

Mechanizované ražby a krasová rizika Berounského tunelu

Dr.-Ing. Zdeněk Žižka

METROPROJEKT Praha a.s.
Argentinská 1621/36
170 00 Praha
Česká republika

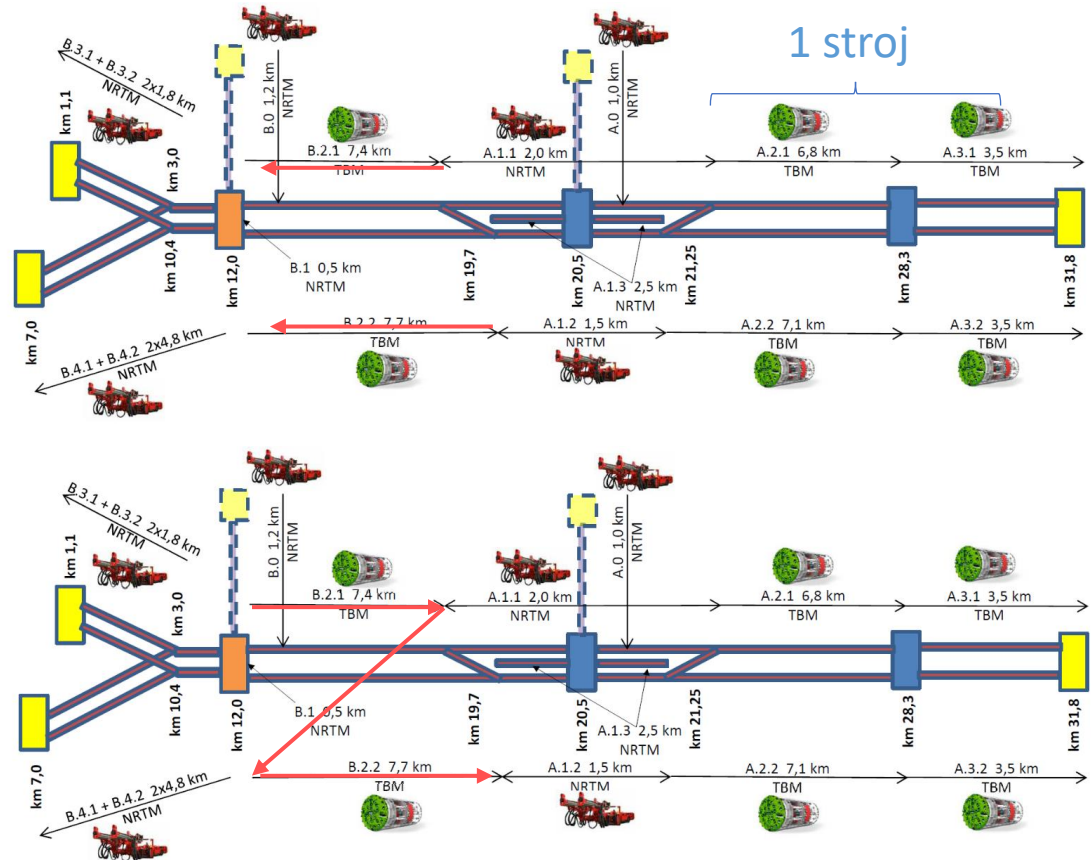
- **Volba postupu ražeb**
- Vzorový příčný řez
- Geotechnické podmínky
- Požadavky na razící techniku
- Recyklace rubaniny
- Kras - průzkum a rizika
- Strategie ražby v krasových oblastech
- Strategie ražeb v krasu Berounského tunelu

- Stavební objekty prováděné metodou TBM:

Stavební objekt	Staničení od (km)	Staničení do (km)	Délka SO (km)
Kaverny Slivenec – východní spojka Tachlovice LTT (101)	12,049	19,465	7,416
Kaverny Slivenec – východní spojka Tachlovice PTT (102)	12,001	19,721	7,720
Západní spojka Tachlovice – Svatý Jan LTT (101)	21,491	28,315	6,824
Západní spojka Tachlovice – Svatý Jan PTT (102)	21,168	28,284	7,116
Svatý Jan – portál Beroun LTT (101)	28,333	31,755	3,422
Svatý Jan – portál Beroun PTT (102)	28,302	31,725	3,423

=> Celkem raženo mechanizovaně **35,9 km**
tunelů

- Byly prověřovány dvě základní varianty ražeb:
 - 4x TBM z Tachlovic
 - 2xTBM ze Slivence + 2xTBM z Tachlovic
 - Doplněková varianta:
 - 2xTBM z Tachlovic + 2x1 TBM ze Slivence
- Optimální varianta z hlediska tunelařiny



2x TBM ze Slivence + 2x TBM z Tachlovic	4x TBM z Tachlovic
<p>+ Výhody</p> <ul style="list-style-type: none">• Nižší nároky na přívod vody na stavenišťě v Tachlovicích• Nižší nároky na dopravu rubaniny ze stavenišťě v Tachlovicích• Méně kritických cest v harmonogramu• Dovrchní ražba ze Slivence směrem do Tachlovic je méně riziková (bude procházet vápenci s možnostmi krasu ca 600 m) s ohledem na zvládnání možných přítoků podzemní vody• V době startu TBM z Tachlovic nemusí být vytvořen ještě celý podzemní komplex v Tachlovicích• V případě nutnosti možná protiražba NRTM z Tachlovic směrem do Slivence	<p>+ Výhody</p> <ul style="list-style-type: none">• Nejnižší možná mimostavenišťní doprava, pokud by byla v Tachlovicích umístěna i továrna na segmenty (toto však je prakticky neproveditelné)• Menší investice do zdvihacích zařízení do šachty nutné pro použití TBM (pouze pro šachtu v Tachlovicích)• Umožní se soustředit na zřízení jednoho centrálního zařízení stavenišťě pro technologii TBM (pravděpodobně však nebude jeden kontrakt!)• Nezávislost ražeb TBM na kontraktu NRTM (kritická závislost pouze na zhotovení podzemního komplexu v Tachlovicích)• V případě nutnosti možná protiražba NRTM ze Slivence směrem do Tachlovic
<p>- Nevýhody</p> <ul style="list-style-type: none">• Převážení segmentového ostění z Berouna až do Slivence (vhodné zřídit továrnu na segmenty ve Slivenci)• Souběh ražeb NRTM a TBM ve Slivenci	<p>- Nevýhody</p> <ul style="list-style-type: none">• Vysoké nároky na zásobování skrz jednu štolu a jednu šachtu• Riziko zpoždění celého projektu v případě problému s postupem při výstavbě podzemního komplexu v Tachlovicích• Samotná prodleva v sestavování 4x TBM je ca 12 měsíců• Požadavek na vysoký příkon proudu v oblasti Tachlovic• Logistika 4 TBM skrz jednu šachtu a štolu je limitující postupy ražeb – zejména se jedná o odvážení rubaniny V Tachlovicích se zdá, že nebude pro 4 TBM dostatek místa pro zařízení stavenišťě• Koncentrovaná logistika může snižovat produktivitu

- Volba postupu ražeb
- **Vzorový příčný řez**
- Geotechnické podmínky
- Požadavky na razicí techniku
- Recyklace rubaniny
- Kras - průzkum a rizika
- Strategie ražby v krasových oblastech
- Strategie ražeb v krasu Berounského tunelu

- Volba postupu ražeb
- Vzorový příčný řez
- **Geotechnické podmínky**
- Požadavky na razící techniku
- Recyklace rubaniny
- Kras - průzkum a rizika
- Strategie ražby v krasových oblastech
- Strategie ražeb v krasu Berounského tunelu

