

Hydrogeologische Untersuchungen des Höhlensystems der Budaer Burg

Hydrogeological Investigations of the Cave System of the Buda Castle

G. HAJNAL¹⁾ & D. FARKAS²⁾

Inhalt

	Seite
1. Einleitung.....	28
2. Entstehung, geomorphologische Situation.....	28
2.1. Geologischer Aufbau.....	31
2.1.1. Trias Grundgebirge.....	31
2.1.2. Eozän bis Pleistozän.....	32
2.2. Hydrogeologie.....	33
2.2.1. Das Thermalwassersystem von Budapest.....	33
2.2.2. Geringer temperierte Wässer im Burgberg.....	34
2.3. Versickerung.....	35
3. Höhlen, Gänge und Keller.....	35
4. Untersuchung der Höhlenbrunnen.....	37
4.1. Wasserstand und Ergiebigkeit.....	37
4.2. Temperatur.....	45
4.3. Wasserchemie.....	46
5. Tropfwässer.....	47
6. Schlussfolgerung.....	48
Zusammenfassung.....	50
Literatur.....	50
Summary.....	52
Dank.....	52

¹⁾ Univ.-Doz. Dipl.-Ing. Dr. techn. Géza HAJNAL, Lehrstuhl für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Technische und Wirtschaftswissenschaftliche Universität Budapest, Műegyetem rkp. 1–3, H-1111 Budapest, Ungarn. E-Mail: hajnal@vit.bme.hu

²⁾ Cand. Ing. Dávid FARKAS, Lehrstuhl für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Technische und Wirtschaftswissenschaftliche Universität Budapest, Műegyetem rkp. 1–3, H-1111 Budapest, Ungarn. E-Mail: david0106@freemail.hu

1. Einleitung

Der Budaer Burgberg mit seiner darauf errichteten Altstadt ist einer der wertvollsten Natur- und Kulturschätze Ungarns. Seine besondere Bedeutung wird von der Welt anerkannt, dem ist zu verdanken, dass die Budaer Burg 1987 zum Weltkulturerbe erklärt wurde.

Zugleich gilt dieser einzigartige Natur- und Kunstdenkmalkomplex als gefährdet, oft kommen Straßeneinstürze sowie schwere Gebäudeschäden vor. Die im Inneren des Berges entstandenen natürlichen Kalktuffbildungen und auch das in diesen ausgebaute Gangsystem stellen zahlreiche technische Probleme sowie Umweltschutzprobleme dar.

Mit der hydrologischen Untersuchung des Gang- und Höhlensystems unter der Budaer Burg wurde Anfang der 1970er Jahre von H. KESSLER begonnen. Seine Untersuchungen wurden ab Mitte der 1990er Jahre fortgeführt, wobei der Wasserstand, die Wassertemperatur sowie die Strömungsverhältnisse in den Höhlenbrunnen gemessen und die chemischen Eigenschaften der Wässer analysiert wurden. Nach Veröffentlichung dieser Ergebnisse (G. HAJNAL, 2003) wurden die hydrologischen Forschungen nicht fortgesetzt. Erst ab Oktober 2008 eröffnete sich wieder die Möglichkeit, diese unter Mitwirkung der Studenten der TU Budapest erneut aufzunehmen.

In einem Jahr konnten zehn Brunnen untersucht werden, wobei in jedem auch Pumpversuche durchgeführt wurden. Aus den Wiederanstiegszeiten konnte auf die Wasserhaushaltsverhältnisse des Gebietes geschlossen werden. Dies ist deshalb sehr wichtig, weil die Versickerung in das Höhlensystem nicht nur aus dem Niederschlag, sondern auch aus den Verlusten der öffentlichen Ver- und Entsorgungsleitungen erfolgt und zur größenordnungsmäßigen Bestimmung dieser Parameter die gleichzeitige Durchführung unterschiedlicher Untersuchungen erforderlich ist.

Im Laufe der Arbeiten stellten sich zahlreiche bisher unbeantwortete Fragen, unter anderen über die hydraulische Verbindung zwischen den Brunnen und über ihre Ergiebigkeit. Im Februar 2009 konnten in drei Brunnen, im September und Oktober in weiteren sechs Brunnen Pumpversuche durchgeführt werden. Nach dem totalen Abpumpen der Brunnen konnten durch kontinuierliche Messung des Wiederanstieges bereits auf die Ergiebigkeit der Brunnen geschlossen sowie durch graphische Darstellung der Messwerte die Wiederanstiegskurven der Brunnen erstellt werden.

Zeitgleich mit den Messungen an den Brunnen wurden die Tropfwässer des Burglabyrinthes in drei unterschiedlichen Bereichen des Höhlensystems untersucht. Durch Auswertung der gemessenen Werte wurde die von der Stollendecke auf das Labyrinth entfallende Wassermenge ermittelt.

Aus jedem Brunnen sowie von den Tropfwasser-Messstellen im Labyrinth wurden Wasserproben gezogen, welche mit Hilfe eines Konduktometers und von Schnelltests auf verschiedene Komponenten untersucht wurden. Nach der Auswertung der Ergebnisse konnten Schlussfolgerungen über den Ursprung der in die Höhle versickernden Wässer gezogen werden.

2. Entstehung, geomorphologische Situation

Die Umgebung des Várhegy (Burgberg) wurde im Mittelpleistozän in Schollen zerbrochen. Sie war ein durch Täler zerschnittenes Gebirgsvorland, dessen bedeutendstes Fließgewässer der Ördögárok (Teufelsgrabenbach) war (E. KROLOPP et al., 1976). Im

Tal des Baches traten von Máriaremete (Maria-Einsiedl) bis Rózsadomb (Rosenhügel), später an Stelle des heutigen Burgberges Thermalquellen aus, welche stark kalkhaltig waren, sodass Ablagerungen von Süßwasserkalken entstanden. Das Gebiet wurde infolge der am Ende der Mindel-Eiszeit eintretenden Strukturbewegungen beachtlich angehoben. Entlang der Bruchlinien entstanden immer neue Täler. Durch die fortschreitende Eintiefung des Donautales tiefte sich auch der Ördögárok auf ein niedrigeres Niveau ein. Dies bewirkte im Bereich des Burgberges eine erhebliche Erosion. In großer Mächtigkeit wurden Ablagerungen des Tertiärs und Quartärs abgetragen. Der Ördögárok lagerte seine Sedimente im nördlichen Teil des Berges in einer durchschnittlichen Mächtigkeit von 1 m ab, auf einer Seehöhe von ca. 150 m ü. A. (O. KADIČ, 1942). Ab Mitte des Pleistozäns bis ins Jungholozän wurde die Eintiefung des Tales des Ördögárok entlang der zwischen dem Naphegy (Sonnenberg) und dem Burgberg verlaufenden, NW–SE gerichteten Bruchlinie fortgesetzt. Auf diese Weise begann die Zerlegung des sich zwischen dem Sonnenberg und dem Burgberg befindenden abschüssigen Gebietes (E. KROLOPP et al., 1976).

Der Burgberg ist eine typische Flussterrasseninsel, sein östlicher und südöstlicher Teil wird von der steilen Talflanke der Donau, seine westliche und südwestliche Seite vom Ördögárok begrenzt (Fig. 1) und von den mit jungen Sedimenten bedeckten, benachbarten Schollen des Budaer Gebirges (Rózsadomb/Rosenhügel, Martinovicshegy/Martinovicsberg, Naphegy/Sonnenberg, Sashegy/Adlerberg) und vom horstartigen Gellértberg abgetrennt (E. KROLOPP et al., 1976, Gy. SCHEUER, 1986). (In Fig. 1 sind nur die geographischen Bezeichnungen im engen Umkreis des Untersuchungsgebietes erfasst. Die Lokalität von weiteren im Text vorkommenden geographischen Bezeichnungen ist L. TRUNKÓ et al. [2000] zu entnehmen.)

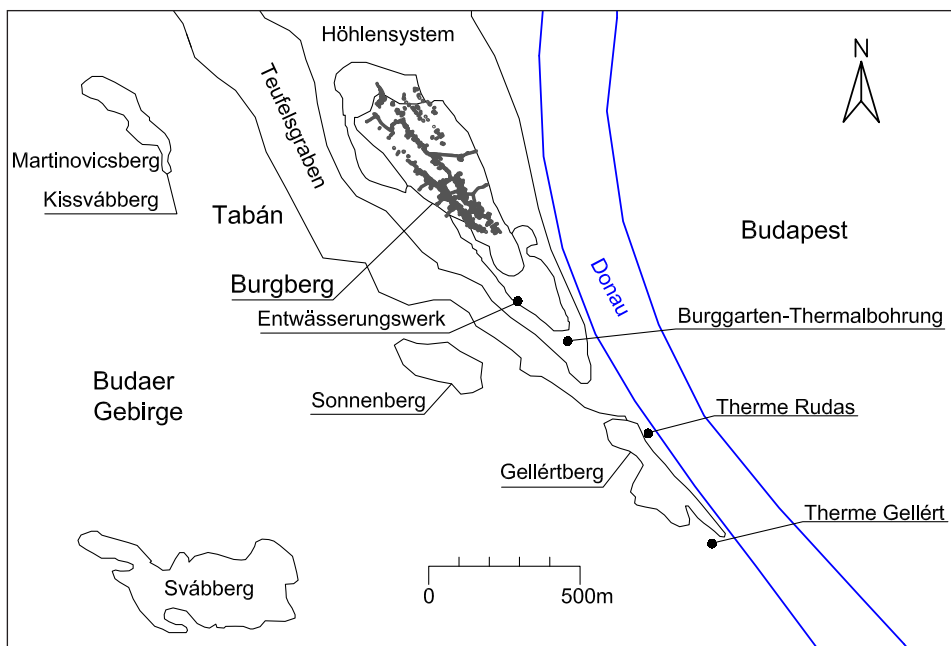


Fig. 1: Lage des Budaer Burgberges in Budapest.
Location of the Buda castle hill in Budapest.

Das Plateau des Burgberges wird mit einer Fläche von 405 000 m², die Oberfläche seiner Flanken und Hänge mit 750 000 m² abgeschätzt. Die Längsachse des Plateaus beträgt 1500 m, die Gesamtlänge des Berges 2000 m. Die Breite des Plateaus variiert zwischen 450 m und 120 m. Die durchschnittliche Höhe der durch Rutschungen und Derasion umgeformten Terrasseninsel beträgt 155–160 m, ihre maximale Höhe 170 m ü. A., welche gegen S in Höhenstufen von 150, 145–135, 120–115 m ü. A. in

