ferrocement szerkezeteknek [1].

A vasbeton feltalálása után 100 évvel már ismert volt a mérnökök számára, hogy a *Monier* által feltételezett korlátlan tartósság csak addig biztosított, amíg a cementkő kémhatása nem csökken az acélbetétek környezetében pH 9 érték alá, azaz pl. a *karbonátosodás* (a cementkő kalcium-hidroxid tartalmának kalcium-karbonáttá alakulása a levegő szén-dioxid tartalmának hatására) nem éri el az acélbetétek mélységét.

A vasbeton rendkívül tartós is lehet, amennyiben a tervezés, a kivitelezés (bedolgozás, utókezelés) és a fenntartás megfelelő. A cementkő lúgos kémhatása mellett (a cement hidratációja során ugyanis nagy mennyiségű szabad  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  szabadul fel) a bebetonozott acélbetétek felületén korrózió ellenálló passzív réteg alakul ki. Ez a passzív réteg mindaddig védi az acélbetéteket, amíg a környező beton kémhatása  $\text{pH} > 9$ .

Tehát a korrózió kialakulásához betonban *négy tényezőnek együttesen* kell jelen lennie, amelyek a következők:

- 1) korrózióra alkalmas anyag (pl. gyengén ötvözött, melegen hengerelt betonacél),
- 2) oxigén,
- 3) víz (utóbbi kettő a kapilláris pórusokon keresztül képes a betonba hatolni),
- 4) a beton kémhatásának  $\text{pH} 9$  alá csökkenése (ez utóbbi a légkör  $\text{CO}_2$  tartalmának hatására a cementkő karbonátosodása révén minden, levegővel érintkező beton-szerkezetenél létrejön bizonyos mélységig; minél kisebb a cementkő porozitása, annál kisebb a karbonátosodás mélysége).

További korróziós veszélyt jelentenek a betonba hatoló, a korróziós folyamatot katalizáló *klorid-ionok* (jégmentesítő sózásból vagy tengervízből).

A korrózió kialakulása elkerülhető, ha a fenti négy tényező bármelyikét kizárjuk a folyamatból. Így a korrózió elkerülésének ígéretes megoldását jelenti például a *korrózióálló, szálerősítésű*

*polimer (FRP) betétek alkalmazása*. Ily módon magát a korrodáló anyagot, az acélt vonjuk ki a korróziós folyamatból.

Már az 1950-es években megkezdődtek azok a kutatások, amelyek a beton és vasbeton szerkezetek tartósságának fokozását célozták. E kutatások egyik irányataként 1959-ben jelent meg az első publikáció, amely fölvetette az *acélbetétek helyettesítését* üvegszálalás polimer (GFRP) anyagú rudakkal [2]. Az úttörő jellegű javaslat azonban hosszú ideig nem talált folytatásra, mert a beton és a szálerősítésű polimer rudak között a *megfelelő tapadást* nem sikerült biztosítani.

## 3. Szálerősítésű polimerek az építőiparban

Az építőmérnöki gyakorlatban a betonszerkezetekhez felhasznált szálerősítésű polimer (FRP) betétek, szalagok és szövetek párhuzamosan futó (unidirectional), nagy szilárdságú szálakkal készülnek (szövetek esetében előfordul két irányban és négy irányban teherhordó szál-elrendezés is). Az FRP anyagok húzószilárdsága általában jelentősen meghaladja az acélbetétek húzószilárdságát, emellett azonban a szakadási nyúlásuk az acélé alatt marad. Ezek a különbségek a keresztmetszetek méretezésére jelentős hatást gyakorolnak.

Acélbetétek helyettesítése céljából mindig olyan szálerősítésű polimer rudakat használunk, amelyekben a teherviselő, nagy húzószilárdságú szálak azonos irányban, a rúd tengelyével párhuzamosan futnak. A szálerősítésű polimer betétek előállítására legáltalánosabb az ún. *pultrúziós eljárás*. A művelet első lépéseként a tekercselt, vagy egyéb módon szállított szálak irányítottóságát, párhuzamosságát állítják be, majd a szálköteget az ágyazóanyag fürdőbe mártást követően autoklávon húzzák keresztül, amelyben az ágyazóanyag bevonat előírt hőmérsékleten és nyomás alatt térhálósodik, megszilárdul. A betonszerkezetek használati hőmérséklet tartományában ( $-25^\circ\text{C} \dots +65^\circ\text{C}$ ) az ágyazóanyagok üvegszerű állapotban vannak. A pultrúziós gyártással előállított, javarészt sima felületű rudak tapadása betonban nem megfelelő, ezért a méretre vágást megelőzően a betétek különféle felületkezelésben részesülnek. A jobb tapadás elérésének egyik lehetősége a sima felületű betétek homokhintéssel való ellátása, azaz nagy szilárdságú ragasztóval finom kvarchomok vagy alumínium-oxid szemcsék ráragasztása a felületre. Másik lehetőség a felületi egyenetlenségek vagy profilok kialakítása a betétek felületén. Ezek lehetnek spirális alakban feltekercselt és préseléssel felragasztott FRP kötegek, vagy speciális nagy szilárdságú kerámiából készített borda profilok, amelyek az acélbetétekhez hasonló külsőt kölcsönöznek az FRP betétnek. Az utólag elhelyezett rétegeknél fontos a megfelelő kémiai kötés biztosítása a külső és belső rétegek között, hogy lehetőleg ne alakuljon ki a bordák elnyíródásával vagy leszakadásával járó tönkremenetel. Bordás FRP betétek homokhintéssel is kerülnek forgalomba.

Az FRP betétek elektrolitikus *korrózióra nem hajlamosak*, így a hagyományos acélbetétek tartósságát messze meghaladó tartósságúak. Mivel az üvegszálak nem lúgállóak, a betonban alkalmazásuk fokozott figyelmet igényel, azonban az aramid és szénszálak esetén ilyen kérdés nem merül föl. Húzószilárdságuk és fáradási szilárdságuk általában meghaladja a nagyszilárdságú szerkezeti acélokét, emellett relaxációjuk és kúszásuk általában kisebb, mint az acéloké, így alkalmasak feszített be-



tonszerkezetek építésére is. FRP betétek mechanikai tulajdonságait a hazai szakirodalom is ismerteti [3].

