

EUPALINŮV TUNEL/ŠTOLA NA OSTROVĚ SAMOS

TUNNEL OF EUPALINOS ON SAMOS ISLAND

VLASTIMIL HANZL, VLADISLAV HORÁK

ÚVOD

Osmý největší řecký ostrov Samos (Σάμος) leží ve východní části Egejského moře na dohled pobřeží Malé Asie. Náleží k Dodekanským ostrovům a spolu s Ikarií a ostrovem Fourni tvoří stejnojmennou prefekturu Samos spadající pod kraj Severní Egeis. Ostrov má rozlohu zhruba 477 km² a 34 200 obyvatel. Nejvyšší horou je Kerkis o výšce 1434 m n. m. Hlavním městem ostrova je Samos. Ostrov bezprostředně sousedí s Tureckem, od kterého jej odděluje jen 1,5 km široký mořský průliv. Udává se, že Samos je nejzelenějším ostrovem Egejského moře – obr. 1.

Ekonomika ostrova spočívá zejména v zemědělství a v turistice. Hlavními zemědělskými produkty jsou hroznové víno, med, olivy, olivový olej, citrony, sušené figy, mandle a květiny.

V klasické antice byl ostrov centrem iónské kultury a bohatství. Ostrov proslavila zdejší vína a červená keramika. Největšího rozkvětu dosáhl Samos za vlády tyrana Polykrata. Později byl pod kontrolou Perské říše a v období helénskému soupeřili o vliv nad ostrovem Ptolemaiovci a Seleukovci. V 2. století př. Kr. Samos ovládla Římská říše, ve středověku byl součástí Byzance, poté jej získali Janované a roku 1566 Osmané. V roce 1474 byl celý ostrov zničen silným zemětřesením a byl téměř opuštěn. Roku 1821 se obyvatelé ostrova připojili k řecké válce za nezávislost, nicméně Samos zůstal i po jejím skončení součástí Osmanské říše. Roku 1835 získal

INTRODUCTION

The eighth largest Greek island, Samos (Σάμος), lies in the eastern part of the Aegean Sea, within sight from the Asia Minor coast. It is one of the Dodecan Islands, forming, together with Icaria and Fourni island, the Samos prefecture falling under the region of North Egeis. The island has the area of roughly 477 km² and the population of 34 200. The highest mountain is Kerkis with its top at the elevation of 1434 m a.s.l. The capital of the island is Samos. The island immediately borders on Turkey, from which it is separated by a mere 1.5 km wide strait. It is stated that Samos is the greenest island in the Aegean Sea – see Fig. 1.

The island economy is based first of all on agriculture and tourism. The main agricultural products comprise grapes, honey, olives, olive oil, lemons, dried figs, almonds and flowers.

During the classical antiquity, the island was a centre of Ionic culture and wealth. The island became famous owing to its wines and red pottery. Samos reached the greatest prosperity during the rule of the tyrant Polycrates. Later it was under the control of the Persian Empire. During the Hellenistic Period, Ptolemaic and Seleuci dynasties contended for domination over the island. In the 2nd century BC, Samos was taken control of by the Roman Empire and, in the Middle Ages, it was part of the Byzantine Empire. Then it was acquired by Genoanians and, in 1566, by Osmanians. In 1474, the entire island was devastated by a heavy earthquake and was nearly deserted.



Obr. 1 Mapa ostrova Samos s vyznačením historického hlavního města a Eupalinova akvaduktu [2]

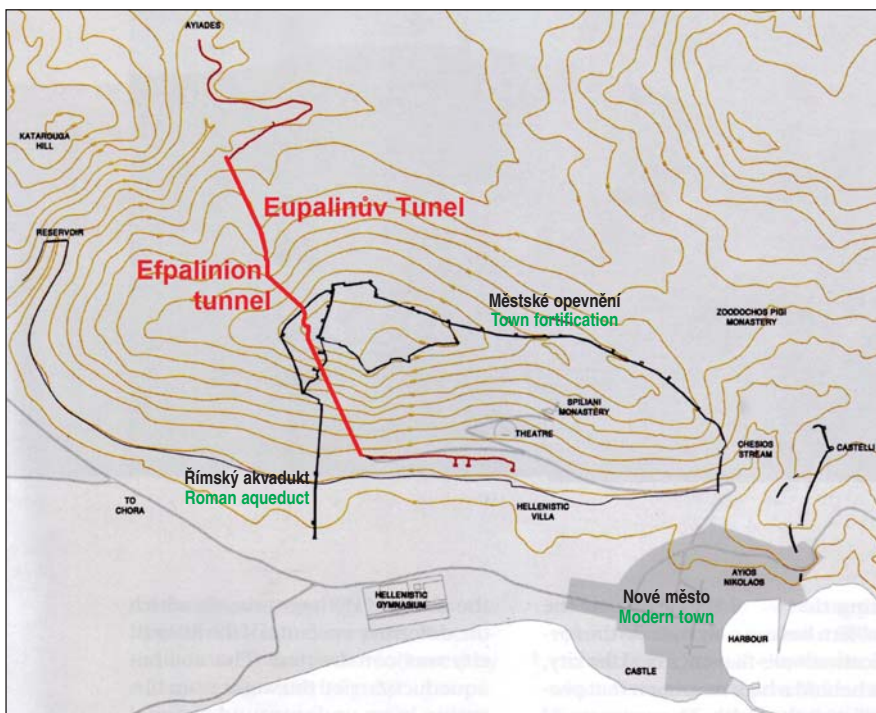
Fig. 1 Map of the island of Samos with the historic capital and Eupalinos aqueduct marked in it [2]

Samos určitou autonomii a v roce 1912 byl začleněn do Řeckého království. Za druhé světové války byl okupován italskými a posléze německými jednotkami. Za významné rodáky jsou považováni Pythagoras, Ezop, Epikuros či Aristarchos a bájně bohyně Héra.

