

VODOHOSPODÁŘSKÁ DÍLA V RAŽBĚ, HISTORIE A SOUČASNOST

Jan Řehoř¹

Abstract

One of the very important types of structure that had played a significant role in the history and since then have been widely used up to present are *hydraulic tunnels*. Through the history of mankind the design and construction of hydraulic tunnels has been an indicator of high engineering, economical and organizational level of expertise acquired by advanced civilizations. The first section of the article (Historical section) points out the importance of hydraulic tunnels in the past. The Semiramis Tunnel, Eupalinos Tunnel and New York City Water Tunnel No.3 are just three examples of achievements in hydraulic engineering. Each of them is characteristic for the era when it was designed and constructed and belongs to the most unique structures of that time. The second part of the article deals with current methodology in conventional tunneling, primarily the most frequently constructed tunnels in the present – sewer main collectors for sewage disposal systems.

Úvod

Vodohospodářské tunely (štoly) patří k významným stavbám, odrážejícím vzdělanostní, hospodářskou a organizační úroveň vyspělých civilizací minulosti i současnosti. Níže uvedený příspěvek je rozdělen na historickou část, kde jsou uvedena významná vodohospodářská díla v ražbě od dávných dob až po současnost. Každé z vybraných děl charakterizuje dobu ve které bylo stavěno a patří ve svém období k unikátním stavbám. Druhá část se věnuje současné technologii používané při budování ražených vodohospodářských děl, zejména se zaměřením na nejčastěji realizované stavby - stavby kanalizací běžných rozměrů.

Z historie vodohospodářských tunelů

Za pravděpodobně nejstarší tunel vůbec je považován nedochovaný **Semiramidin tunel** z 9. stol. př.n.l. Byl dlouhý 900 m s profilem 4 x 5m a překonával řeku, o což se lidé pokusili až za dalších dlouhých 2700 let. Nacházel se v Babylonu, v dnešním Iráku asi 88 km od Bagdádu. Spojoval královský palác s Jupiterovým chrámem a jeho stavbu iniciovala technicky nadaná Babyloňanka Semiramis – královna Asyrská. Byl stavěn po dočasném přeložení toku řeky Eufrat v období sucha (do doby dešťů musela být stavba hotova), v otevřeném výkopu z cihel spojovaných asfaltem. Tunel byl stavěn tisíci otroky z Egypta, Lybie a Ethiopie, aby stavbu v krátkém čase stihly. Podle zlomků zpráv byl profil uzavřen (tehdy unikátní) klenbou. Dnes považujeme klenbu za docela obyčejnou konstrukci, ale nebylo tomu tak vždy. Klenba je tajemství východu a byla dobře střežena, nedostala se ani do Egypta ani do Starého Řecka. Římané se klenby zmocnili násilně ve 4. století př.n.l. a roznegli ji po celé Evropě a zobecněla až v rámci staveb vodovodů a kanalizací.

¹ Ing. Jan Řehoř, KO-KA s.r.o., Thákurova 7, Praha 6 160 00, tel. 224 355 459, e-mail: rehor@ko-ka.cz

Eupalinův tunel (687 př.n.l., obr.1) je dalším významným dílem své doby. Byl postaven antickým inženýrem na řeckém ostrově Samos pod horou Kastro. Tunel sloužil k dopravě vody (vydatné prameny) do města Tigani, dnešní Pythagorion (20 000 obyvatel), které nemělo v létě žádné srážky. Stavěn byl ze dvou stran jako vodorovný, cca 10 let, v křemičitých vápencích otroky z ostrova Lesbos, při stavbě zemřelo mnoho lidí. Významně zkracoval délku trasy vodovodu a současně měl zajišťovat 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 schopen uskutečnit vytyčení a výstavbu náročného podzemního díla. Dno rýhy do které se ukládalo vodovodní potrubí je 3,5 m až 8 m pod počvou tunelu. Směrová chyba ve vytyčení při setkání skupin byla pouhých 60 cm a to přesto, že se museli odklonit od vytyčené trasy z důvodu nestabilních geologických podmínek. Sklon tunelu se pohybuje v rozmezí 5-10 ‰. Tunel byl ve funkci 1000 let do roku 300 našeho letopočtu a pak upadl v zapomnění. Znovu objeven byl v roce 1882 a nyní je zpřístupněn pro turisty. Vystrojení tunelu tvořila převážně pouze vlastní horninová klenba, voda byla vedena v hliněných trubkách DN 250 mm uložených do příkopu podél tunelu a produkovali cca 400 m³ za den.