Staveništní šachta
Slivenec (130 m) +

přístupová štola

Poruchová zóna ca
100 m

Riziko krasu

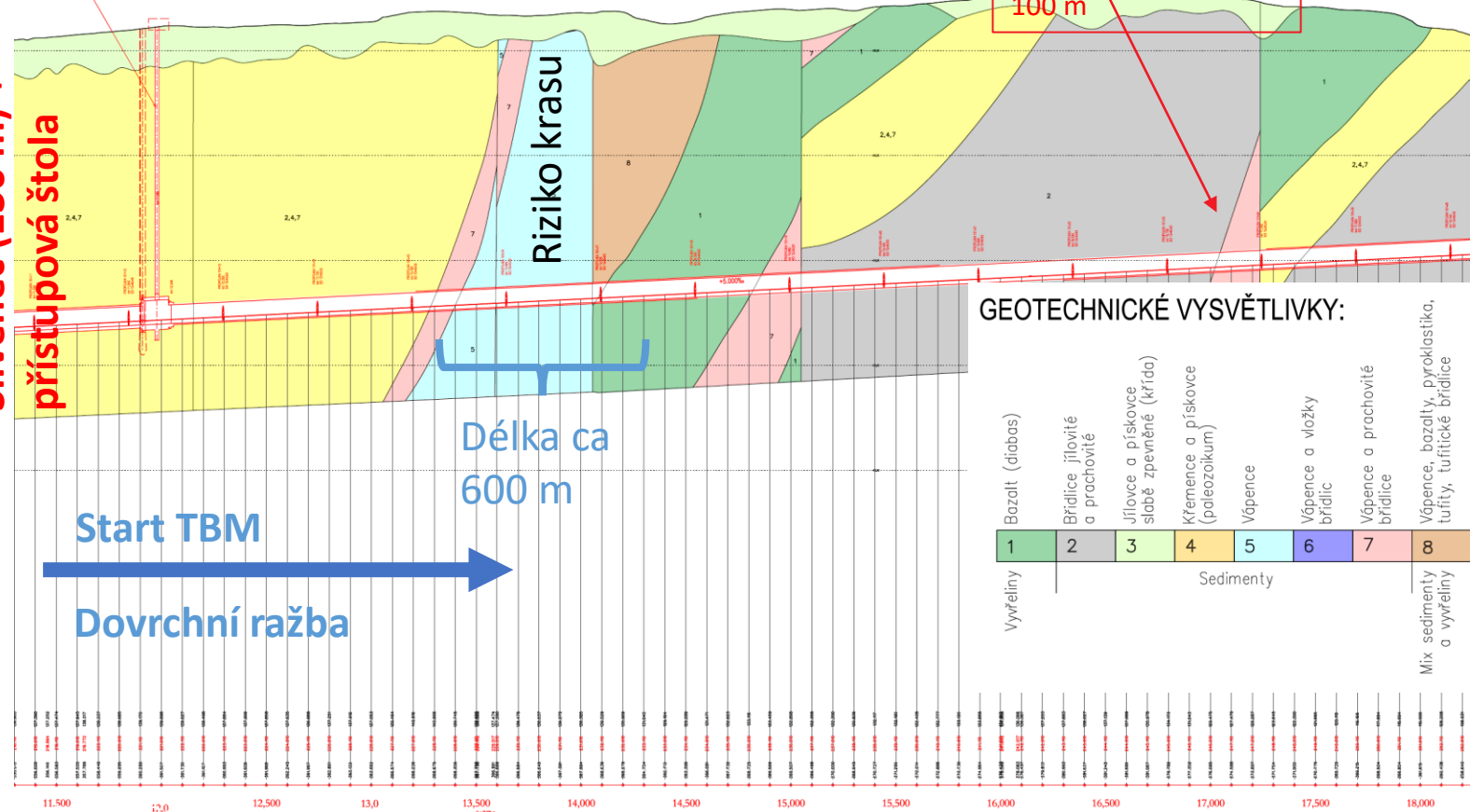
Délka ca
600 m

Start TBM

Dovrchní ražba

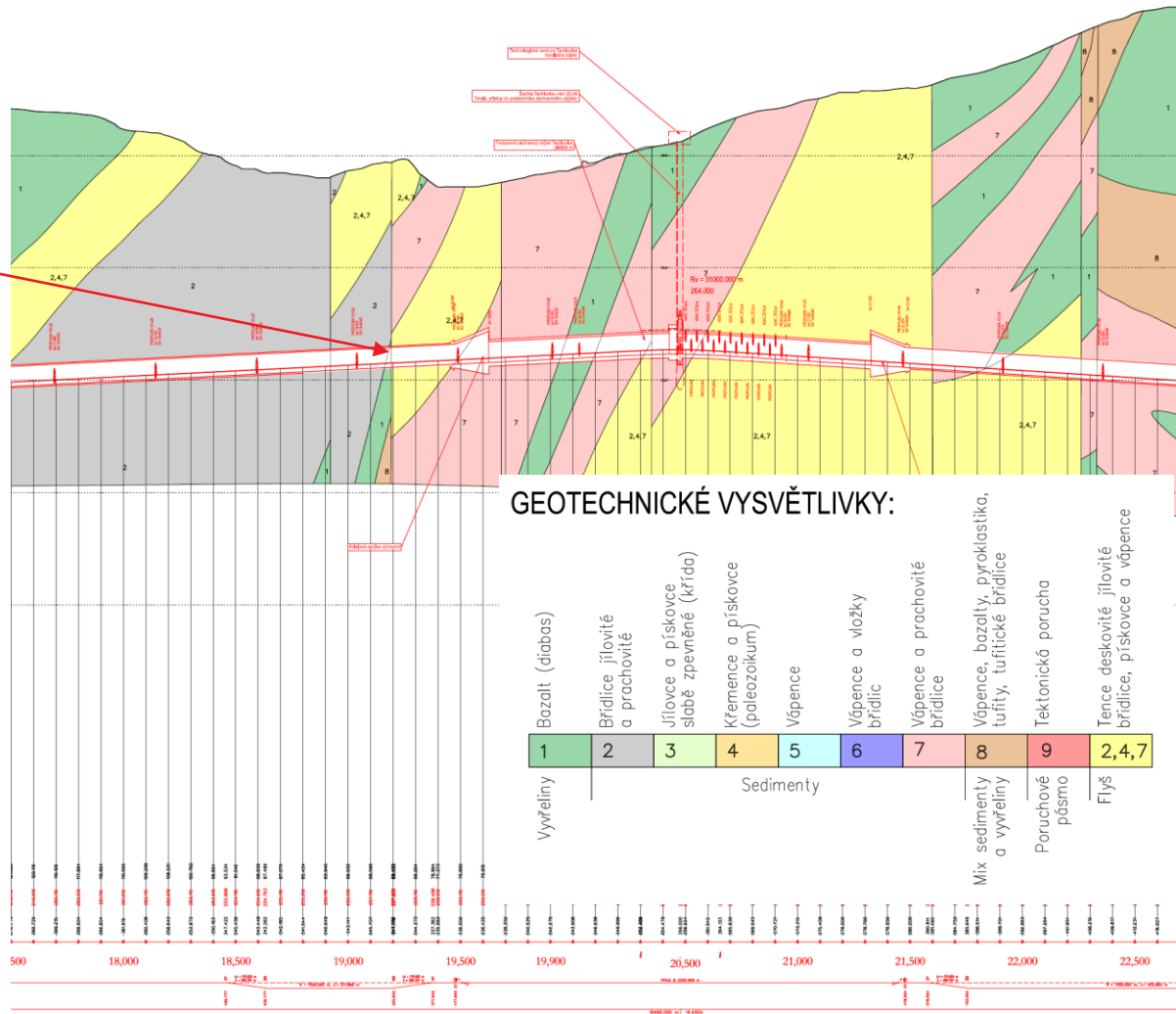
GEOTECHNICKÉ VYSVĚTLIVKY:

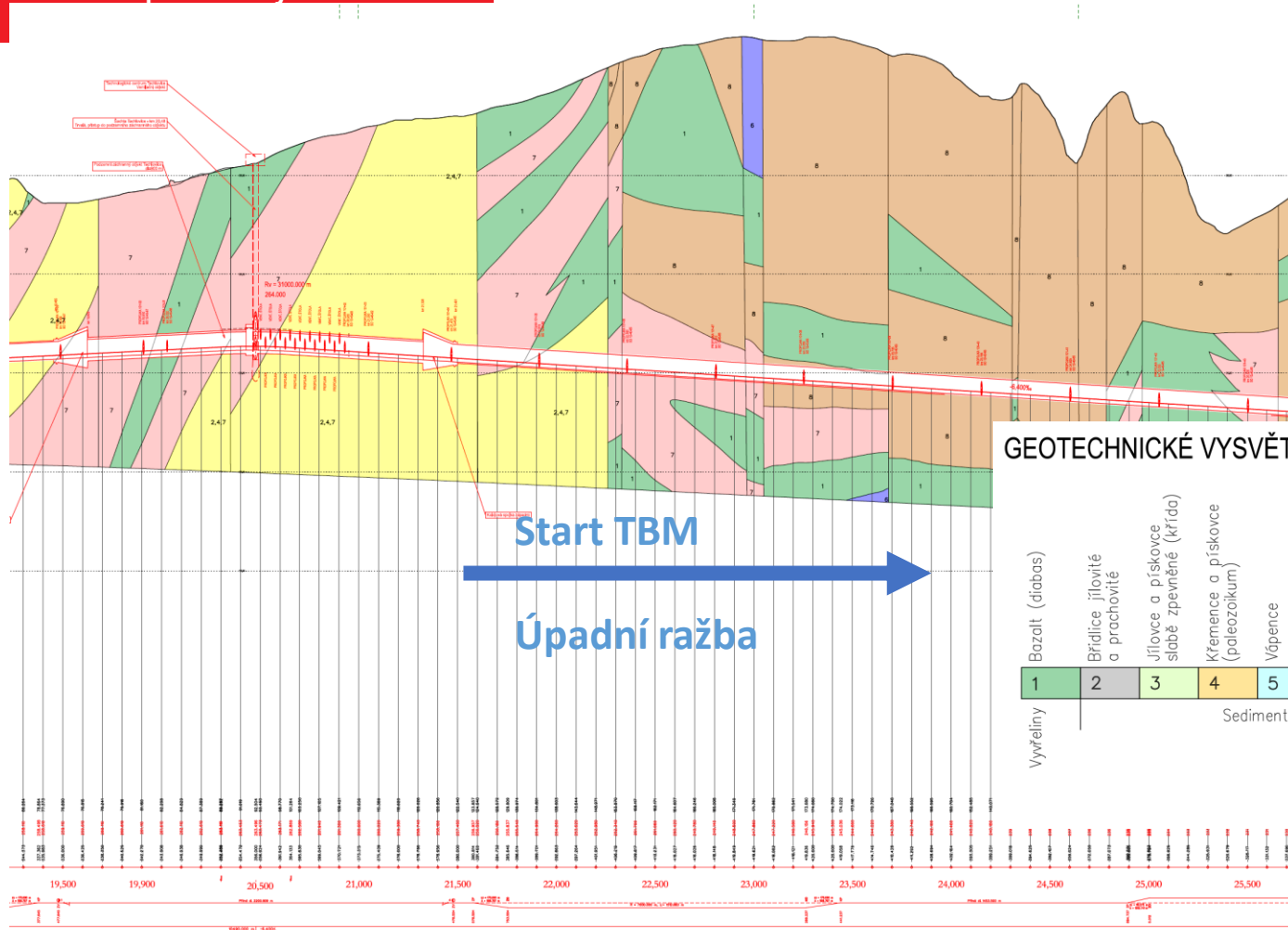
1	2	3	4	5	6	7	8	9	2,4,7
Bazalt (diabas)	Břidlice jílovité a prachovité	Jílovce a pískovce slabě zpevněné (křída)	Křemence a pískovce (paleozoikum)	Vápence	Vápence a vložky břidlic	Vápence a prachovité břidlice	Vápence, bazalty, pyroklastika, tuřity, tuřtické břidlice	Tektonická porucha	Tence deskovité jílovité břidlice, pískovce a vápence
Vyřeliny				Sedimenty			Mix sedimenty a vyřeliny	Poruchové pásmo	Flyš

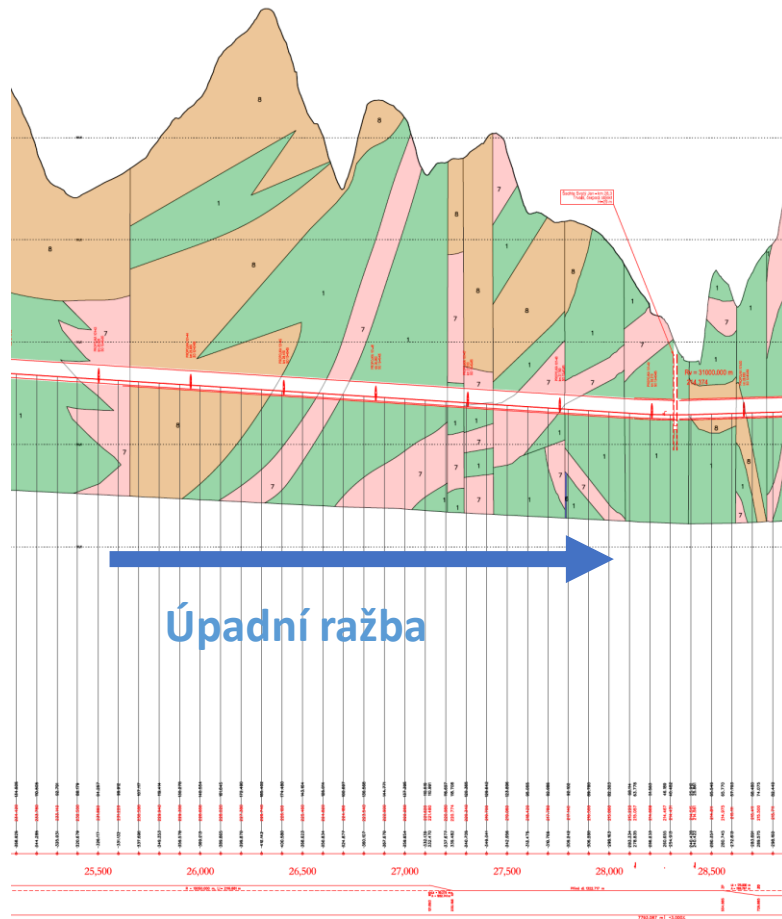


Poruchová zóna ca 100 m

Tachlovice (90 m): Staveništní + ventilační šachta Podzemní záchranná stanice s propojkami

