

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava
Fakulta stavební
Katedra geotechniky a podzemního stavitelství



**PROJEKTOVÁNÍ PODZEMNÍCH STAVEB
(224-0261)**

STUDIJNÍ OPORY PRO KOMBINOVANOU FORMU STUDIA

MAGISTERSKÉHO PROGRAMU:
STAVEBNÍ INŽENÝRSTVÍ - GEOTECHNIKA A PODZEMNÍ
STAVITELSTVÍ

GARANT PŘEDMĚTU: DOC. ING. KAREL VOJTASÍK, CSC.

Anotace

Podzemní stavby jsou výsledkem mnohostranných společenských vztahů, jednání a tvůrčí činnosti mnoha odborníků z řady oblastí. Proces výstavby zahajuje investorský záměr dílo vybudovat a studie proveditelnosti, po kterých následují schvalovací procesy, řešením střetů zájmů, výběr zhotovitelů na průzkum prostředí, zpracování projektu a provedení díla. Po té následují realizační fáze výstavby. Příprava staveniště, napojení staveniště na inženýrské sítě a dopravní infrastrukturu, výstavba podzemních objektů projektovanými metodami a technologiemi. Souběžně s realizací podzemních objektů probíhá kontrolní činnost investora, projektanta, zhotovitele a báňského úřadu. Do realizace významně zasahují objektivní přírodní podmínky, v jejichž důsledku je nutno provádět změny, které musí být sváleny všemi zúčastněnými stranami. Proces výstavby ukončuje dokumentace skutečného provedení. Obsahem předmětu projektování podzemních děl jsou témata podávající informace a poznatky k etapám výstavby podzemního díla od investorského záměru až po zpracování etapy dokumentace skutečného provedení díla. Předmět uzavírá téma BIM, které syntetizuje dílčí témata do interaktivního komplexního modelu výstavby díla.

Témata přednášek:

1. Úvod
2. Přípravné procesy
3. Zadávací procesy
4. Návrh a zpracování projektu podzemní stavby
5. Příprava a zpracování geotechnické dokumentace prostředí
6. Návrh metod realizace a zpracování realizační dokumentace
7. Příprava staveniště
8. Realizace stavby, řízení výstavby observační metodou a kontrolní procesy výstavby
9. Řešení mimořádných událostí na stavbě, jejich dopadů a z nich plynoucích střetů zájmů
10. Dokončení a předání stavby, dokumentace skutečného provedení stavby
11. Podmínky využívání stavby a její údržba
12. Likvidace

Historie podzemních staveb

- 540 až 523 př.n.l. vodovodní štola na řeckém ostrově Samos d. 984, ražba pomocí klínu a kladiv
- 41 – 52 n. l. vodovodní štola délky 653 m z Fucinského jezera v Itálii, Římané používaly ohňovou techniku
- Středověk úpadek tunelářství, stavby sklepů a chodeb hradů a klášterů
- **GEORGIUS AGRICOLA** (1494 – 1555)
- základní díla popisující metody
- hornictví a hutnictví (De re metallica, 1546) a základní systematiku minerálů (De natura fossilium, 1550).
- Nejznámější je ale dvanáctisvazková encyklopedie **De re metallica libri XII** (Dvanáct knih o hornictví a hutnictví - vydáno posmrtně v Basileji 1556), ilustrovaná dřevorytinami.
- 1581 – 1593 Rudolfova štola dl. 109,3 m
- ½ 17. Stol. Používání střelného prachu
- 30. Léta 19. Stol. Rozvoj tunelování s výstavbou železnic – tzv. Alpské tunely
- 1813 první použití vrtací techniky
- 1889 použití betonu v tunelech

- Druhá ½ 19. stol. Výstavba podzemních drah
- 20. stol. rozvoj výstavby silničních tunelů
- Druhá ½ 20. stol. rozvoj spec. podzemních staveb – podzemní hydrocentrály, sportovní haly, úložiště radioaktivních odpadů

Nejznámější železniční tunely

- *Simplon I.* (Itálie – Francie) 19 825 m., 1912 – 1921, kamenné zdivo
- *Simplon II.* 19 803 m, 1895 – 1906, kamenné zdivo
- *Seikan* 53 850 m, 1964 – 1988, ŽLB ostění, ostrovy Hokkaido, Honšu, Kjušu, Šikoku
- *Channel* 49 340 m, 1987 – 1993, ŽLB ostění, Francie Anglie
- Gotthard bázový tunel, 57 km, 2 tubusy, max. rychlost 250km/h

Nejznámější silniční tunely

- *Mont Blanc* 12 650 m, 1965, Francie Itálie
- *St. Gotthard* 16 300m, 1980, Švýcarsko
- Tauernské tunely 1975, Rakousko
- Laerdal , 2005 Norsko (25 km)

Podzemní dráhy

- 1863 Londýn
- 1878 Glasgow, Budapešť
- 1895 Boston
- 1898 Paříž, Berlín
- 1935 Moskva
- 1904 New York (největší)
- 9.5.1974 Praha – linka C

Příklady speciálních podzemních staveb ve světě

- *Gjovik* Norsko, podzemní hokejová hala pro 5100 diváků, 1991 – 1993, v. 20 m, d- 90 m, š. 60 m

Rozdělení podzemních staveb

Dle dispozičního řešení – **Liniové stavby:**

- Štoly
- tunely
- galerie
- kolektory
- Jámy
- Šachty, šachtice a komíny

- plošné stavby:

- Haly
- Kaverny

Liniové (převládá délka)

- **Štoly** (<16 m²)
- **Tunely** (≥ 16 m²)

Dle sklonu:

- Ležaté, vodorovné** (max. 10° od horizontály)
- Úklonové, úpadní** (10° až 60° od horizontály)
- Svislé**
- Šikmé, úklonné** (60° až 90° od horizontály)

Zvláštní: **komíny, šibíky** – v podzemním stavitelství řídké

Galerie = „polotunel“, ochranná konstrukce (nejčastěji komunikace) v úsecích ohrožených sesuvy zemin, skalním řícením, sněhovými lavinami, obvykle v úbočních odřezech

Plošné (převládají vodorovné rozměry nad výškou): podzemní garáže, skladiště, úložiště, sportoviště

Halové (velká půdorysná plocha i výška, příčný profil > 200 m² a delší než nejmenší rozměr příčného profilu)

Kaverny: VE a PVE, hangáry, podzemní energetické zásobníky, úložiště, vojenské objekty...

Rozdělení podzemních staveb

Dle účelu

1, Dopravní štoly a tunely

- železniční
- silniční
- pro pěší
- podzemní městské dráhy
- průplavní a plavební

2, Liniové podzemní stavby vodohospodářské

- vodovodní přivaděče
- kanalizační sběrače, kmenové a jiné stoky
- přívodní, obtokové a odpadní tunely
- šachty tlakové, vyrovnávací, aj.

