

## Tunely, štoly a vytyčování – 2. díl

### Eupalinův tunel a jeho měřické zajištění

Za nejstarší dochovaný tunel na našem kontinentu je považován (turisticky přístupný) Eupalinův tunel na ostrově Samos ze 6. stol. př.n.l. Za tyrana Polykrata (573 – 522) patřil Samos (486 km<sup>2</sup>), ležící v Egejském mo-

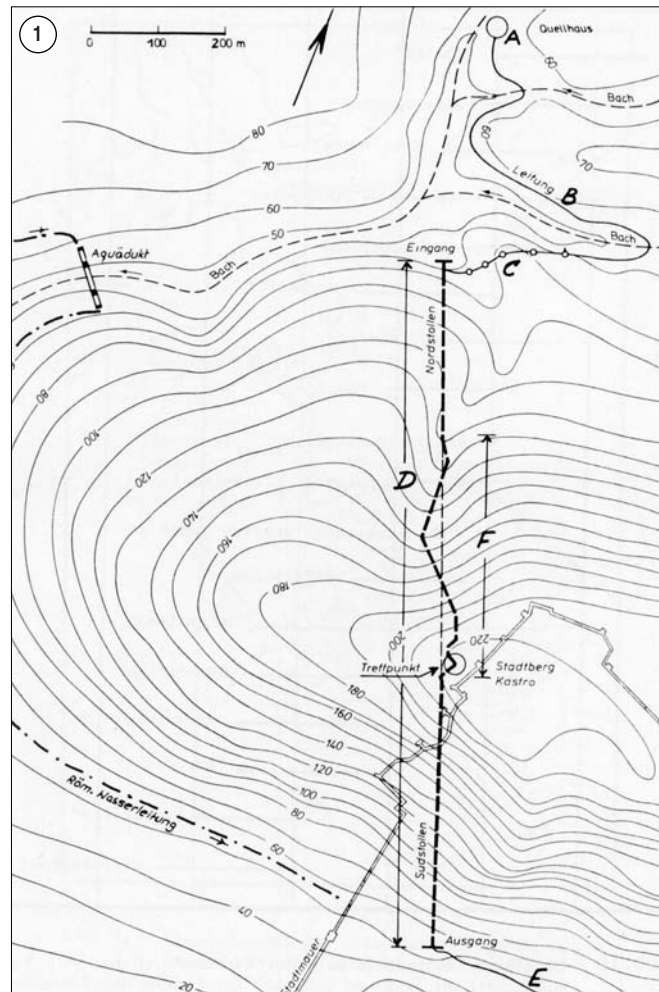
ři u břehů Malé Asie, díky silnému loďstvu k významným řeckým státům a procházel obdobím hmotnosti a kulturního rozmachu. Uměnímilovný vládce zahájil rozsáhlou výstavbu, z níž se dosud připomíná palác, Héřin chrám a městské hradby. (Město se nyní jmenuje po svém nejslavnějším rodákovi Pythagorion;

Pythagoras, asi 580 – 500.) Pro zásobování vodou tehdy asi dvacetitisícového města nechal Polykrates postavit strategicky a občanský významný vodovod.

Voda je nejen základní podmínkou existence člověka a rozvoje jeho společenství, ale v estetických i praktických aplikacích též významnou součástí životního stylu, v antice vysoce ceněnou. Paláce s koupelnami s vanou nebo bazénem (a kanalizací) byly stavěny už v 16. stol. př.n.l. na Krétě i v řeckém pevninském Týrinsu. Ve 4. stol. př.n.l. byly lázně součástí gymnásí, určených pro výchovu mládeže, městskými správami nebo soukromníky byly zřizovány veřejné lázně. Stavba vodovodu na Samu tedy reagovala na požadavky a úroveň své doby.

Polykratův vodovod zaujal známého historika Hérodota (asi 484 – 430) natolik, že jej popsal v III. knize svých devítidílných *Historiés apodexis*. Velkolepá stavba byla udržována ještě za vlády Říma, kdy byl také zbudován nový vodovod, západně od kopce Kastro (*obr. 1, [1]*). Později upadla v zapomnění, znovu objevena byla až roku 1882 archeologem E. Fabriciem. V letech 1971 – 1975 provedl důkladný průzkum, jehož součástí bylo podrobné geodetické zaměření, athénský Německý archeologický ústav (DAI).