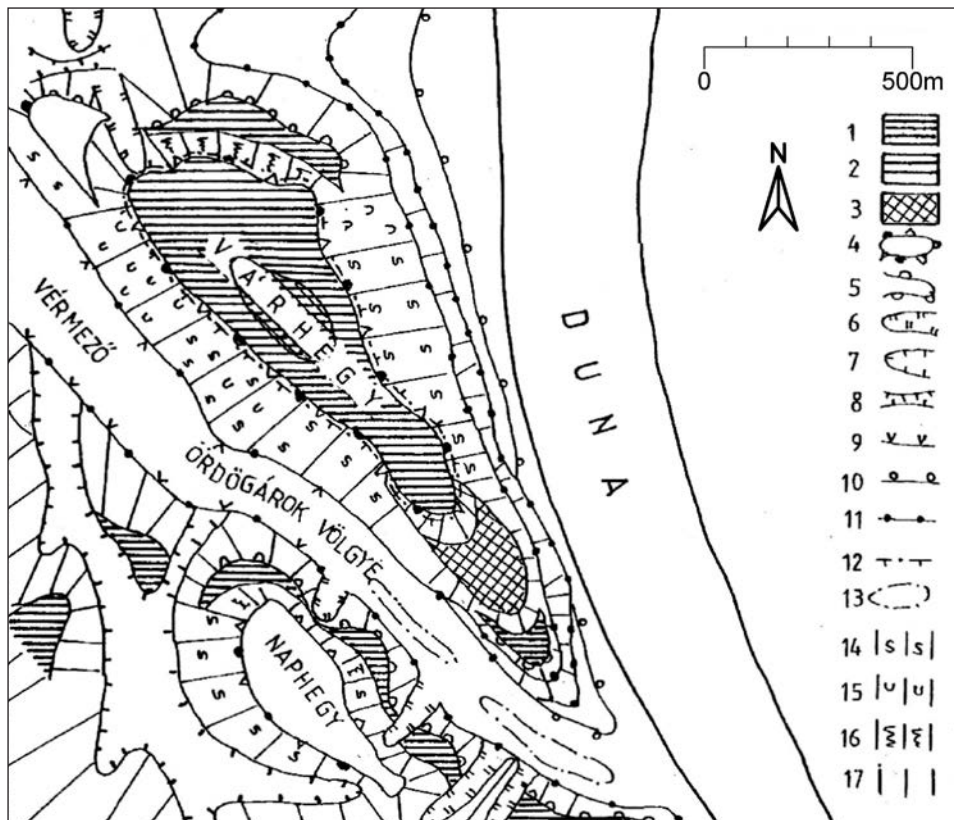


Fig. 2: Geomorphologie des Budaer Burgberges (nach E. KROLOPP et al., 1976). Várhegy – Burgberg, Duna – Donau, Vérmező – Generalwiese, Ördögárok Völgye – Teufelsgrabenbach. Legende: 1 – Süßwasserkalk Stockwerk 152–160 m ü. A., 2 – Süßwasserkalk Stockwerk 160–168 m ü. A., 3 – Süßwasserkalk Stockwerk 142–152 m ü. A., 4 – durch Erosion und Derasion gestalteter Inselberg, 5 – Oberfläche und Kante der Derasionsterrasse, 6 – durch Erosion gestaltetes Derasionstal, 7 – Erosionstal, 8 – Sattel, 9 – Talsohle vom Teufelsgrabenbach, 10 – Ebene des Hochplateaus I, 11 – Kante der Terrassenebenen IIa, IIb, III, 12 – Kante der Terrasse IV, 13 – aufgefüllte Flussbettüberreste, 14 – fossiler Rutschhang, 15 – rezenter Rutschhang, 16 – fossiler Solifluktionshang, 17 – stabiler Hang.

Geomorphology of the Buda castle hill (after E. KROLOPP et al., 1976). Várhegy – castle hill, Duna – Danube, Vérmező – Vérmező park, Ördögárok Völgye – Devil's ditch valley. Legend: 1 – lacustrine limestone level 152–160 m a. s. l., 2 – lacustrine limestone level 160–168 m a. s. l., 3 – lacustrine limestone level 142–152 m a. s. l., 4 – inselberg shaped by erosion and derasion, 5 – surface and edge of the terrace, 6 – derasion valley shaped by erosion, 7 – erosion valley, 8 – saddle, 9 – valley bottom of Devil's ditch, 10 – plain of the high plateau I, 11 – edge of the terrace plain IIa, IIb, III, 12 – edge of the terrace IV, 13 – infilled river bed relics, 14 – fossil slide slope, 15 – recent slide slope, 16 – fossil solifluction slope, 17 – stable slope.

Richtung Tabán und Donau abnimmt (Gy. SCHEUER, 1986). Diese Niveaus markieren gleichzeitig die sich stufenweise wiederholende Eintiefung des Ördögárok entlang der Bruchlinie zwischen Sonnenberg und Burgberg. Die Krustenbewegungen im Pleistozän gestalteten die Terrasseninsel zum Horst bzw. zu dieser Zeit wurden die kiesigen Sande und die Süßwasserkalke abgelagert (Fig. 2).

2.1. Geologischer Aufbau

2.1.1. Trias Grundgebirge

Am südöstlichen Ende des Burgberges wurde im Jahre 1938 die so genannte Burggarten-Thermalbohrung abgeteuft (H. HORUSITZKY, 1939), welche bis heute die meisten Informationen über den stratigraphischen und geologischen Aufbau des Berges liefert (Fig. 3).

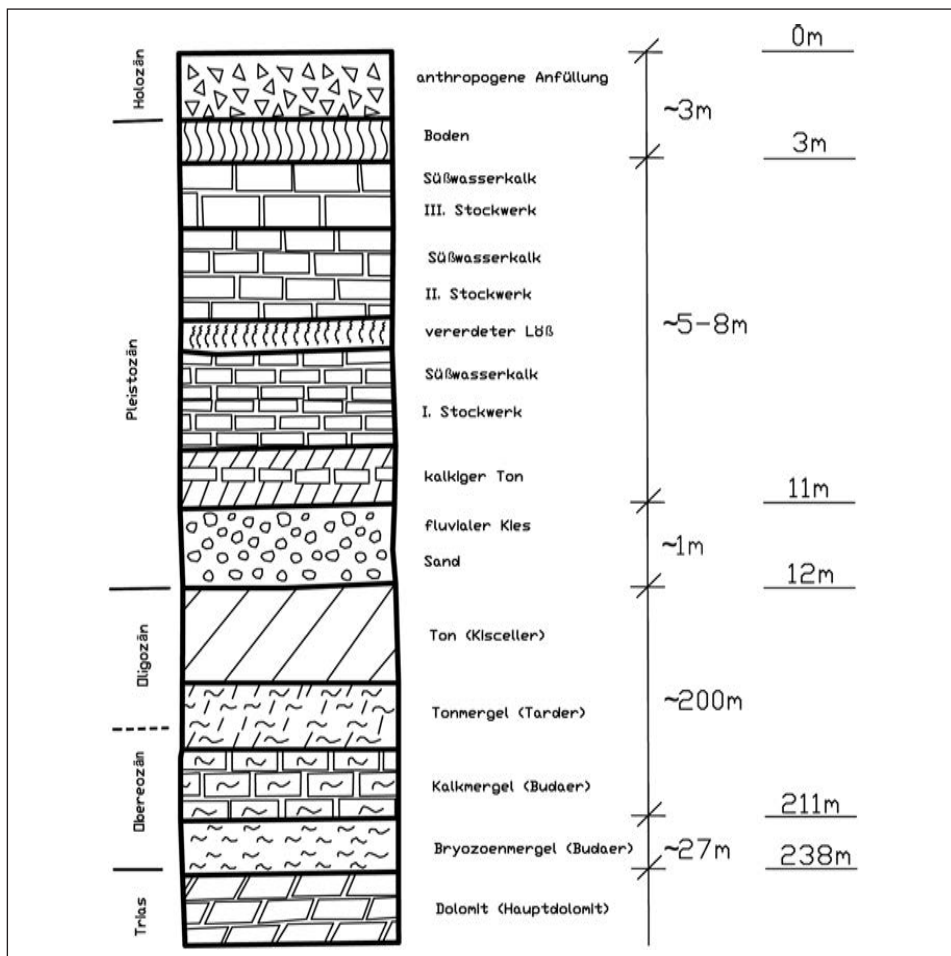


Fig. 3: Stratigraphie des Budaer Burgberges (nach H. HORUSITZKY, 1939).
Stratigraphy of the Buda castle hill (after H. HORUSITZKY, 1939).

Die 261 m tiefe Bohrung erreichte den Dolomit der Obertrias in einer Teufe von 238 m, aus welchem auch die Hauptmasse des nahe gelegenen Gellértberges besteht. Auf diese Weise wurde nachgewiesen, dass das Liegende der tertiären Bildungen die in diesem Gebiet bekannte, älteste Gesteinsart, der Thermalwasser führende Obertrias-Dolomit, bildet (Gy. SCHEUER, 1986).

2.1.2. Eozän bis Pleistozän

Auf den Formationen der Trias war eine dünne (8–9 m mächtige), stark kieselige, graue Formation abgelagert worden, die als eozäner Tuff bestimmt wurde (H. HORUSITZKY, 1939, L. KORDOS, 1969).

Die Hauptmasse des Burgberges bildet die eozäne Budaer Mergelformation, welche zwei besondere, für das Forschungsthema wichtige Eigenschaften hat:

- die Druckfestigkeit des Mergels nimmt durch Einwirkung von Wasser stark ab, auf ein Drittel bis Viertel des Wertes im trockenen Zustand,
- die Bänke der Mergelformation haben ein vorwiegendes Einfallen S bzw. SW,

was in Hinblick auf die Bewegung der unterirdischen Sickerwässer von besonderer Bedeutung ist.

Das Hangende des Mergels ist der oligozäne Ton, auf dem Talbodensedimente abgelagert wurden. Das Dach des Berges wird wie eine Haube vom durchschnittlich 8 m mächtigen pleistozänen Kalkstein bedeckt, welcher durch die im Gebiet aufbrechenden warmen Thermalquellen entstand. In diesem Gestein (und an seiner Grenze zum Liegenden) entwickelte sich das als Weltrarität geltende Kalktuffgangsystem.

Die geologischen Schnitte in Fig. 4 zeigen eine skizzenhafte Darstellung der Schichtung der oben angeführten Gesteine und des Verlaufs des Höhlen- bzw. Gangsystems im Burgberg.

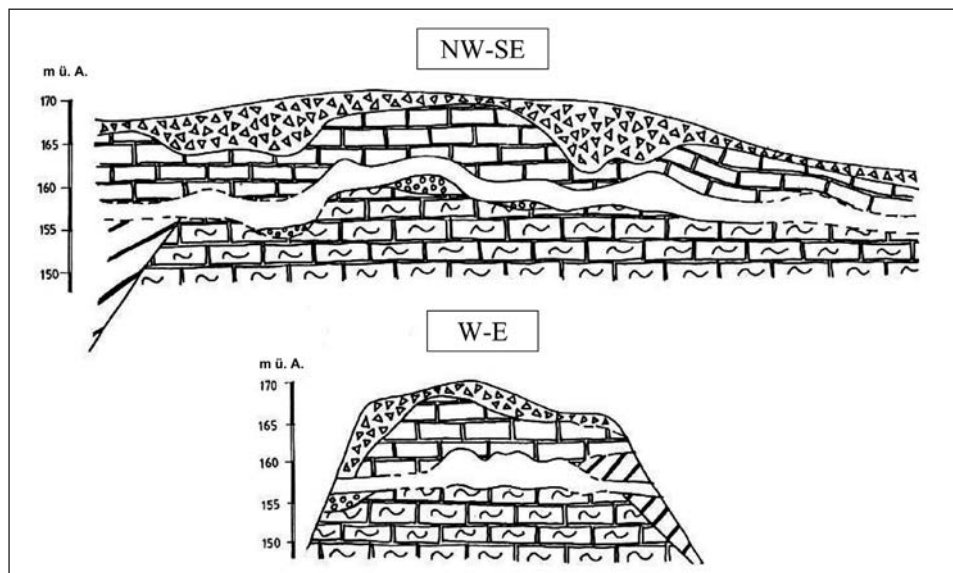


Fig. 4: Skizzenhafte geologische Profile (W-E und NW-SE) nach G. HAJNAL (2003). Signaturen siehe Fig. 3.
 Sketch of geological profiles (W-E and NW-SE) after G. HAJNAL (2003). For signatures see fig. 3.

2.2. Hydrogeologie

2.2.1. Das Thermalwassersystem von Budapest

Das hydraulische System der Budapester Thermalwässer wurde bereits am Ende des 19. Jahrhunderts wissenschaftlich untersucht. Der Berg-Ingenieur V. ZSIGMONDY (1878), der die erste Thermalwasserbohrung in Ungarn abteufte, schätzte das Einspeisungsgebiet des Zirkulationssystems im Budaer und Pilis-Gebirge mit 345 km² ab und wies darauf hin, dass außer den Quellen entlang der Donau keine nennenswerten Karstquellen im Gebiet bekannt sind.