A právě během vlády tyrana Polyrata (* asi r. 573, vládl od r. 538, † asi r. 522 př. Kr.), jinak všestranně pozoruhodné osobnosti s neměně pozoruhodnými osudy (viz např. „Polykratův prsten“), byly uskutečněny tři významné stavby, které pro jejich naprostou mimořádnost zaznamenal i „otec historie“ Hérodotos:

[60] U samoských jsem prodlél déle, protože zbuovali tři díla, která jsou největší v celém Řecku. Skrze kopec, vysoký asi sto padesát sáhů, vykopali zdola tunel s ústím na obou stranách. Délka tunelu je sedm stadií, výška a šířka po osmi stopách. V celé jeho délce je vykopán příkop, hluboký dvacet loket a široký tři stopy, kterým se potrubím vede voda z mocného pramene do města. Stavitelem tunelu byl Naustrofův syn Eupalinos z Megary. To je jedno ze tří děl; druhé je hráz v moři okolo přístavu, postavená v hloubce dvacetí sáhů a dlouhá víc než dvě stadia. Třetí, co vykonali, je stavba největšího chrámu ze všech, které známe. Jeho prvním stavitelem byl domácí člověk, Rhoikos, syn Fileův. Kvůli těmto věcem jsem se u samoských zdržel déle. [1, přeložila Jaroslava Šonková]

Ze současného pohledu, s přihlédnutím k řadě do dneška diskutovaných otázek i vzhledem k osudům tohoto objektu a k jeho současnému poměrně dobrému stavu, je z výše uvedených tří technických zázraků antiky nejzajímavější právě první z nich – Eupalinův tunel/štola (Efpalinio orygmata, Ευπαλίειο ὄρυγμα), který přiváděl vodu do hlavního města Pythagoria (Πυθαγόρειο), až do 60. let 20. stol. pojmenovaného Tigani. A to nejen proto, že se jedná o patrně nejstarší známou inženýrskou liniovou podzemní stavbu v Evropě.



Obr. 2 Přehledná situace Eupalinova akvaduktu. Zřetelné jsou jeho tři části: Prameny v Ayiades s přírodním kanálem na severu, Eupalinův tunel/štola ve středním úseku a kanál přivádějící vodu do města na jihu [2]

Fig. 2 General layout of the aqueduct of Eupalinos. The following three parts of it are distinguishable: Springs in Aiades with the supply canal in the north; the tunnel of Eupalinos in the central section and the canal supplying water to the city in the south [2]

In 1821, the island residents joined the Greek war for independence; nevertheless, Samos remained part of the Ottoman Empire even after its end. In 1835, Samos gained certain autonomy and, in 1912, was incorporated into the Greek kingdom. During World War II it was occupied by Italian and, subsequently, German military units. Considered as important natives are Pythagoras, Aesop, Epicuros or Aristarchos and Hera, a mythological goddess.

It was during the rule of Polycrates, a tyrant of Samos (* around 573, ruling from 538, † around 522 BC), who was otherwise a universally noteworthy figure with not less notable life story (refer, for example, to “The Ring of Polycrates”), that three important structures were carried out, which were even recorded by Herodotus, the ‘Father of History’, for the absolute uniqueness of them.

[60] He spoke about three structures which were greatest in the entire Greece, stating that a tunnel was excavated upwards through an about 150 braces high hill, with the mouths at both sides. The tunnel length was seven stadions, the height and width was eight embraces each. A twenty cubits deep and three feet wide trench was dug throughout the tunnel length. A pipeline running along the trench carried water from a powerful spring to the city. The tunnel was built by Eupalinos of Megara, son of Naustrofos. It was one of the three workings. The second one was an over two stadions long groin erected at the depth of twenty embraces in the sea around the harbour. The third one was the structure of a temple, which was the largest of those known till that time. The first builder of the temple was Rhoikos, son of Philes, a local citizen [1].

From the current point of view, taking into consideration a range of questions which have been discussed till now, and with respect to the history of this structure and its current condition, which is relatively good, the most interesting of the three technical miracles of Antiquity is the first one, the Tunnel of Eupalinos (Efpalinio orygmata, Ευπαλίειο ὄρυγμα), which carried water to Pythagoria (Πυθαγόρειο), the capital, the name of which was Tigani till the 1960s. The fact that it is probably the oldest known linear underground engineering structure in Europe is not the only reason for that.

HISTORY

The history of the origination and the life story of the Tunnel of Eupalinos have been described in technical literature several times (e.g. [2, 3, 4, 5]; in the Czech Republic [6]). The structure was carried out by Eupalinos of Megara in the middle of the 6th century BC for the purpose of supplying water to island’s capital of that time. There were undoubtedly more reasons for developing this system of supplying water to the fortified city (strategic, sanitary and generally civic ones). The fully functional tunnel is mentioned by Herodotus himself, who visited the island around 460 BC.

It is an extremely interesting fact that no mention at all has come down in the other historical sources which originated after Herodotus regarding this astonishing technical work. It is so even despite the fact that the water line had to be used for a very long time (at a guess, at least for 1500 years). The evidence was provided by the later archaeological survey carried out in the 1970s,

HISTORIE

Historie vzniku a osudy Eupalinova tunelu/štoly byly v odborné literatuře již vícekrát popsány (např. [2, 3, 4, 5], v ČR [6]). Pro zásobování tehdejšího hlavního města ostrova vodou byla stavba realizována Eupalinem z Megary v polovině 6. stol. př. Kr. Tento způsob dodávky vody do opevněného města měl nepochybně více důvodů (strategický, hygienický i obecně občanský). Zcela funkční tunel/štola uvádí právě Hérodotos, který navštívil ostrov okolo roku 460 př. Kr.

Je nesmírně zajímavé, že po Herodotovi se v dalších historických pramenech nedochovala již vůbec žádná zmínka o tomto podivuhodném technickém díle. A to i přesto, že vodovod musel být velmi dlouho používán (odhadem nejméně 1500 let). Důkazy nám přináší pozdější archeologický průzkum ze 70. let 20. stol., který datuje významné (římské) úpravy v jižní části tunelu ještě okolo 7. stol. po Kr., když v pozdější době byl zřízen nový římský vodovod ve vrstevnicové pozici v západním a jižním svahu hory Kastro, využívající již dešťovou vodu jímanou do cisterny (obr. 2). Důvod, proč tunel/štola upadl do naprostého zapomenutí po dobu dalšího téměř jeden a půl tisíciletí, spočívá zřejmě ve velmi složitém historickém vývoji Samosu. Časté střídání vládců ostrova bylo standardně doprovázeno hrubými transfery obyvatel. Dalším důvodem mohly být i některé pustošivé přírodní katastrofy (zemětřesení) vedoucí až k opuštění ostrova – viz výše. A s tím i nevyhnutelné vymizení místní historické paměti.

Až v roce 1853 navštívil ostrov francouzský archeolog Victor Guerin, přesvědčený o tom, že by se měly dochovat alespoň zbytky slavného akvaduktu zmiňovaného Herodotem, a přitom našel původní pramen. Zásadní objev však učinil v roce 1882 mnich z kláštera Ayia Triada, se souběžně následujícími pokusy obnovit činnost vodovodu. Ty však nebyly úspěšné. Uvodilo to však předběžný průzkum tunelu, který byl dílem archeologa Ernsta Fabricia z Německého archeologického ústavu. Zveřejněním jeho výsledků v roce 1884 se stal tunel/štola víceméně známým. Poslední a současně i nejpodstatnější archeologický výzkum se zpřístupněním tunelu/štoly

which dates important (Roman) civil works in the southern part of the tunnel to be performed as late as the 7th century AD, whereas a new Roman aqueduct was constructed later, running in the contour line position on the western and southern slopes of Mount Castro. It used storm water collected in a cistern (see Fig. 2). The reason why the tunnel fell into utter oblivion for subsequent one and a half of millennia obviously lies in the very complicated development of Samos. The frequent alteration of the island rulers was accompanied by rough transfers of inhabitants as a standard. Another reason could be devastating natural catastrophes (earthquakes) even resulting in the evacuation of the island – see above. The dying out of the local historical memory is one of the results.

