

Hydrogeological monitoring network at the Bábaapáti (Üveghuta) Site

ÁGNES ROTÁR-SZALKAI¹, ISTVÁN HORVÁTH¹, KÁROLY MARSÓ¹, PÉTER NAGY¹, LAJOS Ó. KOVÁCS²,
TEODÓRA SZŐCS¹ and GYÖRGY TÓTH¹

¹Geological Institute of Hungary, H-1143 Budapest, Stefánia út 14.

²Hungarian Geological Survey, H-1143 Budapest, Stefánia út 14.



Keywords: ground water, Hungary, hydrogeology, meteorology, monitoring, Mórág Block, observation wells, South-eastern Transdanubia, water table, water composition,

Abstract

By means of a hydrogeological monitoring network, established in the wide surroundings of the Bábaapáti (Üveghuta) Site, recordings were made mainly of the qualitative and quantitative changes in surface and subsurface waters due to natural processes. For the evaluation the measurements were complemented by hydrometeorological parameters.

In the course of the investigation of surface waters, it was established that the discharge of streams varies between wide limits as a function of the amount of the precipitation. The flood waves diminish in a few days after the rainfall; their discharge exceeds even ten times the base flow. The base flow of the streams deriving from subsurface waters was steady; some streams became dry only in the summer of 2003, in an extremely dry period.

The observation wells were divided into groups on the basis of the detected groundwater regime. These groups corresponded to the different hydraulic positions of the observation wells. Different water table changes characterised the hilltop, hillside, and valley-bottom observation wells. The water table changes of the hilltop observation wells were controlled by the changes in air pressure and the tidal phenomena, while the water tables of the valley-bottom observation wells reacted sensitively to the infiltration and evaporation events. The hillside observation wells show a transitional character between the two former groups. The short-term groundwater table changes were caused by the air pressure, while the long-term ones were the result of the summarised effects of precipitation.

The changes in the heads of water stored in the fissure system of granite were also caused by the air pressure and tidal phenomena. In the closed fissure system the dominant character of this latter effect was observed, as opposed to the groundwater table changes.

In the course of the water composition investigations, it was established that the hydrochemical features of both the surface and subsurface waters have low natural changeability. The hydrochemical changes of the surface waters reflect the change in the ratio of the surface runoff and the recharge from below the surface. In the course of the examination of the surface waters the water sampling points were divided into two groups (*i.e.* waters of younger and older age). In the hydrochemical composition of the observation wells the mixing of the older waters from deeper horizons and the near-surface younger waters was shown.



Introduction

The aim of the hydrogeological monitoring network is to provide continuous information on the effects, regularities, and trends of the natural processes taking place in the environment through the investigation of the wide surroundings of the Bábaapáti (Üveghuta) Site. The tasks of the observation system are different during the exploration of the Site, during the building and filling up of the repository, and also after its closing. In the stage of site exploration the primary

tasks were the following: (i) a survey of the initial situation relating to the environmental elements of the region; (ii) simultaneous data supply for the different phases of the site characterisation and (within it) for the hydrodynamic modelling and safety analysis.

The observation points of the monitoring network (Figure 1) were developed by using the objects established during the exploration. Simultaneously with the progress of the exploration, the number of observation points, drawn into the monitoring increased gradually. The first observa-

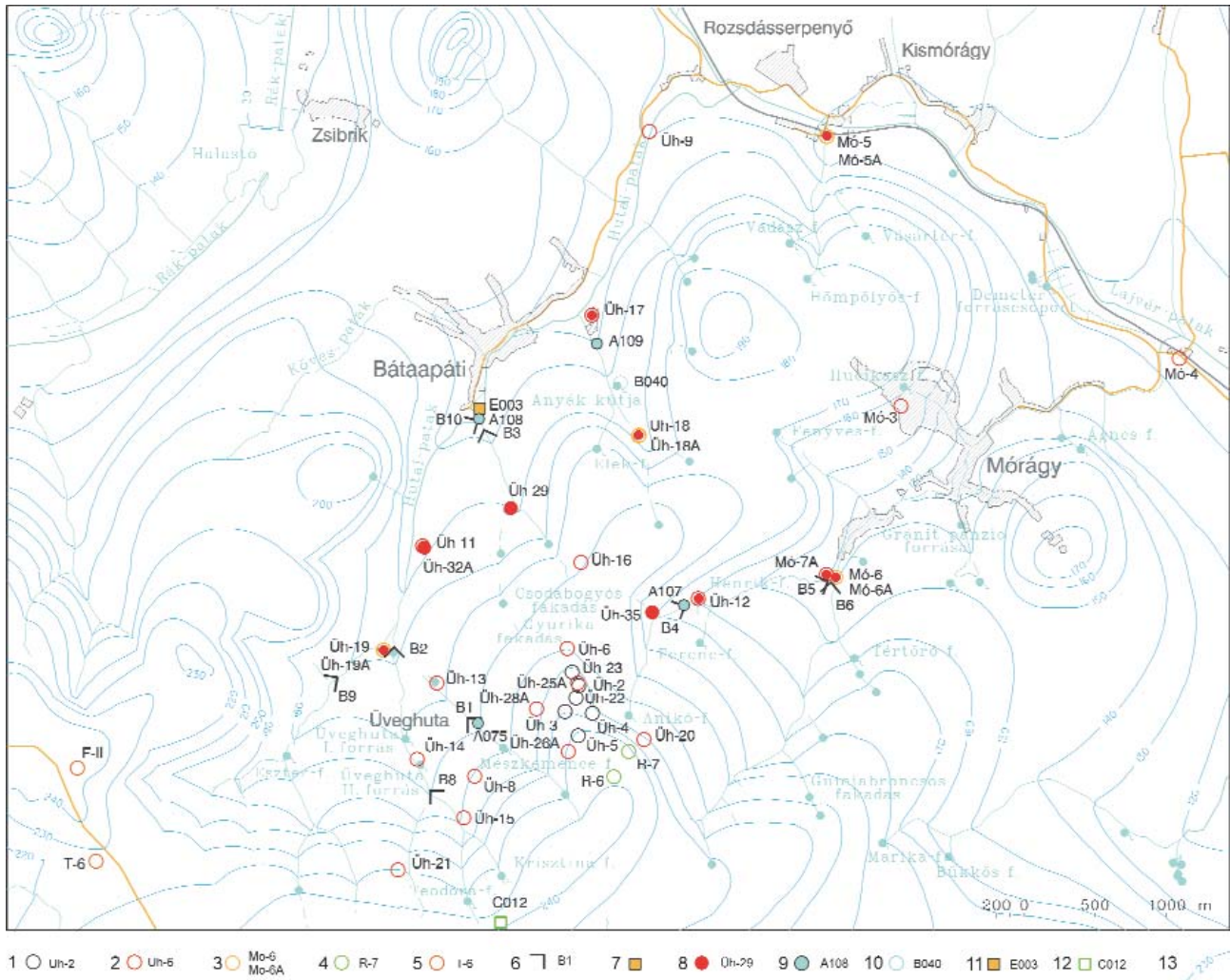


Figure 1. The detecting spots of the hydrogeological monitoring network and the localities of the hydrochemical investigations

1 – observation well, made from deep borehole, 2 – observation well, made from shallow borehole, 3 – double observation wells, made from shallow boreholes, 4 – observation well, made from geophysical shot hole, 5 – observation well, made from exploratory borehole at Ófalu site, 6 – established gauging station, 7 – meteorological station, 8 – sampled well, 9 – sampling point for surface water, 10 – sampled spring, 11 – sampling place for precipitation, 12 – dug well, 13 – constructed contour line of the groundwater table

1. ábra. A vízföldtani monitoringrendszer észlelési pontjai és a vízkémiai vizsgálatok helyszínei

1 – észlelőkúttá kialakított mélyfúrás, 2 – észlelőkúttá kialakított sekélyfúrás, 3 – észlelőkútpárrá kialakított sekélyfúrások, 4 – észlelőkúttá kialakított geofizikai robbantólyuk, 5 – észlelőkúttá kialakított ófalu-i kutatófúrás, 6 – állandósított vízhozammerő műtárgy, 7 – meteorológiai állomás, 8 – mintázott kút, 9 – felszíni vízmintavételi hely, 10 – mintázott forrás, 11 – csapadék-mintavételi hely, 12 – ásott kút, 13 – szerkesztett talajvíz-szintvonal

tions – which have been at a limited number of observation points so far – began in the second half of 1997. Continuous observations, covering simultaneously all the possible points, started in the February 1999 and have carried on until the present day in a uniform system and have expanded continuously by objects established at different stages of the exploration.

First of all, the monitoring system records the qualitative and quantitative changes in subsurface waters. For the interpretation of this, the registration of the changes in the qualitative and quantitative parameters of surface waters as well as in the hydrometeorological parameters influencing the subsurface hydrological cycle, is indispensable. The measurements were carried out at a meteorological station using an

observation well system consisting of 45 shallow and 14 deep boreholes, 13 gauging stations, and some springs. Water samples were collected from 14 points in a monthly frequency. The several years of observation provided the possibility to characterise the changes in subsurface waters under natural conditions and to determine the factors causing the changes (ROTÁRNÉ SZALKAI et al. 2002). The proportion of the surface waters deriving from below the surface was determined. The trends and periodicity of the changes in the water table and the water head, measured in observation wells, have been investigated and compared to the similar kind of alternations of the meteorological parameters. The degree of changes in water composition were determined with the different recharge features for subsurface waters of different ages.

Results of the hydrometeorological measurements

The changes in the flow system of the subsurface waters and in the runoff conditions of the surface waters are equally in close connection with the hydrometeorological alternations. The parameters representing these changes — *i.e.* the amount of precipitation, the air temperature and pressure — have been continuously measured by automatic electronic measuring instruments at a meteorological station. The latter was established in Bátaapáti, at the beginning of November 1999. The amount of precipitation was recorded by a Lambrecht 15188 type automatic measuring device (with 0.1 mm accuracy). This is suitable also for measuring winter precipitation due to the factory-equipped heating apparatus in it. The changes in air pressure were measured by a Vaisala PTB200 type digital measuring device (with 10 hPa accuracy), while changes in air temperature were measured by a DTR13 type thermometer equipped with a shading screen (with 0.1 °C accuracy). The measured available data were recorded by a QLC50 type data logger at a 10 minute frequency.

The evaluation of the data from the hydrogeological observations began in 1997 and data collection has carried on continuously since then. The latter were measured by the stations of the Hungarian Meteorological Service. The stations at Pécs and Véménd were taken into account for the period before the establishment of the meteorological station at Bátaapáti.

The analysis of the parameters measured at the meteorological station at Bátaapáti was carried out with the accuracy necessary primarily for the interpretation of the hydrogeological observations. During the evaluation no attempts were made to detect new phenomena or new tendencies; rather, the aim was to determine the degree of the already known processes in the studied period and in the region of the measuring station at Bátaapáti. The results of the most important hydrometeorological measurements can be summarised as follows.

By comparing the average temperatures of the consecutive years it has been confirmed that, in accordance with the climatic conditions of the region, the yearly rhythm of temperature alternation is balanced and greater anomalies do not appear. The trends over several years of monthly average temperature, however, show a more varied picture. A greater deviation from the many years' tendency can be seen during the extremely cold periods in December 1999 and February 2003, as well as during the periods that were much warmer (+3 °C) than the average in May and June 2003. The latter value from the data sequence from Pécs was the highest one measured in the course of the last 100 year.

In general, the changes in air pressure show higher values in the winter months (the difference between the maximum and minimum values is above 30 hPa) and lower ones (20 hPa or below) in the summer months. The daily fluctuation of air pressure is about 1 hPa at Bátaapáti, but in case of a sudden change in weather a difference of 10 hPa may also

occur. In the course of the statistical study (cycle analysis) of the air pressure time series, regularly repeating 8, 12, and 24 hours rhythmical alternations were detected.

In the region of Bátaapáti there is no information on the spatial distribution of the precipitation. The nearest precipitation measuring station can be found at Véménd. By comparing the measurement data of the two stations, it has been established that differences in the amount of the precipitation may occur even within a short distance. (This has been observed mainly in case of the heavy showers of the summer period in short terms.) Generally, the yearly precipitation amount varies between 600–700 mm. Based on the data of the measuring station at Véménd (for the period between 1961–1990), the many years' average of precipitation is 636 mm. The average of the yearly precipitation, measured at Bátaapáti is similar to that at Véménd (627.6 mm in the period between 1999–2003). The 1990s proved to be wetter: the only year in which the annual precipitation did not exceed 500 mm was 1990 (the precipitation was 489.5 mm). The yearly precipitation exceeded 700 mm, a value several times greater than the average (in the years 1991, 1993, 1995, 1998, and 1999). The year 2000 and afterwards can be regarded as poor in precipitation as compared to the previous period. The precipitation exceeded 600 mm (624.8 mm) only in 2001, while in 2000 and 2003 values below 450 mm (364.2 mm and 432.9 mm, respectively) were measured.

