

Přehled klasických metod výstavby tunelů

ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ TUNELOVACÍCH METOD

- **Konvenční tunelování (cyklický postup ražby)** – operace provedené v jednom pracovním cyklu umožňují postup ražby o jeden záběr
 - (Klasické tunelovací soustavy)
 - **Současné metody konvenčního tunelování**
(Prstencová metoda, NRTM, NTM, ADECO RS, MOVPP, Spritzbetonbauweise, Kernbauweise, SCL, Lasershell, Metoda čelního odtěžování)
- **Kontinuální strojní tunelování („plynulý“ postup ražby)**
 - **Plnoprofilové tunelovací stroje** - razicí stroje a štíty

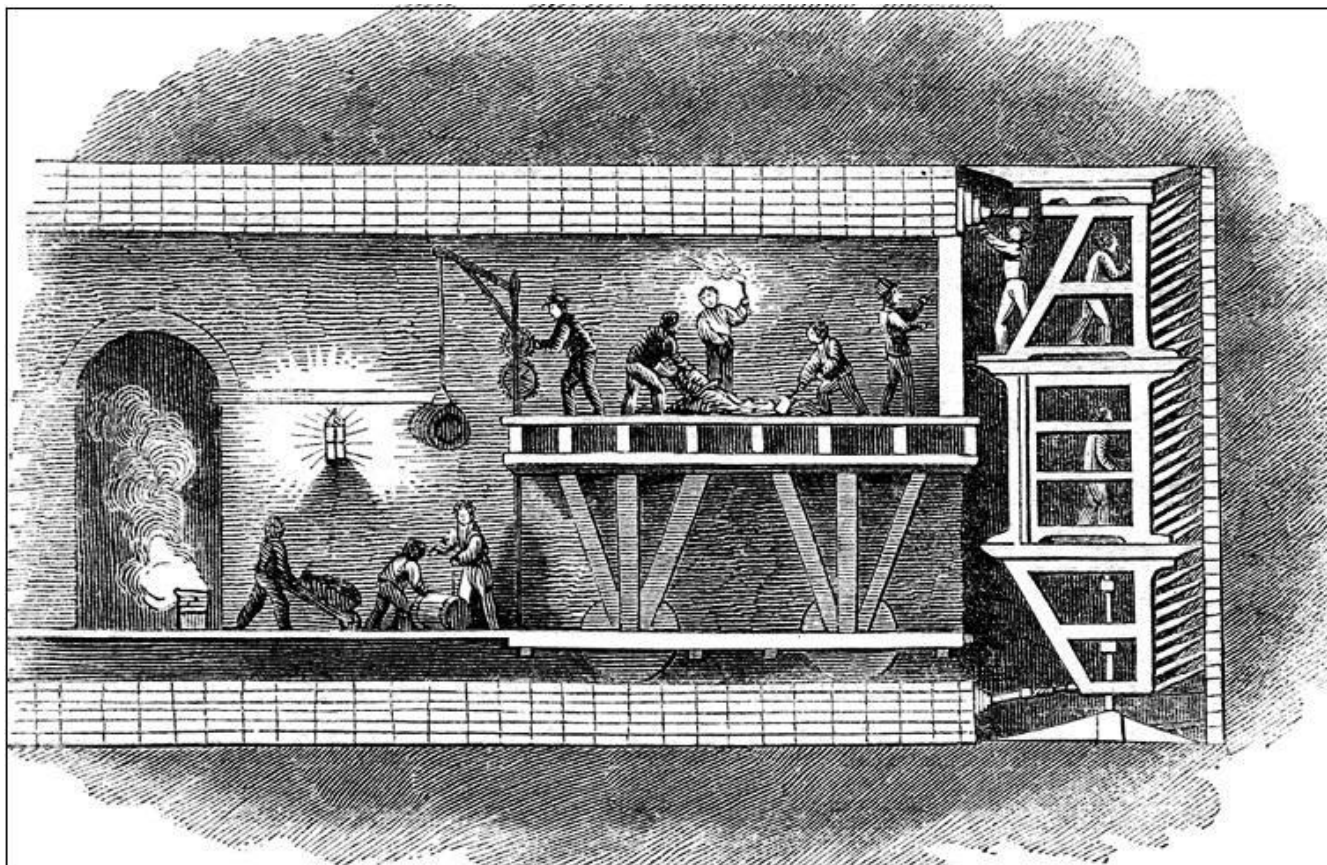
HISTORICKÝ ÚVOD

- Výstavba tunelů v průběhu 19. stol. a v části 20. století byla prováděna převážně pomocí **klasických tunelovacích soustav**. Provizorní výztuž tvořila v ýdřeva, definitivní výztuž obezdívka, později ostění z prostého betonu.
- 1. polovina 19. století – G. Stephenson – 1829 parní lokomotiva Rocket – mohutný rozvoj železniční sítě v Anglii a v celé Evropě → **tunely**
- 1830 – železniční tunel Edge Hill v Anglii na trati Manchester – Liverpool (**základy Anglické soustavy**).
- 1837 – tunel Oberau v Německu na trati Lipsko-Drážďany (**základy Rakouské soustavy**).
- 1839 – železniční tunel Gumpoldskirchen v Rakousko-Uhersku na Jižní dráze (**Rakouská soustava**).

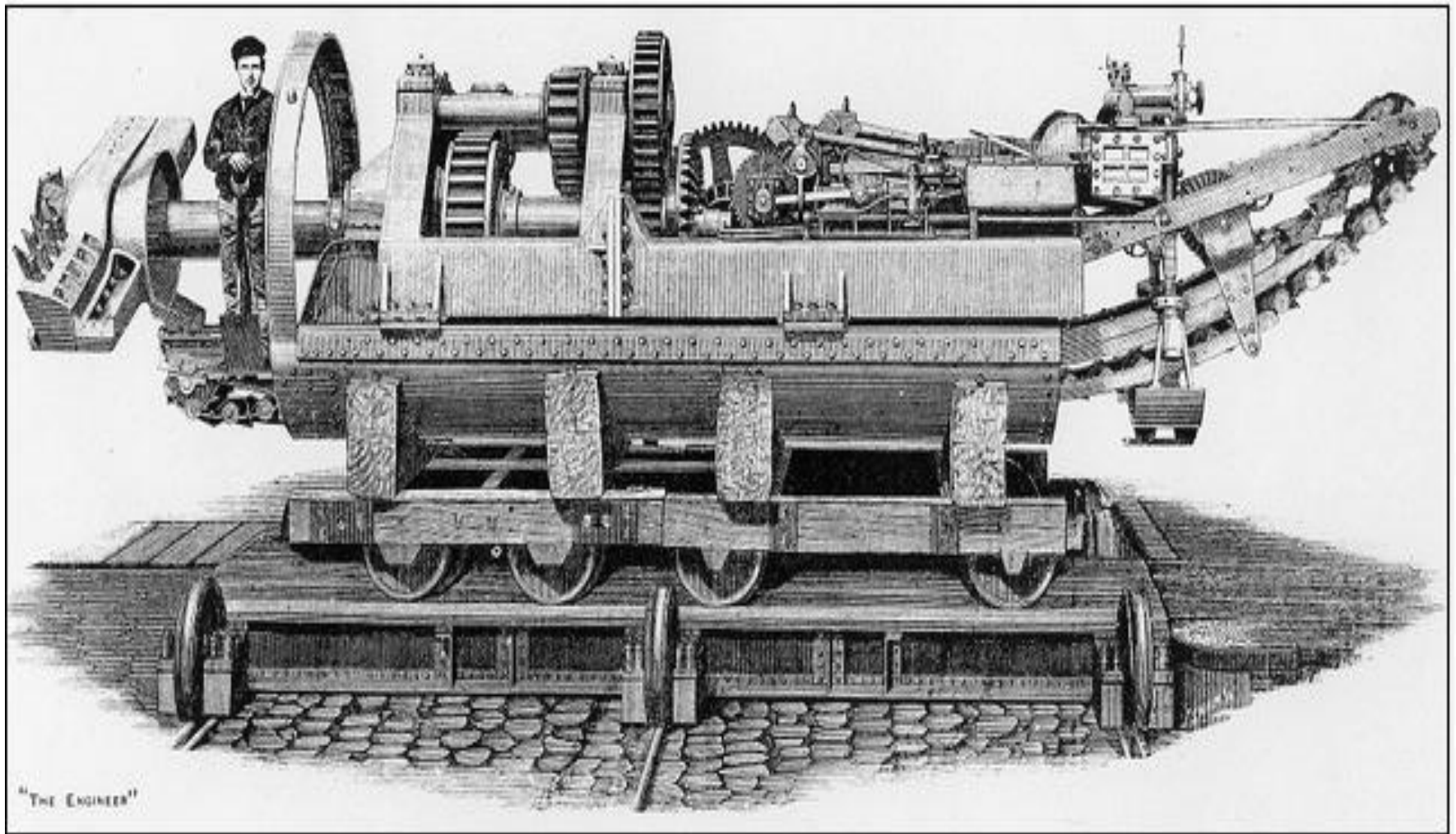
Železniční tunely – 2. pol.19 stol. a začátek 20.stol

Starší železniční tunely	Výstavba	Typ	Délka
Mt Cenis (Fréjus)	(1857–1871)	dvoukolejný	12 234 m
Gotthard	(1872-1878)	dvoukolejný	14 984 m
Arlberg	(1880-1884)	dvoukolejný	10 250 m
Simplon I	(1891-1906)	jednokolejný	19 803 m
Lötschberg	(1906-1912)	dvoukolejný	14 536 m
Simplon II	(1912-1921)	jednokolejný	19 825 m

- 1843 – první ražba štítem - pod Temží v Londýně (Isambard Brunel)



- 1881 – 1. pokus o tunel pod kanálem La Manche
razicí stroj Beaumont/English Ø 2,13 m



Průzkumná štola tunelu pod kanálem La Manche vyražená strojem Beaumont/English



Křídové vápence – průměrná rychlost ražby 15 m/den (!). Zastaveno v r. 1883.

- 1. pol. 20. stol. – prstencová metoda a nemechanizované štíty
- 1964 – **NRTM** – silniční tunel Massenbergr v Rakousku

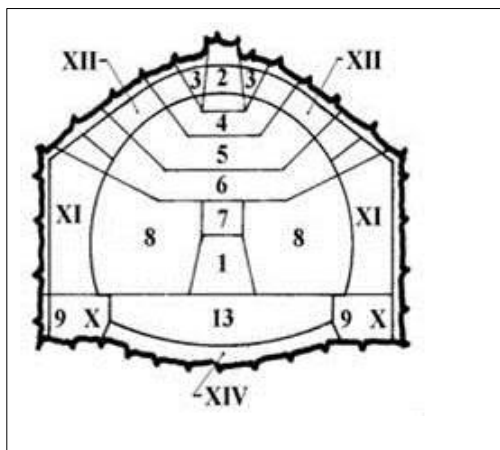
KLASICKÉ TUNELOVACÍ SOUSTAVY

- **Rakouská soustava**
 - krokvová (původní)
 - **podélníková** zvaná „modifikovaná“
- Německá soustava zvaná jádrová
- Belgická soustava zvaná podchycovací
- **Anglická soustava**