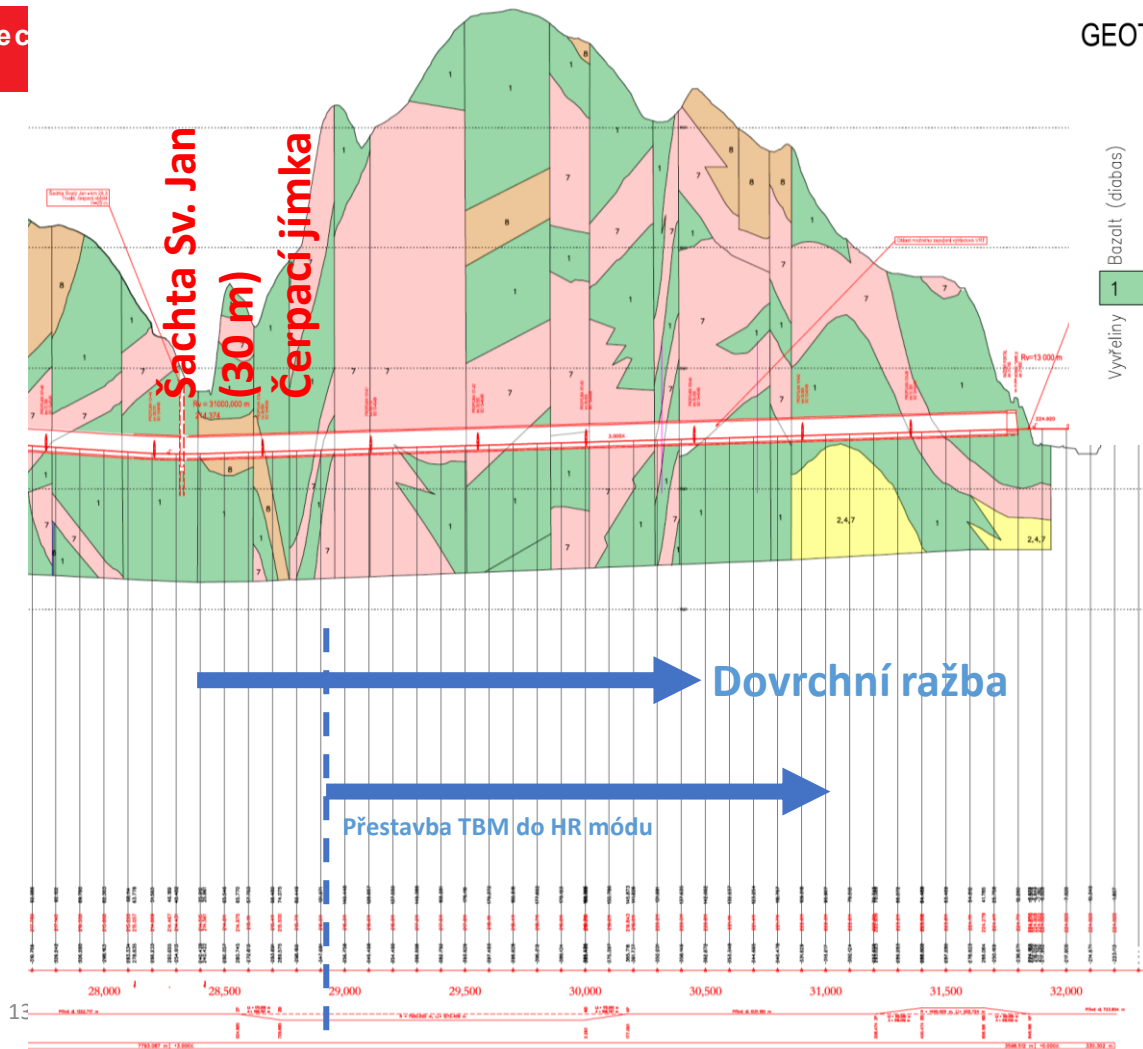






GEOTECHNICKÉ VYSVĚTLIVKY:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	2,4,7	
Vyřeliny								Mix sedimenty a vyřeliny	Poruchové pásmo	Flyš
Bazalt (diabas)	Břidlice jílovité a prachovité	Jílovce a pískovce slabě zpevněné (křída)	Křemence a pískovce (paleozoikum)	Vápence	Vápence o vločky břidlic	Vápence o prachovité břidlice	Vápence, bazalty, pyroklastika, tuřity, tuřické břidlice	Tektonická porucha	Tence deskovité jílovité břidlice, pískovce a vápence	



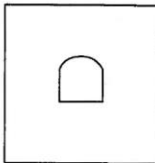
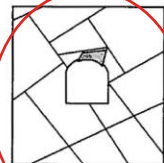
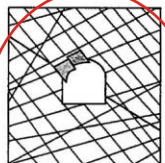
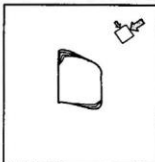
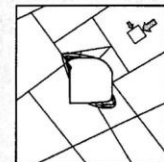
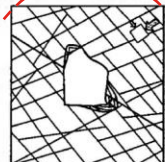

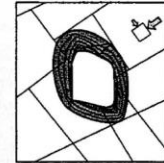
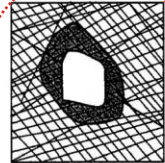
Vyřeliny	Sedimenty
1 Bazalt (diabas)	
2 Břidlice jílovité a prachovité	
3 Jílovce a pískovce slabě zpevněné (křída)	
4 Křemence a pískovce (paleozoikum)	
5 Vápence	
6 Vápence a vážky břidlic	
7 Vápence a prachovité břidlice	
8 Vápence, bazalty, pyroklastika, tufty, tuftické břidlice	
9 Tektonická porucha	
Mix sedimenty a vyřeliny	
Poruchové pásmo	
Flyš	2,4,7

Geotechnické zhodnocení

- Na základě předběžného geotechnického průzkumu
 - Zatřídění podmínek napjatosti
 - Chování diskontinua
 - Odhad konvergenčí (tlačivost) - kontinua
 - Rizika/protiopatření => požadavky na razící techniku

- Výsledná strategie ražby (na základě v současnosti dostupných podkladů 😊)

Martin et al. (1998): Hoek-Brown parameters for predicting the depth of brittle failure around tunnels

	Massive ($RMR > 75$)	Moderately Fractured ($50 > RMR < 75$)	Highly Fractured ($RMR < 50$)
Low In-Situ Stress ($\sigma_1 / \sigma_c < 0.15$)	 <p>Linear elastic response.</p>	 <p>Falling or sliding of blocks and wedges.</p>	 <p>Unravelling of blocks from the excavation surface.</p>
Intermediate In-Situ Stress ($0.15 > \sigma_1 / \sigma_c < 0.4$)	 <p>Brittle failure adjacent to excavation boundary.</p>	 <p>Localized brittle failure of intact rock and movement of blocks.</p>	 <p>Localized brittle failure of intact rock and unravelling along discontinuities.</p>
High In-Situ Stress ($\sigma_1 / \sigma_c > 0.4$)	 <p>Failure Zone</p> <p>Brittle failure around the excavation.</p>	 <p>Brittle failure of intact rock around the excavation and movement of blocks.</p>	 <p>Squeezing and swelling rocks. Elastic/plastic movement of continuum.</p>

ve 2 poruchách

Fig. 1: Examples of tunnel instability and brittle failure (highlighted grey squares) as a function of Rock Mass Rating (RMR) and the ratio of the maximum far-field stress (σ_1) to the unconfined compressive strength (σ_c), modified from Hoek et al. (1995).

- Volba postupu ražeb
- Vzorový příčný řez
- Geotechnické podmínky
- **Požadavky na razicí techniku**
- Recyklace rubaniny
- Kras - průzkum a rizika
- Strategie ražby v krasových oblastech
- Strategie ražeb v krasu Berounského tunelu

Posouzení vhodnosti razicí techniky

➤ Dle doporučení DAUB

+	Hlavní oblast nasazení	V této oblasti byl posuzovaný typ stroje úspěšně v minulosti nasazen bez nutných dodatečných úprav.
-	Kritická oblast nasazení	Nasazení v této oblasti by pravděpodobně vyžadovalo speciální úpravy stroje. Bez dodatečných úprav jsou očekávány těžkosti během ražby. Postupy ražeb a finanční efektivita budou výrazně sníženy oproti hlavní oblasti nasazení.
o	Nasazení stroje možné	Nasazení stroje v této oblasti může vyžadovat speciální úpravy, avšak technická proveditelnost byla v této oblasti v minulosti již prokázána. Dosahované postupy ražby a finanční efektivita mohou být nižší.

o/+	Rozhraní Hlavní oblast nasazení a Nasazení stroje možné	Nasazení stroje v této oblasti možné a nachází se na hranici hlavní oblasti nasazení stroje
o/-	Rozhraní Kritická oblast nasazení a nasazení stroje možné	Nasazení v této oblasti je spíše problematické