The yearly distribution of precipitation shows generally two, rarely three maxima. In average values, the difference between the maximum (June) and minimum (February) of the monthly precipitation is almost four-fold. The precipitation in the winter and summer half years differs considerably — it is nearly two-fold in the summer half years.

Results of the water stage–discharge measurements in the surface waters

The task was to know exactly the hydrological cycle of the area, to determine precisely the connection between the surface and subsurface waters, as well as to characterise the surface runoff. For this reason altogether 13 gauging stations (overfalls) were established on the streams in the environs of the Site (Huta Creek, Mórógy Creek, Nagymórógy Creek, Mézskemence Creek, Éva Valley cut, Mély Valley cut and Hosszú Valley cut; Figure 1). The establishment of the Overfalls took place in two steps. By creating overfalls B1, B2, B3 and B4 in 1999 as well as 2000, it was intended mainly to track the changes in time in the water amount ascending from below the surface in the four valleys nearest to the Site. Thus these observation points were designated in the upper sections of the streams. The further gauging stations, established in 2002, enabled the investigation of the surface and subsurface hydrological cycle which is characteristic of the whole region of the Site, and its changes over time. Accordingly, the observation points serving the characterisation of the water behaviour in the upper sections of the streams (B7, B8, B9) have been complemented. The gauging stations

(overfalls) in the lower sections of the streams were established in order to investigate the water amount collected during the surface and subsurface runoff in some partial catchment areas (B5, B6, B10, B12). This included the two most important streams (B11: Huta Creek, B13: Mórág Creek) during the surface and subsurface runoff. During the installation it was taken also into consideration that, although the regime of the streams can be regarded as balanced in the dry period, the discharge of the creeks may be multiplied in the wet season. Due to the change of several orders of magnitude in water discharges, a specific measuring device had to be created. It also had to measure discharges of several thousand l/min reliably, besides the exact measurement of discharges of some l/min. The choice fell on a complex measuring overfall with a crest composed of two profiles of different inclination. In the winter period, when the temperature of the air sinks permanently below freezing point, the creeks quickly freeze due to their small stream character. Therefore, it is not possible to

measure continuously the water stage and discharge — not even by regular maintenance and ice breaking.

The water stage rise of the streams follows clearly the amount of the precipitation. All the gauging stations are characterised by the fact that the water stage rise appears with a delay of some hours after the rainfall. The flood wave, caused by a single rainfall within one day, subsides in 24 hours. On the other hand, nearly one week of wet weather results a rise in the water stage, lasting 4-5 days after the rainfall has stopped. On the basis of the results of long-term water stage measurements, it can be stated that the regime of the studied streams is rather extreme. After a great amount of precipitation at one time, the flood discharge may exceed even by more than ten times the small-water base flow of the winter and end summer periods, which are poor in precipitation. In the winter period the sudden, quick water stage rise, due to the precipitation, as well as the long-lasting, more permanent water stage rise, caused by snow melting, can easily be separated. In summer,

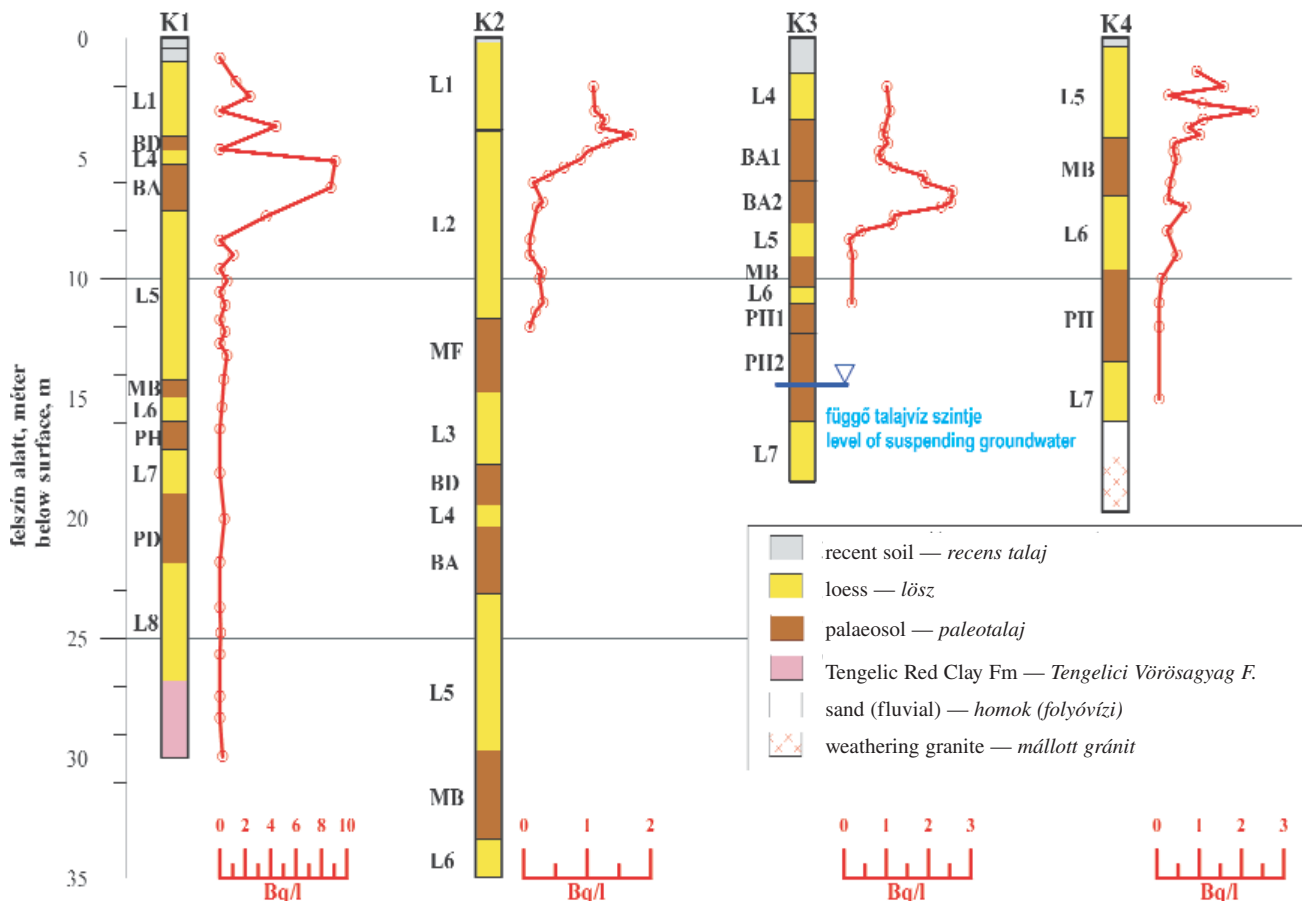


Figure 2. Sections and investigation results of the dug wells drilled in the Üveghuta Research Area

Paks Loess Formation: L1-L8 = loess horizons; MF = Mende Upper Palaeosols; BD = Basaharc Double Palaeosols; BA1 = Basaharc Lower Palaeosols, Upper horizon; BA2 = Basaharc Lower Palaeosols, Lower Horizon; MB = Mende Basic Palaeosols; PH1 = Paks Sandy Palaeosols, Upper Horizon; PH2 = Paks Sandy Palaeosols, Lower Horizon; PD = Paks Double Palaeosols; PDL = interstratified loess in Paks Double Palaeosols; red curve = tritium content in the rock moisture (After MARSÍ et al. 2004)

2. ábra. Az üveghutai kutatási területen mélyült ásott kutak szelvényei és vizsgálati eredményei

Paksi Löss Formáció: L1-L8 = löszhorizontok; MF = Mendei Felső Talajhorizont, Felső Talaj; BD = Basaharc Dupla Talajhorizont; BA1 = Basaharc Alsó Talajhorizont, Felső Talaj; BA2 = Basaharc Alsó Talajhorizont, Alsó Talaj; MB = Mende Bázis Talajhorizont; PH1 = Paksi Homokos Talajhorizont, Felső Talaj; PH2 = Paksi Homokos Talajhorizont, Alsó Talaj; PD = Paks Dupla Talajhorizont; piros görbe = közetnedvességben mért tríciumtartalom (MARSÍ et al. 2004 után)

in the permanently dry, warm periods (like in the summer of 2002), the degree of evaporation is in balance with the subsurface recharge of the base flow, which results in the daily fluctuation of the water stage. If the degree of the evaporation exceeds the recharge from below the surface, the water stage subsides below the “0 level” on the gauge, the overfall of water over the structure stops, dead water accumulates behind the overfall crest, and in an extreme case the channel becomes dry. The summer of 2003, which was poor in precipitation, resulted in the complete drying-up of several measuring sections.

Changes in the groundwater tables

The changes in the groundwater tables were recorded in 40 observation wells. The latter were created from shallow boreholes (M6-3, M6-4, M6-5, M6-5A, M6-6, M6-6A, M6-7A, M6-7B, M6-7C, M6-7D, Üh-6, Üh-8, Üh-9, Üh-11, Üh-12, Üh-13, Üh-14, Üh-15, Üh-16, Üh-17, Üh-18, Üh-18A, Üh-19, Üh-19A, Üh-20, Üh-21, Üh-25A, Üh-26A, Üh-28A, Üh-31A, Üh-31B, Üh-31C, Üh-32A, Üh-32B, Üh-32C, Üh-32D, Üh-33, Üh-34, Üh-35, and Üh-36A), geophysical shot holes (R-6 and R-7), and two observation wells in the Ófalu research area (F-II and T-6, Figure 1). The change in the heads of the waters, filling the fissure system of the granite, was measured in the different depth intervals of the 14 deep boreholes (Üh-2, Üh-3, Üh-4, Üh-5, Üh-22, Üh-23, Üh-25, Üh-26,

Üh-27, Üh-28, Üh-29, Üh-30, Üh-36 and, Üh-37) in the area of the Site, separated by packers. For measuring the changes in the groundwater tables, the measuring devices Hidroprofi-L (operating on the principle of floating balance) and Dataqua (equipped with a pressure probe) were used. The observation results were read weekly; when the reading took place manual water table check measurements were also carried out every time. In the observation wells, created from deep boreholes, the packer intervals of the measuring multipacker system have since been remodelled several times in accordance with the changing research tasks. Thus there are no sequences in which there are many years of undisturbed data.

In the Üveghuta area, the following effects influencing the subsurface water tables had to be taken into account:

- infiltration from precipitation,
- evaporation of ground water,
- changes in the water tables of drainage wells and streams,
- changes in air pressure,
- terrestrial tides,
- hydraulic tests, pumping tests,
- water samplings,
- drilling activity.

For evaluating the changes in the groundwater tables, the water table time series were divided into groups on the basis of several points of view. The interpretation was carried out by both comparative analysis of the regime curves of the wells and by statistical methods.



Figure 3. Connection between the water tables of observation wells Üh-6 and R-6 and the air pressure

3. ábra. Kapcsolat az Üh-6 és az R-6 észlelőkutak vízszintje és a légnyomás között

The observation wells were established in different hydraulic positions of the flow system of the region and thus the changes in water composition, water tables and heads at different points of the flow system could be recorded. The majority of the observation wells, as well as the well pairs, were drilled in the possible upward zones, on the valley bottoms, to a depth of 15–50 m. Thus they react directly to the changes in weather by their near-surface water tables. At some places, (20–80 m deep) water table observation wells were also established which recorded the deeper water tables of partly the hilltops and partly the hillsides. On this basis, *hilltop*, *hillside*, and *valley-bottom* observation wells are distinguished. At the same time the above grouping agrees with the separation according to the groundwater depth below the terrain. In the valley-bottom observation wells, the groundwater table below the terrain is 0.3–6.5 m, in the hillside ones it is 10.5–33.8 m, while in the hilltop ones is 53.3–79.98 m.

In the different hydraulic positions, different phenomena affect the subsurface waters and thus even the nature of their water table time series differs considerably. The differences were observed both in the short-term changes and in changes over many years. The regime curves of the hilltop, hillside, and valley-bottom water table observation wells were compared. This showed that valley-bottom wells, having a near-surface water table, react sensitively to the infiltration and evaporation events, while the regime of other observation wells is determined mainly by the changes in air pressure.