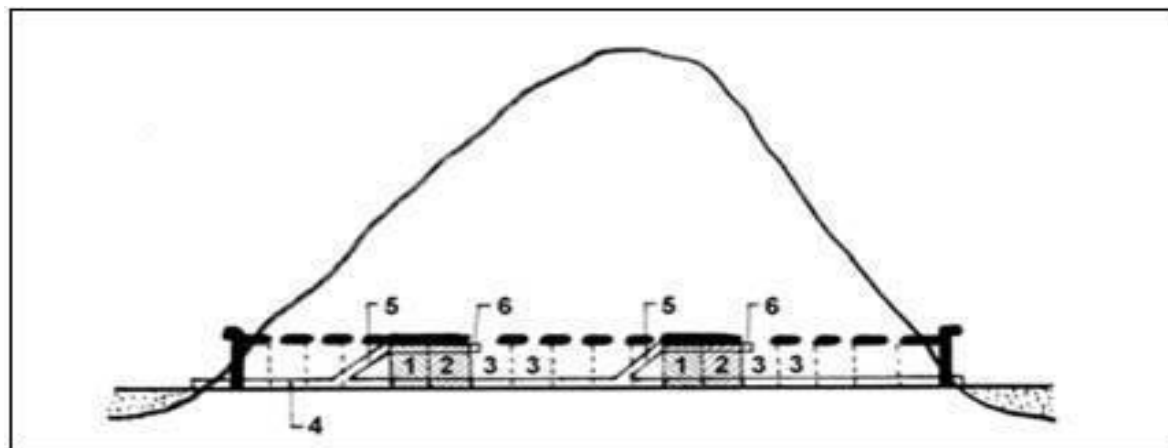
- Italská soustava
- Kunzova soustava

Rakouská soustava - piliřový systém tunelování

Schema pobírání

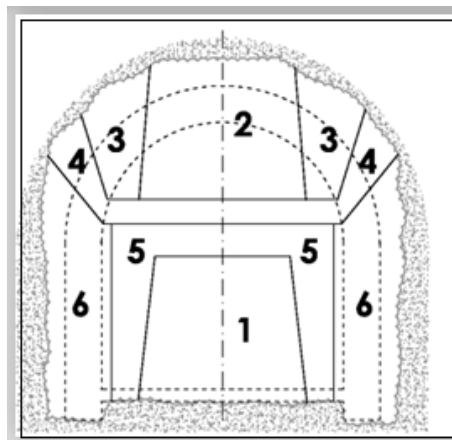


Sled prací

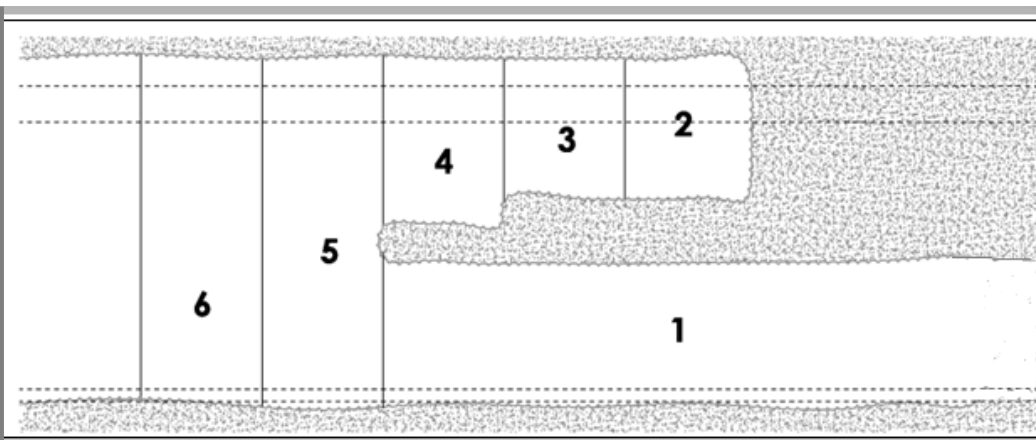


plynulý systém tunelování

Schema pobírání

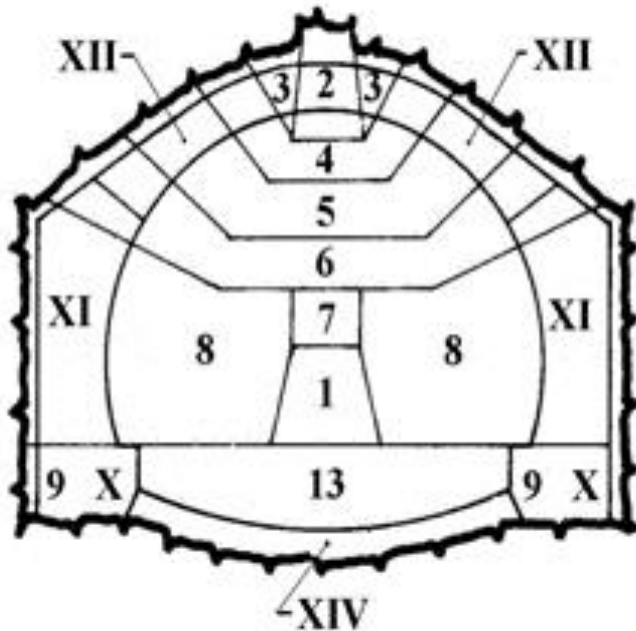


Sled prací



Rakouská soustava (pilířový systém)

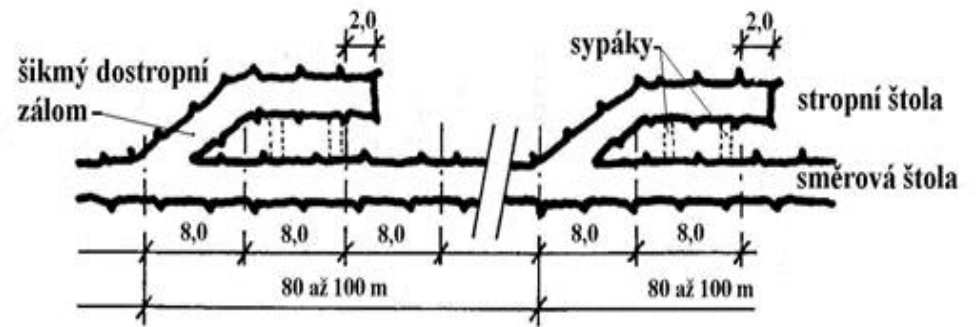
Schema pobírání



výlomy - arabská čísla

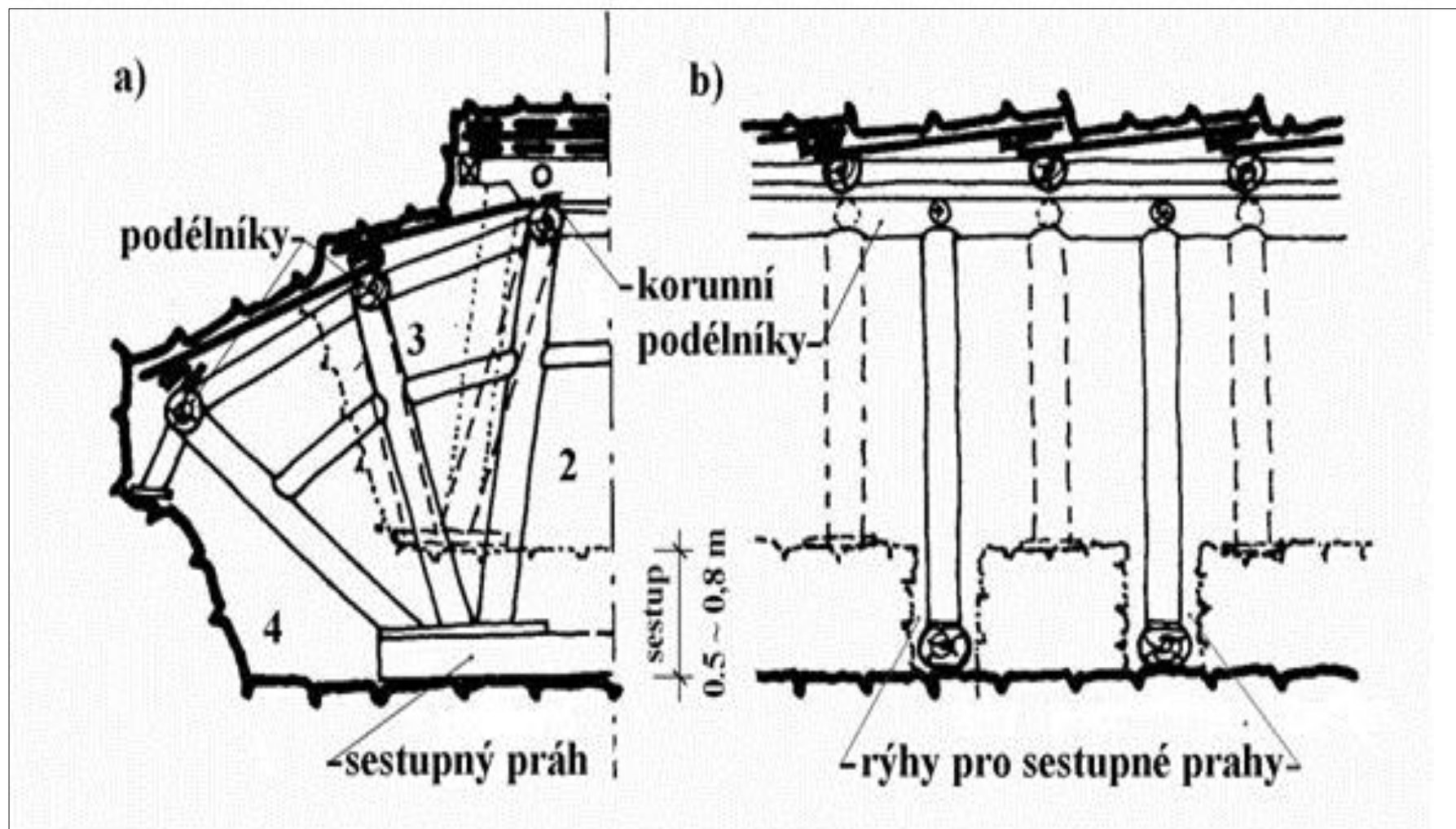
zdění - římská čísla

- 1 - směrová štola
- 2 - stropní štola
- 3 až 6 - výlom kaloty
- 7 - výlom pro hlavní sloupy
- 8 - výlom opěří
- 9 - výlom základů
- X - zdění základů
- XI - zdění opěr
- XII - zdění klenby
- 13 - výlom dna
- XIV - zdění spodní klenby

