

PRAHA-VELESLAVÍN

PRAHA-DEJVICE

## Výškový systém Bpv Souřadnicový systém S-JTSK

Změna:	Název změny:	Datum:	Provedl:	Podpis:
1	Update of the content based on additional question from the assessors	June 2020	Dr. Žižka	<i>Žižka</i>

Investor, objednatel:	<b>Správa železnic, s.o.</b> Dlážděná 1003/7 110 00 Praha 1 - Nové Město kontaktní adresa: Správa železnic, s.o. Stavební správa západ Sokolovská 1955/278, 190 00 Praha 9	Inženýrská činnost: <b>METROPROJEKT Praha a.s.</b> Argentinská 1621/36 170 00 Praha 7 www.metroprojekt.cz info@metroprojekt.cz
-----------------------	--	---

Člen sdružení:	 <b>SUDOP PRAHA</b>	<b>SUDOP PRAHA a.s.</b> Olšanská 1a, 130 80 Praha 3 tel.: +420 267 094 111 fax: +420 224 230 316 e-mail: praha@sudop.cz
----------------	--	---

<b>METROPROJEKT Praha a.s.</b> Argentinská 1621/36 170 00 Praha 7 generální ředitel: Ing. David Krása tel.: +420 296 154 105 www.metroprojekt.cz info@metroprojekt.cz	 <b>METROPROJEKT</b>	Souprava číslo:
---	--	-----------------

HIP: <b>Ing. Jiří ÚLEHLA</b> tel.: +420 296 154 304 Stupeň: DUR	Podpis: <i>Úlehl</i>	Název a účel díla: <b>Modernizace trati Praha-Výstaviště (mimo) - Praha-Veleslavín (mimo)</b>
---	----------------------	--

Zpracovatelský útvar: <b>STŘEDISKO S60 DOPRAVNÍCH STAVEB</b> tel.: +420 296 154 247	Název části díla: <b>Podklady pro zpracování posouzení variant tunelových staveb Reference documents for tunnel variants assessment</b>
Vedoucí útvaru: <b>Ing. Petr ZOBAL</b>	Podpis: <i>Zobal</i>

Odpovědný projektant: <b>Dr. Zdeněk Žižka</b>	Podpis: <i>Žižka</i>	Název přílohy: <b>Clarification of questions concerning regional geology of Prague</b>	Změna: -
Vypracoval: <b>Dr. Zdeněk Žižka</b>	Podpis: <i>Žižka</i>		Číslo příl.: <b>000</b>
Skart. znak: <b>V20/2041</b>	Datum: <b>05/2020</b>	Počet formátů: -	Měřítko: -
IČD:	<b>18</b>	<b>7461</b>	<b>23</b>
	<b>00</b>	<b>00</b>	<b>00</b>

## LIST OF ANNEXES

### Praha-Výstaviště (mimo) - Praha-Veleslavín (mimo)

#### CLARIFICATION OF QUESTIONS CONCERNING REGIONAL GEOLOGY OF PRAGUE

1.	Technical report - answers for questions	001
2.	Orientační geologický řez 1	002
3.	Orientační geologický řez 2	003
4.	Orientační geologický řez 3	004
5.	Orientative geological profile 1	005
6.	Orientative geological profile 2	006
7.	Orientative geological profile 3	007
8.	Location of geological profiles	008
9.	Hudek J. (2016) Determination of rock massif state of stress using the stress-relief gallery method for first passage of metro tunnels under the Vltava river in 91973, Tunnel journal, 25(1), pp. 51-60	009

## TECHNICAL REPORT – ANSWERS FOR QUESTIONS

The following questions are formulated by Prof. Markus Thewes (Ruhr-University Bochum), Doc. Alexandr Rozsypal (independent expert) and Mr. Michal Froněk (Railway administration).

The answers were prepared by Zdeněk Zizka (METROPROJEKT PRAHA a.s., Petr Vitásek (SUDOP PRAHA a.s.) and František Dragoun (SUDOP Praha a.s.).

### Questions and answers

1. Regarding the aeolian loess layers near the east portal, the technical feasibility may depend on the tendency of mechanical degradation upon stress redistribution or contact with water. Furthermore, loess soils sometimes exhibit leeching and cavities. Can this risk be estimated based on the currently available information or based on previous experience in Prague's geology? (Prof. Thewes)

**Response:** We are not aware of the creation of caverns in Aeolian sediments in Prague conditions. In the territory of Prague, these are usually not pure loess but loess clay. No cracks or cavities are formed in the given environment.

2. Since no swelling tests have been performed in the tunnel horizon, is there a notable risk of swelling ground behaviour in the tunnel horizon anywhere along the different alignments? (Prof. Thewes)

**Response:** A swelling test was performed Aeolic sediments with negative tendency for swelling. Page 35 – Geotechnical investigation for bored tunnel – variant South.

Additionally, we can state based on experience that there is not any significant swelling of Prague Ordovician shales and loess. This experience was gained from the construction of tunnel Blanka in Dejvice district and also the subway of Prague (up to 50 m depth).

3. Regarding the three-dimensional orientation of the rock/soil boundary: is there a high risk of glancing intersections between rock and soil that might cause problems with steering and tool wear in TBM tunnelling? This statement falls in line with the already answered question of whether fault zones are expected parallel to any of the alignment variants. (Prof. Thewes)

**Response:** The geological conditions in Prague are characterized with gradual transition from hard rock to soft soil. It means, there is very low probability that a hard rock will be encountered simultaneously with soil at the tunnel face. Usually the tunnel face will consist of the healthy rock a fractured rock. The fractured rock will have certain amount of apparent cohesion.

Within the sections excavated by the TBM method, local tectonic faults will be encountered. These faults are manifested mainly by higher cracking and crushing of rocks. In the given faults, the occurrence of rocks of a character up to clayey gravels and increased groundwater inflows can be locally expected. The thickness of tectonic faults reaches the order of decimetres to the first meters. Due to the urbanization of the area, a more precise localization of low-power tectonic faults is not feasible.

Based on the experience gained from Metro A excavation by EPB shield located nearby, these faults did not represent any significant problem for the excavation

4. What is the probability to encounter further fault zones that have so far not been explored? (Prof. Thewes)

**Response:** The regional geological map of Prague is very well developed, based on knowledge and documentation of other nearby underground structures (metro, joint-utility tunnels, road tunnels, etc.).

The probability of occurrence of a completely unknown significant tectonic fault zone or fault, with a thickness of the first tens of meters, is therefore very low. Irregular occurrence of rocks with a higher

degree of cracking and crushing can be expected during excavation. Clarification of the existence of possible fault zones will be the task of a detailed (next) phase of geotechnical survey.

Statement of the geologist concerning the probability of occurrence of the fault zone in the area of "slope" between Střešovice and Dejvice: There are no indications of the occurrence of fractures or fault zones in the longitudinal direction with the Center tunnel variant from any of the documents known to us and the survey work performed by us. From the geological maps, only partial perpendicular and oblique tectonic lines. However, the occurrence of partial disturbed bands in the range of units of meters, which may occur in the route of the Center variant, is not excluded. In the case of choosing the Center variant for the next stage of design stage, it is necessary to add information on engineering geological and hydrogeological conditions in the form of a detailed survey.

5. What are the properties of the fault zones in the tunnel horizon compared to closer to the surface? (Prof. Thewes)

**Response:** In the upper weathered parts of the rock massif, not only is the rock defragmented, but also its gradual mineral change. The final product of the weathering processes of the Ordovician shales of the Dobrotiv Formation are clays and loamy soils with soft fragments of the parent rock, mostly of firm consistency. In the case of rocks of the Letna Formation, completely weathered (decomposed) rocks acquire the character of solid clays and clays with solid fragments of quartz and quartz sandstones. In the fault zones, it will be mainly the crushing of weathered to healthy rocks, with clay-dust-like interstitial mass. In general, it can be stated that the fault zones show better geotechnical properties than the weatherings of the bedrock found above.

The rock mass properties of the fault zones to be considered are designated within the geotechnical report as "TEKT".

6. Are there experiences from comparable materials in the area regarding the triaxial behaviour of rocks and soils in the area? (Prof. Thewes)

**Response:** Due to previous large underground structures in the Ordovician rocks of the Prague Barrandian Basin, there are results of triaxial shear tests both from the given rock environment and from the environment of Quaternary sediments (especially loess clays).

7. Are there any statements regarding the anisotropy of the shale formations? The stratification angle and the anisotropic strength/stiffness characteristics are of high importance for the excavation process. (Prof. Thewes)

**Response:** Due to previous large underground structures in the Ordovician rocks of the Prague Barrandien Basin and detailed mapping, there is information about the anisotropy of local rocks. These are mainly the slopes and directions of the slopes of stratification, wrinkling, predominant fracture systems, etc. Due to the wrinkling of the rock massif, the Prague Barrandien Basin can be considered anisotropic environment from this point of view.

Following table based on investigation of Hudek (1971) provides comparison of strengths of joints parallel and perpendicular to bedding:

Rock mass formation	Weathering degree	Deformation properties - rock mass						Residual shear strenght of the joints						Peak shear strenght of the joints					
		Deformability modulus (kp/cm <sup>2</sup> ) from-to		Elasticity modulus (kp/cm <sup>2</sup> ) from-to		Poissons ratio (-) from-to		Parallel to bedding			Perpendicular to bedding			Parallel to bedding			Perpendicular to bedding		
		T <sub>0</sub> (kp/cm <sup>2</sup> ) from-to	φ (°) from-to	T <sub>0</sub> (kp/cm <sup>2</sup> ) from-to	φ (°) from-to	T <sub>0</sub> (kp/cm <sup>2</sup> ) from-to	φ (°) from-to	T <sub>0</sub> (kp/cm <sup>2</sup> ) from-to	φ (°) from-to	T <sub>0</sub> (kp/cm <sup>2</sup> ) from-to	φ (°) from-to	T <sub>0</sub> (kp/cm <sup>2</sup> ) from-to	φ (°) from-to	T <sub>0</sub> (kp/cm <sup>2</sup> ) from-to	φ (°) from-to	T <sub>0</sub> (kp/cm <sup>2</sup> ) from-to	φ (°) from-to		
Dobrotiv formation	W4-5	100	200	200	500	0,3	0,4												
	W3	200	500	500	1500	0,3	0,3												
	W2	500	5000	1500	8000	0,3	0,25	0,2	0,3	0,3	0,4	0,3	0,2	0,4	0,2	0,4	0,2	0,3	
	W1	4000	15000	6000	25000	0,25	0,15	0,3	0,4	0,4	1	18	22	0,4	0,5	27	33	0,5	1,5
Letna formation	W4-5	100	300	300	1000	0,4													
	W3	300	1500	1000	2500	0,2													
	W2	1500	5000	2500	8000	0,15		0,3	0,8	0,3	0,8	22	28	0,4	1	32	38	1	0,2
	W1	4000	15000	6000	20000	0,1		0,8	1,2	0,8	1,2	28	32	1	4	38	42	4	12
Liben formation	W4-5	100	200	200	500	0,4													
	W3	200	500	500	1500	0,3													
	W2	500	5000	1500	8000	0,3	0,25	0,2	0,4	0,3	0,4	16	21	0,2	0,8	21	28	0,5	1
	W1	3000	15000	5000	25000	0,25	0,15	0,3	0,5	0,4	1	21	25	0,8	1,2	28	34	1	37

1 kp/cm<sup>2</sup> = 98 kPa = 98 kN/m<sup>2</sup>. This table is to be considered as informative only, as the properties of the rocks were not specifically determined for the assessed project.

8. How have the geophysical measurements been interpreted and considered in the reports [1.3 to 1.6]? Which parameters were directly or indirectly determined based on geophysical tests? (Prof. Thewes)

**Response:** Within selected boreholes, presiometric measurements were performed in order to obtain the presiometric modulus of deformation  $E_{def,p}$ . On selected boreholes, dilatometric measurements were performed in the rock base in order to obtain the basic strength and deformation characteristics of the rock mass - dilatometric modulus of deformation  $E_d$ . Furthermore, a wide range of logging methods was performed on the designated wells - digital methods of wave acoustic logging and

acoustic television. Lithological interfaces of rock types were determined directly in the field by logging measurements, water content was determined, fault zones were separated, including chemical alteration of rocks (weathering), anisotropy of rocks in the well, inflows and groundwater losses.

9. Appendix 8 of the Geotechnical Exploration Report for the NORTH variant [1.4] contains detailed information on dynamic testing that was performed close to the Institute of Physics of the Czech Academy. Has any significant vulnerability to tunnelling-related vibrations been found? If yes, we would like to ask for a translation of this appendix. (Prof. Thewes)

Response: these investigations were conducted to simulate the transmission of railway-induced vibrations through ground. Therefore, we think that they are not relevant for your assessment. The experiments conducted in the Institute of physics can be temporarily disrupted by the tunnel excavation.

