

Hydrothermal minerals and phenomena in the Mórógy Granite Formation

PÉTER KOVÁCS-PÁLFFY and MÁRIA FÖLDVÁRI

Geological Institute of Hungary, H-1143 Budapest, Stefánia út 14.



Key words: absolute age, fluid inclusions, geothermal system, Hungary, hydrothermal mineral assemblages, radioactive waste, South-eastern Transdanubia, stable isotopes, Üveghuta

Abstract

On the basis of the investigation of their relatively rich mineral assemblage using different methods, the hydrothermal fillings in the fissures of the granitoid rocks at Mórógy were precipitated predominantly from neutral Ca- and Mg-rich fluids in a relatively wide temperature range in several generations. Subordinately, products of alkaline as well as acidic fluids are also present.



Introduction

During the time since their formation, the Palaeozoic magmatic rocks of the Mórógy Granite Formation have been affected by hydrothermal processes. The granitoid rock body suffered external deformation that led to the formation of fissures in it. The tectonically generated zones contributed to the free flow of the hydrothermal fluid. The hydrothermal processes can be traced as being partly directly on the granitoid rock, but mainly in the fillings of the fissures of different size and direction weaving densely through the granitoid body.

Diversification of the hydrothermal processes is reflected remarkably in the mineral fillings of the fissure systems. In the rocks of the Mórógy Granite Formation, penetrated by seventeen (17) Űh-marked boreholes that have been drilled up to now in the Bábaapáti–Üveghuta region, 27,756 fissures and fractures have been recorded so far (MAROS et al. 2003). Their filling was described on the basis of visual observations. Besides the fissures of the rocks, the strongly brecciated, argillised fracture zones are also filled by the products of hydrothermal fluids.

Probably, the chloritisation, detectable in the granitoid rocks, is a product of hydrothermal alteration. Similarly the general carbonatisation of the rocks may be the result of the

hydrothermal affect. The low montmorillonite content of the bedrock, observable locally at a greater depth, as well as the pyrite dissemination (which occurs also only rarely in traces) can be clearly regarded as hydrothermal phenomena.

The material of the Cretaceous (Rozsdásserpenyő Formation) subvolcanic trachyandesite dykes, penetrated in the boreholes, has suffered high-grade hydrothermal alteration (montmorillonitisation).

Various mineralogical investigations were carried out on the material of filling of the described fissures and fractures — altogether 795 samples. This work included thin section, X-ray diffraction, and thermoanalytical investigations (Geological Institute of Hungary), microprobe and fluid inclusion examinations (Department of Petrology and Geochemistry, Eötvös Loránd University), oxygen, carbon, and sulphur isotope investigations, and ¹⁴C and K/Ar dating (Institute of Nuclear Research, Hungarian Academy of Sciences).

The aims of the investigations were the qualitative and quantitative characterisation of the variegated mineral fillings as well as the determination of the precipitation sequence, the composition of the hydrothermal fluids, the temperature of the formation, and the age of precipitations on the basis of analogies in literature and comparison with measurements.

The nature of fissure fillings

When documenting the drill-core samples, the visually detectable fillings of the rock fissures were described. The fissures can be closed or open. Their thickness is very different, varying from hair fissures up to as much as 20 cm. The fissure fillings can be homogeneous ones or multigenerational common occurrences. During the process of visual description, groups of argillaceous, siliceous, haematitic (red), limonitic (yellow), chloritic, carbonatic, mixed, and clastic material were separated between the fillings.

In the thin sections, the texture of the fillings is generally massive, but texture with microbreccia also occurs, frequently in a banded–zoned symmetric or asymmetric structure. Often, minerals crystallised at different temperatures appear besides each other within a fissure which can be the result of multiple opening or precipitation from gradually cooling fluid or possibly a combination of these. Locally, the central part of the fissures is cavernous; subsequent deformational processes or dissolutions can frequently be observed and sometimes the formed cavities are filled with secondary precipitations.

Minerals filling the fissures

A small part of the minerals (quartz, feldspar, chlorite, hornblende, biotite, rutile, *etc.*) derive from the mineral components of the host rocks of the fissures. These minerals got into the fluids as clastic ingredients and are not the subject of the investigation of the hydrothermal processes dealt with below.

However, a great part of the fissure filling material is authigenic mineral formed from hydrothermal fluids.

In the samples, the characteristic authigenic minerals detected by X-ray diffraction and thermoanalytical investigations are as follows (in order of quantity): carbonates, clay minerals (montmorillonite, palygorskite, illite, kaolinite, corrensite), quartz, chlorite, Fe-oxides and oxides–hydroxides, and epidote. Albeit rarely, other minerals also occur: biotite, adularia, prehnite, zeolite, alunite, barite, native sulphur, *etc.* By means of electron microprobe, minerals regarded as rarities could be also detected — *e.g.* RFF minerals, sulphides, garnets, *etc.* The mineralogical characters of all of these were presented in detail in the previous publication (KOVÁCS-PÁLFFY *et al.* 2000). During the investigations in 2002–2003, some minerals (adularia, alunite, barite, corrensite, sulphur, clinoptilolite, Na-montmorillonite, prehnite) were identified from the boreholes at Üveghuta which up until then had not been described.

On the basis of the previous and new investigations, the fissure filling minerals can be characterised as below – in order of frequency. Fissure fillings with significant (>25%) carbonate content comprised 52% of the studied samples (40% with predominantly calcitic, 12% with predominantly dolomitic composition). In the investigated samples, calcite, dolomite, Fe-dolomite as well as “ankerite”, Mn-bearing

dolomite and kutnahorite were identified. The electron microprobe and cathode luminescence examinations (SZABÓ *et al.* 1998) also refer to the varied replacement conditions in carbonate minerals. The calcite frequently contains replacements (Mg, Mn, Fe; see Figure 1). By means of electron microprobe examinations, REE-carbonates could be detected in rhombohedral dolomite which had been precipitated at a higher temperature (Üh–4, 126.8 m).

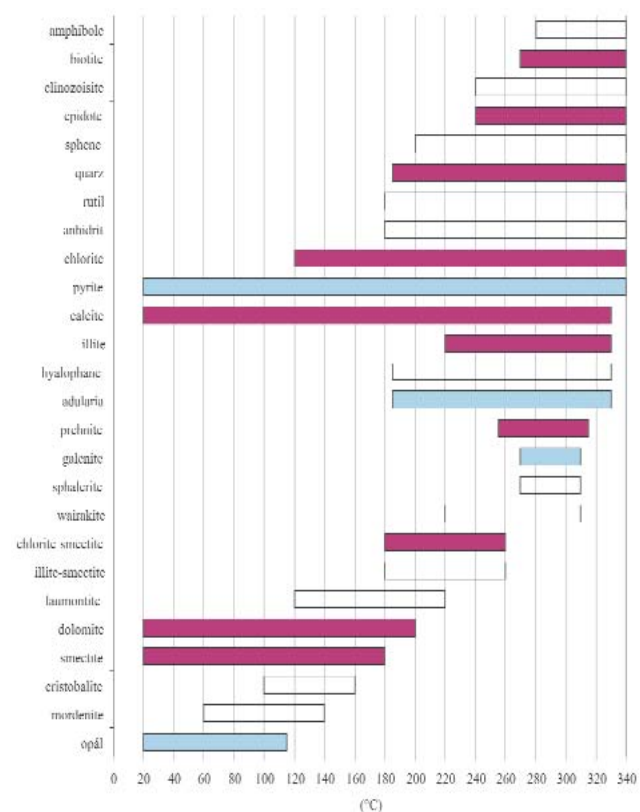


Figure 1. The temperature stability of hydrothermal minerals common for neutral pH (after HENLEY, ELLIS 1983, REYES 1990) Minerals in the fissure fillings in the Üveghuta granite: claret-coloured = most frequent, blue = in traces

1. ábra. Neutrális kémhatású hidrotermális oldatok ásványainak hőmérsékleti stabilitása (HENLEY, ELLIS 1983, REYES 1990 nyomán) Az üveghutai gránit repedéseiben előforduló ásványok: bordó = jelentős mennyiségben, kék = nyomokban

Fissure fillings with significant (>25%) clay mineral composition represent 28% of the samples. The main representatives of the clay minerals are (sometimes vermiculite-like) montmorillonite, illite, and palygorskite. Besides these, kaolinite was also identified in 9 samples, representing a maximum 12% of the quantity. At 139.39 m depth of Borehole Üh–27, Na-montmorillonite can be detected (34%). Likewise, in Borehole Üh–27 corrensite (a swelling trioctahedral clay mineral with a regular chlorite–smectite mixed structure) also occurs in steeply dipping fissures. When the drill cores have reached the surface, the fissures with clay minerals are generally open and the clay minerals are spread on the walls of the fissures as crust-like coatings.