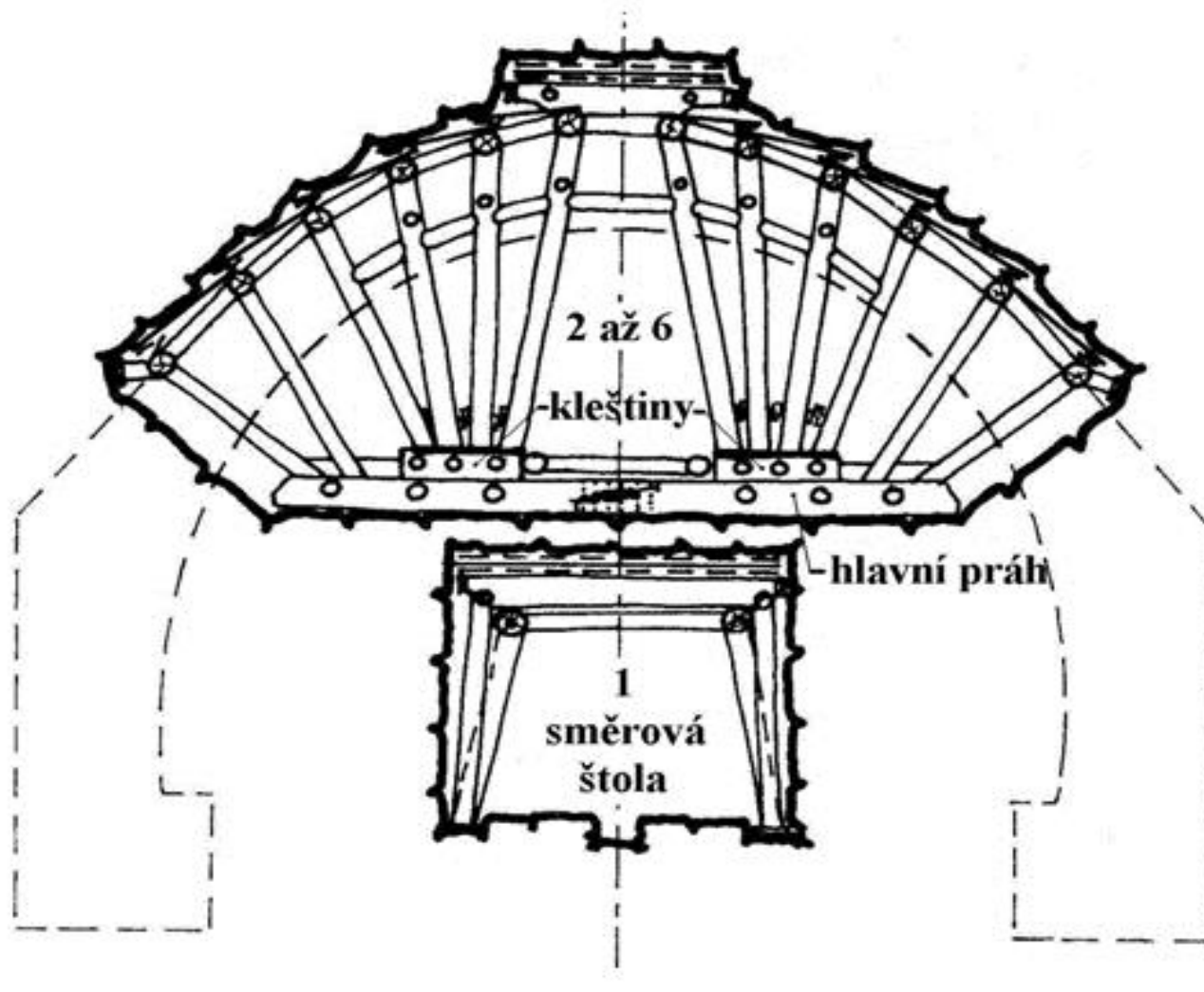


Dostrovní zálomy při pilířovém ražení

Postup pobírání v kalotě

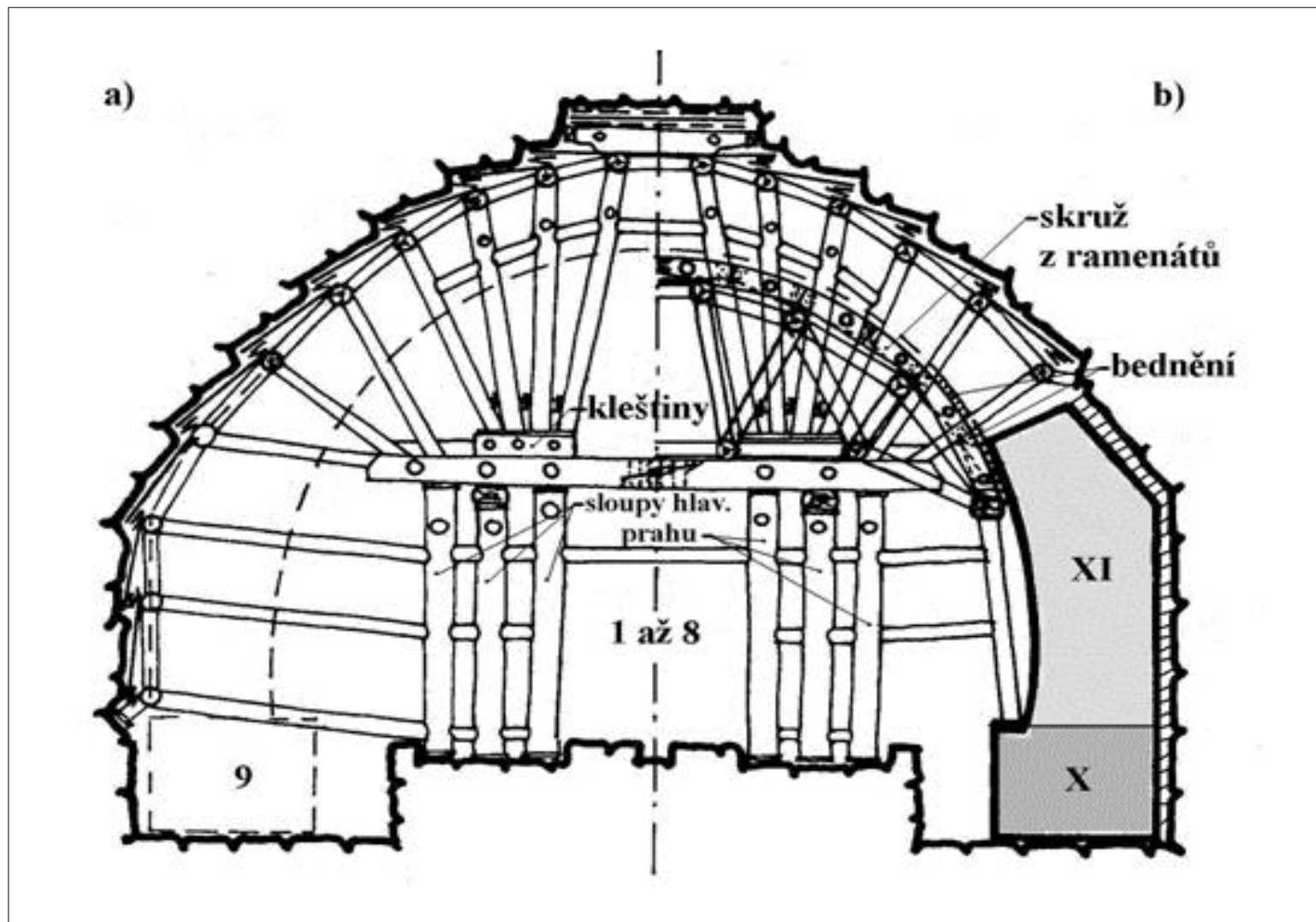


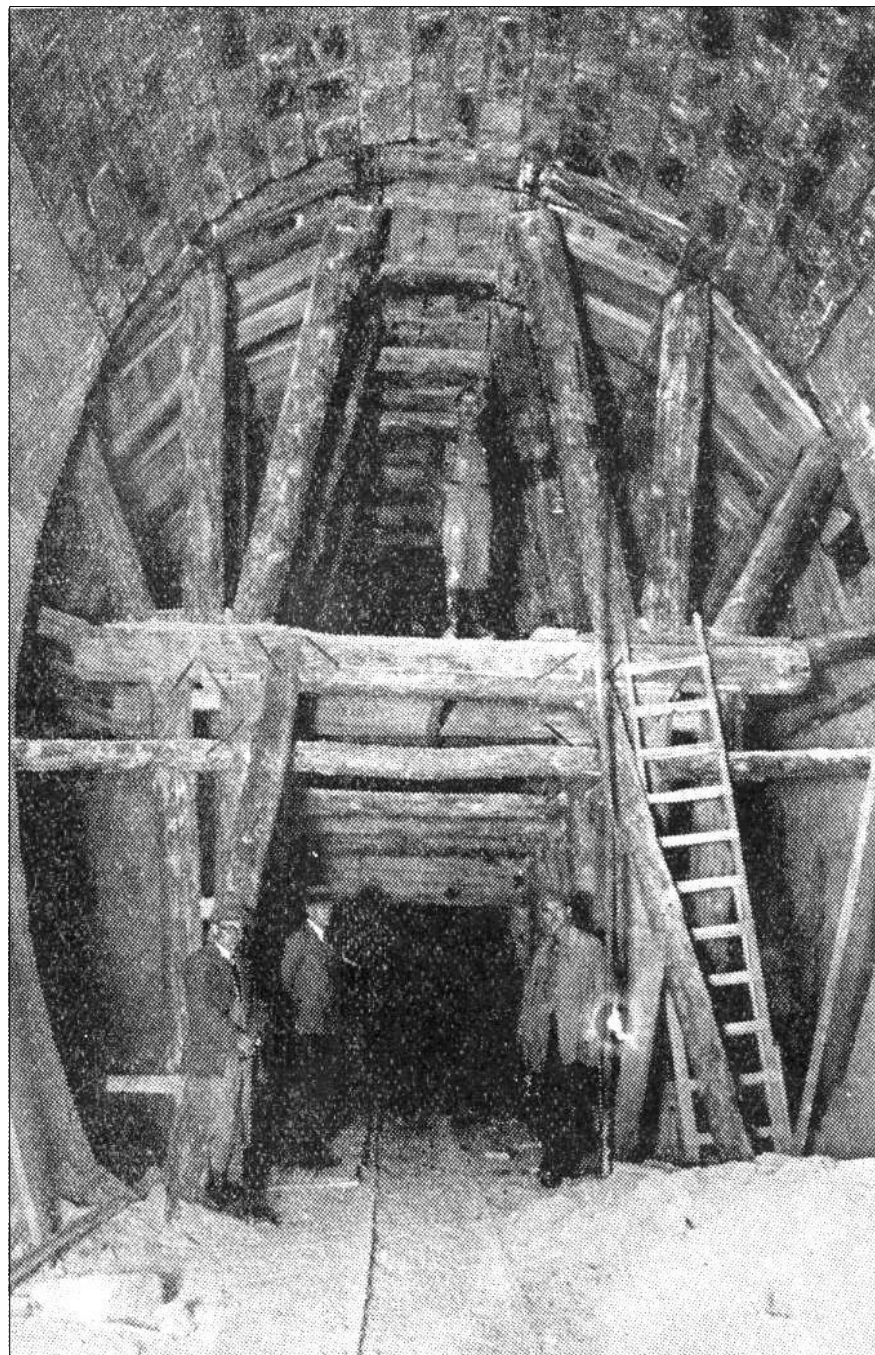
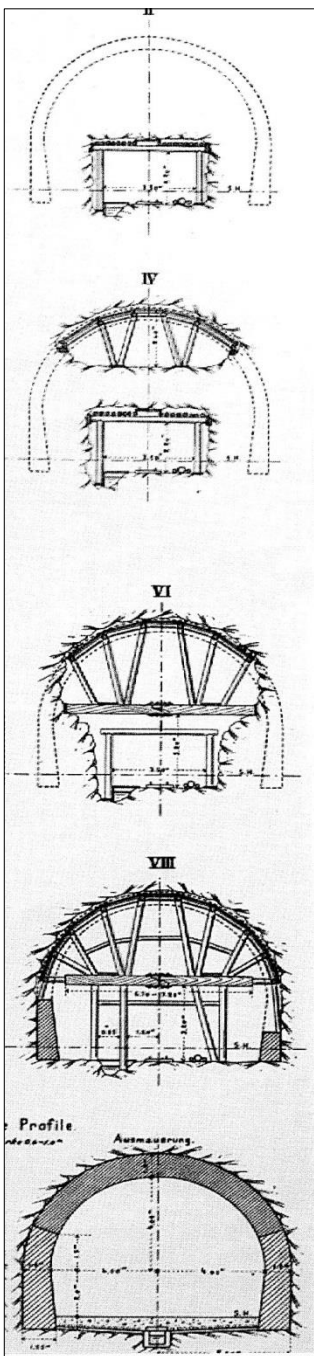
Výdřeva kaloty



Výdřeva plného výlomu

Zednická výdřeva





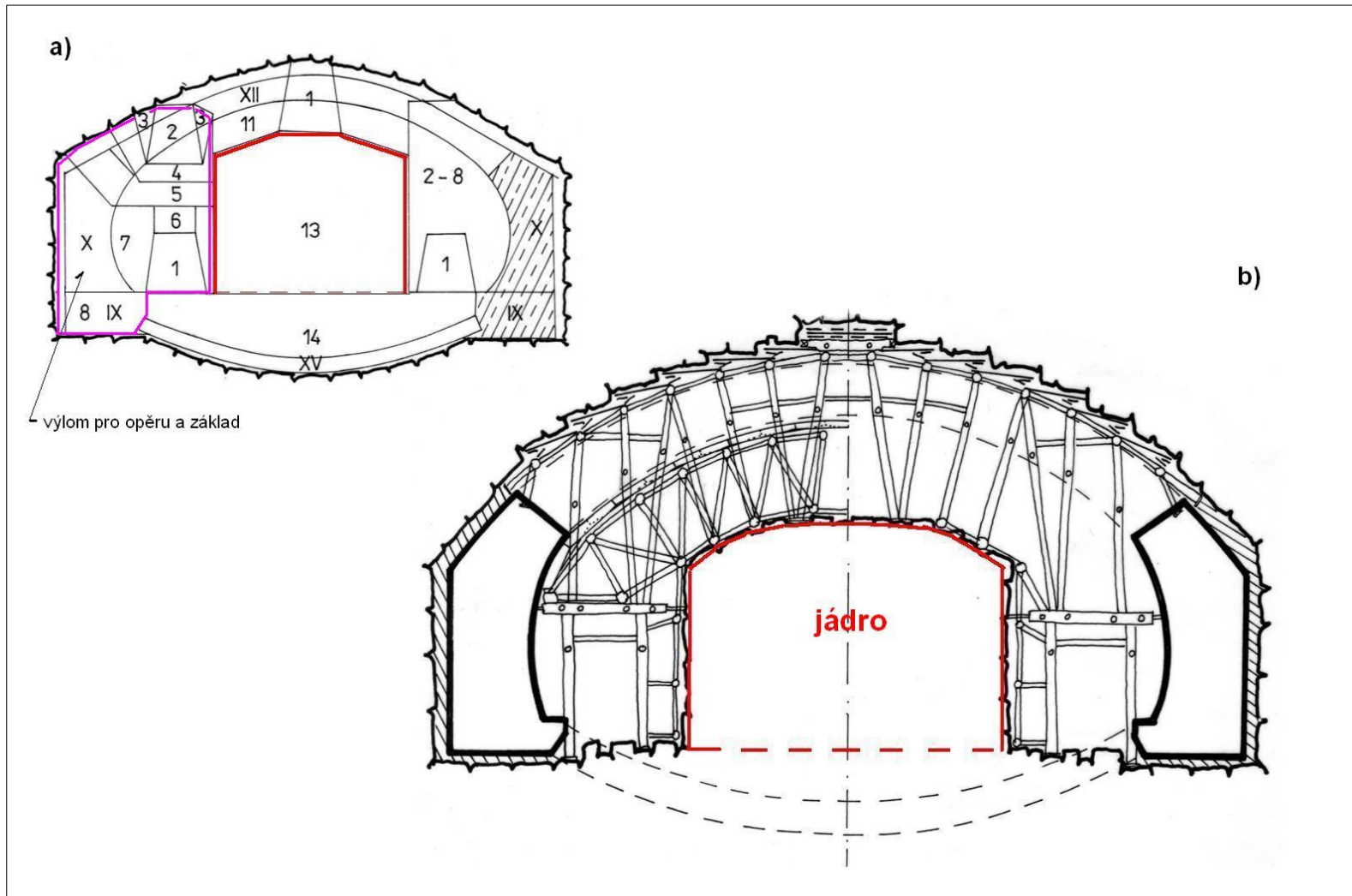
Rakouská soustava

Výdřeva plného
 výlomu
 1. Vinohradského
 tunelu (1871)

Výuková štola Josef FSv ČVUT



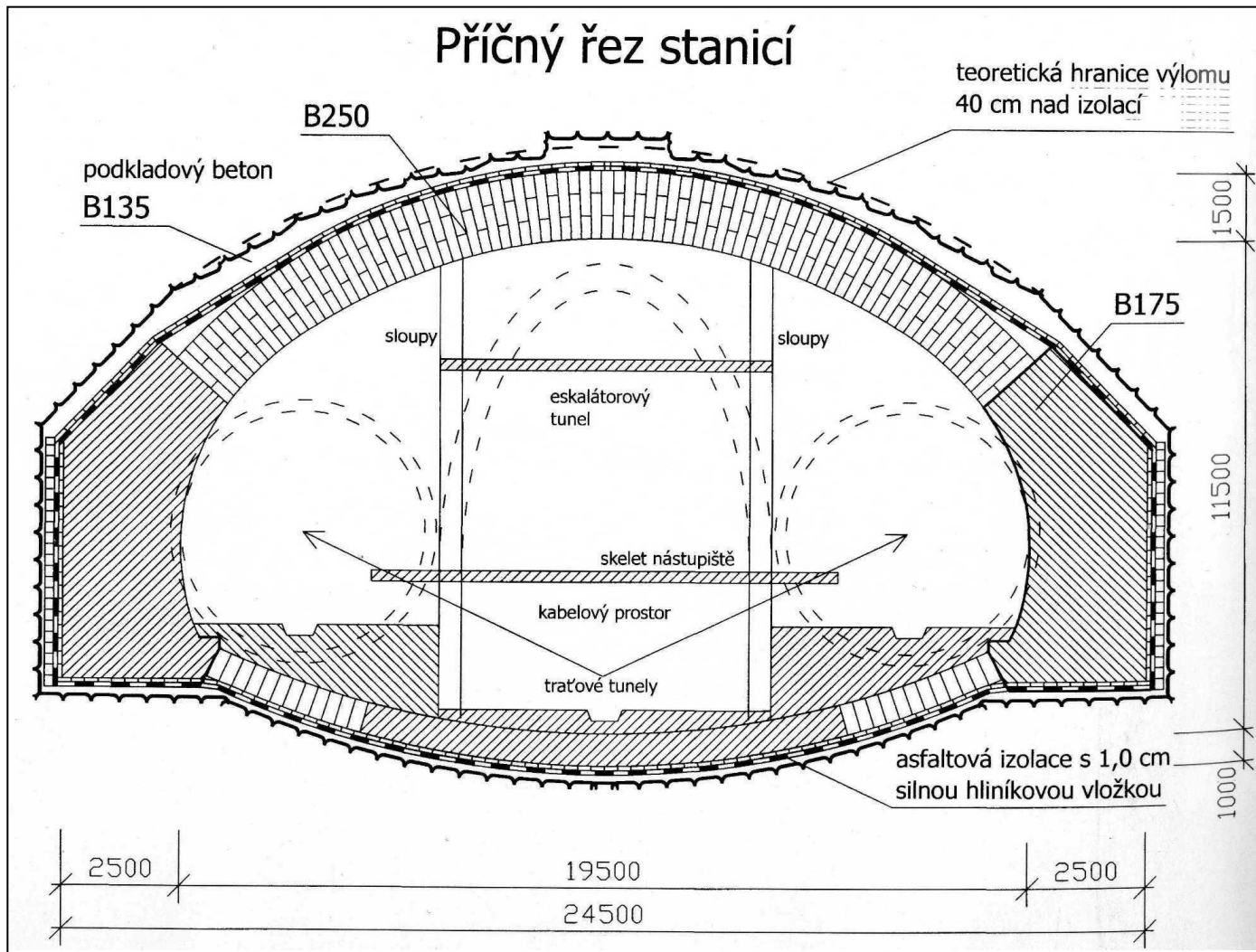
Německá soustava tzv. jádrová



a) Schema pobírání

b) Výměra plného výlomu

Stavba „stanice“ Klárov (1953)