10. Are there significant differences regarding the aforementioned open questions (1 to 9) between the three bored tunnel variants (Prof. Thewes)

**Response:** There is currently no relevant response. Currently, the evaluation of exploratory works for the variant CENTER is in progress.

The first two variants (Variant North and Variant South) show approximately the same rating. The only difference is the evaluation in the area of the entrance portal and the first section, where the clay shales of the Libeň Formation will not be found in the SOUTH variant.

Statement of the geologist concerning the probability of occurrence of the fault zone in the area of "slope" between Střešovice and Dejvice: There are no indications of the occurrence of fractures or fault zones in the longitudinal direction with the Center tunnel variant from any of the documents known to us and the survey work performed by us. From the geological maps, only partial perpendicular and oblique tectonic lines. However, the occurrence of partial disturbed bands in the range of units of meters, which may occur in the route of the Center variant, is not excluded. In the case of choosing the Center variant for the next stage of design stage, it is necessary to add information on engineering geological and hydrogeological conditions in the form of a detailed survey.

11. Designer's technical note regarding the possibility of encountering a fault zone running parallel to the tunnel alignment Three geotechnical cross-sections through the entire area are attached) (Doc. Rozsypal)

**Response:**

Based on your request, we send you 3 indicative geological profiles. The location and geometry of the profiles were provided by the client (METROPROJEKT PRAHA). Geological profiles are compiled in the scale M 1: 1 000/500.

The geological interpretation shown in the profiles is a synthesis of documented boreholes in the given locality and detailed engineering geological maps of Prague compiled at a scale of 1: 5,000. These are the geological boundaries as well as the width and slope of tectonic disturbed rocks. Abbreviations for individual types of soils and rocks are taken from the "Geotechnical Survey" (Dragoun Fr. - SUDOP PRAHA a.s., 08/2019).

With regard to the geological conditions known to us, we do not assume the existence of a fault zone parallel to any of the proposed variants of excavated tunnels. There will be limited fault zones in the route, some of which are known (see profiles) and others have not yet been detected.

Best regards,

Petr Vitasek

12. Statement of the geologist concerning the occurrence of quartzites with the "Cut and cover variant"

**Response:**

Within the „cut and cover“ variant of the tunnel, it is possible to expect the Řevnice quartzites in the section of the chainage approx. cca 4,850-4,910, 6,000-6,140 a 6,710-6,825. Řevnice quartzites are one of the hardest rocks in the Ordovician development of the Prague Barrandien Basin. They consist of plate-like to bench-shaped light gray and yellow-gray quartzites and siliceous sandstones, which are in places permeated by small positions of slate. In the unweathered state, these are very difficult rocks to dismantle and extract, mainly strength classes R2 / R1 (according to ČSN 73 6133, ČSN P73 1005). The rocks disintegrate along the predisposed surfaces (cracks, layered surfaces) into fragments up to boulders, with a weak clayey-sandy gap filling mass of discontinuity surfaces. The final product of decomposition is usually fragmentary to stony rubble. The rocks deform brittle during folding. Along the contact with the surrounding shales, they tend to be more crushed, and groundwater flows with a higher degree of aggressiveness often occur at the interface (XA1, XA2 according to ČSN EN 206 + A1). The drawing of the quartzite strip in the geological profiles is based only on the available map data and more distant archival probes, where mostly quartzite rubble were documented. Due to the overall wrinkling of the rocks of the Prague Barrandien Basin and the slope of the layers, their significant occurrence cannot be ruled out within the construction, or on the contrary they may not be found by the construction at all (it is not valid for chainage 4,850 – 4,910, at which the quartzites are definitely crossed). Within the project, we recommend considering their occurrence within the given construction variant.

----

Best regards, Fr. Dr.

### 13. Definition of K0 in Prague (Prof. Thewes and Mr. Fronek)

**Response:** It was not investigated by the geologist. However, information dealing with this issue are known from other projects in Prague area. Please refer to the attached paper from Jiri Hudek.

### 14. Does a risk register exist? (Mr. Fronek)

**Response:**

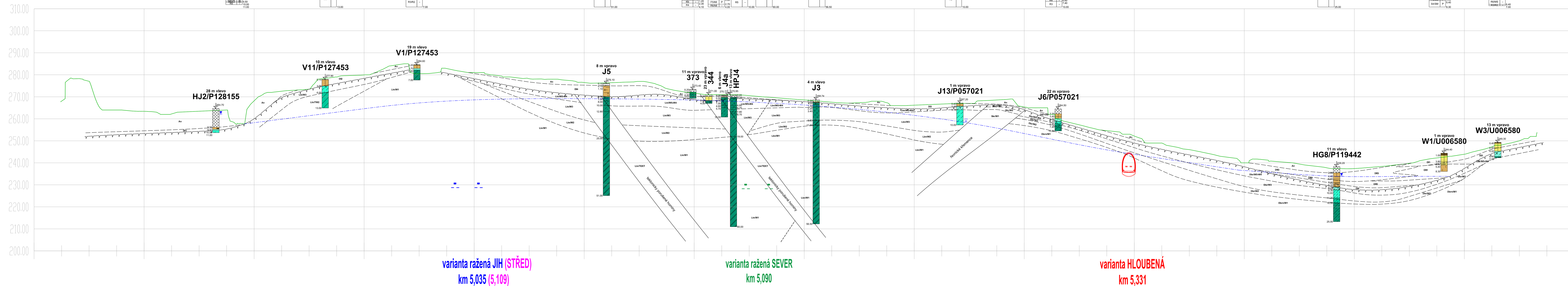
There are two risk registers existing for the bored variant “South”: 1) risks of geotechnical origin are discussed and evaluated within the geotechnical investigation report. 2) simplified register of risks connected with EPB excavation and their mitigation are discussed in the Technical report of the tunnel.

In the next project stage, detailed risk register will be produced for the chosen variant. The register will be also submitted to the Czech authority for mining for the purposes of safety assessment of the project.



# Orientační geologický řez 1

M 1 : 1 000 / 500



**LEGENDA POUŽITÝCH ZNAČEK PRO VRSTVY A STRATIGRAFIE:**

Návážka	Hlina s nízkou plasticitou	Břidlice jílovitá silně zvětralá	Antropozookum
Humózní vrstva	Hlina se střední plasticitou	Břidlice jílovitá mírně zvětralá	Humózní horizont
Stavební surf	Písek dobře zrnitý	Břidlice jílovitá navětralá	Eolické sedimenty
Konstrukce vozovky	Písek hrubý	Břidlice jílovitá zvětralá	Detritální sedimenty
Beton	Písek jílovitý	Břidlice jílovitá silně zvětralá	Ordovíká horniny zvětralé
Jíl šterkovitý	Štěrka jílovitá	Břidlice jílovitá mírně zvětralá	Ordovíká horniny silně zvětralé
Jíl písčivý	Břidlice zvětralá	Břidlice jílovitá navětralá	Ordovíká horniny mírně zvětralé
Jíl s nízkou plasticitou	Břidlice silně zvětralá	Břidlice jílovitá zdravá	Ordovíká horniny zvětralé
Jíl se střední plasticitou	Břidlice mírně zvětralá	Břidlice písčivá mírně zvětralá	Ordovíká horniny zdravé
Jíl s vysokou plasticitou	Břidlice navětralá	Břidlice písčivá zdravá	Ordovík
Hlina písčivá	Břidlice jílovitá zvětralá	Břidlice písčivá zdravá	

**KLASIFIKACE:**

**Konstatace dle ČSN 73 6133 (K)**

kalovitá	K
máklá	M
tuhá	T
pevná	P
tvrdá	R

**Ulehlost dle ČSN 73 6133 (U)**

lehká	KY
středně ulehá	SU
užitá	UL

**HRANICE:**

Rozhraní vrstev	---
Přechodování podklad	---
Označení vrstev	---
Hladina podzemní vody	---
Tektonická linie	---
Specifický vymezení oblast	---

**VRT**

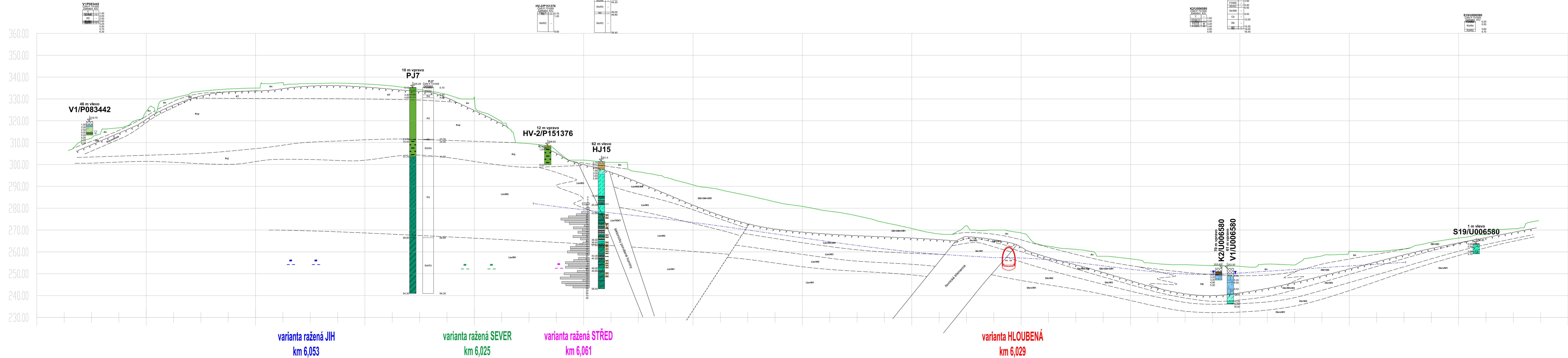
5m vlevo	Průmět vrtu (se směru střešení profilu)
J1	Označení vrtu
185,83	Nadmořská výška vrtu (m n.m.)
▼	Vzorky
▼	Hladina naražená
▼	Hladina ustatená

SESTAVENO NA ZÁKLADĚ OMEZENÉHO POČTU VRTŮ V DANÉ LOKALITĚ. MÍSTA BEZ VRTŮ JSOU INTERPRETOVÁNA Z PODROBNÝCH INŽENÝRSKOGEOLOGICKÝCH MAP PRAHY V MĚŘÍTKU 1 : 5000



# Orientační geologický řez 2

M 1 : 1 000 / 500



**LEGENDA POUŽITÝCH ZNAČEK PRO VRSTVY A STRATIGRAFIE:**


**KLASIFIKACE: Konzistence dle ČSN 73 6133 (K)**

katvka	K
měkka	M
tuhá	T
pevná	P
tvrdá	R

**Ulehlost dle ČSN 73 6133 (U)**

kyprá	KY
středně ulehlostí	SU
lehlostí	LU

**HRANICE:**

- Rozhraní vrstev
- Předkvarténi podklad
- Označení vrstev
- Hladina podzemní vody
- Tektonická linie
- Specificky vymezená oblast

**VRT**

Směr vrtu J1

Průměr vrtu (ve směru stárání profilu)

Označení vrtu

Hladinová výška vrtu (m n.m.)

**Vzorky**

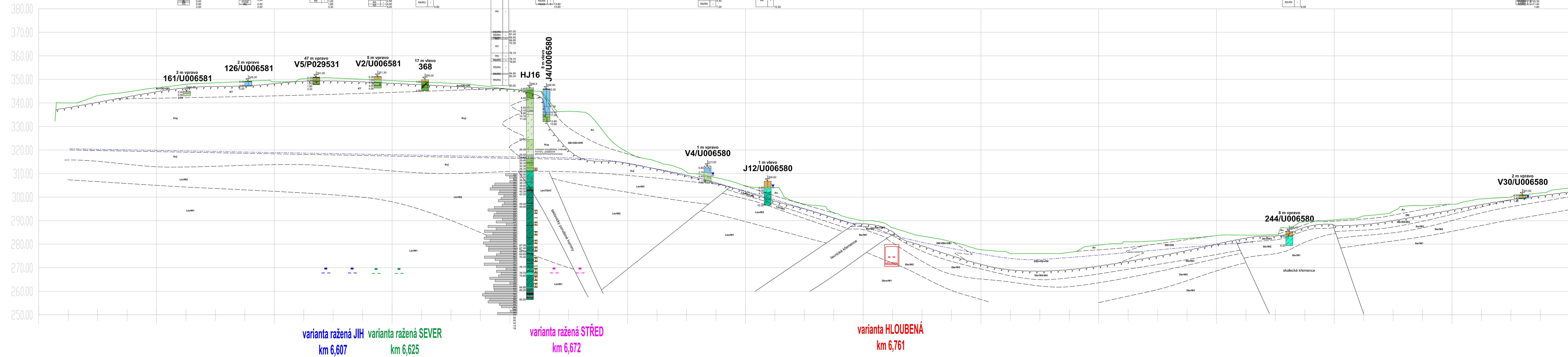
- Hladina naražená
- Hladina ustálená
- Vzorek horniny
- Agresivita zemín
- Petrografický vzorek