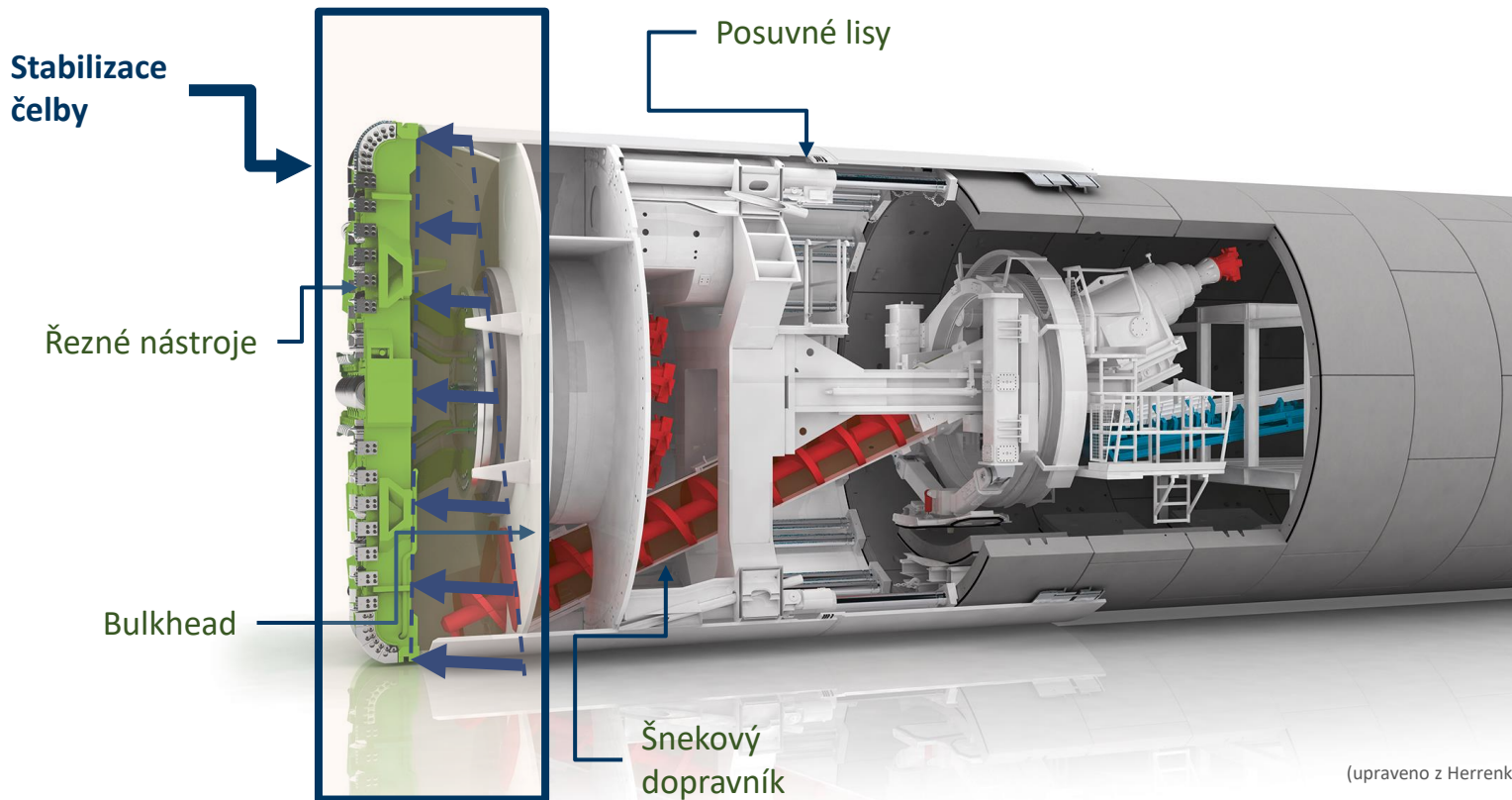
➤ Kritéria:

- UCS
- RQD
- RQD se zohledněním extrémů
- RMR
- Přítoky
- Náchylnost k bobtnání
- Podpůrný tlak na čelbě
- Abrazivita

- EPB- TBM: 3 módy ražby

Oblast:

- Slivenec – Tachlovice
- Tachlovice – Svatý Ján



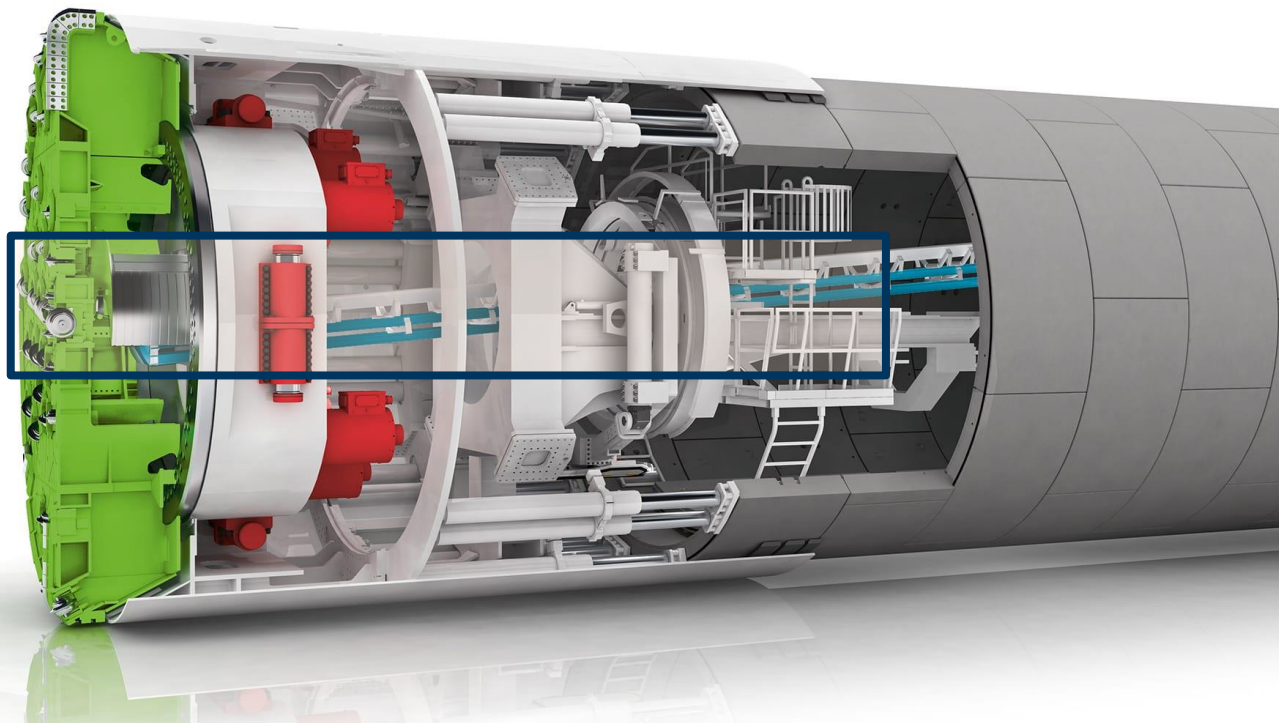
(upraveno z Herrenknecht.de)

- Hard Rock- TBM se štítem: otevřená čelba

Oblast:

- Přestrojění v oblasti za Sv. Jánem
Ražba směrem do Berouna

Odtěžování
pásovým
dopravníkem



(upraveno z Herrenknecht.de)