It was as late as 1853 that the island was visited by Victor Guerin, a French archaeologist, who was sure that at least remains of the famous aqueduct, which had been mentioned by Herodotos, should have survived. During his visit, he discovered the original spring. However, a crucial discovery was made by a monk of Aia Triada Monastery in 1882. The discovery was followed by attempts to restore the aqueduct operation. The attempts did not meet with success. They meant the prelude to a preliminary investigation into the tunnel, which was carried out by Ernst Fabricius from the German Archaeological Institute. After the publication of its results in 1884, the tunnel became more or less well known. The last and at the same time the most substantial archaeological research combined with making the tunnel accessible was conducted in the 1970s, again by employees of the German Archaeological Institute [2].

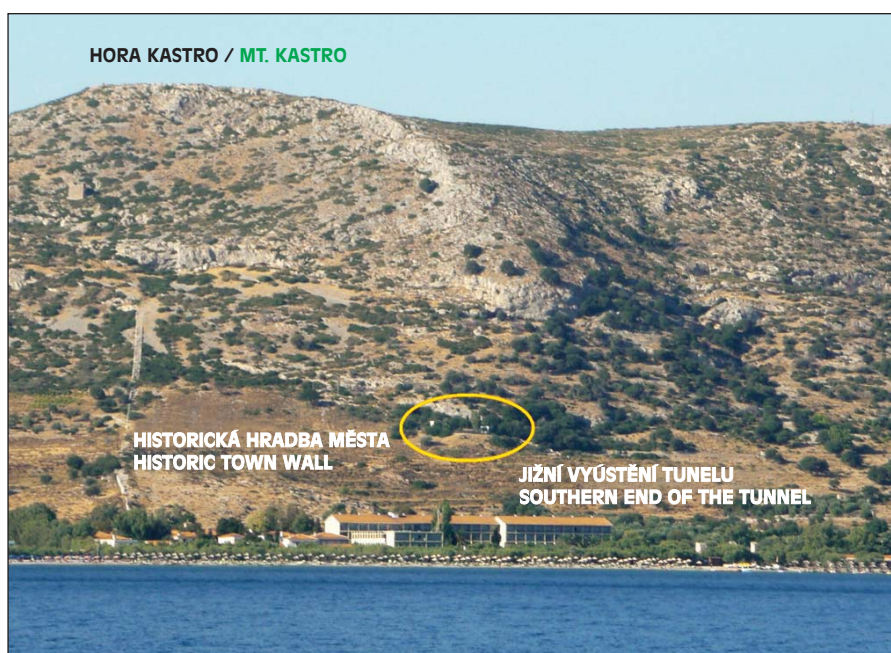
TECHNICAL SOLUTION

Water was collected from prolific springs lying near the village of Agiades (today already abandoned), NW of the top of Mount Castro (237 m a.s.l.) – see Fig. 2. The about 850 m long northern collecting canal runs zig-zag toward the south. It is locally up to 5 m deep. For that reason it was carried out using mining methods, with the excavation proceeding in both directions from access shafts. In the central part of the aqueduct, there is a tunnel (see below), and after the tunnel emerges on the southern side of Mount Castro (see Fig. 3), the water distribution

alignment runs eastward at the length of about 500 m, with over twenty, more or less preserved, access shafts.

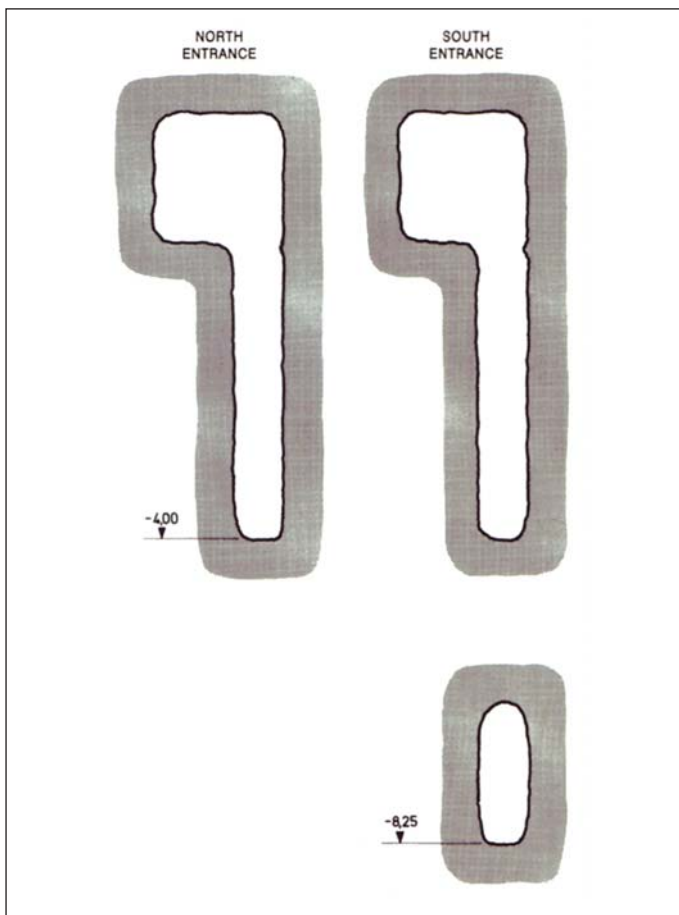
The tunnel itself is 1050 m long (in straight line 1036 m / 4000 ft). The inner dimensions of the main gallery are, in general, 1.80 m x 1.80 m; its width is locally slightly reduced and, on the contrary, enlarged at the point where the counter-headings met. At the eastern wall, there is a ditch in the bottom throughout the tunnel length for the water pipeline, up to depth of 3.5 to 8 m (see Fig. 4). The reason is that the tunnel was built in a very modern way, as a “dry” structure. Water was led through 0.71 to 0.73 m long terracotta pipes with the inner diameter of 0.24 to 0.26 m and 2 to 2.5 cm thick walls. It is estimated that about 4000 pipes were used for the entire water pipeline. The gradient of the pipeline inside the tunnel is about 0.45 % (see Fig. 4). The system was capable of supplying up to 400 m³ of water every day.