Fissure fillings with significant (>25%) quartz content represent 12% of the studied fissure filling samples. Quartz occurs often as a fissure filling mineral, usually in the form of thin veins. Rarely, opal also occurs. The quartz veins are strongly interfingered with the host rock and their material is hard. The quartz content of the studied fissure fillings from Borehole Üh-27 is surprisingly low.

Fillings with significant (>25%) chlorite content represent 7% of the studied samples. Both thin section investigations and thermoanalyses indicate the presence of several (at least two) types of chlorite.

Characteristic minerals of fissure fillings — *i.e.* the Fe-oxides and oxides–hydroxides — appear with the greatest frequency in steeply dipping fissures. Their most important representatives are haematite and its hydrational alteration product, goethite.

Epidote appears alone or accompanied by chlorite in the samples from greater depths of the studied boreholes.

In the fillings of the fissures in the deeper parts of Boreholes Üh-26 and Üh-27, *alunite* and *barite* as well as *prehnite* and *clinoptilolite* minerals were identified.

In three thin sections, authigenic *adularia*, overgrown on the fissure wall, was detected with a strong sericitic alteration.

Using different study methods, the presence of sulphide minerals (*pyrite*, *calcopyrite*, *galenite*, *etc.*) was detected. With thermoanalytical investigations the presence of *sulphur* out of the native elements could be shown in traces.

By means of electron microprobe, *apatite*, *zircon*, *Co-Ni-arsenide*, *U-Th-oxide* (Borehole Üh-4, 126.8 m) could be identified.

Besides the fissures of the rocks, the strongly brecciated *fracture zones* are also filled by the products of hydrothermal fluids. Sometimes, their thickness can be of an order of size of one metre. On the basis of their mineral composition, these zones can be divided into the following groups:

— Fe-dolomitic composition (Boreholes Üh-4, 160.8 m; Üh-5, 169.0–169.5 m) as well as “ankeritic” composition (Borehole Üh-22, 381.5–384.0 m) may represent the initial phase of carbonate precipitation;

— calcitic composition (Borehole Üh-23, 65.1 m) was formed probably in the final phase of carbonate formation (secondary, meteoric calcite);

— “vermiculitic” (well-swelling, vermiculite-like montmorillonite) composition (Boreholes Üh-2, 367.5 m; Üh-3, 60.0 and 247.4 m; Üh-5, 214.0 m; Üh-23, 169.6 m) is the most frequent.

Composition of the hydrothermal fluids

The factors determining the formation of hydrothermal minerals are the composition of fluid, the pH, the oxygen level (Eh), and the temperature of the fluid. From the mentioned mineral assemblages, the following information was gained on the composition of the hydrothermal fluids:

— Out of the minerals, epidote, chlorite, prehnite, palygorskite, calcite, dolomite, and corrensite refer to precipitation from predominantly neutral Ca- and Mg-rich fluids. In the samples with high (>25%) smectite content, the following important mineral associations could be observed: montmorillonite; montmorillonite+illite; montmorillonite+palygorskite±illite±chlorite±calcite; montmorillonite+chlorite; and montmorillonite+calcite. All these show that montmorillonite was formed from fluids in which the Mg concentration was not enough for the formation of Mg-carbonates. The palygorskite appears as an intermediate mineral between the Mg-richer dolomite and the Mg-poorer smectites (Mg-montmorillonite). The vermiculite-like smectite as well as the saponite-like smectite mineral, detected thermoanalytically in 4 samples, may be similar transitional formations.

The minerals characteristic of acidic fluids of silicate composition — kaolinite, illite–sericite (±montmorillonite) — appear subordinately, while the minerals of acidic, sulphatic fluids — like sulphides, sulphates, and native sulphur — are present in traces. As opposed to montmorillonite and chlorite, for example, the kaolinite is a mineral generally bound to greater water concentration. Practically, this means that the kaolinite comes into being in open or well-penetrable fissures.

Thus, the system can be regarded as a neutral (slightly acid – slightly basic, “low-sulphid”) hydrothermal fluid with low sulphur content. In such systems, the appearance of kaolinite and alunite refer to overprinting from near-surface sulphatic waters.

— Na-montmorillonite and clinoptilolite indicate precipitations richer in alkalies and calc-alkalies in the near-surface zone of Borehole Üh-27 (between 102–163 m). In the deeper zones (between 255–302 m) prehnite appears and this can be connected to the formation of the Cretaceous alkaline basalt rock dykes, found at a still greater depth.

Besides the general considerations outlined above, the fluid inclusion examinations on carbonate minerals provided factual information on the composition of the fluids. Accordingly, three types of fluids occurred:

— high-density fluids with varying NaCl and CaCl₂ content (<30% NaCl equivalent value),

— low-density fluids with low–medium salt content (<15% NaCl equivalent value),

— fluids of meteoric origin with very low NaCl content.

Temperature of mineral precipitation

Studying the literature on hydrothermal systems (UTADA 1980; HENLEY, ELLIS 1983; REYES 1990; HEDENQUIST 1995; MOLNÁR 1997) the following notion can be formed on the temperature of fluids.

Figure 2 summarises the temperature stability of the minerals of neutral hydrothermal fluids. In this figure, the minerals that have formed over wide temperature ranges and

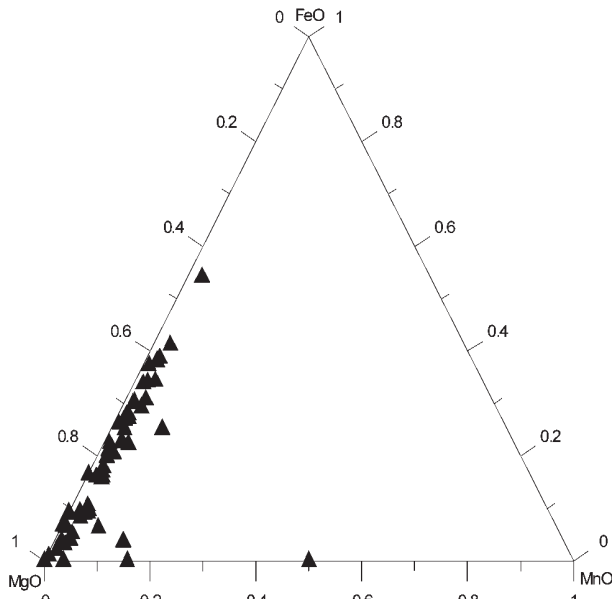


Figure 2. Composition of carbonate minerals of the dolomite-ankerite series from fissures based on electronprobe analysis

2. ábra. A repedések dolomit-ankerit-sort képviselő karbonát-ásványainak összetétele mikroszondás vizsgálat alapján

which are present in the fissure fillings at Úveghuta are marked by colour.

This picture can be completed with the following:

Out of the hydrothermal chlorites, the composition of the members of solid solution *clinocllore*–*chamosite* shows a great variety. Three index numbers of the structural composition of chlorite, the Fe/(Fe+Mg) proportion, the number of octahedral unfilled positions, and the degree of Al-replacement in the tetrahedral layer were used as geothermometers (CATHÉLINEAU, NIEVA 1985; CATHÉLINEAU 1988, JIANG et al. 1994; MARTÍNEZ-SERRANO, DUBOIS 1998; ALTENBERGER 2000). Out of these, the Fe/(Fe+Mg) proportion depends the least on the temperature (ZIMÁK 1999). According to the literature data, Mg-richer chlorite appears together with epidote, while Fe-richer chlorite is accompanied by illite which usually occurred at a slightly lower temperature. In the samples from Úveghuta, two types of chlorite were present according to the thermoanalytical investigations. Out of these, those with a higher dehydroxilation temperature on thermoanalytical curves are richer in Mg, while those with a lower dehydroxilation temperature are richer in Fe (Figure 3).

With regard to temperature and the formation of *corrensite* — a clay mineral with a regular chlorite–smectite mixed structure — the data scatter between 230–270 °C. This mineral, with its mixed structure, is very sensitive to concentration. The Mg²⁺ and Al³⁺ concentration favourable for its formation is a relatively rare phenomenon (LINDQUIST, HARLE 1991).

Out of the varieties with layer polymorphy, the 1M–1Md variety of *illite* was detected. According to the literature data (NEMECZ 1973), this is stable at temperatures below 350 °C. On the basis of the thermoanalytical investigation, the illite

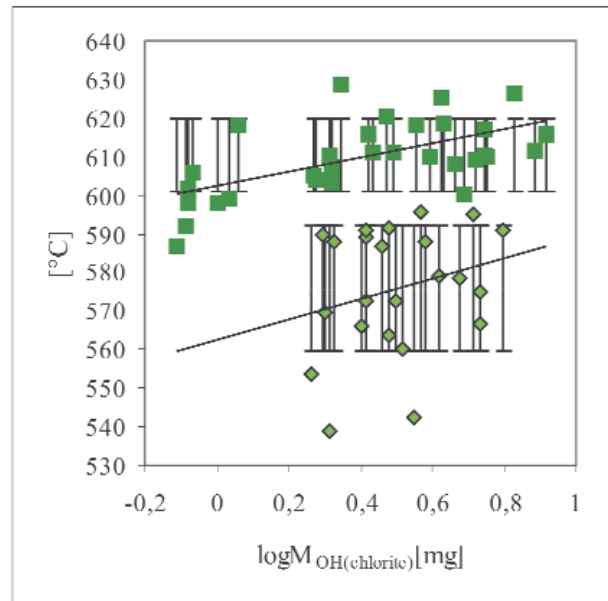


Figure 3. Dehydroxilation temperature of chlorite as the function of the quantity of samples from Úveghuta boreholes

3. ábra. Kloritok dehidroxilációs hőmérsékletei mennyiségük függvényében az úveghutai fúrásokban

at Úveghuta is similar to that at Recsk (Mátra Mts, North Hungary), which is of epithermal (<250 °C) origin.