Stavební objekt	Základní požadavky
Kaverny Slivenec – východní spojka Tachlovice LTT (101)	<ul style="list-style-type: none"> • Aktivní podpora čelby zeminovou/horninovou kaší, • Štít k zamezení odprysků, • Částečná kompenzace hydrostatického tlaku (v krasových oblastech plná kompenzace tlaku se slurryfier box?), • Demontovatelnost razícího komplexu v kaverně k umožnění konvenční protiražby z Tachlovic ve směru Slivenec v případě uvíznutí stroje a nemožnosti pokračovat v ražbě
Kaverny Slivenec – východní spojka Tachlovice PTT (102)	
Západní spojka Tachlovice – Svatý Jan LTT (101)	<ul style="list-style-type: none"> • Štít k zamezení odprysků horniny • V oblasti Sv. Ján aktivní podpora čelby zeminovou/horninovou kaší,
Západní spojka Tachlovice – Svatý Jan PTT (102)	
Svatý Jan – portál Beroun LTT (101)	<ul style="list-style-type: none"> • V počátku ražby nutná kompenzace hydrostatického tlaku, • Štít k zamezení odprysků, • EPB přestavěno po ca. 300 m na tzv. hardrock a s tím spojená demontáž šnekového dopravníku
Svatý Jan – portál Beroun PTT (102)	

- Volba postupu ražeb
- Vzorový příčný řez
- Geotechnické podmínky
- Požadavky na razící techniku
- **Recyklace rubaniny**
- Kras - průzkum a rizika
- Strategie ražby v krasových oblastech
- Strategie ražeb v krasu Berounského tunelu

- Vzhledem k délce tunelu představuje správně nastavený management nakládání s rubaninou významný ekonomický aspekt

Rubanina bude na základě výsledků podrobného geotechnického průzkumu rozříděna do tří skupin:

1. **Třída A** - vysoce kvalitní materiál, recyklovatelný jako kamenivo do betonu
2. **Třída B** - Materiál střední kvality, ale recyklovatelný jako materiál do násypů
3. **Třída C** - nerecyklovatelný materiál na skládku

Rozhodovací kritéria pro možné využití (zatřídění do třídy A) rubaniny z TBM do betonu převzato z projektu KAT II:

Zkouška	Posuzované kritérium
UCS	≥ 70 Mpa
Příčný tah (paralelně k vrstevnatosti)	≥ 5 MPa
Příčný tah isotropní horniny	≥ 7 MPa
Index lámavosti LCPC	$\leq 70\%$
Obsah vrstevnatých křemičitanů	$\leq 30\%$
Obsah nevhodných minerálů celkově	$\leq 5\%$

- Volba postupu ražeb
- Vzorový příčný řez
- Geotechnické podmínky
- Požadavky na razící techniku
- Recyklace rubaniny
- **Kras - průzkum a rizika**
- Strategie ražby v krasových oblastech
- Strategie ražeb v krasu Berounského tunelu

➤ Z tunelářského hlediska jsou z krasových útvarů významné pouze dutiny (kaverny)

Co by si přál projektant vědět o krasu?

- Velikost krasových dutin
- Charakteristiky výplně krasových dutin
- Četnost krasových dutin v kvazihomogenních úsecích
- Hydrostatický tlak v krasových dutinách
- Mechanické parametry okolní horniny

Krasové jevy a jejich průzkum – ALEA principy

Karstifikace vede ke třem typům problémů:

- 1) Samotné dutiny (např. problémy s kotvením a stabilitou dutin, zasekávání TBM).
- 2) Sedimenty v dutinách (např. vyprazdňování dutin podobné proudění bahna, bobtnání sedimentů, zalepování vrtné hlavy).
- 3) Voda, která může být pod vysokým tlakem a hromadit se ve velkém množství.

KarstALEA: Wegleitung zur Prognose von karstspezifischen Gefahren im Untertagbau

KarstALEA: Instructions pratiques pour la prévision
des dangers liés au karst lors de travaux souterrains

KarstALEA: Practical guide for the prediction of karst-
related hazards in underground works

EPFL ENAC ICARE GEOLEP

Marco Filippini

Aurèle Parriaux

Schweizerisches Institut für Speläologie und Karstforschung
SISKA / Institut Suisse de Spéléologie et Karstologie
ISSKA, La Chaux-de-Fonds

Silvia Schmassmann *

Pierre-Yves Jeannin

Forschungsauftrag FGU2009/003 auf Antrag der
Fachgruppe Untertagbau (FGU)

Dezember 2012

1395

KarstALEA

- 70 % krasových dutin vzniklo podél několika geologických rozhraní.
- Hustota krasových dutin v horninovém masivu závisí na současných a minulých hydrogeologických podmínkách
- Krasové dutiny se vyskytují například ve slučích v určitých nadmořských výškách, které odpovídají dřívějším předpotopním úrovním (paleoúdolní půdy)
- Na základě znalosti hydrogeologie a historie zkrasovatění horninového masivu je možné předpovědět i některé vlastnosti těchto hornin (velikost a tvar dutin, množství a typ sedimentů, trvalý nebo dočasný tlak vody sedimentů, trvalý nebo dočasný tlak vody, předpokládaná výplň atd.)
- Pro krasovou oblast mají být vytvořeny čtyři 3d modely:
 - Geologický
 - Hydrogeologický
 - Speleogenetický (vznik krasových dutin)
 - Model výchozích ploch nespojitostí masivu

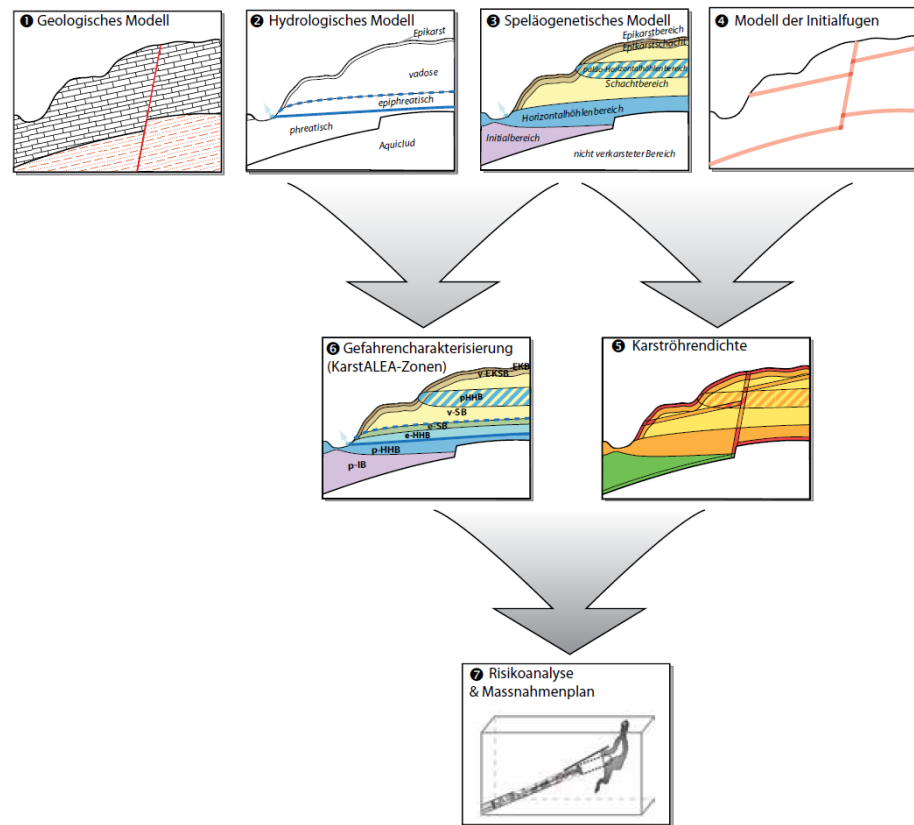
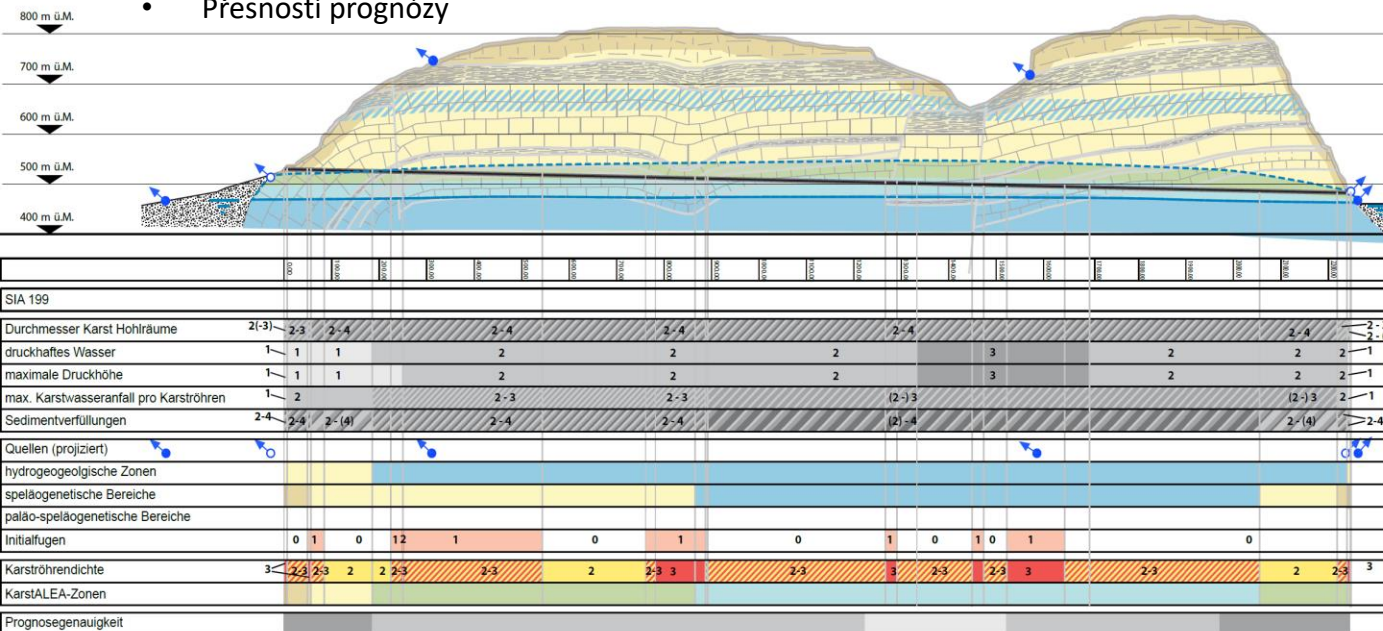