První část Polykratova vodovodu začíná v Agidaes jímáním pramene v kamenném domku v nadmořské výšce zhruba 55 m. (*V obr. 1 označeno A.*) Pokračuje 690 m dlouhým, většinou otevřeným příkopem (*B*) s průměrným spádem 0,05 %. Navazuje 150 m dlouhý úsek (*C*), s ohledem na



terén budovaný hornickým způsobem ze šachet vzdálených 30 – 50 m, hlubokých až 15 m. Potom se trasa téměř pravouhře láme do příčné osy tunelu (*D*) a na jeho konci se již za městskými hradbami opět pravouhře odklání. V tomto úseku (*E*), budovaném hornicky obdobně jako část (*C*), bylo restaurováno asi 500 m s 21 svislými šachtami (*obr. 2*).

Podstatnou částí stavby je protičelbou ražený tunel (*D*), podcházející pod vápencovým vrchem Kastro s městskými hradbami v největší hloubce zhruba 162 m. Významně zkracoval délku trasy vodovodu a současně zajišťoval lepší ochranu a případnou obranu. (Paradoxně bylo město roku 439 př.n.l. vyplněno Atéňany, kteří pronikli právě tímto tunelem.) Práce na něm řídil Eupalinos z Megary. V literatuře se objevuje domněnka, že trasa původně měla vrch obcházet a teprve při výstavbě došlo ke změně projektu. Mohla být vyvolána právě příchodem Eupalinovým, který byl (podle Hérodota jako jediný) schopen uskutečnit vytyčení a výstavbu náročného podzemního díla. Tunel délky 1,03 km s profilem v průměru 1,8 x 1,8 m však sloužil »jen« jako prostor pro výstavbu a provozní údržbu rýhy vlastního vodního přivaděče. Dno rýhy šíře 0,6 m se spádem 0,4 % je cca 3,5 – 8 m pod počvou (dnem) tunelu. V nehlubších místech byla



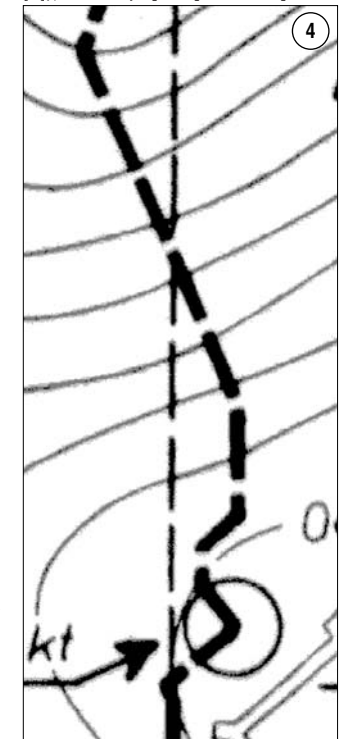
dokonce rýha ražena pro úsporu práce hornicky, tedy jako druhá štola, místy je zakryta deskami (*obr. 3*). Studium možnosti vytyčení tunelu se intenzivně zabýval už Héřon Alexandrijský zvaný Méchanikos (1. stol. n.l.), autor fundamentální práce o geometrii a geodézii *Peri dioptrás*.

Tunel byl prokazatelně ražen protičelbou z portálů jako vodorovný – převýšení počvy portálů v nadmořské výšce 55,8 m je dnes pouhých 0,04 m, styk obou větví je však v prorážce asi o 0,6 m níž. Přitom 25 m před prorážkou se náhle severní větev zvedla asi o 1 m, takže počva musela být dodatečně dorovnána, ovšem ve stropě je patrný nadvýlom. Nelze vyloučit, že se vědomě jednalo o metodu řízení prorážky.

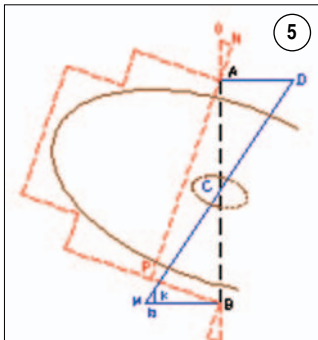
Zahloubení rýhy vodovodu 3,5 – 8 m pod počvu tunelu považují odborníci za důsledek zkrácení délky úmyslně »zvednutého« tunelu oproti jeho rovnoběžnému vedení na východ od stávající osy v úrovni dna vlastního vodovodního přivaděče. Se zkrácením délky osy až o 140 m (14 %) bylo současně dosaženo dostatečného spádu toku a zjednodušení výstavby. Za nepravděpodobnou je považována domněnka o chybě řádově +3 m při výškovém měření. Tento názor potvrzuje i stavební situace na jižním konci tunelu s výtokem.