Der Autor F. SCHAFARZIK (1926, 1928) entwickelte ein Strömungsmodell für die Thermalwässer und erkannte die Möglichkeit der Strömung in einem mehrschichtigen Grundwasserleiter. Dieses Modell entwickelten M. VENDEL & R. KISHÁZI (1963–1964) zu einem „Unterströmungsmodell“ weiter und führten Wasser- und Wärmehaushaltsberechnungen durch. Sie stellten fest, dass die Alimentierung der warmen Thermalwasserquellen auch aus dem Kaltkarst erfolgt. Die hydrogeologischen Voraussetzungen der Wechselwirkung zwischen den ungespannten kälteren Wässern und dem gespannten Thermalkarstwasser blieben ungeklärt. Das modifizierte dreidimensionale Strömungsmodell des Thermalwassers wurde von L. ALFÖLDI & Á. LORBERER (1976) veröffentlicht.

Das Reservoir ist nicht homogen, die Transmissivität der übereinander liegenden Zonen ist unterschiedlich und somit entstehen räumliche Strömungen statt der einfachen vertikal-ebenen Strömung. Die Zwangsbahnen der Strömung großer horizontaler (mehrere Kilometer) und kleiner vertikaler (einige 100 m) Ausdehnung werden entlang tektonischer Gürtel durch Klüfte und Kluftsysteme kurzgeschlossen, besonders, wenn entlang des Gürtels Quellaustritte bzw. allgemein aufsteigendes Tiefengrundwasser vorkommen. In diesen Abschnitten des ausgezeichnet wasserführenden tektonischen Gürtels kann keine horizontale Strömung unter dem aufsteigenden Wasserkörper durchkommen, und daher kann nur eine Umströmung dieser Zone entstehen. Die einzige Möglichkeit ist, wenn diese Zone in der Tiefe so geschlossen ist, dass das Anzapfen einer tief liegenden Zwangsbahn nicht erfolgt.

Die Quellen von Budapest entspringen in Formationen unterschiedlichen Alters und unterschiedlicher Ausbildung. Ein Teil der natürlichen Quellen kommt aus dem Alluvium und aus dem liegenden Eozän oder Oligozän zu Tage.

Die nördlichen geringer temperierten Quellen bei Csillaghegy entspringen aus dem auf dem Eozän liegenden pleistozänen Kalkstein, bei Békásmegyér aus dem Kisceller Ton, der unter dem Alluvium liegt. Die Quellen des Römerbades entspringen aus dem Budaer Mergel, jene am Fuße des Gellértberges direkt aus dem Dolomit (Obertrias) (L. ALFÖLDI, 1979).

Die Thermalwässer von Budapest stammen aus dem verkarsteten Reservoir des mesozoischen karbonatischen Grundgebirges aus der Trias. Die Grundwasserströmung in den nicht verkarsteten, jedoch geklüfteten Gesteinen war seit langem bekannt. Der geklüftete Budaer Mergel ist ein ausgezeichneter Grundwasserleiter.

Der Autor T. BÖCKER (1975) wies nach, dass für die karbonatische Gesteinsmasse Klüfte im Millimeterbereich charakteristisch sind und diese die regionale Grundwasserströmung bestimmen. Die Durchlässigkeit des nicht geklüfteten Gesteines wurde zwischen 10⁻⁹ und 10⁻¹⁶ m/s ermittelt. Die Gesamtporosität des Dolomits liegt zwischen 1–2 %. Die Diploporendolomite können Gesamtporositäten bis 11 % aufweisen, wovon die Matrixporosität 7–8 % beträgt. Für die Dolomite des Budaer Gebirges stehen keine

Angaben über Durchlässigkeiten zur Verfügung, ähnliche, geklüftete Dolomite im Transdanubischen Mittelgebirge weisen Durchlässigkeiten von $1,0 \times 10^{-6}$ bis $3,5 \times 10^{-6}$ m/s auf.

2.2.2. Geringer temperierte Wässer im Burgberg

Beim westlichen Flügel des königlichen Palais wurde ein Entwässerungswerk gebaut, dessen Bauzeitpunkt und die Gründe der Errichtung nicht bekannt sind. Es wird erstmals in der Studie von T. SZONTAGH (1908) über die Entwässerung des Burgbergtunnels erwähnt.

In zwei Schächten des Entwässerungswerkes wurde 1908 eine Wassertemperatur von $17,5 \text{ }^\circ\text{C}$ gemessen. Einer der Schächte ist $14,5 \text{ m}$, der andere 30 m tief. Die Sohle beider Schächte liegt einige Meter tiefer als das untere Niveau des Tunnels. Die ausführliche hydrogeologische Untersuchung des Gesamtsystems wurde 1935 durchgeführt (H. HORUSITZKY, 1935). Zu dieser Zeit wurden in den Schächten Wassertemperaturen von $16,5\text{--}18 \text{ }^\circ\text{C}$ gemessen. Das heißt, die 27 Jahre später gemessenen Werte geben die Werte von 1908 wieder. Es wurde weiters festgestellt, dass einer der Schächte von unten alimentiert wird.

Die Temperatur der geringer temperierten Quellen liegt zwischen $20 \text{ }^\circ\text{C}$ und $30 \text{ }^\circ\text{C}$. Daher belegen die Messungen von H. HORUSITZKY nicht eindeutig, dass geringer temperiertes Karstwasser am Burghang austrat, allerdings weist die Auswertung seiner Ergebnisse – der Vergleich der Wässer mit der Temperatur und der Wasserchemie der Abwässer, die tektonischen Gegebenheiten (Störungssystem des Ördögárok) und die vertikale Lage – darauf hin, dass diese Wässer unter die Budaer Thermalwässer eingestuft werden können. Aus den Temperaturdaten kann auch darauf geschlossen werden, dass warme Quellen in der Nähe des Entwässerungswerkes aufsteigen, welche durch die Schichtwässer abgekühlt werden. Ein Liter $42 \text{ }^\circ\text{C}$ warmes Wasser sollte mit $2,8 \text{ l}$ $10 \text{ }^\circ\text{C}$ kaltem Wasser gemischt werden, um ein Wasser von $18 \text{ }^\circ\text{C}$ zu erhalten. Dies ist in Kenntnis der chemischen und physikalischen Eigenschaften der im Burgberg strömenden Wässer möglich. Einige Jahre nach der Untersuchung des Entwässerungswerkes erhielt H. HORUSITZKY im Jahr 1939 die Genehmigungen zur Niederbringung einer Tiefbohrung im Burggarten. Den damaligen Beschreibungen zufolge trat das Thermalwasser an der Grenze des Dolomits in einer Teufe von 248 m auf. Anfangs wurde eine Schüttung von 150 l/min , später 200 l/min und zum Schluss 250 l/min gemessen. An der Bohrlochsohle wurde eine Wassertemperatur von $48 \text{ }^\circ\text{C}$, am Auslauf eine von $44 \text{ }^\circ\text{C}$ gemessen. Die Temperaturabnahme wurde von H. HORUSITZKY (1939) durch Zufluss des Grund- und Schichtwassers erklärt, was auch durch die chemischen Untersuchungen untermauert wurde. Die Durchmischung bewiesen auch die Spuren von Nitrit, Nitrat und Ammonium der im Budaer Mergel sickernden Wässer. Der Ruhewasserspiegel der Thermalwasserbohrung stellte sich auf $106,01 \text{ m ü. A.}$ ($9,42 \text{ m}$ über dem Nullpunkt der Donau) und $1\text{--}2 \text{ m}$ über dem Wasserspiegel der Therme Rudas ein. Die Bohrung wurde in der ersten Etappe 50 h lang gepumpt, wobei der Wasserspiegel $29,5 \text{ m}$ unter GOK sank. Die Absenkung blieb auf diesem Niveau konstant. Nach Einstellen des Pumpens stellte sich in wenigen Minuten der Ruhewasserspiegel $16,5 \text{ m}$ unter GOK ein. Bei der letzten Untersuchung nahm die Schüttung auf $285,6 \text{ l/min}$, die Wassertemperatur um $1,2 \text{ }^\circ\text{C}$ (auf $45,2 \text{ }^\circ\text{C}$) zu. Die Zusammensetzung des Wassers ähnelt jener des Wassers der Therme Rudas (H. HORUSITZKY, 1939).

Nach der klassischen hydrogeologischen Gliederung ist auf dem Plateau des Burgberges kein Grundwasser anzutreffen. Im Süßwasserkalk unter den anthropogenen Auf-

füllungen strömt Karstwasser im Kluftsystem. Da diese Schicht durchschnittlich 5–8 m mächtig ist, kann dieses Wasser nicht als Karstwasser im klassischen Sinne betrachtet werden. Die beste Definition für diese Wässer ist das Kluft- oder Spaltwasser. Wegen der Heterogenität, der unterschiedlichen Struktur des Kalksteins kann dieses Spaltwasser von unterschiedlichem Volumen sein. Es existiert im kapillaren Netz, kann aber auch in einige Kubikmeter großen Höhlungen anzutreffen sein. Die Neubildung erfolgt aus dem Niederschlag und den Verlusten der Ver- und Entsorgungsleitungen (G. HAJNAL, 1995).

Das in die unter dem Kalkstein gelegene 1–2 m mächtige alluviale Formation versickernde Wasser bildet auch keinen zusammenhängenden Wasserkörper. Die früheren Untersuchungen wiesen nach, dass die Schachtbrunnen im Labyrinth aus voneinander getrennten kleinen Einzugsgebieten gespeist werden. Die Durchsickerung zwischen den Brunnen ist minimal, infolge des Abpumpens kommt keine Strömung zustande. Der überwiegende Anteil der Wässer versickert in Richtung der Burgflanken, grundsätzlich durch die Klüfte des Budaer Mergels. Davon zeugen die an den Burgflanken austretenden Scheinquellen, die überwiegend, bedingt durch das Einfallen der Gesteinsschichten nach SW, am westlichen Hang zu finden sind.

2.3. Versickerung

Es wurde bereits nachgewiesen (G. HAJNAL, 2003), dass die vadosen Wässer des Süßwasserkalkes auch dann zum Vorschein kommen, wenn längere Zeit kein Niederschlag gefallen ist. Die Gründe dafür sind Verluste aus öffentlichen Ver- und Entsorgungsleitungen, in erster Linie die Undichtheit des Wasserversorgungsnetzes. An einer undichten Stelle mit 5 mm Durchmesser versickern 25 l Wasser in der Minute. Zehn Prozent der Gesamteinpeisung in das Netz stellen den Verlust dar. Für das Plateau des Burgberges wurden früher für zwei Perioden (1992–1995 und 1996–2000) Berechnungen unter Heranziehung der monatlichen Infiltration durchgeführt. Für die erste Periode wurde eine Versickerung aus der Wasserleitung von 168 mm/a, für die zweite eine von 142 mm/a ermittelt. Dies ist etwa ein Viertel des Jahresniederschlages, von dem nur ein Teil in den Untergrund bzw. ins Gestein versickert. Der Jahresverlust aus dem Mischkanalsystem beträgt 160 mm/a. Die zwei Beträge zusammen machen bereits eine beträchtliche Menge aus. Natürlich ist das Auftreten der Wässer nicht gleichmäßig, sondern kommt eher als punktuelle Belastung vor, was an der unteren Grenze der Kalksteindecke gut beobachtet werden kann.