SESTAVENO NA ZÁKLADĚ OMEZENÉHO POČTU VRTŮ V DANÉ LOKALITĚ. MÍSTA BEZ VRTŮ JSOU INTERPRETOVÁNA Z PODROBNÝCH INŽENÝRSKOGEOLOGICKÝCH MAP PRAHY V MĚŘÍTKU 1 : 5000



# Orientační geologický řez 3

M 1 : 1 000 / 500



**LEGENDA POUŽITÝCH ZNAČEK PRO VRSTVY A STRATIGRAFIE:**


**KLASIFIKACE:**  
Klasifikace dle ČSN 73 6133 (K)

kaolínová	K
láva	L
mořská	M
pyritová	P
tvrdá	R

**Utěhlost dle ČSN 73 6133 (U)**

kyprá	KY
slabě utěhlost	SU
utěhlost	UL

**HRANICE:**

- Rozhraní vrstev
- Přechodová hranice
- Označení vrstev
- Hladina podzemní vody
- Tektonická čára
- Specificky vymezená oblast

**VZORKY:**

- Nadmořská výška vrtu (m n. m.)
- Vzorky
- Hladina naražená
- Vzorek horniny
- Agresivita zemín
- Petrografický vzorek

**SESTAVENO NA ZÁKLADĚ OMEZENÉHO POČTU VRTŮ V DANÉ LOKALITĚ. MÍSTA BEZ VRTŮ JSOU INTERPRETOVÁNA Z PODROBNÝCH INŽENÝRSKOGEOLOGICKÝCH MAP PRAHY V MĚŘÍTKU 1 : 5000**

# Orientalive geological profile 1

M 1 : 1 000 / 500



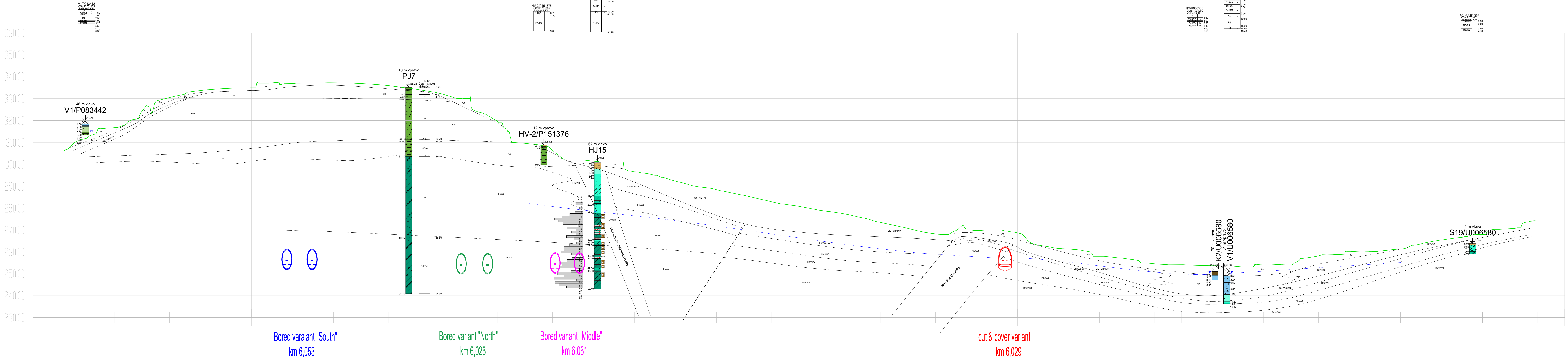
Legend of soils/rocks:


**BUILT ON THE BASIS OF A LIMITED NUMBER OF Boreholes IN THE LOCATION. PLACES WITHOUT Boreholes ARE INTERPRETED FROM DETAILED ENGINEERING AND GEOLOGICAL MAPS OF PRAGUE AT A SCALE OF 1: 5000**



# Orientative geological profile 2

M 1 : 1 000 / 500



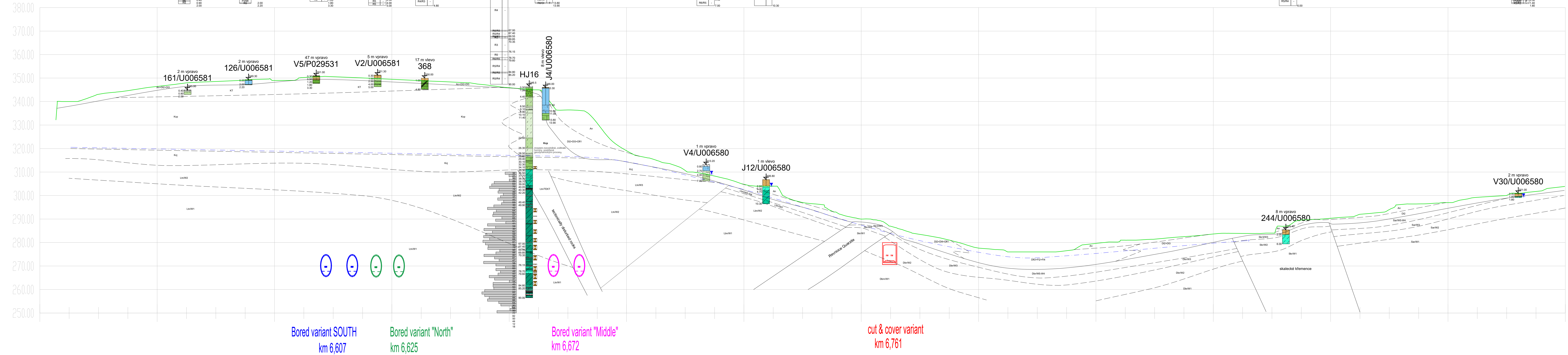
- Legend of soils/rocks**
- Antropogenic soil
  - Pavement
  - Organic layer
  - Sandy clay
  - Clay - semi plastic
  - Sandy silt
  - Silt - semi plastic
  - Sand with a mixture of fine grained soil
  - Silty sand
  - Clayey sand
  - Silty gravel
  - Filling, over 50% of crushed rock
  - Filling, less than 50% of crushed rock
  - clay
  - Sandstone fully weathered
  - Sandstone slightly weathered
  - Sandstone weakly weathered
  - Claystone weakly weathered
  - Claystone - sound
  - Siltstone - slightly weathered
  - Siltstone weakly weathered
  - Shale decomposed
  - Shale - moderately weathered
  - Shale - slightly weathered
  - Shale weakly weathered
  - Quartzite decomposed
  - Quartzite weakly weathered
  - Silty shale slightly weathered
  - Silty shale sound
  - Antropozokium
  - Humic horizon
  - Deluvial sediments
  - Fluvial sediments
  - Cretaceous rocks fully weathered
  - Cretaceous rocks slightly weathered
  - Cretaceous rocks sound
  - Ordovic rocks fully weathered
  - Ordovic rocks slightly weathered
  - Ordovic rocks strongly weathered
  - Ordovic rocks slightly weathered
  - Ordovic rocks sound

- Calcification - Consistency after CSN 73 8133 (K)**
- liquid
  - plastic
  - semi-solid
  - solid
  - hard
- Soil compaction CSN 73 8133 (U)**
- loose
  - partially compacted
  - compacted
- Limes**
- Layers
  - Rock bed
  - Designation layers
  - Groundwater level
  - Tectonic line
  - Specific area
- VRT**
- Průmět vrtu (ve směru staničení profilu)
  - Číslo vrtu
  - Národní výška vrtu (m n.n.)
  - Vzorky
  - Hladina naražení
  - Vzorek hominy
  - Agresivita zemín
  - Petrografický vzorek

**BUILT ON THE BASIS OF A LIMITED NUMBER OF Boreholes IN THE LOCATION. PLACES WITHOUT Boreholes ARE INTERPRETED FROM DETAILED ENGINEERING AND GEOLOGICAL MAPS OF PRAGUE AT A SCALE OF 1: 5000**

# Orientative geological profile 3

M 1 : 1 000 / 500



**Legend of soils/rocks:**


**Classification:**  
 Consistency after CSN 73 6133 (K)  
 liquid  
 plastic  
 semi-solid  
 solid  
 hard

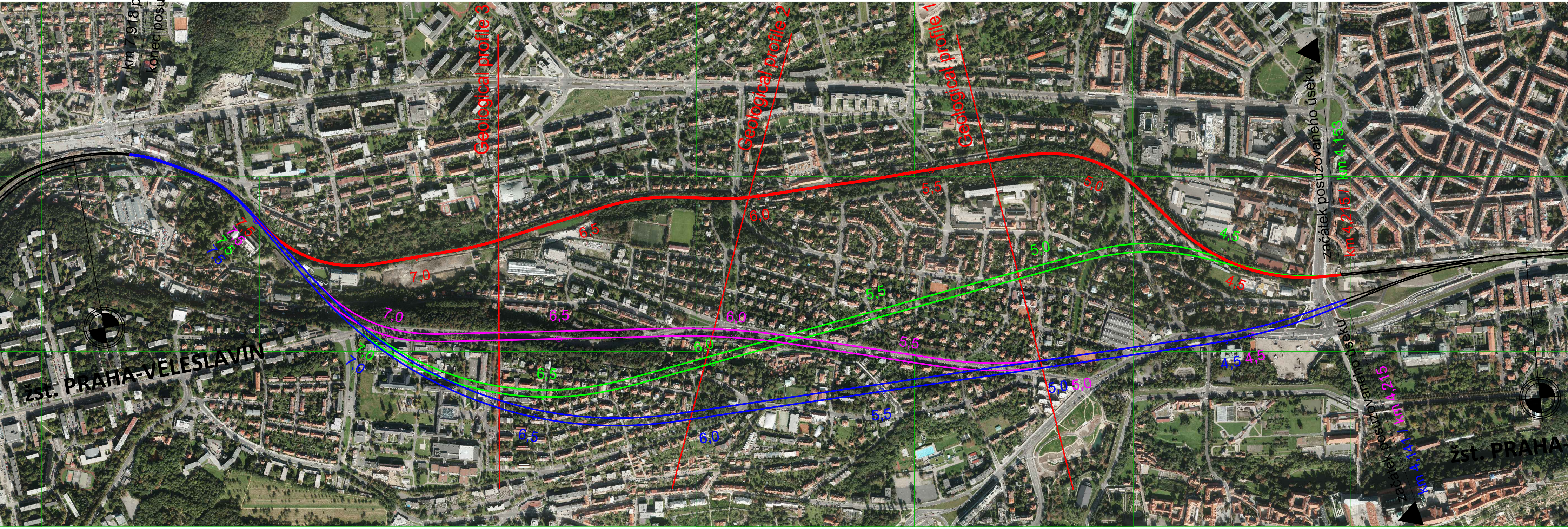
**Soil compaction CSN 73 6133 (U)**  
 loose  
 partially compacted  
 compacted

**Lines:**  
 Layers  
 Rock bed  
 Designation layers  
 Groundwater level  
 Tectonic line  
 Specific area

**VRT**  
 5m vlevo  
 J1  
 185,63  
 Průmět vrtu (ve směru stančení profilu)  
 Označení vrtu  
 Nadmožská výška vrtu (m n.m.)  
 Vzorok  
 Hladina naražená  
 Hladina ustálená  
 Vzorok horniny  
 Agresivita zemin  
 Petrografický vzorek

**BUILT ON THE BASIS OF A LIMITED NUMBER OF Boreholes IN THE LOCATION. PLACES WITHOUT Boreholes ARE INTERPRETED FROM DETAILED ENGINEERING AND GEOLOGICAL MAPS OF PRAGUE AT A SCALE OF 1: 5000**







# ZJIŠTĚNÍ NAPJATOSTI HORNINOVÉHO MASIVU METODOU ODLEHČENÍ ŠTOLOU PRO PRVNÍ PODTUNELOVÁNÍ ŘEKY VLTAVY METREM V ROCE 1973

## DETERMINATION OF ROCK MASSIF STATE OF STRESS USING THE STRESS-RELIEF GALLERY METHOD FOR THE FIRST PASSAGE OF METRO TUNNELS UNDER THE VLTAVA RIVER IN 1973

JIŘÍ HUDEK

### ABSTRAKT

V roce 1973 se připravovalo první podtunelování Vltavy trasou A pražského metra. Ražba byla situována do horninového prostředí ordovických jílovitých břidlic s nízkou pevností a velmi velkou hustotou diskontinuit. Specifikem zde bylo prototypové použití mechanizovaného štítu TŠČB-3, který výrub vyztužoval ostěním z monolitického lisovaného betonu. Tento však byl nearmovaný a neumožňoval pokládání vodotěsné izolace, a proto jej bylo nutné dimenzovat s bezpečností i proti vzniku trhlin. Zatížení na obezdívku je v počáteční fázi určeno tlakem lisování a v konečné je závislé na původním napětí v horninovém masivu. Jelikož ostění bylo kruhového průřezu, bylo třeba zjistit především poměr horizontálních a vertikálních složek napětí, tj. součinitel tlaku v klidu  $K_0$ . K jeho stanovení byla zvolena velkoobjemová metoda odlehčením štolou, jednalo se zde o prvou aplikaci v naší republice. Metoda vyžaduje před ražením štoly osadit do vrtů v okolním horninovém prostředí měřicí body. Výlom kruhové odlehčovací štoly (o průměru 2 m) byl prováděn s úplným vyloučením trhacích prací a bez podchycování nosnou výztuží. Při vyhodnocování výsledků zjištěného přetvoření anizotropního a heterogenního horninového masivu v důsledku vyražení štoly byla použita tehdy ještě zcela nová metoda konečných prvků.