The tunnel was driven through the environment formed by competent, partly crystalline, limestone. The sub-horizontal bedding, which can be seen, with the highest



Obr. 3 Jižní vyústění tunelu ve výšce cca 55 m n. m. západně od historického hlavního města Pythagoria

Fig. 3 The southern end of the tunnel at the altitude of about 55 m a.s.l. west of the historic capital, the city of Pythagoria



Obr. 4 Příčný řez tunelem/štolou u severního (vlevo) a jižního (vpravo) vstupu. Patrný je charakteristický profil hlavního (suchého) tunelu a prohloubení jeho počvy pro keramické vodovodní potrubí při východní stěně. Toto prohloubení dosahuje na severním vstupu hl. cca 3,80 m a na jižním výstupu asi 8,50 m. Tím je zaručen spád vody cca 0,45 %. V jižní části tunelu/štoly bylo prohloubení místy prováděno hornickým způsobem paralelní spodní velmi úzkou štolou [2]

Fig. 4 Cross section through the tunnel at the northern portal (left side) and the southern portal (right side). It shows the characteristic profile of the main (dry) tunnel and the deepening of its bottom for the ceramic water pipeline at the eastern wall. This deepening reaches about 3.80 m at the northern end and about 8.50 m at the southern end, securing the gradient of about 0.45 %. In the southern part of the tunnel, the deepening was locally carried out by mining methods, with a parallel, very narrow gallery driven under the bottom [2]

byl proveden v 70. letech 20. stol. opět pracovníky Německého archeologického ústavu [2].

TECHNICKÉ ŘEŠENÍ

Voda byla jímána z vydatných pramenů u (dnes již opuštěné) vesnice Agiades, SZ od vrcholu hory Kastro (237 m n. m.) – obr. 2. Severní sběrný a přírodní kanál dl. cca 850 m je veden klikatě k jihu. Místy je až přes 5 m hluboký a z toho důvodu i provedený hornickým způsobem obousměrnou ražbou z přístupových šachet. Ve střední části vodovodu následuje tunel/štola (viz dále) a po vyústění tunelu/štolky na jižní straně hory Kastro (obr. 3) je rozvod vody trasován v délce cca 500 m východním směrem, s více než dvaceti víceméně dochovanými vstupními šachtami.

Vlastní tunel/štola je dlouhý 1050 m (v přímé linii 1036 m/4000 ft). Vnitřní rozměr hlavní chodby činí generelně cca 1,80x1,80 m, místy je mírně zúžený, v místě setkání protiražeb naopak rozšířený. Při východní stěně je po celé délce výrazné zahlobení počvy rýhou pro vodovod do hl. 3,5 až 8 m (obr. 4). Tunel/štola byl totiž proveden velmi moderně jako „suchý“. Voda byla vedena v terakotových trubkách vnitřního

probability made the disintegration of the rock to an extent easier (see Fig. 5). This work was naturally carried out at the level of the technology existing at that time, i.e. by hand, using (probably iron) chisels and hammers. It is assumed that the excavation was carried out by slaves (first of all prisoners of the war with Lesbos?), in conditions which were, in retrospect, grueling. The work places were illuminated by oil burners (found during the archaeological survey) and no ventilation was probably available. From these points of view, the basic excavated cross section appears to be even grandiose. The duration of the construction work is estimated to be somewhere between 5 to 15 years (most frequently 10 years) – see [2, 4, 5]. Using a very simple calculation (when driving the length of 1050 m long tunnel from both ends), at the estimation of the construction work duration of 5/10/15 years, we arrive at the advance rates of one heading to be approximately 0.3/0.15/0.10 m per day, respectively. Taking into consideration the results of excavation trials using experimental archaeology methods, the longer estimated duration appears rather more probable.

The main tunnel (including the ditch for the water pipeline) has no lining and the condition of the rock is very good even after over 2500 years, at least in the section which was made accessible (see Fig. 5). Access galleries were provided with a lining (see Fig. 9).

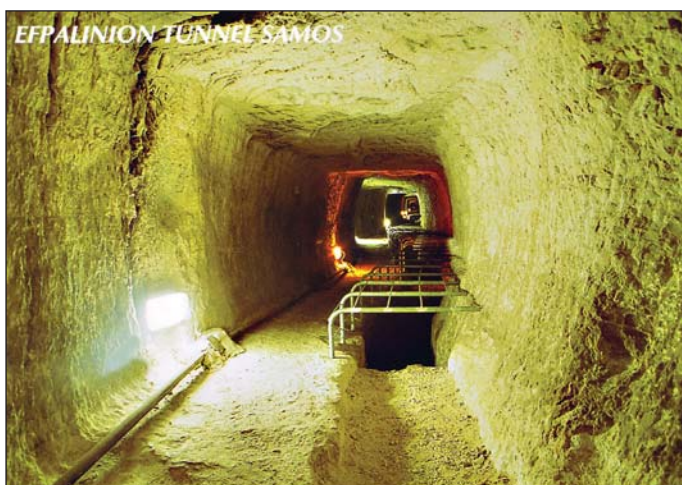
HORIZONTAL AND VERTICAL ALIGNMENT OF THE TUNNEL

The horizontal and vertical alignment design is today considered to be the main demonstration of Eupalinos' engineering mastery. His design is probably (e.g. according to [3]) only the second long underground linear construction where it was clearly established that it was driven concurrently from two opposite portals. The first structure which was referred to in this context is the so-called Ezechias tunnel in Jerusalem (approximately 700 BC). Nevertheless, in contrast with this structure, it is Eupalinos to whom the historic priority is attributed as far as the methodically controlled approach to the application of driving tunnels from both ends is concerned.

HOW WAS THE TUNNEL OF EUPALINOS DESIGNED, SURVEYED AND MANAGED?

H. J. Kienast [2] describes the most likely approach to the solving of the problem, taking into consideration the technical possibilities available in the period during which the tunnel was being built.

The prerequisite for success was first of all thorough knowledge of the region topography. Without it the project would have been difficult to realise. Eupalinos was well acquainted with both the requirements of the city for water supplies and the local terrain and, as a technically qualified professional, he found a solution to the problem. The basic condition for the exploitation of the spring can be formulated in the following way: The location of the spring in relation to the location of the mountain found between the spring and the city requires a closed pipeline to be led either around the mountain or through it. On the one hand, a supply canal around the mountain is easier to realise, however, its significantly greater length and its vulnerability to landslides or enemy diversion is a disadvantage. On the other hand, passing through a mountain is a technically risky deed, in addition requiring a long construction time. Nevertheless, in general, the higher safety and also the fact that the mouth can be placed to a higher-level location and, in addition, directly inside the city boundaries, remains to be the advantage of the route passing through the mountain (paradoxically, the capital of the island was plundered in



Obr. 5 Pohled do tunelu/štoly směrem k severu. Vpravo, u východní stěny, byla rýha vodovodu po zpřístupnění úseku zabezpečena mříží. Patrné jsou subhorizontální vrstevnatost a na stěnách stopy po rozpojování horniny [komerční pohlednice]