3. Höhlen, Gänge und Keller

Die Hohlräume im Kalktuff des Budaer Burgberges sind in ihrer ursprünglichen Ausbildung unregelmäßige und niedrige Gebilde und der Mensch wollte diese zu seinem eigenen Nutzen gestalten. Wenn der Kalktuff hart war, wurde das Liegende ausgehöhlt, wenn er abbaubar war, wurden die Gänge in Richtung der Stollendecke oder der Seitenwände erweitert. Letztere wurden an vielen Stellen hochgemauert, die Decke wurde durch Säulen unterstützt (O. KADIČ, 1942). Zum Ansammeln des in die Höhlungen einfließenden Wassers wurden Brunnen gegraben, welche oft mit Luftschächten von der Stollendecke bis zur Oberfläche leicht zugänglich gemacht wurden. Infolge der oben angeführten Vorgänge wurden bis heute zahlreiche Bezeichnungen für die Hohlräume

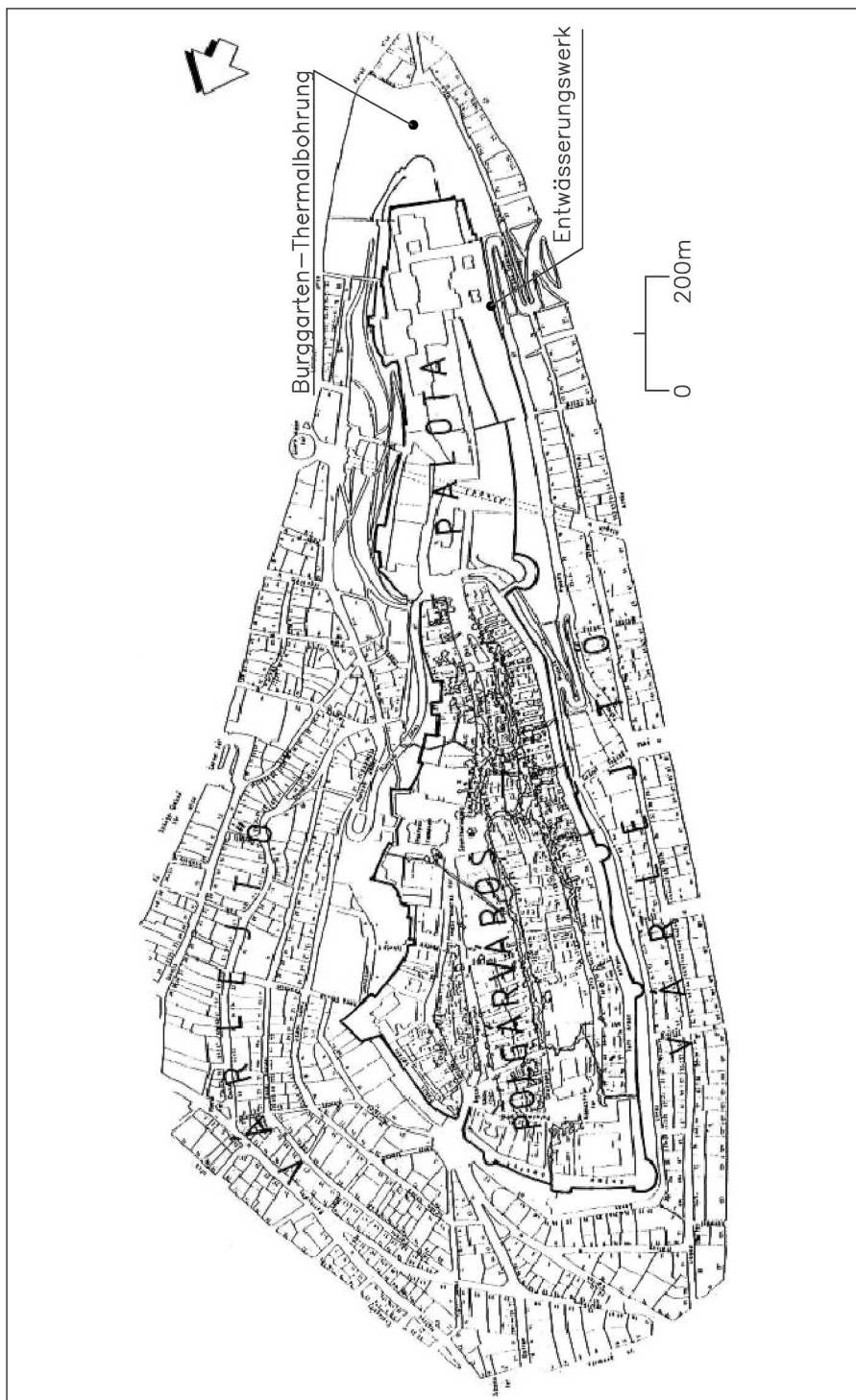


Fig. 5. Lageplan des Budaer Burgberges (nach G. HAJNAL, 2003). Palota — Palais, polgárúró — Bürgerstadt, várlejtő — Burghang.
 Site plan of the Buda castle hill (after G. HAJNAL, 2003). Palota — palace, polgárúró — citizen town, várlejtő — castle hillside.

gebräuchlich. Sie werden Höhle, Hohlraum, Keller, Tiefkeller, Höhlenkeller, Türkenkeller und Felsenkeller genannt.

Die Gesamtfläche der zusammenhängenden Höhlenkeller beträgt ca. 18 000 m², jene der getrennten Hohlräume ca. 4000 m². Nach unseren heutigen Kenntnissen befinden sich Hohlräume natürlichen Ursprungs nur unter der Bürgerstadt (Polgárváros, Fig. 5).

4. Untersuchung der Höhlenbrunnen

Die Anzahl der auffindbaren und identifizierbaren Brunnen nahm mit der Zeit kontinuierlich ab. In der Mitte des 17. Jahrhunderts wurden 75 Brunnen erwähnt (L. ZOLNAY, 1961), T. SZONTAGH (1908) beschreibt 28 Brunnen, 1938 wurden nur noch 13 Brunnen untersucht (H. HORUSITZKY, 1939), und in einem Lageplan aus dem Jahre 1951 wurden 26 Brunnen dargestellt. In den 1990er Jahren wurden insgesamt 21 Brunnen ins Auge gefasst (Fig. 6). Viele der von H. KESSLER 1970–1971 erschlossenen Brunnen (H. KESSLER, 1971) konnten nicht mehr identifiziert werden. Zur Zeit der Untersuchungen von H. KESSLER wurden die Brunnen eingemessen, jedoch sind diese Daten verloren gegangen.

4.1. Wasserstand und Ergiebigkeit

Die Messung der Wasserstände der Höhlenbrunnen erfolgte in zwei Perioden mit gewisser Regelmäßigkeit. Die erste Periode dauerte vom 6. 9. 1970 bis 30. 5. 1971 an (H. KESSLER, 1971). In diesen neun Monaten wurden wöchentliche Messungen an 12 Brunnen durchgeführt.

In der zweiten Periode von Juni 1998 bis Januar 2000 wurden die Wasserstände von 10 Brunnen etwa einmal im Monat registriert.

Mit den Messungen wurde ab Oktober 2008 mit wöchentlicher Häufigkeit an sechs Brunnen (Mély, Bölényes, Nagy, Kávézó, Világtengely, Vendégkönyves) im südlichen Teil der Burghöhle neu begonnen. Ab September sowie Oktober 2009 wurden an weiteren sechs Brunnen (Mamutfogas, Hadik, Német, Méróórás, Barlangos, Északi-labirintus) die vor mehreren Jahrzehnten begonnenen Messungen im nördlichen Teil fortgesetzt. Bei 10 von den 12 in der Burghöhle untersuchten Brunnen bestand die Möglichkeit, die Wasserstände mit den früheren Ergebnissen zu vergleichen (G. HAJNAL et al., 2009).

Es ist wichtig anzumerken, dass die gemessenen Wasserstände der ersten Periode nur auf grafischen Darstellungen erhalten blieben, in tabellarischer Form standen die Daten nicht zur Verfügung, Messprotokolle und konkrete Daten waren nicht mehr aufzufinden, daher war die Datenverarbeitung und Darstellung besonders schwierig.

Die Ergiebigkeit der Höhlenbrunnen wurde zuerst 1970 untersucht (H. KESSLER, 1971), danach wurden in der Mitte der 1990er Jahre mehrere Male Messungen von den Fachleuten des Taucherklubs von Debrecen durchgeführt (DEBRECENI BÚVÁRKLUB 1994a, 1994b, 1996) (Tab. 1).

Im Februar 2009 konnten im südlichen Teil der Burghöhle an drei Brunnen (Bölényes, Nagy, Kávézó) Pumpversuche durchgeführt werden. Im September und Oktober 2009 wurden je drei Brunnen im nördlichen Teil abgepumpt.

Im Folgenden werden die registrierten Ganglinien sowie die Pumpversuchsergebnisse von je zwei charakteristischen Brunnen sowohl aus dem nördlichen als auch aus dem südlichen Bereich der Burghöhle im Detail dargestellt (Fig. 7–12).

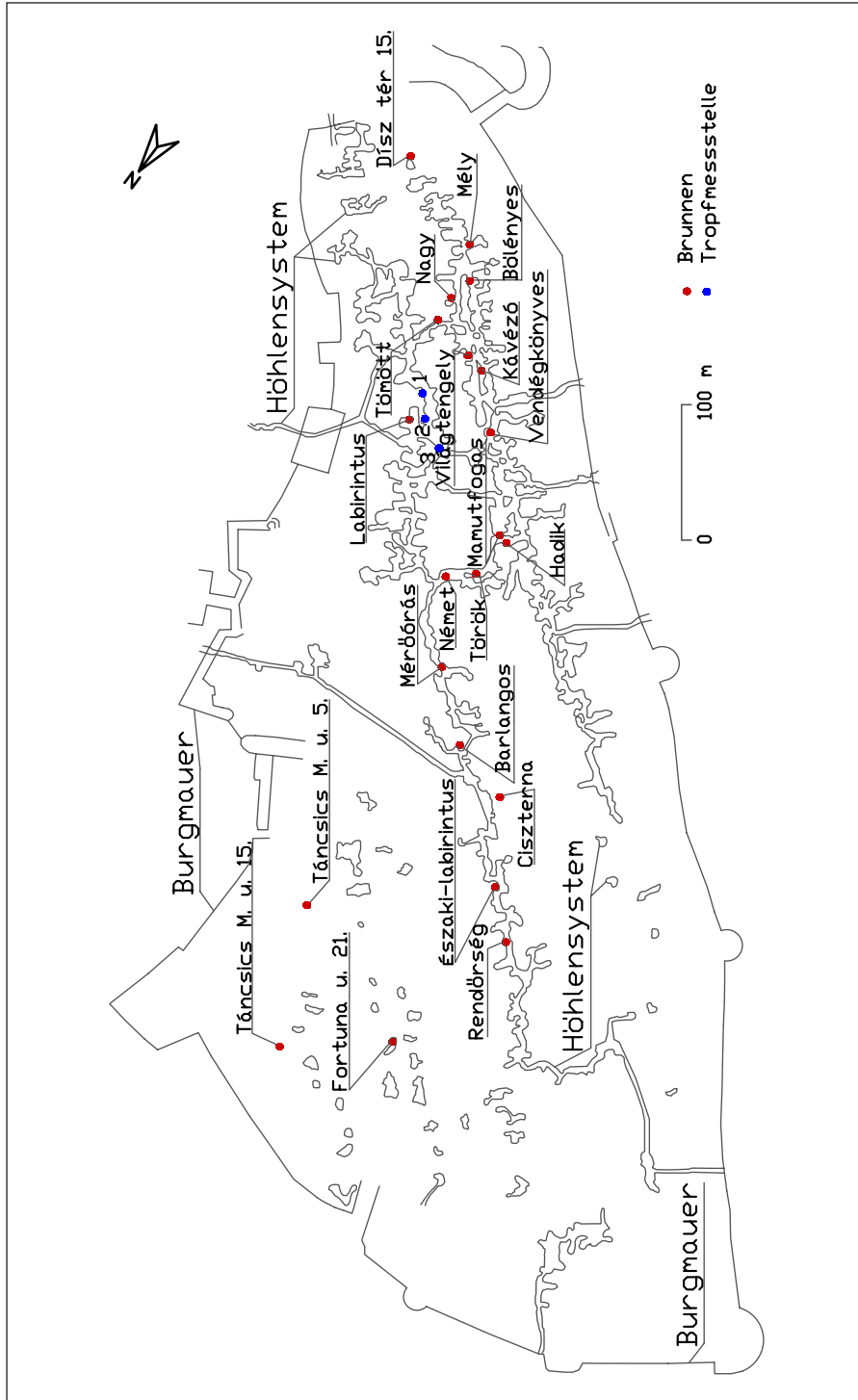


Fig. 6: Höhlensystem und Lage der Höhlenbrunnen (nach G. HAJNAL, 2003).
 Site plan of the cave wells (after G. HAJNAL, 2003).