Az építőmérnöki gyakorlatban az 1990-es évek óta vannak jelen az FRP betétek, és csak a hídépítés területén már több mint száz azon (híd)szerkezetek száma a világon, amelyekben FRP betéteket építettek be acélbetétek részleges vagy teljes körű helyettesítésére. Ezek egy része gyalogos- ill. kerékpárhíd, másik része közúti ill. autópálya híd, de találunk köztük elektromágneses lebegtetésű vasút hídgerendáit is. E hídszerkezetek kevés kivételtől eltekintve Japánban és Észak-Amerikában található, az európai alkalmazások száma tíz körüli [4-11]. Az elmúlt húsz év tapasztalatai rendkívül kedvezőek.

## 4. FRP betétek alapanyagai

Az FRP betétek nagy, általában 60–65V% száltartalommal rendelkező szálerősítésű polimerek. Szilárdsághordozó részeik a *szálak*, amelyeket polimer gyanta *ágyazóanyagba* ágyazunk. Az építőmérnöki alkalmazásokban megjelenő száltípusok a szén (grafit), az üveg és az aramid (aromás poliamid) szálak, illetve az utóbbi években a bazalt szálak. Ágyazóanyagként leggyakrabban epoxi, poliészter és vinilészter gyantákat alkalmaznak.

### 4.1 Ágyazóanyagok

Ágyazóanyagként hőre keményedő műanyagokat alkalmazunk az alacsonyabb ár és a megfelelőbb feldolgozhatóság miatt [12]. Legnagyobb mennyiségben epoxigyantákat használunk, amelyeknek előnye, hogy nagy szilárdságú, viszonylag jó hőállóságú szálerősített termékek állíthatók elő ezekkel, azonban az epoxigyanták a beton erősen lúgos kémhatásával szemben nem minden esetben ellenállóak. Telítetlen poliésztergyantákat, vinilészter, modifikált uretán és polietilén alapú műgyantákat is alkalmazhatunk, amelyek szintén kisebb hőmérsékleten, kis nyomáson kikeményíthetők, a szálakhoz jól tapadnak, azonban hőállóságuk csak 200°C-ig növelhető [13]. A beton lúgos kémhatásával szemben kiemelkedő ellenállása van a vinilészter gyantáknak.

Az ágyazóanyag szerepe nem csupán a szálak összetartása és a terhek elosztása a szálak között (különös tekintettel az esetlegesen elszakadt szálak terheinek továbbítására), hanem azok fizikai védelme is a keresztirányú hatásoktól (mivel a szálak keresztirányban sokkal kisebb szilárdságúak mint hosszirányban, a molekulák tengelyirányú orientációja miatt) [14].

Az FRP betétek ágyazóanyagainak dermedési/folyási hőmérséklete 120...140 °C feletti. *Rövid idejű terhelésre közel lineárisan rugalmasan, míg tartós terhelésre viskoelasztikusan viselkednek.* Két ágyazóanyag mechanikai jellemzőit az 1. táblázatban hasonlíthatjuk össze.

	Poliésztergyanta	Epoxigyanta
<b>Szakítószilárdság (N/mm<sup>2</sup>)</b>	450...800	600...800
<b>Rug.modulus (kN/mm<sup>2</sup>)</b>	20...30	30...40
<b>Sűrűség (kN/m<sup>3</sup>)</b>	12...14	12...13
<b>Lin. hőtág. e. h. (10<sup>-6</sup> 1°C)</b>	110...140	60...95
<b>Tartós hőállóság (°C)</b>	100	110...130

1. táblázat Ágyazóanyagok tulajdonságai [13]  
Table 1. Properties of resins [13]

### 4.2 Üvegszál

Az üvegszálak kifejlesztésétől, az elmúlt évszázad 30-as éveinek végétől kezdve az üvegszál-erősítésű polimer szerkezetek, tartószerkezetek fejlődése ugrásszerű volt, egészen a hetvenes évekig. A 70-es évek olajválsága a polimerek árát megnövelte, ezzel gátját képezve a tömeges alkalmazásnak, azonban a fejlesztések ma is tovább folynak. Nem szabad megfeledkeznünk arról, hogy az üvegszálakhoz leggyakrabban alkalmazott ún. E-üveg (boroszilikátüveg) *nem alkáliálló*, így a beton erősen lúgos kémhatásának (pH 12–13,5) külön védelem nélkül ellenállni nem képes. Lúgos környezetben az alkáliálló, ún. AR (Alkaline Resistant), nagy ZrO<sub>2</sub> tartalmú üvegszálak károsodása sem teljesen kizárt [15]. Emiatt az elmúlt évszázad 90-es éveiben némileg visszaesett az üvegszálak betétként történő alkalmazása, és felerősödött az alkáliálló szálak kutatása.

Az üvegszálakat 10 µm körüli átmérővel gyártják [16]. A különböző adalékokat tartalmazó üvegolvadékot platina lemezre folytatják, amelyen több száz darab, 1-2 mm átmérőjű furat van, majd az egész köteget megfogva azt olyan sebességgel húzzák, hogy a kívánt, 10 µm körüli szálátmérő kialakuljon. Ügyelni kell, hogy a szálak egymással ne érintkezzenek, mert az károsodásukhoz vezet. Ezt bevonószerekkel érik el. A kész szálakat feltekerceslik szállításhoz. Üvegszálak mechanikai jellemzőit a 2. táblázatban foglaltuk össze.

### 4.3 Aramidszál

Az üvegszálak polimer betétekkel szerzett első tapasztalatokkal egy időben kezdődött egyéb szintetikus szálak kifejlesztése a vegyiparban. Ezek egyike az *aramid*, amely krisztallitos szerves vegyületből, aromás poliamidból áll. Az aramid nagy húzószilárdságú és rugalmassági modulusú mesterséges szerves szál, így mérnöki alkalmazásra kiválóan alkalmas. Gyártási eljárására (PPD, illetve TDC monomerek polikondenzációja) jelen tanulmányunk keretein belül nem térünk ki [17,18].

Erős savak és lúgok idővel az aramid másodlagos kötéseit roncsolják, ami az anyag degradálódását (= polimerizációs fok csökkenése a mechanikai tulajdonságok romlása mellett) eredményezheti. Ezért úgy fogalmazhatunk, hogy az aramidszál-erősítésű polimer (AFRP) betétek a betonszerkezetek használati időtartama alatt tekinthetők alkáliállóknak.