Fig. 5 A view north, down the tunnel. On the right side, at the eastern wall, the trench for the water pipeline was secured by a grill after the section had been made accessible. It is possible to see the sub-horizontal bedding and traces after the disintegration of the rock in it [a commercial picture postcard]

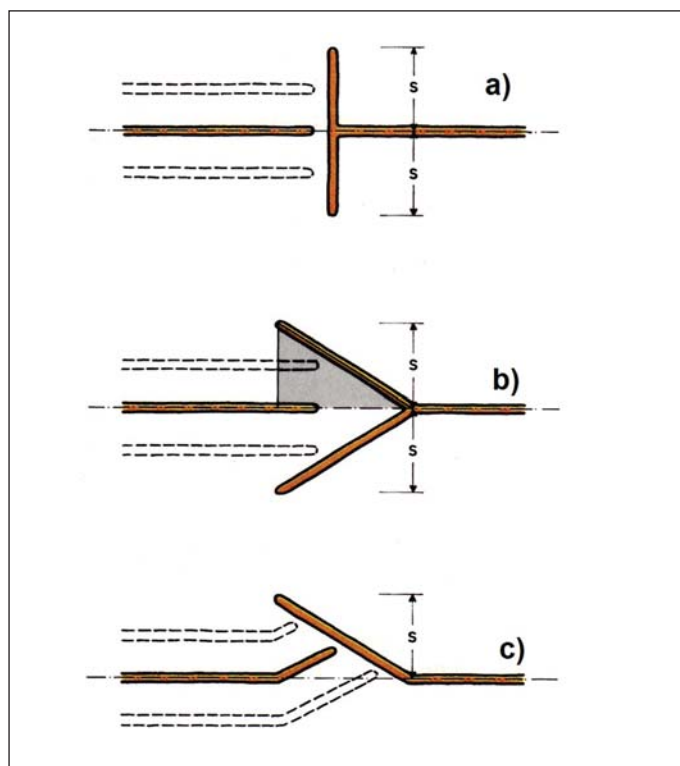
Ø 0,24 až 0,26 m, tloušťky stěny 2 až 2,5 cm a délky 0,71 až 0,73 m; odhaduje se, že na celý vodovod jich bylo použito cca 4000 ks. Spád vodovodu v tunelu činí cca 0,45 % (obr. 4). Systém mohl dodávat městu až 400 m³ vody denně.

Tunel/štola je vyražen v prostředí pevných vápenců, částečně krystalických. Patrná je jejich subhorizontální vrstevnatost, což s nejvyšší pravděpodobností do jisté míry usnadňovalo rozpojování horniny (obr. 5). To se dělo přirozeně na úrovni tehdejší technologie – tzn. ručně (patrně již železnými?) dláty a kladivy. Předpokládá se, že ražbu prováděli otroci (především zajatci z války s ostrovem Lesbos?), z dnešního pohledu za zničujících podmínek. Osvětlení pracovišť bylo olejovými kahanci (nalezenými při archeologickém výzkumu), větrání patrně žádné. Z těchto pohledů se jeví základní průřez ražení až velkorový. Délka stavby je odhadována mezi 5 až 15 lety (nejčastěji cca 10 let) – viz [2, 4, 5]. Velmi jednoduchým počtem (při protiražbě na dvě čelby) vychází potom při dl. tunelu/štoly 1050 m pro odhad trvání stavby 5/10/15 let, denní postup na jednu čelbu cca 0,3/0,15/0,10 m. Přihlédnutím k výsledkům výrubů prováděných metodami experimentální archeologie se pak jeví pravděpodobnější spíše delší odhady trvání stavby.

Hlavní tunel/štola (včetně rýhy pro vodovod) je nevyzděný, přičemž stav horniny i po více než 2500 letech je velmi dobrý – alespoň ve zpřístupněném úseku (obr. 5). Obezdvíčkou jsou opatřeny přístupové chodby (obr. 9).

SMĚROVÉ A VÝŠKOVÉ VEDENÍ TRASY

Dnes je pokládáno za hlavní projev Eupalinova inženýrského mistrovství právě směrové a výškové vedení stavby. Jeho projekt je patrně (např. podle [3]) teprve druhou dlouhou liniovou podzemní stavbou prokazatelně raženou současně ze dvou protějších portálů. První se v této souvislosti udává tzv. Ezechiášův tunel v Jeruzalémě (cca 700 př. Kr.). Nicméně na rozdíl od této stavby je právě Eupalinovi přisuzováno historické prvenství v metodicky řízeném přístupu v použití protiražby.



Obr. 6 Zajištění setkání proti sobě ražených větví ve směrovém vedení
a) Konec jedné z větví je příčně rozšířen do tvaru T

b) Vytvoření dopředu rozeklané čelby ve tvaru Y
c) Neekonomičtější, ale stejně jisté řešení odchýlením konců obou protiražených tunelů/štol

U severní větve doleva a u jižní větve doprava. Eupalinos zvolil právě toto řešení. Ideální místo setkání je v polovině delší odkloněné větve a jistota setkání je stejná jako v případě a) [2]

Fig. 6 Securing that the horizontal alignments of the tunnel sections driven against each other meet

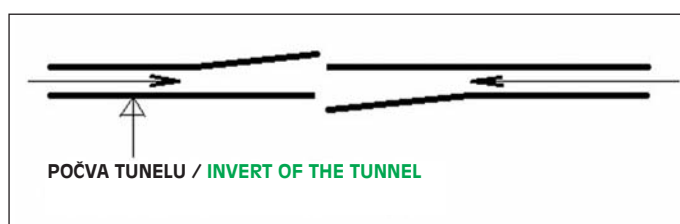
a) The end of one section is transversally widened to form a capital T

b) Creating a Y-shaped heading forking up ahead

c) The most economic but equally certain solution by means of deflecting the ends of both sections driven against each other. At the northern section and southern section, pictured left and right, respectively. Eupalinos chose this solution. The ideal location for the encounter is in the middle of the longer deflected section. The certainty of the encounter is identical with that achieved in the case a) [2]

439 BC by Athenians, who invaded the fortified city just through this tunnel [6]). The client, with the highest probability Polycratos or somebody from his closest surroundings, therefore decided on the basis of the above-mentioned arguments that the passage through Mount Castro would be realised.

The deciding inputs consisted of the following considerations: The location of the spring, the overall topography of the area and methods available for measurements. The initial idea was that the tunnel alignment would be set out on the surface of the mountain and then be transferred to the mountain entrails. Another input was the requirement for the tunnel not to be longer than necessary and not to terminate outside the city fortification. It is known



Obr. 7 Schéma zajištění výškového setkání [2]

Fig. 7 A chart of the system of securing the vertical encountering [2]



Obr. 8 Jižní vstupní portálek nad přístupovou chodbou do tunelu/štol
Fig. 8 The southern little access portal above the access adit to the tunnel

JAK BYL NAVRŽEN, VYTYČEN A ŘÍZEN EUPALINŮV TUNEL/ŠTOLA?