Im ersten Messzeitraum wurde in den ersten Tagen von November 1970 Wasser aus den Brunnen Bölényes und Vendéggönyves geschöpft (H. KESSLER, 1971). Der Wasserstand des **Bölényes-Brunnens** stieg ab Anfang 1971 über 600 mm an und nach einer längeren abnehmenden Periode nahm er wieder zu (Fig. 7). Dies trat infolge der Niederschlagszunahme im Mai ein, wobei der Niederschlag im Mai das Fünffache von

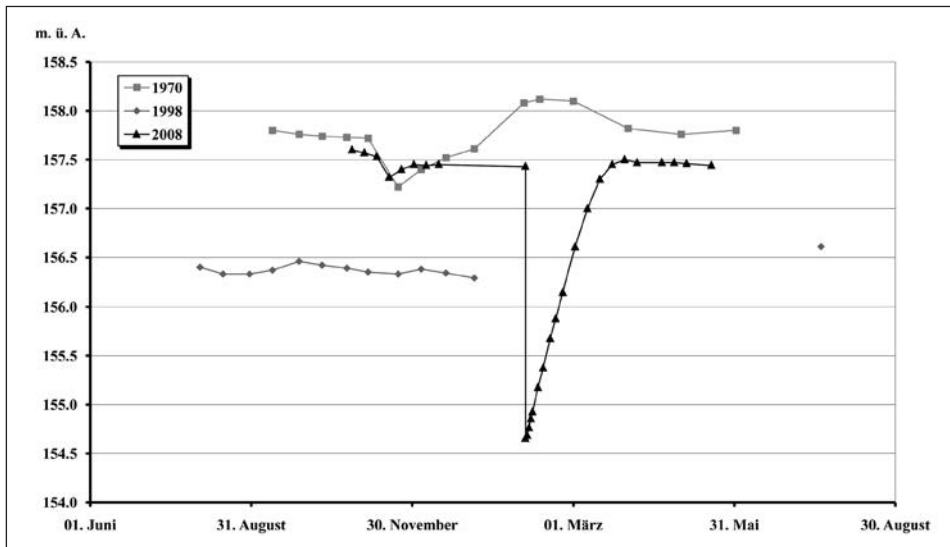


Fig. 7: Wasserstandsganglinien des Bölényes-Brunnen.
Water level hydrographs of well Bölényes.



Fig. 8: Bölényes-Brunnen nach dem Abpumpen (Foto: G. HAJNAL, 2009).
The well Bölényes after drawdown (photo: G. HAJNAL, 2009).

jenem vom April betrug. Zur Zeit unserer eigenen Messungen folgte der Wasserstand des Brunnens noch eindeutiger der Niederschlagsmenge, was auch trotz seltenerer Beobachtungen feststellbar war. Der mittlere Wasserspiegel des Brunnens sank zwischen den ersten zwei Messzeiträumen um 1,4 m. In Fig. 7 ist gut erkennbar, dass der heutige Wasserspiegel des Brunnens jenem von den 1970er Jahren näher steht, im vergangenen Jahrzehnt erfolgte ein Anstieg von ca. 1 m.

Der Durchmesser des Bölényes-Brunnens beträgt ungefähr 1,46 m. Die Wassersäule im Brunnen wurde mit einer Pumpe, deren Durchfluss 40 l/min betrug, in 89 min vollkommen abgepumpt (Fig. 8). Die Aufspiegelung im Brunnen war gleichmäßig, die Ergiebigkeit des Brunnens ließ sich mit 109 l/d ermitteln. Dieser Wert ist um sieben- bis achtfach größer als die früher ermittelten Werte (vgl. Tab. 1). Der Grund dafür könnte nur durch wiederholte Untersuchungen festgestellt werden.

In den 1970er Jahren waren die Wasserstandsänderungen des **Nagy-Brunnens** am kleinsten (maximale wöchentliche Änderung 38 mm), die 1998 beginnende Datenreihe ist wesentlich unbeständiger (Fig. 9). Das Vorzeichen der Wasserstandsänderungen entspricht der Veränderung der Niederschlagsmenge, deren Maß unter allen Brunnen hier das größte ist. Die Gültigkeit des gleichen Vorzeichens kippte beim im Juni 1999 auftretenden Niederschlagsmaximum um, da sank der **Wasserstand des Brunnens** nämlich über jedes bisherige Maß sogar unter (!) die bis dahin angenommene Sohlentiefe des Brunnens von 157,6 m ü. A. um 40 cm.

Dies war jedoch nur so möglich, dass die Brunnensohle inzwischen erneut geräumt wurde, worüber jedoch keine konkreten Informationen zur Verfügung standen. Während der Räumung des Brunnens muss das Wasser ständig gepumpt worden sein. Es ist zwar möglich, dass die Wasserbewegung nur durch die Niederschlagsmenge zum Zeitpunkt der anderen Messungen beeinflusst wurde, dennoch ist es wichtig zu berücksichtigen, dass dieser Brunnen am meisten den unerwünschten anthropogenen Auswirkungen ausgesetzt ist. Der mittlere Wasserstand des Brunnens sank etwa um 1 m zwischen den ersten zwei Messzeiträumen.

Bis heute trat im Nagy-Brunnen auch im Vergleich mit den 1970er Jahren ein Wasserstandsanstieg von 1 m ein. Aufgrund der mündlichen Mitteilung der Betreiber des Labyrinthes muss das Wasser aus dem Brunnen regelmäßig abgepumpt werden, damit keine Überflutung aus dem Brunnen erfolgt.

Der Durchmesser des Nagy-Brunnens beträgt 1,34 m. Aus dem Brunnen wurde eine Wassersäule von 1,94 m abgepumpt (Fig. 10), ebenfalls mit einem Durchfluss von 40 l/min innerhalb von 70 min. Wie bereits erwähnt und auch in Fig. 9 ersichtlich ist, musste der Brunnen mehrmals abgepumpt werden. Bedauerlicherweise wurde davon keine Dokumentation erstellt, die früheren Daten stehen aber nicht zur Verfügung. Die Ergiebigkeit des Brunnens beträgt 88 l/d.

Der Wasserspiegel im **Mamutfogas-Brunnen**, wie im einige Meter neben ihm gelegenen Hadik-Brunnen, vor dem Abpumpen war nur wenige Zentimeter niedriger im Vergleich mit der Datenreihe von 1998 (Fig. 11). Die Aufspiegelung war äußerst schnell, jedoch wurde der vor dem Abpumpen registrierte Wasserspiegel bei der letzten Messung nicht wieder erreicht. Von der Kurve kann abgelesen werden, dass der Wasserspiegel in den ersten sechs Tagen 1,6 m zunahm. Gemäß den früheren Beobachtungen reagiert der Brunnen langsam, aber doch eindeutig. Aufgrund der jüngeren Messerie kann diese Aussage nicht vollkommen bestätigt werden, weil infolge des Niederschlages keine intensivere Aufspiegelung beobachtet werden kann, wie z. B. beim Némét- oder Barlangos-Brunnen. Die vorhergehenden Untersuchungen beweisen ebenfalls, dass es keine Verbindung zwischen dem Mamutfogas- und dem Hadik-Brunnen gibt, trotz

dem geringen Abstand von einigen Metern zwischen den Brunnen. Beim Abpumpen der Brunnen ließ sich keine Verbindung zwischen den Wasserspiegeln erkennen.

Die 2,7 m hohe Wassersäule im Mamutfogas-Brunnen wurde bei einem Brunnendurchmesser von 1,55 m in 46 min abgepumpt. Der Brunnen wies 1994 eine Ergiebigkeit von 43 l/d auf. Die jüngsten Messungen und Berechnungen lieferten eine deutlich höhere Ergiebigkeit von 206 l/d (Tab. 1).

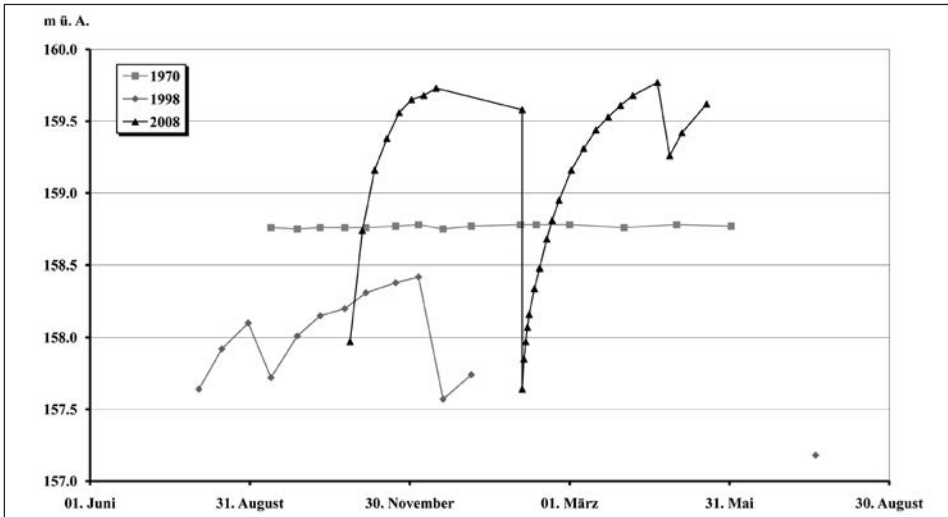


Fig. 9: Wasserstandsganglinien des Nagy-Brunnens.
Water level hydrographs of well Nagy.



Fig. 10: Abpumpen des Nagy-Brunnens (Foto: G. HAJNAL, 2009).
Drawdown at well Nagy (photo: G. HAJNAL, 2009).

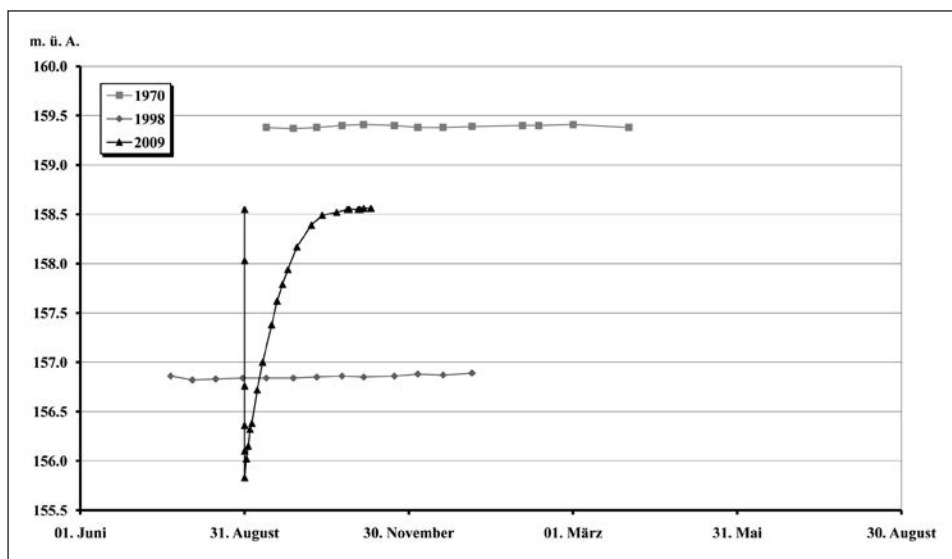


Fig. 11: Wasserstandsganglinien des Mamutfogas-Brunnens.
Water level hydrographs of well Mamutfogas.