3, Liniové podzemní stavby energetické

- telekomunikační
- kabelové
- parovody, horkovody,
- teplovody
- kolektory pro společné vedení inženýrských sítí určitých druhů

4, Halové a plošné podzemní stavby

- Hydrocentrály vyrovnávací komory, komory kulových a jiných uzávěrů, energetické zásobníky na ropu, zemní plyn, apod.
- skladiště, garáže, výroby, plošné podchody
- objekty zdravotní techniky (nádrže, vodojemy, čistící stanice)
- objekty záštitných staveb (správní, skladištní a ochranné)

Dle způsobu výstavby:

- a) **Ražené:** klasické metody ražení pomocí TP, nebo pomocí razících mechanismů. Celá výstavba probíhá v podzemí, bez narušení nadloží. Obvykle ve větší hloubce.
- b) **Hloubené:** v otevřené jámě, svahované či pažené, posléze zasypané. Obvykle v malé hloubce, otevřená stavební jáma.
- c) **Kombinované:** kombinace ražení obvykle pod ochranou klenbou budovanou hloubením ze stavební jámy. Výstavba systémem „želva“.
- d) **Zasypávané:** zvýšení původního terénu
- e) **Speciální:** výstavba ve složitých podmínkách. Spouštěné kesony, naplavované a vysouvané konstrukce, vrubované tunely, ražení štíty či s přetlakem vzduchu, zmrazování apod.
- f) **Protlačované:** v zeminách, v malé hloubce. Konstrukce je sestavována ve startovací jámě a celá tlačnou stolicí posouvána vpřed, obvykle s odtěžováním zeminy v čelbě. Protlačují se obvykle malé, nejvýše střední profily od 0,6m do 2,0m.
- g) **Mikrotunelované:** speciálními soupravami a postupy ražené, vrtané či protlačované, velmi malých až malých \varnothing (do 800 [2.000] mm)

Dle vedení trasy díla:

- a) V přímém směru
- b) V oblouku
- c) Ve spirále
- d) Vrcholové
- e) Patní

Dle překážky:

- a) Podzemní stavby horské
- b) Podzemní stavby podvodní
- c) Podzemní stavby městské
- d) Podzemní stavby ekologické (ochrana území)

Inženýrsko-geologický průzkum

Činnost pro získání komplexní informace o geologicko-technických podmínkách v místě (prostoru) do něhož je nutno umístit PS. Tato informace musí umožnit seriózní návrh, hospodárnou a bezpečnou realizaci a v neposledním bezproblémový provoz PS.

Etapy IG průzkumu:

- a) Předběžný
- b) Podrobný
- c) Doplnkový
- d) Provozní

Etapy přípravy stavby (navazující na IG průzkum)

- a) dokumentace pro územní řízení
- b) dokumentace pro stavební povolení
- c) dokumentace pro výběrové řízení
- d) dokumentace realizační
- e) závěrečná zpráva

Klasické tunelovací metody vytvářely profil malými záběry s okamžitým zajištěním (= výstrojí); byly dosti universální – mohly se přizpůsobit i nečekaným změnám prostředí. Nekladly zvláštní požadavky na průzkum (ten probíhal prakticky současně s ražbou). Postačujícími údaji byla obvykle **rozpojitelnost** a **tlačivost** horniny.

Moderní tunelovací metody vyžadují dokonalejší GT průzkum. Bývají totiž vysoce účinné často pouze v určitém typu horninového prostředí. Průzkum proto musí klasifikovat prostředí **po celé trase** a posléze z toho volit technologii výstavby. Platí to především pro postupy **nedostatečně universální** (např. TBM či štítování). Za dostatečně universální je dnes považována NATM

Hlavní úkoly průzkumu

- **Vyřešení IG poměrů v území** - skladba vrstev v trase, širším okolí, v celé výšce nadloží; linie báze kvartéru; stupeň a dosah větrání masívu; intenzita rozpukání – směr, sklon a stav diskontinuit; ověření a přesná lokalizace mocnějších tektonických („poruchových“) pásem
- **Ověření fyzikálních, mechanických a technologických vlastností** horniny i masívu; jejich zatřídění a klasifikace. (Zvláštní význam má bobtnání)
- **HG posouzení území** – h.p.v. a její(ich) kolísání; směr a rychlost proudění p.v.; propustnost pokryvů a puklinových systémů v masívu; tlak vody ap. (Voda přitéká do díla; zatěžuje ostění; snižuje stabilitu horniny; komplikuje technologii. PS drénuje prostředí = „ukradení“ p.v. => nutnost zmapovat celé povodí)

Posouzení korozní situace:

Agresivní účinky na betonové, železobetonové a kovové konstrukce a vlastní horninu:

- Od horninového prostředí
- Od vod (vody neagresivní a agresivní, korozní dopad mají nicméně obě)
- Od plynů
- Od cizích proudových polí – „bludné“ proudy

Včetně základního návrhu ochrany

Agresivita podzemní vody

- **Útočnost** neboli **agresivita** je jednou z nejdůležitějších vlastností podzemní vody s ohledem na stavební činnost. Může být **síranová, uhličitá** nebo se může jednat o vodu **hladovou**. Rovněž **pH** ovlivňuje agresivitu vody.
- **Síranovou agresivitu** mohou způsobovat různé minerály obsažené v horninách. Patří k nim zejména sírany (sádrovec $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, anhydrit CaSO_4) nebo sulfidy (pyrit FeS_2 , pyrhotin FeS). Síranová agresivita se velmi často vyskytuje v neogenních slínech celé střední Moravy.
- **Uhličitá agresivita** vzniká rozkladem organogenní příměsi v aluviálních sedimentech a dále je častá v oblastech vývěru pramenů minerálních vod, bohatých na CO_2 .

- **Hladová voda** neobsahuje rozpuštěné soli (je v podstatě destilovanou vodou), která vyluhuje soli z okolního horninového i stavebního (např. betonu) prostředí.
- Podzemní voda s vysokým i velmi nízkým **pH** působí agresivně na své okolí.

Bludné proudy

- Na železobetonové a ocelové konstrukce může také působit **geoelektrická agresivita** - tzv. "Bludné proudy". Tento typ koroze obvykle působí v blízkosti stejnosměrných elektrických zařízení (hromadná kolejová doprava, popř. některá výrobní zařízení) a jejich vliv se nejvýznamněji projevuje u inženýrských sítí (ocelová a žb potrubí) a liniových dopravních staveb (mostní konstrukce, hloubené tunely,...). Pole bludných proudů bývají zejména ve městě velmi silná. Popis geoelektrické agresivity bývá součástí zprávy geoelektrického nebo korozního průzkumu staveniště - v případě, že se na staveništi provádí. Součástí zprávy bývají rovněž navržená opatření pro různý stupeň agresivity.
- Obvykle se používají následující typy ochrany proti tomuto typu koroze:
 - Omezení vzniku bludných proudů jejich odváděním
 - Provedením pasivní (primární) ochrany betonu
 - Provedením aktivní (sekundární) ochrany
 - Konstrukční opatření - oddělení jednotlivých částí stavby z elektrického hlediska (dilatační spáry, případně v místě kontaktů dvou částí konstrukce využívat plastbeton nebo některou epoxidovou pryskyřici, popř. jiný materiál s dostatečnými rezistentními parametry)

Hlavní úkoly průzkumu

Získání podkladů pro volbu technologie – slouží už předchozí údaje, dále např. trhatelnost horniny, posouzení seismických účinků trhacích prací, možnosti dalšího využití rubaniny, doba potřebná pro aktivaci výstroje ap.

Podklady pro posouzení stability území nad tunely či při portálech. Stabilita portálových úseků; stabilita vlastních tunelů či svahů (u úbočních tunelů); poklesy povrchu území (s pasportizací ohrožených objektů)

Zvláštní (ne GT!) posouzení = Ekologický audit (tzv. EIA procedura) pro posouzení možných vlivů stavby na životní prostředí (zeleň, sociální zátěže ap.)