The water table time series of the *valley-bottom* observation wells are characterised by daily and seasonal changes. A yearly cycle can also be recognised, but rhythms over several years have not been detected. A determinant factor in the water table changes of the valley-bottom observation wells is the degree of infiltration from precipitation. The latter is a function of the duration of the dry period before rainfall, the amount of the precipitation which falls at one time, and the intensity of the rainfall. The reason for the difference between certain observation wells is that this effect is influenced predominantly by the amount of water flowing in the sediments (alluvium), deposited on the valley bottoms. The degree of the effect depends on the thickness of the alluvium. It was shown by correlation investigations that the water table changes in most of the valley-bottom observation wells are in close relationship with the monthly sum of the precipitation. On the basis of the difference in the daily changes in the water table data, as well as the cross-correlation comparison of the daily precipitation amounts, the effects of precipitation were detected immediately only in the water table of Observation Well Üh-11. The signs of the close correlation relationship with precipitation appeared only two days later in Observation Wells Üh-13, Üh-14, Üh-15, Üh-17 and Üh-19, and with a delay of several days elsewhere (Figure 2). A peculiar phenomenon is the melting of snow that — similarly to the surface waters — also raises the table of the subsurface waters. In the water table changes of the wells established on alluvial sediments, a daily fluctuation appears — mainly in the summer period — which can be interpreted clearly as the effect of evapotranspiration here — that is, groundwater evaporation. The evaporation is of a different degree in the different observation wells. There are valley and near-valley wells (e.g. M6-4) where the sinking of the water table is a result of the draining of the system and not the groundwater evaporation.

The water table time series of the *hillside* observation wells are controlled by many years of changes. These changes are also of cyclic character with the duration of a cycle being four-five years. The water table changes are equally influenced by the amount of the precipitation, the air pressure, and the tidal phenomena. Out of the wells, Üh-16 differs from the others in its low water table fluctuation within the group. However, on the basis of both its hydraulic

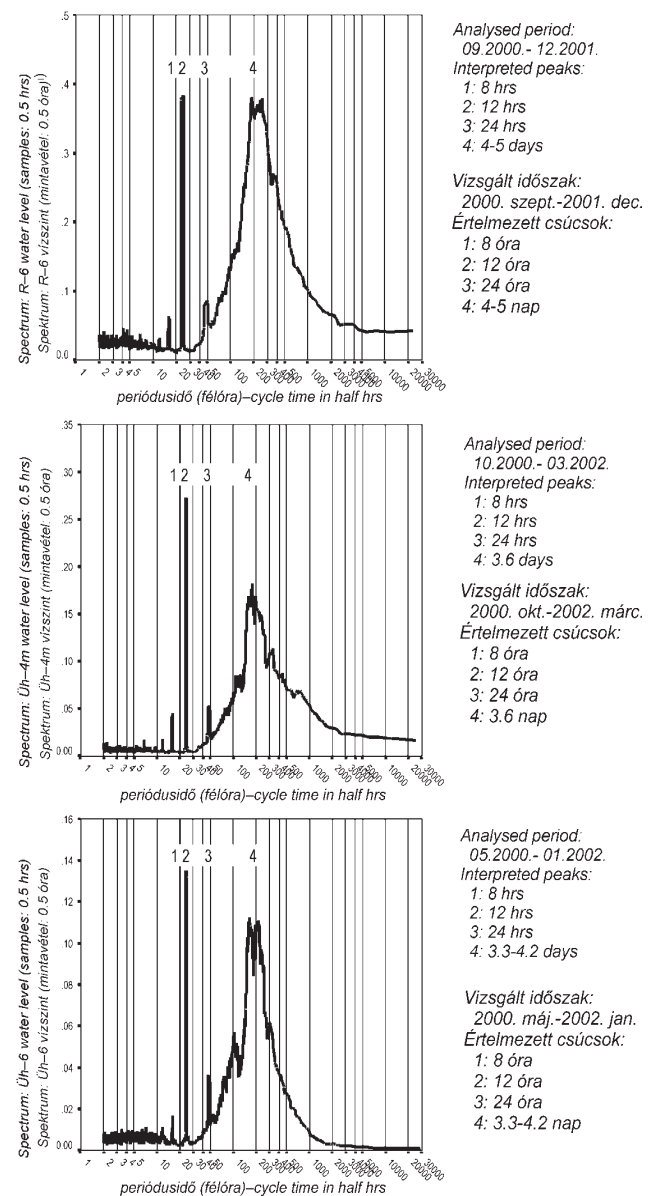


Figure 4. Typical spectra, determined during the cycle investigation of the groundwater table time series of hilltop observation wells
4. ábra. Dombtetői észlelőkutak talajvízszint-idősorainak ciklusvizsgálata során meghatározott tipikus spektrumok

position and the investigation of its short-term changes it is reasonable to assign it to this group. A characteristic feature of the hillside group is that some observation wells show similarities with the valley-bottom ones, while the others have similarities with the hilltop ones. The effects of certain rainfall events or wet periods cannot be observed in the water table time series. The effects of the infiltrating waters can be summed up and the water table curves can be brought into close connection with the yearly amount of precipitation. The effects of both the air pressure and the tides appear in the water table changes that, in general (with the exception of R-7), cause just a some cm of water movement. The Observation Well R-7 reacts to the mentioned effects in a way characteristic of the hilltop wells; the air pressure change results in a water movement of around 20 cm.

The detected long-term groundwater table changes in the *hilltop* observation wells show a trend. Probably, these trends may be the consequences of some long-term accumulated effects that cannot be brought into connection with the many years' fluctuation of the weather elements. For exploring the effects that cause the water table changes, the measurements have to be continued for several years. As opposed to the long-term changes, the short-term water table fluctuations are of the same nature and degree, respectively, in every well. The short-period water table movement is controlled by the air pressure and the tides (Figure 3). The cycle investigation in the hilltop observation wells provided total-

ly identical results for all the observation wells; these results reflect the 8 hours, 12 hours, and 24 hours changes in air pressure (Figure 4). The 12 and 24 hours changes are connected to the tidal effects that can only be observed to a small degree with some cm of fluctuations.

Changes in the pressure of fissure waters

Similarly to the hilltop observation wells, the fluctuation in the groundwater head of the granite is influenced mainly by the change in air pressure and the tidal phenomena. In the more closed fissure system of the granite, these effects appear more markedly than in the ground waters. The effects of both the air pressure and the simultaneous tides result in the same degree of groundwater head change in almost every detected interval. As opposed to the ground waters of the hilltop observation wells, the effect of the tides appear more strongly than that of the air pressure in the deeper zones, causing a nearly four times bigger change.

On the basis of statistical analyses, it has been determined that there is a very close connection between the change in air pressure and water table changes. The cycle investigation was carried out for both longer and shorter periods. In the different horizons of the individual observa-

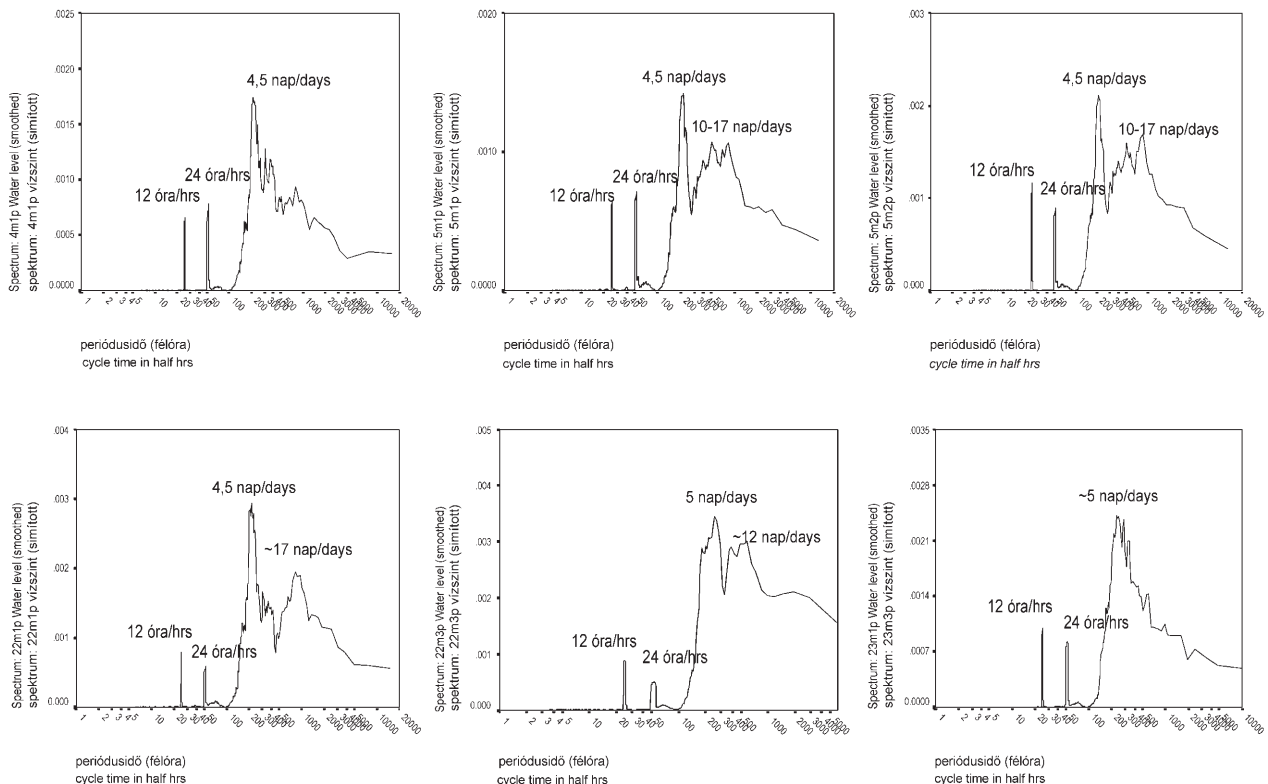


Figure 5. Spectrum of changes, detected in the groundwater heads of observation wells, created from hilltop deep boreholes with the period time of the main cycles

5. ábra. A dombtetői mélyfúrásokból kialakított észlelőkutak potenciálszintjeiben észlelt változások spektruma a főbb ciklusok periódusidejével

Table 1. Data of the sampling spots

Village	Code of the sampling spot	Site of sampling	Subject of sampling	Filtered section (m)	X _{100V}	Y _{100V}	Z (m asl)
Bátaapáti	A075	Mézőkemence Creek, at the mouth of the right side tributary valley	creek		94,917.0	61,5305.0	195.0
	A107	Creek above Overfall B4	creek		95,750.0	61,6760.0	166.0
	A108	Huta Creek, above Overfall B10	creek		97,060.0	61,5310.0	149.0
	A109	Nagymórág Valley, appr. 100 m above Overfall B12	creek		97,590.0	61,6140.0	144.0
	B040	Nagymórág Valley, Anyák-kútja	spring		97,310.0	61,6290.0	154.0
	E003	Huta Creek Valley, meteorological station	rainfall		97,130.0	61,5330.0	147.0
Mórág	Mó-5	Mouth of Naspolya Valley	well	40.0-50.0	99,049.5	61,7766.8	123.5
	Mó-6	Mórág Valley, at the mouth of Éva Valley	well	40.0-50.0	95,954.0	61,7843.2	140.5
	Mó 7A	Mórág Valley, at the mouth of Éva Valley, borehole group	well	37.5 50.0	95,962.1	61,7757.4	144.0
	Üh 12	Éva Valley, near to Henrik Spring	well	12.5 15.0	95,797.9	61,6869.7	162.1
	Üh 18	Nagymórág Valley	well	40.0 50.0	96,946.2	61,6455	156.7
Bátaapáti	Üh-19	Huta Valley, at the mouth of Hosszú Valley, forester's lodge	well	40.0-50.0	95,436.8	61,4656.2	166.5
	Üh-29	appr. 600 m SSE above Overfall B3, 232.3-300.38 m	well	232.3-300.4	96,431.2	61,5537.3	160.6
	Üh-32A	Huta Valley, Idegen Fieldlands, borehole group	well	26.9-50.0	96,154.2	61,4925.4	157.6
	Üh-35	Éva Valley	well	30.0-44.2	95,696.1	61,6530.2	176.2

tion wells, totally concordant results for both parameters were obtained. The long-term cycle investigations revealed changes over periods of 4-5 and 10-17 days, respectively, in the water table changes. They are in accordance with the periods observed during the changes in air pressure. Short-term rhythmical alternations were also detected; for them 12 and 24 hours repeated changes were confirmed by detailed analysis (Figure 5). The so determined cycles show little difference from those of the ground waters. Here, the 12 and 24 hours time-period also reflects the effects of the tidal phenomena. The asymmetric character of the effect was also observed in the deeper horizons, according to which the 12 hours periods are always weaker. As opposed to the ground water, however, no changes repeating every 8 hours were detected, which indicates the effect of the tides on the air pressure. On the basis of their absence in the deep boreholes, it is assumed that the deeper zones of granite form a much more closed system than the aquifer upper fissured granite layer that has only an indirect connection with the air pressure. Due to the nature and structure of the multipacker observation system, there is no possibility for this connection — not even within the observation well.

Water composition investigations

The aim of the water composition investigations was to detect the changes in time in the composition of the surface and subsurface waters in the Bátaapáti research area. The degree of changes gives information on the stability of the flow system over the course of time. The water composition investigations in the framework of the monitoring helped in

the acquisition of a reliable knowledge on the basic geochemical condition of the subsurface waters.