Werden die Zeitreihen des **Barlangos-Brunnens** von 1970 und 1998 untersucht, kann festgestellt werden, dass der Wasserstand des Brunnen als ausgeglichen betrachtet werden kann, weil von Woche zu Woche eine Abnahme oder Zunahme von höchstens 2 cm zu beobachten ist (Fig. 12). Diese Eigenschaft des Brunnen kann auch während der Messungen von 2009 beobachtet werden. Das Wasser im Brunnen wurde abgepumpt und anschließend die Aufspiegelung kontinuierlich registriert, was beinahe einen Monat dauerte. Nach Fortsetzung der Messungen wurde die Erfahrung gemacht, dass ein Unterschied von 1 cm zwischen den Daten vor dem Abpumpen sowie am Ende der Aufspiegelung zu verzeichnen ist. Die Sensibilität des Brunnen auf den Niederschlag kommt dadurch zum Ausdruck, dass er nach den beträchtlichen Niederschlägen Anfang September und Mitte Oktober höhere Durchflüsse aufwies. Der Wasserspiegel im Brunnen sank im Vergleich mit der Zeitreihe der 1970er Jahre um 0,85 m, allerdings stieg er im Vergleich mit dem von 1998 um 1,7 m.

Der Durchmesser des Barlangos-Brunnen beträgt 1,2 m, der im oberen Abschnitt auf 1,7 m erweitert wird. Aus dem Brunnen wurden 3,07 m³ abgepumpt, was 2 h und 20 min in Anspruch nahm. Die Ergiebigkeit wurde durchschnittlich zu 88 l/d ermittelt, während 1993 552 l/d und 1994 38 l/d ermittelt wurden. Aus den Daten ist ersichtlich, dass die jüngsten Messungen eher die Ergebnisse von 1994 wiedergeben.

Seit Beginn des Messzeitraumes von 2008 fielen gemäß den Daten auf der Homepage des Meteorologischen Landesdienstes Ungarns (OMSZ) mehrfach Niederschläge im Stadtgebiet von Budapest, die über dem langjährigen Mittelwert lagen. Im Dezember fiel an aufeinander folgenden drei Tagen ein Niederschlag von über 10 mm und im Februar 2009 war auch die Anzahl der Tage mit Niederschlagshöhen von einigen Millimetern größer. Nach dem mäßigen Rückgang des Wasserspiegels in den Brunnen kann ein sanfter Anstieg bei den Brunnen im südlichen Teil beobachtet werden. Bei den im nördlichen Teil gelegenen Brunnen Német, Barlangos und Északi-labyrinth kann darauf geschlossen werden, dass sie mehr oder weniger auf die Niederschläge reagierten, die

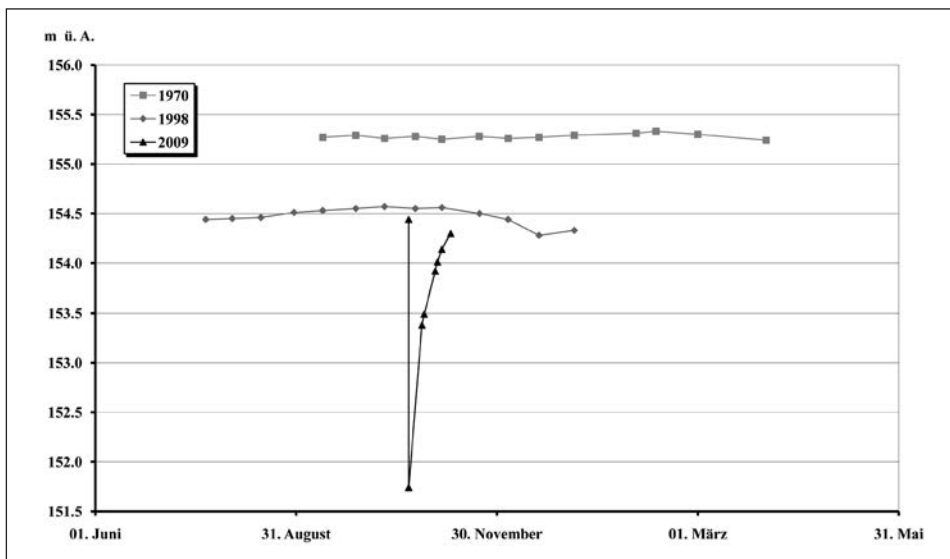


Fig. 12: Wasserstandsganglinien des Barlangos-Brunnens.
Water level hydrographs of well Barlangos.

hauptsächlich Anfang September, Mitte Oktober und Anfang November fielen. Um die Auswirkungen der Niederschläge genauer nachweisen zu können, wären längere Datenreihen erforderlich.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass von den analysierten neun Brunnen sieben in den 1970er Jahren die höchsten mittleren Wasserstände hatten. Zwei Ausnahmen sind der Nagy- sowie der Vendégekőnyves-Brunnen, bei welchen nicht nur eine Zunahme im Vergleich mit den 1970er Jahren zu beobachten ist, sondern unter den drei Messzeiträumen die Datenreihe von 2008 den höchsten Wasserspiegel aufweist. Die Datenreihen von 2008 und 2009 der Brunnen Kávészó, Mamutfogas und Hadik sind etwa mit jenen von 1998 gleich. Bei den Brunnen Bölényes, Németh und Barlangos trat eine Wasserspiegelzunahme im Vergleich mit den 1990er Jahren ein. Der Mérőórás-Brunnen ist der einzige, von welcher Ganglinie eindeutig abgelesen werden kann, dass sein Wasserspiegel von 2009 wesentlich niedriger ist als jener in den vorhergehenden Jahrzehnten.

In Tab. 1 ist ersichtlich, dass wenige Messungen stattfanden und auch diese nur kurze Perioden umfassen. Die Ergiebigkeiten wurden aus den Aufspiegelungskurven der abgepumpten Brunnen ermittelt. Daher gilt bei dieser Methode besonders: „eine Messung ist keine Messung“. Aus den Ergebnissen der 1970er und 1990er Jahre können trotzdem wichtige Schlüsse gezogen werden. Die Ergiebigkeit der meisten sich im nördlichen Teil der Bürgerstadt befindlichen Brunnen ist um ein bis zwei Größenordnungen größer als jene der Brunnen im südlichen Teil. Diese Tatsache hat eindeutig hydrogeologische Gründe, nämlich im nördlichen Teil kann in großer Ausbreitung der Terrassenkies des Ördögárok angetroffen werden, während im südlichen Teil wesentlich bindigere Böden unter dem Süßwasserkalk zu finden sind.

Von den 2008 und 2009 untersuchten Brunnen kann gesagt werden, dass sich nur die Ergiebigkeit des Mérőórás-Brunnens nicht um das deutlich Mehrfache im Vergleich der Daten der 1970er und 1990er Jahre veränderte. Der Tab. 1 kann entnommen werden,

Tab. 1: *Ergiebigkeit der Höhlenbrunnen.*
Yield of the cave wells.

Brunnen	1971	1993	1994	1996	2008–2009
	[l/d]				
Dísz tér 15.	–	–	480	1 008	–
Mély	4	–	4	–	–
Bölényes	16	–	14	–	109
Nagy	–	–	–	–	88
Kávézó	–	–	–	–	2
Vendégkönyves	43	–	–	–	5
Labirintus	–	1 296	744	720	–
Mamutfogas	–	–	43	–	206
Hadik	–	–	–	–	16
Német	–	–	–	–	18
Mérőórás	–	744	480	–	452
Barlangos	–	552	38	–	88
Ciszterna	9	–	–	–	–
Északi-labirintus	–	9	89	528	4
Fortuna u. 21.	–	–	1 440	1 440	–
Rendőrség	–	–	5 400	7 200	–
Táncsics M. u. 5.	–	–	10 080	12 000	–
Táncsics M. u. 15.	–	–	13 000	12 000	–

dass es für die Brunnen Kávézó, Nagy, Hadik und Német keine früheren Ergiebigkeitswerte gab, daher kann auch keine Gegenüberstellung vorgenommen werden. Im Allgemeinen kann festgestellt werden, dass die seichten Brunnen mit kürzerer Wassersäule deutlich niedrigere Ergiebigkeit haben als die tieferen Brunnen.

Die aus den Datenreihen der Aufspiegelungen ausgewerteten hydraulischen Parameter der in den Brunnen erfassten Aquiferbereiche werden in Tab. 2 angeführt.

Tab. 2: *Hydraulische Parameter der untersuchten Aquifere. T – Transmissivität, S/S' – relative Veränderung des Speicherkoeffizienten, k_f – Durchlässigkeitsbeiwert.*
Hydraulic parameters of the aquifers investigated. T – transmissivity, S/S' – relative change of storativity, k_f – coefficient of hydraulic conductivity.

Vollkommene Aufspiegelung			
	T [m ² /s]	S/S'	k_f [m/s]
Bölényes	2,617E-6	0,9056	9,280E-07
Nagy	1,383E-6	0,9693	6,984E-07
Barlangos (2009)	1,198E-6	0,9343	3,915E-07
Keine vollkommene Aufspiegelung			
Mamutfogas	1,625E-6	0,9625	4,865E-07
Hadik	2,487E-6	0,9765	1,703E-06
Német	1,807E-6	0,9738	1,843E-06
Barlangos (2010)	2,152E-6	0,9863	3,779E-07

Wichtig wäre, die geologischen Gegebenheiten des Gebietes sowohl in Hinblick auf die Wasser führenden Schichten als auch in Hinblick auf die möglichen Brüche detaillierter zu untersuchen.

4.2. Temperatur

Zu Beginn des vergangenen Jahrhunderts wurde die Wassertemperatur von einigen Brunnen gemessen, die meisten wiesen eine Temperatur von 12 °C auf (T. SZONTAGH, 1908).

Ebenfalls liegen einige Daten aus dem Jahre 1938 vor (H. HORUSITZKY, 1938), als die Wassertemperatur von 13 Brunnen registriert wurde. Die Werte lagen zwischen 10,5 und 13,9 °C. In diesem Messzeitraum war die Lufttemperatur in den Höhlen 8–11 °C.

Die erste längere Datenreihe entstand 1970–1971 (H. KESSLER, 1971), zu dieser Zeit variierte die Wassertemperatur der Brunnen zwischen 10,6 und 15,8 °C und die Wassertemperatur folgte mehr oder weniger der Lufttemperaturveränderung. Die Messergebnisse blieben auch hier nur in grafischer Form erhalten. Die von den Kurven abgelesenen Maxima und Minima (gerundet) werden hier für die Brunnen angeführt. Die Messungen von 1998 wurden mit einer etwa monatlichen Häufigkeit, im neuesten Messzeitraum wöchentlich durchgeführt (Tab. 3).