Different types of *kaolinite* are formed at different temperatures (*dickite*>*kaolinite*>*halloysite*). The boundary zone of the *kaolinite*–*dickite* occurrence is about 120 °C. On the X-ray diffractograms of the samples from Úveghuta, line poor, chaotic, 1Md type *kaolinites* formed at low temperature were detected. According to the thermoanalytical investigation, *kaolinite* has a low dehydroxilation temperature (543 °C) and this also indicates a variety of low formation temperatures.

According to experimental data (FRANK-KAMENETSKIJ et al. 1972), *palygorskite* can come into being from hydrothermal fluids at temperatures between 100–300 °C. The conditions of formation are usually reductive.

The *Fe–Mn–Mg-carbonates* show a higher temperature than the dolomite. If iron is present in a great quantity “*ankerite*” is formed; if manganese is present in a large quantity *kutnahorite* comes into being.

Native sulphur is formed frequently in hydrothermal veins over different wide temperature ranges (40–280 °C). It occurs at Úveghuta even in great depths in traces. It is possible, however, that sulphur is the product of the oxidation of sulphide minerals present in the system that may have formed either within the fissure or in the time interval between the sampling and the examination. According to VETŐ (2003), the small amount of native sulphur can be brought into connection with the bacterial reduction in the sulphate content of the fissure water.

According to Figure 2, the *smectite*, *clinoptilolite* (*zeolite*), and *prehnite* in the fissures of Borehole Úh–27 usually indicate different temperatures. As opposed to this, ROBINSON et al. (2002) describe the *zeolite*, *smectite*, and *prehnite*

mineral assemblage — found in the core samples of oceanic boreholes — as being one with a formation temperature below 100°C.

Quartz and *calcite* are general accompanying elements of the listed minerals. They are present equally in zones of different temperatures and thus they are not characteristic from the point of view of temperature. The thermoanalytical investigation of calcites in the boreholes at Üveghuta shows multigenerational, varying temperatures of formation.

A decreasing fluid temperature order is referred to by the occurrence of epidote \rightarrow epidote+chlorite (=propylite) \rightarrow chlorite \rightarrow chlorite-smectite of mixed structure \rightarrow smectite or illite (sericite) \rightarrow illite-montmorillonite \rightarrow montmorillonite next to, or after each other.

In addition to the conclusions drawn from the analogies in literature, actual measurements mainly on carbonate minerals also provided an opportunity to make the temperature conditions of the hydrothermal system more exact.

In order to determine the temperature of formation of carbonates, SZABÓ (1999), SZABÓ et al. (1998, 2003) carried out electron microscope, microprobe, and fluid inclusion examinations while HERTELENDI (1996), HERTELENDI et al. (1999) and SZÁNTÓ (2002, 2003) performed stable isotope analyses.

On the basis of the assemblage of the petrographic investigation, electron microprobe measurements, and fluid inclusion examinations of fissure fillings, at least 3 calcite and 2 dolomite generations of different temperature can be separated with varied composition. In the case of calcites of higher temperature, more Mg-, Mn-, Fe-replacements can

be observed, while in the case of dolomites of higher temperature more Fe-, Mn-replacements are present. Often, minerals having different composition and indicating different temperatures of formation at the same time, appear next to each other within a fissure (Figures 4–6). This reflects multiple opening or a separation sequence from gradually cooling fluid.

Though the homogenisation temperatures measured on the fluid inclusions of the fissure fillings of clearly calcite



Figure 4. Alternating calcite-dolomite zones in the fissure infilling of the sample from 250.55 m in Borehole Üh-28

Dark zones represent dolomite, light zones calcite

4. ábra. Kalcit-dolomit zónák váltakozása az Üh-28 fúrás 250,55 m-éből származó minta repedéskitöltésében
Sötét zónák = dolomit, világos zónák = kalcit

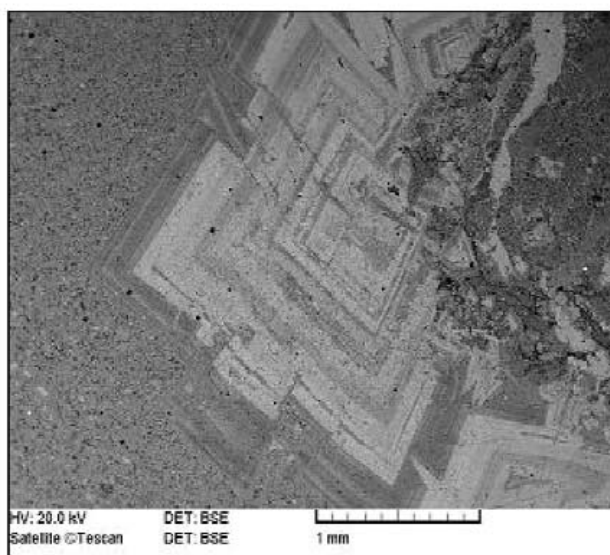


Figure 5. Dolomite-ankerite oscillating zonality in a fissure infilling (Borehole Üh-26, 91.75 m)

Dark zones represent Fe-poor, light zones Fe-rich dolomite

5. ábra. Dolomit-ankerit oszcillációs zónásság repedéskitöltésben (Üh-26, 91,75 m)

A sötét sávok vasban szegényebb, a világos sávok vasban gazdagabb dolomit-összetételek

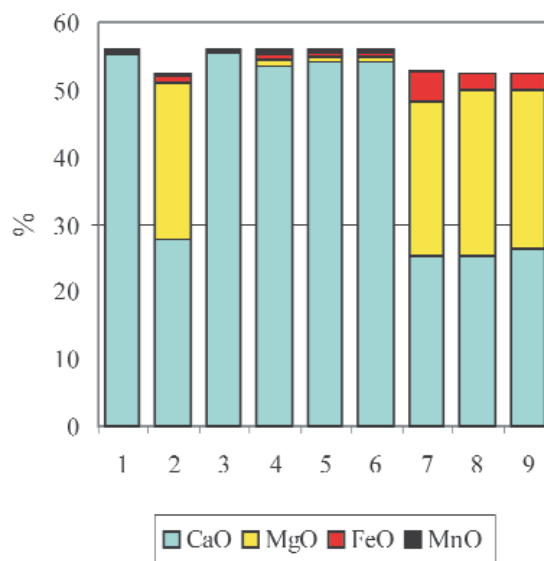


Figure 6. Distribution of oxide-concentration in the zones of a sample from 108.39 m in Borehole Üh-36

6. ábra. Az Üh-36 fúrás 108,39 méteréből vett minta zónáiban mért oxidkoncentráció eloszlása

material, and without pressure correction, vary between 89–279 °C, they fall predominantly between 100–140 °C (Figure 7). The salinity values calculated from ice-thawing temperatures vary between 0.35–25% NaCl equivalent values.

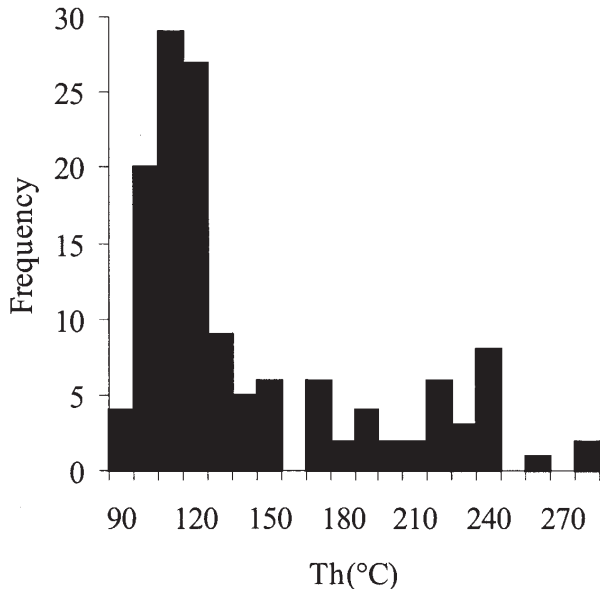


Figure 7. Frequency distribution of the homogenisation temperatures of fluid inclusions in the calcite fissure infillings

7. ábra. A repedések kalcitjában mért folyadékzárványok homogenizációs hőmérsékletének gyakorisági eloszlása

The calcites with a high (180–280 °C) homogenisation temperature contain fluid inclusions with low–medium salt content while the salinity of low-temperature (100–150 °C) fluids could also be high (Figure 8).