Aramid szálak 10-12 µm körüli szálátmérővel és különböző rugalmassági modulusokkal készülnek. Rugalmassági modulusuk szerint megkülönböztethetünk normál rugalmasságú NM (E = 70-80 kN/mm<sup>2</sup>), közepes rugalmasságú IM (E = 90-100 kN/mm<sup>2</sup>) és nagy rugalmasságú HM (E = 120-180 kN/mm<sup>2</sup>) aramidokat. A különböző gyártók aramid termékeit eltérő márkánévvvel hozzák forgalomba (pl. Kevlar® - DuPont; Twaron® - AKZO; Technora® - Teijin, stb.). Aramidszálak mechanikai jellemzőit a 2. táblázatban láthatjuk.

### 4.4 Szénszál

A CFRP betétekben használatos szálakat nagy molekulájú polimerből: poli-akril-nitrilből (PAN), vagy kőszénkátrányból (coal tar pitch) állítják elő [14,19]. A PAN alapú szálak drágábbak és a grafitosítási eljárásuk is idő-, és energiaigényesebb, de jobb minőségű terméket eredményez. A kőszénkátrány alapú

szálak szilárdsági tulajdonságai általában mintegy 20%-kal maradnak alatta a PAN alapú szálakénak.

A szál maga szintén kompozit, ugyanis nem a teljes széntartalom van jelen grafitkristályok formájában. Minél nagyobb a grafitkristályok aránya, annál nagyobb a szál rugalmassági modulusa. A grafitkristályokat gyártás közben nyújtják, így a molekulalánc párhuzamos lesz a szál tengelyének irányával, majd ezt a helyzetet rögzítik vegyi folyamatokkal.

Bár a *szén és grafit* elnevezést egyaránt használhatjuk a szálak megnevezésére, van köztük különbség, mégpedig az anyag homogenitásában. Ugyanis, amíg a *szénszálak* 93...95% széntartalmúak, addig a *grafitszálak* széntartalma többnyire meghaladja a 99%-ot. Nagy szilárdságú szénszálak polimer szerkezeti elemek általában grafitszálak felhasználásával készülnek. A legnagyobb különbség a két termék hőkezelésében van, ugyanis ha a szálakat magasabb hőmérsékleten nyújtják, a rugalmassági modulus növelhető. A szénszálak grafitosítási eljárása 1300°C-on történik, a grafitszálaké pedig 2000...3000°C-on. A grafitszálak nagy szilárdságúak és rugalmassági modulusúak [16].

Kétféle típust különítenek el a szálak között: a kisebb rugalmassági modulusúval de nagy szilárdsággal rendelkező HT-típus (HT= high tension) és a nagyobb rugalmassági modulusú, de kisebb szilárdságú HM-típus (HM= high modulus). A szilárdság és a rugalmassági modulus egymással fordított arányban állnak. Szénszálak mechanikai jellemzőit a 2. táblázatban láthatjuk.

	üvegszál	aramidszál	szénszál
<b>Húzószilárdság (N/mm<sup>2</sup>)</b>	2300-4500	3000-3600	2300-7000
<b>Rug. modulus (kN/mm<sup>2</sup>)</b>	72-87	63-180	150-800
<b>Szakadónyúlás (%)</b>	2,6-5,7	2,0-4,1	0,3-1,8
<b>Poisson tényező (-)</b>	0,22	0,33-0,38	0,35
<b>Lineáris hőt. Hosszir.</b>	5-15	-6,0 ... -2,0	-0,9 ... +0,7
<b>e.h. (1/°C) Keresztir.</b>	5-15	55-60	8-18
<b>Térf. súly (kN/m<sup>3</sup>)</b>	24-25	13,9-17,8	17-19

2. táblázat Szálak mechanikai tulajdonságai  
Table 2. Mechanical properties of fibres

## 5. FRP betétek mechanikai tulajdonságai

Az FRP betétek – többek között inhomogenitásuk következtében – az acélbetétektől eltérően viselkednek. Az inhomogenitás nem csupán abból adódik, hogy az anyag szálerősítésű, hanem abból is, hogy a gyártás során a betétek külső rétegét általában ágyazóanyagban sokkal gazdagabbá teszik a különböző felületkezelési eljárások (homokhintés, bordák elhelyezése, stb.) miatt, vagy egyszerűen csak a szálak védelme érdekében. Így kialakul a betétekben egy belső, nagyobb száltartalommal rendelkező, tengelyirányban teherhordó mag.

A betétek hosszirányú tulajdonságait alapvetően a szálak határozzák meg, míg a keresztirányú viselkedést az ágyazóanyag is jelentősen befolyásolja. Az FRP betétek hossz- és keresztirányú jellemzői ezért lényegesen eltérnek egymástól.

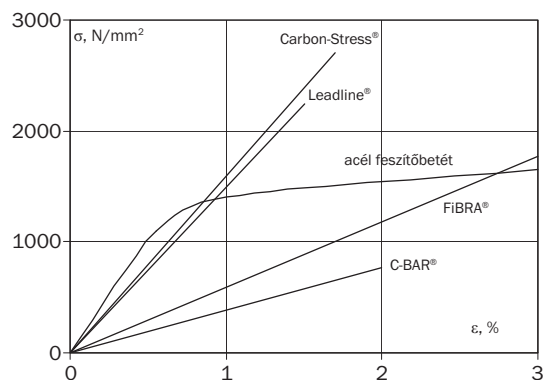
Az FRP betétek húzószilárdsága és rugalmassági modulusa a szálak típusától, a szálak hosszteneggel bezárt szögétől, a száltartalomtól, a keresztmetszet alakjától és az ágyazóanyag

típusától függenek. A húzószilárdságot ezen kívül még a betétek átmérője is befolyásolja (acélbetéteknél ilyen hatás nincs), mert a keresztmetszet közepén lévő szálak kevésbé vesznek részt a teherviselésben, mint a keresztmetszet széleihez közelebb esők. A betétek felületén, a betonról átadódó nyíróerő hatására az egyes elemi szálakban eltérő alakváltozás (feszültség) ébred az ágyazóanyag alakváltozóképesége miatt. Így nagyobb átmérőjű betétek fajlagos húzószilárdsága kisebb (vagyis a szilárdság növekedése csökkenő tendenciájú az átmérő növelésével).