Der niedrigste Wert bei den früheren Messungen wurde im Hadik-Brunnen (10 °C), der höchste im Nagy-Brunnen erfasst. Die Minima traten ausnahmslos bei der Registrierung vom 4. 1. 1999, die Maxima in den Sommermonaten oder im Frühherbst auf. Die Daten der ersten Messserie zeigen ein weit ausgeglicheneres Bild als jene in der zweiten Messserie. In den 1970er Jahren war die Differenz zwischen den Minima der einzelnen Brunnen 4 °C, zwischen den Maxima 3 °C, während die Differenz zwischen den Minima 6,2 °C und den Maxima 4 °C bei der Messserie der 1990er Jahre betrug. Es ist interessant, dass in der ersten Messserie (1970–1971) das Maximum und in der zweiten Messserie (1998–1999) das Minimum der Temperaturen im Hadik-Brunnen

Tab. 3: Wassertemperaturen der Höhlenbrunnen.
Water temperatures of the cave wells.

Brunnen	1970–1971		1998–1999		2008–2009	
	[min. °C]	[max. °C]	[min. °C]	[max. °C]	[min. °C]	[max. °C]
Mély	–	–	–	–	13,3	14,3
Bövényes	13	14	13,7	16,0	13,3	15,4
Nagy	14	15	14,3	18,0	14,2	16,8
Világtengely	–	–	–	–	14,7	18,5
Kávészó	13	14	16,2	17,6	15,4	17,7
Vendégkönyves	12	13	15,3	17,2	15,5	16,6
Mamutfogas	14	15	12,0	14,0	13,6	13,8
Hadik	15	16	10,0	14,5	13,4	15,4
Török	12	14	11,5	14,0	–	–
Német	13	14	12,0	14,3	13,6	14,1
Mérőórás	13	14	13,0	14,8	13,9	15,4
Barlangos	11	13	14,1	16,0	15,3	15,3
Északi-labirintus	–	–	–	–	13,1	13,2

registriert wurde. Der Grund dafür mag sein, dass der Brunnen bzw. der Höhlenabschnitt mit der Oberfläche durch einen Schlot in unmittelbarer Verbindung steht. Daher kann mit der Lufttemperatur gleichzeitig auch die Wassertemperatur sensibler auf die meteorologischen Einwirkungen sein.

An den Schwankungen der von den Autoren erstellten Datenreihen kann die Tendenz beobachtet werden, dass im südlichen Teil des Labyrinthes, der zurzeit der Untersuchungen genutzt und daher stellenweise beheizt wurde, die Wassertemperaturen durchschnittlich höher sind als jene in den im nördlichen Teil des Labyrinthes gelegenen Brunnen.

Aus dem Vergleich der Datenreihe von 2008 bis 2009 mit den Messungen von 1998 bis 1999 kann festgestellt werden, dass die Extremwerte der Temperaturminima und -maxima nicht in den gleichen Brunnen auftraten.

4.3. Wasserchemie

Die Ergebnisse der chemischen Untersuchungen der Wässer der Höhlenbrunnen wurden in mehreren Studien festgehalten (T. SZONTAGH, 1908, H. HORUSITZKY, 1938). Die Brunnenwässer der Burghöhle wurden auf verschiedene chemische Komponenten durch Schnelltests sowie mit Konduktometer untersucht.

Vergleicht man mit dem Leitungswasser, so ist erkennbar, dass die stark verunreinigten Brunnenwässer nicht aus dem Uferfiltrat der Donau stammen (die Trinkwasserversorgung von Budapest erfolgt aus dem Uferfiltrat der Donau). Die Proben aus den Brunnen Bölényes, Nagy und Kávézó weisen eine sehr ähnliche Zusammensetzung auf, nur der Anteil an Nitrat ist wesentlich abweichend. Die für die Gesamthärte verantwortlichen Calcium- und Magnesiumionen wurden vermutlich aus den umliegenden Gesteinen ausgelöst, während für den hohen Chloridgehalt die Salzstreuung der Straßen verantwortlich gemacht werden kann. Die erhöhte Präsenz von Nitrat weist auf frühere organische Verunreinigungen hin (Tab. 4).

Das Wasser des Vendégekőnyves-Brunnens weicht wesentlich von jenem der vorher erwähnten Brunnen ab. Eine Erklärung dafür ist heute noch nicht bekannt, zur Ermittlung der Ursachen wären weitere Untersuchungen erforderlich.

Tab. 4: Ergebnisse der hydrochemischen Untersuchungen (2. 2. 2009).
Results of the hydrochemical investigations (2nd February 2009).

Brunnen	Leitfähigkeit [mS/cm]	Gesamthärte [dH°]	Chlorid [mg/l]	Nitrit [mg/l]	Nitrat [mg/l]
Bölényes	2,6	38	675 (923)	0 (0)	100 (118)
Nagy	2,1	28	475 (533)	0 (0,1)	75 (168)
Nagy (gepumpt)	2,0	27	425	0 (0)	75
Kávézó	2,4	36	575 (249)	0 (0)	0 (0)
Vendégekőnyves	1,1	13	200 (107)	0,05 (0,50)	50 (16)
Mamutfogas	1,7	26	334 (319)	0,08 (0)	49 (144)
Mérőórás	1,4	31	100 (220)	1 (0)	5 (136)
Barlangos	9,6	98	1491	0,75 (0)	75 (84)
Északi-labirintus	2,7	35	525	0,75	100
Északi-labirintus (gepumpt)	2,0	36	425	0,50	50
Leitungswasser	0,4	18	25	0	0

In den Brunnen Mamutfogas, Mérőórá, Barlangos und Északi-labyrinth nahm die Nitratkonzentration ab. Es kann festgestellt werden, dass die Chloridkonzentration in den Brunnen des südlichen Teiles höher als jene in den Brunnen des nördlichen Teiles ist.

5. Tropfwässer

Die Intensität der Tropfwässer wurde früher nur von H. KESSLER (1971) gemessen. Die an sechs Tropfstellen gemessenen Intensitäten variierten zwischen 1,4 und 200 l/min.

Im Jahre 2008 konnte an drei Stellen die Tropfintensität gemessen werden (Fig. 6, Fig. 13), die Werte sind in Tab. 5 angeführt. Aufgrund der im früheren und letzten Messzeitraum vorgenommenen Begehungen kann eindeutig festgestellt werden, dass die Vernässung in kleineren Bereichen als früher erfolgt, was der kontinuierlichen Rekonstruktion der öffentlichen Versorgungsnetze zu verdanken ist. Trotzdem gibt es infolge einzelner verborgener Schadstellen tropfende Bereiche bzw. Vernässungen.



Fig. 13: Messung der Tropfintensität im Labyrinth (Foto: G. HAJNAL, 2009).
Measurement of drip intensity in the labyrinth (photo: G. HAJNAL, 2009).

Tab. 5: Tropfintensitäten (Messungen 2008).
Drip intensities (measurements 2008).

Messstelle	Intensität [l/d]
1	0,21–0,86
2	2,10–2,52
3	3,24–5,04

Alle Tropfstellen zeichnen sich durch eine Gesamthärte und einen Chloridgehalt aus, die auch jene der Brunnenwässer weit überschreiten (Tab. 6). Der Ursprung der Verunreinigungen ist wahrscheinlich gleich mit den bei den Brunnenwässern erwähnten Verunreinigungen. Auffallend ist, dass auch zwischen den einzelnen Stellen wesentliche Unterschiede zu beobachten sind.

Tab. 6: *Hydrochemische Untersuchung der Tropfwässer.*
Hydrochemical investigation of drip water.

Tropfstelle	Leitfähigkeit [mS/cm]	Gesamthärte [dH]	Chlorid [mg/l]	Nitrit [mg/l]	Nitrat [mg/l]	Datum
1	6,8	60	2025	0,15	75	2. 2. 2009
1	6,7	59	1950	0,25	75	19. 2. 2009
2	4,2	51	1300	0,15	100	2. 2. 2009
2	4,5	50	1450	0,50	100	3. 2. 2009
2	4,6	72	1250	1,00	100	19. 2. 2009
3	2,7	18	800	0,15	50	19. 2. 2009
3	2,8	18	850	0,00	50	2. 2. 2009

6. Schlussfolgerung

Aus den im Höhlensystem registrierten einzelnen Daten ist es schwierig, genaue Schlüsse über den Wasserhaushalt des Gebietes zu ziehen. Zum Beispiel kann die Versickerung aus dem Niederschlag an einzelnen Stellen der Stollendecke nachgewiesen werden, dabei ist jedoch zu berücksichtigen, über welche komplizierten Wegigkeiten das Wasser in der 5–10 m mächtigen Süßwasserkalkschicht sowie in den darüber liegenden anthropogenen Anschüttungen zum Beobachtungspunkt gelangen kann. Das Kluftnetz des Gesteines weist eine äußerst abwechslungsreiche Konfiguration auf, das Verhältnis der gepflasterten und ungepflasterten Flächen an der Oberfläche ist sehr unterschiedlich usw. Die Wässer aus den Verlusten der Versorgungsleitungen können ebenfalls auf unterschiedlichen Wegen in das Labyrinth gelangen und sie können mit Hilfe der hydrochemischen Untersuchungen nicht unbedingt von den Niederschlagswässern unterschieden werden. Der Wasserstand der Brunnen wird über diese Parameter hinaus auch von der Art, dem Einfallen und der Porosität des Gesteines im Umfeld des Brunnens beeinflusst, wovon ebenfalls wenige Informationen zur Verfügung stehen. Die Mehrheit der Brunnen ist gemauert, frühere Erhebungen erstreckten sich nicht auf die genaue Bestimmung des umgebenden Gesteins. Ein Teil der Brunnen wurde im Mergel, ein anderer Teil im Kies abgeteuft. Auf diese geologischen Eigenschaften kann oft nur indirekt geschlossen werden, eben aufgrund der Pumpversuche (z. B. aus der Größenordnung der Ergiebigkeit).

Daher sind die hydrologischen Untersuchungen erforderlich. Die bisher gewonnenen Daten sind jedoch nicht ausreichend, genaue Kenntnisse über das Gebiet zu formulieren. In Tab. 7 wird eine einfache Beziehungsmatrix präsentiert, welche aufgrund der Wiederholung der Untersuchungen kontinuierlich aktualisiert werden kann.

Analysiert man die zusammenfassende Darstellung der Messergebnisse (Tab. 7), so ist ersichtlich, dass der Einfluss des Niederschlages beim Északi-labirintus-Brunnen nachgewiesen werden kann, nicht aber aufgrund der Zeitreihen bei den Brunnen Mamutfogas, Hadik und Méróórás.

Tab. 7: Zusammenfassung der Messergebnisse der einzelnen Brunnen. * klein: 1–20 l/d, mäßig: 20–1500 l/d, ** die Wassertemperaturen wurden mit den Daten von 1998–1999 verglichen.
 Summary of measurement results of the individual wells. * small: 1–20 l/d, moderate: 20–1500 l/d, ** water temperatures compared to the data of 1998 and 1999.

Brunnen	Niederschlagsbeziehung		Ergebnisse*		Wassertemperatur** (2008–2009)	
	1998–1999	2008–2009	1998–1999	2008–2009	Minimum	Maximum
Bövényes	stark	stark	klein	mäßig	keine Veränderung	keine Veränderung
Nagy	mäßig	mäßig	keine Daten	mäßig	keine Veränderung	Abnahme
Kávézó	schwach	schwach	keine Daten	klein	Abnahme	keine Veränderung
Vendégkönyves	mäßig	mäßig	keine Daten	mäßig	keine Veränderung	Abnahme
Mamutfogas	mäßig	nicht nachweisbar	klein	mäßig	Zunahme	keine Veränderung
Hadik	stark	nicht nachweisbar	keine Daten	klein	Zunahme	Zunahme
Német	mäßig	mäßig	keine Daten	klein	Zunahme	Abnahme
Métróórá	mäßig	nicht nachweisbar	mäßig	mäßig	Zunahme	Zunahme
Barlangos	mäßig	mäßig	mäßig	mäßig	Zunahme	Abnahme
Északi-labirintus	keine Daten	schwach	mäßig	klein	keine Daten	keine Daten

Die Ergiebigkeit betrachtend, wurden für die Brunnen Nagy, Kávészó, Vendégekőnyves, Hadik und Német erst die ersten Ergebnisse registriert. Die Ergiebigkeit der Brunnen Bölényes und Mamutfogas nahm gemäß Tab. 7 zu, jene des Északi-labirintus-Brunnens ab. Bei den Brunnen Mérőórás und Barlangos trat keine Veränderung ein.