Metody průzkumu

- Studium archivních materiálů a rekognoskace území
- Inženýrsko-geologické a hydrogeologické mapování
- Geofyzikální průzkum
- Vrtný průzkum
- Průzkumné štoly a šachty
- Laboratorní zkoušky
- Terénní zkoušky
- Geotechnický monitoring
- Modelování: matematické, fotoelasticimetrie a fyzikální (hmotové)

Etapovost průzkumu podle TP 76

- Rešerše a orientační průzkum (x STUDIE): Pro návrh trasy a nalezení kolizí

- Předběžný průzkum (x DÚR): Probíhá již v konkrétní trase, posuzuje realizovatelnost
- Podrobný průzkum (x DSP): Musí dát úplný prostorový obraz o IG, GT a HG poměrech
- Doplnkový průzkum (x DZS, příp. DSP): Řeší doplňky a detaily. Není zvláštní etapou, pouze časově oddělenou či prolínající se částí Podrobného průzkumu
- GT sledování výstavby (x RDS, příp. DSPS) včetně instrumentace a GT monitoringu
- Zcela zvláštní etapa: Průzkum pro rekonstrukce a/nebo opravy]

Předmětem průzkumu je:

A, Hornina:

- Stav horniny
- Fyzikální vlastnosti
- Mechanické vlastnosti
- Technické vlastnosti

B, Horninový masiv:

- Struktura horninového masivu
- Stav zvětrání
- Hydrogeologické poměry

Situování díla v masivu

- Je-li o lokalizaci PS koncepčně rozhodnuto, je nutno věnovat pozornost detailnímu umístění (je-li to vůbec možné; mělo by, ale často to již z řady důvodů nelze!)
- Tunel by se měl vyhnout:
 - a) **Horninám narušeným povrchovými vlivy** (zvětrání; stavby pozemní a mělce podzemní – inženýrským sítím a jiným podzemním stavbám – podzemní urbanismus!). Obecně (pro 1. desítky m) platí: **čím vyšší nadloží, tím lépe** (= lepší hornina, zaručení horninové klenby, eliminace účinků poddolování na povrch ap.)
 - b) **Velkým či větším poruchovým zónám v masívu** (nelze-li to, je nutné je křížit pokud možno kolmo, na nejkratším úseku)

Tunel v synklinále a antiklinále (ražení kolmo na vrstvy)

- a) Za nejpříznivější je považována trasa kolmá na směr vrstev (puklin) zapadají-li či jsou-li vodorovné
- b) Prochází-li tunel antiklinálou je hornina výrazně rozpukaná s místními nerovnoměrnými horninovými tlaky
- c) Prochází-li tunel synklinálou je zpravidla vlhký až mokrá. Vlhký je vždy při střídání vrstev různé propustnosti

Tunel v synklinále a antiklinále (ražení po směru vrstev je považované za méně vhodné až nevhodné)

- a) Značné jednostranné tlaky s vysokými nadvylomy
- b) Hornina tlačí z obou stran. Obvyklé jsou velmi vysoké přítoky vody.
- c) Při mírném ohybu vrstev hornina netlačí, ale rozpojování je obtížnější. Při strmém ohybu jsou vysoká zatížení stropu.

Průzkumná štola

- Velmi diskutovaná položka průzkumu

- Někdy zavrhaná (pro vysoké náklady; časovou náročnost; narušení stavu napjatosti horninového masívu ještě před ražbou definitivního díla)
- Někdy upřednostňovaná (pro přesnost a spolehlivost průzkumu; řadu údajů lze získat pouze průzkumnou štolou!)
- O volbě průzkumné štoly by měly vždy rozhodnout vysoce racionální argumenty (očekávané GT poměry, požadavky uvažované technologie, výška nadloží, členitost a využití povrchu – les, zástavba ap.)

Umístění průzkumné (předrážené, směrové, pilotní) štoly:

- a) **V profilu raženého tunelu:** vynikající GT informace - kubatura štoly v kubatuře tunelu (snížení nákladů). Ražbu tunelu 1. možno zahájit až po dokončení štoly (= časová ztráta)
- b) **V profilu vedlejšího tunelu:** ražbu tunelu 1. lze zahájit zpožděně za štolou – GT informace bude plynule zapracována, ze štoly lze v tunelu 1. rozfárat další pracoviště => urychlení prací. Štola je využitelná pro provizor. větrání, odvodnění a vedení sítí. Po dokončení tunelu 1. slouží štola co úniková (provizorní)
- c) **Mimo profil (mezi dvěma tunely):** u jednorourových tunelů štola urychluje výstavbu či slouží jako úniková štola. U tunelů v mimořádných GT podmínkách štola vede trvalé technologie (větrání, sítě, odvodnění) = servisní štola.

Umístění průzkumné štoly v příčném profilu:

Při ražbě plným průřezem trhavinami nebo TS. Štola se vede co nejnižší (pro gravitační odvodnění):

- a) Při členěném průřezu – na úrovni 1. lávky
- b) Při ražbě TBM nebo mechanizovaným štítem (koncentricky)

Případné vystrojení štoly nesmí kolidovat s technologií ražby velkého tunelu.

Klasifikace prostředí pro podzemní stavitelství

Jeden ze základních výstupů GT průzkumu pro PS

správné a výstižné, současně i maximálně zjednodušené ohodnocení masívu (případně jeho chování) z pohledu podzemního stavitelství.

Klasifikační systémy:

- IG (popisují prostředí)
- GT (popisují vlastnosti)
- účelové (zde i tunelářské)

Standardně se klasifikační systémy prolínají

Klasifikační systémy (KS)

Funkce klasifikačních systémů:	Sjednocovací Popisná Doporučující
Typy klasifikačních systémů:	Popisné Číselné (indexové)

Z KS vychází nejvhodnější technologie ražení, vyztužování a dalších opatření

Klasifikace podle ražnosti (dnes zastaralá, ale často alespoň verbálně používaná; popisuje horninu, jak se chová při ražení)

- 0 (zvláštní stupeň ražnosti – „litá skála“)
- 1.
- 2.
- 3. stupeň ražnosti

Klasifikace podle zvodnění

- Z1 (čelba suchá)
- Z2 (výrub suchý, po 8 hod. z puklin lokálně kape; $0,05 \div 0,1 \text{ ls}^{-1}$)
- Z3 (čelba mokrá, ve výrubu drobně prší; $0,1 \div 0,5 \text{ ls}^{-1}$)
- Z4 (velký přítok; $>0,5 \text{ ls}^{-1}$)

KS dle Rabcewicze-Pachera – Klasifikace pro NRTM, horninové prostředí rozděluje do 5 tříd. I třída charakterizuje ideální horninové podmínky pro bezproblémovou ražbu a vyztužování, V.třída je opakem – složité poměry jak z hlediska prostředí, tak samotné realizace podzemního díla - viz. NRTM.

Klasifikace podle rakouské normy ÖNORM B2203/ 1994 – popisuje horninu podle jejího chování ve výrubu a podle příslušného horninového typu přiřazuje požadavky na výlom a jeho zabezpečení. Oceňuje horninové prostředí i z pohledu nákladů na ražení

- Horninový typ A (A1 – stabilní, A2 - mírně lámavá)
- Horninový typ B (B1 – lámavá; B2 – silně lámavá; B3 – drobivá, vysypává)
- Horninový typ C (C1 – odprýskavá; C2 - tlačivá; C3 – silně tlačivá; C4 – tekoucí; C5 - bobtnavá)

Číselné klasifikace

Používají se pro „ulehčení“ klasifikace. Místo často obšírného popisování horninového prostředí příp. jeho chování ve výrubu, přiřazují masívu jedno číslo (index) v němž by mělo být obsaženo ocenění horninového prostředí (= jeho kvality z pohledu tunelování, chování výrubu při postupu prací i obtížnosti tunelování)

Historie:

- Protodjakonov (1908) Rusko
- Terzaghi (1946) USA
- Lauffer (1958) Rakousko
- Pacher (1964) Rakousko
- RQD (1967) USA
- RMR (1973,1989) JAR
- Q (1974) Norsko
- Franklin (1975) Kanada
- QTS (1977) ČR
- Basic geotechnical description- ISRM (1981) USA

Číselné (indexové) klasifikační systémy:

- **KS dle Protodjakonova** – zohledňuje pevnost hornin v tlaku pomocí součinitele f_p , který nabývá hodnot od 0,3 do 20 a rozděluje prostředí na 20 skupin.
- **KS dle Terzagiho** – třídí horniny podle stupně oslabení puklinami a zavádí součinitel tlačivosti c_T^I , resp. c_T^{II} a doplňuje Protodjakonovu teorii.
- **KS RQD (rock quality designation)** - Deer: Určuje se z výnosu vrtného jádra. Dle indexu kvality RQD je prostředí rozděleno do 5 skupin - výborná (RQD= 100%) až velmi nízká kvalita horninového prostředí (RQD= 0%).
- **KS RMR (rock mass rating)** – Bieniawski: Komplexní hodnocení dle 6 základních vlastností hornin a horninového prostředí (RMR=A+B+C+D+E+F)
- **KS RSR (rock structure rating)** – Wickham: Hodnocení 3 parametrů, které jsou ohodnoceny příslušným počtem bodů, tak jako u RMR. Čím více bodů je, tím je prostředí kvalitnější.
- **KS podle Norského geotechnického institutu NGI:** Zahrnuje 6 charakteristik horniny a horninového prostředí s ohledem na puklinatost a napjatost masivu. Q nabývá hodnot od 0,01 do 1000, kde 1000 je extrémně výborná kvalita horninového prostředí.
- **KS dle Tesaře:** Komplexní systém, použitelný pro poloskalní a skalní horniny, který je normou předepsán pro železniční tunely.
 $TS = 10 \cdot \log s_d + 26,2 \cdot \log d + 6,2 \cdot \log D + 61,4$
 $QTS = TS - (a + b + c + d) \dots a \ b \ c \ d$ jsou redukční součinitelé

Razící metody podzemních staveb

Historický vývoj

- **1830 – anglická soustava** (železniční tunel Edge Hill, Anglie, trať Manchester–Liverpool)
- **1837 – rakouská soustava krokrová** (železniční tunel Oberau, Německo, trať Lipsko–Drážďany)
- **1839 – rakouská soustava podélníková** (železniční tunel Gumpoldskirchen, Rakousko-Uhersko, Jižní dráha)
- **1845 – německá (jádrová) soustava** (železniční tunel Třebobický, Rakousko-Uhersko, Severní dráha)
- **1964 – NRTM** (silniční tunel Massenbergraben, Rakousko)

PRSTENCOVÁ METODA

- Nasazuje se ve skalních horninách s dostatečnou stabilitou, příp. i v méně stabilních poloskalních horninách a zeminách (zde **doplněná o štít**). **Ražba se provádí standardně plným profilem** s použitím trhač práce i TBM. Není vyloučeno ani jednoduché členění s horní pilotní štolou.
- **Krátké výlomové záběry jsou bez odkladu vystrojovány definitivní výstrojí UZAVŘENÍM PRSTENCE.** Následuje případná rychlá zakládka, a vždy včasná výplňová aktivační injektáž. To, spolu s rychlým postupem prací i u velkých \emptyset omezuje rozsah rozvolněné zóny nad výrubem
- Krátké záběry zajišťují stabilitu výrubu v podélném směru.
- **Nutná je stabilita čelby.** Nestabilní čelba ohrožuje bezpečnost a výrazně snižuje stabilitu stropu (především v podélném směru. Potom je nutné čelbu podepřít (obvykle kotvením příp. přetlakem vzduchu) nebo nasadit štít (různého systému)

- V některých případech je možné prstencovou metodu realizovat i s některými typy provizorní výstroje (SB, BERNOLD, rámy)
- Je-li prstenec obezdívky prováděn z dílců vysoké hmotnosti (q až t, běžně 1÷1,5 t, max. 2,5 t) je nutný **ukladač = erektor**
- Pokud je používán erektor a není nasazen štít = **erektorová ražba**
- Injektáž se provádí přes injekční otvory v tybincích (dílech). Mezeru mezi obezdívkou a horninou je nezbytně nutné pečlivě proinjektovat včetně záklenku (jinak hrozí podélné porušení obezdívky puklinami)
- Injektuje se běžně cementem, někdy odděleně (zafoukání kačirkem + injektáž)
- Injektáž je prováděna jako primární a jako sekundární
- Postup injektáže: odspodu, symetricky nahoru, s kontrolou ve vyšších otvorech:

Metoda ztraceného bednění – systém BERNOLD

- Může být použita při prstencové metodě, prstence už nemusí být v počvě uzavírány. Jedná se o velmi neostrý přechod k NATM, resp. o jedno z ostění využitelných při NATM
- Primární či sekundární obezdívka je zřizována z betonu ukládaného do ztraceného bednění z prolamovaných nebo žebrovaných plechů (9, 10, 11 žeber; tl. 1,25; 2; 3 mm) nebo husté síťoviny vyztužené pruty
- Pažící plechy mohou být v zeminách zatahovány nebo předháněny
- Běžná je kombinace s ocelovými skružemi (trvalými nebo jen po dobu zrání betonu), s kotvením i se SB
- Technologie vhodná i pro zřizování šachet

Nová rakouská tunelovací metoda (NRTM, NATM)

Definice NRTM:

- NRTM je tunelovací metoda, která vědomě a cíleně využívá **nosných vlastností horninového masivu** s cílem optimalizovat proces ražení a zabezpečování výrubu a minimalizovat s tím spojené ekonomické náklady.
- Při výstavbě tunelů pomocí NRTM je obvykle stabilita výrubu zajištěna **primárním ostěním** a definitivní konstrukce tunelové trouby (sekundární ostění) je budována teprve po ustálení napěťově-deformačního stavu v okolí výrubu.
- Hlavními konstrukčními prvky primárního ostění jsou **stříkaný beton a kotevní systém**. Nedílnou součástí NRTM je geotechnický monitoring opírající se především o měření deformací tunelového výrubu. Stříkaný beton působí plošně a vyplňuje všechny nerovnosti výrubu.
- NRTM se tak z hlediska geotechnického řadí do skupiny observačních metod, u kterých je průběh výstavby průběžně sledován, a způsob ražby a zajištění výrubu primárním ostěním jsou upravovány podle skutečného chování výrubu a horninového masivu.

Nesmírně důležitý je vliv času => **jednoduchá a rychlá výstroj**

- Jako výstroj se používá:
 - a) **SB na ocelové síti** (KARI-sít, svařovaná mřížovina). SB urychlený, suchý, mokrá i s rozptýlenou výztuží [=] tenkostěnné, tak akorát poddajné ostění]
 - b) **Kotvení** (včetně čelby). Svorníky a kotvy (jehly) všech možných typů

- c) **Ocelové oblouky.** Plnostěnné (I, H, HE, HEB, TH – K - Heintzmann) i příhradové (Bretex, Pantex, Asta ap.)
- d) Ve velmi až extrémně špatné geologii je možné předstihové zlepšování horninového masívu v okolí i předpolí PS (piloty, mikropiloty, injektáže, TI, zmrazování, odvodňování ap.)

Při NATM je obvykle zřizován nekruhový = podkova či „tlamový“ průřez, často se spodní klenbou.

Pro NATM je typické **ČLENĚNÍ VÝRUBU** v příčném i podélném směru => vstupujeme do masívu menšími šetrnými záběry, rychle zvládnutelnými, se kterými se hornina vyrovná. Člení se horizontálně nebo vertikálně. Vzdálenost mezi dvěma tunely min $3xD$ (D je šířka výrubu). Člení se i podélně, rozstup podélný cca 100m.