- ⇒ **délka 1030 m**
- ⇒ **hloubka 162 m**
- ⇒ **sklon 5-10 ‰**
- ⇒ **profil 1,8 x 1,8m**

Obr. 1 – Eupalinův tunel

Císařský Řím – asi 1 mil. obyvatel zásobovalo 19 aquaduktů s denní kapacitou 0,7 – 1,0 mil m³ vody. Pro srovnání současná potřeba vody srovnatelného města z hlediska počtu obyvatel – Prahy je 0,5 mil m³ vody za den což je cca 1/2 potřeby vody Říma v tehdejší době. Napájely 1200 kašen a 900 veřejných lázní. Součástí bylo i 2500 m tunelů pro dopravu vody. Římští „Barbaři“ v rámci dobytí Etruské říše získaly technickou myšlenku klenby, kterou Etruskové přinesly do Evropy z Asie. Římané trik vylepšili, objevili cement a umění monolitického klenutého zdiva bylo římským stavitelům známé jako nám. Lhostejnost však zůstávala co se týče mechanického pokroku v budování tunelů. Nač vynalézat dynamit či samohyb když mám otroka. Od pádu římské říše nastal úpadek pro tunelové stavby. Každý žil pouze pro malý zájmový okruh. Starší obdivuhodné stavby byly zapomenuty a 1000 let nebylo také nic podniknuto v oboru tunelářského umění. Vznikaly pouze chodby sloužící k úniku z různých pevností, dobývání rud apod.

Z historie vodního tunelářství nelze vynechat **Rudolfovu štolu z 16. století** pod pražskou Letnou, která byla vystavena za účelem gravitačního napájení rybníků v nedaleké Stromovce.

New York City Water Tunnel No. 3

Největší inženýrský projekt v historii New York City. Slouží a bude sloužit pro zásobování vodou. Plánování tunelu začalo v roce 1950, kdy bylo zjištěno že třetí tunel bude nezbytný

z důvodu redukce závislosti na existujících tunelech (no.1, no.2), které bude třeba opravovat a udržovat.

První fáze výstavby byla zprovozněna v roce 1998, začíná v Hillview Reservoir a vede přes Central Park, 5. Avenue, podchází East river a končí v Queens. Na trase jsou čtyři unikátní podzemní armaturní komory, které umožňují napojení na stávající distribuční systém a zároveň připojení dalších fází výstavby.

Druhá fáze výstavby se skládá z Brooklyn - Queens sekce, tunel bude propojen s Richmond Tunel, který zásobuje Staten Island. Manhattan část začíná v Central parku napojením na armaturní komoru a prochází celý Manhattan, v současné době jsou tunely vyraženy, pracuje se na zásobovacích šachtách. Zprovozněn by měl být v roce 2012.

Třetí fáze zahrnuje spojení Hill reservoir s Queen sekcí a **čtvrtá fáze** propojuje dvě vodní nádrže Kensico reservoir a Hillview reservoir.

Ražené tunely byly zpočátku budovány klasickými metodami, od druhé fáze byl nasazen tunelovací štít. Průměry tunelů jsou až 7,3 m a tvoří je železobetonová konstrukce.



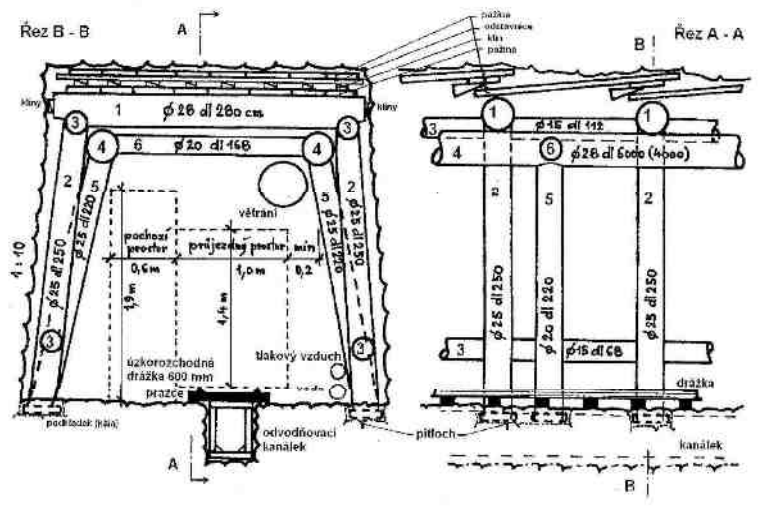
- ⇒ délka 97 km
- ⇒ hloubka 76-240 m pod povrchem
- ⇒ cena cca 6 miliard \$ (cca1 mil. Kč/m)
- ⇒ průměr tunelu až 7,3 m
- ⇒ 14 armaturních komor
- ⇒ objem stavby cca 75 přivaděčů Želivka
- ⇒ potřeba vody města 5 000 000 m³/den