The designation of the regular sampling points began in July 1997 and with the progress of the research the number of the sampled points has increased. When designating the points, the intention was to get acquainted with the waters of different age and mixing proportion in the flow system of the drainage area, as well as to make the sampling relatively simple and reliably reproducible. The multilevel packer system, built in boreholes deeper than 100 m, precluded automatically the possibility of sampling, with the exception of Well Üh-29 where the depth water comes to the surface.

The regular sampling of the creeks began in 2000 and 2002, respectively.

All the sampling points were established in the possible ascendance zone of contaminants from the subsurface reservoir of low- and intermediate-level radioactive wastes.

The sampling points of the water composition (Table 1, Figure 1) are as follows:

— an observation wells, created from shallow Boreholes Mó-5, Mó-6 and Mó-7A, as well as Üh-12, Üh-18, Üh-19, Üh-32A and Üh-35;

— observation well, created from deep Borehole Üh-29;

— surface streams: Éva Valley (A107), Mézőkemence Valley (A075), Huta Creek (A108), and Nagymórág Valley (A109);

— a captured spring: Anyák-kútja (B040) in the Nagymórág Valley,

— precipitation at the meteorological station (E003).

Water sampling took place on a monthly basis. In the weathered or fissured granite the filtered wells penetrate

generally poor aquifers; after their draining the recharge is slow and takes place mainly from above, from the upper groundwater tables; after the recharge the original water composition is restored over a period of a few months. The water extraction before sampling was minimised in order to shorten the period of the restoration of the original water composition. A customised sampling procedure has been elaborated for all the sampled wells, taking into account the experiences of the investigations. During the sampling, the following parameters in the frame of measurements made on the spot were recorded:

- water and air temperature,
- pH,
- specific conductivity,
- redox potential,
- alkalinity.

The devices were calibrated by using the factory etalon every sampling day, before the first sampling. When measuring alkalinity, three independent measurements were carried out on each occasion.

The laboratory analyses included the routine measurements (Na, K, Ca, Mg, Fe, Mn, NH_4 , Cl, alkalinity, SO_4 , NO_3 , NO_2 , H_2SiO_3 , KOI, specific conductivity, and pH) and the determination of trace elements (Li, Be, B, Al, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Rb, Sr, Mo, Ag, Cd, Sb, Cs, Ba, La, Tl, Pb, Bi, Th, U) as well as ^2H , ^{18}O , ^{15}N , ^{34}S , and ^{222}Rn isotopes. The measurements of the ^2H and ^{18}O isotopes were carried out by the Laboratory for Geochemical Research of the Hungarian Academy of Sciences (MTA GKL); those of the sulphur and nitrogen isotopes were made by the Institute of Nuclear Research of the Hungarian Academy of Sciences (MTA Atomki). The radon was determined by the Department of Atomic Physics of the Eötvös Loránd University (ELTE).

For the routine measurements as well as the nitrate, oxygen, deuterium, and tritium measurements, the samples were taken in new vessels and were washed three times by the water to be sampled. For the cation as well as trace element measurements, new plastic bottles, previously treated by nitric acid, were used. The bottles were washed twice by distilled water and then nitric acid of high purity was added to them in order to preserve the sample in advance. Concentrated sulphuric acid was added to the bottles necessary for KOI sampling — after acidising and preparing them by distilled water. For the nitrate analyses, the samples were preserved by acetonitril and stored in a cold storage bag or refrigerator, respectively, before beginning the examinations. For the sulphur isotope investigations the sampled water was alkalisied by NaOH to pH 12. Then the precipitation necessary for the analyses was formed by BaCl_2 . For the nitrogen isotope determinations, the samples were preserved by chloroform and stored in a cold storage bag or refrigerator, respectively, before the analysis. For the radon investigations the water sample was put under an “opti-flour-o cocktail”.

In reality, the sampling meant the collection of a sample series. The spectrum of the collected samples varied accord-

ing to the provenance and the purpose of use. In the course of the monthly samplings, there was not always the possibility to collect samples at every sampling point. In December 2002, then in January and March 2003, it was not possible to sample the deep Borehole Üh–29 due to technical reasons. In water-composition monitoring, this was the first really deep Observation Well (filtered between 232.3–300.38 m) in the upward zone and the only one that provides flowing water. Due to tracing investigations, Observation Well Üh–32A was not sampled in December 2002, while the M6–6 and M6–7A were not sampled in March and April 2003. In the dry periods in August, September, and October 2003, the section of the Huta Creek designated for sampling became dry and thus the collection of samples A–108 was suspended for three months.

In Observation Well Üh–18 — drawn into the tracer tests at Borehole Group Üh–31 — the NaBr solution, added as a tracer, then the high-concentration NaCl solution, which was pumped in subsequently, modified the composition of the original water. Here, after the tracer test, the time course of dilution as an effect of the natural flows was examined by regular sampling.

The age of the waters and their position in the flow system are reflected well by the cation exchange (*i.e.* decrease in the amount of Ca^{++} and Mg^{++} as well as an increase in Na^+). The change in the isotope ratio of ^2H and ^{18}O shows the water–rock interaction (Figure 6).

The $\delta^{18}\text{O}$ value of the waters older than 10,000 years is less than -11.5 ; that of the younger waters of Holocene age is

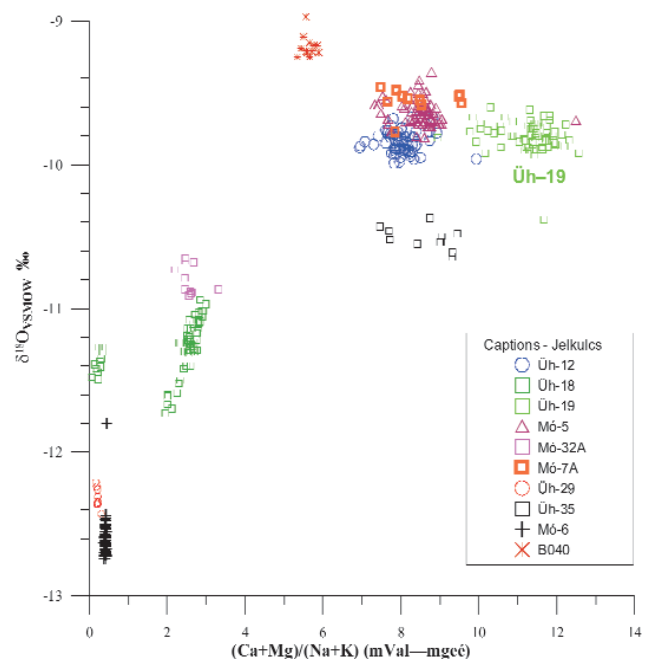


Figure 6. The sampling sites of subsurface waters as a function of $\delta^{18}\text{O}$ and cation exchange

VSMOW = Vienna Standard Mean Oceanic Water

6. ábra. A felszín alatti vizek mintázási helyei a $\delta^{18}\text{O}$ és a kationcsere függvényében

VSMOW = Bécsi standard, átlagos óceánvíz

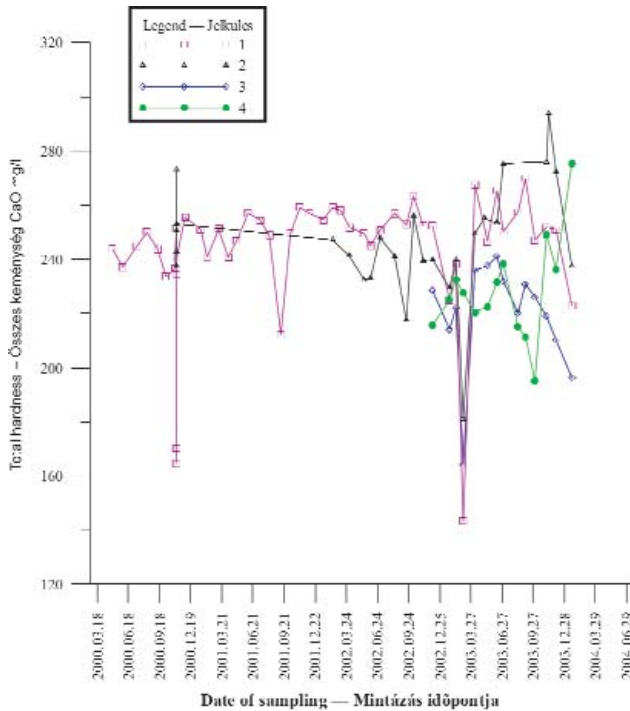


Figure 7. The temporal change in total hardness of the creeks 1 – Éva Creek, Overfall B4, upstream, 2 – Huta Creek, Overfall B10, upstream, 3 – Mészkenecse Creek, Overfall B1, upstream, 4 – Nagymórány Creek, Overfall B12, upstream

7. ábra. A patakok összes keménységének időbeli változása

1 – Éva-völgyi patak, a B4 bukó fölött, 2 – Hutai-patak, a B10 bukó fölött, 3 – Mészkenecse-patak, a B1 bukó fölött, 4 – Nagymórányi-völgy, a B12 bukó fölött kb. 100 m

higher than -10.3 (in general -9.7). The climatic change at the Pleistocene–Holocene boundary represented a nearly 2000 years transitional period. During the investigations the measured values fell between the mentioned boundaries; they thus reflected clearly the transitional character, and at the same time showed clearly the effect of mixing the two kinds of water. It has been proved that the water of Wells M6–6 and Üh–29 derives from the precipitation infiltrated in Late Würmian (their ^{14}C age is around 20 thousand years). The waters of Üh–18, Üh–32A, and Üh–35 are mixed, and of a transitional character; on the basis of ion exchange it was shown that in the first two wells old Holocene, while in the latter one young Holocene water mixed with Würmian waters. The peculiar character of the water of the captured Anyák-kútja spring can be traced back to two causes. The first one is that the feeding ground of the spring is composed of granite, covered by a thin soil layer. In all the other cases the water infiltrates through relatively thick (40–50 m) loess. The latter is accompanied by the dissolution of more Na and less Ca and Mg. The other reason is that the infiltration area of the spring has a topographic position 100 m lower on average than that of the other water sampling points; it may result in the 0.5‰ increase in $\delta^{18}\text{O}$. On the basis of the ion exchange, the youngest water derives from Well Üh–19. It was prepared from two groups of samples from Well Üh–18 (on the left side of Figure 7) after the tracer tests, as mentioned above.

Figure 7 shows the total hardness (the amount of Ca^{++} and Mg^{++}) from the investigation data of the creeks. The remarkably low values of the figure indicate the diluting effect of the precipitation (high water stage) at the time of sampling or immediately preceding it. Only the time series of the creek in the Éva Valley is long enough for investigating fundamental regularities. The values of the base flow fluctuate within 20 units. This could be the common consequence of the evaporation from the alluvium along the creek and the analysis error ($\pm 5\%$). The slightly rising character observed during the studied period refers to the increase in the ratio of the ground water feeding the creek in the first place.

The changeability over time of total hardness for the two groups can be seen in Figures 8 and 9. In both figures the time trend of total hardness shows a rising character in some of the sampled wells (M6–5, Üh–19, Üh–18, Üh–35). The reason for this may be that, after the monthly sampling, the original water conditions are not restored perfectly in the environment of every well. The parallel running of the sawtooth pattern at wells Üh–12 and Üh–19 (Figure 8), for example, cannot be traced back to a natural effect. Furthermore, on the basis of the correlation coefficient of around 0.7 between the two data series its reason is an analytical error.

The temporal change in $\delta^{18}\text{O}$ values is demonstrated by Figures 10 and 11 in the previous grouping. The trend-like change in the oxygen isotope values of the sampled waters reflects water mixing. The examination of the samples from the wells drilled during the research proved that the $\delta^{18}\text{O}$ values decrease downwards in the infiltration zone. Thus the trend in Wells Üh–12, M6–5, and Üh–19 up until the summer of 2002 (Figure 10) can be interpreted by the increasing degree of mixing with older waters. This is in contradiction to the conclusions that can be drawn from the hardness time series of these same wells (Figure 8). However, in this case the latter assumption was accepted as trustworthy. The trend referring to rejuvenation (that can be detected at older waters — Figure 10) is in accordance with the total hardness data (Figure 9).

Since the detected changes are not strikingly great, it is mainly the reliability of analyses as well as the amount of regular and accidental errors that set limits to the reliably demonstrable detection of changes in the flow system and in the evaluation of the results of the water-composition investigations. These errors occurred even in case of careful sampling and sample treating.

Summary

By means of a hydrogeological monitoring network, established in the wide surroundings of the Bátaapáti (Üveg-huta) Site, recordings were made mainly of the qualitative and quantitative changes in surface and subsurface waters due to natural processes. For the evaluation the measurements were complemented by hydrometeorological parameters.