The thermometric behaviour of the fluid inclusions of certain samples (based on observations and not measurements) points to the fact that these inclusions were derived at a very low temperature (<100 °C) from probably meteoric waters with low salinity.

The stable isotope measurements also give information on the precipitation temperature.

Between 1998–2002, a $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ determination was carried out on 74 carbonate samples of fissure fillings from the boreholes at Üveghuta (Figure 9). It is difficult to draw conclusion from the $\delta^{18}\text{O}$ values of carbonates with respect to absolute temperature because the isotope composition of water as the environment of carbonate precipitation is not known and this dramatically affects the calculated temperature data (DEMÉNY 2003). However, the measurements are suitable for investigating the relative precipitation temperature. On the basis of the oxygen isotope composition of water, sampled from Borehole Üh-1, HERTELENDI (1996) qualified the carbonate fillings as being of hydrothermal origin and different temperatures and assigned their temperatures of formation into three ranges. The $\delta^{13}\text{C}$ data measured on the carbonates also appear in a very wide value range which also indicates that the carbonate precipitation took

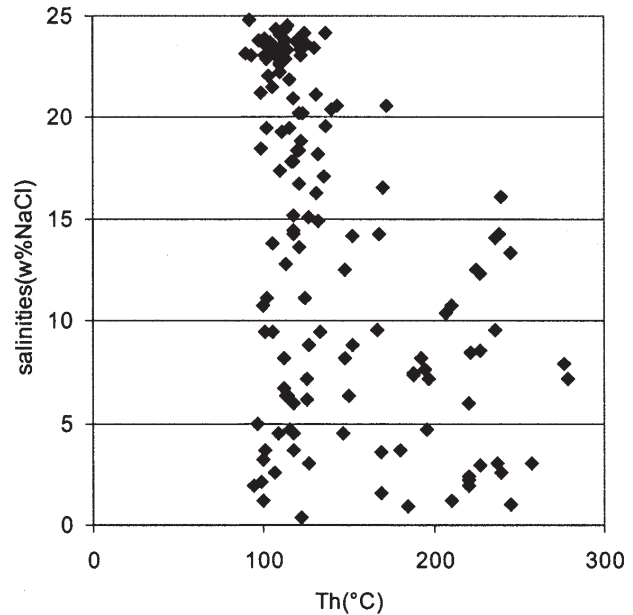


Figure 8. Calculated salinity (BODNAR 1993) as the function of homogenisation temperature for primer fluid inclusions of the calcite in fissure fillings (after SZABÓ 2003)

8. ábra. Számolt szalinitás (BODNAR 1993) a mért homogenizációs hőmérsékletek függvényében a repedéskitöltések kalcitjából származó fluidzárványokban (SZABÓ 2003 nyomán)

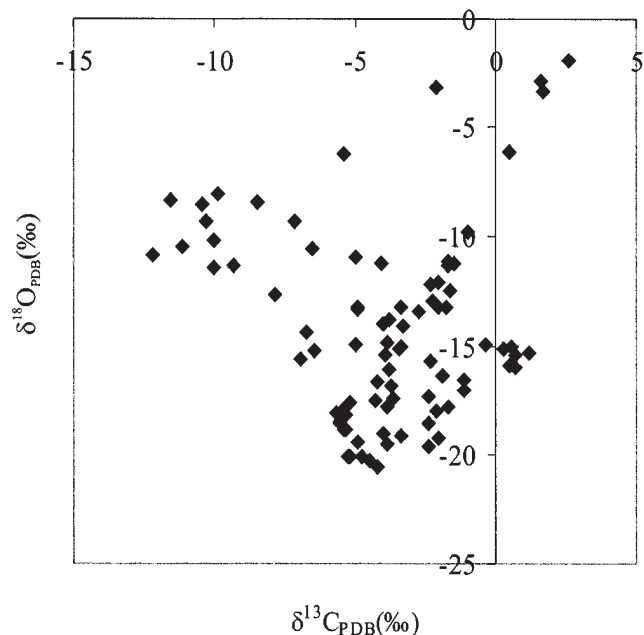


Figure 9. Distribution of C and O stable isotopes of calcite in fissure fillings

9. ábra. Stabil szén- és oxigénizotópok eloszlása az érkitöltések kalcitjában

place from very different fluids which were independent of each other. This is also suggested by the fact that there is no acceptable correlation between the carbon and oxygen isotope proportions.

Age of the hydrothermal processes

On the illite samples from the fissure fillings penetrated by the boreholes at Üveghuta, dating was performed by K/Ar method (BALOGH 1998, 1999, 2001). The age data measured in illites — concentrated from the samples selected on the basis of X-ray diffraction investigations — characterise varied argillaceous fissure fillings and differ significantly from each other. On 5 calcite samples, dating was also performed by the ^{14}C method (Table 1).

In the Mecsek Mountains, Ladinian and Liassic tuff as well as Cretaceous alkaline basalt and phonolite volcanism are known (NAGY E. 1969; NAGY E., RAVASZ-BARANYAI 1968; HARANGI, ÁRVÁNE SÓS 1993). The measured K/Ar age of illites that can be regarded as being of postmagmatic origin is either in direct connection with them or reflects mixed ages. The age data of the studied calcites indicate the fact that they are older than the age of the present-day waters in depths at which the oldest data proved to be 36,000 years. Accordingly, the 5 studied calcite samples are the precipitation products of pre-Holocene water or fluid flows.

Table 1. Absolute ages of fissure filling minerals from the boreholes at Üveghuta

Borehole	Depth (m)	Studied fraction [μ]	Studied mineral	Applied dating method	Measured age	Geological age
Üh 1	99.8		calcite	^{14}C	>45,000 years	?
Üh 3	57.36		calcite	^{14}C		
	61.7		calcite	^{14}C		
Üh 4	62.4		calcite	^{14}C		
	97.68		calcite	^{14}C		
Üh-2	367.11–367.70	<10	illite	K/Ar	75.2±3.0 Ma	Late Cretaceous
Üh 22	182.60	<2	illite	K/Ar	106.9±4.1 Ma	Middle Cretaceous
	278.10	<2	illite	K/Ar	117.2±4.5 Ma	Early Cretaceous
Üh-5	107.03	<10	illite	K/Ar	172.9±6.6 Ma	Middle Jurassic
Üh-1	346.10	<2	illite	K/Ar	190.3±7.2 Ma	Early Jurassic
	343.90	<2	illite	K/Ar	208.8±7.9 Ma	Late Triassic
	345.70	<2	illite	K/Ar	215.0 Ma	Middle Late Triassic
	349.90	<2	illite	K/Ar	229.7±8.7 Ma	Early Triassic

Summary

The fissures and fracture zones formed by tectonic effects in the granitoid rock body provided a possibility for the free flow of the hydrothermal fluids. The mineral components of the rocks hosting the fissures (microcline, albite, biotite, hornblende, and quartz) got into the fluids as clastic ingredients. This indicates the multiple opening and shearing of the fissures. These multiply opened fissures are filled by the hydrothermal minerals.

On the basis of the character of the minerals, the hydrothermal minerals of the Mórógy Granite were precipitated mainly from neutral Ca- and Mg-rich fluids in the

340–20 °C temperature range of hydrothermal processes in different temperature phases, and over several generations. Subordinately, products of alkaline as well as acidic fluids also appear. The multiple opening of the fissures and the arrival of newer fluids, possibly with different compositions and temperatures make the analysis of the minerals (which exist beside each other) more difficult and the chronological orders of the generations of the fillings are merged. The rhythmic alternation of the fluid compositions is shown, for example, by the rhythmic alternation of carbonate minerals with a zoned structure or by the dolomite–palygorskite–montmorillonite levels (Borehole Üh-22).