Obr. 2 – New York City Tunnel No.3

Současné technologie klasické ražby pro vodohospodářská díla

Tunelářské metody historie byly primitivní, lidé pracovali ručně, dláty, kladivy, skála se rozpalovala ohněm a zchlazovala proudy studené vody, aby popraskala. Chodby vylámané ve skalách se nevyzdívaly a kdyby chtěli skalní stropy podzemních chodeb vyzdít nevěděli jak, neznali klenby. Postupně došlo k využívání dřeva k dočasnému zajištění tunelu nebo štoly při stavbě. Základní **výdřeva štoly** je zřejmá z obrázku č.3. Skládá se z podvojnů, stojek, které tvoří celek zvaný Veřej. Veřeje jsou v podélném směru rozpírány rozpěrami. V případě

potřeby je možno doplnit zajištění Podvlaky. Spoje jednotlivých částí se provádí tesařsky nebo v kombinaci s ocelovým skobami – kramlemi. Ražba ve dřevě zažívá vzhledem k vysokým cenám železa renesanci a firmy, které mají pracovníky znalé práce se dřevem občas vyžadují změny projektů ražby z oceli na dřevo. Často se používá v havarijních podmínkách. Předností ražby ve dřevě je rychlá instalace (díky snadné úpravě dřevěných prvků podle konkrétních podmínek) a kvalitní aktivace (utažení) pomocí dřevěných klínů a varovné projevy při přetížení. Nevýhodou zvětšení plochy výrubu vzhledem k větší tloušťce výztužných prvků v porovnání s ocelí.



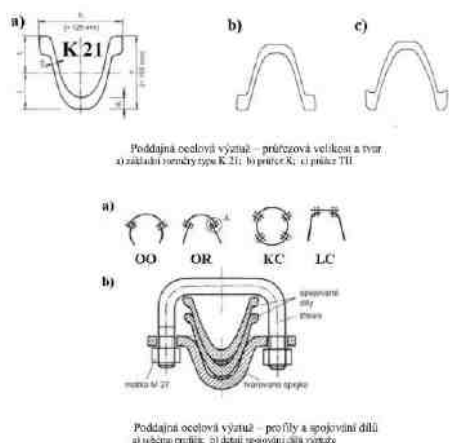
Výdřeva štoly s podvlaky

1 – podvoj, 2 – stojky podvoje, 3 – rozpěry veřejí, 4 – podvlaky, 5 – stojky podvlaků, 6 – rozpěry podvlaků

Obr. 3 – Dřevěná výdřeva štoly

Ocelová výtuž je v současnosti nejrozšířenějším typem provizorní žebrové výtuže. Protože jde o žebrové prvky, je plošné zajištění (zapažení) stropu provedeno buď pažinami, které jsou k líci výrubu aktivovány dřevěnými klíny, nebo je nejčastěji výrub mezi žebry zajišťován stříkaným betonem. V kombinaci s ocelovými žebry se používají plechové pažiny, nejčastěji typu Union. Žebra mohou být provedena z ocelových prvků různého příčného průřezu a používají se především poddajné profily typu TH. Pro těžní šachty je možno v případě větších rozměrů použít tužší výtuž z válcovaných profilů I, U.

Poddajná ocelová výtuž typu TH (Touissant – Heitzmann) nebo typu K (korýtková výtuž) jsou principiálně stejné, liší se jen malými odchylkami příčného řezu. Ten má v zásadě tvar korýtky a válcuje se v několika váhových typech, které se liší svou únosností. Výtuž tohoto typu je v příčném profilu dělená na několik částí, které se spojují na překryvnou délku min 40 cm pomocí dvojice třmenů se šrouby. Tření, které vznikne mezi jednotlivými spojovanými díly při dotažení třmenových šroubů, umožňuje při nebezpečném přetížení výtuže proklouznutí dílů ve spoji, čímž dojde ke snížení tlaku na výtuž. Výtuž se proto neporuší a zůstává nadále funkční.