Abb. 2-d : Ablauf der KarstALEA-Untersuchungen in sieben Arbeitsschritten

(KarstALEA)

➤ Výsledkem KarstALEA je podélný profil s očekávaným:

- Průměrem kaveren
- Tlakem vody a vydatností přítoků
- Hustotou kaveren
- Přesností prognózy



- verwendete Abkürzungen**
- speläogenetische Bereiche**
- EKB Epikarstbereich
 - EKSB Epikarstschachtbereich
 - SB Schachtbereich
- HHB Horizontalhöhlenbereich
- IB Initialbereich
- pal-... paläo-....
(paläospeläogenetische Bereiche)

- KarstALEA-Zonen**
- EKB Epikarstbereich
 - vEKSb vadoser Epikarstschachtbereich
 - vSB vadoser Schachtbereich
 - eSB epiphreatischer Schachtbereich
 - eHHB epiphreatischer Horizontalhöhlenbereich
 - pHHB phreatischer Horizontalhöhlenbereich
 - pIB phreatischer Initialbereich

	1	2	3	4
ϕ Durchmesser Karst-Hohlräume (varians 20-Tausendstel)	< 0.2 + 2%	0.2 - 2 2 - 20%	2 - 10 20 - 100%	> 10 100%
ρ_w druckhaftes Wasser (Variabilität)	kaum	temporär < 50 m	temporär > 50 m	permanent (siehe T)
T max. Druckhöhe (Höhe über Bauwerksohle)	< 10	10 - 50	50 - 100	> 100
Q_{max} max. Karstwasseranfall pro Karstströmen	< 5	5-50	50 - >100 kurzzeitig	50 - >1000 anhaltend
ρ_{sed} Sedimentverfüllungen	kaum Sed.	Blöcke & Kies	Lehm kohäsiv	Lehm nicht kohäsiv
Quellen	perennierende Quelle		temporäre Quelle	
H_2 hydrogeologische Zonen	vados	epiphreatisch	phreatisch	
H_{20} speläogenetische Bereiche	EKB	EKSB	SB	HHB
H_{20} paläo- speläogenetische Bereiche	pal-EKB	pal-EKSB	pal-SB	pal-HHB
H_{20} Initialfugen regionaler Bedeutung	0	1	2	
P Gefahrenstufen Karstphänomene (Gefahrencharakterisierung)	1 gering / unwahrscheinlich	2 mittel / möglich	3 hoch / wahrscheinlich	
ϕ KarstALEA-Zonen (Gefahrencharakterisierung)	EKB	vEKSb	vSB	eSB
		eHHB	pHHB	pIB
ϕ_{qual} Prognosegenauigkeit	gering	mässig	gut	sehr gut

(KarstALEA)

(KarstALEA)

- Volba postupu ražeb
- Vzorový příčný řez
- Geotechnické podmínky
- Požadavky na razicí techniku
- Recyklace rubaniny
- Kras - průzkum a rizika
- **Strategie ražby v krasových oblastech**
- Strategie ražeb v krasu Berounského tunelu

Kuala Lumpur – Klang valley MRT

- Zkrasovatělý vápenec v intravilánu s rizikem náhodných kaveren => variable density TBM

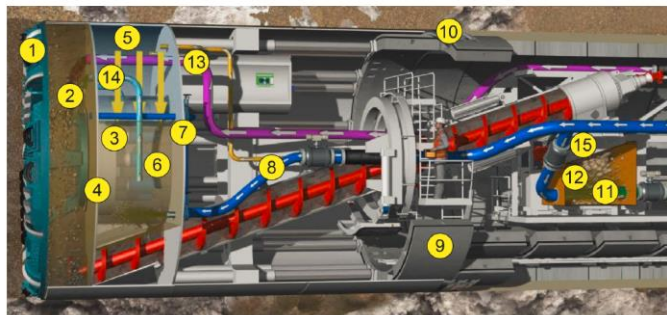


Figure IV - 9: Mixshield mode (HDSM mode)

- | | |
|--|--|
| [1] Cutting wheel | [9] Segment |
| [2] Excavation chamber | [10] Tailskin |
| [3] Face support medium | [11] Slurry line |
| [4] Submerged wall | [12] Slurryfier box |
| [5] Air bubble | [13] Suspension line (High-Density-Support-Medium) |
| [6] Working chamber | [14] Communicating tubes |
| [7] Bulkhead | [15] Roller crusher |
| [8] Feed line (Low-Density-Support-Medium) | |