References — Irodalom

- ALTENBERGER, U. 2000: The Formation of Hydrothermal Chlorite-Rich Veins. Evidence for Fluid Overpressure in the Bergen Arcs/Caledonites of Norway. — *TSK (Tektonik, Strukturgeologie, Kristallingeologie) 8 Conference, Freiburg, 2000. 10. 4–6.*, poster.
- BALOGH K. 1998: Üveghutai fúrásokból származó ásványok K/Ar kormeghatározása (in Hungarian: K/Ar age determination of the minerals originated from the Üveghuta boreholes). — *Unpublished working document*, Geological Institute of Hungary, Budapest.
- BALOGH K. 1999: Üveghutai fúrásokból származó ásványok K/Ar kormeghatározása (in Hungarian: K/Ar age determination of the minerals originated from the Üveghuta boreholes). — *Unpublished working document*, Geological Institute of Hungary, Budapest.
- BODNAR, R. J. 1993: Revised equation and table for determining the freezing point depression of H₂O–NaCl solutions. — *Geochimica et Cosmochimica Acta* 57 (3), pp. 683–684.
- CATHELINÉAU, M. 1988: Cation site occupancy in chlorites and il-

- lites as a function of temperature. – *Clay Minerals* 23, pp. 471–485.
- CATHELINEAU, M., NIEVA, D. 1985: A chlorite solid-solution geothermometer – the Los Azufres (Mexico) geothermal system. – *Contributions to Mineralogy and Petrography* 91 (3), pp. 235–244.
- DEMÉNY A. 2003: Stabilizotóp-geokémia és termometria: hogyan és mire? (in Hungarian, with English abstract: Stable isotope geochemistry and thermometry: How to use and what for?) – *Földtani Közöny* 133 (2), pp. 263–270.
- FRANK-KAMENETSKIJ, V. A., KOTOV, N., GOILO, E., KLOTCHKOVA, G. 1972: Some aspects of structural transformations of clay minerals under hydrothermal conditions. – *Proceedings of the International Clay Conference 1972, Madrid*, pp. 303–312.
- HARANGI SZ., ÁRVÁNE SÓS E. 1993: A Mecsek hegység alsó-kréta vulkáni kőzetei I. Ásvány- és kőzettan [in Hungarian, with English abstract: Early Cretaceous volcanic rocks of the Mecsek Mountains (South Hungary). I. Mineralogy and petrology]. – *Földtani Közöny* 123 (2), pp. 129–165.
- HEDENQUIST, J. W. 1995: Origin of and exploration for epithermal gold deposits, Lecture Notes. – *Manuscript*, Department of Mineralogy, Eötvös Loránd University, Budapest, 121 p.
- HENLEY, R. W., ELLIS, A. J. 1983: Geothermal systems ancient and modern: a geochemical review. – *Earth-Science Reviews* 1, pp. 1–50.
- HERTELENDI E. 1996: Kis és közepes radioaktív hulladékok tervezett tároló helyéről származó minták izotópanalitikai vizsgálata (in Hungarian: Isotope analytical research on the samples originated from the planned disposal of low- and intermediate-level radioactive waste). – *Manuscript*, Geological Institute of Hungary, Budapest.
- HERTELENDI E., SZÁNTÓ ZS., PALCSU L., FUTÓ I., MOLNÁR M., SÁNDOR L.-NÉ 1999: Üveghutai gránitmintákon végzett izotópanalitikai vizsgálatok és eredmények értelmezése (in Hungarian: Isotope analytical research on the Üveghuta granitoid samples and the explanation of the results). – *Manuscript*, Geological Institute of Hungary, Budapest.
- JIANG, W. T., PEACOR, D. R., BUSECK, P. R. 1994: Chlorite geothermometry – contamination and apparent octahedral vacancies. – *Clay Minerals* 42, pp. 593–605.
- KOVÁCS-PÁLFFY, P., FÖLDVÁRI, M., RÁLISCH-FELGENHAUER, E., BARÁTH-SINYEY, K. 2000: Mineralogical characterisation of the fissure fillings in the Üveghuta granite. (Az üveghutai gránitban található repedéskitöltések ásványtani jellemzése). – *Annual Report of the Geological Institute of Hungary, 1999*, pp. 369–394.
- LINDQUIST, K., HARLE, S. 1991: Corrensites of hydrothermal origin from Veitsiv area, Eastern Finland – *Clays and Clay Minerals* 39, pp. 219–223.
- MAROS GY., BALLA Z., DUDKO A., FODOR L., FORIÁN-SZABÓ M., KOROKNAI B., LANTOS M., PALOTÁS K. 2003: Tektonikai zárójelentés (in Hungarian: Final tectonic report). – *Manuscript*, Geological Institute of Hungary, Budapest.
- MARTÍNEZ-SERRANO, R. G., DUBOIS, M. 1998: Chemical variations in chlorite at the Los Humeros geothermal system, Mexico. – *Clays and Clay Minerals* 46, pp. 615–628.
- MOLNÁR F. 1997: Epitermás aranyércesedések kialakulásának modellezése ásványtani-genetikai vizsgálatok alapján: példák a Tokaji hegységből (in Hungarian: Modelling of the origin of epithermal gold mineralisation based on mineralogy and genetic investigations: on the example of Tokaj Mountains). – *Földtani Kutatás* XXXIV (1), pp. 8–12.
- NAGY E. 1969: Mecsek hegység alsóliász kőszénösszlete. Földtan (In Hungarian: Lower Liassic coal measures of the Mecsek Mountains). – *Annals of the Geological Institute of Hungary* 51 (2), pp. 245–270.
- NAGY E., RAVASZ-BARANYAI L. 1968: Tufás kaolinit- és sziderittelepek a mecseki ladini összlet alján (in Hungarian: Tuffaceous kaolinite and siderite deposits on the base of the Ladinian in the Mecsek Mountains). – *Földtani Közöny* 98 (2), pp. 213–217.
- NEMECZ E. 1973: *Agyagásványok* (in Hungarian: Clay minerals). – Akadémiai Kiadó, Budapest, 507 p.
- REYES, A. G. 1990: Petrology of Philippine geothermal systems and the application of alteration mineralogy to their assessment. – *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 43 (1–4), pp. 279–309.
- ROBINSON, P. T., ERZINGER, J., EMMERMANN, R. 2002: Data report: The composition and origin of igneous and hydrothermal veins in the lower ocean crust – ODP Hole 735B, Southwest Indian Ridge. – In: NATLAND, J. H., DICK, H. J. B., MILLER, D. J., VON HERZEN, R. P. (eds): *Proceedings Ocean Drilling Program, Scientific Results*, 176. [Online]. Available from World Wide Web: <http://www.odp.tamu.edu/publications/176_SR/chap_9/chap_09.htm> (Manuscript number 176SR-019).
- SZABÓ CS. 1999: Karbonátos repedéskitöltés-vizsgálatok Üveghuta környékén mélyített fúrások granitoid kőzetein (in Hungarian: Analysis of carbonate infillings in granitoid cores drilled near Üveghuta). – *Manuscript*, Geological Institute of Hungary, Budapest.
- SZABÓ CS., GÁLNÉ SOLYMOS K., SZABÓNÉ BALOG A. 1998: Karbonátos repedéskitöltés-vizsgálatok Üveghuta környékén mélyített fúrások granitoid kőzetein (in Hungarian: Analysis of carbonate infillings in granitoid cores drilled near Üveghuta). – *Manuscript*, Geological Institute of Hungary, Budapest.
- SZABÓ CS., GÁLNÉ SOLYMOS K., FALL A. 2003: Karbonátos repedéskitöltés-vizsgálatok Üveghuta környékén mélyített fúrások granitoid kőzetein (in Hungarian: Analysis of carbonate infillings in granitoid cores drilled near Üveghuta). – *Manuscript*, Geological Institute of Hungary, Budapest.
- SZÁNTÓ ZS. 2002: Izotópanalitikai vizsgálati jegyzőkönyv, 2002: (in Hungarian: Record of isotope analytical research on the Üveghuta granitoid samples). – *Manuscript*, Geological Institute of Hungary, Budapest.
- SZÁNTÓ ZS. 2003: Izotópanalitikai vizsgálati jegyzőkönyv, 2002: (in Hungarian: Record of isotope analytical research on the Üveghuta granitoid samples). – *Manuscript*, Geological Institute of Hungary, Budapest.
- UTADA, M. 1980: Hydrothermal alterations related to igneous activity in Cretaceous and Neogene Formations of Japan. – *Mining Geology, Special Issue* 8, pp. 67–83.
- VETŐ I. 2003: Az Üveghuta környéki felszín alatti és felszíni vizek szulfáttartalma: előzetes geokémiai értékelés (in Hungarian: Sulphate content in surface and ground waters in the surroundings of Üveghuta: preliminary geochemical evaluation). – *Manuscript*, Geological Institute of Hungary, Budapest.
- ZIMÁK, J. 1999: Application of chlorite compositional geothermometers to hydrothermal veins in the Variscan flysch sequences of the Nizký Jeseník Upland to Alpine-type veins in the Sobotín region and to the paragenesis with “strigovite” from Žulová massif and Strzegom-Sobótka massif. – *Acta Universitatis Palackianae Olomucensis, Facultas Rerum Naturalium, Geologica* 36, pp. 69–74.

Hidrotermális képződmények és jelenségek a Mórágyi Gránit Formációban

KOVÁCS-PÁLFFY PÉTER, FÖLDEVÁRI MÁRIA

Magyar Állami Földtani Intézet, 1143 Budapest, Stefánia út 14.