Az FRP betétek lényeges tulajdonsága, hogy statikus terhelés hatására lineárisan rugalmasan viselkednek egészen a tönkremenetelig, majd ridegen szakadnak. Folyási jelenséget nem mutatnak.

FRP betétek húzószilárdsága 700-3500 N/mm<sup>2</sup>, rugalmassági modulusa 38000-300000 N/mm<sup>2</sup>, szakadónyúlása 0,8-4,0% tartományban lehet. Az 1. ábrán különböző FRP betétek és egy acél feszítőpászma jellegzetes  $\sigma - \epsilon$  diagramjait láthatjuk (Leadline® és Carbon-Stress® szénszálak betétek, FiBRA® aramidszálak betét, C-BAR® üvegszálak betét) [3].

Szálerősítésű polimeren minden anyagjellemző (szilárdság, rugalmassági modulus, Poisson-tényező, stb.) irányfüggő, azaz a vizsgált irány és a szálak tengelye által bezárt szög függvénye. Az anyagjellemzők általában szélső értékeket vesznek fel a szálak tengelyével párhuzamosan ( $\phi = 0^\circ$ ), illetve a szálak tengelyére merőlegesen ( $\phi = 90^\circ$ ) vizsgálva.



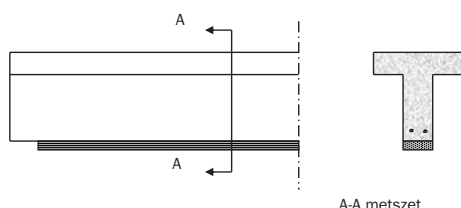
1. ábra FRP betétek  $\sigma - \epsilon$  ábrái [3]  
Fig. 1.  $\sigma - \epsilon$  diagrams of FRP reinforcements [3]

## 6. További alkalmazási lehetőségek

Az 1990-es évektől kezdve egyre nagyobb mennyiségben használunk föl az építőmérnöki gyakorlatban szálerősítésű polimer (FRP) anyagokat szerkezetek javítása és megerősítése során is. A szálerősítésű polimer (FRP) anyagokat kő, falazott szerkezetek, beton, vasbeton, feszített vasbeton, acél, alumínium és fa anyagú szerkezetek javítása és megerősítése során alkalmazták sikerrel. A szálerősítésű polimer (FRP) anyagok az acélbetétek, feszítőbetétek helyettesítésén túlmenően felhasználhatók a megépült vasbeton szerkezetek hajlítás-, nyírási- és nyomási teherbírásának a növelésére is. A megerősítés során többnyire a szálerősítésű polimer (FRP) szalagokat vagy szövetet a betonfelületre ragasztjuk (EBR = Externally Bonded Reinforcement), vagy utólagosan kialakított horonyba ragasztva (NSMR = Near Surface Mounted Reinforcement) helyezük el.

### 6.1 Hajlítási megerősítés

A szálerősítésű polimer (FbRP) anyagok gerendák alsó oldalsó felületeire, illetve lemezek alsó felületére rögzíthetők ragasztóanyaggal. A szálerősítésű polimer (FRP) anyag a szerkezet húzási vasalásának kapacitását kiegészítve növeli a hajlítási teherbírást. A szálerősítésű polimer (FRP) anyagokat úgy helyezük el, hogy a szálak a gerenda tengelyével párhuzamosan, illetve a lemez megerősíteni kívánt teherhordási irányával párhuzamosan helyezkedjenek el. Egy gerenda megerősítés sémáját mutatja a 2. ábra.

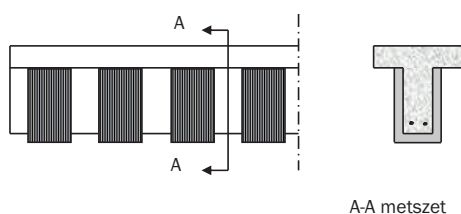


2. ábra Vasbeton gerenda hajlítási megerősítésének sémája szálerősítésű polimer (FRP) szalag alkalmazása esetén

Fig. 2. Schematic representation of a reinforced concrete beam strengthened in flexure by FRP strips

### 6.2 Nyírási megerősítés

A szálerősítésű polimer (FRP) anyagokat gerendák oldalsó felületein (esetenként az alsó és oldalsó felületeket is érintve, U-alakban) helyezük el, illetve pillérek esetén a kengyelek vonalát követve, vagy a teljes felületet befedően alkalmazzuk. A szálerősítésű polimer (FRP) anyag a szerkezet nyírási vasalásának, kengyeleinek kapacitását kiegészítve növeli a nyírási teherbírást. Egy gerenda megerősítés sémáját mutatja a 3. ábra.

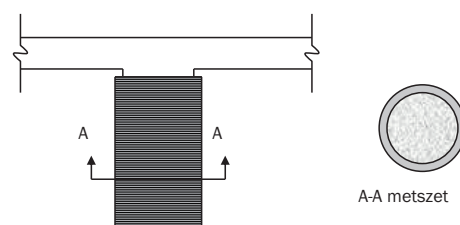


3. ábra Vasbeton gerenda nyírási megerősítésének sémája szálerősítésű polimer (FRP) szövet alkalmazása esetén

Fig. 3. Schematic representation of a reinforced concrete beam strengthened in shear by FRP sheets

### 6.3 Oszlopok megerősítése

Vasbeton oszlopok megerősítése során abroncsszerűen helyezük el a szálerősítésű polimer (FRP) szalagokat vagy szövetet a betonfelületen. Terhelés közben a nyomott szerkezetek keresztirányban méretnövekedést szenvednek el, amelyet az elhelyezett szálerősítésű polimer (FRP) anyagok gátolnak. A gátolt alakváltozás miatt a betonban háromtengelyű (triaxiális) feszültségállapot alakul ki. A teherbírás növekedése ezzel valósul meg, ugyanis a beton háromtengelyű feszültségállapotban számottevően nagyobb nyomószilárdsággal és nagyságrendekkel nagyobb törési összenyomódással bír, mint egytengelyű feszültségállapot esetén. Oszlopok megerősítése során a szálak iránya az esetek többségében merőleges a szerkezeti elem tengelyének irányára. Egy oszlop megerősítés sémáját mutatja a 4. ábra.