Řešení problémů při zhoršení horninových poměrů

- zkrácení zabírky
- zvýšení počtu nebo prodloužení svorníků
- zabránění extruze pomocí horninové opěry
- stabilizace čelby SB, svorníky nebo jejich kombinací
- aplikace hnané výztuže (hnané stropnice, injektované kotvy, položit, ...)
- zesílení a členění vrstvy SB
- rozšíření základu výztuže kaloty
- zpevnění počvy injektáží nebo svorníky
- budováním dočasné protiklenby SB
- ražení ve stlačeném vzduchu
- úprava okolní horniny (injektáž, zmrazování, odvodňování)

Monitoring při NRTM

- a) **Měření konvergence a posunů v měřických profilech** - měření probíhá ve směru hlavních os. Předpokládáme ustálení deformací - varovné stavy. Měřící technika - konvergometry, dálkoměry, totální stanice, záměrné terčíky,...Probíhá ve větší hustotě počtu měření.
- b) **Měření zatížení výztuže pomocí dynamometrů**- na kontaktu horniny a výztuže, měřící technika - tlakové podušky a snímače
- c) **Měření napětí v betonu** - dynamometrická nebo deformometrická měření
- d) **Měření původní napjatosti masívu** - metody mechanické (deformační, kompenzační, odlehčovací), geofyzikální, hydrofracturing
- e) **Měření posunů uvnitř horninového masívu** - extenzometrická a inklinometrická měření
- f) **Měření posuvů povrchu terénu** - nivelační měření
- g) **Měření zatížení svorníků a kotev** - dynamometrická měření
- h) **Měření tlaku podzemní vody** - piezometrická měření

Fenner – Pacherova křivka:

Popisuje závislost mezi napětím a deformací, která vzniká na výrubu. Stanovujeme z ní zatížení výztuže. Při vytvoření výrubu se nám mění napěťový stav v masívu. Mění trojosý stav na dvojosý. Normálové a tangenciální napětí na lící se blíží nule. Tlak podzemní vody klesne na nulu a voda začne proudit do výrubu. V blízkosti výrubu vzniká zóna nakypření důsledkem, čeho dochází k rozvolňování a snižování

pevnosti. Tvar FP křivky je závislý na kvalitě hornin, razící metodě a způsobu rozpojení horniny. Tři základní stavy mohou nastat: napjatost je menší než pevnost horniny (pružné chování), napjatost je na mezi pevnosti horniny, anebo pevnost horniny je nedostatečná a dochází v důsledku nakypření k rozevírání trhlin a vypadávání bloků, které zatěžují výztuž. V tomto případě mohou nastat čtyři charakteristické případy:

Výstroj optimální tuhosti zabudovaná v optimálním čase (min. zatížení výztuže, malé deformace)

Příliš tuhá výstroj zabudovaná brzy (vysoké zatížení výztuže, malé deformace, nevyužitá pevnost horniny)

Výstroj optimální tuhosti zabudovaná pozdě (příliš velké deformace a velké zatížení)

Výstroj nedostatečné tuhosti je zabudovaná pozdě (příliš velké konvergence, které se neuklidňují. Nutné doplnění výstroje).

Norská tunelovací metoda - NMT

Norská tunelovací metoda má základní charakteristické rysy:

- velmi rychlý postup ražby a tím i nízké náklady,
- v pevných horninách se razí klasickým způsobem pomocí trhacích prací a v jílovitých sedimentech se obvykle využívají plnoprofilové razící stroje (TBM),
- primární výztuž je zároveň i ostěním definitivním, skládá se pouze ze stříkaného betonu (prostého nebo drátkobetonu) a kotvení (systematického nebo nahodilého),
- ocelové výztužné rámy se běžně nepoužívají, jen ve ztížených geologických podmínkách se zkrátí zabírka a primární ostění se vyztužuje pomocí žeber ze stříkaného betonu,
- kvalita horninového masivu je posuzována dle Q – systému,
- geotechnický monitoring se běžně neprovádí jen v úsecích zhoršených geologických podmínek.

ADECO – RS

- Klíčovým prvkem z hlediska deformací nadloží a sedání povrchu je zejména **oblast horninového masivu před čelbou výrubu - jádro výrubu** (prof.Lunardi – „ADECO-RS“)
- Metoda ADECO-RS zkratka Analysis of COntrolled Deformation in Rocks and Soils
- **Nutno zabránit deformacím jádra**
- K základním prvkům metody patří zvýšení tuhosti jádra v předstihu před vlastní ražbou, použití tuhého primárního ostění
- vyztuženého např. válcovanými profily tuhých rámu, ražba tunelu na plný profil a betonáž tuhého definitivního ostění v technologicky minimálním odstupu od čelby s rychlým uzavíráním spodní klenby.
- Jádro tunelu je standardně vyztužováno dlouhými sklolaminátovými
- mi kotvami délky minimálně odpovídající průměru tunelu, v případě
- nestabilního prostředí je zlepšováno pomocí tryskové injektáže

Ražba plným profilem

Stabilizační opatření:

- Radiální kotvení
- Axiální kotvení

- Sanační injektáž v nadloží jádra
- Trysková injektáž nad jadrům (PLS (pre lining systém) – „kornouty“)
- Obvodový vrub s předklenbou (PLS – dratkobeton)
- TBM s tlakovou kontrolou čelby (APB, EPB, SPB)
- Drenažní vrty do předpolí

Pre-Lining Systém

Metoda obvodového vrubu s předklenbou - Perforex

- Metoda předřezání s předklenbou se nazývá Perforex metoda
- byla zavedena v sedmdesátých letech, zpočátku byla metoda vyvinuta pro vytvoření obrysové trhliny (vrubu), při použití trhacích prací v podzemní s cílem optimalizovat obrys a minimalizovat dopad účinků TP na okolní horninu.
- Rozsah použití pak byla rozšířen přes betonování vrubu, který vytváří ochranou betonovou klenbu.
- Tato patentovaná metoda dobře prokázal četné využití ve Francii a v zahraničí se stala referencí pro železnici a dálniční tunely v měkkých a poloskalních horninách.
- V těchto typech zemin, kde výztuž je nutná a zejména v městských oblastech nám metoda Perforex umožňuje ražbu v plném průřezu tunelů
- U mnoha podzemních staveb metoda Perforex dokáže být velmi výkonná a představuje mnoho výhod:
- Rychlá instalace dočasné podpory klenby před rozpojením čelby, která má za následek, omezení stlačení horniny v okolí tunelu, značný pokles sedání na povrchu.
- Bezpečnost při výstavbě: práce pod ochranou betonové klenby a okolní struktury

Větrání podzemních děl

Při konvenčním trhavinovém ražení tunelu, ale i při beztrhavinovém ražení se dostava do ovzduší množství zdraví škodlivých plynu a prachu, které zhoršují pracovní podmínky a působí negativně na organizmus pracovníků.

Pracovní podmínky v tunelech mohou ještě zhoršit výrony metanu a jiných plynu z horninového masivu a výtokových plynu ze spalovací motoru používaných strojů.

Dodržení povolených koncentrací se průběžně kontroluje a je možné ho dosáhnout účinnou kombinací dvou skupin opatření:

- minimalizace produkce škodlivin a prachu použitím vhodných mechanismů, trhavin a pracovních postupů,
- zavedením účinného větrání, kterým se koncentrace škodlivin a prachu v ovzduší zředí na přijatelnou míru.

Omezení produkce škodlivin při rážení tunelu je možné dosáhnout těmito způsoby:

1. Použitím strojů s vhodným pohonem – elektrickým nebo pneumatickým. Dieselové motory mají být vybaveny vhodnými filtry.
2. Velké množství škodlivin a prachu vzniká při rozpojování horniny klasickými nitroglycerinovými trhavinami. Nahrazuje se moderními vícesložkovými trhavinami s vyrovnanou kyslíkovou bilancí
3. Používání mokré směsi pro stříkaný beton

Dle národních předpisů tunelářský vyspělých států EU jsou dány tyto požadavky:

- rychlost proudění vzduchu v raženém profilu tunelu nesmí klesnout pod 0,3 m/s,
- na každého pracovníka v tunelu je třeba dodat minimálně 1,5 až 2,0 m³/min čerstvého vzduchu,
- na každý dieselový stroj v tunelu je třeba dodat 4 m³/min čerstvého vzduchu na každý kW výkonu stroje (nakladače, rýpadla, dopravní stroje, zařízení na stříkaný beton).

A, větrání ve fázi ražby: Separátní Sací, Foukací, Kombinované

Jelikož k větrání tunelu je potřeba dodávat do čelby velké množství vzduchu nízkého přetlaku, průměr ventilačního potrubí zejména v dlouhých tunelech, kde vznikají při proudění veliké ztráty, je velký – často nad 2,5 m - a stanovuje se výpočtem.