H. J. Kienast [2] popisuje právě nejpravděpodobnější přístup k řešení problému. To proto, že si uvědomuje souvislosti a technické možnosti doby, kdy byl tunel/štola vystavěn.

Předpokladem úspěchu byla především důkladná znalost topografie regionu – bez toho by byl projekt stěží uskutečnitelný. Eupalinos byl dobře obeznámen jak s požadavky města na přivedení vody, tak i s místním terénem. A jako technicky zdatný odborník našel řešení problému. Základní podmínka využití pramene může být formulována následovně: Poloha pramene a poloha hory mezi pramenem a městem vyžaduje uzavřené potrubí vedené buď okolo hory, nebo skrze ni. Přírodní kanál kolem hory lze sice snáze realizovat, ale nevýhodou je jeho výrazně větší délka a dále je zranitelný svahovými pohyby nebo nepřátelskou diverzí. Na druhé straně je průchod horou technicky riskantním počinem, navíc vyžadujícím dlouhý čas. Nicméně výhodou vedení vodovodu horou zůstává obecně bezpečnost (paradoxně však hlavní město ostrova bylo roku 439 př. Kr. vyplněno Athéňany, kteří pronikli do opevněného města právě tímto tunelem/štolou [6]) a dále i skutečnost, že vyústění může vyjít ve vyšší poloze a navíc přímo uvnitř města. Zadavatel – s nejvyšší pravděpodobností Polykrates nebo někdo z jeho nejbližšího okolí – rozhodl tedy na základě uvedených argumentů o realizaci průchodu horou Kastros.

Rozhodující vstupy pak byly následující: Pozice pramene, celková topografie území a dostupné možnosti k provedení měření. Výchozí myšlenkou bylo vytyčení linie tunelu na povrchu hory a pak převedení této linie do jejího nitra. Dále to byl požadavek na to, aby tunel nebyl delší, než je nutné, a nekončil vně opevnění. Linie tunelu přitom neprochází pod strmým vrcholem hory, ale mírně na západ, místy, kde má její hřbet pozvolnější profil. Důvodem byla zkušenost, že čím pravidelnější je povrch, tím přesněji lze přímkou vytyčit. Ačkoli je vrcholový hřbet kritickým

that, instead of running directly under the steep top of the mountain, the tunnel alignment runs slightly west of the mountain top, where the profile of the mountain crest is gentler. The reason was the experience that the more regular the surface the more precisely the line could be set out. Despite the fact that the top crest is the critical point of the entire alignment, the setting out process is likely to start in this location. The reason was that it was necessary to determine the direction of the alignment to lead to the city. Therefore, other authors, e.g. [3, in the CR 6] who refer to Heron of Alexandria, are not right. Their idea that the direction of the tunnel excavation was determined by means of a rectangular traverse must be erroneous because of the fact that in such the case it would have been accompanied by significant accumulation of measurement errors.

It was the setting out of the horizontal alignment of the tunnel on the top of the crest that was the deciding step. The following setting out down from the crest to both sides was only a matter of routine. Another important task was to determine the levels of both ends of the tunnel. There were two methods available for surveying around the mountain. The first of them, the use of a chorobates (a sort of a simple levelling instrument, very roughly described as a long 'bubble tube') is probably more likely because it makes reaching of higher precision possible. The other method lies in the use of T-shaped horizontal boards (= 'boning rods'). The vertical survey was carried out with relatively high accuracy, with the difference between the ends of the entrances of a mere 4 cm. The points can therefore be considered to lie at identical levels. However, this result is probably random. The reason is the fact that it was only possible to transfer levels by means of a chorobates to the distance of approximately 2 km with the accuracy of several decimetres. On the other hand, it was possible to repeat the process several times and the averaged results were therefore more plausible.

The crucial item of the work was therefore performed by determining the direction of the tunnel and the positions and levels of entrances. The initial point and the end point were defined as the points of intersection between a straight line (the tunnel centre line) and the contour line passing through the selected level. Then the horizontal alignment was probably set out on the surface of the mountain, where the tunnel length was determined as a series of horizontal sections measured by a bar. This procedure had crucial importance for the planning of the project as a whole and is beyond doubt.

It was possible from the initial cutting into the mountain to check the direction of the excavation advance by observing a straight line determined by ranging poles erected on the slope. This method is simple and reliable. It was vital for the determination of the correct direction, first of all in the initial stage of the construction, that as high setting out accuracy was reached as possible because an error at the beginning would have propagated further. For that reason a vertical shaft was sunk near the entrance, allowing the installation of another check point for determining the alignment orientation. This point was transferred to the tunnel bottom by means of a plummet. Owing to this measure the setting out became more accurate. It was applied on the southern slope, which is steep and where rods with nails (ranging poles) allowed only a limited length for sighting. Backsighting from the tunnel interior was also applied. It is shown by one place in the tunnel where a directional error occurred and was identified by the backsight from the tunnel. The deviation was removed, but a niche remained in the tunnel wall after the sighting axis had been restored.

místem celé trasy, proces jejího vytyčování pravděpodobně začal právě zde. To proto, aby se stanovil směr trasy tak, aby vedla do města. Nemají tudíž pravdu jiní autoři, např. [3, v ČR 6], odvolávající se na Herona z Alexandrie. Jejich představa, že směr ražby byl určen pomocí pravouhého polygonu, musí být mylná, protože v takovém případě by došlo ke značné kumulaci měřických chyb.

Právě vytyčení směru tunelu na vrcholu hřbetu bylo rozhodujícím krokem. Od hřbetu dolů na obě strany bylo pak vytyčování již rutinní. Další významnou úlohou bylo určení výšek vstupů obou konců tunelu. Pro výšková měření okolo hory byly dostupné dvě metody. První z nich – použití chorobatu (něco jako jednoduchý nivelační přístroj, velmi přibližně „dlouhá vodováha“) je asi pravděpodobnější, poněvadž je možné dosáhnout vyšší přesnosti. Druhá metoda spočívá v použití vodorovných desek ve tvaru T (= „dlaždičských křížů“). Výšková měření byla provedena s relativně vysokou přesností, když konce vstupů se liší jen o 4 cm a mohou tedy být považovány za body ležící v jedné výšce. Pravděpodobně se však jedná o výsledek náhodný. Přenášení výšek pomocí chorobatu mohlo být totiž provedeno na vzdálenost cca 2 km jen s přesností na několik dm, mohlo však také být i několikrát opakováno a zprůměrované výsledky tak byly hodnověrnější. Rozhodující práce byly tedy vykonány určením směru tunelu a určením pozice a výšek vstupů. Počáteční a koncový bod byly definovány jako průsečík přímký (osy tunelu) a vrstevnice procházející zvolenou výškou. Poté byla pravděpodobně trasa vytyčena na povrchu hory, s tím, že délka tunelu se určila jako série vodorovných úseků měřených latí. Tento postup měl zásadní význam pro plánování projektu jako celku a je nepochybný.