Severní (vtoková) větev je asi o 200 m delší nežli větev jižní,

kteřá však procházela obtížnějšími geologickými podmínkami. Nelze však vyloučit ani to, že Eupalinos stavbu převzal až po vyražení zmíněných 200 m původně ze severu jednostranně raženého díla. Pro zajištění prorážky mohlo být po dosažení patřičné délky obou větví (délkové značky jsou dosud zachovány) použito několika metod. První bylo ražení kolmých vlevo a vpravo odbočujících štol, druhou šikmý horizontální odklon jedné nebo obou větví a konečně třetí »vlnitě« vedení jedné z větví. Svou roli v tom mohl hrát i odposlech klepání z protější větve. Moderní měření, dokládající změnu směru jižní větve asi 35 m před prorážkou (*viz obr. 4, [1]*), dovoluje předpokládat pou-







žití druhé a v závěrečné fázi i třetí varianty. Polohová odchylka dosáhla hodnoty cca 3,5 m.

Směrové vytyčení osy tunelu (*A-B ve schematicém obr. 5*) mohlo být provedeno přímo přes vrch Kastro úlohou postupného zařazení bodu *C* do přímky, která je dodnes obsažena v učebnicích elementární stavební geodézie.

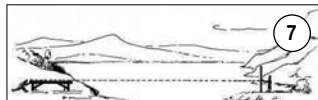
Je možné, že body byly za bezvětrí signalizovány sloupcem kouře z otevřeného ohně. Koncové body zpravidla nebyly přesně definovány. Délka osy mohla být po tomto vytyčení odvozena přímým měřením latěmi, urovnávanými na stojanech do vodorovné polohy např. pomocí olovnic nebo krokvic. Jinou možností bylo trigonometrické určení délky osy, v *obr. 5* kreslené modře. Při existenci bodu *C* mohly být v koncových bodech *A, B* vytyčeny kolmice *AD* a *BM* vhodné délky. Délka obou úseků osy tunelu *AB* byla vypočtena z podobnosti pravoúhlých trojúhelníků po změření hodnot *b, k*. ( $BC:k = BM:b$ , obdobně *AC*). Hérón Alexandrijský nabídl možnost pravoúhle se lomícího polygonového pořadu, vetknutého s ohledem na terén mezi dané portálové body (*obr. 5*, červená kresba). Strany polygonu při tomto nepřímém vytyčení definují pravoúhlý trojú-

helník *ABP*, kterému odpovídají shodné trojúhelníky (např. *AON*), vytyčené v konstantním zmenšením délek v portálových bodech. (Platí  $AB:AO = BP:NO$ , s možnou kontrolou obdobným postupem na portálovém bodě *B*.) Tím byly určeny i úhly zarážky, tedy směr ražby. Pro vytyčování pravých úhlů byl v době stavby tunelu k dispozici vytyčovací kříž či Římany oblíbená groma (*obr. 6*) nebo snad už jako novinka dioptr-



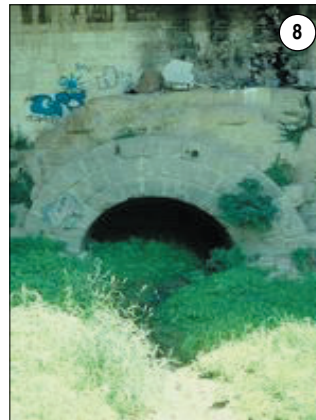
ra. Protože Hérón považoval gromu za příliš hrubou (úhel ramen archeology nalezené kovové gromy z vojenského tábora Vetoniensis u bavorského Waltingu se lišil od pravého úhlu až o 2°), lze předpokládat, že přesnost řecké dioptry byla vyšší, zejména pro takto významnou stavbu.

Pro výšková měření se pro překonávání terénních stupňů používaly svahoměrné latě na svislých opěrách s dělením, horizontované olovnicí. Pravděpodobně je též použitý tzv. Hérónovy vodováhy (horizontální trubice s vodou ve tvaru U se svislými skleněnými válci, s průzory nastavenými do úrovně hladin, ustálených na principu spojených nádob, s lať se svisle posuvnými cílovými kruhovými barevně vodorovně dělenými terči) pro obousměrnou geometrickou nivelaci. (V české literatuře byla tato lať uváděna jako běžná pomůcka ještě koncem 19. století.) Nelze vyloučit ani podobný



rozměrnější římský chorobates (*obr. 7* – břevno s průzory, urovnávané do vodorovné polohy na stojanech podélným žlábkem naplněným vodou), podle názoru některých historiků též dioptry, případně jejich předchůdce. Výškové měření mohlo probíhat přibližně nad osou tunelu nebo naopak kopec Kastro obcházet prakticky po vrstevnici. V úvahu přichází též trigonometrické měření výšek, založené na podobnosti trojúhelníků, zejména v případě, že byl určen bod (*C*) nad osou tunelu na vrcholu kopce. Četné stavby, zejména římské akvadukty, dodnes dokládají vysokou přesnost těchto pomůcek a postupů.