### ABSTRACT

In 1973, the first passage of the Line A metro tunnels under the Vltava River was under preparation. The excavation was to pass through a rock environment formed by the Ordovician clay shales with low strength and very closely spaced discontinuities. The specifics of this work was the prototype application of the mechanised shield TŠČB-3, which provided the support of the excavated opening with a cast-in-place compressed concrete lining. Since the concrete was not reinforced and did not allow for installing waterproofing, it was necessary to design the dimensions of the lining to be safe even against cracking. The load acting on the lining in the initial phase is determined by the concrete compression and, in the final phase, it depends on the original stress in the rock mass. Because the lining was circular in the cross-section, it was first of all necessary to determine the proportion of horizontal components of stress to vertical ones, i.e. the coefficient of pressure at rest  $K_0$ . The large-volume relief gallery method was chosen for its determination; it was the first application in our republic. This method requires the installation of measurement points in boreholes in the surrounding rock environment in advance of the gallery excavation. The excavation of the circular relief gallery (2m in diameter) was carried out with the total exclusion of blasting operations and without supporting with structural reinforcement. The at that time completely new Finite Element Method was applied to the assessment of the results of the detected deformations of the anisotropic and heterogeneous rock mass resulting from the gallery excavation.

### ÚVOD

V padesátileté historii projektového ústavu PUDIS Praha byly vždy významnou složkou činnosti také průzkumy. Například pro pražské metro byl PUDIS v letech 1967 až 1977 generálním dodavatelem inženýrskogeologických průzkumů a autor tohoto příspěvku byl hlavním zpracovatelem jejich geotechnické části. Celkový přehled průzkumných činností PUDIS pro podzemní stavby byl již stručně popsán v časopisu Tunel č. 3/2007 [1]. Tento příspěvek by však chtěl připomenout zajímavý příklad, který má vazbu i na současné problémy v oboru podzemního stavitelství.

V roce 1973 probíhaly přípravy na první podtunelování řeky Vltavy trasou A pražského metra. Příslušný úsek byl situován mezi budoucími stanicemi na levém břehu Malostranská a pravém Staroměstská, a to v horninovém prostředí ordovických prachovitojílovitých břidlic charakteru až s nízkou pevností a velmi velkou hustotou diskontinuit. Novým specifikem zde byl předpoklad prototypové ražby mechanizovaným štítem (sovětské výroby) TŠČB-3, který výrub vyztužoval ostěním z monolitického lisovaného betonu. Tento však byl

### INTRODUCTION

Surveys were always important parts in the fifty-year history of the activities of PUDIS Praha design institute. For example, PUDIS was the general contractor for engineering geological surveys for the Prague Metro in 1967 through to 1977 and the author of this paper was the main author of the geotechnical parts. The overall overview of the surveying activities of PUDIS was already briefly described in TUNEL journal issue No. 3/2007 [1]. This paper would wish to remind the readers of an interesting example, which is related even to current problems in the field of underground construction.

In 1973, the preparations for the first tunnelling work under the Vltava River for the Line A of Prague metro were underway. The respective section was located between future stations Malostranská (on the left bank) and Staroměstská (on the right bank), in a rock environment formed by the Ordovician silty-clayey shales with the characteristic low strength and very closely spaced discontinuities. The new specific feature of this work was the assumption of a prototype application of the Soviet-production mechanised

nearmovaný a s ohledem na přítomnost tlakové podzemní vody a nemožnost pokládání vodotěsné izolace bylo potom nutné dimenzování s bezpečností i proti vzniku a rozevírání trhlin. Vliv této technologie byl projektantem analyzován – viz lit. [2] a bylo poukázáno na to, že zatížení na obezdívku je dáno reaktivním tlakem horniny proměnlivým v čase. Jeho počáteční hodnota je určena hlavně tlakem lisování (při druhém stupni 1,5 MPa) a konečná (po doznění pracovních stadií vývoje horninového tlaku a dosažení stavu dlouhodobého působení) je přímo závislá na velikosti a rozdělení původních napětí v horninovém masivu. Jelikož ostění bylo projektováno kruhového průřezu, bylo třeba stanovit především poměr horizontálních a vertikálních složek napětí, tj. součinitel tlaku v klidu  $K_0$ . Jeho ověření v heterogenním a anizotropním prostředí rozpuštěných skalních hornin náleží však mezi nejnáročnější geotechnické terénní zkoušky. V tomto případě byla zvolena velkoobjemová metoda odlehčením štolou (viz schéma na obr. 1). Pro zhodnocení a interpretaci naměřených posunutí bylo aplikováno matematické modelování metodou konečných prvků – v té době ještě používané rovněž prototypově.

Na řešení uvedené náročné geotechnické problematiky se podílely především tyto firmy:

- PUDIS Praha – návrh metody, řízení realizace, interpretace a zhodnocení výsledků;
- HYDROPROJEKT Praha – matematické modelování metodou konečných prvků;
- METROSTAV Praha – ražba přístupových děl a vlastní pokusné odlehčovací stoly.

## STRUČNÁ CHARAKTERISTIKA HORNINOVÉHO PROSTŘEDÍ

V zájmové oblasti jsou vodorovné osy tunelů metra situovány přibližně 22 m pod průměrnou úrovní hladiny Vltavy. Byly raženy ve zdravých prachovitojíllovitých břidlicích vinických vrstvách, které náležejí do ordovické barrandienské synklinály. Jejich orientační ilustraci umožňuje například část čelby fotograficky zachycená na obr. 2 a 3. Základní materiál těchto břidlic vykazuje pevnost v jednoosém tlaku nejčastěji v rozpětí 10 až 25 MPa a jedná se tedy o horninu s nízkou až střední pevností. Jsou převážně tence deskovitě vrstevnaté, šikmo ukloněné (průměrný sklon k jihu  $50^\circ$ ) a jsou prostoupeny systémem puklin, ohlazů a tektonických poruch, které způsobují značnou nehomogenitu přetvárného chování. Horninový masív se skládá z nepravidelných bloků a výrazných diskontinuitních ploch s ohlazi. Horninové bloky mají velmi velkou až velkou hustotu diskontinuit, tektonické poruchy jsou tvořeny rozdrčenou horninou (s extrémně velkou hustotou diskontinuit).

Celková mocnost břidlic od erozní báze Vltavy k vodorovné ose tratěvých tunelů je cca 13 m. Z této mocnosti zaujímají horizonty s patrným dosahem zvětrávacích procesů 7 m (přibližně 1 m rozložené, 2 m zvětralé a 4 m navětralé břidlice).

Nad erozní bází se nacházejí pleistocénní sedimenty údolní terasy Vltavy (hrubozrnné štěrky a písčité štěrky) a výše pak holocénní náplavy (písčité štěrky, písky a lokálně bahno).

## VOLBA ZKUŠEBNÍ METODY

V předstihu byly na uvedeném podzemním pracovišti ověřeny možnosti aplikace tehdy špičkových metod prováděných renomovaným pracovištěm. Proto byla úloha objednána u Hornického ústavu Československé akademie věd. Příslušné výsledky jsou shrnuty v expertize o stavu napjatosti horninového masivu v přirozeném uložení metodou odlehčeného vrtného jádra, doplněnou o měření ultrazvukem – lit. [3].

shield TŠČB-3, which provided the support of the excavated opening with a cast-in-place compressed concrete lining. But this concrete was not reinforced and, with respect to the presence of pressurised groundwater and impossibility of installing a waterproofing system, it was necessary to design the dimensions of the lining to be even safe against the development and opening of cracks. The influence of this technology was analysed by the designer – see. Ref. [2] and it was pointed that the load acting on the lining was given by the rock pressure varying with time. The initial value of the pressure is mainly determined by the pressure exerted by the concrete compression (1.5MPa during the second degree) and the final value (after the working stages of the rock pressure development fade out and the state of the long-term stress action is achieved) directly depends on the magnitude and distribution of the original stresses in the rock mass. Since the circular cross-section was designed for the lining, it was necessary to determine first of all the proportion of the horizontal components to vertical components of the stress, i.e. the coefficient of pressure at rest  $K_0$ . The verification of this coefficient in the heterogeneous and anisotropic environment of fractured rock belongs among the most demanding geotechnical field tests. The large-volume stress-relief gallery method was chosen in this particular case (see the chart in Fig. 1). Mathematical modelling using the Finite Element Method, which was also used as a prototype at that time, was applied to the assessment and interpretation of the measured displacements.

The following firms participated mainly on the solution to the above-mentioned exacting geotechnical issue:

- PUDIS Praha – the method design, control over the implementation, interpretation and evaluation of results;
- HYDROPROJEKT Praha – mathematical modelling using the Finite Element Method;
- METROSTAV Praha – excavation of access adits and the experimental stress-relief gallery itself.

## BRIEF CHARACTERISTICS OF ROCK ENVIRONMENT

The longitudinal axes of the metro tunnel tubes in the area of interest are located approximately 22m under the average level of the Vltava River surface. The tunnels were driven through the Vinice Formation silty-clayey shales existing in the Ordovician Barrandean Syncline. Their approximate illustration is possible, for example, on the part of the excavation face captured in Figures 2 and 3. The basic material of these shales exhibits the uniaxial compressive strength within ranging from 10 to 25MPa, which means that it is low to medium strength rock. It is mostly thinly tabularly bedded, dipping (the average dip to the south is  $50^\circ$  and the rock mass contains pervasive systems of fissures, slickensides and tectonic faults causing significant non-homogeneity of the deformational behaviour. The rock mass consists of irregular blocks and marked discontinuity surfaces with slickensides. The spacing of discontinuities in the rock blocks with small to very small spacing; the tectonic faults are formed by crushed rock (with extremely small spacing of discontinuities).

The total thickness of the shales from the Vltava erosion basis up to the axis of the running tunnels is ca 13m. Of this thickness, horizons with obvious reach of weathering processes capture 7m (approximately 1m of decomposed shale, 2m of weathered shale and 4m of slightly weathered shale).

Z této expertizy vyplývá:

- Pro stanovení napjatosti je zastiženo prostředí ve značně složitých a nepříznivých podmínkách. Komplikace způsobuje především heterogenita – hojný výskyt porušených zón a proměnlivost ve směru i úklonu vrstev s výraznou anizotropií.
- Metodou odlehčení jádra pro konečnou délku vrtu (5,47 m) bylo stanoveno vertikální napětí  $\sigma_v = 0,21$  MPa a horizontální  $\sigma_h = 1,58$  MPa. Tato mimořádně vysoká hodnota vodorovného napětí byla přisouzena koncentraci napětí na hraně zářezu Vltavy nebo vlivu nedalekých letenských svahů.
- Metoda ultrazvuková pro dané prostředí s velmi nízkou úrovní napjatosti neumožnila přímé stanovení absolutních hodnot napětí.

K interpretaci těchto výsledků lze dodat, že pro horninový masiv se horizontální napětí jeví nereálně vysoké a vertikální nízké. Součinitel tlaku v klidu by zde dosáhl extrémní hodnoty  $K_0 = 7,52$ , na což by samozřejmě nearmovaný beton nebylo možné nadimenzovat. Příslušné hodnoty vystihují jen napjatost horninových úlomků a pro horninový masiv je třeba vybrat podstatně rozměrově větší metodu ověření.

Z metod zjišťování napjatosti bylo tedy pro řešení úkol třeba vybrat takovou, která by splňovala následující tři podmínky:

1. možnost zjišťování původní napjatosti;
2. velkoobjemové měřítko;
3. citlivost pro nízká napětí.

Ad 1. Úkol zjistit složky původní napjatosti vylučoval možnost použití těch metod, které k instalaci aparatur vyžadují přístupová díla měnící primární napjatost již před začátkem měření. Patří sem všechny metody, při nichž jsou přístroje osazovány na líc výrubu nebo do pásma zmenšených či zvýšených napětí. Je to například často používané odlehčení horninového bloku rýhami s kompenzací přetvoření vloženými plochými lisami. Výsledky těchto měření zde reprezentují změněný stav napjatosti po vyražení přípravného díla.

Ad 2. Značný stupeň rozpuštění a heterogenita zastiženého horninového prostředí znemožňovaly získání reprezentativních výsledků metodami pracujícími s malým objemem horniny. Velikost objemové jednotky, jejíž napjatost bylo nutné studovat, byla v tomto případě minimálně řádu  $10 \text{ m}^3$  až  $100 \text{ m}^3$ .