Stavba Klárov (1953)



čelo stanice

Stavba Klárov

(1953 – jádrová soustava)



Zdění klenby

Stavba Klárov

(1953 – jádrová soustava)



výlom jádra

Spojka tras metra „C“ – „A“

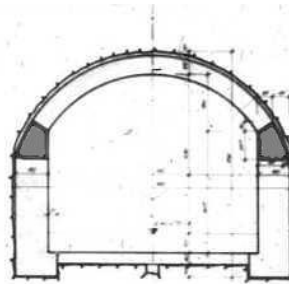
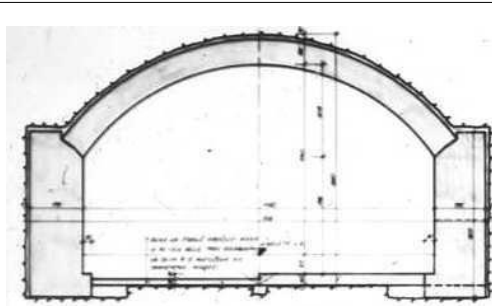
(1972 – dl. 73 m, 4x rozšíření průřezu na 114 m²)



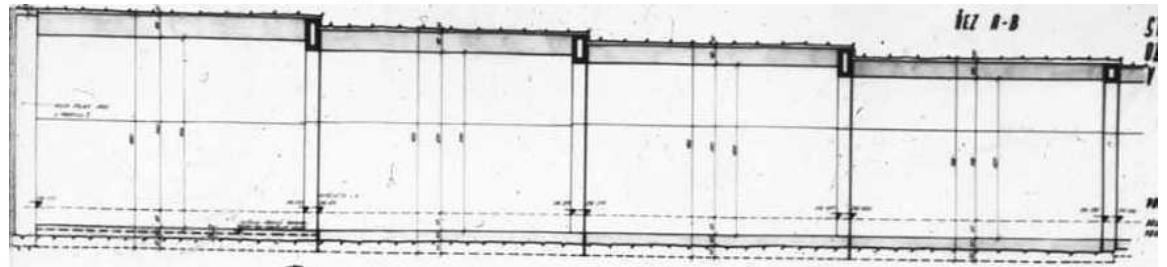
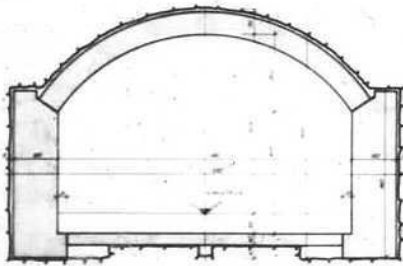
Pohled směrem k Nuselskému mostu

Spojka tras metra C – A

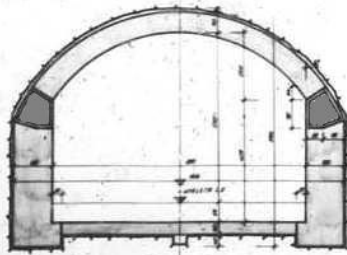
(1972 - modernizovaná jádrová a belgická soustava)



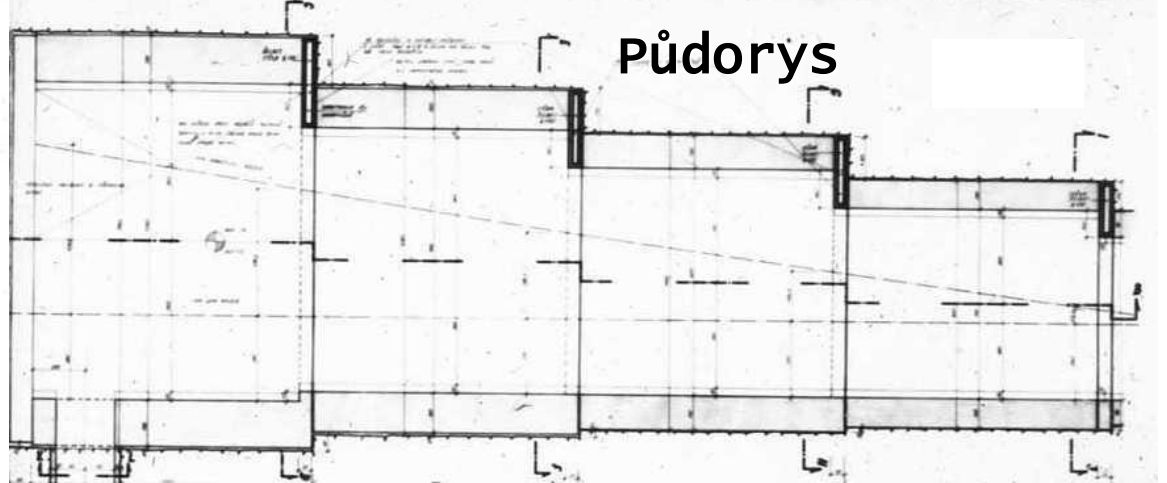
Podélný řez



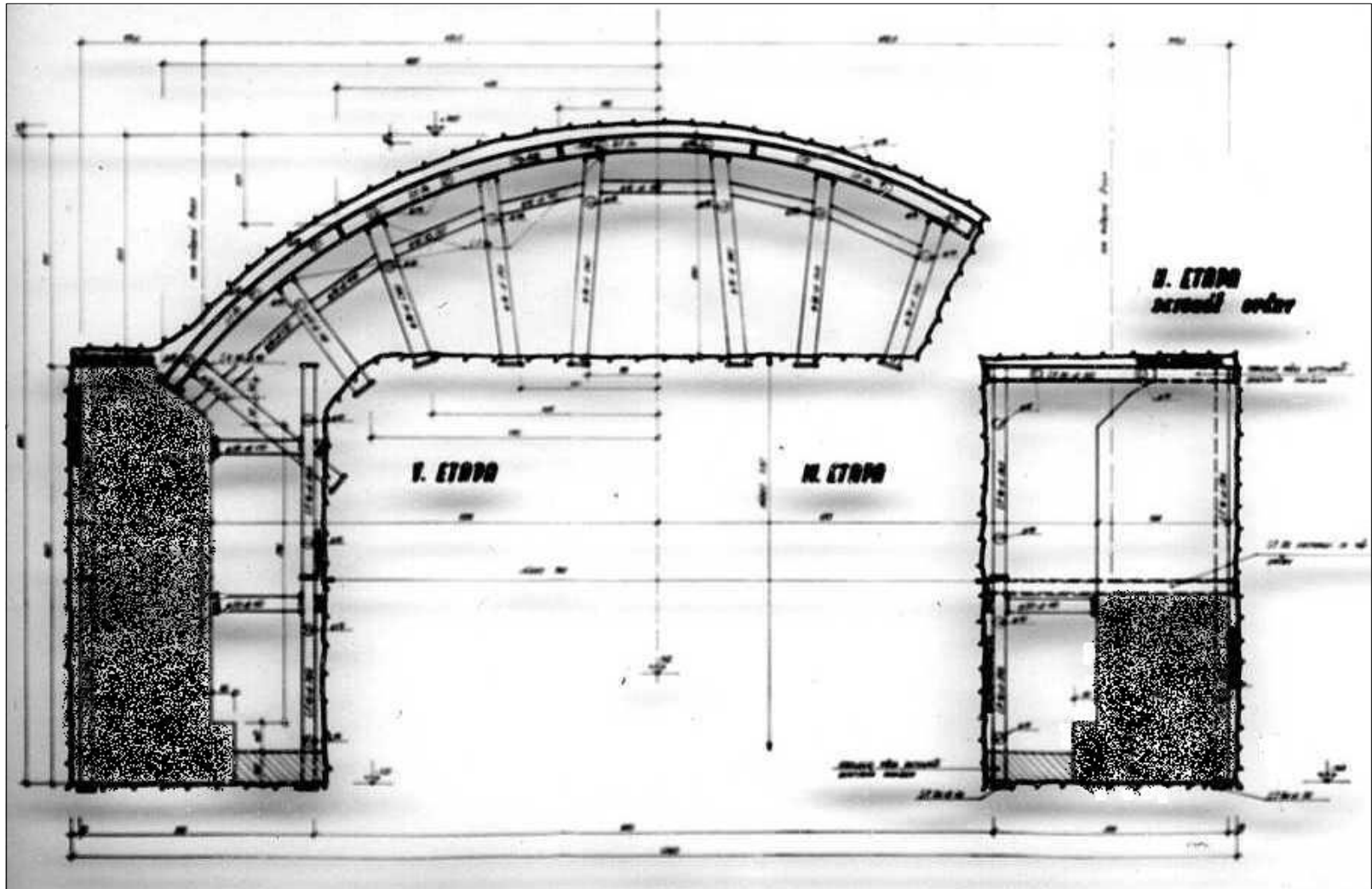
Půdorys



Příčné řezy

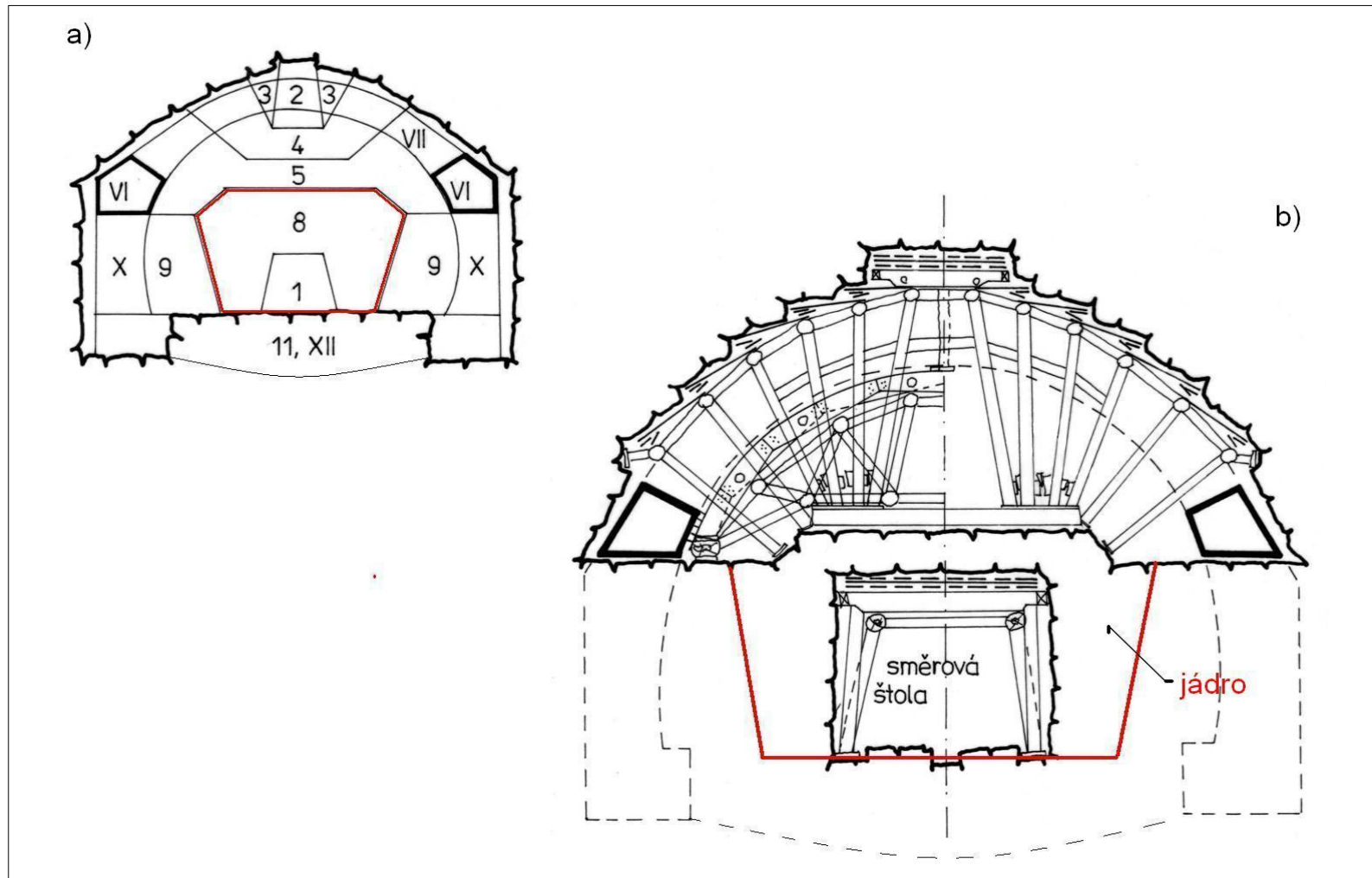


Modernizovaná jádrová soustava (1972)