4. ábra Vasbeton oszlop megerősítésének sémája szálerősítésű polimer (FRP) szövet alkalmazása esetén

Fig. 4. Schematic representation of a reinforced concrete column strengthened by FRP sheets

### 6.4 Módszerek

A szerkezetek megerősítésére használt szálerősítésű polimer (FRP) anyagok beépítésének a módszereit alapvetően két csoportba, a nedves eljárások (*wet lay-up*) és a száraz eljárások (*dry lay-up*) közé szokás sorolni. A nedves eljárás során, jellegzetesen szálerősítésű polimer (FRP) szövet felhasználása történik, amikor a szálanyagot a beépítés helyszínén vonják be epoxigyantával, és a gyantával átítatott „nedves” állapotban történik a beépítés. A felhordott epoxigyanta szolgál egyben a szálerősítésű polimer (FRP) ágyazóanyagául, illetve a megerősítési rendszer ragasztóanyagául. A száraz eljárás során a kikeményített, szálerősítésű polimer (FRP) szalagokat, vagy a „száraz”, előimpregnált szövetet epoxigyanta ragasztóanyaggal ragasztják a megerősítendő szerkezet felületére. Ez utóbbi eljárás hasonlít leginkább az évtizedekkel korábban kifejlesztett, felragasztott acél szalagos megerősítésre, és részben hordozza is annak azt a hibáját, hogy sokkal kevésbé flexibilisen működő megerősítési módszer, mint a szálerősítésű polimer (FRP) szövetek felhordása nedves eljárással.

Ki kell hangsúlyozni, hogy a szálerősítésű polimer (FRP) anyagokkal történő megerősítés jellegzetesen tapadás-érzékeny alkalmazás, ami azt jelenti, hogy a megerősítendő szerkezet felületének fogadóképesnek kell lennie a szálerősítésű polimer (FRP) anyagok epoxigyantával történő rögzítéséhez.

A terület szakirodalmi gazdag. Az érdeklődő olvasó további részleteket talál pl. [20,21] irodalomban.

### 7. Szabványosítási törekvések

A szálerősítésű polimer (FRP) anyagok építőmérnöki alkalmazási lehetőségeinek vizsgálatára 1987-ben a Japán Építőmérnökök Szövetsége (JSCE, Japan Society of Civil Engineers) és a Kanadai Építőmérnökök Szövetsége (CSCE, Canadian Society of Civil Engineers) egy-egy munkabizottságot alakított, amelyek 1991-ben és 1992-ben jelentették meg első tanulmányaikat. Az Amerikai Betonszövetség (ACI, American Concrete Institute) 1992-ben, a Nemzetközi Betonszövetség (*fib*, fédération internationale du béton) 1996-ban alapította meg hasonló bizottságait. Kanadában 1995-ben létrehozták az ISIS Canada Research Network kutatóhálózatot, amelynek elsődleges célja a szálerősítésű polimer (FRP) anyagok építőmérnöki alkalmazási lehetőségeinek vizsgálata volt. Az első alkalmazási, méretezési javaslat sorozatot 1996-ban adták ki Japánban, majd ezt további országokban újabbak követték: 1999 Egyesült Királyság, 1999 Svédország, 2001 Kanada, 2001 Egyesült Államok, 2002 Hollandia, 2004 Olaszország,



2008 Ausztrália. A Nemzetközi Betonszövetség (*fib*) 2000-ben, 2001-ben és 2007-ben adott ki olyan Bulletin-eket, amelyek a szálerősítésű polimer (FRP) anyagok betonszerkezetekhez történő alkalmazási lehetőségeit tárgyalta. A Nemzetközi Betonszövetség (*fib*) legújabb mintaszabványát, a *fib* Model Code 2010 végleges verzióját 2013-ban adták ki, amely már tartalmaz FRP anyagokra vonatkozó szakaszokat. A jelenleg érvényben lévő Eurocode szabványokból azonban egyelőre hiányoznak az FRP anyagok alkalmazására vonatkozó fejezetek.

A bemutatott tudományos bizottsági munka mellett sok ezer konferencia cikk és folyóirat cikk is napvilágot látott az elmúlt évtizedekben, amely a téma iránti jelentős érdeklődés mellett azt is bizonyítja, hogy a területen folyamatos a kutatás és a fejlesztés nemzetközi szinten.

A nemzetközi szabványosítás jelentőségét felismerve, több európai uniós előzményt követően 2013-ban elindult a COST Action TU1207 „Next Generation Design Guidelines for Composites in Construction” kooperáció, amelynek egyik kifejezett célja, hogy európai koordinációval nemzetközi kommunikációs platformot létesítsen a terület kutatói számára abból a célból, hogy a tevékenységük összehangolásával rövid időn belül lehetséges legyen az Eurocode szabványok kibővítése az FRP anyagok alkalmazására vonatkozó fejezetekkel. A kooperációban részt vesz a *fib* és RILEM munkabizottságok képviselőin túlmenően a CEN érintett bizottságának képviselője, illetve szabadon csatlakozhat bármely COST régióba tartozó ország. Jelen cikk megjelenésének pillanatában a résztvevő országok száma 22, amely azonban tovább növekedhet még. A COST Action TU1207 kooperáció eredményei folyamatosan nyomon követhetők a program weboldalán [22].

## 8. Összefoglalás

A korróziós károsodás következtében a vasbeton és feszített vasbeton szerkezetek valamint hidak állapota romlik, fenntartási költségeik nőnek (pl. a több mint 5000 magyarországi közúti vasbeton hídon mintegy 1 millió négyzetméternyi felület van kitéve a sózás okozta korróziós veszélynek).

Napjainkban sem várható a tartóssági problémák számának csökkenése, hiszen igen sok olyan szerkezetünk van, amely a tartóssági problémák jelentkezése előtti időszakban épült és ezért tartóssági szempontból most éri el élettartama határát.

A korróziós károsodás megelőzésének és a korróziós károsodások kijavításának igen ígéretes megoldását nyújthatja a nem korrodáló (vagyis elektrolitikus korrózióknak teljesen ellenálló) szálerősítésű polimer (FRP) anyagok alkalmazása.