Obr. 4 – Poddajná ocelová výztuž **obr. 5 – Štola s použitím poddajné výztuže**

Pražský rám je dalším typem ocelové výztuže, který má tvar ploché oceli tvořené nohami a vrchní obloukovou částí. Spoje jsou provedeny jako tuhé šrouby a únosnost tohoto rámu je menší než korýtkové výztuže. Použití tohoto rámu je nevhodné v případě nesymetrických geologických podmínek kdy je rám zatěžován asymetricky a může dojít k jeho zborcení. Jeho tvar byl a je stále hojně využíván pro vejčité stoky pro které jsou jeho velikostní řady přizpůsobeny. Stavební firmy ho často preferují vzhledem k menší ceně než u korýtkové výztuže.

Ražba v obtížných podmínkách



Ražba v obtížných geologických podmínkách je vždy výzvou jak pro dodavatele, tak pro projektanta zejména z hlediska bezpečnosti provedení stavby a neohrožení okolních objektů. Důležité je provádět v rámci stavby geotechnický monitoring – sledování jak stavba působí na své okolí a naopak. V rámci sledování se provádí gedoetická měření na povrchu a v ražbě doplněná konevergenčním měřením ve štole. Konvergenčním měřením se rozumí trojice pevných bodů umístěných obvykle v příčném řezu na ocelových rámech, lepší je umístění přímo do horniny pokud to situace dovolí. Měří se vzájemná vzdálenost bodů což singalizuje deformaci příčného řezu a výšková poloha těchto bodů, která odhalí případné „boření“ celého profilu ražby. Příkladem takových podmínek je ražba na kanalizačním sběrači Čakovice kde ražba probíhala ve zvodnělých jílovitých břidlicích. Vlivem rozbřednutí počvy ražby docházelo k zabořování celého tunelu. Zpevnění zajistilo až rychlé vybetonování podlahy a znovu položení kolejového systému pro dopravu materiálu.

Obr. 6 – Ražba v zvodnělých jílovitých břidlicích

Tvary a způsoby zajištění těžních šachet

Nedílnou součástí tunelu jsou přístupové body – těžní šachty. Aby mohl být tunel vyražen je třeba umístit těžních šachtu, zvolit její tvar, velikost, způsob vyztužení. Volbu tvaru šachty ovlivňuje.

- definitivní konstrukce, která bude do šachty umístěna
- statická únosnost
- prostorová omezení v okolí stavby

Obvykle je rozhodujícím hlediskem pro volbu tvaru těžní šachty tvar definitivní konstrukce. U hlubších děl se může situace obrátit a definitivní dílo je dobré navrhovat s vědomím statických problémů při zajištění šachty. V tomto případě je vhodné využít kruhového tvaru šachty, který je staticky nejvýhodnější a může tím být ušetřeno mnoho finančních prostředků a problémů spojených s jiným tvarem šachty (obr.7,8). Obvyklý tvar šachty obdélníkový je obvykle vyztužen korýtkovou výztuží, v případě statických problémů se doplňuje stříkaným betonem s ocelovou sítí. U větších obdélníkových šachet je nutno přejít na ocelové profily I, které jsou však těžké a hůře se s nimi manipuluje. Vzhledem k vysokým cenám železa stejně jako u ražeb dochází k požadavkům dodavatelů používat jako zajišťovací materiál dřevo.



Obr. 7 – Kruhový kanalizační vstup (hloubka 15m)



Obr.8 – Model šachty

Uložení definitivního díla do ražby

Vlastním uložením definitivního díla do ražby vrcholí vlastní práce budování vodohospodářského díla hornickým způsobem. V našem případě se jedná o potrubí různých materiálů či zděné stoky. Potrubí v ražbě je obvykle v celém průřezu zabetonováno. V okolí potrubí se používá zafoukávání betonem, v horní části kde již není možné zafoukávat dochází k zalití popílkobetonem. Při obetonování působí na potrubí velké vztlakové síly, proto je důležité provést dostatečné zajištění potrubí proti vztlaku. Při nesprávném zajištění může dojít

buď k lokálnímu poškození potrubí nebo k výškovým rozsazením potrubí působením vztlakových sil.