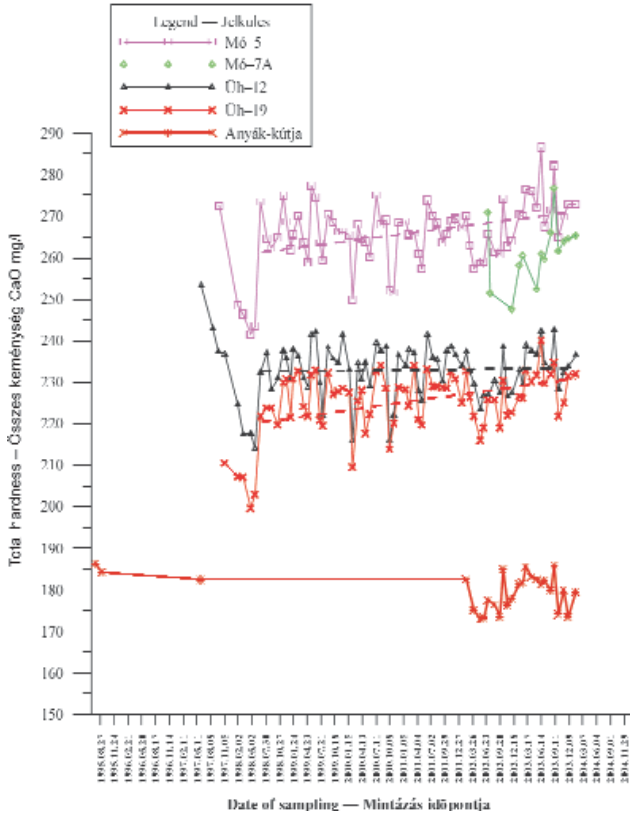


Figure 8. The temporal change in total hardness of the Holocene waters

8. ábra. A holocén vizek összes keménységének időbeli változása

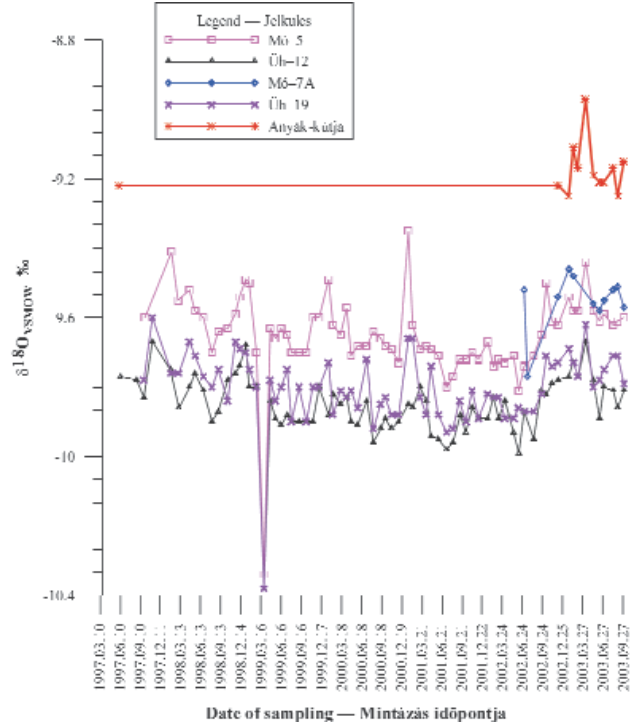


Figure 10. The temporal change in the $\delta^{18}\text{O}$ value of the Holocene waters

VSMOW = Vienna Standard Mean Oceanic Water

10. ábra. A holocén vizek $\delta^{18}\text{O}$ -értékének időbeli változása
VSMOW = Bécsi standard, átlagos óceánvíz

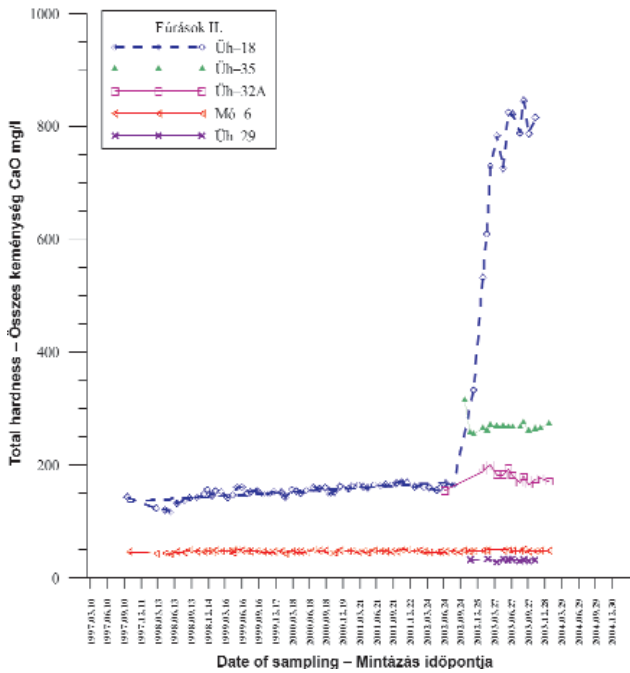


Figure 9. The temporal change in total hardness of the Pleistocene and mixed waters

9. ábra. A pleisztocén és kevert vizek összes keménységének időbeli változása

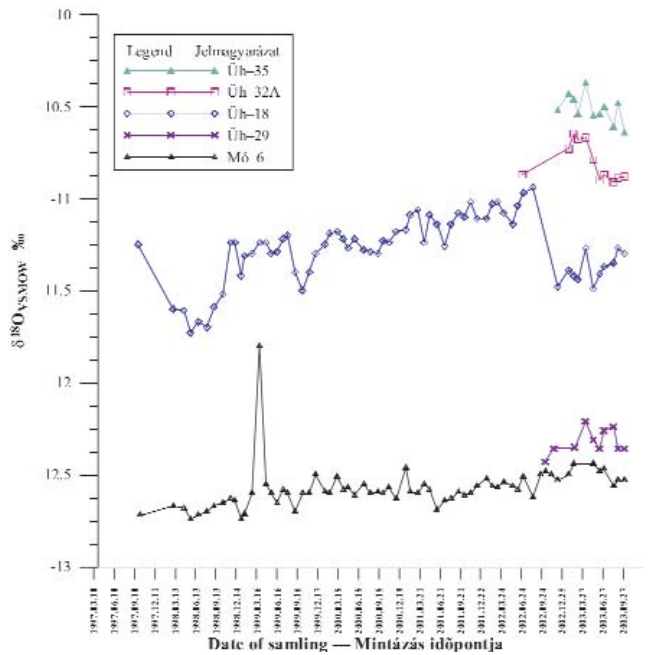


Figure 11. The temporal change in the $\delta^{18}\text{O}$ value of the Pleistocene and mixed waters

VSMOW = Vienna Standard Mean Oceanic Water

11. ábra. A pleisztocén és kevert vizek $\delta^{18}\text{O}$ -értékének időbeli változása
VSMOW = Bécsi standard, átlagos óceánvíz

In the course of the investigation of surface waters, it was established that the discharge of streams varies between wide limits as a function of the amount of the precipitation. The flood waves diminish in a few days after the rainfall; their discharge exceeds even ten times the base flow. The base flow of the streams deriving from subsurface waters was steady; some streams became dry only in the summer of 2003, in an extremely dry period.

The observation wells were divided into groups on the basis of the detected groundwater regime. These groups corresponded to the different hydraulic positions of the observation wells. Different water table changes characterised the hilltop, hillside, and valley-bottom observation wells. The water table changes of the hilltop observation wells were controlled by the changes in air pressure and the tidal phenomena, while the water tables of the valley-bottom observation wells reacted sensitively to the infiltration and evaporation events. The hillside observation wells show a transitional character between the two former groups. The short-term groundwater

table changes were caused by the air pressure, while the long-term ones were the result of the summarised effects of precipitation.

The changes in the heads of water stored in the fissure system of granite were also caused by the air pressure and tidal phenomena. In the closed fissure system the dominant character of this latter effect was observed, as opposed to the groundwater table changes.

In the course of the water composition investigations, it was established that the hydrochemical features of both the surface and subsurface waters have low natural changeability. The hydrochemical changes of the surface waters reflect the change in the ratio of the surface runoff and the recharge from below the surface. In the course of the examination of the surface waters the water sampling points were divided into two groups (*i.e.* waters of younger and older age). In the hydrochemical composition of the observation wells the mixing of the older waters from deeper horizons and the near-surface younger waters was shown.

References — Irodalom

ROTÁRNÉ SZALKAI Á., BÁNYAI L., HORVÁTH I., MENTES GY., Ó. KOVÁCS L., PAPP G., SZÉKVÖLGYI K., TÓTH GY. 2002: Kis és közepes radioaktivitású erőművi hulladékok végleges elhelyezése. Az üveghutai kutatások kiegészítő munkái, a kutatási terület környezeti megfigyelőrendszerének működtetése 1998–2002 (in Hungarian: Final disposal of the low- and in-

termediate-level radioactive wastes from the nuclear power plant. Complementary works of the Üveghuta investigations, operation of the environmental monitoring system in 1998–2002). — *Manuscript*, Geological Institute of Hungary, Budapest.

Vízföldtani megfigyelő-hálózat a Bátaapáti (Üveghutai)-telephelyen

ROTÁRNÉ SZALKAI ÁGNES¹, HORVÁTH ISTVÁN¹, MARSÓ KÁROLY¹, NAGY PÉTER¹, Ó. KOVÁCS LAJOS²,
SZÓCS TEODÓRA¹, TÓTH GYÖRGY¹

¹ Magyar Állami Földtani Intézet, 1143 Budapest, Stefánia út 14.,

² Magyar Geológiai Szolgálat, 1143 Budapest, Stefánia út 14.

Kulcsszavak: Délkelet-Dunántúl, felszín alatti vizek, hidrogeológia, Magyarország, megfigyelőkutak, meteorológia, monitoring, Mórágyi-rög, vízminőség, vízszint

Összefoglalás

Az üveghutai telephely tágabb térségében kialakított vízföldtani monitoringrendszerrel elsősorban a felszíni és a felszín alatti vizek természetes folyamatok hatására bekövetkező mennyiségi és minőségi változásait regisztráltuk. Az értékeléshez méréseinket hidrometeorológiai paraméterekkel egészítettük ki.

A felszíni vizek vizsgálata során megállapítottuk, hogy a vízfolyások vízhozama a lehullott csapadék mennyiségének függvényében széles határok között változik. Az árhullámok a csapadékot követő egy-két nap alatt levonulnak, vízhozamuk esetenként az alapvízhozam tízszeresét is meghaladta. A vízfolyások felszín alatti vizekből származó alapvízhozama egyenletes volt, csak 2003 nyarán, egy rendkívüli száraz időszakban száradt ki több vízfolyás.

Az észlelőkutakat a megfigyelt talajvízjárás alapján több csoportba soroltuk. Az így meghatározott csoportok megfeleltek az észlelőkutak különböző hidraulikai helyzetének. Eltérő vízszintváltozások jellemezték a dombtetői, a domboldali és a völgytalpi helyzetű észlelőkutakat. A dombtetői észlelőkutak vízszintváltozását a légnyomás változása és az árapályjelenségek határozták meg, míg a völgytalpi észlelőkutak vízszintjei érzékenyen reagáltak a beszivárgási és a párolgási eseményekre. A domboldali észlelőkutak átmeneti jelleget mutatnak az előző két csoport között. A rövid idejű talajvízszint változásokat a légnyomás, a hosszú idejűeket a csapadék összegzett hatása okozta.

A gránit repedésrendszerében tárolt víz potenciálszintjének változását szintén a légnyomás és az árapályjelenségek váltották ki. A zárt repedésrendszerben a talajvízszint-változásával ellentétben az utóbbi hatás domináns jellegét figyeltük meg.

A vízminőségi vizsgálatok során megállapítottuk, hogy mind a felszíni, mind a felszín alatti vizek vízkémiai jellemzői kis természetes változékonysággal rendelkeznek. A felszíni vizek vízkémiai változásai a felszíni lefolyás és a felszín alól utánpótlódó víz arányának változását tükrözik. A felszín alatti vizek vizsgálata során a vízmintavételi helyeket két csoportra (fiatalabb és idősebb korú vizek) bontottuk. Az észlelőkutak vízkémiai összetételében a mélyebb szintekből származó idősebb és a felszínhez közeli fiatalabb vizek keveredését mutattuk ki.

Bevezetés

A vízföldtani monitoringrendszer célja, hogy a Bátaapáti (Üveghutai)-telephely tágabb térségének vizsgálata révén folyamatos információt szolgáltasson a környezetben lejátszódó természetes folyamatok hatásáról, szabályosságáról és trendjéről. A megfigyelőrendszer feladata a telephelykutatás, a tároló kiépítése és feltöltése során, illetve lezárását követően eltérő. A telephelykutatás szakaszában elsődleges feladat volt a térség környezeti elemeire vonatkozó alapállapot-felmérés, valamint egyidejűleg adatok szolgáltatása a telephely jellemzésének különböző fázisaihoz, ezen belül a hidrodinamikai modellezéshez és a biztonsági elemzéshez.