Az 1990-es évektől kezdve egyre nagyobb mennyiségben használunk föl az építőmérnöki gyakorlatban szálerősítésű polimer (FRP) anyagokat az acélbetétek, feszítőbetétek helyettesítésén túlmenően a már megépült szerkezetek javítása és megerősítése során is. A szálerősítésű polimer (FRP) anyagokat kő, falazott szerkezetek, beton, vasbeton, feszített vasbeton, acél, alumínium és fa anyagú szerkezetek javítása és megerősítése során alkalmazták sikerrel.

Napjaink legfontosabb törekvése, hogy a szálerősítésű polimer (FRP) anyagok a nemzetközi méretezési szabványokba, illetve az Eurocode szabványokba is bekerüljenek. Ennek érdekében 2013-ban elindult a COST Action TU1207 „Next Generation

Design Guidelines for Composites in Construction” kooperáció, amelynek egyik kifejezett célja, hogy rövid időn belül lehetséges legyen az Eurocode szabványok kibővítése az FRP anyagok alkalmazására vonatkozó fejezetekkel.

### Felhasznált irodalom

- [1] Balázs Gy.: *Beton és vasbeton I.* Akadémiai Kiadó, 1994, 446 p.
- [2] Rubinsky, A. – Rubinsky, I. A.: *A Preliminary Investigation of the Use of Fiber Glass for Prestressed Concrete.* Magazine of Concrete Research, Sept. 1959. pp. 71-78.
- [3] Borosnyói A. – Balázs L. Gy.: *Tartósság biztosítása nem acél anyagú betétek alkalmazásával.* Betonszerkezetek tartóssága, Szerk. Balázs Gy. és Balázs L. Gy., 2008. június 23., pp. 293-314.
- [4] Tokyo Rope: *Technical Data on CFCC®.* Tokyo Rope Mfg. Co., Ltd. Manual, Tokyo, October 1993.
- [5] Taerwe, L., ed.: *Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures.* Proceedings of the Second International RILEM Symposium (FRPRCS-2), Ghent 1995, E & FN Spon, London.
- [6] El-Badry, M. M., (editor): *Advanced Composite Materials in Bridges and Structures.* Proceedings, 2<sup>nd</sup> International Conference. Canadian Society for Civil Engineering, Montreal, Quebec 1996.
- [7] Japan Concrete Institute (JCI): *Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures.* Proceedings of the Third International RILEM Symposium (FRPRCS-3), October 1997, Sapporo, Japan.
- [8] Crivelli Visconti, I., (editor): *ECCM-8 European Conference on Composite Materials – Science, Technologies and Applications.* Proceedings, Naples, Italy, June 1998.
- [9] Japan Prestressed Concrete Engineering Association (JPCEA): *Prestressed Concrete in Japan.* XIII. FIP Congress, National Report, Amsterdam, Holland, 1998
- [10] Uomoto, T.: *Durability considerations for FRP reinforcements.* Proceedings of the Fifth International Symposium (FRPRCS-5), Thomas Telford, London, 2001, pp. 17-32.
- [11] *fib: Bulletin 40: FRP Reinforcement in RC Structures.* Technical Report prepared by a working party of Task Group 9.3, September 2007.
- [12] Cosenza, E. – Manfredi, G. – Realfonzo, R.: *Bond of FRP Rebars to Concrete: Experimental Behaviour and Analytical Models.* Studi e Ricerche, Vol.17, 1996. pp. 253-282.
- [13] Palotás L. – Balázs Gy.: *Mérnöki szerkezetek anyagtana 3.* Beton-habarcserámia-műanyag. Akadémiai Kiadó, 1980.
- [14] Tépfers, R., Editor: *CEB, TG 2/5 „Bond Models”.* State-of-the-Art-Report. Draft. Chapter 8. Bond of non-metallic reinforcement. Version 6, June 23, 1998.
- [15] Tannous, F. E. – Saadatmanesh, H.: *Environmental Effects on the Mechanical Properties of E-Glass FRP Rebars.* ACI Materials Journal, V.95, No. 2, March-April 1998, pp. 87-100.
- [16] Piggott, M. R.: *Load Bearing Fibre Composites.* Pergamon Press Ltd., Oxford, England, ISBN 008 024 230 8, 1980.
- [17] AKZO: *Aragrid®: Non Corrosive Mesh Reinforcement for Brickwork and Concrete.* Technical Data, 1992.
- [18] Gerritse, A.: *Aramid-based prestressing tendons.* Alternative Materials for the Reinforcement and Prestressing of Concrete, Ed. Clarke, Chapman & Hall, London, 1993, pp. 172-199.
- [19] Rostásy, E.: *State-of-the-Art Report on FRP Materials.* FIP Report, Draft, 1996. Unpublished.
- [20] *fib: Bulletin 10: Bond of Reinforcement in Concrete.* State-of-Art Report prepared by Task Group Bond Models, August 2000.
- [21] *fib: Bulletin 14: Externally bonded FRP Reinforcement for RC Structures.* Technical Report prepared by a working party of Task Group 9.3, October 2001.
- [22] [http://www.cost.eu/domains\\_actions/tud/Actions/TU1207](http://www.cost.eu/domains_actions/tud/Actions/TU1207)

### Ref.:

**Borosnyói Adorján:** *Betonszerkezetek korrózióállóságának biztosítása innovatív, szálerősítésű polimer (FRP) anyagokkal.* Építőanyag, 65. évf. 1. szám (2013), 26–31. p.  
<http://dx.doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2013.6>

The manuscript must contain the followings: **title; author's name, workplace, e-mail address; abstract, keywords; main text; acknowledgement** (optional); **references; figures, photos with notes; tables with notes; short biography** (information on the scientific works of the authors).

The full manuscript should not be more than **6 pages including figures, photos and tables**. Settings of the word document are: 3 cm margin up and down, 2,5 cm margin left and right. Paper size: A4. Letter size 10 pt, type: Times New Roman. Lines: simple, justified.

### TITLE, AUTHOR

The title of the article should be short and objective.

**Under the title the name of the author(s), workplace, e-mail address.**

If the text originally was a presentation or poster at a conference, it should be marked.

### ABSTRACT, KEYWORDS

The abstract is a short summary of the manuscript, about a half page size. The author should give keywords to the text, which are the most important elements of the article.