Úkolem větrání během ražby je:

- odvětrání povýbuchových zplodin
- zajištění vyhovujících pracovních podmínek (teplota/vlhkost=[katastufepň])
- odstranění technických plynů

Složení ovzduší v podzemí:

- dusík N₂ - inertní plyn
- kyslík O₂ - nesmí být méně než 19%
- metan CH₄ - se vzduchem výbušný plyn, lehčí než vzduch, zjištění interferometrem
- sirovodík, nitrózní plyny, oxidy uhlíku, ...

B, větrání v průběhu provozu: přirozené větrání liniových staveby (umístění portálů, pístový efekt, ventilační systém). Ventilační systémy halových objektů

Větrání v průběhu provozu má zabezpečit:

- zředění koncentrace škodlivin v ovzduší na přípustnou míru,
- dobrou viditelnost pro průjezd vozidel tunelem s ohledem na dovolenou rychlost,
- snížení účinku tepla a kouře z požáru na osoby v tunelu,
- řízený rozptyl škodlivin z tunelu, a tím snížení imisního zatížení jeho okolí.

Větrání silničních tunelů:

Větrací systémy silničních tunelů:

- a) podélné
- b) polopříčné
- c) příčné

Prostředky k větrání:

ventilátory + ventilační šachty a stanice

PŘIROZENÉ PODÉLNÉ VĚTRÁNÍ

- Využívá rozdílu tlaků mezi portály způsobeného **PÍSTOVÝM EFEKTEM** projíždějících vozidel. Do jisté míry mu může pomoci (nebo jej naopak může rušit) **KOMÍNOVÝ EFEKT** (při větších podélných spádech)

Toto větrání je použitelné při délkách tunelu l:

- $l \leq 500$ m při jednosměrném provozu
- $l \leq 200$ m při jednosměrném provozu ve městě
- $l \leq 300$ m při obousměrném provozu

PODÉLNÉ VĚTRÁNÍ S PROUDOVÝMI VENTILÁTORY

- Ventilátory podporují podélný proud vzduchu
- Směr a intenzita proudění jsou podle potřeby změnitelné
- Rychlost vzduchu by neměla překročit $10 \div 12 \text{ ms}^{-1}$

POLOPŘÍČNÉ VĚTRÁNÍ

- Čerstvé větry vyfukovány příčně k podélné ose přibližně od stropu tunelu (nutný prostor na přívod!)
- Mdlé větry odchází oběma portály
- Systém vhodný pro tunely dl. cca $2 \div 4$ km se středním zatížením bez výrazných špiček

PŘÍČNÉ VĚTRÁNÍ

- Čerstvé větry jsou vyfukovány a mdlé odsávány příčně k podélné ose
- Obě vedení mohou potřebovat až cca 30 m^2
- U delších tunelů jsou nutné **větrací šachty**. To může být problém u horských tunelů s vysokým nadložím – zde mohou být použity souběžné štoly či tunely (sloužící současně i jako servisní a únikové).

Množství škodlivin závisí hlavně na:

- hustotě a druhu vozidel
- povolené rychlosti
- podélném sklonu tunelu
- umístění portálů, atd.

Větrání železničních tunelů a metra:

-jednodušší než automobilové - pístový účinek, menší exhalace. Prostředky k větrání: ventilační šachty

Větrání halových objektů: - větrná rozvaha

Odvodnění a hydroizolace

Ochrana podzemních staveb proti vodě - přítoky vody do čelby se dají jen obtížně předvídat

Mohou být i velmi vysoké – extrémně i více než $1\,000 \text{ ls}^{-1}$ (např. pod řekami). Nicméně takový přítok již odpovídá **PRŮTRŽI**. V ČR max. do 500 ls^{-1} . Velmi vysoké přítoky však zpravidla s časem rychle klesají (tzv. „statické zásoby“ vody vytečou)

Přítoky vody jsou velmi nepříjemné při úpadních ražbách a hloubení šachet

Tunel může být:

- **DRÉNOVÁN**
- **IZOLOVÁN**

Izolace **musí** vždy zamezit:

U silničních tunelů:

- Tvoření louží či náledí na vozovce
- Tvoření rampouchů

U železničních tunelů:

- Vnik vody na trolejový vodič
- Tvoření rampouchů

Prosakující podzemní vody ztěžují i zřizování primárního ostění ze stříkaného betonu a výrazně zvyšují jeho spad z nastiikových ploch. Proto je potřeba přistoupit k ochranným opatřením:

- při plošných průsacích podzemních vod ze stropu ve formě hustého děste je třeba na líci výrubu rozprostřít ochrannou HDPE folii s výstupky, resp. žebry,
- při soustředěných výtocích beztlakové, resp. tlakové vody je nutné zachytit jednotlivé výtoky do drenážních hadicových svodnic a svést do odvodňovacích příkopu, resp. potrubí. Hadice se upevňují k líci výrubu maltou z rychle tuhajícího cementu (nastřelením)

Plošná (obrysová, odlehčovací) drenáž

- Tvořená vrstvou drenážní geotextilie (rouna)
- Tvořená výstupkovou fólií
- Často jsou nutné odvodňovací vrty v masívu i v primární obezdívce
- Hadicová i plošná drenáž jsou zaústěny do podélného drénu u opěr nebo do plošného drénu v počvě

Odvodnění během provozu

liniové stavby - soustava podélných drenáží (min. sklon 3‰)

- čistící šachty
- kanalizační systém

halové stavby - vodní rozvaha (kanály, jímky, sběrače, drenáže...)

Stupně vodotěsnosti

Tunely jsou budovány s předpokládanou životností více než 100 let, což znamená, že standardy pro konstrukce tunelů musí být velmi vysoké a zvláště ty, které se vztahují na systémy těsnění a hydroizolaci:

- **Třída 1 Zcela suchy** - Nejsou dovolena žádná vlhka místa na vnitřních částech tunelu.
- **Třída 2 Suchy až navlhly** - Dovolena ojedinělá slabá místa. Není dovoleno kapaní vody na vnitřním povrchu tunelu.
- **Třída 3 Vlhky** - Dovolena částečně vlhka místa a ojedinělá místa kapající vody na vnitřním povrchu tunelu.
- **Třída 4 Vlhky až mokry** - Nejsou dovolena žádná vlhka místa s kapající vodou.

Hydroizolace

Systém hydroizolace:

- uzavřený - typ ponorka (neovlivní režim podzemních vod)

- otevřený - typ deštník (ovlivní režim podzemních vod)

Podklad pod hydroizolaci:

Na upravený povrch primárního ostění se pomocí nastřelovacích hřebů s podložkami připevňuje drenážní plást - plstěna geotextilie, resp. plastová profilovaná folie, umožňující jednak plošné zachytávání vody, prosakující přes primární ostění, jednak její odvedení do drenážního systému tunelu. Počet a rozmístění upínacích prvků má být volen tak, aby hydroizolační folie byla při betonáži sekundárního ostění co nejméně namáhaná na tah.

Podle požadavku TKP SSE 2000 (převzaté z DS 853) mají být v horní části klenby tři úchyty na 1 m² plochy. V bočních částech průřezu postačí dva úchyty na 1 m².

Geotextilie plní kromě drenážní funkce i funkci ochrannou - brání poškození hydroizolační folie přímým kontaktem s poměrně drsným povrchem podkladové vrstvy SB a má mít tyto parametry:

- objemovou hmotnost ~ 500 g/m²,
- jmenovitou tloušťku > 4 mm,
- pevnost v tahu ~ 10 kN/m,
- odolnost proti proražení ~ 2,5 kN,
- chemickou stálost v rozmezí hodnot pH = 2 až 13.

Nehořlavost není předepsaná.