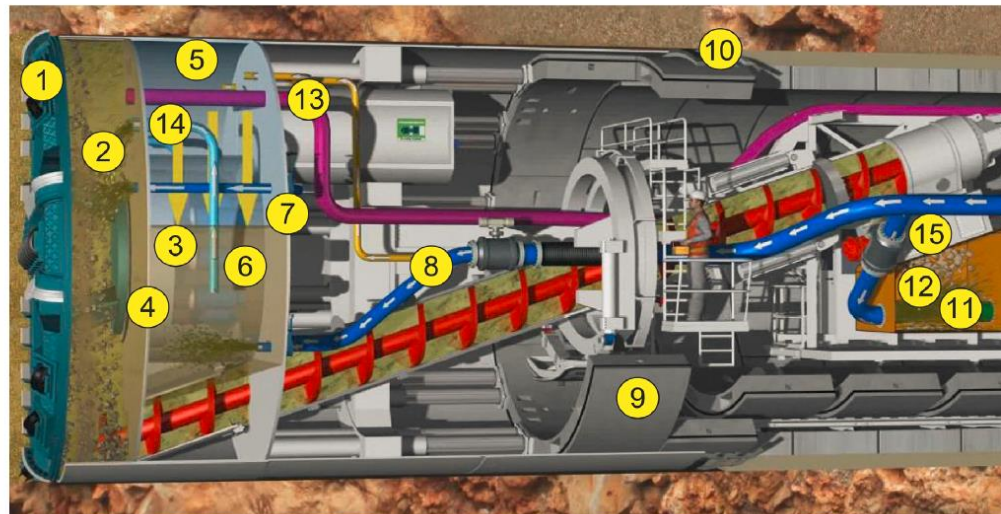
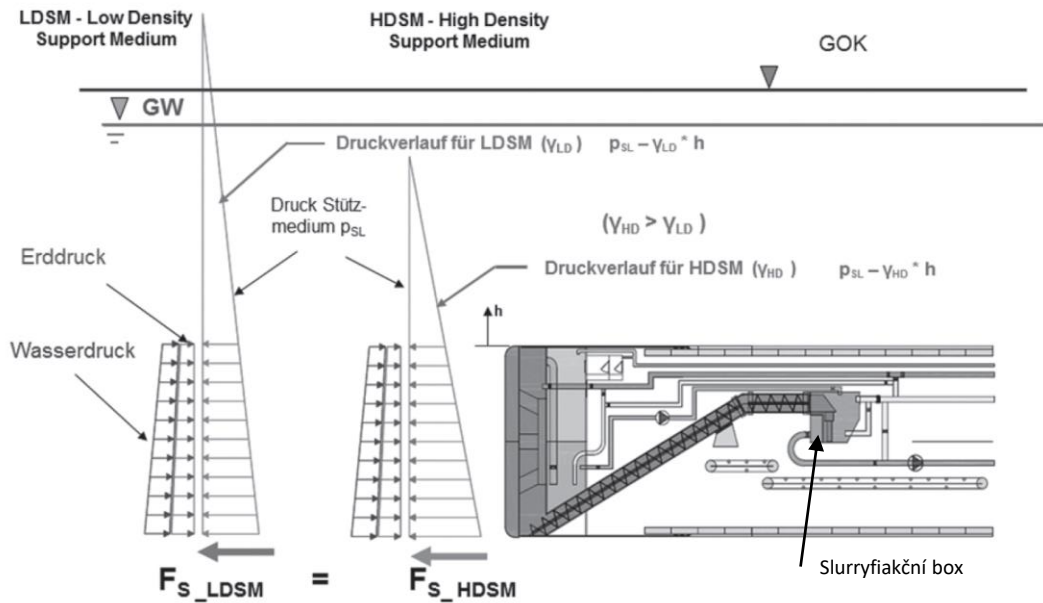


Figure IV - 10: Mixshield mode (LDSM mode)

- | | |
|--|--|
| [1] Cutting wheel | [9] Segment |
| [2] Excavation chamber | [10] Tailskin |
| [3] Face support medium | [11] Slurry line |
| [4] Submerged wall | [12] Slurryfier box |
| [5] Air bubble / cushion | [13] Suspension line (High-Density-Support-Medium) |
| [6] Working chamber | [14] Communicating tubes |
| [7] Bulkhead | [15] Roller crusher |
| [8] Feed line (Low-Density-Support-Medium) | |

(Herrenknecht.de)



Srovnání podpůrného tlaku na čelbě

Burger W. et al. (2015)

HDSM mód:

- hustota média pro klasický slurry mód je moc veliká, pro klasický EPB mód by byla rubaniny však moc tekutá

- Volba postupu ražeb
- Vzorový příčný řez
- Geotechnické podmínky
- Požadavky na razící techniku
- Recyklace rubaniny
- Kras - průzkum a rizika
- Strategie ražby v krasových oblastech
- **Strategie ražeb v krasu Berounského tunelu**

1) Mechanizace nabízející oba postupy ražby

- Otevřená čelba:
 - injektáže
 - výplně
- Uzavřená (tlakovaná čelba EPB s rychlou reakcí pomocí HD bentonitu)
 - Tlakování čelby aby nedošlo k její nestabilitě a zalití tunelu vodou (bahnem)

Minimalizace rizik?

2) Vrtný průzkum před čelbou

Kritéria

- Zásah do cyklu stroje: možnost provádění současně se sestavování ostění? Kolik vrtů a jaká délka se vyvrtá během 20 – 40 minut (většinou je však delší)
- Možnost provádění skrz čelbu (pouze otevřený mód) a skrz štít ve střední části (otevřený, polouzavřený i uzavřený mód)
- Ve střední části stroje možné umístiti např. 14 uzavíratelných otvorů pro provádění vrtů se sklonem 10° a průměrem otvoru 125 mm
- Přes čelbu mohou vést dva vrtací kanály průměru 150 mm (obvykle se umísťují např 2 m nad dno štítu)
- Ve stabilních horninách může být proveden vrt délky 20 – 40 metrů, dle HK až 50 - 100 m

Rizika

- uvíznutí částí vrtných zařízení v profilu ražby
- u vrtů přes čelbu: složité provádět vrty proti tlaku. Při naražení zvodnělé kaverny vyplněné materiálem hrozí jeho vytečení do pracovní komory stroje a neplánovaný přechod na uzavřený mód s rozsáhlým užitím stavební chemie.

Jak navrhnout průzkumné vrty před čelbu?

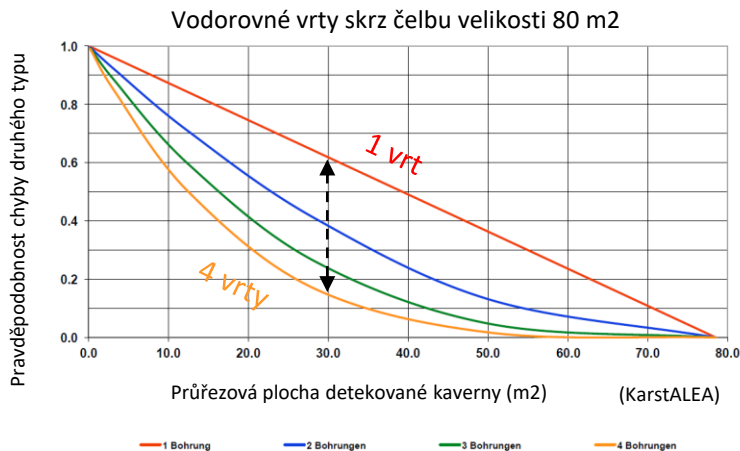
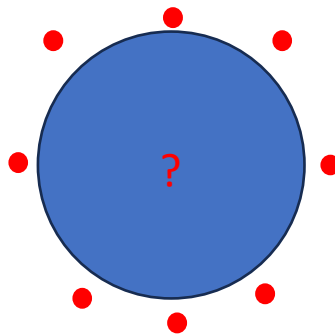


Abb. 7.3: Wahrscheinlichkeit mit einer Erkundungsbohrung eine Karströhre zu finden

In der Grafik ist die Fehlerwahrscheinlichkeit dargestellt, mit einer oder mehreren horizontalen Bohrungen einen Hohlraum gegebener Größe nicht zu detektieren (Fehler 2. Art).

- Riziková analýza na základě výsledků podrobného geotechnického průzkum



- V případě mechanizované ražby je klíčová i stabilita pod počvou tunelu
- Provedení geofyz. kontroly po ražbě, zda se v bezprostředním okolí tunelu nenacházejí kaverny – eventuální injektáž/výplň přes ostění

Statické posouzení základě mechanických vlastností masivu:

- Jak velká kaverna ohrozí stabilitu tunelu?
- Jak velká kaverna ohrozí stabilitu stroje?
- Jak blízko musí být tato kaverna, aby k ohrožení došlo?

METROPROJEKT Praha a.s.

Argentinská Office Building
Argentinská 1621/36, 170 00 Praha 7
metroprojekt@metroprojekt.cz
+420 296 154 105