Spojka C - A

Belgická soustava tzv. podchycovací



a) Schema pobírání

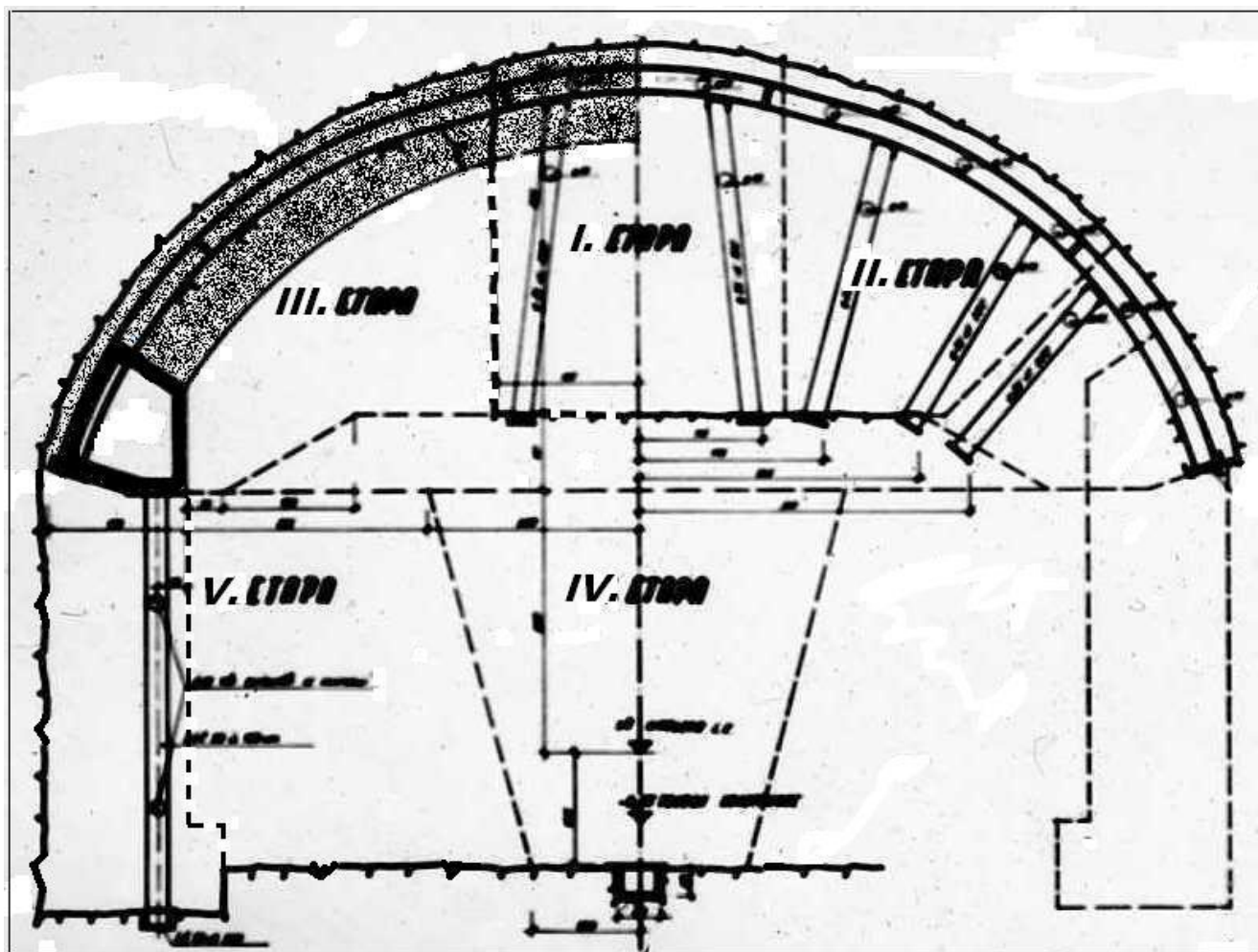
b) v ýd řeva plného výlomu

Stavba Klárov (belgická soustava - 1953)



Provádění opěr

Modernizovaná belgická soustava

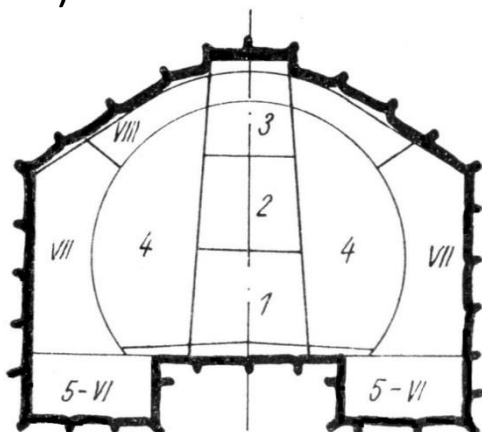


Spojka C – A (1972)

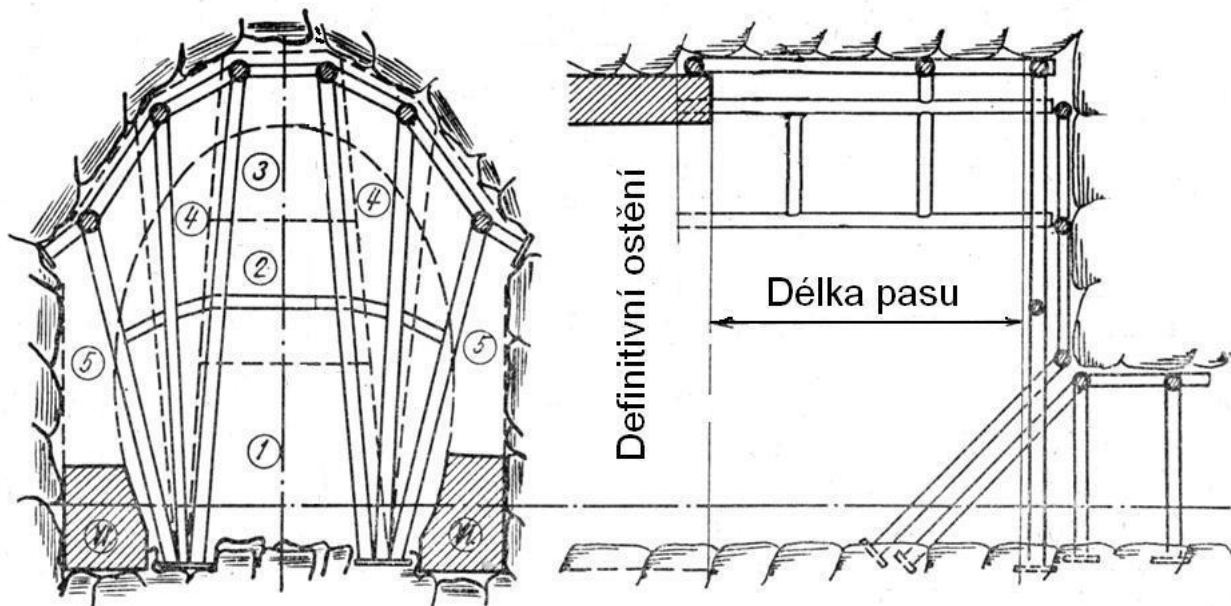
železniční tunel Bílá skála v Praze-Libni (1975)

Anglická soustava

a)



b)