V případě zděných stok postupujeme při práci od spoda, používáme obvykle čedičové žlábkové s bočnicemi nebo čedičové radiálky (obloukové segmenty), které se ukládají do betonu. V případě radiálek je vhodné provést uložení střídavě bez průběžné podélné spáry a zpracovat ve spolupráci s výrobcem kladečský plán. Žlab je možné do určitého poloměru použít i v oblouku. U oblouku s malým poloměrem je třeba řešit kónické seřiznutí žlabů, které je vhodné vzhledem k tvrdosti materiálu provést u výrobce a ne na stavbě. Na ně navazují kanalizační cihly, obetonované až do úrovně osy stoky. Následuje osazení dřevěného ramenátu a vyzdění klenby stoky, která může být z jedné nebo dvou řad cihel. Druhou řadu je možné nahradit ocelovou sítí. Horní vrchlík nad zdivem se zalévá popílkobetonem. Důkladné vylití volných prostor je důležité z hlediska aktivace vložené konstrukce s okolní horninou. Jakékoliv volné prostory jsou zdrojem budoucích problémů při krátkodobých událostech v případě natlakování stoky. S touto chybou se často setkáváme, za ostěním stoky jsou kaverny způsobené již při výstavbě a stokový systém v těchto místech je často narušen. Následují drahé injektážní práce.



Obr.9 – Uložení žlábků z čedičových radiálek



Obr.10 – Vyzdění boků stoky



Obr.11 – Osazení ramenátu



Obr.12 – Zdění horního pasu stoky

Závěr

Z hlediska historie byly v příspěvku zmíněny stavby, které ve své době byly naprosto jedinečné a i tehdejší obyvatelé je považovaly za nejlepší technická díla své doby. Historická díla fascinují svým rozsahem, kterého bylo dosaženo nezměrným úsilím lidí, často však na úkor bezpečnosti. Rozměr tunelů a štol (plošný výrub) byl často mnohem větší ve vztahu ke skutečně využitě ploše při dopravě vody. Důvodem byla zejména technologie provádění, která nebyla kromě bezpečnosti ani ekonomická. Dnešní štoly využívají maximálně plochu výrubu pro dopravu vody, splašků a při jejich stavbě je prvořadá bezpečnost pracovníků. Obvyklým technickým rozhraním pro rozhodnutí budovat tunel a ne hloubený výkop bývá uváděna hloubka stoky 6 m. Dnešní společnost vyžaduje stavbu štol i v místech kde by dříve lidé vůbec nepovažovali za nutné stavět tunel. Výjimkou nejsou tunely stavěné s minimální krytím 2 m (hloubka stoky cca 4,5m) z důvodu křížení s inženýrskými sítěmi, kolize s veřejnou zelení, souběhu s intenzivní dopravou. Naopak dnešní technika dovoluje hloubit výkopy v místech kde nejsou kolize s jinými zájmy až do hloubky 7,5 m. Problémem však v těchto případech je bezpečný pohyb pracovníků v těchto hloubkách, často nedochází ke kvalitnímu pažení výkopu. Na závěr uvádím tabulku orientačních cen k porovnání budování kanalizace DN 500 mm v ražbě či v hloubeném výkopu pro jednotnou hloubku 6m. Obě varianty byly zpracovány pro různé geologické poměry na vzorovém úseku 50 m s dvěma šachtami. Výpočet vychází ze směrných cen ÚRS. V případě hloubeného výkopu se počítá s opravou komunikace v celé délce výkopu, v případě ražby pouze v místě těžních šachet. Z tabulky vyplývá výrazná cenová odlišnost obou technologií při stejné hloubce uložení potrubí.

TECHNOLOGIE	GEOLOGIE	OPRAVA KOMUNIKACE	KČ/m	procentuální porovnání ceny
RÝHA	TŘ.3-4 snadno rozpjitelné (hlína)	V CELÉ DÉLCE RÝHY	24 270	27%
RÝHA	TŘ.6 - nesnadno trhatelné (rula)	V CELÉ DÉLCE RÝHY	36 180	40%
RAŽBA	I.stupeň ražnosti, soudržné rozpukané	V MÍSTĚ ŠACHTY	89 870	92%
RAŽBA	II. stupeň ražnosti, málo soudržné, tlačivé	V MÍSTĚ ŠACHTY	97 400	100%

tab. 1 – cenové porovnání technologie ražby a hloubeného výkopu kanalizace DN 500 mm

Literatura

1. Dr Ing. Jiří Streit: Tunely všech dob a zemědílů, nakladatelství Synek (1946)
2. prof. Ing. Jiří Barták, DrSc., doc. Ing. Miloš Bucek, DrSc.: Podzemní stavby, Praha 6, skripta (1989)
3. Doc. Ing. Pavel Hánek: Z historie tunelů, sborník anotací přednášek 12. konference SDMRG, Hustopeče, 2005, soubor 11
4. Internetové stránky encyklopedie