### MAIN TEXT

Contains: materials and experimental procedure (or something similar), results and discussion (or something similar), conclusions.

### REFERENCES

References are marked with numbers, e.g. [6], and a bibliography is made by the reference's order.

#### Examples:

Journals:

[6] Tóth, Gy. – Máté, B.: *Földtani tényezők bazaltbányák művelésénél*. Mélyépítéstudományi Szemle. XXIV. évf. 4. szám (2004), pp. 145-148.

Books:

[6] C. Barry Carter – M. Grant Norton.: *Ceramic Materials Science and Engineering*. Springer Science + Business Media, LLC; New York, 2007.

### FIGURES, TABLES

All drawings, diagrams and photos are figures. The **text should contain references to all figures and tables**. This shows the place of the figure in the text. Please send all the figures in attached files, and not as a part of the text. **All figures and tables should have a title.**

**Authors are asked to submit color figures by submission. Black and white figures are suggested to be avoided, however, acceptable.**

The figures should be: tiff, jpg or eps files, 300 dpi at least, photos are 600 dpi at least.

### BIOGRAPHY

Max. 500 character size professional biography of the author(s).

### CHECKING

The editing board checks the articles and informs the authors about suggested modifications. Since the author is responsible for the content of the article, the author is not liable to accept them.

### CONTACT

Please send the manuscript in electronic format to the following e-mail address: femgomze@uni-miskolc.hu and epitoanyag@szte.org.hu or by post: Scientific Society of the Silicate Industry, Budapest, Bécsi út 122–124., H-1034, HUNGARY

**We kindly ask the authors to give their e-mail address and phone number on behalf of the quick conciliation.**

## INHALT

- 2 Mathematische Analyse der kapillaren Aufstighöhe im porösen Kalkstein
- 6 Statische Härteprüfung von porösen mineralischen Baustoffe
- 11 Typische Probleme bei Untersuchungen mit Schubstangen-Dilatometer
- 15 Mineralogische und mechanische Veränderungen im Baustoff eines Rotschlamm-Deponiebeckens
- 21 Die Wirkung der mineralogischen und petrographischen Eigenschaften der Lake District-Gesteine auf die Qualität von künstlichen Marmoren
- 26 Korrosionsbeständige Betonkonstruktionen mit innovativen faserverstärkten Kunststoffe (FVK)

## СОДЕРЖАНИЕ

- 2 Математическое моделирование капиллярного всасывания воды в пористом известняке
- 6 Изучение статической твердости пористых камнеобразных строительных материалов
- 11 Типичные проблемы при „push – rod” дилатометрическом анализе
- 15 Минерологические и механические изменения в материале стен резервуаров для хранения „красного ила”
- 21 Влияние минерологического состава Lake District горных пород (Турция) на качество искусственного мрамора
- 26 Коррозостойкость бетонных конструкций с инновативными волокнистыми полимерами (FRP)

## ELŐFIZETÉS

Az előfizetés díja  
1 évre **5000 Ft.**

Előfizetési szándékát kérjük jelezze:

Szilikátipari

Tudományos Egyesület

Telefon/fax:

06-1/201-9360

E-mail:

epitoanyag@szte.org.hu

Előfizetési megrendelő letölthető

a folyóirat honlapjáról:

www.epitoanyag.org.hu

## SUBSCRIPTION

Price of subscription for  
1 year **40 EUR.**

Subscription form is available  
on the website of the journal:

www.epitoanyag.org.hu



## Balázs György

| 1926–2013

2013. február 5-én, életének 86. évében eltávozott közülünk Balázs György professzor emeritus, „a beton szerelmese”.

Tisztán emlékszem arra a szürke, komor reggelre, amikor a hírt megkaptuk; mintha a ter-

mészet is osztozott volna a család, a barátok, a munkatársak, a tanítványok, a betonos szakma, és a nemzet fájdalmában. Balázs professzor élete és munkássága példa volt mindannyiunk számára, hogyan lehet szerényen, de rendíthetetlenül szolgálni a tudományt, az oktatást és a hazát. Balázs professzor nem csak vallotta, de élete utolsó percéig élte is hitvallását, amelyből saját szavaival is idézek itt, az *Építőanyag – Journal of Silicate Based and Composite Materials* hasábjain a búcsú perceiben.

Balázs professzor mély erkölcsi gyökereit szülőfalujából, Rábaszentandrásról hozta, legfontosabb életelvét: „Jó alkalomnál jobbat ne várj!” édesapjának köszönte. Édesapja és szülőfaluja tanította meg neki az adott szó becsületének tiszteletben tartását, a fizikai munka megbecsülését, az emberek tiszteletét, a töretlen optimizmust és a becsületességre törekvést. Életelveit a köz szolgálatában, oktatóként és kutatóként eltöltött évtizedek munkájával valósította meg. Munkatársai és tanítványai körében közismert volt páratlan teherbírása és munkavégző képessége, illetve a tudományszervező és iskolateremtő tevékenysége. Rajongott a laboratóriumi kutatásért, szeretett fiatalokkal együtt dolgozni, szerénysége és emberszeretete minden kollégájában, „harcostársában” tiszteletet ébresztett. Nekem is megadatott az az öröm, hogy élete utolsó évtizedében közvetlen munkatársa lehettem. Munkásságát harminc szakkönyv és 250-nél több tudományos közlemény fémjelzi. Az építőmérnöki szakma és a beton és vasbeton anyagok széles körű elismertségéért tett erőfeszítései elévülhetetlen érdemei. Igazi szakmai közéleti ember volt. Egyetemén, a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemen (BME) 18 szakmai, közéleti bizottságnak volt tagja. A Magyar Tudományos Akadémián (MTA) 11 bizottságban tevékenykedett. Szakmai szervezetekben 22 bizottság tagja volt. A Szilikátipari Tudományos Egyesület (SZTE) Beton Szakosztályának alapítója és éveken át elnöke volt. A szakmáért és a hazáért tett erőfeszítéseiért 40-nél több kitüntetést kapott, többek között Budapest Főpolgármesterétől a Budapest Díszpolgára címet, illetve a magyar köztársasági elnöktől a Magyar Köztársaság Érdemrend Kiskeresztjét és a Széchenyi-díjat.

Kedves Tanár Úr!