Příprava podkladu pro hydroizolaci

1. Zkontrolovat tvar líce primárního ostění
2. Odstranit nebo zastříkat všechny ostré prvky, kovové i dřevěné, vyčnívající z líce primárního ostění (kotvy apod.)
3. Pokud je líc primárního ostění plošně vlhký, nebo z něho vytékají soustředěné výtoky podzemní vody, musí se voda zachytit plošnými drény
4. Na líc primárního ostění je třeba nastříkat krycí vrstvu stříkaného betonu na vyrovnání ostrých hran (poměr sklonu 10:1)

Hydroizolaci dle uložení vzhledem k ostění dělíme na:

- rubovou (vnitřní)
- lícovou (vnější)
- mezilehlou (mezi primárním a sekundárním ostěním)

Dle materiálu dělíme hydroizolace:

Asfaltové pásy	- juta, hliník, ..., obaleny asfaltem
Folie	- polyetylen, PVC, ..., často dvoubarevné, obvyklé pro NRTM, proti protržení chráněna geotextilií
Nástřikové izolace	- směsi na bázi latexu, potřeba suchý povrch
Plechové izolace	- většinou na vnitřním líci ostění
Zkvalitnění betonu	- zvýšení podílu jemně mletého cementu, přidání latexu, krystalizační přísady, atd.
Injektáž	- cementová, polymery, akryláty, ..., za ostění nebo do horniny

Kontrola kvality svarů po svařování - folie

A, Tlaková zkouška

Dvoj-svárový stroj provádí dva svařené spoje najednou. Na obou stranách dvojitého švu se vznikly kanálek mezi dvěma svary, který bude testován, pevně uzavře a nainstaluje se tlakoměr a jehla.

B, Vizuální kontrola svarů

Po svařování by měly být všechny svary vizuálně zkontrolovány, zda jsou dobře řemeslně provedeny. Zvláštní pozornost by měla být věnovaná T-spojům, prostupům a přeplátovaným spojům.

C, Mechanická kontrola svarů

Všechny ručně svařované svary by měly být mechanicky testovány, poté co po svařování zcela vychladnou. Pro tento účel použijte šroubovák (široky přibližně 5 mm, s tupým koncem). Na spoj aplikujte slabý tlak tak, aby nedošlo k poškrabání membrány. Mechanická zkouška není zkouškou vodotěsnosti; pomáhá pouze odhalit svary, které nejsou dostatečně svařeny.

Portály a předportálové zářezy

FUNKCE PORTÁLŮ

Přechod z volné trasy komunikace do tunelu se provádí přes **portálový objekt**, který se skládá ze samostatného portálu osazeného takřka pravidelně do připortálových zářezů.

Půdorysné nároky portálového prostoru v příčném i podélném směru jsou podmíněny bezpečnostními požadavky na odstavné plochy před portálem a geometrickým uspořádáním v tunelu. Tvar zářezů jsou a volba stabilizačních opatření vychází vždy z lokálních geologických podmínek.

Hlavní funkci portálů je chránit vstup do tunelu. Musí být přitom splněny technicko-bezpečnostní požadavky:

- Spolehlivé přenesení tlaků hornin nadloží
- Ochrana vstupu do tunelu před padajícími kameny, sněhem a ledem
- Zachytávání a odvádění povrchové vody stékající po svahu
- Zdůraznění konstrukčního významu tunelu prostřednictvím architektonicky významných prostředků
- Zabezpečení podmínek dostatečné viditelnosti a tak bezpečného provozu v tunelu

Všeobecné zásady návrhu

Z hlediska bezpečnosti provozu celého tunelového díla je nejvýznamnější úlohou portálu **jeho statická funkce**. Značná **variabilita hornin** v portálovém úseku, **výskyt anomálií a poruchových zón**, jako i **nižší pevnostní parametry** hornin kladou zvýšené požadavky statické zabezpečení portálů. Při trasování komunikace je potřeba **se vyhnout** těmto poruchovým zónám, a aby nedocházelo k přecházení sesuvných území.

Z geologického hlediska jsou zásadní rozdíly ve vlastnosti oproti horskému masívu:

- V blízkosti povrchu je skalní hornina navětralá a její pevnost je snížena. Vyznačuje se zvýšenou odlučností
- Trhliny skalní horniny jsou otevřené, a proto je hornina více náchylnější, a citlivější k dodatečnému rozvolnění. Zvyšuje se počet trhlin rovnoběžných s povrchem
- Suťové kužele, říční a morénové sedimenty a staré sesuvy způsobují časté odtrhnutí hornin

Je potřeba uvažovat za nestabilní nejen strmé svahy ale i mírně ukloněné. Z konstrukčního hlediska můžeme rozlišovat různé typy uspořádání portálů:

- a) V pevných skalních horninách nemusí mít portály složitou konstrukci
- b) V případě hrozícího nebezpečí pádu kamene nebo přítoků vody je potřeba provést ochrannou stěnu
- c) V případě působení tlaku ze svahu musí portál působit jako opěrná konstrukce

Vedení tunelů:

- A, kolmý portál při strmém svahu
- B, šikmý portál při strmém svahu
- C, kolmý portál při kolmém vstupu do mírném svahu
- D, kolmý portál při šikmém vstupu do mírného svahu

Způsob zabezpečování předportálových svahových zářezů

Stabilitě portálové jámy je potřeba věnovat velkou pozornost. Vzhledem k významnosti a náročnosti tunelové stavby se snažíme maximálně redukovat dočasné konstrukce. Při zhoršení podmínek během výstavby je potřeba urychleně reagovat na změnu a přijmout příslušná opatření. Mezi základní zákroky patří:

- Vybudování odvodňovacích příkopů a zachytávat povrchové a srážkové vody
- Zhotovení odvodňovacích vrtů
- Spolehlivé zajištění stability svahů
- Zajištění monitoringu svahu a sledování pohybů

Pro návrh sklonu mělkých zářezů můžeme využít základní empirické předpoklady:

- u zdravých skalních hornin to může být 1:5
- u navětralých 1:3 až 1:4.
- Ve zvětralých horninách cca 1:2.

U hlubokých je potřeba posoudit stabilitu výpočtem mezní rovnováhy

Volba a typu zajištění je dána různými faktory:

- Vlastnosti hornin (zemin)
- Hloubka výkopu a půdorysné uspořádání
- Úroveň hladiny podzemní vody
- Stabilita přírodního svahu před zásahem
- Nevyhnuté doplňující zákroky
- Čas na zhotovení stabilizačních opatření
- Předpokládaná délka otevření dočasných výkopů
- Celkové ekonomické zhodnocení stavebních prací

Způsoby zajištění svahů předzářezů portálů

1. Úprava tvaru svahu
2. Odvodnění svahu
3. Opěrné konstrukce
4. Stěnové konstrukce
5. Horninové kotvy
6. Vyztužování svahů

7. Zpevňování zemin
8. Ochranné konstrukce

Stěnové konstrukce

- Záporové pažení
- Pilotové stěny
- Mikropilotové stěny
- Podzemní stěny

Výstavba městských podzemních staveb hloubením

Metody výstavby:

- Výstavba ve svahovaných stavebních jamách
- Výstavba metodou konstrukčních podzemních stěn
- Výstavba metodou hloubení a ražby pod zastropením (želva, top down)
- Zvláštní metody výstavby

Výstavba ve svahovaných stavebních jamách

- Minimální racionální výšku nadloží lze uvažovat 0,8-1,0. Stavba je pod zámraznou hloubkou a v nadloží lze vést ještě kabely. Pro významnější stavby je vhodnější hloubka 2,0-2,5m. Umožňuje křížení s vodovody a plynovody, kolize s kanalizací.
- Sklon svahů musí být co nejstrmější, aby se minimalizovaly objemy výkopů. Stabilita musí být zajištěna po celou dobu výstavby, je ovlivněna podzemní vodou a zatížením okolo jámy. U skalních hornin se volí co nejstrmější sklony. Riziko u sklonu diskontinuit do stavební jámy- někdy kotvení. V sypkých zeminách musí být sklon menší než úhel vnitřního tření.
- Tento postup volíme nejčastěji pro liniové vedení (kolektory, podchody..). Pro tunely je to příliš široké a zabírá mnoho místa