A megfigyelőrendszer észlelési pontjait (1. ábra) a kutatás során létesített objektumok felhasználásával alakítottuk ki. A kutatások előrehaladtával fokozatosan nőtt a megfigyelésbe bevont észlelőhelyek száma. Az első észleléseket — egyelőre korlátozott számú észlelőponton — 1997 második felében kezdtük. Az összes lehetséges megfigyelőhelyre egyidejűleg kiterjedő folyamatos észleléseket 1999 februárjától a kutatás különböző fázisaiban létesített objektumokkal folyamatosan bővülő, egységes rendszerben a mai napig folytatjuk.

A megfigyelőrendszer elsősorban a felszín alatti vizek mennyiségi és minőségi változásait rögzíti, amelyek értelmezéséhez elengedhetetlen a felszíni vizek mennyiségi és minőségi, illetve a felszín alatti vízforgalmat befolyásoló

hidrometeorológiai paraméterek változásainak regisztrálása. A méréseket egy meteorológiai állomáson, 45 sekélyfúrásból és 14 mélyfúrásból kialakított észlelőkútban, 13 vízhozammérő műtárgyon és egy-két forráson végezzük. Havonkénti gyakorisággal 14 helyről vízmintákat gyűjtünk. A többéves megfigyelés lehetőséget adott a felszín alatti vizek természetes állapotban történő változásainak jellemzésére, a változásokat kiváltó tényezők meghatározására (ROTÁRNÉ SZALKAI et al. 2002). Meghatároztuk a felszíni vizek felszín alól származó hányadát. Vizsgáltuk az észlelőkutakban mért vízszint- és potenciálszint-változások trendjét és periodicitását, valamint összevetettük ezeket a meteorológiai paraméterek hasonló jellegű változásaival. Meghatároztuk a vízminőségi változások mértékét, illetve megismertük a különböző korú felszín alatti vizek eltérő utánpótlási sajátosságait.

A hidrometeorológiai mérések eredményei

A felszín alatti vizek áramlási rendszerének és a felszíni vizek lefolyási viszonyainak változása egyaránt szorosan összekapcsolódik a hidrometeorológiai változásokkal. Az ezeket reprezentáló paramétereket (a csapadék mennyisége, a léghőmérséklet, a légnyomás) egy — Bátaapátiban kialakított — meteorológiai állomáson 1999. november eleje óta folyamatosan, automata elektronikus mérőműszerekkel mértük. A csapadék mennyiségét Lambrecht 15188 típusú automata csapadékmérő műszerrel (0,1 mm pontossággal) regisztráltuk, amely a belsejében gyárilag elhelyezett fűtőberendezés-jóvoltából téli csapadék mérésére is alkalmas. A légnyomás változását Vaisala PTB200 típusú digitális légnyomásmérő műszerrel (10 hPa pontossággal), a léghőmérsékletet DTR13 típusú árnyékoló ernyővel ellátott hőmérővel (0,1 °C pontossággal) mértük. A mért adatokat egy QLC50 típusú adatgyűjtő 10 percnkénti gyakorisággal rögzítette.

Az 1997-ben megkezdett és azóta is folyamatosan végzett vízföldtani észlelések adatainak kiértékeléséhez összegyűjtöttük a bátaapáti meteorológiai állomás telepítése előtti időszakokra vonatkozó, az Országos Meteorológiai Szolgálat (OMSZ) pécsi és vémei állomásain mért adatait.

A bátaapáti meteorológiai állomáson mért paraméterek elemzését elsősorban a vízföldtani megfigyelések értelmezéséhez szükséges részletességgel végeztük el. Értékelésünk során nem új jelenségek, illetve új tendenciák megállapítására törekedtünk, hanem a már ismert folyamatok mértékét határoztuk meg a vizsgált időszakokra, a bátaapáti mérőállomás térségére. A legfontosabb hidrometeorológiai mérések eredményei az alábbiakban foglalhatók össze.

Az egymást követő évek átlaghőmérsékleteinek összehasonlításával megállapítottuk, hogy a térség éghajlati adottságainak megfelelően a hőmérséklet-változás évenkénti ritmusa kiegyenlített, nagyobb anomáliák nem jelentkeznek. A havi átlaghőmérséklet többéves alakulása már változatosabb képet mutat. A többéves tendenciától nagyobb eltérés mutatkozik az 1999. év decemberében és a 2003 februárjában jelentkező rendkívüli hideg, illetve a 2003. május és június hó-

napokban észlelt, az átlagosnál jóval (3 °C-kal) melegebb időszakokban. Ez utóbbi — a pécsi adatsorban — az elmúlt 100 év során mért legmagasabb érték volt.

A légnyomás változása a téli hónapokban általában magasabb (a maximum és a minimum értékek közötti különbség 30 hPa felett van), míg a nyári hónapokban alacsonyabb (20 hPa, illetve ez alatti) értéket mutat. A légnyomás napi ingadozása Bátaapátiban 1 hPa körül változik, de hirtelen időjárás-változás idején 10 hPa különbség is előfordul. A légnyomásidősor statisztikai vizsgálata (cikluselemzése) során rendszeresen ismétlődő 8 órás, 12 órás, illetve 24 órás ritmikus változást mutattunk ki.

Bátaapáti térségében a lehullott csapadék térbeli eloszlásáról nincs információnk. A legközelebbi csapadékmérő állomás Vémei taláható. A két állomás mérési adatainak összehasonlításával megállapítottuk, hogy már ilyen kis távolságon belül is adódhatnak különbségek a lehullott csapadék mennyiségében (ezt elsősorban a nyári időszak heves záporainál, rövid időszakokra figyeltük meg). Az évi csapadékösszeg általában 600–700 mm között változik. A csapadék sokéves átlaga a vémei mérőállomás adatai alapján (1961–1990 közötti időszak) 636 mm. A Bátaapátiban mért éves csapadékösszegek átlaga a vémeihez hasonló (az 1999–2003 közötti időszakban 627,6 mm). A 90-es évek csapadékosabbnak bizonyultak, az éves csapadék összege csak 1990-ben nem haladta meg az 500 mm-t (489,5 mm volt). Az éves csapadékösszeg több alkalommal is (az 1991., 1993., 1995., 1998. és 1999. évben) meghaladta az átlagosnál nagyobb értéket jelentő 700 mm-t. A 2000-es évek az előző időszakhoz képest csapadékszegénynek mondhatók. A lehullott csapadék mennyisége csak 2001-ben haladta meg a 600 mm-t (624,8 mm volt), a 2000. és 2003. évben pedig 450 mm alatti értéket (364,2 mm, illetve 432,9 mm-t) mértünk.

A csapadék éves eloszlása általában két, ritkán három maximumot mutat. A havi csapadék maximuma (június) és minimuma (február) között átlagértékben csaknem négyszeres a különbség. A nyári és téli félévekben lehullott csapadék mennyisége jelentősen eltér, a nyári félévekben közel kétszeres a mennyisége.

Felszíni vizek vízállás–vízhozam méréseinek eredményei

A kutatási terület vízforgalmának pontos megismerésére, a felszíni és felszín alatti vizek kapcsolatának pontosítására, valamint a felszíni lefolyás jellemzése céljából a telephely környezetében lévő vízfolyásokon (Hutai-patak, Mórággyi-víz, Nagymórággyi-patak, Mészkemence-patak, Éva-völgyi-árok, Mély-völgyi-árok, Hosszú-völgyi-árok) összesen 13 db állandósított vízhozammérő műtárgyat (mérőbukót) létesítettünk (1. ábra). A mérőbukók kialakítása két lépésben történt. Az 1999-ben, illetve 2000-ben létesített B1, B2, B3 és B4 bukó kialakításával elsősorban a telephelyhez legközelebb eső négy völgyben a felszín alóli vízkilépések időbeli változásait kívántuk nyomon követni, ezért e mérőhe-

lyeket a vízfolyások felső szakaszán jelöltük ki. A 2002-ben létesített további mérőszelvények a telephely teljes térségére jellemző felszíni és felszín alatti vízforgalmat, és annak időbeli változását vizsgálják. Ennek megfelelően kiegészítettük a vízfolyások felső szakaszain a vízkilépések jellemzését szolgáló mérőhelyeket (B7, B8, B9), és a vízfolyások alsó szakaszain is telepítettünk bukókat egy-egy részvízgyűjtő (B5, B6, B10, B12), illetve a két legjelentősebb vízfolyás (a B11 a Hutai-patak, a B13 a Mórággyi-víz) által a felszíni és felszín alatti lefolyás során összegyűjtött vízmennyiség vizsgálatára. A kiépítésnél figyelembe vettük azt is, hogy a vízfolyások vízjárása a csapadékmentes időszakban ugyan egyenletesnek mondható, azonban csapadékos időszakban a patakok vízhozama a többszörösére nőhet. A vízhozamok több nagyságrendű változása miatt olyan mérőeszközt kellett építenünk, amely a néhány l/min-es hozamok pontos mérése mellett több ezer l/min-es hozamokat is megbízhatóan mér. Választásunk egy összetett szelvényű mérőbukóra esett, amelyen a bukóél két különböző hajlású szelvényből épül fel. Téli időszakban, amikor a levegő hőmérséklete tartósan fagypontra alá süllyed, a patakok kisvízfolyás jellegük miatt hamar befagynak, ezért rendszeres karbantartással és jégtöréssel sincs lehetőség a vízállás és a vízhozam folyamatos mérésére.

A vízfolyások vízállás-emelkedése jól követi a lehullott csapadék mennyiségét. Mindegyik vízhozammérőre jellemző, hogy a vízállás megemelkedése az esőt követően néhány órással késéssel jelentkezik. Az egyszeri, egy napon belül lehulló csapadék okozta árhullám 24 órán belül levonul, míg a közel egyhetes csapadékos időjárás hatása a csapadék megszűnését követően 4-5 napos emelt vízállást eredményez. A hosszúidejű vízállásmérések eredménye alapján megállapítható, hogy a vizsgált vízfolyások vízjárása meglehetősen szélsőséges. A csapadékszegény téli és nyárvégi időszakban kialakuló kisvízi alapvízhozamnak akár a tízszeresét is meghaladhatja az egyszerre lehullott nagymennyiségű csapadékot követő árvízi vízhozam. A téli időszakban jól elkülöníthető a lehullott csapadék hatására bekövetkező hirtelen, gyors, illetve a hóolvadás okozta elhúzódozó, tartósabb vízállás-emelkedés. Nyáron a tartósan száraz, meleg periódusokban (mint pl. 2002 nyarán) a párolgás mértéke egyensúlyban van az alapvízhozam felszín alól történő utánpótlásával, ami a vízállás napi ingadozását eredményezi. Amennyiben a párolgás mértéke meghaladja a felszín alól történő utánpótlást, a vízmércén a vízállás a „0 szint” alá süllyed, a műtárgyon a víz átbukása megszűnik, a bukóél mögött pangó víz gyűlik össze, szélsőséges esetben a meder kiszárad. A 2003. évi nyári csapadékszegény időszak több mérőszelvény teljes kiszáradását eredményezte.

Talajvízszintek változása

A talajvízszint változásait 40 sekélyfúrásból (Mó-3, Mó-4, Mó-5, Mó-5A, Mó-6, Mó-6A, Mó-7A, Mó-7B, Mó-7C, Mó-7D, Üh-6, Üh-8, Üh-9, Üh-11, Üh-12, Üh-13, Üh-14, Üh-15, Üh-16, Üh-17, Üh-18, Üh-19,

Üh-19A, Üh-20, Üh-21, Üh-25A, Üh-26A, Üh-28A, Üh-31A, Üh-31B, Üh-31C, Üh-32A, Üh-32B, Üh-32C, Üh-32D, Üh-33, Üh-34, Üh-35 és Üh-36A) és két geofizikai robbantólukból (R-6 és R-7) kialakított észlelőkútban, valamint az ófalui kutatási terület két észlelőkútjában (F-II és T-6) regisztráltuk (1. ábra). A gránit repedésrendszerét kitöltő vizek potenciálszintjeinek változását a telephely területén létesített 14 mélyfúrás (Üh-2, Üh-3, Üh-4, Üh-5, Üh-22, Üh-23, Üh-25, Üh-26, Üh-27, Üh-28, Üh-29, Üh-30, Üh-36 és Üh-37) pakkerekkel elválasztott különböző mélységintervallumaiban mértük. A talajvizek vízszintváltozásainak méréséhez úszó-ellensúly elven működő Hidroprofi-L, illetve nyomássonzával ellátott Dataqua mérőműszereket használtunk. Az észlelési eredményeket hetente olvastuk ki, a kiolvasáskor minden alkalommal ellenőrző kézi vízszintméréseket is végeztünk. A mélyfúrásokból kialakított észlelőkutakban a méréseket biztosító többpakkeres rendszer pakkeres intervallumait a változó kutatási feladatokkal összhangban többször is átépítettük, ezért nem rendelkezünk többéves zavartalan adatsorokkal.