Tárgyszavak: abszolút kor, Délkelet-Dunántúl, folyadékzárvány, geotermikus rendszer, hidrotermális ásványgyűttes, Magyarország, radioaktív hulladék, stabil izotóp, Üveghuta

Összefoglalás

A Mórágyi granitoid kőzetek repedéseiben lévő hidrotermális képződmények – a bennük előforduló viszonylag gazdag ásványgyűttes különböző módszerekkel történt vizsgálata alapján – uralkodóan intermedier, Ca-ban és Mg-ban dús oldatokból, viszonylag széles hőmérsékleti tartományban, több generációban váltak ki. Alarendelten alkáli, illetve savanyú oldatok termékei is jelentkeznek.

Bevezetés

A Mórágyi Gránit Formáció paleozoos magmás képződményeire a képződésük óta eltelt idő során hidrotermális folyamatok hatottak. A granitoid kőzettestet olyan külső, deformáló hatások érték, amelyek benne repedések kialakulására vezettek. A tektonikailag generált zónák szabad áramlási lehetőséget biztosítottak a hidrotermális oldatoknak. A hidrotermális folyamatok részben közvetlenül a granitoid kőzeten, de főleg a granitoid testet sűrűn átszövő, különböző méretű és irányú repedések kitöltéseiben nyomozhatók.

A hidrotermális folyamatok sokszínűsége a repedésrendszerek ásványkitöltéseiben tükröződik szembevetően. A Bátapáti–Üveghuta térségében eddig lemélyített 17 db Üh jelű fúrás által harántolt Mórágyi Gránit Formáció kőzeteiben eddig 27 756 repedést, törést rögzítettek (MAROS et al. 2003). Ezek anyagát vizuális megfigyelések alapján írták le. A kőzetek repedésein kívül az erősen zúzott, agyagosodott törésés-zónák is hidrotermális oldatok termékeivel vannak kitöltve.

A granitoid kőzetekben észlelhető kloritos átalakulás valószínűleg hidrotermális bontás terméke. Hasonlóan hidrotermális hatás eredménye lehet a kőzetek általános karbonátosodása. Egyértelműen hidrotermális jelenségnek tekinthető az alapkőzet helyenként nagyobb mélységben észlelhető, kis montmorillonittartalma, valamint az ugyancsak ritkán, nyomokban megjelenő pirithintés.

A fúrásokban harántolt, kréta korú (Rozsdásserpenyői Formáció) szubvulkáni trachandezit-telérek anyaga nagyfokú hidrotermális bontást (montmorillonitosodást) szenvedett.

Különböző ásványtani vizsgálatok — vékonycsiszolatos, röntgendiffrakciós és termoanalitikai-vizsgálatok (MÁFI), mikroszondás és folyadékzárvány-vizsgálatok (ELTE Kőzettan-Geokémia Tanszék), oxigén-, szén- és kénizotóp-vizsgálatok, ¹⁴C- és K/Ar-kormeghatározások (MTA Atomki) — a leírt repedések, törések töredékén, 795 db minta anyagán történtek.

A vizsgálatok célja a változatos ásványkitöltések minőségi és mennyiségi jellemzése, a kiválási sorrend, valamint a hidrotermális oldatok összetételének, a képződési hőmérsékletnek és a kiválások korának megállapítása volt irodalmi analógiák és konkrét mérések alapján.

A repedéskitöltések jellege

A fúrási magminták dokumentálásakor a kőzet repedéseinek vizuálisan észlelhető kitöltéseit írták le (MAROS et al. 2003). A repedések lehetnek zártak és nyíltak. Vastagságuk igen változó, hajszálrepedésektől akár 20 cm-ig. A repedés-kitöltések lehetnek egyneműek vagy többgenerációs együtt-előfordulások. A vizuális leírások során a kitöltések között

agyagos, kovás, hematitos (vörös), limonitos (sárga), kloritos, karbonátos, kevert anyagú és közettörmelék csoportokat különítették el.

A vékonycsiszolatokban a kitöltések szövete általában tömeges, de van mikrobrecsás szövet is, gyakran sávós-zónás szimmetrikus vagy aszimmetrikus elrendeződésben. Egy-egy repedésen belül gyakran különböző hőmérsékleten kristályosodott ásványok jelennek meg egymás mellett, ami lehet többszöri felnyílás, illetve fokozatosan kihűlő oldatból való kiválás eredménye, esetleg ezek kombinációja. A repedések központi része néha üreges, későbbi deformációs folyamatok vagy kioldódások gyakran megfigyelhetők, a képződött üregek néha másodlagos kiválásokkal vannak kitöltve.

A repedéseket kitöltő ásványok

Az ásványok kis része (kvarc, földpátok, klorit, amfibol, biotit, rutil stb.) a repedéseket befogadó kőzetek ásványos összetevőiből származik. Ezek az ásványok törmelékeselegyrészként kerültek a kitöltést eredményező oldatokba, és nem képezik tárgyát a hidrotermális folyamatok alábbi vizsgálatának.

A repedéseket kitöltő anyag nagy része azonban hidrotermális oldatokból képződött autigén ásvány.

A mintákban röntgendiffrakciós és termoanalitikai vizsgálatokkal kimutatott jellegzetes autigén ásványok — mennyiségi sorrendjükben — a következők: karbonátok, agyagásványok (montmorillonit, paligorszkit, illit, kaolinit, corrensit), kvarc, klorit, Fe-oxidok és -oxid-hidroxidok, epidot. Ritkán előfordulnak egyéb ásványok is: biotit, adular, prehnit, zeolit, alunit, barit, terméskén stb. Elektron-mikroszondával ritkaságnak számító ásványokat is kimutattunk, amilyenek az RFF-ásványok, a szulfidok, a gránátok stb. Mindezek ásványtani jellegeit korábbi publikációinkban (KOVÁCS-PÁLFFY et al. 2000) részleteztük. A 2002–2003. évi kutatások során néhány, az üveghutai fúrásokból eddig még le nem írt ásványt (adular, alunit, barit, corrensit, kén, klinoptilolit, Na-montmorillonit, prehnit) azonosítottunk.

A korábbi és az új vizsgálatok alapján a repedéskitöltő ásványokat — gyakorisági sorrendjükben — a következőképpen jellemezhetjük.

Jelentősebb (>25%-os) karbonáttartalmú repedéskitöltés a vizsgált minták 52%-a (40% uralkodóan kalcitos, 12% uralkodóan dolomitos összetételű). Vizsgált mintáinkban kalcitot, dolomítot, Fe-dolomítot, illetve „ankeritet”, Mn-tartalmú dolomítot és kutnahoritot azonosítottunk. Elektron-mikroszondás és katódlumineszcenciás vizsgálatok (SZABÓ et al. 1998) is a karbonátásványokban fellépő változatos helyettesítési viszonyokra mutatnak. A kalcit gyakran tartalmaz (Mg, Mn, Fe) helyettesítéseket (1. ábra). Elektron-mikroszondás vizsgálatokkal magasabb hőmérsékleten kivált romboéderes dolomítban (Üh-4, 126,8 m) RFF-karbonátok voltak kimutathatók.

A jelentős mértékben (>25%) agyagásványos összetételű repedéskitöltések a vizsgált minták 28%-át képezik. Az agyagásványok fő képviselői a (néha vermikulitszerű) mont-

morillonit, az illit és a paligorszkit. Ezeken kívül 9 mintában, max. 12%-nyi mennyiségben kaolinitet is azonosítottunk. Az Üh-27 fúrás 139,39 m mélységében Na-montmorillonit mutatható ki (34%). Ugyancsak az Üh-27 fúrásban, meredek dőlésű repedésekben előfordul még corrensit (klorit-szmektit szabályos kevert szerkezetű, duzzadó, trioktaéderes agyagásvány). Az agyagásványos repedések a fúrómagok felszínre kerülése után általában nyíltak, az agyagásványok kéregszerű bevonatként elkenődnek a hasadék falain.

A jelentős mértékben (>25%) kvarc összetételű repedéskitöltések a vizsgált repedéskitöltés-minták 12%-át képezik. A kvarc repedéskitöltő ásványként gyakran fordul elő, általában vékony erek formájában, ritkán opál is előfordul. A kvarcerek a befogadó kőzettel erősen összefogazódnak, anyaguk kemény. Meglepően alacsony az Üh-37 fúrásból vizsgált repedéskitöltések kvarctartalma.

A jelentős mértékben (>25%) klorit összetételű kitöltések a vizsgált minták 7%-át képezik. Mind a vékonycsiszolatos vizsgálatok, mind a termoanalízis több (legalább kétféle) klorit jelenlétét jelzi.

A repedéskitöltések jellegzetes ásványai a *Fe-oxidok és -oxihidroxidok*, legnagyobb gyakorisággal a meredek dőlésű repedésekben jelennek meg. Legfontosabb képviselőjük a hematit és ennek hidratációs bomlásterméke, a goethit.

Epidot önállóan vagy klorit kíséretében jelentkeznek a vizsgált fúrások nagyobb mélységből származó mintáiban.

Az Üh-26 és Üh-27 fúrások mélyebb részeiben található repedések kitöltésében *alunit* és *barit*, illetve *prehnit* és *klinoptilolit* ásványt azonosítottunk.