Postup výstavby

- Hloubení stavební jámy a úprava jejích svahů a dna
- Uložení drenáže, rozprostření štěrkové vrstvy na dno
- Vybetonování podkladního betonu a uložení hydroizolace
- Montáž ostění, betonáž ostění
- Hydroizolace stěn a stropu ostění + ochranné vrstvy hydroizolace
- Zpětné zasypání konstrukce, hutnění, úprava povrchu terénu

Monolitická ostění:

Je levnější než prefabrikát, beton se dá upravit, aby odolával průsakům vody. Používání systémových bednění, bednicích vozů, zkrácená doba na odbednění

Prefabrikáty:

Jsou přesné, omezení mokřích procesů, rychlost montáže, vysoká kvalita betonu. Těsnění styčných spár. Zvýšené dopravní náklady.

Kombinace

kombinace prefa. a monolit. Ocelové plechové dílce z vlnitého plechu

Výstavba v pažených výkopech

- Výstavba v prostorově stísněných podmínkách s využitím svislých pažících stěn rozepřených nebo kotvených
- Volba pažení je ovlivněna:
 - Vlastnostmi zeminy
 - Hloubka jámy (půdorys, tvar a rozměr)
 - Úroveň hladiny podzemní vody
 - Pracnost a ekonomické aspekty
 - Doba použití (životnost) jámy
- Pažení: příložné, štětovicové, záporové, pilotové, podzemní stěny

Štětovicové pažení

- Využití zejména u nesoudržných zemin, propustných, při výstavbě pod hladinou vody. Dno pažnice je potřeba vetknout a horní část se rozpírá rámy (v jednotlivých úrovních podle hloubení) nebo kotvami.
- Štětovnice - ocelové (plastové) válcované nosníky (typ Larsen)
- Beranění probíhá po dvojicích přes zámek sousední štětovnice, volná zámek se uzavírá trnem
- Nevýhodou jsou vibrace při beranění, vytvoření souvislé stěny (křížení s ing. sítěmi)
- Dají se opět vytáhnou, a znovu použít, někdy jako trvalé

Záporové pažení

- Kombinace příložného a štětovicového pažení. Použití jak v soudržných tak nesoudržných zeminách i při výstavbě pod hladinou podzemní vody.
- Postup prací: zaberanění zápor (I nosníky), při hloubení se postupně vkládají pažnice mezi zápor a rozpírají se, provede rozepření nebo kotvení v jednotlivých úrovních

Pilotové stěny

- Jsou výhodné pro velké hloubky, není zajištěná úplná vodotěsnost
- Používají se: mikropiloty, velkopřůměrové piloty, pilíře z tryskové injektáže
- Mikropiloty: do hloubek max. 9m, osová vzdálenost 2d až 5d. Použití injektáže, betonových převázek, kotvení
- Velkopřůměrové piloty – průměr 0,6-3,0m, délky několik desítek metrů. Jsou vyztužené armokošem, vrtání spirálovým vrtákem (drapákem). Vysoká tuhost prvků.
- Pilíře tryskové injektáže: - vytvoření sloupu zpevněné zeminy promísením s cementovým mlékem pod vysokým tlakem.

Monolitické podzemní stěny

- Použití jako těsnící, pažící a konstrukční prvek, tak jako i trvalý konstrukční prvek ostění
- Provedení v tloušťce 0,6-0,8m, betonáž po lamelách, hloubení drapákem přes vodící rýhu.
- Nevýhodou je nerovný a nekvalitní povrch líce stěn – nutná úprava

Kombinovaná metoda

Využití v místech kde je nízké nadloží, potřeba co nejdříve zasypat zářez z důvodu nestability, vrátit dopravu na povrchu do původního stavu.

Systém **želva**: - vytvoření monolitické klenby na vytvarované hornině v otevřené jámě

Naplavování

- V tzv. suchém doku se vybetonují dílce tunelu. Délka dílců nepřesahuje 100m. V korytu řeky se vyhloubí stavební jáma a zabetonují základové prahy (mikropiloty).
- Po betonáži se čela dílců uzavřou a dok se zaplaví. Konstrukce se přetáhne na místo uložení. Vytvoří se vodotěsné propojení dílců, přikotví se k prahům a konstrukce se přesype.
- Hmotnost prefabrikátu se volí tak, aby jen mírně vyčnívaly nad hladinu, spouští se pomocí cisteren na vodu uvnitř prefabrikátů
- Těsnění je zajištěno gumovým límcem, spoje se dobetonují

Mechanismy pro moderní metody ražení

Stroje na cyklické ražení:

- a) **s hydraulickými rýpadly (tunelbagry)** - doprofilování a dočištění výrubu, vhodné do zemin a poloskalních hornin
- b) **s bouracími kladivy - impaktory** - doprofilování výrubu - vhodné do skalních hornin s hustou sítí nespojitostí
- c) **s výložníkovými frézami** - otáčení hlavy okolo příčné nebo podélné osy => tvar a hmotnost stroje, vhodné do zemin a méně abrazivních hornin
- d) **speciální jednoúčelové stroje** – perforex (metoda obvodového vrubu)

Strojní komplexy na kontinuální ražení

A/ Plnoprofilové razící stroje (PPRS, TBM - Tunnel Boring Machines)

- multifunkční razící systémy vhodné do neporušených skalních a poloskalních hornin

Dle konstrukčního uspořádání dělíme:

otevřené TBM - a)

uzavřené TBM s jednoduchým pláštěm - b)

s dvojitým (teleskopickým) pláštěm - c)

TBM s rozšiřováním výrubu - d)

Výhody a nevýhody TBM:

+ **hladký obrys** a malé poškození okolí výrubu

+ bezpečnost a pracovní podmínky

+ vysoké pracovní postupy

- **jen kruhový**, konstantní průřez v téměř přímém směru

- problémy ve složitých geologických podmínkách

- cena (zbudování startovací komory, samotný stroj ...)

Nejčastější výztuž při ražení TBM:

- otevřený TBM - vyrovnávací vrstva ze SB, izolace a monolitický beton

- TBM s pláštěm - prefabrikované ostění, styčné plochy utěsněny gumou nebo plasty (pro dobré hydrogeologické podmínky - primární ostění prefabrikované, mezilehlá izolace, sekundární ostění z monolitického betonu)

Volba typu závisí na:

- parametrech horninového prostředí
- možnost rozepření do horniny
- poruchových zónách v trase

B/ Ražení pomocí tunelovacích štítů

- varianta hnaného ražení, vysouvaného pomocí lisů opřených o výztuž
- používají se v zeminách a zvětralých poloskalních horninách
- štít se skládá z břitové, trupové a koncové části
- tuhost zajišťuje příčný a podélný rám, který vytváří i nosnou konstrukci pracovních plošin

Rozlišujeme štíty:

- nemechanizované
- mechanizované se záběrem po částech
- mechanizované
- pro ražení pod HPV
- zvláštní (multištítý, pološtítý, nožové štíty...)

Nemechanizované

- rozpojování horniny se provádí ručně
- odtěžení je realizováno nakladači a vozíky
- součástí bývá erektor s otočným a posuvným výložníkem pro ukládání segmentového ostění

Mechanizované se záběrem po částech

- rozpojování je realizováno rozpojovacím orgánem na výložníku
- materiál je odtěžován kontinuálními nakladači na dopravníky

Ostění při štítování:

- ocelové, litinové tybinky (pravé x klasické)
- železobetonové segmentové ostění
- monolitický beton, presbeton