Ad 3. Z malé hloubky uložení samozřejmě vyplývají nízké absolutní hodnoty napětí vyvolaného tíhou nadloží. Vertikální napětí v úrovni vodorovné osy tunelu metra je zde přibližně  $0,5$  MPa. Proto citlivost metody musí být podstatně vyšší než pro případy vysokých napětí ve značných hloubkách důlních podmínek. Tato okolnost například znemožňovala získání směrodatných výsledků některými geofyzikálními metodami.

Uvedeným třem podmínkám vyhovuje zvolená varianta metody *odlehčení horninového masivu štolou*. Její schéma je vyznačeno na obr. 1. Patří mezi deformační metody a odvozuje primární napjatost na podkladě velikostí a směrů deformací horninového prostředí v okolí odlehčovací stoly způsobených jejím ražením. Metodu navrhl a poprvé realizoval prof. Leopold Müller ze Salcburku – lit. [4]. V Československu se jednalo o první aplikaci a v této variantě s měrnými body situovanými v horninovém prostředí podél celé ražby dosud jedinou. Jednodušší varianta podle Merrill-Petersona s měrnými body pouze při ústí odlehčovací stoly, která poskytuje soubor výsledků jen pro jeden profil determinovaný uvedenými okrajovými podmínkami, byla později aplikována vícekrát – naposledy pro Královopolský tunel, Pavlík, 2012 [5]. Použitá modifikace

The Pleistocene sediments of the Vltava flood-plain terrace (coarse-grained gravels and sandy gravels) are above the erosion base; the Holocene fluvial deposits (sandy gravels, sand and locally mud) are above them.

## SELECTION OF TESTING METHOD

The possibilities of the application of at that time top methods were verified in advance by a renowned workplace. For that reason the order for the verification was placed with the Mining Institute of the Czechoslovak Academy of Sciences. The respective results are summarised in the expert opinion on the stress state of rock mass in natural bedding condition using the de-stressed drilling core method, which was complemented by ultrasound measurements – Ref. [3].

It follows from the expert opinion:

- The conditions of the environment encountered is quite complicated and unfavourable for the determination of the state of stress. Complications are caused first of all by the heterogeneity – the abundant presence of fault zones and the variability of the trend and dip of layers with marked anisotropy.
- Applying the de-stressed drilling core method to the final borehole length (5.47m), the vertical stress was determined at  $\sigma_v = 0.21$  MPa and the horizontal stress at  $\sigma_h = 1.58$  MPa. This extraordinarily high value of the horizontal stress was attributed to the concentration of stress at the upper edge of the Vltava River cutting or the influence of nearby Letná slopes.
- The ultrasound testing method did not allow the direct determination of absolute values of the measurements for the particular environment with very low level of stress.

It is possible to add to the interpretation of these results that the horizontal and vertical stresses appear to be unrealistically high and low, respectively, for the rock mass. The coefficient of pressure at rest reached here the extreme value of  $K_0 = 7.52$ , for which, of course, unreinforced concrete could not be designed. The respective values only give a picture of the state of stress of rock fragments and it is necessary to select a verification method with substantially larger dimensions of rock mass blocks.

It was therefore necessary for the problem being solved to select such a method of verifying the state of stress which would fulfil the following three conditions:

1. the possibility of determining the original state of stress;
2. a large-volume scale;
3. sensitivity to low stresses.

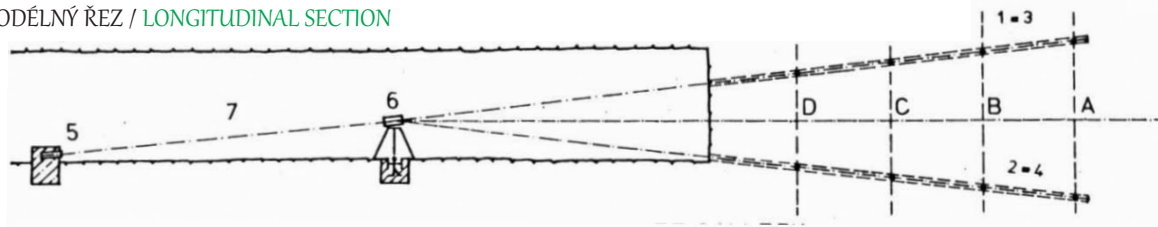
Ad 1. The task to determine the components of the original state of stress excluded the possibility of using the methods which require access adits changing the primary state of stress for the installation of apparatuses already before the commencement of measurements. Among them belong all methods at which the apparatuses are installed on the surface of the excavated opening or in the zone of reduced or increased stresses. It is, for example, the frequently mentioned rock mass block de-stressing by grooves with the compensation of deformations by flat jacks. The results of these measurements represent here the changed state of stress after the completion of the preparatory working.

Ad 2. The significant degree of fracturing and the heterogeneity of the rock environment encountered precluded obtaining representative results using methods operating with small volumes of rock. The minimum magnitude of the volume unit the state of stress of which had to be studied was in this case in the order of  $10 \text{ m}^3$  to  $100 \text{ m}^3$ .



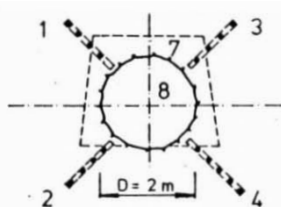
## STADIUM PŘÍPRAVNÝCH PRACÍ / STAGE OF THE PREPARATION WORKS

## PODÉLNÝ ŘEZ / LONGITUDINAL SECTION

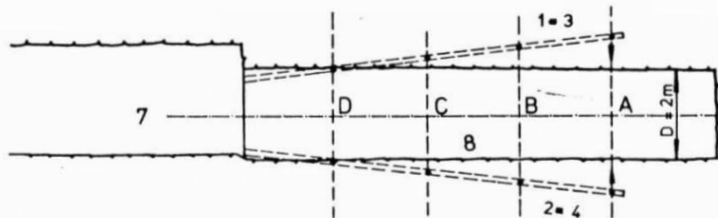


## STAV PO VYRAZENÍ ODLEHČOVACÍ ŠTOLY / STAGE AFTER THE EXCAVATION OF STRESS-RELIEF GALLERY

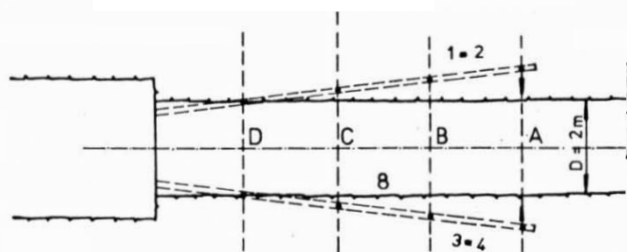
## PŘÍČNÝ ŘEZ / CROSS SECTION



## PODÉLNÝ ŘEZ / LONGITUDINAL SECTION



## PŮDORYSNÝ ŘEZ / A PLAN



## Legenda / Legend

- 1, 2, 3, 4** pozorované vrty s PVC trubkami a výplňovou injektáží  
measuring boreholes with PVC-tubes grouted in rock
- A, B, C, D** měřené příčné profily / measured cross sections
- cílové značky úhlového sledování / target marks
- 5** betonové bloky s výchozími značkami  
concrete blocks with initial marks
- 6** stabilizované stanoviště theodolitu  
stabilized position of the theodolite
- 7** přístupová štola s pozorovací komorou  
access gallery with observing room
- 8** nevytlučený výrub odlehčovací štoly  
unsupported stops of stress-relief gallery

Obr. 1 Schéma použité modifikace metody stanovení primární napjatosti horninového masivu odlehčením štolou

Fig. 1 Chart of the used modification of the method of determining the primary state of stress by means of the stress-relief gallery method

Hudek, J., 1973

experimentu se zde lišila od původní verze L. Müllera systémem měření pretvoření a způsobem jejich vyhodnocení.

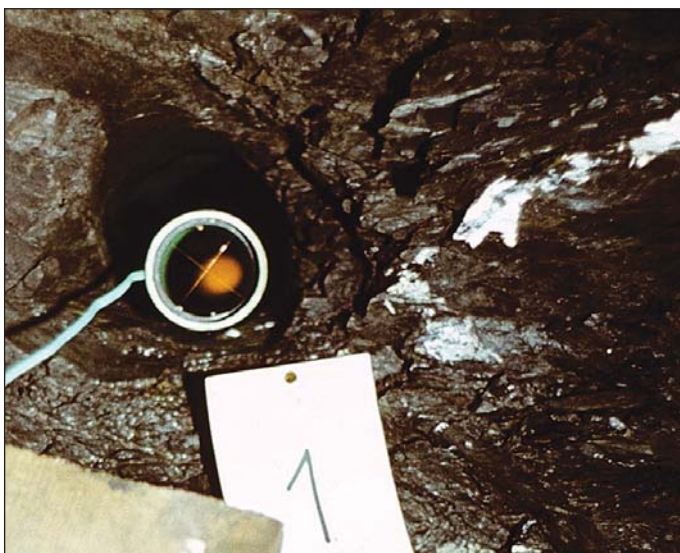
### POUŽITÁ MODIFIKACE STANOVENÍ NAPJATOSTI ODLEHČENÍM ŠTOLOU

Metoda vyžaduje před ražením štoly osadit do okolního horninového prostředí měřící body. Ve stadiu přípravných prací byly proto nejprve z přístupové chodby vyvrtány čtyři paprskovitě se rozbíhající vrty délky 8,5 m. Jejich osy svíraly s horizontální i vertikální rovinou, jdoucí osou přístupové chodby, úhel 6°. Do těchto vrtů byly zasunuty trubky z polyvinylchloridu o relativně malé tuhosti. Na jejich konci byla umístěna žárovka s matnicí. Uvnitř byly ve vzájemné vzdálenosti 2 m fixovány cílové značky tvořené nitkovým křížem z ocelových vláken. Detail instalace této měřicí optické aparatury do vrtu č. 1 (levý horní) zachycuje fotografie na obr. 2 (na konci elektrické osvětlení nitkových křížů). Cílové značky byly situovány ve čtyřech měřených příčných profilech označených A, B, C a D. Vzdálenost cílových značek od startovacího čela štoly se zvětšovala od profilu D až k profilu A. Těsný kontakt PVC trubek se sledovanou horninou byl zajištěn výplňovou injektáží. Dále byly v zadní části přístupové chodby vybetonovány bloky se základními značkami nulového čtení.

Ad 3. Of course, low absolute values of the stress induced by the weight of overburden are a consequence of the small depth of embedding. The vertical stress at the metro tunnel axis level is approximately 0.5MPa here. For that reason the sensitivity of the method has to be significantly higher than that for the cases of high stresses at great depths existing in mines. This condition, for example, precluded obtaining competent results using some geophysical methods.

The above-mentioned three conditions are met by the selected method variant – the rock mass de-stressing by a gallery method. Its chart is presented in Fig. 1. It belongs among deformational methods and derives the primary state of stress on the basis of magnitudes and directions of rock environment deformations in the surroundings of the de-stressing gallery caused by its excavation. The method was proposed and for the first time implemented by Prof. Leopold Müller from Salzburg – Ref. [4]. It was the first application in Czechoslovakia and, in this variant with measurement points located in the rock environment throughout the excavation length, till now the only. A simpler variant according to Merril-Petterson with measurement points only at the mouth of the de-stressing gallery, which provides a set of results only for one profile determined by the above-mentioned boundary conditions, was applied later several times – last time to the Královo Pole tunnel, 2012 [5]. The experiment modification used differed there from the original version by L. Müller in the system of deformation measurements and the method of their assessment.





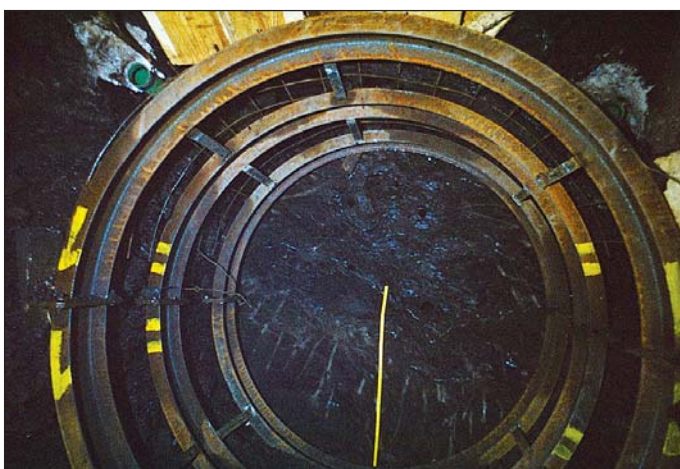
Hudek, J., 1973

Obr. 2 Instalace optické měřicí aparatury do vrtu č. 1 – na konci elektrické osvětlení nitkových křížů

Fig. 2 Installation of the optical measurement apparatus into borehole No. 1 – electrical illumination of cross hair targets is seen at the end

Pro sledování horizontálních a vertikálních posuvů cílových značek byl použit teodolit umístěvaný do průřezu os pozorovacích vrtů. Stabilizace stanoviště stroje byla zajištěna betonovým blokem v počvě chodby s centrační značkou. Stroj byl velmi přesně centrován s pomocí speciálního zařízení Ing. Vencovského z Hornického ústavu ČSAV. Urovnání podle rotační osy umožňovalo vysokou přesnost centraxe v mezích  $\pm 0,1$  mm. Celková přesnost systému měření posuvů byla před zabudováním zařízení do podzemí odzkoušena v laboratoři a výsledná chyba nepřesáhla  $\pm 0,14$  mm. Vzájemné odlišení jednotlivých cílových značek v jednom vrtu nečinilo žádné obtíže, protože v zóně ostrosti dalekohledu teodolitu se nacházela vždy jen jedna z nich.