Od prvního záłomu do hory bylo možné kontrolovat směr postupu pohledem přes výtyčky postavené na svahu – jde o jednoduchou a spolehlivou metodu. Pro zajištění správnosti směru ražby bylo, zejména v první části stavby, životně důležité dosáhnout co nejvyšší přesnosti vytyčení, poněvadž chyba na začátku by se přenášela dál. Z toho důvodu byla vykopána vertikální šachta v blízkosti vstupu a tak byl získán další kontrolní bod pro orientaci trasy, který byl přenesen provážením olovnicí na počvu tunelu. Tím se vytyčení směru přímký stalo přesnější. Bylo to použito na jižním svahu, který je strmý a kde latě s hřebíky (výtyčky) dovolovaly jen omezenou délku záměry. Zaměřování trasy probíhalo i zpětně záměrou z tunelu. Svědčí o tom jedno místo tunelu/štoly, kde došlo k chybě ve směru, která byla zjištěna právě pohledem z tunelu. Odchylna byla opravena, ale pro obnovení záměrné přímký vznikla nika ve stěně tunelu/štoly.

Tunel/štola měl projít horou ve vodorovné trase a ta byla, bez ohledu na drobné odchylny, také stále dodržována. Mělo to tu výhodu, že kdyby byla nafárána vodonosná puklina či poloha, nebyl by problém s odtokem vody. V případě k městu se svažující nivelety by v jižní části takové problémy nenastaly, ale v severní větvi by mohla voda zaplavit čelbu a nedovolila by tak pokračování ražby. Právě proto tedy vedl Eupalidos trasu ve vodorovném směru. A také musel řešit problém s přítokem vody již 200 m od severního vstupu, když se ražba přiblížila právě k vodonosné vrstvě. Po nastalém přítoku se zde počva mírně zvedá tak, aby voda mohla vytékat z tunelu. Posléze, v místě již za překonanou zvodnělou vrstvou, se počva opět snižuje na původní projektovanou výšku.

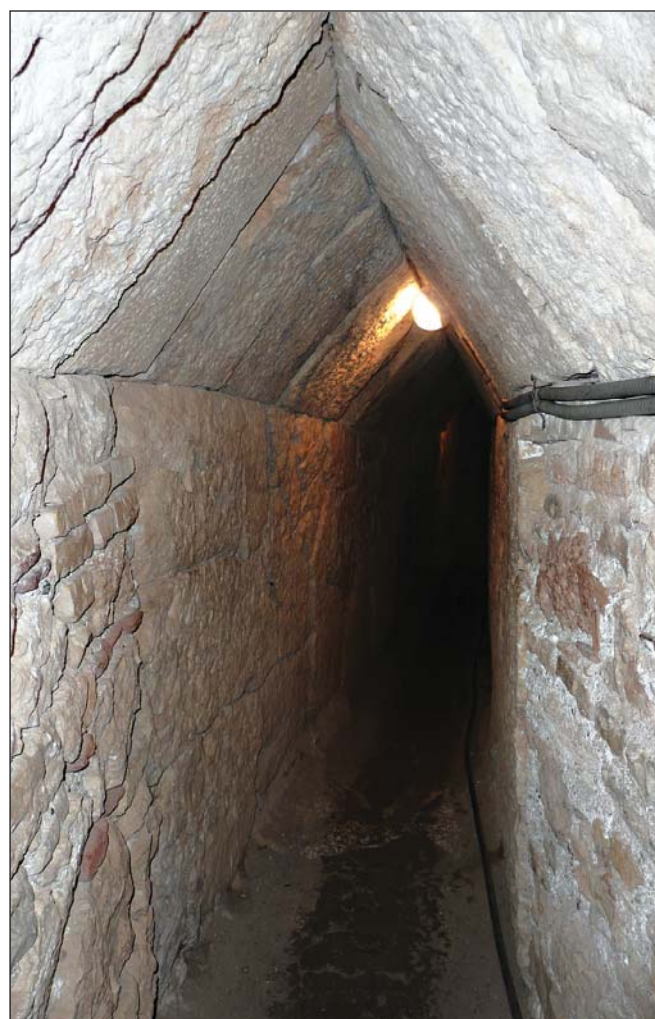
Z pohledu trasování tunelu/štoly je velmi působivá i skutečnost, že ač původní přímký směr severní větve nemohl být kvůli velmi rozpukané a méně stabilní hornině dodržen (a trasa se zde proto stáčí na západ), je po překonání tohoto kritického místa tunel/štola opět narovnaná do dřívějšího směru (je to patrné na obr. 2).

Vytyčení směrů a změřená délka negarantovaly, že se oba protisměrně ražené úseky tunelu/štoly potkají. Nemohly být totiž vyloučeny drobné nepřesnosti v měřeních vyplývající z dobové úrovně techniky. I relativně malá odchylna ve směru v hodnotě 1° představuje uprostřed tunelu/štoly příčnou odchylnu 9 m! Z toho

The tunnel was designed to pass through the mountain along a horizontal alignment. This alignment was, without respect to minor deviations, continually maintained. It had the advantage that, if a water-bearing fissure or layer had been tapped, there was no problem with the water discharge. Such problems would not have been encountered in the southern part in the case of the alignment descending toward the city, but the heading could have been inundated in the northern section and prevented the continuation of the excavation. This was the reason why Eupalidos designed the alignment to be horizontal. And really, he had to deal with the problem of a water inflow as early as 200 m from the northern entrance, where the excavation approached a water-bearing layer. After the inflow appeared, the tunnel bottom slightly ascended so that water could flow out of the tunnel. Subsequently, in the place where the water-bearing layer was overcome, the bottom again dropped to the original design level.

As far as the tunnel alignment is concerned, even the fact is very impressive that, even though it was impossible to maintain the original straight direction of the northern section because of significantly fractured and less stable rock (the alignment therefore turns west in this location), the tunnel was again straightened to the original direction when the critical place had been overcome (this is obvious from Fig. 2).