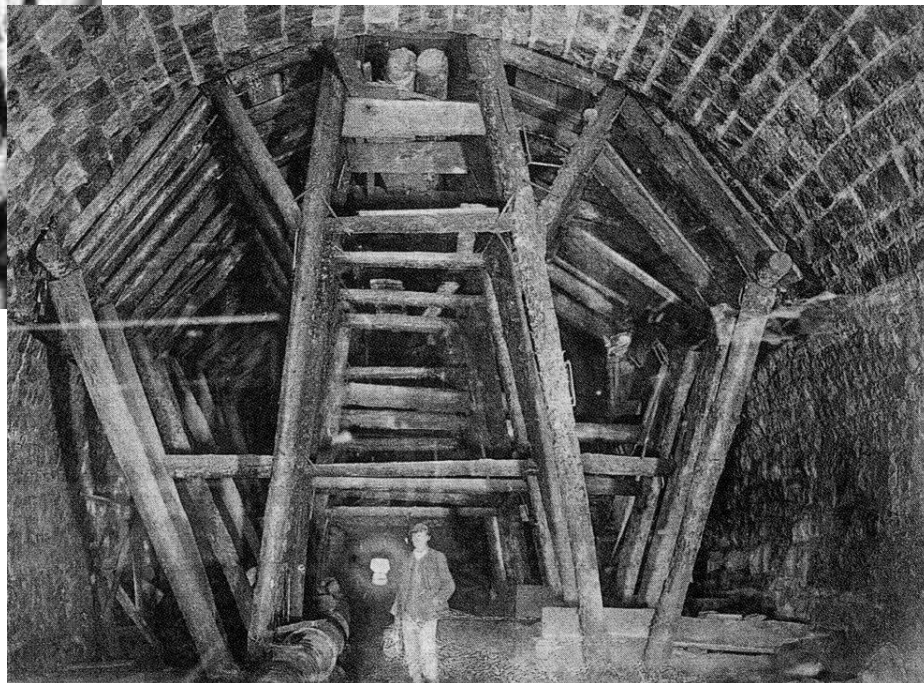
a) Schema pobírání

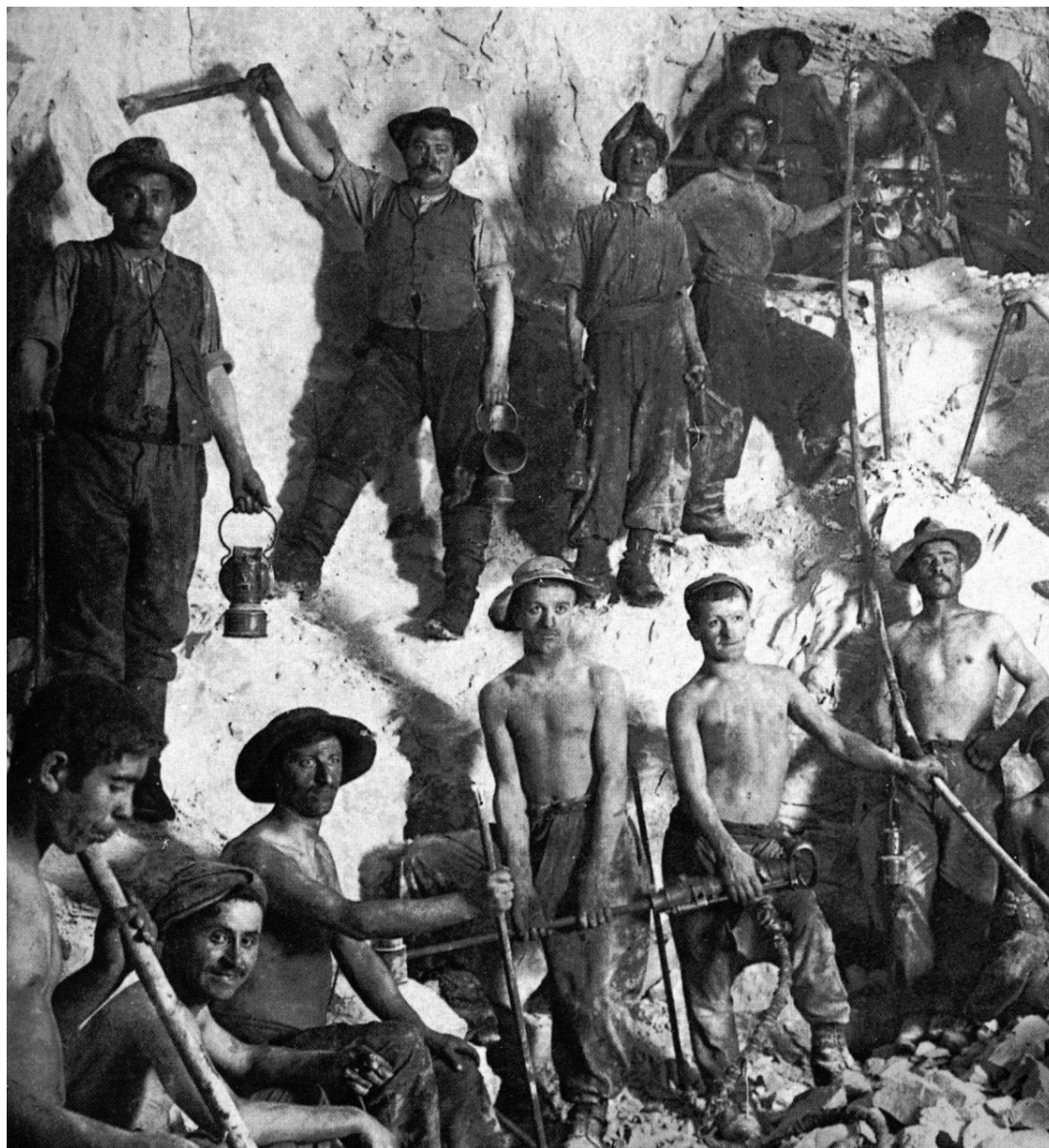
b) v ýdřeva plného výlomu

Lötsgbergtunnel – 14.605 m



Doba výstavby 5,5 roku
1906 až 1912



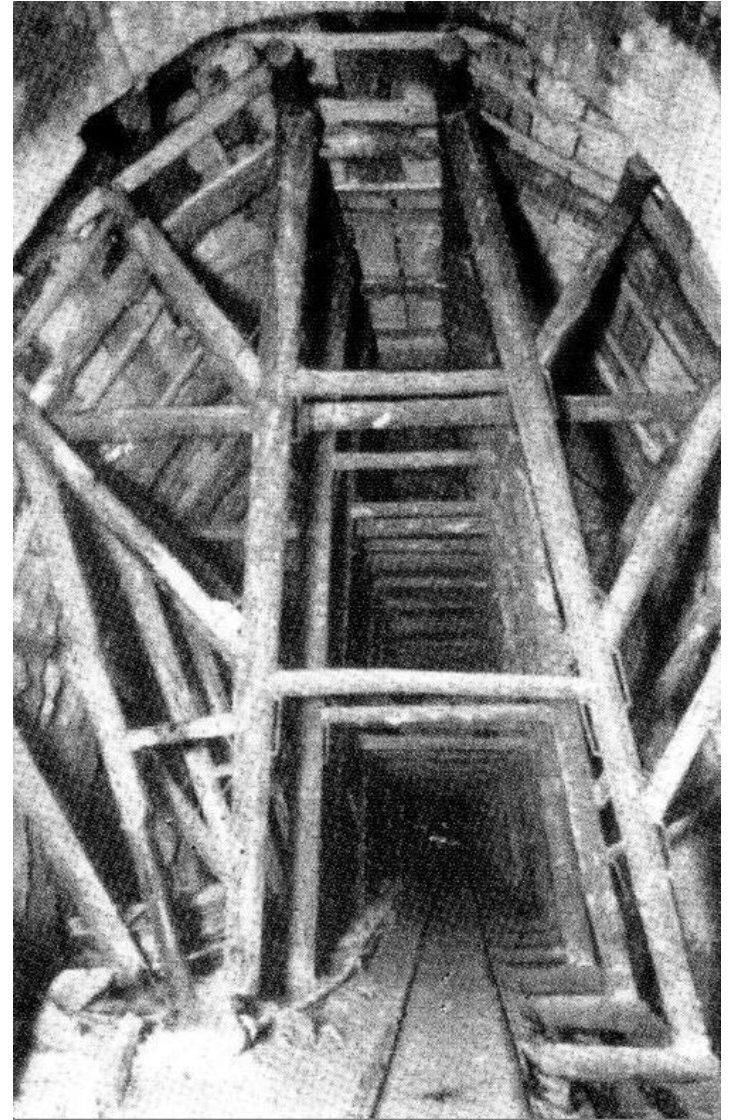


Tuneloví dělníci při ražbě Lötschbergského tunelu

Simplontunnel – 19.803



Doba výstavby 8 let
1899 až 1906





Simplonské tunely I a II
jižní portál - současný stav ↓



↑ Simplon I – jižní portál,
začátek výstavby Simplonu II
1912

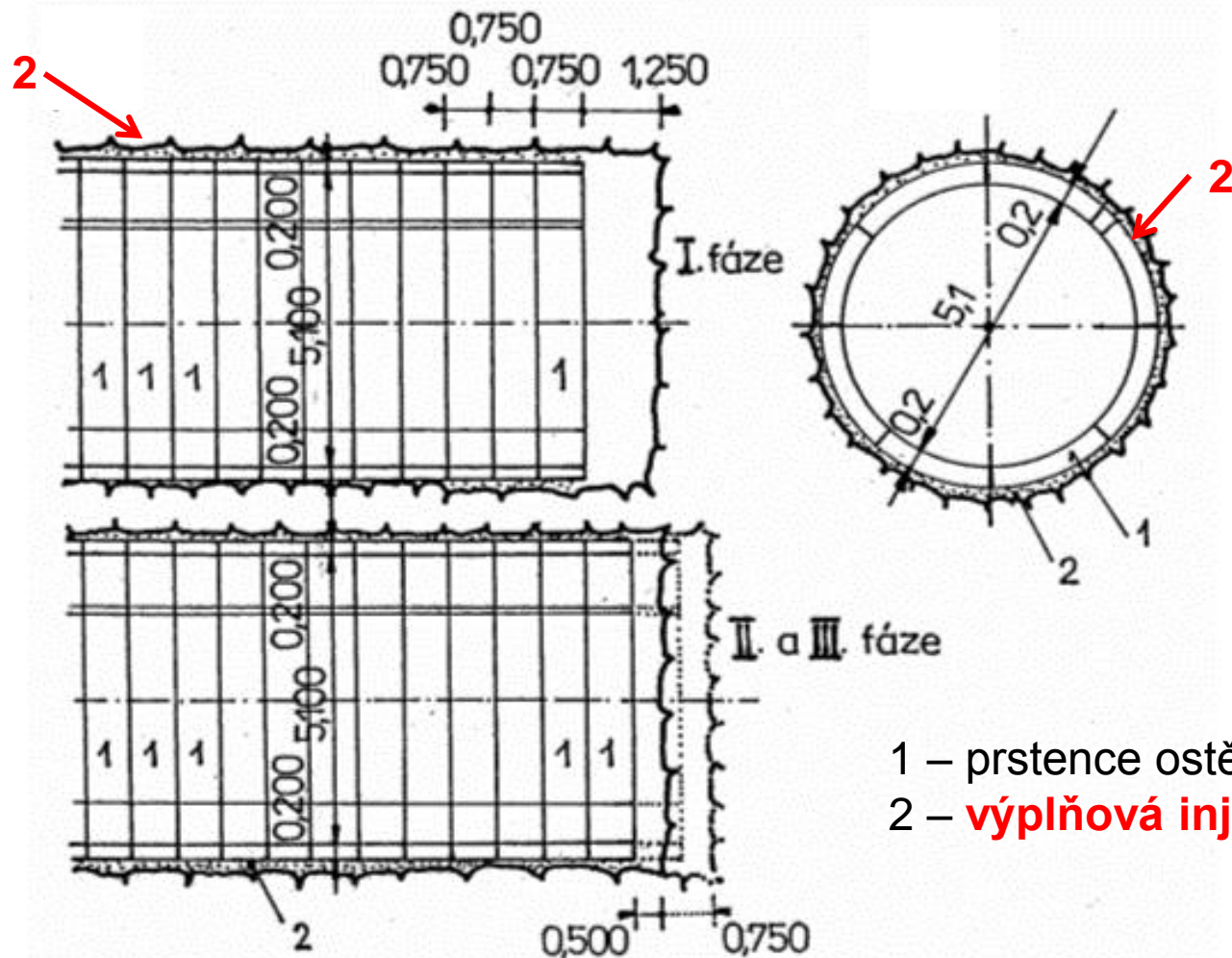
Současné metody konvenčního tunelování

- A. Prstencová metoda.
- B. Nová rakouská tunelovací metoda (NRTM).**
- C. Norská metoda tunelování („drill and blast“ – NTM).
- D. ADECO – RS (Lunardiho metoda – „NITM“).
- E. Metoda obvodového vrubu („Perforex“, obecně metody „Pre-Lining Systems“ – PLS).
- F. SCL (Sprayed Concrete Lining), Lasershell (Anglie).
- G. Spritzbetonbauweise, Kernbauweise (Švýcarsko).
- H. Metoda čelního odtěžování (ražba pod zastropením, metoda „želva“).



DĚKUJI ZA POZORNOST

A. PRSTENCOVÁ METODA



Základní atributy prstencové metody

- Obvykle kruhový tvar ostění z dílců (tubingů) – ukládání erektozem.
- Tvarově neurčité ostění (staticky přeurtité) – nutná okamžitá výplňová injekce.
- Nečleněný výrub – problémy se stabilitou čelby (pilot-štola, kotvení čelby – „pražská“ prstencová metoda).
- **„Univerzální“ metoda** (výztuž bezpečná, málo hospodárná).

B. NOVÁ RAKOUSKÁ TUNELOVACÍ METODA

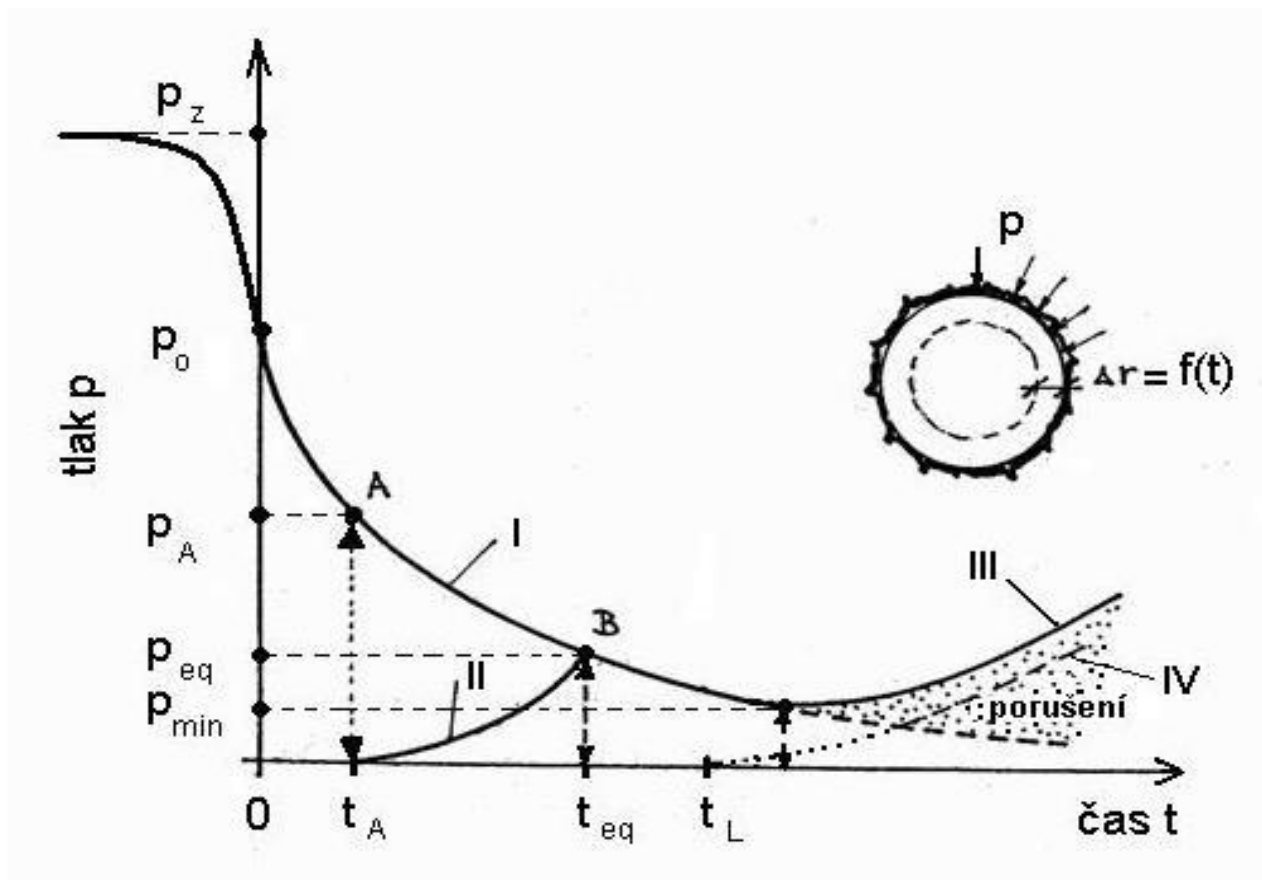
- Historický vývoj:
 - Prof. L. von Rabcewicz – patent z roku 1948 – **zajištění výrubu dvouvrstevným ostěním.**
 - Ing. A. Brunner – patent z roku 1953 – **zajištění stříkaným betonem.**
 - Prof. L. von Rabcewicz – 1962 – formuloval základní **zásady nového postupu tunelování nazvaného NÖT.**
 - Prof. L. Müller – 1978 Salzburg – **22 zásad NÖT.**

Základní principy NRTM

- **Nosné spolupůsobení horninového masivu s primárním ostěním.**
- Odhad doby stability nevystrojeného výrubu.
- Optimální odhad okamžiku instalace primárního ostění a rychlosti ražby.
- **Monitoring deformací**
- **Deformace masivu vedou ke snížení horninového tlaku na výrub i primární ostění – Fenner-Pacherova křivka.**
- Použití doplňujících stabilizačních a protideformačních opatření.
- Po ustálení deformací primárního ostění se instaluje sekundární ostění.