Három vékonycsiszolatban repedésfalon továbbnőtt autigén *adulart* észleltünk erős szericites bontással.

Nyomokban különféle vizsgálati módszerekkel szulfidásványok — *pirit*, *kalkopirit*, *galenit* stb. —, illetve termoanalitikai vizsgálatokkal a terméselemek közül *kén* jelenlétét mutattuk ki.

Elektron-mikroszondás vizsgálatokkal *apatit*, *cirkon*, *Co-Ni-arzenid*, *U-Th-oxid* (Üh-4, 126,8 m) volt azonosítható.

A kőzetek repedésein kívül az erősen zúzott, *törésses övek* is hidrotermális oldatok termékeivel vannak kitöltve. Vastagságuk néha méteres nagyságrendű is lehet. Ásványos összetételük alapján a következő csoportokra oszthatók:

— a Fe-dolomitos (Üh-4, 160,8 m; Üh-5, 169,0–169,5 m), valamint az „ankerites” összetétel (Üh-22, 381,5–384,0 m) a karbonát kiválás kezdeti fázisát képviselheti;

— a kalcitos összetétel (Üh-23, 65,1 m) valószínűleg a karbonátok képződésének végső fázisában keletkezett (másodlagos, meteorikus kalcit);

— a „vermikulitos” (jól duzzadó vermikulitszerű montmorillonit) összetétel (Üh-2, 367,5 m, Üh-3, 60,0 és 247,4 m, Üh-5, 214,0 m, Üh-23, 169,6 m) gyakoribb.

A hidrotermális oldatok összetétele

A hidrotermális ásványok keletkezését megszabó tényezők az oldatösszetétel, a pH, az oxigénszint (Eh) és az ol-

dathőmérséklet. A felsorolt ásványegyüttesekből a hidrotermális oldatok összetételére vonatkozóan az alábbi információ nyerhető:

— Az ásványok közül az epidot, klorit, prehnit, paligorszkít, kalcit, dolomit és corrensit uralkodóan intermedier, Mg-ban és Ca-ban dús oldatokból való kiválásra mutat. A magas szmektit-tartalmú (>25%) mintákban a következő fontosabb ásványtársulások figyelhetők meg: montmorillonit; montmorillonit + illit; montmorillonit + paligorszkít ± illit ± klorit ± kalcit; montmorillonit + klorit; montmorillonit + kalcit. Ezekből az látható, hogy montmorillonit olyan oldatokból képződött, amelyekben a Mg-koncentráció nem volt elegendő Mg-karbonátok képződéséhez. A paligorszkít a Mg-gazdagabb dolomit és a Mg-szegényebb szmektitek (Mg-montmorillonit) közötti köztes ásványként jelenik meg. Hasonló átmeneti képződmény lehet a vermikulitszerű szmektit és a 4 mintában termoanalitikailag észlelt szaponitszerű szmektitásvány.

Alárendelten jelennek meg savanyú, szilikátos összetételű oldatokra jellemző ásványok: kaolinit, illit–szericit (±montmorillonit) és nyomokban savanyú, szulfátos oldatok ásványai, mint a szulfidok, szulfátok és terméskén. A kaolinit általában nagyobb vízkoncentrációhoz kötött ásvány, szemben pl. a montmorillonittal és klorittal, ami gyakorlatilag azt jelenti, hogy a kaolinit a nyitott vagy jól átjárható repedésekben képződik.

A rendszer tehát alacsony kéntartalmú, neutrális (enyhén savas – enyhén bázisos, „low-sulfidation”) hidrotermális oldatnak tekinthető. Az ilyen rendszerekben a kaolinit és az alunit megjelenése felszín közeli szulfátos vizekből történő felülírásra utal.

— Alkáliákban és mészkalkáliákban gazdagabb összetételű kiválásokat jelez az Űh–27 fúrás felszín közeli zónájában (102–163 m között) a Na-montmorillonit, a klinoptilolit. A mélyebb zónákban (255–302 m között) prehnit jelenik meg, amely a még nagyobb mélységben található, kréta korú trachandezit közzelélérek képződésével hozható kapcsolatba.

A vázolt általános megfontolások mellett karbonátásványokon végzett fluidumzárvány-vizsgálatok konkrét információt adtak az oldatok összetételéről, amely szerint az oldatoknak három típusa jelentkezett:

— nagy sűrűségű oldatok változó NaCl- és CaCl₂-tartalommal (<30s% NaCl-egyenérték),

— alacsony sűrűségű és alacsony–közepes sótartalmú oldatok (<15s% NaCl-egyenérték),

— nagyon alacsony NaCl-tartalmú, meteorikus eredetű oldatok.

Az ásványkiválási hőmérséklet

A hidrotermális rendszereket tárgyaló szakirodalom (UTADA 1980; HENLEY, ELLIS 1983; REYES 1990; HEDENQUIST 1995; MOLNÁR 1997) áttanulmányozása alapján az oldatok hőmérsékletéről az alábbi képet alakíthatjuk ki.

A 2. ábra a neutrális kémhatású hidrotermális oldatok ásványainak hőmérsékleti stabilitását foglalja össze. Ezen

színessel jelöltük azokat a széles hőmérsékleti tartományokban keletkezett ásványokat, amelyek az üveghutai fúrások repedéskitöltéseiben előfordulnak.

Ezt a képet a következőkkel egészíthetjük ki:

A hidrotermális kloritok közül a *kliniklor–chamosit* szilárd oldat tagjainak összetétele nagy változatosságot mutat. A klorit szerkezeti összetételének 3 mérőszámát, a Fe/(Fe+Mg) arányt, az oktaédes betöltetlen pozíciók számát és a tetraédes rétegben lévő Al-helyettesítés mértékét geotermométerként szokták használni (CATHELINÉAU, NIEVA 1985; CATHELINÉAU 1988; JIANG et al. 1994; MARTÍNEZ-SERRANO; DUBOIS 1998; ALTENBERGER 2000). Ezek közül a Fe/(Fe+Mg) arány függ legkevésbé a hőmérséklettől (ZIMÁK 1999). Az irodalmi adatok szerint epidottal együtt Mg-ban, a kissé alacsonyabb hőmérsékleten jelentkező illit kíséretében pedig Fe-ban gazdagabb klorit szokott jelentkezni. Az üveghutai mintákban termoanalitikai vizsgálatok szerint két típusú klorit jelentkezett. Ezek közül a termoanalitikai görbéken magasabb dehidroxilációs hőmérsékletűek Mg-ban, míg az alacsonyabb dehidroxilációs hőmérsékletűek Fe-ban dúsabbak (3. ábra).

A *corrensit* — klorit–szmektit szabályos kevert szerkezetű agyagásvány — képződési hőmérsékletére az adatok 230–270 °C között szórnak. Ez a kevert szerkezetű ásvány igen érzékeny a koncentrációra. A képződésének kedvező Mg²⁺- és Al³⁺-koncentráció viszonylag ritka jelenség (LINDQUIST, HARLE 1991).

A rétegpolimorfiás változatok közül az *illit* 1M–1Md változatát mutattuk ki. Irodalmi adatok (NEMECZ 1973) szerint ez a 350 °C alatti hőmérséklettartományban stabil. A termoanalitikai vizsgálat alapján az üveghutai illit az epitermális (<250 °C) eredetű recski illithez hasonló.

A *kaolinit* különböző típusai különböző hőmérsékleten keletkeznek (dickit>kaolinit>halloysit). A kaolinit–dickit előfordulás határzónája kb. 120 °C. Az üveghutai minták röntgendiffraktogramjain vonalszegény, rendezetlen, 1Md típusú, alacsony hőmérsékleten képződött kaoliniteket észleltünk. A termoanalitikai vizsgálat szerint a kaolinit alacsony dehidroxilációs hőmérsékletű (543 °C), ami szintén alacsony keletkezési hőmérsékletű változatra utal.

A *paligorszkít* hidrotermális oldatokból kísérleti adatok (FRANK-KAMENETSKIJ et al. 1972) szerint 100–300 °C hőmérsékleten képződhet. A képződési körülmények általában redukтивak.

A *Fe–Mn–Mg-karbonátok* a dolomiténál magasabb hőmérsékletet jeleznek. Ha nagy mennyiségben vas van jelen, akkor „ankerit”, ha mangán, akkor kutnahorit keletkezik.

Terméskén különböző tág hőmérsékleti tartományban (40–280 °C) gyakran képződik hidrotermális erekben, nyomokban. Üveghután nagy mélységekben is előfordul. Elképzelhető azonban, hogy a kén a rendszerben jelenlévő szulfidásványok oxidációjának terméke, amely akár a repedésen belül, akár a mintavétel és a vizsgálat között lezajlott időben keletkezhetett. VETŐ (2003) szerint a kis mennyiségű terméskén a repedésvíz szulfáttartalmának bakteriális redukciójával hozható összefüggésbe.