The setting out of directions and the measured length did not guarantee that the two sections of the tunnel driven in opposite directions would have met. The reason is that it was



Obr. 9 Jižní přístupová chodba do tunelu/štoly s charakteristickým archaickým profilem, vyznačujícím se střechovitým stropem z kamenných desek
Fig. 9 Southern access adit to the tunnel with a typical archaic profile, which is characterised by a roof-shaped ceiling formed by stone slabs

vyplývala potřeba učinit taková opatření, která by zajistila setkání obou proti sobě ražených částí. Eupalinos uvažoval několik řešení. Nejjednodušší by bylo zakončení jedné části tunelu/štoly ražbou kolmou ke směru trasy tunelu/štoly ve tvaru písmene T. Toto řešení je však nevýhodné v tom, že rozrážky musí být provedeny na obě strany. Výhodnější postup, již s menší vynaloženou prací, spočívá ve vychýlení směru ražby u obou částí tunelu/štoly. A právě toto řešení zvolil Eupalinos – obr. 6. Pravděpodobnost setkání obou proti sobě ražených částí i ve vertikále (niveletě) zajistil obdobným rozšířením chodby v počtvě a ve stropu chodby ve směru svíslém – obr. 7. Obě opatření jsou také dokumentována archeologickým průzkumem. Je velmi zajímavé, že postup použitý pro setkání obou větví ve směru vertikálním byl zbytečný – nebyla zde totiž zastížena prakticky žádná odchylka! Určitou roli v závěrečných krocích setkání severní a jižní větve mohly sehrát i akustické signály z protějších čeleb – poklepy.

ZÁVĚR

Eupalinův tunel/štola na ostrově Samos je mimořádně zajímavou historickou podzemní stavbou. Byla proto i roku 1992 zapsána do seznamu Světového dědictví organizace UNESCO. Staří stavby, její osudy a jen postupně odkrývané otázky jejího vzniku zaujaly řadu badatelů, inženýrů, umělců (viz např. Paul Valéry – Dialogy se Sokratem, Eupalinem a dalšími... [5], dále [7]) i „obyčejných“ smrtelníků. Objekt je dnes i pro občany ČR relativně velmi dobře dostupný. Zpřístupněn je úsek dlouhý cca 100 m z jižního vchodu nad městem Pythagorionem (obr. 8, 9). Vstupné činí velmi přijatelná 4 €.

Poznámka: V textu článku používají autoři označení stavby Eupalinův tunel/štola především s ohledem na platné české názvosloví, které předpokládá, že podzemní stavba do příčného průřezu 16 m² se nazývá štola a většího příčného průřezu tunel. Současně se tak snaží zohlednit i to, že v anglické a německé literatuře se tato stavba důsledně označuje jako tunel.

DOC. ING. VLASTIMIL HANZL, CSc.,
hanzl.v@fce.vutbr.cz, Ústav geodézie FAST VUT,
DOC. ING. VLADISLAV HORÁK, CSc.,
horak.vl@fce.vutbr.cz,
Ústav geotechniky FAST VUT, Brno

Recenzoval: Ing. Pavel Šourek

Poděkování: Článek vznikl s finanční pomocí EU „OP Výzkum a vývoj pro inovace“, projekt reg. č. CZ.1.05/2.1.00/03.0097, v rámci činnosti regionálního centra AdMaS „Pokročilá stavební materiálu, konstrukce a technologie“.

not possible to exclude petty inaccuracies in measurements following from the technical level of equipment of the period. Even a relatively small deviation from the direction at the value of 1 degree represents a transverse deviation of 9 m in the middle of the tunnel length! It followed from this fact that such measures had to be adopted which would have ensured that the two parts driven against each other met. Eupalinos speculated about several solutions. The simplest one would have been terminating one part of the tunnel by a drift perpendicular to the direction of the tunnel alignment, forming a letter T. But this solution was disadvantageous because the drift had to be carried out to both sides. A more advantageous solution, where the amount of work expended was smaller, lied in the deflecting of the directions of the excavation on both parts of the tunnel. And this is exactly the solution which was adopted by Eupalinos (see Fig. 6). He increased the probability that the two parts driven against each other would have met even vertically by a similar vertical enlargement of the tunnel at the bottom and the crown (see Fig. 7). Both measures have been documented by an archaeological survey. It is very interesting that the procedure applied with the aim of securing the meeting of both sections in the vertical direction was unnecessary because virtually no deviation was encountered! Certain role during the final steps of the process of the meeting of the northern section and the southern section could be even played by acoustic signals sent from the opposite headings – by knocking on the excavation face.

CONCLUSION

The tunnel of Eupalinos on the island of Samos is an extremely interesting historical underground structure. For that reason it was inscribed on the UNESCO World Heritage List of cultural and natural properties. The age of this structure, its life story and the only step-by-step revealed issues of its origination fascinated many researchers, engineers, artists (for example Paul Valéry – Dialogues with Socrates, Eupalinos and others... [5], further [7]) as well as „ordinary” mortals. The structure is today relatively very well accessible even for citizens of the Czech Republic. The section made accessible is about 100 m long, from the southern entrance above the city of Pythagorion (see Figures 8, 9). The entrance fee of 4 € is very reasonable.

DOC. ING. VLASTIMIL HANZL, CSc.,
hanzl.v@fce.vutbr.cz, Ústav geodézie FAST VUT,
DOC. ING. VLADISLAV HORÁK, CSc.,
horak.vl@fce.vutbr.cz,
Ústav geotechniky FAST VUT, Brno

Acknowledgements: The article was processed under financial support of the Research Funds CZ.1.05/2.1.00/03.0097 (AdMaS).

LITERATURA / REFERENCES

- [1] HÉRODOTOS. *Dějiny, Kniha třetí [60]*. Praha: Academia, 2003, s. 188–189. ISBN 80-200-1192-7. Přeložila Jaroslava Šonková.
- [2] KIENAST, H. J. *The Aqueduct of Eupalinos on Samos*. Athens: Ministry of Culture – Archeological Receipts Fund, 2005. ISBN 960-214-424-6.
- [3] APOSTOL, T. M. The Tunnel of Samos. *Engineering & Science*, 2004, No. 1, s. 30–40. <<http://calteches.library.caltech.edu/4106/1/Samos.pdf>>.
- [4] HUGHES, D., KELLER, H. J. *The Tunnel of Eupalinos*. Wikipedie, otevřená encyklopedie. <<http://homepages.cwi.nl/~aeb/math/samos/>>.
- [5] LAHANAS, M. *Der Tunnel von Eupalinos*. Wikipedie, otevřená encyklopedie. <<http://www.mlhanas.de/Greeks/Eupalinos.htm>>.
- [6] HÁNEK, P. Tunely, štoly a vytyčování – 2. díl. *Zeměměřič*, 2007, 3, s. 4–7. <<http://klobouk.fsv.cvut.cz/~hanek/K154/PDF/Tunely02.pdf>>.
- [7] BEICHE, H. Der Tunnel im Spiegel der Kultur: Ein Streifzug des Tunnelbauers durch die Welt der Literatur und Künste. In *Tunnel – Räume für zukunftssichere Mobilität*, s. 31–37, STUVA-Tagung 2009 in Hamburg. BauBV GmbH, Gütersloh. ISBN 978-3-7625-3636-9.