Bei den Temperaturuntersuchungen kann aufgrund der Messergebnisse von 1998 bis 1999 und 2008 bis 2009 festgestellt werden, dass das Minimum des Kávészó-Brunnens abnahm, die Minima der Brunnen Mamutfogas, Hadik, Német, Mérőórás und Barlangos anstiegen. Weiters nahmen die Maximumwerte der Brunnen Nagy und Vendégekőnyves ab, ebenso die Maxima der Brunnen Német und Barlangos. Hingegen stiegen die Maxima der Brunnen Hadik und Mérőórás an (Tab. 3).

Aufgrund der bisherigen Untersuchungen können folgende Feststellungen formuliert werden:

- Der Wasserstand der Brunnen nahm im Vergleich mit den 1970er Jahren im Allgemeinen ab. Dies kann auf die Abnahme der Verluste aus den Versorgungsleitungen zurückgeführt werden. (Die Einspeisungsmenge der Versorgungsleitungen nahm auf etwa die Hälfte ab.)
- Die Wassertemperatur der Brunnen folgt eng der Lufttemperatur der Höhlen.
- Die Mehrheit der Brunnen verfügt über ein eigenes Einzugsgebiet, die einzelnen Brunneneinzugsgebiete kommunizieren miteinander nicht.
- Die Ergiebigkeit der Brunnen im nördlichen Teil ist um ein bis zwei Größenordnungen größer als jene im südlichen Teil.

Zusammenfassung

Aufgrund der Analyse der Wasserstands-, Temperatur- und hydrochemischen Untersuchungen können viele Informationen über die Höhlenbrunnen und den Wasserhaushalt des Gebietes gewonnen werden. Die Pumpversuche in den Brunnen und die regelmäßige Wiederholung dieser Versuche liefern immer mehr Daten über die hydrogeologischen Eigenschaften des Gebietes. Die früheren derartigen Messungen hatten vermutlich technische Hindernisse, aber durch die planmäßige Wiederholung der Pumpversuche konnten viele Fragen beantwortet werden (z. B. Kommunikation zwischen den Brunnen, Ursprung der Brunnenwässer, Vorbeugung von Havariefällen usw.).

Der Ausbau eines Monitoringsystems wäre wichtig, welches die Durchführung von weiteren gleichzeitigen Untersuchungen ermöglichen könnte. In Kenntnis von Daten ausreichender Anzahl wäre die Modellierung des Gesamtsystems mit einer Genauigkeit möglich, welche für die oft eintretenden Havariefälle (Straßeneinstürze, Rohrbrüche, Gesteinsbewegungen) schnelle Abhilfe schaffen könnte. Mangels dieses Monitoringsystems sollen weiterhin regelmäßige Messungen durchgeführt werden.

Literatur

- ALFÖLDI, L. (1979): Budapesti Hévízek/Budapester Thermalwässer.– VITUKI Proceedings, **20**, 102 S., Budapest.
- ALFÖLDI, L. & Á. LORBERER (1976): A karsztos hévízek háromdimenziós áramlásának vizsgálata kútadatok alapján/Untersuchung der dreidimensionalen Strömung von Karstthermalwässern aufgrund von Brunnendaten.– Hidrológiai Közlöny, **56 (10)**, 433–443, Budapest.

- BÖCKER, T. (1975): Felszinalatti vízáramlás karsztos kőzetekben/Unterirdische Wasserströmung in verkarsteten Gesteinen.– Kandidátusi disszertáció/Kandidatendissertation, Magyar Tudományos Akadémia, 112 S., Budapest.
- DEBRECENI BÚVÁRKLUB (1994a): Összefoglaló jelentés a budai Várbarlang 1993. máj. 29.–1994. jan. 28. között vizsgált és tisztított kútjainak hidrogeológiai megfigyeléseiről/Bericht über die hydrogeologischen Beobachtungen der im Zeitraum 29. 5. 1993 bis 28. 1. 1994 untersuchten und gereinigten Brunnen der Budaer Burghöhle.– Unveröff. Bericht, Debreceni Búvárklub, 20 S., Debrecen.
- DEBRECENI BÚVÁRKLUB (1994b): Jelentés a Táncsics u. 15. sz. kút állapotfelméréséről, összefüggésvizsgálatáról és próbaszivattyúzásáról/Bericht über die Zustandsaufnahme, den Interferenztest und den Pumpversuch des Brunnens Táncsics u. 15.– Unveröff. Bericht, Debreceni Búvárklub, 5 S., Debrecen.
- DEBRECENI BÚVÁRKLUB (1996): Jelentés a budai Várnegyed 8 kútjának és 2 forrásának vizsgálatáról, melynek célja a vizek hálózati részarányának meghatározása/Bericht über die Untersuchung von 8 Brunnen und 2 Quellen im Budaer Burgviertel zur Bestimmung der Proportion des Wassers aus dem Versorgungsnetz.– Unveröff. Bericht, Debreceni Búvárklub, 15 S., Debrecen.
- HAJNAL, G. (1995): A budai Várbarlangok hidrologiája/Hydrologie der Budaer Burghöhlen.– Karszt- és Barlangkutatás, **10**, 211–223, Budapest.
- HAJNAL, G. (2003): A budai Várhegy hidrogeológiája/Hydrogeologie des Budaer Burgberges.– 129 S., Budapest (Akadémiai Kiadó).
- HAJNAL, G., D. FARKAS, SZ. MÁTÉ, Z. MÉSZÁROS & Z. PÓTH (2009): A budavári barlang hidrologiai vizsgálata/Hydrologische Untersuchung der Budaer Burghöhle.– Mélyépítés, **2009/2**, 16–21, Budapest.
- HORUSITZKY, H. (1935): Adatok az Ördögárok-völgy Krisztinaváros – Tabáni szakaszának hidrologiájához/Beitrag zur Hydrologie des Abschnittes Krisztinaváros – Tabán des Ördögárok Tales.– Hidrológiai Közöny, **15 (1-6)**, 233–243.
- HORUSITZKY, H. (1939): Budapest Duna – jobbparti részének geológiai viszonyai/Geologische Verhältnisse des Rechtsufers der Donau von Budapest.– Hidrológiai Közöny, **18 (1938)**, S. 404, Budapest.
- KADIČ, O. (1942): A budavári barlangpincék, a várhegyi barlang és a Barlangtani Gyűjtemény ismertetése/Besprechung der Höhlenkeller der Budaer Burg, der Burgberghöhle und der speläologischen Sammlung.– Barlangvilág, **12 (3-4)**, 49–75, Budapest.
- KESSLER, H. (1971): A budai Várbarlangban végzett hidrologiai mérések értékelése/Auswertung der in der Budaer Burghöhle durchgeführten hydrologischen Messungen.– Unveröff. Bericht, FÖMTERV 30.891, Budapest.
- KORDOS, L. (1969): A budai Várhegy és Várbarlang földtani viszonyai/Geologische Verhältnisse des Budaer Burgberges und der Burghöhle.– Karszt és Barlang, **2**, 47–50, Budapest.
- KROLOPP, E., F. SCHWEITZER, Gy. SCHEUER, Gy. DÉNES, L. KORDOS, I. SKOFLEK & D. JÁNOSSY (1976): A budai Várhegy negyedkori képződményei/Die tertiären Bildungen des Budaer Burgberges.– Földtani Közöny, **106 (3)**, 193–228, Budapest.
- SCHAFARZIK, F. (1926): A Szent Gellérthegy geológiai múltja és jelene/Geologische Vergangenheit und Gegenwart des Sankt Gellért-Berges.– Temészettudományi Közöny, **58**, S. 468, Budapest.
- SCHAFARZIK, F. (1928): Visszapillantás a budai hévforrások fejlődéstörténetére/Rückblick auf die Entwicklungsgeschichte der Budaer Thermalquellen.– Hidrológiai Közöny, Jg. **1921**, H. **I.**, S. 9., Budapest.
- SCHEUER, Gy. (1986): A budai Várbarlang geológiai vizsgálata, geológiai állapotfelmérés/Geologische Untersuchung der Budaer Burghöhle, geologische Zustandsaufnahme.– Manuskript, 67 S., Budapest.
- SZONTAGH, T. (1908): A budai várhegyi Alagút hidrogeológiai viszonyai – Jelentés a Várhegyi Alagút vizesedésének okairól/Hydrogeologische Verhältnisse des Burgbergtunnels von Buda. Bericht über die Vernässungen des Burgbergtunnels.– Unveröff. Bericht, 23 S., Budapest.
- TRUNKÓ, L., P. MÜLLER & T. BUDAI (2000): Ungarn. Bergland um Budapest, Balaton-Oberland, Südbakony.– Sammlung geologischer Führer, **91**, 158 S., Berlin/Stuttgart (Gebrüder Borntraeger).
- VENDL, M. & R. KISHÁZI (1963–64) Összefüggések melegforrások és karsztvizek között a Dunántúli-középhegységben megfigyelt viszonyok alapján/Zusammenhänge zwischen Warmquellen und Karstwässern aufgrund von im Transdanubischen Mittelgebirge beobachteten Verhältnissen.– MTA Műszaki Tudományos Osztály Közleményei, **32 (1-4)**, 393–417 und **33 (1-4)**, 205–233, Budapest.

ZOLNAY, L. (1961): Buda középkori vízművei/Mittelalterliche Wasserwerke von Buda.– Történelmi Szemle, 4 (1) 16–55, Budapest.

ZSIGMONDY, V. (1878): A városligeti artézi kút Budapesten/Der artesische Brunnen im Stadtwaldchen von Budapest.– Földtani Közlöny, IX, 128 S., Budapest.

Summary

Based on the analysis of water level, temperature and hydrochemical investigations important information can be obtained on the cave wells and the water balance of Buda castle hill. The pumping tests in the wells and the periodic repetition of these tests yield an increasing data on the hydrogeological character of the area. The previous measurements of this kind had probably technical obstacles but systematic repetition of pumping tests enabled answering many questions (e. g. communication between the wells, origin of well water, prevention of average cases).

The installation of a monitoring system would be an important means to carry out different investigations simultaneously. With availability of sufficient data, it would be possible to model the overall system with an accuracy that allows rapid remediation of the cases repeatedly occurring (pipe bursts, road collapse, rock wasting). Due to lack of this monitoring system, the periodic measurements need to be continued.

Dank

Die Autoren danken Herrn Sándor TOLNAI und István POZSGAI für ihre bei den Pumpversuchen geleistete Mitarbeit. Herrn Mag. Zoltán PÓTH sei für die Durchführung der chemischen Untersuchungen gedankt. Weiters wird Herrn Szabolcs MÁTÉ, Herrn Péter VAJDA und Zoltán MÉSZÁROS für die Mitwirkung bei den Pumpversuchen und den Messungen gedankt. Besonderer Dank gebührt Herrn Dipl.-Ing. Dr. techn. Vilmos VASVÁRI für seine wertvollen Ratschläge und für seine Mitarbeit bei der Ausfertigung des Manuskripts.

Schlüsselwörter: Budaer Burgberg, Brunnen, Ergiebigkeit, Pumpversuch, Wasserstand
Keywords: Buda castle hill, well, yield, pumping test, water level