Fájó hiányodat el kell fogadnunk, saját szavaiddal élve: a nehézségeket megalkuvás nélkül le kell gyűrni. Az utat, amelyet mutattál nekünk követjük abban a megnyugvásban, hogy életpályád, amely oly sokunkat megérintett, utódaid munkája által örökké él.

Nyugodj békében.

*Dr. Borosnyói Adorján*  
főszerkesztő

Balázs György professor emeritus who was “in love with concrete” passed away on 5 February 2013.

I remember clearly to that grey and sombre morning when we received the news; as if the nature itself shared the grief of the family, friends, colleagues, disciples, professionals of concrete and that of the nation. The life and achievements of Professor Balázs was an example for all of us how to serve science, education and the motherland in a humble but unwavering way. Professor Balázs did not only confess but truly lived his creed up to the last minute of his life; from which I quote here in *Építőanyag – Journal of Silicate Based and Composite Materials* at the moments of remembrance.

Professor Balázs developed his deep moral roots in his home village Rábaszentandrás, Hungary and he attributed his most important statement of belief to his father: “Do not wait for a better opportunity than a good one!”. His father and his home village taught him the respect of the given word, the appreciation of the physical work, the respect of other people, the unbroken optimism and the will of being honest. His beliefs were embodied in work for decades in public service as university tutor and researcher. He was well known among his colleagues and students for his enormous work capacity and his unique science-organizing and school-building activities. He was enthusiastic about laboratory research, he liked working together with young people, his modesty and love to people made him very much respected among his colleagues, among his “fellow warriors”. I had the honour as well to become one of his direct colleagues during the last decade of his life. His life achievement is hallmarked by thirty technical books and over 250 scientific papers. His merits are imprescriptible due to his efforts taken for the widespread recognition of the civil engineering profession and the concrete and reinforced concrete materials. He was a real professional public man. At the Budapest University of Technology and Economics (BME) he contributed to 18 committees. At the Hungarian Academy of Sciences (MTA) he was member of 11 committees. In professional organizations he served in more than 22 different positions. He was the founder and chairman for several years of the Concrete Sub-group of the Scientific Society of the Silicate Industry (SZTE). He was acknowledged for his efforts taken for his profession and for his country by more than 40 awards including the Honorary Citizen of Budapest awarded by the Lord Mayor of Budapest as well as the Széchenyi Award and the Knights Cross of Hungary awarded by the President of Hungary.

Dear Professor Balázs,

We should accept your grievous absence, but, in your own words: “Obstacles should be surmounted without any compromise!”. The path that was laid by you before us is followed with the comforting feeling in our hearts that your life achievement that touched so many of us goes on live forever in the work of your successors.

May your soul rest in peace.

*Dr. Adorján Borosnyói*  
Editor-in-Chief





# COST

## EUROPEAN COOPERATION IN SCIENCE AND TECHNOLOGY

### COST Action TU1207

## NEXT GENERATION DESIGN GUIDELINES FOR COMPOSITES IN CONSTRUCTION

Corrosion of steel reinforcement is the most significant factor limiting life expectancy of reinforced concrete structures in Europe and worldwide. In Europe alone, the annual cost of repair and maintenance of the infrastructure is about 50% of the construction turnover, currently standing at more than €300bn. The development of more durable structures and efficient rehabilitation solutions will lead to less disruption and associated costs and thus are the driving forces behind the introduction of composites in construction.

Composites (or Fibre Reinforced Polymers – FRPs) have been used extensively in the aerospace, automotive and defence industries since the early 60s. Nonetheless, their use in construction only started in the 1980s in Japan, and civil engineers in Europe have only recently begun to gain confidence in this technology for primary structural applications.

The composites industry has grown recently through key markets (including construction, wind energy, aerospace, automotive) to reach a worldwide market of €68bn and the demand for composites within the European construction market, including reinforcing bars and strengthening systems, is estimated to grow fast and reach €3.1bn by 2013.

Despite the considerable technological developments in this field, there are still key scientific and logistical issues that need to be addressed for the widespread acceptance in construction. For example, existing design recommendations are largely based on work carried out more than fifteen years ago on first generation reinforcing products and their conservativeness is hindering the development of innovative and more efficient products and design solutions.

The COST Action TU1207 aims to: coordinate European research in the field; develop and maintain a critical mass of researchers; offer a link between academia and industry; and develop a new generation of design guidelines based on European Standards.

The COST Action TU1207 will:

- Foster active communication amongst researchers and promote the establishment of a strong community.
- Cross pollinate research through the dynamic dissemination of ideas, experiences and best practice.
- Enable the faster consolidation of knowledge and the more proactive advancement of the state-of-the-art.
- Facilitate knowledge transfer and the advancement of current design practice into much needed standardised provisions.

The development of new generation design guidelines based on European Standards will facilitate the adoption of composites, not only in Europe but worldwide. This Action will bring together the scientific community in this field and will help enhance the quality of research and training, as well as reduce duplication of work. The indirect benefits of this Action are significant. The use of FRPs in lieu of steel will reduce the lifetime costs of corrosion prone structures by over 80%, through reduced maintenance and down time for repairs. Furthermore, the use of composites in rehabilitation of existing structures will reduce overall costs (including time for execution) by over 25% and for seismic retrofit the cost reduction over conventional techniques can be up to 50%.

The potential of expansion/diversification of the composites industry is also very exciting as it is expected to lead to the creation of many more high value jobs, wealth, higher safety and reduced risk.

The results of the COST Action TU1207 will be directly exploitable by researchers, FRP composite manufacturers, practicing engineers and architects, and standardization bodies. The long term benefits resulting from the development of recognised standards will also address the needs of infrastructure and building owners and end users.

COST is an intergovernmental framework that includes 35 Member Countries and one Cooperating State. This allows researchers from these countries to embark upon networking opportunities by participating in science and technology networks called 'COST Actions'. However, COST Actions do not limit participation to scientists from COST Member Countries only.

Contact your National COST Office if you willing to participate in the COST Action TU1207.

For further information refer to the website of the COST Action TU1207:

[http://www.cost.eu/domains\\_actions/tud/Actions/TU1207](http://www.cost.eu/domains_actions/tud/Actions/TU1207)

EUROPEAN  
SCIENCE  
FOUNDATION

ESF provides the COST Office  
through a European Commission contract



COST is supported by the EU  
RTD Framework Programme