Po dokončení přípravných prací a základním zdvojeném nulovém zaměření všech značek bylo zahájeno ražení kruhové odlehčovací štoly o průměru 2 m. Výlom byl prováděn s úplným vyloučením trhacích prací po záběrech délky 0,5 m. Čelo výrubu bylo udržováno stále přibližně svislé. Odlehčovací štola nebyla podchycována výztuží. Vložená bezpečnostní kruhová výstroj (osazovaná ve vzájemné vzdálenosti 1 m) nebyla



Hudek, J., 1973

Obr. 3 Pohled na břidlici vinických vrstev na čele odlehčovací štoly po vyražení délky 2 m

Fig. 3 A view of the Vinice Formation shale at the excavation face of the stress-relief gallery after the completion of the excavated length of 2 m

## THE MODIFICATION USED FOR STRESS STATE DETERMINATION BY STRESS-RELIEF GALLERY METHOD

The method requires measurement points to be installed in the surrounding rock environment prior to the gallery excavation. For that reason 4 radially parting boreholes 8.5m long were first carried out from an access adit at the preparation work stage. Their axes formed an angle of  $6^\circ$  with the horizontal and vertical planes passing through the axis of the access adit. Polyvinylchloride tubes with relatively low stiffness were inserted into the boreholes. Light bulbs with a ground-glass screen were installed at their ends. Steel cross hair targets were fixed inside the tubes at the spacing of 2m. A detail of the installation of this optical measurement apparatus into borehole No. 1 (left, top) is captured by photo in Fig. 2 (electrical illumination of the cross hairs is seen at the end). The targets were located in four measurement cross-sections marked as A, B, C and D. The distances of the targets from the starting face of the gallery grew from cross-section D up to cross-section A. The tight contact of the PVC tubes with the rock mass being examined was provided by annular grouting. Further on, concrete blocks with basic marks of the zero reading were cast in the rear part of the access adit.

A theodolite installed in the intersection points of axes of the observation boreholes was used for the monitoring of horizontal and vertical displacements of the targets. The stabilisation of the theodolite set up was secured by a concrete block with a central mark embedded in the adit bottom. The theodolite was centered very precisely by means of special equipment designed by Ing. Vencovský from the Institute of Mining of the Czechoslovak Academy of Sciences. Setting the theodolite according the axis of rotation allowed for high precision of the centering within precision limits of  $\pm 0.1$  mm. The total accuracy of the measurement of displacement was tested in a laboratory before the incorporation of the equipment into the underground and the resultant error did not exceed  $\pm 0.14$ mm. Differentiation of individual targets in one borehole made no problems because only one of them was always found in the theodolite telescope focus zone.

The excavation of the circular 2m-diameter stress-relief gallery commenced after the completion of the preparatory work and the doubled basic survey of all targets. The excavation was carried out with completely excluded blasting operations, with excavation rounds 0.5m long. The excavation face was continually maintained approximately vertical. The stress-relief gallery was not provided with excavation support. The incorporated circular safety support frames (installed at 1m spacing) were not tightened against the rock, therefore they remained unloaded, which was in addition continually checked by a system of strain gauge transducers glued on the steel sections. The conditions with the excavation face at the distance of 2m and after complete excavation of the length of 10.3m are captured by the photos in Fig. 3 and Fig. 4, respectively.

The movement of the rock mass in the direction of the stress-relief gallery occurred as a result of the excavation. The movement was copied even by the tubes with the targets. The targets were surveyed after the completion of every other excavation round. The targets were observed for additional 30 days after the completion of the excavation for the purpose of recording the elastic recovery.

The movements of the targets were assessed depending on the distance of the excavation face from the measured cross-section and the time. The first measurable displacements appe-



Hudek, J., 1973

Obr. 4 Celkový pohled do odlehčovací štoly po vyražení délky 10,3 m  
Fig. 4 Overall view down the stress-relief gallery after the completion of the excavated length of 10.3m

dotahována k hornině, a tudíž nezatížená, což bylo průběžně ještě kontrolováno systémem tenzometrických snímačů nalepených na ocelových profilech. Stav s čelem výrubu ve vzdálenosti 2 m zachycuje fotografie na obr. 3 a po celkovém vyražení 10,3 m je na obr. 4.

V důsledku ražení docházelo k pohybu horninového masivu směrem k odlehčovací štole, který kopírovaly i trubky s cílovými značkami. Tyto byly zaměřovány po každém druhém záběru. Pro podchycení složky dopružování byly značky po dokončení ražení sledovány ještě dalších 30 dnů.

Pohyby cílových značek byly vyhodnocovány v závislosti na vzdálenosti čela výrubu od měřeného profilu a na čase. První měřitelné posuvy se objevovaly již 2 až 1 m před čelem, při průchodu výrubu pod cílovými značkami dosahovaly tyto posuvy již cca 15 % konečných celkových hodnot a při postupu 2 m za značkami (tj. jeden průměr štoly) cca 55 %. Příklad postupného vývoje posunů pro nejvzdálenější profil A je vyznačen v obr. 6. Ve vrtu č. 1 (levý horní) byla naměřena konečná svislá složka posuvu 0,9 mm a vodorovná 0,3 mm. U vrtu č. 4 (pravý dolní) bohužel došlo k poruše osvětlovacího zařízení, a proto příslušný diagram v obrázku chybí.

K systému měření přetvoření uvedenou geodetickou metodou je třeba upozornit, že pro dané prostředí poskytlo ještě vyhovující výsledky. Ale pro horninový masiv s vyšší tuhostí (například s moduly pružnosti většími než cca 300 MPa) je nutné použít přesnější metodu.

## SOUVISEJÍCÍ DOPLŇUJÍCÍ GEOTECHNICKÉ ZKOUŠKY A MĚŘENÍ

Součástí doplňujícího inženýrskogeologického průzkumu pro ražbu tratových tunelů mechanizovaným štítem pod řečištěm Vltavy byla ještě řada dalších prací. Mimo podrobné geologické dokumentace přílehlých předstihových ražeb to byly systematické odběry horninových vzorků pro standardní laboratorní zjišťování popisných, základních fyzikálních a mechanických vlastností. Dále v předstihu v blízkosti odlehčovací štoly byla situována rozrážka pro sérii terénních zkoušek

are already 2 to 1m before the excavation face; during the excavation passage under the targets the displacements already reached 15% of the final total values and ca 55% when the excavation face advanced 2m beyond the targets (i.e. one diameter of the gallery). An example of the gradual development of displacements for the most distant cross-section A is presented in Fig. 6. The final vertical and horizontal components of displacement measured in borehole No. 1 (left, top) amounted to 0.9mm and 0.3mm, respectively. Unfortunately, a defect of the illumination equipment occurred in borehole No. 4 (right, bottom). For that reason the respective diagram is missing in the picture.

Regarding the system of measuring deformations using the above described survey method, it is necessary to point out that it provided results still satisfactory for the particular environment. However, a more accurate method has to be used for rock mass with higher stiffness (for example with moduli of elasticity greater than ca 300MPa).

## RELATED COMPLEMENTARY GEOTECHNICAL TESTS AND MEASUREMENTS

A number of other work operations were parts of the complementary engineering geological investigation for the excavation of running tunnels under the Vltava river bed using the mechanised shield. Apart from detailed geological documentation of adjacent advanced excavation operations, there was the systematic collection of rock specimens for standard laboratory determination of descriptive, basic physical and mechanical properties. In addition, a tunnel stub was carried out in advance in the vicinity of the stress-relief gallery for a series of field rock mechanics tests. Apart from common plate loading tests (with the area up to 5000cm<sup>2</sup>) and shear tests with the predetermined failure surface (along the bedding planes, weakness planes or planes with general orientation by a rock block), large-volume field tests on cylindrical or prismatic blocks (1.0m high and with the transverse dimension of 0.5m) with the free development of a failure surface – first of all under uniaxial and triaxial compression (with detailed measurement of deformation) were conducted. A field torsional test (combined with compression) was even carried out for anisotropic (or transversally isotropic) environment. The shear modulus of deformation  $G_{def}$  was determined by this test.

The results of the particular tests and measurements are incorporated into the survey report [6] including information obtained from the stress-relief gallery. These materials were further interpreted as input values for respective static assessments (including FEM calculations).

In the context of designing dimensions of compressed concrete lining in the section of the metro line A passage under the Vltava river bed, the problems of stability of the pre-stress introduced into the rock mass were solved. For that reason a series of 4 long-term (120 days) modified plate load tests (the area of 5000cm<sup>2</sup>) for obtaining information on yielding of the above-mentioned shale and, in the context of it, even on the development of the relaxation of the introduced pre-stress were realised. A detailed description of the respective methodologies, the obtained results and conclusions from their interpretation is presented in the report Ref. [7].

The information is presented in the form of tables with the values of individual basic physical, deformational and strength-related characteristics for individual genotypes (describing even, for example, the conditions in tectonic and fault zones) is summarised in the overall report [8] for the purpose



mechaniky hornin. Mimo běžné zatěžovací zkoušky deskou (plochy až 5000 cm<sup>2</sup>) a smykové s předurčenou plochou porušení (podél vrstevnatosti, puklinatosti či s obecnou orientací horninovým blokem) se jednalo o velkoobjemové polní zkoušky na válcových či hranolových blocích (výšky 1,0 m a příčném rozměru 0,5 m) s volným vývinem plochy porušení – především v jednoosém a tříosém tlaku (s podrobným měřením přetvoření). Pro anizotropní prostředí (resp. transversálně izotropní) byla dokonce prototypově realizována terénní zkouška v kroucení (kombinované s tlakem) a touto byl stanoven smykový modul přetvárnosti  $G_{def}$ .

Výsledky příslušných zkoušek a měření jsou začleněny do průzkumné zprávy [6] a to včetně informací z odlehčovací štoly. Tyto materiály byly dále interpretovány jako vstupní hodnoty do příslušných statických posudků (včetně výpočtu metodou konečných prvků).

V souvislosti s dimenzováním ostění z lisovaného betonu v úseku podchodu trasy A metra pod řečištěm Vltavy byla rovněž řešena problematika stabilnosti vneseného tlakového předpětí do horninového masivu. Proto zde byla realizována série čtyř dlouhodobých (120 dní) modifikovaných zatěžovacích zkoušek deskou (plochy 5000 cm<sup>2</sup>) pro získání informací o do tvarování výše popsané břidlice a v souvislosti s tímto i o průběhu relaxace vneseného předpětí. Podrobný popis příslušných metodik, zjištěných výsledků a závěrů z jejich interpretace je v průzkumné zprávě lit. [7].

Pro účely výpočtu napjatosti horninového masivu (a dále i projektového statického posouzení konstrukce) byly výše uvedené informace celkově shrnuty ve zprávě [8]. Zde jsou tabelárně uvedeny pro jednotlivé geotypy (vystihující i například poměry v tektonických a poruchových zónách) hodnoty jednotlivých základních fyzikálních, přetvárných a pevnostních charakteristik. Pro ilustraci jsou jejich hloubkové průběhy také vyneseny do vybraných příčných řezů. Sledované vlastnosti byly vstupními hodnotami do statických výpočtů, a to především při interpretaci matematického modelování metodou konečných prvků.