Az 2. ábra szerint az Űh-27 fúrás repedéseiben mutatkozó *szmektit*, *klinoptilolit* (zeolit) és *prehnit* általában különböző hőmérsékletet jeleznek. Ezzel szemben ROBINSON et al. (2002) óceáni kéregfúrások magmintáiban talált zeolit, szmektit és prehnit ásványegyüttest <100 °C alatti képződésű hőmérsékletűnek írta le.

A *kvarc* és a *kalcit* a felsorolt ásványok általános kísérője. Különböző hőmérsékletű zónákban egyaránt megjelennek, ezért hőmérsékleti szempontból nem jellemzőek. A kalcitok termoanalitikai vizsgálata az üveghutai fúrásokban többgenerációs, változó képződési hőmérsékleteket mutat.

Csökkenő fluidum-hőmérsékleti sorrendet jelent az epidot \rightarrow epidot+klorit (=propilit) \rightarrow klorit \rightarrow klorit-szmektit kevert szerkezetű ásvány \rightarrow szmektit vagy illit (szericit) \rightarrow illit-montmorillonit \rightarrow montmorillonit egymás melletti vagy egymás utáni előfordulása.

Az irodalmi analógiákból levonható következtetéseken kívül, elsősorban karbonátásványokon, konkrét mérések is lehetőséget adtak a hidrotermális rendszer hőmérsékleti viszonyainak pontosítására.

A karbonátok keletkezési hőmérsékleteinek megállapítására vonatkozóan SZABÓ (1999), SZABÓ et al. (1998, 2003) elektronmikroszkópos, mikroszondás és folyadékzárvány-vizsgálatokat, HERTELENDI (1996), HERTELENDI et al. (1999) és SZÁNTÓ (2002, 2003) pedig stabilizotóp-meghatározásokat végzett.

A repedéskitöltések petrográfiai vizsgálata, elektronmikroszondás mérései és fluidzárvány-vizsgálatának együttese alapján legalább 3 különböző hőmérsékletű kalcit- és 2 dolomit-generációt lehet elkülöníteni eltérő összetétellel, a magasabb hőmérsékletű kalcitok nagyobb Mg-, Mn-, Fe-, a magasabb hőmérsékletű dolomitok pedig nagyobb Fe-, Mn-helyettesítéssel jellemezhetők. Egy-egy repedésen belül gyakran különböző összetételű és egyben különböző képződési hőmérsékletet jelző ásványok vannak egymás mellett (4–6. ábra), ami vagy többszöri felnyílást, vagy fokozatosan kihűlő oldatból való kiválási sorrendet tükröz.

A tisztán kalcitanyagú repedéskitöltések folyadékzárványain mért, nyomáskorrekció nélküli homogenizációs

hőmérsékletek $89\text{--}279$ °C között változnak, de túlnyomórészt $100\text{--}140$ °C közé esnek (7. ábra). A jégolvadási hőmérsékletekből számolt szalinitási értékek $0,35\text{--}25s\%$ NaCl-egyenérték között változnak.

A magas ($180\text{--}280$ °C) homogenizációs hőmérsékletű kalcitok alacsony–közepes sótartalmú fluidzárványokat tartalmaznak, az alacsony hőmérsékletű ($100\text{--}150$ °C) oldatok szalinitása magas is lehetett (8. ábra).

Egyes minták fluidzárványainak termometriai viselkedése (megfigyelés és nem mérés alapján) arra enged következtetni, hogy ezek a zárványok igen alacsony hőmérsékleten (<100 °C), kis sótartalmú, valószínűleg atmoszférikus vizekből származnak.

A stabilizotóp-mérések ugyancsak tájékoztatást adnak a kiválási hőmérsékletről.

$\delta^{13}\text{C}$ - és $\delta^{18}\text{O}$ -meghatározás 1998–2002 között az üveghutai fúrások 74 db repedéskitöltésből származó karbonátmintáján történt (9. ábra). A karbonátok $\delta^{18}\text{O}$ -értékeiből nehéz abszolút hőmérsékletre következtetni, mert nem ismertes a karbonát-kiválás közegét képező víz izotóppozsztétele, amely drasztikusan befolyásolja a számított hőmérsékleti adatokat (DEMÉNY 2003). A mérések azonban alkalmasak a relatív kiválási hőmérséklet vizsgálatára. HERTELENDI (1996) az Űh-1 fúrásból mintázott víz oxigénizotóp-összetétele alapján a karbonát-kitöltéseket hidrotermális eredetűnek és különböző hőmérsékletűnek minősítette, képződési hőmérsékletüket három tartományba sorolta. A karbonátokon mért $\delta^{13}\text{C}$ -adatok is nagyon széles értéktartományban jelentkeznek, ami szintén arra mutat, hogy a karbonát-kiválás nagyon eltérő, egymástól független oldatokból történt. Ugyancsak ezt sugallja az a tény, hogy nincs elfogadható korreláció a szén- és az oxigénizotóp-arányok között.

A hidrotermális folyamatok kora

Az üveghutai fúrások által harántolt repedéskitöltésekből származó illitmintákon K/Ar módszerrel történtek kor meghatározások (BALOGH 1998, 1999, 2001). A röntgendiff-

1. táblázat. Üveghutai fúrások repedéskitöltő ásványain kapott radiometrikus korok

Fúrás	Mélység (m)	Vizsgált frakció [μ]	Vizsgált ásvány	Alkalmazott kor meghatározási módszer	Mért kor	l-öldtani kor
Űh-1	99,8		kalcit	^{14}C	>45 000 év	?
Űh 3	57,36		kalcit	^{14}C		
	61,7		kalcit	^{14}C		
Űh-4	62,4		kalcit	^{14}C		
	97,68		kalcit	^{14}C		
Űh-2	367,11–367,70	<10	illit	K/Ar	75,2 \pm 3,0 M év	késő-kréta
Űh-22	182,60	<2	illit	K/Ar	106,9 \pm 4,1 M év	középső-kréta
	278,10	<2	illit	K/Ar	117,2 \pm 4,5 M év	kora-kréta
Űh 5	107,03	<10	illit	K/Ar	172,9 \pm 6,6 M év	középső-jura
Űh 1	346,10	<2	illit	K/Ar	190,3 \pm 7,2 M év	kora-jura
	343,90	<2	illit	K/Ar	208,8 \pm 7,9 M év	késő-triász
	345,70	<2	illit	K/Ar	215,0 M év	középső–késő-triász
	349,90	<2	illit	K/Ar	229,7 \pm 8,7 M év	kora-triász

rakációs vizsgálatok alapján kiválasztott mintákból dúsított illitből mért koradatok különböző agyagos repedéskitöltéseket jellemeznek, és egymástól jelentősen eltérnek. 5 kalcitmintán ¹⁴C-módszerrel is történt kormeghatározás (1. táblázat).

A Mecsekben ladin és liász tufa, valamint kréta alkáli bazaltos és fonolitos vulkanizmust ismerünk (NAGY E. 1969; NAGY E., RAVASZ-BARANYAI 1968; HARANGI, ÁRVÁNÉ SÓS 1993). Az utómagmás eredetűnek tekinthető illitek mért K/Ar kora vagy ezekkel közvetlenül van kapcsolatban, vagy keverék korokat tükröz. A vizsgált kalcitok koradatai arra utalnak, hogy idősebbek, mint a jelenlegi mélységi vizek kora, amelyekből a legidősebb vízkor 36 000 évnél adódott. A vizsgált 5 kalcitminta ezek szerint holocén előtti víz- vagy oldatáramlások kiválási terméke.

Összefoglalás

A granitoid kőzettestben tektonikai hatásokra létrejött repedések és töréss övek áramlási lehetőséget biztosítottak

a hidrotermális oldatoknak. A repedéseket befogadó kőzetek ásványos összetevői (mikroklin, albit, biotit, amfibol és kvarc) törmelékes elegyrészként az oldatokba kerültek, ami a repedések többszöri felnyílására és elnyíródására mutat. Ezeket a többszörösen felnyílt repedéseket töltik ki a tulajdonképpeni hidrotermális ásványok.

Az ásványok jelegei alapján a Mórágyi Gránitban lévő hidrotermális képződmények uralkodóan intermedier, Ca-ban és Mg-ban dús oldatokból váltak ki, a hidrotermális folyamatok 340-től 20 °C-ig terjedő hőmérsékleti tartományában, különböző hőmérsékletű fázisokban, több generációban. Alárendelten alkáli, illetve savanyú oldatok termékei is jelentkeznek. A repedések többszöri felnyílása és újabb, esetleg eltérő összetételű és hőmérsékletű oldatok érkezése megnehezíti az egymás mellett előforduló ásványok elemzését, a kitöltések generációinak időbelisége összehasonlítható. Az oldatösszetételek ritmikus változására mutat pl. a zónás felépítésű karbonátásványok vagy a dolomit-paligorszkit–montmorillonit-szintek ritmikus váltakozása (Üh–22 fúrás).