Az üveghutai területen a felszín alatti vízszinteket befolyásoló következő hatásokkal kellett számolnunk:

- csapadékból való beszivárgás,
- talajvíz párolgása,
- megcsapoló források–vízfolyások vízszintváltozása,
- légnyomásváltozás,
- földi árapály,
- kútvizsgálatok, próbaszivattyúzások,
- vízmintavételezés,
- fúrási tevékenység.

A talajvízszint változásainak értékeléséhez a vízszint-idősorokat több szempont alapján csoportosítottuk. Az értelmezést a kutak vízjárásgörbéinek összehasonlító elemzésével, valamint statisztikai módszerekkel egyaránt elvégeztük.

A megfigyelőkutakat a térség áramlási rendszerének különböző hidraulikai helyzeteibe telepítettük, ezáltal az áramlási rendszer különböző pontjaiban tudjuk regisztrálni a vízminőségben és a vízszintekben, illetve potenciálszintekben bekövetkező változásokat. Az észlelőkutak többsége, valamint a kútpárok a lehetséges vízfeláramlási körzetekben, völgytalpakon mélyültek, szűrőzött szakaszaik 15–50 m mélységben vannak, ezért a felszínhez közeli vízszintjükkel közvetlenül reagálnak az időjárási változásokra. Néhány helyen olyan (20–80 m mélységű) talajvízszint-észlelőkutak telepítésére is sor került, amelyek részben a dombtetők, részben a domboldalak mélyebb vízszintjeit regisztrálják. Ez alapján a továbbiakban *dombtetői*, *domboldali* és *völgytalpi* észlelőkutakat különböztettük meg. A fenti csoportosítás egyben megfelel a talajvíz terep alatti mélysége szerinti megkülönböztetésnek is. A völgytalpi észlelőkutakban a talajvízszint terep alatti mélysége 0,3–6,5 m, a domboldaliakban 10,5–33,8 m, a dombtetőiekben 53,3–79,98 m.

A különböző hidraulikai helyzetekben más-más jelenségek befolyásolják a felszín alatti vízszinteket, ezért a vízszint-idősoraiak jellege is jelentősen eltér. Az eltérést mind a rövididejű, mind a többéves változásokban megfigyeltük. A

völgytalpi, domboldali és dombtetői talajvíz-megfigyelő kutak vízjárásgörbéinek összehasonlításával megállapítottuk, hogy a felszínhez közeli vízszinttel rendelkező völgytalpi kutak érzékenyen reagálnak a beszivárgási és párolgási eseményekre, míg más észlelőkutak vízjárásában a légnyomás változása a meghatározó.

A völgytalpi észlelőkutak vízszint-idősoraira a napi és a szezonális változások jellemzőek. Felismerhető az éves ciklus is, de többéves ritmust nem mutattunk ki. A völgytalpi észlelőkutak vízszintváltozásainak meghatározó tényezője a csapadékból történő beszivárgás mértéke, amely a csapadékot megelőző száraz időszak hosszának, az egyszerre lehullott csapadék mennyiségének, illetve a csapadék intenzitásának függvénye. Az egyes észlelőkutakban mutatkozó eltérés oka, hogy e hatást elsősorban a völgytalpakon lerakódott üledékekben (allúviumban) áramló vízmennyiség befolyásolja. A hatás mértéke az allúvium vastagságától függ. Korrelációs vizsgálatokkal kimutattuk, hogy a legtöbb völgytalpi észlelőkút vízszintváltozása a csapadék havi összegével áll szoros kapcsolatban. A vízszintadatok napi változásainak különbsége, illetve a napi csapadékmennyiségek keresztkorrelációs összehasonlítása alapján csak az Üh–11 észlelőkút vízszintjében észleltük azonnal a csapadék hatását. Az Üh–13, Üh–14, Üh–15, Üh–17 és Üh–19 észlelőkutakban két nap múlva, máshol csak többnapos késéssel mutatkozott a csapadékkal szoros korrelációs kapcsolat (2. ábra). Sajátos jelenség a hóolvadás, amely a felszíni vizekben tapasztaltakhoz hasonlóan a felszín alatti vizek szintjét is megemeli. Az alluviális üledékekre telepített kutak vízszintváltozásaiban — főként a nyári időszakban — napi ingadozás jelenik meg, amely egyértelműen az itteni evapotranszpiráció hatásaként, azaz talajvízpárolgásként értelmezhető. A párolgás a különböző észlelőkutakban eltérő mértékű. Vannak olyan völgyi, illetve völgyekhez közeli kutak (pl. a M6–4), amelyekben a vízszint süllyedése a rendszer ürüléséből és nem a talajvíz párolgásából fakad.

A domboldali észlelőkutak talajvízszint-idősorait többéves változások határozzák meg. A változás szintén ciklikus jellegű, a ciklus időtartama négy-öt év. A vízszintváltozásokat a lehullott csapadék mennyisége, a légnyomás és az árapályjelenségek egyaránt befolyásolják. A kutak közül az Üh–16 kis vízszintingadozása miatt elkülönül a csoporton belül, azonban hidraulikai helyzete és rövididejű változásainak vizsgálata alapján egyaránt indokolt ebbe a csoportba sorolnunk. A domboldali csoport jellemzője, hogy egyes észlelőkutak a völgytalpiakkal, míg a többiek a dombtetőiekkel mutatnak hasonlóságot. A vízszintidősorokban nem figyelhető meg az egyes csapadékesemények vagy csapadékos időszakok hatása. A beszivárgások hatásai összegződnek, a vízszintgörbék a csapadék évenként lehulló mennyiségével hozhatók szoros kapcsolatba. Mind a légnyomás, mind az árapály hatása megjelenik a vízszintváltozásokban, amely általában (az R–7 kivételével) csak néhány centiméteres vízmozgást eredményez. Az R–7 észlelőkút az említett hatásokra a dombtetői kutakra jellemzően reagál, a légnyomásváltozás 20 cm körüli vízszintmozgást eredményez.

A dombtetői észlelőkutakban megfigyelt hosszúidejű talajvízszint-változások trend jelleget mutatnak. Ezek a trendek valószínűleg valamilyen hosszúidejű, összegződő hatás következményei lehetnek, amelyek nem hozhatók összhangba az időjárási elemek többéves ingadozásával. A vízszintváltozásokat kiváltó hatás feltárására a mérések többéves folytatása szükséges. A hosszúidejű változásokkal ellentétben a rövididejű vízszintingadozások minden kútban azonos jellegűek, illetve azonos mértékűek. A rövidperiódusú vízszintmozgást a légnyomás és az árapály határozza meg (3. ábra). A dombtetői észlelőkutakban elvégzett ciklusvizsgálat valamennyi észlelőkútra teljesen egyező eredményeket mutatott, amelyek a légnyomás 8 órás, 12 órás és 24 órás változását tükrözik (4. ábra). A 12 és 24 órás változások az árapályhatásokhoz kapcsolódnak, amelyek csak kis mértékű, néhány cm-es ingadozásokban figyelhetők meg.

Repedésvizek nyomásváltozása

A gránit potenciálszintjeinek ingadozását a dombtetői talajvízszint-észlelő kutakhoz hasonlóan elsősorban a légnyomás változása, valamint az árapályjelenségek befolyásolják. A gránit zártabb repedésrendszerében ezek a hatások markánsabban jelentkeznek, mint a talajvizekben. Mind a légnyomás, mind az egyidőben jelentkező árapály hatása szinte valamennyi észlelt intervallumban ugyanolyan mértékű potenciálszint-változást eredményez. A dombtetői észlelőkutak talajvizeiben tapasztaltakkal szemben a mélyebb zónákban az árapályhatás erősebben jelentkezik, mint a légnyomás hatása, annál mintegy négyszer nagyobb változást okozva.

Statisztikai vizsgálatok alapján megállapítottuk, hogy igen szoros kapcsolat van a légnyomás változása és a vízszintváltozások között. A ciklusvizsgálatot hosszabb és rövid időszakokra egyaránt elvégeztük. Az egyes észlelőkutak különböző szintjeiben mindkét paraméterre teljesen egybevágó eredményeket kaptunk. A hosszúidejű ciklusvizsgálatok 4–5 és 10–17 napos periódusidejű változásokat tártak fel a vízszintváltozásokban. Ezek a légnyomás változásában megfigyelt periódusokkal vannak összhangban. Rövididejű ritmikus változásokat is kimutattunk, részletes elemzéssel ezekre 12 és 24 órás ismétlődő változásokat határoztunk meg (5. ábra). Az így meghatározott ciklusok kis eltérést mutatnak a talajvizek esetében tapasztaltaktól. A 12 és 24 órás periódusidő itt is az árapályjelenségek hatását tükrözi. A mélyebb szintekben is megfigyeltük a hatás aszimmetrikus jellegét, amely szerint mindig a 12 órás periódusok jelentkeznek gyengébben. A talajvízben tapasztaltaktól eltérően azonban nem észleltünk 8 óránként ismétlődő változást, amely az árapály légnyomásra gyakorolt hatását jelzi. A mélyfúrásban ezek hiánya alapján feltételezzük, hogy a gránit mélyebb zónái a talajvíztartó felső repedezett gránit-hoz képest sokkal zártabb rendszert alkotnak, amely a légnyomással csak közvetett kapcsolatban van. Ennek a kapcsolatnak a részletes megismerésére a többpakkeres észlelőrendszer jellegéből és szerkezetéből adódóan még az észlelőkúton belül sincs lehetőség.

1. táblázat. A mintavételi helyek adatai

Település	Mintavételi hely jele	Mintavétel helye	A mintázás tárgya	Szűrőzött szakasz (m)	X _{rov}	Y _{rov}	Z (m Bf)
Bábaapáti	A075	Mészkemence-patak, a jobb oldali mellékvölgy torkolatánál	patak		94 917,0	615 305,0	195,0
	A107	patak a B4 bukó fölött	patak		95 750,0	616 760,0	166,0
	A108	Hutai-patak a B10 bukó fölött	patak		97 060,0	615 310,0	149,0
	A109	Nagymórági-völgy a B12 bukó fölött kb. 100 m	patak		97 590,0	616 140,0	144,0
	B040	Nagymórági-völgy, Anyák-kútja	forrás		97 310,0	616 290,0	154,0
	E003	Hutai-patak völgye, Meteorológiai állomás	csapadék		97 130,0	615 330,0	147,0
Mórág	Mó 5	Naspolya-völgy torkolata	fúrás	40,0 50,0	99 049,5	617 766,8	123,5
	Mó 6	Mórági-völgy az Éva-völgye torkolatánál	fúrás	40,0 50,0	95 954,0	617 843,2	140,5
	Mó 7A	Mórági-völgy az Éva-völgye torkolatánál, csoportfúrás	fúrás	37,5 50,0	95 962,1	617 757,4	144,0
Bábaapáti	Üh 12	Éva-völgye, Henrik-forrás mellett	fúrás	12,5 15,0	95 797,9	616 869,7	162,1
	Üh 18	Nagymórági-völgy	fúrás	40,0 50,0	96 946,2	616 455,0	156,7
	Üh-19	Hutai-völgy a Hosszú-völgy torkolatánál, erdészlak	fúrás	40,0-50,0	95 436,8	614 656,2	166,5
	Üh 29	B3-as bukó fölött DDK-re kb. 600 m-re, 232,3 300,38 m	fúrás	232,3 300,4	96 431,2	615 537,3	160,6
	Üh-32A	Hutai-völgy, Idegen-szántók, csoportfúrás	fúrás	26,9-50,0	96 154,2	614 925,4	157,6
	Üh-35	Éva-völgye	fúrás	30,0-44,2	95 696,1	616 530,2	176,2

Vízminőségi vizsgálatok

A vízminőségi vizsgálatok feladata a bábaapáti kutatási terület felszíni és felszín alatti vizeinek összetételében mutatkozó időbeli változások észlelése volt. A változások mértéke az áramlási rendszer időbeli stabilitására ad felvilágosítást. A monitoring keretében folyó vízminőségi vizsgálatok egyben a felszín alatti vizek geokémiai állapotának megbízható megismerését is szolgálták.

A rendszeres mintavételi helyek kijelölése 1997 júliusában kezdődött, és a kutatás előrehaladtával a mintázott helyek száma bővült. A helyek kijelölésénél arra törekedtünk, hogy a megcsapolási területeken az áramlási rendszer eltérő korú és keveredési arányú vizeit ismerhessük meg, valamint hogy a mintavétel viszonylag egyszerű és megbízhatóan reprodukálható legyen. A 100 m-nél mélyebb fúrásokba beépített többszintes pakkerendszer eleve kizárta a mintázás lehetőségét, kivéve az Üh-29 fúrást, ahol a mélységi víz a felszínre jön.

A patakok rendszeres mintázása 2000-ben, illetve 2002-ben kezdődött.

Valamennyi mintavételi hely a kis és közepes radioaktivitású hulladék felszín alatti tárolójából kiszabaduló szennyeződések lehetséges kilépési zónájában települ.