- **Adaptabilní metoda** – observace ražby zajišťuje její bezpečnost a současně hospodárnost

Rozšířená Fenner – Pacherova závislost



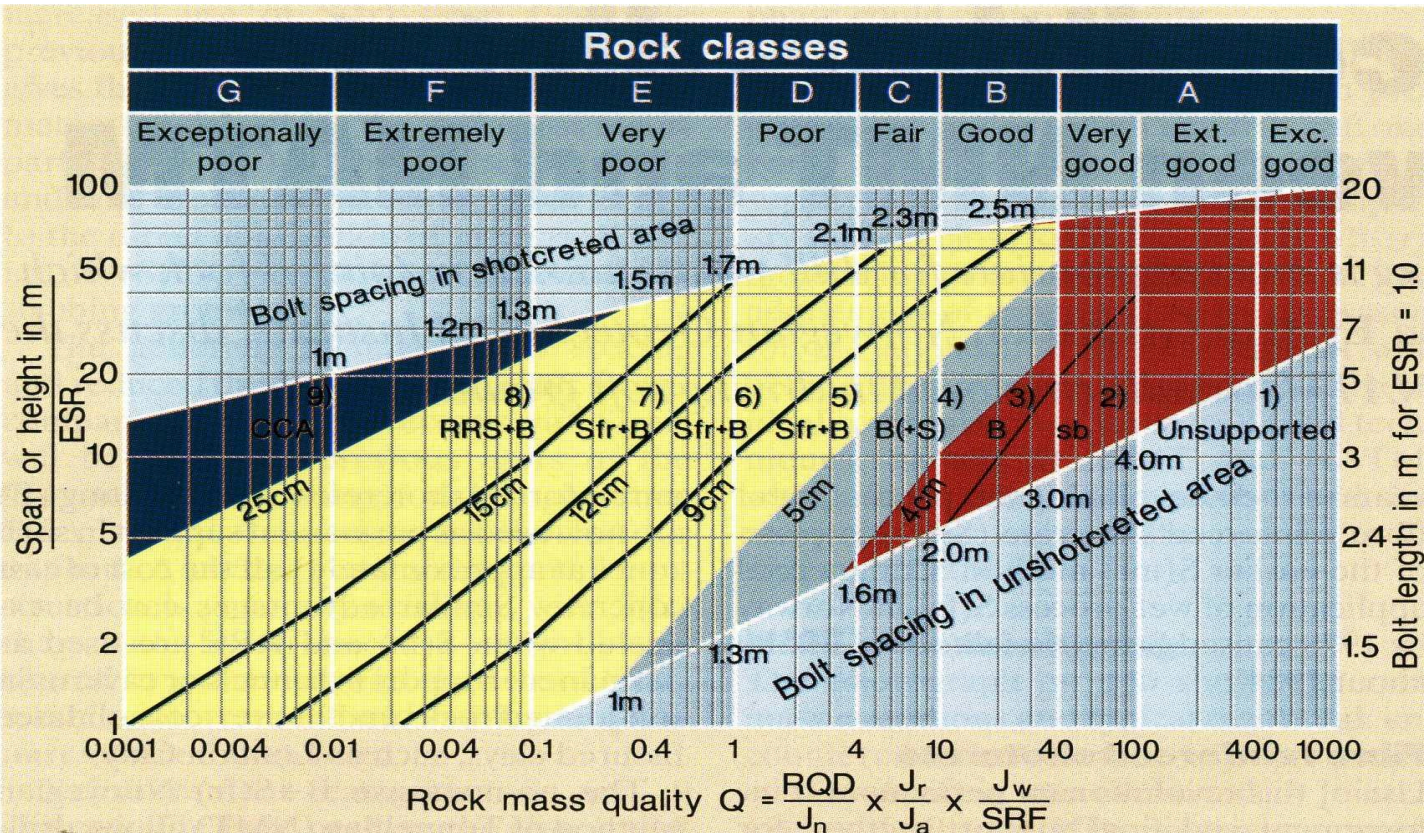
I – křivka reakce horninového masivu II – křivka odporu zabudované výztuže
III – tlak horniny po porušení IV – křivka odporu pozdě zabudované výztuže

C. NORSKÁ TUNELOVACÍ METODA

- Vhodná metoda pro postup ražby „drill and blast“.
(stabilní výruby, dlouhé záběry 3 až 6 m, rozpojování trhavinami, svorníková výztuž, stříkaný beton, dočasná výztuž je součástí definitivního ostění)
- Vyztužení výrubu se provádí v podstatné míře stříkaným drátkobetonem.
- Návrh trvalého zajištění výrubu se provádí na základě klasifikačního systému Q.
(klasifikace vytvořená v NGI na základě poznatků z více než 1000 sledovaných tunelů. Původně označovaná jako BLLL – Barton, Liehm, Loset, Lunde).

Vyztužovací kategorie při NTM

diagram Grimstad-Barton



REINFORCEMENT CATEGORIES:

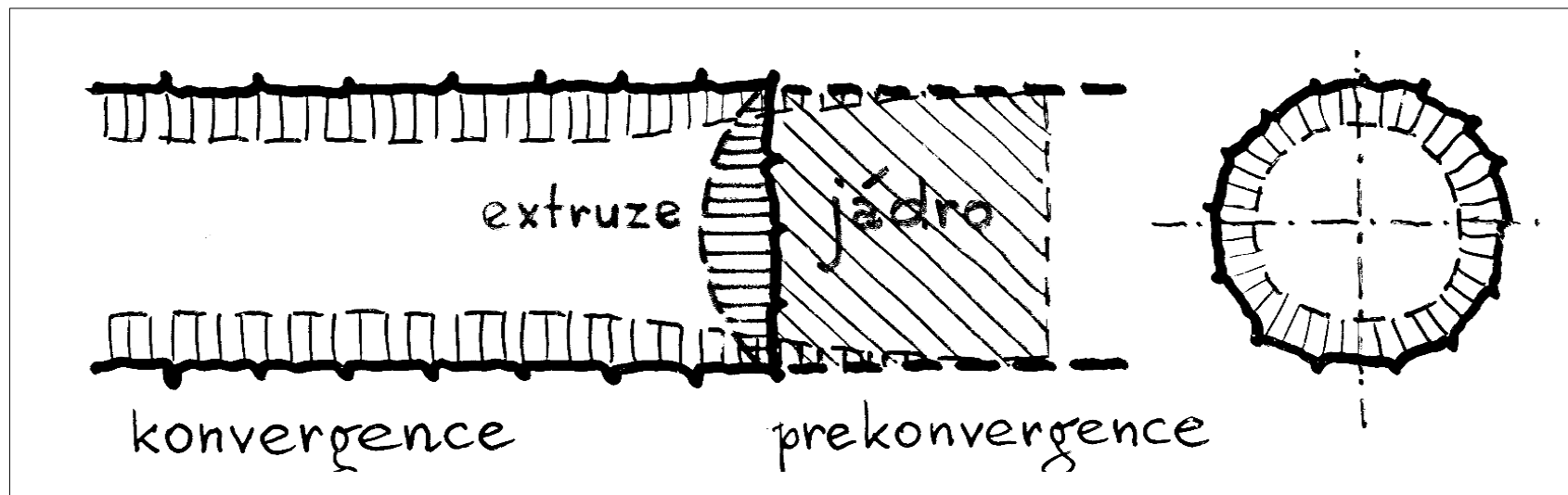
- 1) Unsupported
- 2) Spot bolting, sb
- 3) Systematic bolting, B
- 4) Systematic bolting, (and unreinforced shotcrete, 4-10cm), B(+S)
- 5) Fibre reinforced shotcrete and bolting, 5-9cm, Sfr+B
- 6) Fibre reinforced shotcrete and bolting, 9-12cm, Sfr+B
- 7) Fibre reinforced shotcrete and bolting, 12-15cm, Sfr+B
- 8) Fibre reinforced shotcrete >15cm, reinforced ribs of shotcrete and bolting, Sfr,RRS+B
- 9) Cast concrete lining, CCA



Tunel Siglufjordur
Odpal čelby

D. ADECO - RS

L'Analisi delle Deformazioni Controllate nelle Rocce e nei Suoli
Prof. Lunardi



Ražba plným profilem.

Zpevnění oblasti horninového masivu předčelbového jádra.

Masivní provizorní ostění.

Rychlá výstavba definitivního ostění.

Tyto úpravy **zmenšují extruzi, prekonvergenci i konvergenci** –
důsledkem je zmenšení deformací nadloží a sedání povrchu.

Používaná stabilizační opatření při ADECO-RS:

Radiální kotvení

Axiální kotvení do předčelbového jádra

Sanační injektáž v nadloží jádra

Trysková injektáž nad jádrem

Obvodový vrub s předklenbou

Drenážní vrty do předpolí (?)

ADECO-RS je pokládáno za vhodnou alternativu k NRTM v obtížných podmínkách s monotónním geologickým vývojem.

Pokud deformace nadloží nejsou problémem, pak rychlá výstavba sekundárního ostění přestává být jednou z priorit této metody.

ADECO – RS (tunel Val di Sambro)



Ražba plným profilem, husté kotvení čelby laminátovými svorníky

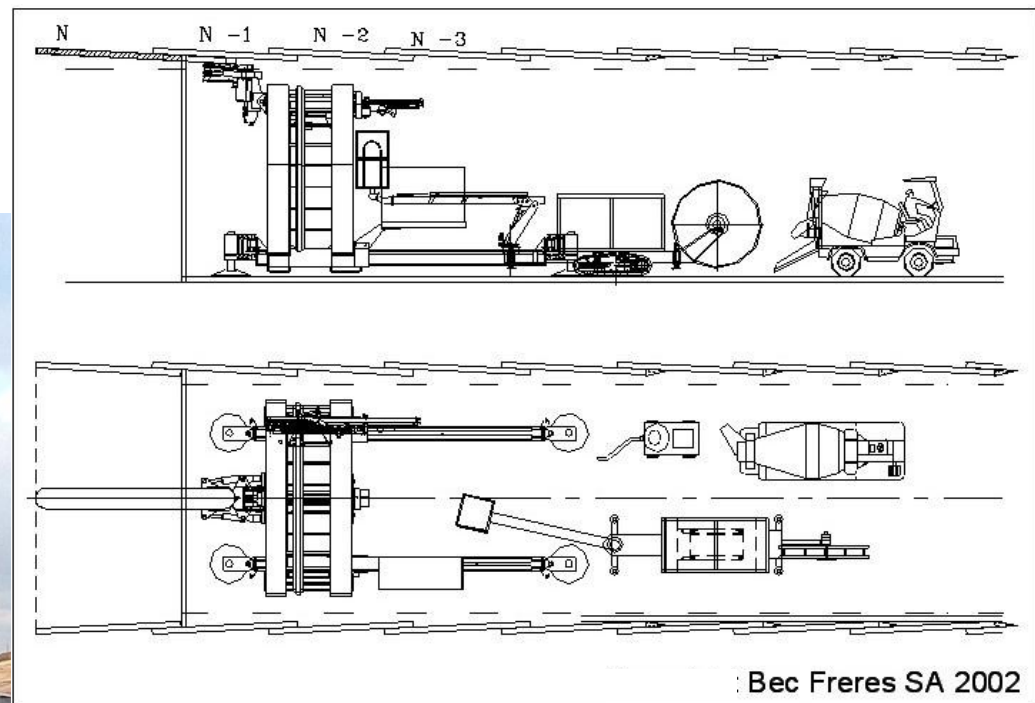
Malý odstup výstavby definitivního ostění od čelby



E. METODA OBVODOVÉHO VRUBU S PŘEDKLENBOU

(PreLining Systém - PLS)

Vrubovací stroj PERFOREX
na tunelu Březno



Schema postupu výstavby

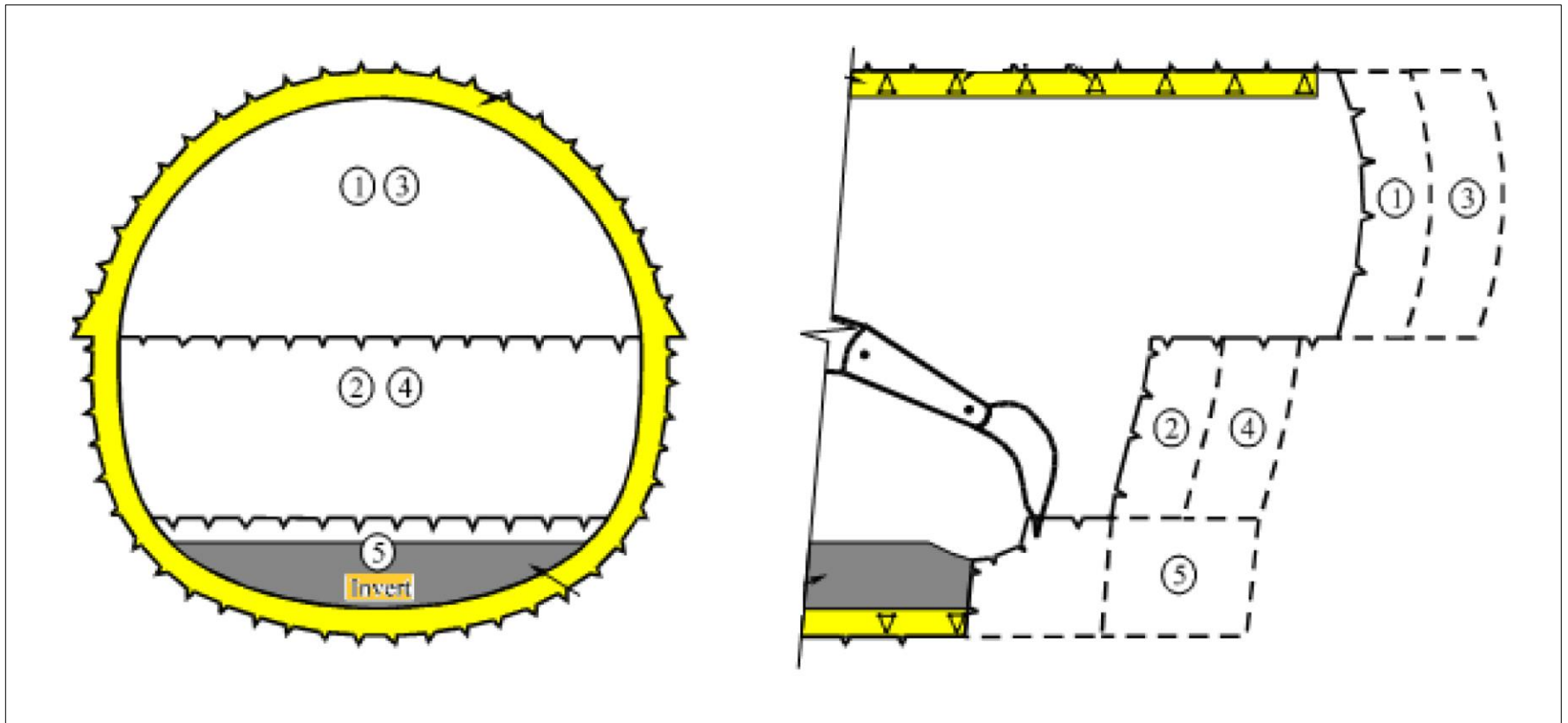
New PLS (Japonsko)



Odkryté lamely předklenby

F 2. METODA SCL (Anglie)

- Metoda principiálně blízká NRTM – používaná při výstavbě tunelů londýnského metra v prostředí tuhých jílu.
- Ražba horizontálně členěným profilem, ostění obvykle dvouplášťové se stříkanou mezilehlou izolací. Omezení výztužných sítí a ráků v primárním ostění i použitím drátkobetonu, sekundární ostění i z prostého betonu.
- Tvar výrubu ze statických důvodů je obvykle velmi blízký kruhovému profilu.
- **Rychlé uzavírání celého profilu** spodní klenbou ve snaze minimalizovat deformace nadloží.