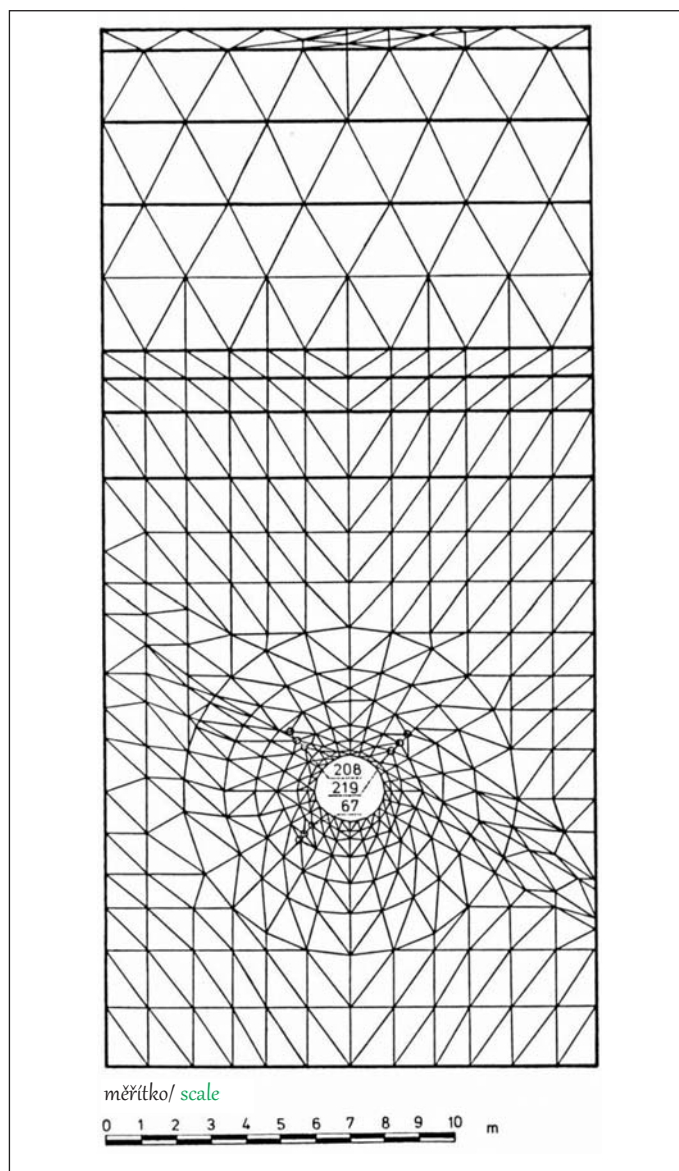
## MATEMATICKÉ MODELOVÁNÍ POKUSU METODOU KONEČNÝCH PRVKŮ

Uvedený matematický model zpracoval projektant tohoto úseku pražského metra – Hydroprojekt Praha, konkrétně jeho šéf specialista M. Doležalová. \*)

Charakter zastiženého horninového masivu (se značnou nehomogenitou) a provedeného velkoobjemového dlouhodobého geotechnického pokusu vyžadovaly adekvátní způsob pro vyhodnocení výsledků. Jednalo se vlastně o matematické modelování pokusu s přihlédnutím k výsledkům ostatních terénních zkoušek. Uvedeným požadavkům nejlépe vyhovovala metoda konečných prvků.

Pro řešení byl přijat zjednodušující předpoklad rovinného řešení pro dobu, kdy nastalo úplné vydechnutí horninového masivu. Dále byla akceptována podmínka, že v zájmové zóně

\*) Ing. Marta Doležalová, CSc. (později obdržela v rodném Maďarsku i titul vysokoškolského profesora) byla v naší republice průkopnicí matematického modelování metodou konečných prvků (již od začátku sedmdesátých let minulého století) a celoživotně v této geotechnické specializaci mimořádně vynikala, což platilo i v mezinárodním měřítku (zejména pro podzemní stavby). Bohužel již nežije, zemřela 23. 12. 2013. Příslušná kapitola je zde proto sestavena na podkladě jejích výsledků z roku 1974, soustředěných především ve zprávě [9].



Doležalová, M., 1974

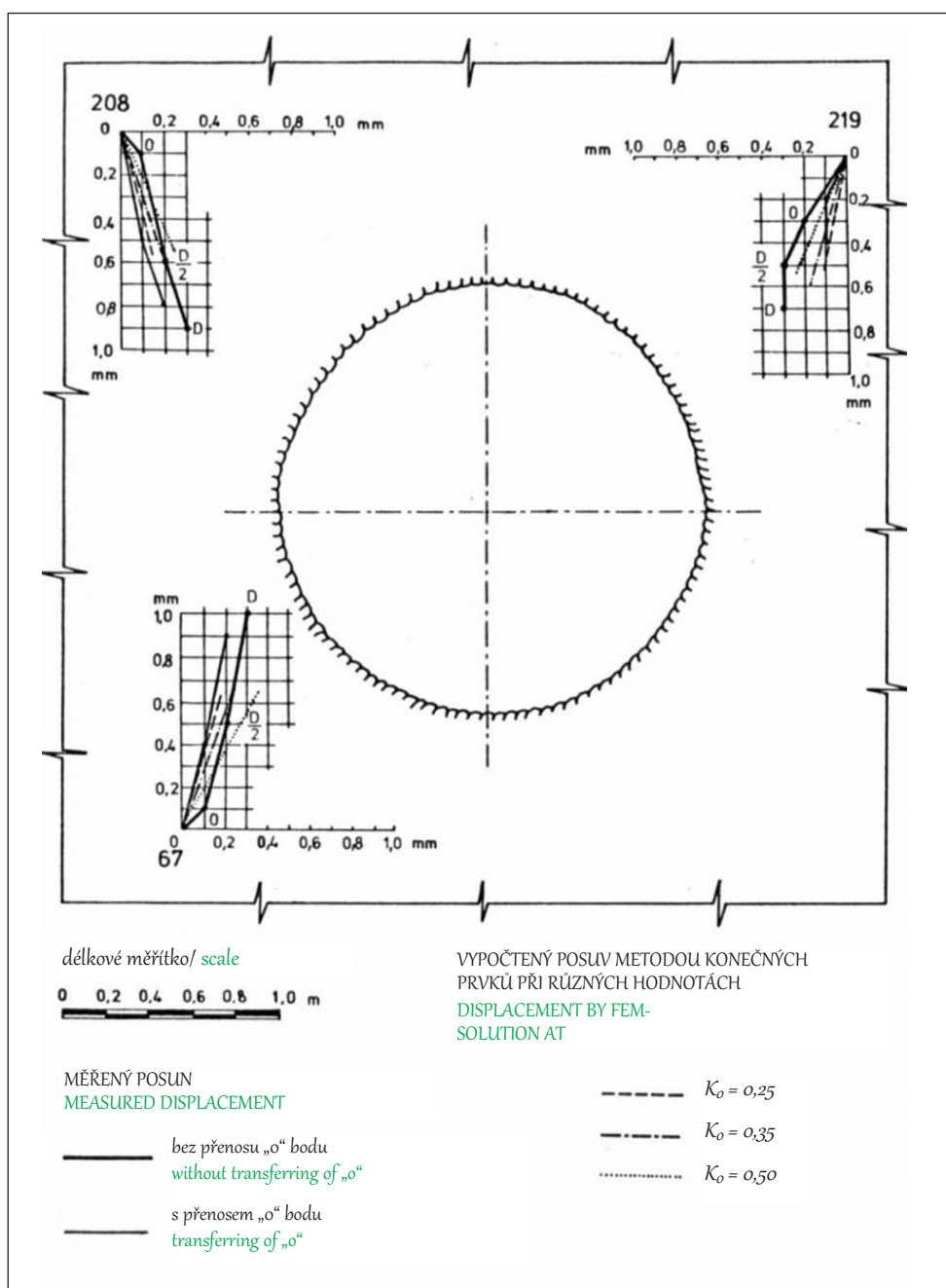
Obr. 5 Síť konečných prvků  
Fig. 5 Finite elements network

of the calculation of the rock mass stress (and further even for the structural analysis of the structure by the designer). For illustration, their values varying with depth are also plotted in cross-sections in the report. The respective properties became the input values for structural analyses, first of all for the interpretation of the FEM mathematical modelling.

## MATHEMATICAL MODELLING OF THE EXPERIMENT USING THE FINITE ELEMENT METHOD

The respective mathematical model was prepared by the designer for this Prague metro section - Hydroprojekt Praha, more specifically by its chief, specialist M. Doležalová. \*)

\*) Ing. Marta Doležalová, CSc. (she later received even the title of a university professor in native Hungary) was a pioneer of mathematical modelling using the Finite Element Method (as long ago as the beginning of the 1970s) and exceptionally excelled in this geotechnical specialisation for the whole life. This applied even on the international scale (namely to underground structures). Unfortunately, she is no more alive, she died on 23/12/2013. The respective chapter is for that reason compiled on the basis of her results from 1974, which were concentrated mainly in the report [9].



Obr. 6 Porovnání měřených a vypočtených posuvů v profilu A  
Fig. 6 Comparison of measured and calculated displacements in cross-section A

Doležalová, M., 1974

nebyla překročena mez kluzu, a může být tedy použita lineární varianta metody konečných prvků. Úloha byla formulována jako iterační, tj. velikost a rozdělení geostatických napětí se zadávalo zkusmo a výsledné pole vypočtených posuvů se porovnávalo s naměřenými.

Při dělení oboru na konečné prvky byly respektovány očekávané gradienty napětí, geologické podmínky a hlavně přesné umístění měrných bodů (z těchto jsou v obr. 5 až 9 vyznačeny pro poslední měřený příčný řez A uzly 67, 208 a 219). Obor byl dělen velmi podrobně – celkový počet prvků byl 690 a počet uzlů 397 – viz obr. 5. Hranice byly zvoleny ve vzdálenosti 5–6násobku průměru otvoru tak, aby na nich byl již vliv odlehčovací štoly na primární napjatost bezvýznamný. Jako zatížení bylo předpokládáno jen působení vlastní tíhy horninového masivu.

Pro zdravě rozpukané břidlice vinického souvrství byl aplikován transverzálně izotropní model přetvárných a pevnostních vlastností (s poměrem modulů pružnosti ve směru vrstevnatosti a kolmo na ni v hodnotě 1,5).

The character of the rock mass encountered (with a significant inhomogeneity) and of the large-volume long-term geotechnical experiment required an adequate method for assessing the results. It was actually the mathematical modelling of the experiment taking into consideration the results of other field tests. The Finite Element Method (FEM) met the requirements best of all.

A simplifying assumption was adopted for the solution for the time when the total stress relief due to excavation was over. In addition, the condition was accepted that the yield point was not exceeded in the zone of interest, therefore that the linear variant of the FEM could be used. The problem was formulated as an iteration problem, i.e. the magnitude and distribution of geostatic stresses were set at random and the resultant field of calculated displacements was compared with the measured displacements.

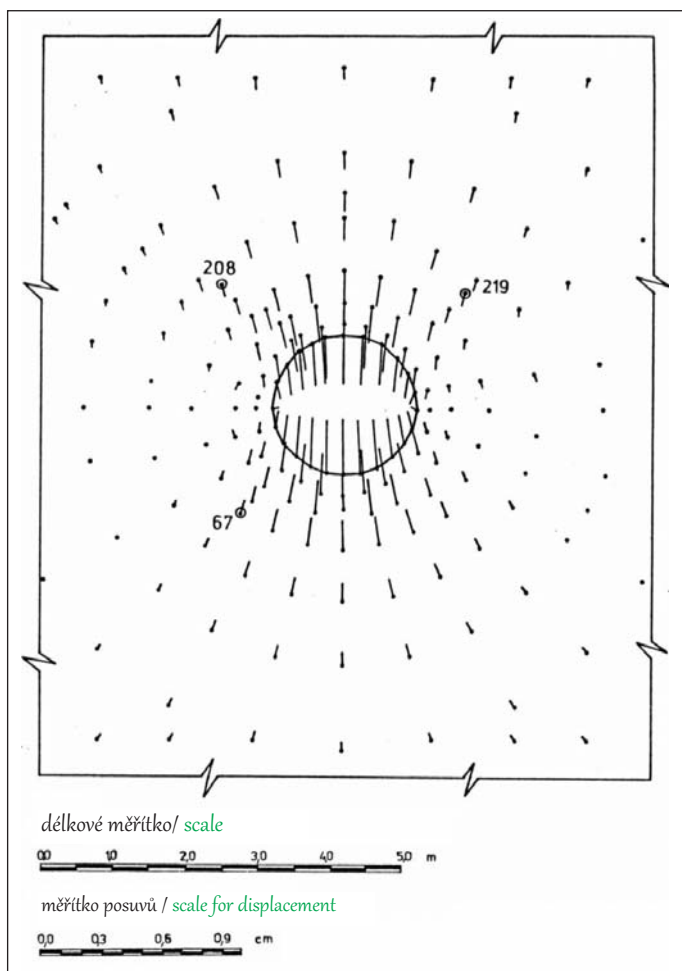
The expected stress gradients, geological conditions and, first of all, exact placement of measurement points (of them, the nodes 67, 208 and 219 are marked in Figures 5 through to 9 for the last measured cross-section A) were respected when the domain was being divided into the finite elements. The domain was divided in great detail – the total number of elements was 690 and the number of nodes was 397 – see Fig. 5. The borders were selected at the distance of 5 to 6-times the diameter of the opening so that the influence of the stress-relief gallery on the primary state of stress was unimportant on them. The load was assumed to consist only of the rock mass dead weight.

med to consist only of the rock mass dead weight.

A transversally isotropic model of deformational and strength-related properties (with the proportion between moduli of elasticity in the direction of bedding and perpendicularly to it amounting to 1.5) was applied to the fresh Vinice Formation fractured shale.