A vízminőség mintavételi helyei (1. táblázat, 1. ábra) a következők:

— sekélyfúrásból kialakított észlelőkút a Mó-5, Mó-6 és Mó-7A, valamint az Üh-12, Üh-18, Üh-19, Üh-32A és Üh-35;

— mélyfúrásból kialakított észlelőkút az Üh-29;

— felszíni vízfolyás az Éva-völgye (A107), a Mészkemence-völgy (A075), a Hutai-patak (A108) és a Nagymórági-völgy (A109);

— foglalt forrás az Anyák-kútja (B040) a Nagymórági-völgyben,

— csapadékvíz a meteorológiai állomásnál (E003).

A vízmintavételre havonkénti gyakorisággal került sor. A mállott vagy repedezett gránitban szűrőzött kutak általában rossz vízadók, a leürítésük után lassú a visszatöltődés, elsősorban felülről, a felső talajvízszintekből történik, a feltöltődés után az eredeti vízösszetétel egy-két hónap alatt áll helyre. A mintavételt megelőző vízkiemelést minimalizáltuk, hogy az eredeti vízminőség visszaállási ideje lerövidüljön. Minden egyes mintázott kútra a vizsgálatok tapasztalatait figyelembe vevő, tulajdonságára szabott mintavételi előírást dolgoztunk ki. A mintavétel során a helyszíni mérések keretében az alábbi paramétereket mértük:

- víz és léghőmérséklet,
- pH,
- fajlagos vezetőképesség,
- redox potenciál,
- lúgosság.

A műszereket minden mintavételi napon, az első mintavétel előtt, gyári etalon felhasználásával hitelesítettük. A lúgosság mérésénél minden alkalommal három független mérést végeztünk.

A laboratóriumi vizsgálatok a rutin (Na, K, Ca, Mg, Fe, Mn, NH₄, Cl, lúgosság, SO₄, NO₃, NO₂, H₂SiO₃, KOI, fajlagos vezetőképesség és pH) méréseket, a nyomelemek (Li, Be, B, Al, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Rb, Sr, Mo, Ag, Cd, Sb, Cs, Ba, La, Tl, Pb, Bi, Th, U), valamint a ²H-, ¹⁸O-, ¹⁵N-, ³⁴S- és ²²²Rn-izotóp meghatározását foglalták magukba. A ²H- és ¹⁸O-izotóp mérést az MTA GKL, a kén- és nitrogénizotóp mérést az MTA Atomki végezte, a radont az ELTE Atomfizikai Tanszéke határozta meg.

A rutinmérésekhez, valamint a nitrát, oxigén, deutérium és trícium méréséhez a mintákat új, a mintázandó vízzel háromszor átöblített edényekbe vettük. A kation-, illetve nyomelemmérésekhez új műanyag palackokat használtunk,

amelyeket előzetesen salétromsavval kezeltünk, majd kétszer desztillált vízzel átmostunk, végül a palackokba a minta tartósítására előzetesen nagy tisztaságú salétromsavat adagoltunk. A KOI mintázáshoz szükséges üvegekbe — savazás és desztillált vizes előkészítés után — koncentrált kénsavat adagoltunk. A nitrátelelmzésekhez a mintákat acetonitrilrel tartósítottuk, és a vizsgálatok megkezdéséig hűtőtáskában, illetve hűtőszekrényben tároltuk. A kénizotóp-vizsgálatokhoz a mintázott vizet NaOH-val 12-es pH-ra lúgosítottuk, majd ezt követően BaCl₂-vel képeztünk — az elemzésekhez szükséges — csapadékot. A nitrogénizotópmeghatározásokhoz a mintákat kloroformmal tartósítottuk, majd az elemzésig hűtőtáskában, illetve hűtőszekrényben tároltuk. A radonvizsgálathoz a vízmintát „opti-flour-o kotel” alá helyeztük.

Egy-egy mintavétel a valóságban egy-egy mintasorozat begyűjtését jelentette. A begyűjtött minták spektruma a származási hely és a felhasználás célja szerint változott. A havonkénti mintavételek alkalmával nem mindig volt lehetőségünk az összes mintavételi helyet megmintázni. 2002 decemberében, majd 2003 januárjában és márciusában műszaki okok miatt nem nyílt lehetőség az Ũh–29 mélyfúrás mintázására. A vízminőségi monitoringban ez az első valóban mély észlelőkút (232,3–300,38 m között szűrözve), amely feláramlási zónában települ, és az egyetlen, amelyben kifolyó vizet kaptunk. Nyomjelzéses vizsgálatok miatt 2002. december hónapban az Ũh–32A, 2003. márciusban és áprilisban a M6–6 és M6–7A észlelőkutakat nem mintáztuk. 2003. augusztus, szeptember és október hónapban csapadékmentes időszak következtében kiszáradt a Hutai-patak mintázásra kijelölt szakasza, így három hónapig szünetelt az A–108 jelű minták begyűjtése.

Az Ũh–31 csoportfúrásoknál végzett nyomjelzéses vizsgálatba bevont Ũh–18 észlelőkútban a nyomjelzőként beadott NaBr-os, majd az utána nyomott nagy töménységű NaCl-os oldat az eredeti víz összetételét megváltoztatta. Itt a rendszeres mintavétellel a nyomjelzéses vizsgálatot követően a természetes áramlások hatására bekövetkező hígulás időbeli lefolyását vizsgáltuk.

A vizek korát, az áramlási rendszerben elfoglalt helyzetét jól tükrözi a víz–kőzet kölcsönhatást mutató kationcsere (a Ca⁺⁺ és Mg⁺⁺ mennyiségének csökkenése, valamint a Na⁺ növekedése), a ²H- és ¹⁸O-izotóp arányának a változása (6. ábra).

A 10 000 évnél idősebb vizek $\delta^{18}\text{O}$ -értéke –11,5-nél kisebb, a fiatalabb holocén korú vizek értéke –10,3-nál nagyobb (átlagosan –9,7). A pleisztocén–holocén határán bekövetkező klímaváltozás közel 2000 éves átmeneti időszak volt. Vizsgálataink során a mért értékek az említett határok közé estek, ezáltal jól tükrözték az átmeneti jellegét, egyben elválaszthatatlanul mutatják a kétféle víz keveredésének hatását. Bizonyítottan a késő-würm időszakban beszivárgott csapadékból származik a M6–6 és Ũh–29 kutak vize (¹⁴C koruk 20 ezer év körüli). Az Ũh–18, Ũh–32A és Ũh–35 vize kevert, átmeneti jellegűt mutat, az ioncsere alapján az első kettő idős holocén, az utolsónál fiatal holocén víz keveredett würm vizekkel. Az Anyák-kútja

nevű foglalt forrás vízének sajátos jellegét két okra vezethetjük vissza. Az egyik, hogy a forrás vízgyűjtője vékony talajtakaróval fedett gránit — míg az összes többi esetben viszonylag vastag (40–50 m) löszön keresztül történik a beszivárgás —, ami több Na és kevesebb Ca és Mg beoldódásával jár. A másik ok, hogy a forrás beszivárgási területe átlagosan 100 m-rel alacsonyabb topográfiai helyzetre, mint a többi vízmintavételi helyé, ez eredményezheti a $\delta^{18}\text{O}$ 0,5%-os növekedését. A legfiatalabb víz az ioncsere alapján az Ũh–19 kútból származik. Az Ũh–18 kút mintáinak két csoportjából (a 7. ábra bal oldalán) az elemzés a nyomjelzéses vizsgálatokat követően készült, mint fentebb említettük.

A patakok vizsgálati adataiból az összes keménységet (a Ca⁺⁺ és Mg⁺⁺ mennyiségét) mutatja a 7. ábra. Az ábrán látható kiugróan alacsony értékek a mintavétellel egyidejű vagy a mintavételt közvetlen megelőző csapadék (magas vízállási helyzet) hígító hatását jelzik. Csak az Éva-völgyi patak időszora elegendő hosszúságú ahhoz, hogy az alapvető törvényszerűségeket vizsgálhassuk. Az alapvízhozamhoz tartozó értékek 20 egységen belül ingadoznak, ami a patak menti allúviumból történő párolgás következménye és az elemzési hiba ($\pm 5\%$) együttes hatása lehet. A vizsgált időszakban megfigyelt gyengén emelkedő jelleg a patakat elsősorban tápláló talajvíz arányának növekedésére utal.

A két csoportra vonatkozó összes keménység időbeli változékonyságát a 8. és 9. ábra mutatja be. Az összes keménység időbeli trendje mindkét ábrán a mintázott kutak egy részében (M6–5, Ũh–19, Ũh–18, Ũh–35) emelkedő jellegűt mutat. Ennek oka az lehet, hogy a havonkénti mintavétel után nem minden kút környezetében áll tökéletesen helyre az eredeti vízállapot. A fűrészfogasság párhuzamos futása pl. Ũh–12 és Ũh–19 fúrásoknál (8. ábra) természetes hatásra nem vezethető vissza, s a két adatsor közötti 0,7 körüli értékű korrelációs együttható alapján az oka analitikai hiba.

A $\delta^{18}\text{O}$ -értékek időbeli változását a 10. és 11. ábra szemlélteti az előbbi csoportosításban. A mintázott vizek oxigénizotóp-értékének trendszerű változása a vízkeveredést tükrözi. A kutatás során mélyült fúrások mintáinak vizsgálata azt igazolta, hogy a beszivárgási zónában lefelé haladva a $\delta^{18}\text{O}$ -értékek csökkennek. Így az Ũh–12, M6–5 és Ũh–19 kútban 2002 nyaráig mutatkozó trendet (10. ábra) az idősebb vizek növekvő hozzákeveredésével értelmezhetjük. Ez ellentmondásban van az ugyanezen észlelőkutak keménység-idősoraiból (8. ábra) levonható következtetésekkel, de ez esetben az utóbbi feltételezést fogadtuk el hitelesnek. Az idősebb vizeknél (10. ábra) észlelhető fiatalodásra utaló trend összhangban van az összes keménység-adatokkal (9. ábra).

A vízminőségi vizsgálatok eredményeinek értékelésében, mivel a kimutatott változások nem kirívóan nagyok, elsősorban az analitika megbízhatósága, a rendszeres és véletlen hibák nagysága szabott határt az áramlási rendszerben bekövetkező változások megbízhatóan kimutatható észlelésének. Ezek a hibák körültekintő mintázás és mintakezelés esetén is jelentkeztek.

Összefoglalás

A Bátaapáti (Üveghutai)-telephely tágabb térségében kialakított vízföldtani monitoringrendszerrel elsősorban a felszíni és a felszín alatti vizek természetes folyamatok hatására bekövetkező mennyiségi és minőségi változásait regisztráltuk. Az értékeléshez méréseinket hidrometeorológiai paraméterekkel egészítettük ki.

A felszíni vizek vizsgálata során megállapítottuk, hogy a vízfolyások vízhozama a lehullott csapadék mennyiségének függvényében széles határok között változik. Az árhullámok a csapadékot követő egy-két nap alatt levonulnak, vízhozamuk esetenként az alapvízhozam tízszeresét is meghaladta. A vízfolyások felszín alatti vizekből származó alapvízhozama egyenletes volt, csak 2003 nyarán, egy rendkívüli száraz időszakban száradt ki több vízfolyás.

Az észlelőkutakat a megfigyelt talajvízjárás alapján több csoportba soroltuk. Az így meghatározott csoportok megfeleltek az észlelőkutak különböző hidraulikai helyzetének. Eltérő vízszintváltozások jellemezték a dombtetői, a domboldali és a völgytalpi helyzetű észlelőkutakat. A dombtetői észlelőkutak vízszintváltozását a légnyomás

változása és az árapályjelenségek határozták meg, míg a völgytalpi észlelőkutak vízszintjei érzékenyen reagáltak a beszivárgási és a párolgási eseményekre. A domboldali észlelőkutak átmeneti jelleget mutatnak az előző két csoport között. A rövididejű talajvízszint-változásokat a légnyomás, a hosszúidejűeket a csapadék összegzett hatása okozta.

A gránit repedésrendszerében tárolt víz potenciálszintjének változását szintén a légnyomás és az árapályjelenségek váltották ki. A zárt repedésrendszerben a talajvízszint változásával ellentétben az utóbbi hatás domináns jellegét figyeltük meg.

A vízminőségi vizsgálatok során megállapítottuk, hogy mind a felszíni, mind a felszín alatti vizek vízkémiai jellemzői kis természetes változékonysággal rendelkeznek. A felszíni vizek vízkémiai változásai a felszíni lefolyás és a felszín alól utánpótlódó víz arányának változását tükrözik. A felszín alatti vizek vizsgálata során a vízmintavételi helyeket két csoportra (fiatalabb és idősebb korú vizek) bontottuk. Az észlelőkutak vízkémiai összetételében a mélyebb szintekből származó idősebb és a felszínhez közeli fiatalabb vizek keveredését mutattuk ki.