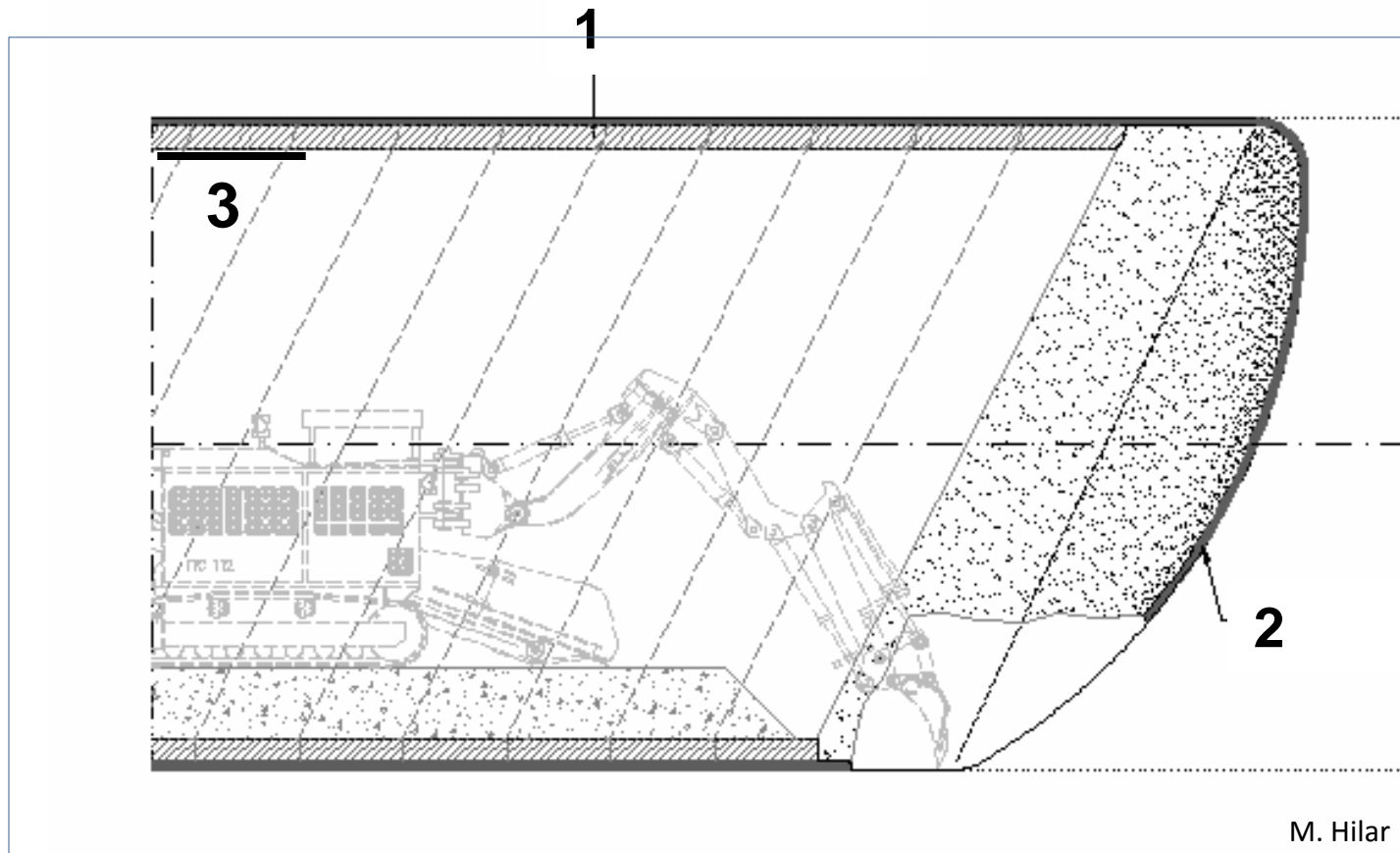
J. Korejčík

SCL - Ražba horizontálním členěním s rychlým uzavíráním primárního ostění (odstup invertu od čelby 6 až 8 m)

1 a 3 – záběry v kalotě, 2 a 4 – záběry v opěří, 5 – záběry ve dně profilu

F 1. METODA LASERSHELL (Anglie)

- Metoda používaná pro ražbu v tuhých londýnských jílech.
- Ražba plným profilem.
- Sklon a prostorové vyklenutí čelby zvyšuje její stabilitu a zmenšuje deformace výrubu i nadloží.
- Ostění jednoplášťové ze stříkaného drátkobetonu , vodotěsné.
- Tvar výrubu a dimenze ostění jsou průběžně monitorovány pomocí **laserového dálkoměru**, údaje jsou počítačově zpracovány – bezprostřední komunikace s obsluhou tunelbagru a s operátorem trysky stříkaného drátkobetonu.



Lasershell – schema postupu výstavby

Tři fáze detailního budování definitivního ostění ze stříkaného drátkobetonu:

1. Počáteční vrstva – tl. 75 mm stříkaného drátkobetonu, zajištění výrubu, utěsnění, vrstva bez statické funkce.
2. Konstrukční vrstva – tl. 200 až 250 mm drátkobetonu, definitivní statická funkce.
3. Dokončující vrstva - tl. 50 mm stříkaného betonu po dokončení ražeb, úprava.

G 1. SPRITZBETONBAUWEISE (Švýcarsko)

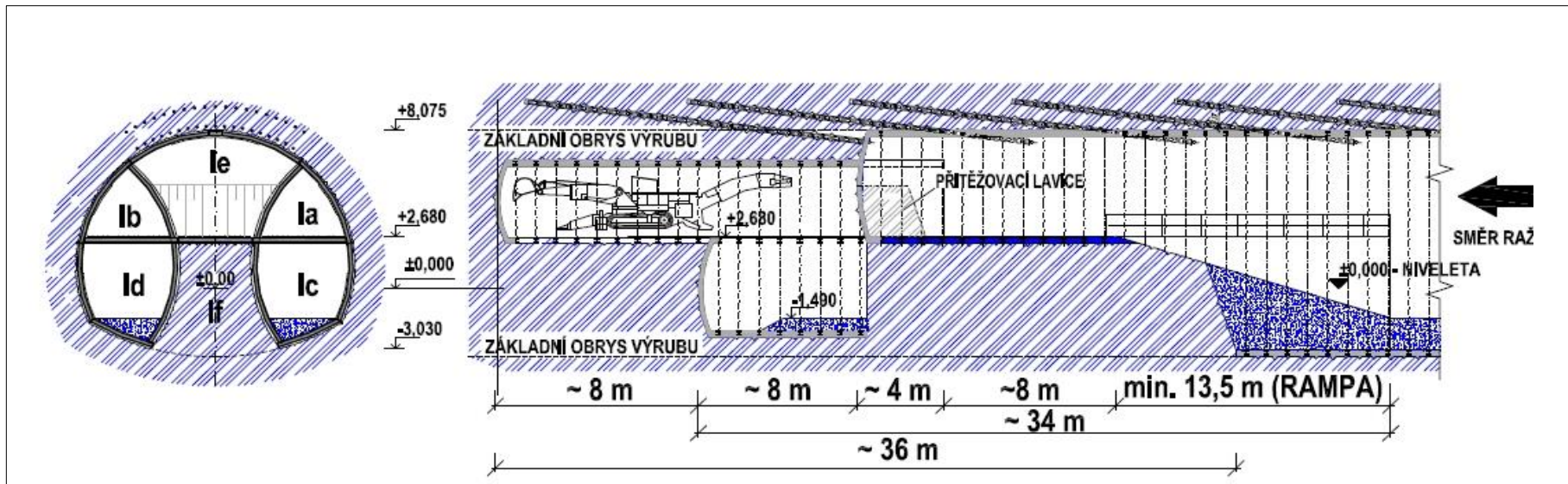
Metoda principiálně velmi blízká NRTM.



Fasenschaub Tunnel – dálnice A4 v kantonu Schaffhausen

G 2. KERNBAUWEISE (Švýcarsko)

- Modifikace metody Spritzbetonbauweise při svislém členění výrubu v tlačivých horninách.
- Masivní výztužné rámy z válcovaných H-profilů.
- Rozepření v úrovni počvy kaloty zůstává funkční po celou dobu výstavby primárního ostění.



Amberg

Kernbauweise – Královopolský tunel – VMO Brno

Odtěžování jádra rampou s likvidací středního rozepření

Královopolský tunel



Dodatečné odtěžování
jádra bez likvidace
středního rozepření

Tunel Uetliberg

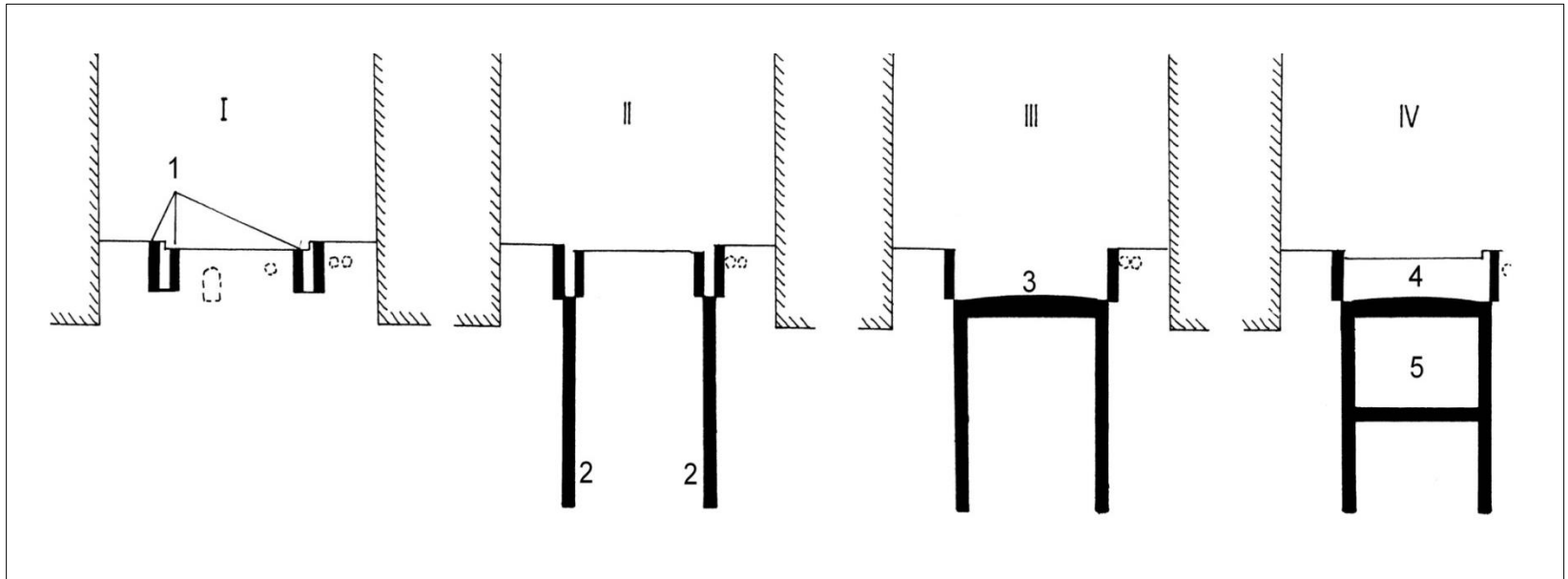


F. METODA ČELNÍHO ODTĚŽOVÁNÍ

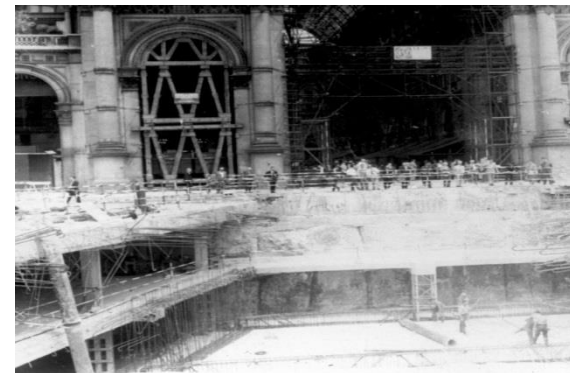
(Ražba pod zastropením)

- Provádění tunelů pod nízkým nadložím modifikací původní „milánské“ metody.
- Náhrada za výstavbu v pažené stavební jámě.
- V předvýkopu se provedou některou z technologií speciálního zakládání nosné prvky pro uložení definitivního stropu.
- Po jeho provedení se předvýkop zasype a na povrchu se obnoví provoz.
- Pod ochranou stropu se provádí čelní odtěžování vnitřního prostoru tunelu.
- Úprava vnitřního líce stěn tunelu po vytěžení.

Schema původní milánské metody



1 – vodící zídky, 2 – konstrukční podzemní stěny, 3 – strop tunelu, 4 – úprava nadloží a vozovky, 5 – provádění tunelu pod ochranou definitivního stropu



Silnice I/38 – obchvat Jihlavy



Čelní odtěžování pod zasypaným stropem („želva“ na skruži)

Tunel Hněvkovský I



„želva“ na terénu

L. Mařík



1848



1888



1991

DĚKUJI ZA POZORNOST