Císařský Řím s asi 1 miliónem obyvatel zásobovalo 19 aquaduktů s denní kapacitou 0,7 – 1 mil. m<sup>3</sup>. Nejstarší Aqua Appia pochází z roku 312 př.n.l. Napájely 1200 kašen, 11 císařských a 900 veřejných lázní. (Pro srovnání: Praha s 1,2 milióny obyvatel vykázala v roce 2004 denní spotřebu 0,37 mil. m<sup>3</sup> pitné vody.) Připomeňme určitý protipól. Dosud existující *cloaca maxima*, podzemní páteř římské kanalizace, podle tradice vznikala už v 6. stol. př.n.l. za etruského krále Tarquinia Priscia původně k odvodnění bažin mezi pahorky. V 2. stol. př.n.l. byly četné úseky vyzděny, zaklenuty (profil až 2x 4 m) a zakryty (*obr. 8*, ústí do Tibery). Okolo roku 80 byla ražena asi 6 km dlouhá štola, odvádějící povodňové vody z údolí Fučinského jezera. V provinciích Říma se dochovalo 93 vodovodů. Jejich celková dél-

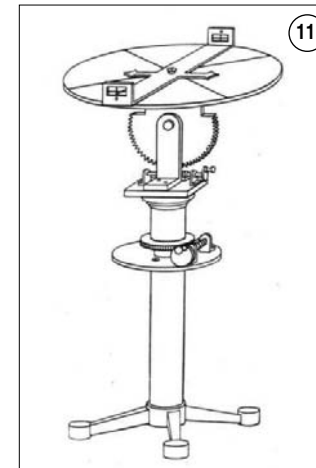
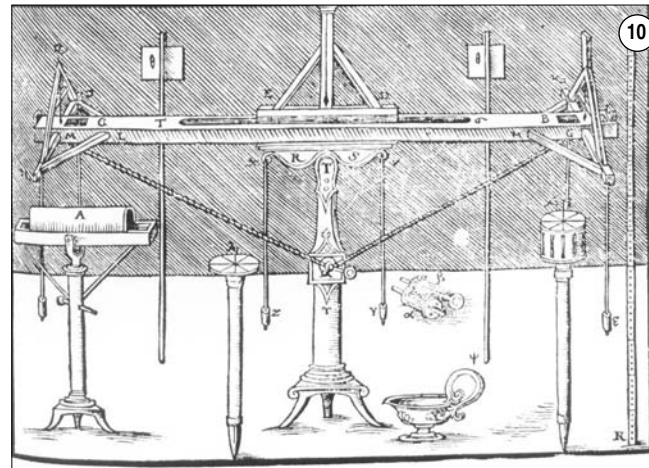


ka je zhruba 400 km, z toho 2,5 km bylo vedeno v tunelech a 64 km bylo podpíráno soustavou arkád na pilířích. Na *obr. 9* je snímek aquaduktu z Caesarie, zmíněného už v 1. dílu. (Foto P. Veselý.)

Antické přístroje a pomůcky patřily k základnímu měřickému instrumentáriu přes celou dobu



středověké stagnace až do novověku, jak dokládá i reprodukce na *obr. 10*, převzatá z německé publikace ze 16. století. Jsou na ní zobrazeny upravený chorobates s laťemi a pomůcky pro vytyčování úhlů stálé velikosti. Na *obr. 11* je přiblížena soudobá rekonstrukce dioptry. K nim se postupem doby přidaly i přístroje a postupy, dato-



vané do éry arabské moudrosti. Jednou z prvních knih, shrnující výsledky obou civilizací v oboru měřictví, je *Geometria*. Jejím autorem je Gerbert d'Aurillac (935 – 1003), klerik, vědec, diplomat a politik, který se roku 999 stal papežem a přijal jméno Silvestr II. Kniha po četných opisech tiskem poprvé vyšla roku 1721.

(Há)

Text byl zpracován s podporou výzkumného záměru MSM 6840770001 Spolehlivost stavebních konstrukcí.

#### Literatura:

- [1] PETERS, K.: Wie hat der griechische Baumeister Eupalinos vor 2500 Jahren den Wasserleitungstunnel auf der Insel Samos vermessen, geplant und abgesteckt? In: Ingenieurvermessung von der Antike bis zur Neuzeit. 3. Symposium zur Vermessungs-Geschichte in Dortmund. Stuttgart, Verlag Wittwer 1987, s. 27 – 56.
- [2] HÁNEK, P.: Z historie tunelů. Sborník anotací a CD sborník přednášek 12. konference SDMG. Hustopeče, 2005.
- [3] Encyklopedie antiky. Praha, Academia 1973.
- [4] HÁNEK, P.: Gerbert z Aurillacu. GaKO 49 (91), 2003, č. 2, s. 35-37.
- [5] Internetové encyklopedie a stránky.