The modulus of elasticity (parallel with the bedding)  $E = 300\text{MPa}$ , Poisson's ratio  $\nu = 0.26$ , shear parameters in the direction of bedding  $\phi = 25^\circ$  and  $c = 0.05\text{MPa}$  and perpendicularly to the bedding  $\phi = 31^\circ$  and  $c = 0.07\text{MPa}$  and the unit weight  $\gamma = 24.5$  were introduced in the basic set of input geotechnical characteristics for fresh Vinice Formation shales.

Graphical comparison of calculated and measured values of deformation for the coefficients of lateral pressure  $K_0 = 0.25, 0.35$  and  $0.50$  being verified is for the representative most distant cross-section A assembled in Fig. 6. The assessment of the magnitude and direction of displacements



Doležalová, M., 1974

Obr. 7 Vektory posuvů v profilu A při  $K_0 = 0,32$ Fig. 7 Vectors of displacements in cross-section A at  $K_0 = 0.32$ 

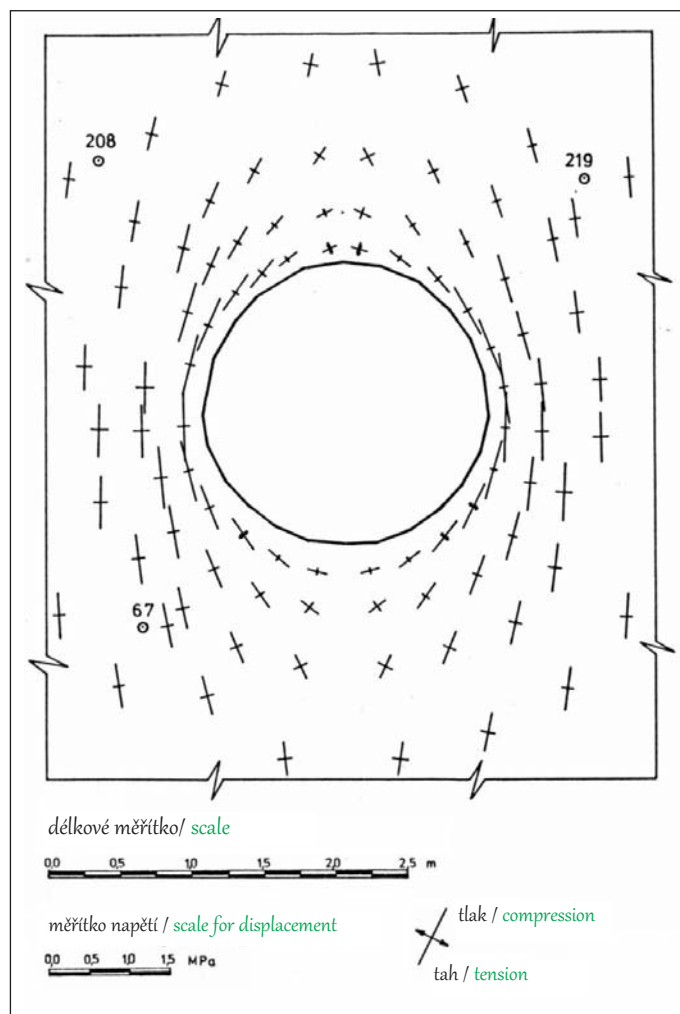
V základní sestavě vstupních geotechnických charakteristik byl pro zdravé břidlice vinických vrstev zaváděn modul pružnosti (rovnoběžně s vrstevnatostí)  $E = 300$  MPa, Poissonovo číslo  $\nu = 0,26$ , smykové parametry ve směru vrstevnatosti  $\phi = 25^\circ$  a  $c = 0,05$  MPa a pro kolmo k vrstevnatosti  $\phi = 31^\circ$  a  $c = 0,07$  MPa a objemová tíha  $\gamma = 24,5$  kNm<sup>-3</sup>.

Grafické porovnání vypočtených a naměřených hodnot deformací pro ověřované součinitele bočního tlaku  $K_0 = 0,25$ ;  $0,35$  a  $0,50$  je pro reprezentativní nejvzdálenější příčný profil A sestaveno do obr. 6. Vyhodnocení velikosti a směru posuvů je do značné míry ovlivněno volbou směrodatného úseku. Průzkumem byly zjištěny i složky posuvů, které vznikly v uvažovaném profilu ještě před vyjmutím horniny. Ty jsou však vyvolány prostorovou soustavou sil, jejíž směr je jiný než po provedení výrubu. Proto ve výpočtech byly za směrodatné pokládány jen části z této druhé fáze přetvoření.

Z porovnání výsledků ve třech zájmových bodech byl stanoven průměrný součinitel tlaku v klidu  $K_0 = 0,32$ . Pro tuto hodnotu byl dále stanoven výsledný stav přetvoření a napjatosti vyznačený v obr. 7 a 8.

## ZÁVĚR

Pro účely projektu traťových tunelů trasy A pražského metra pod řečištěm Vltavy se v letech 1973–1974 podařilo velkoobjemovou metodou odlehčení štolou s výpočtem metodou konečných prvků stanovit součinitel tlaku v klidu. V prostředí zdravých měkkých jílovitých břidlic vinických vrstev (ordovik) s velmi velkou až velkou hustotou diskontinuit byla zjištěna průměrná hodnota  $K_0 = 0,32$ .



Doležalová, M., 1974

Obr. 8 Stav napjatosti v profilu A při  $K_0 = 0,32$ Fig. 8 State of stress in cross-section A at  $K_0 = 0.32$ 

is affected to a great extent by the selection of the decisive section. Even the components of displacements which originated in the particular cross-section before the removal of rock were identified by the survey. However, these components are caused by a spatial system of forces the direction of which is different than that for the execution of the excavation. For that reason only the parts from this second phase of deformation were considered as decisive in the calculations.

The average coefficient of pressure at rest  $K_0 = 0.32$  was determined on the basis of the comparison of results in three points of interest. The resultant state of deformation and stress presented in Figures 7 and 8 was further determined for this value.

## CONCLUSION

The coefficient of pressure at rest was successfully determined for the purpose of the design for the Prague Metro Line A running tunnels under the Vltava river bed using the large-volume stress-relief gallery method, with the calculation using the Finite Element Method. The average value of  $K_0 = 0.32$  was determined in the environment formed by fresh Vinice Formation (Ordovician) clayey shales with very close to close spacing of discontinuities.

It is possible on the basis of the terrain morphology and geological history to expect the absence of residual stresses in the vertical direction. It follows from the overburden weight that the normal stress at the level of the stress-relief



Z morfologie terénu a geologické historie lze v zájmové oblasti předpokládat absenci reziduálních napětí ve vertikálním směru. Z tíhy nadloží vyplývá v úrovni osy odlehčovací štoly normální vertikální napětí  $\sigma_v = 0,49$  MPa. Po vynásobení výše uvedeným  $K_0$  vychází horizontální klidové napětí  $\sigma_h = 0,16$  MPa. Obdobná hodnota byla získána i výpočtem ze známého vztahu  $\sigma_h = \sigma_v \cdot \nu / (1 - \nu)$  – při zavedení výše uvedeného Poissonova čísla zjištěného terénními zkouškami na horninových blocích  $\nu = 0,26$ . Toto dokazuje i absenci reziduálních napětí v horizontálním směru.

Uvedený příklad představuje vhodné spojení experimentálních měření in situ s matematickým modelováním metodou konečných prvků pro řešení problémů mechaniky hornin. Metoda odlehčení štoly se jeví jako vhodná k určení složek napjatosti i v komplikovaném prostředí heterogenních a anizotropních skalních hornin. Řeší problematiku v měřítku z hlediska budování podzemních děl adekvátním představám horninového masivu (do vyhodnocovaného přetvárného procesu byl zapojen objem větší než 100 m<sup>3</sup>) a lze ji použít i v prostředí intenzivně rozpukaných až rozdrčených hornin. Vzhledem k náročnosti však její aplikace je oprávněná jen v případech průzkumu pro velmi exponovaný podzemní objekt s výraznou závislostí na složkách primární napjatosti.

Pro komplexnost lze dodat, že zjištěný součinitel horninového tlaku v klidu  $K_0 = 0,32$  je ve statických výpočtech pro pražské břidlice běžně interpretován i v současné době. O zde uvedené problematice bylo v roce 1977 referováno na mezinárodním sympoziu Italské geotechnické společnosti – viz lit. [10].

*Ing. JIŘÍ HUDEK, CSc., jiri.hudek@pudis.cz,  
PUDIS a.s.*

*Recenzovali / Reviewed: doc. Ing. Vladislav Horák, CSc.,  
Ing. Jaroslav Němeček*

gallery  $\sigma_v = 0.49$  MPa. After multiplying by the above-mentioned  $K_0$ , the horizontal stress at rest  $\sigma_h = 0.16$  MPa. A similar value was also obtained by the calculation from the well known relationship  $\sigma_h = \sigma_v \cdot \nu / (1 - \nu)$  - with the above-mentioned Poisson's ratio determined by field tests on rock blocks  $\nu = 0.26$  introduced into the calculation. This fact in addition proves the absence of residual stresses in the horizontal direction.

The example presented above represents a connection of experimental in situ measurements with mathematical modeling using the Finite Element Method, which is suitable for the solution to rock mechanics problems. The stress-relief gallery method appears to be suitable for the determination of the state of stress in a complicated environment formed by heterogeneous and anisotropic rock. It solves the problems in a scale adequate from the aspect of building underground workings to the image of the rock mass (a volume exceeding 100m<sup>3</sup> was involved in the deformational process). It can be applied even to the environment formed by intensely fractured up to crushed rock. Although, with respect to the exactness, its application is justified only in the cases of a survey for a highly exposed underground structure with marked dependence on the components of primary state of stress.

For the reason of complexity it is possible to add that the determined coefficient of rock mass pressure at rest  $K_0 = 0.32$  is commonly interpreted in structural analyses for Prague shales even today. The problems described above were reported at the international symposium of the Italian Geotechnical Association in 1977 – see Ref. [10].

*Ing. JIŘÍ HUDEK, CSc., jiri.hudek@pudis.cz,  
PUDIS a.s.*

## LITERATURA / REFERENCES

- [1] HUDEK, J., CHMELÁŘ, R. Od pražské podpovrchové tramvaje k tunelům Slivenec (41 let geotechnického průzkumu a monitoringu podzemních staveb s firmou PUDIS, a. s.). *Tunel*, 2007, roč. 16, č. 3, s. 26-39.
- [2] DOLEŽALOVÁ, M. aj. *Metro Praha, I. provozní úsek trasy A: Traťový úsek Klárov – Kaprova – statické výpočty metodou konečných prvků*. Praha, Hydroprojekt, 1973.
- [3] MUŽÍK, L., SKLENÁŘ, J. *Expertiza o stavu napjatosti horninového masivu v přirozeném uložení metodou odlehčení jádra, doplněnou měřením ultrazvukem v oblasti podchodu trasy A pražského metra pod Vltavou*. Praha, Hornický ústav ČSAV, 1973, 21 s.
- [4] MÜLLER, L. *Der Felsbau*. 1. ed., Stuttgart: Ferdinand Enke Verlag, 1963, s. 318-321.
- [5] RUPP, D., PAVLÍK, J., HANÁK, J. Geotechnický průzkum a monitoring – ražba průzkumných štol. In *Kolektiv autorů: Královopolský tunel Brno*. Doplněk, Brno, 2012, s. 48-61.
- [6] HUDEK, J. aj. *Doplňující inženýrskogeologický průzkum pro I. provozní úsek trasy A pražského metra: Ověření vlastností horninového prostředí vinických vrstev u levobřežní části Mánesova mostu v Praze 1*. Praha, PUDIS, 1973, 107 s.
- [7] HUDEK, J. *Doplňující inženýrskogeologický průzkum pro traťové tunely Klárov – Kaprova na I. provozním úseku trasy A pražského metra: Terénní zkoušky dotvarování a relaxace tlakového napětí v horninovém prostředí vinických vrstev u levobřežní části Mánesova mostu v Praze 1*. Praha, PUDIS, 1974, 36 s.
- [8] HUDEK, J. aj. *Doplňující inženýrskogeologický průzkum pro I. provozní úsek trasy A pražského metra: Podklady pro výpočet napjatosti horninového masivu v prostředí vinických vrstev u levobřežní části Mánesova mostu v Praze 1*. Praha, PUDIS, 1974, 23 s.
- [9] DOLEŽALOVÁ, M. *Metro Praha, I. provozní úsek trasy A: Zjišťování původní napjatosti horninového masivu – výpočet metodou konečných prvků*. Praha, Hydroprojekt, 1974.
- [10] DOLEŽALOVÁ, M., HUDEK, J. The determination of the primary stress state in tectonic disturbed soft shales. In *International symposium The geotechnics of structurally complex formations*. Associazione Geotecnica Italiana, 1977, s. 199-210.