

OVLIVNĚNÍ KONSTRUKCE METRA C RAŽBOU PRŮZKUMNÝCH ŠTOL PRO STAVBU I.D METRA

IMPACT OF THE EXCAVATION OF EXPLORATORY GALLERIES FOR THE CONSTRUCTION OF METRO I.D ON THE STRUCTURE OF METRO C

MARTIN VINTER, VOJTĚCH ANDERLE

ABSTRAKT

V letech 2019–2022 byl v lokalitě pražské Pankráce prováděn Doplnkový geologický průzkum pro výstavbu trasy I.D metra. Hloubení a ražby čtyř podzemních průzkumných děl probíhaly v městské oblasti s různou hustotou zástavby. Dvě z nich se razily v prostoru budoucí stanice Pankrác přímo pod rušnou křižovatkou, dvěma kolektorovými tunely, významnými potrubními sítěmi a zejména přímo pod intenzivně provozovaným úsekem trasy C pražského metra. Vliv poklesu hladiny podzemní vody, spojený se zahájením průzkumných prací, na pokles sledovaných konstrukcí metra, jeho postupná stabilizace a následný protisměrný pohyb, tedy zdvih tunelů, byly podrobně sledovány a průběžně vyhodnocovány díky systému automatického měření deformací na dilatacích a náklonů. Nedílnou a podstatnou součástí komplexu provádění ražeb a monitoringu byla pravidelná ověřovací geodetická měření, prohlídky prováděné zhotovitelem geotechnického monitoringu a kompletní výměna informací s provozovatelem metra, včetně využívání jeho provozních prohlídek, měření a zkoušek. V průběhu průzkumných prací oba traťové tunely v ovlivněném úseku procházely postupně různými stavy namáhání, na které reagovaly deformacemi a poruchami. S postupně získávanou zkušeností o chování konstrukcí byl systém monitoringu modifikován a doplňován tak, aby nepříznivé projevy byly kontrolovány a eliminovány na přípustnou míru.

ABSTRACT

A supplementary geological survey was conducted for the construction of the Metro Line I.D in the Pankrác area of Prague from 2019 to 2022. The trenching and excavation of four underground exploratory works were carried out in an urban area with a differing development density. Two of them were excavated in an area of the future Pankrác station directly underneath a busy intersection, two utility tunnels, important pipelines, and mainly directly underneath an intensively operated section of Line C of the Prague Metro. The impact of a decreasing groundwater level, connected with the onset of exploratory works, on the sinking of monitored structures of the Metro, and its gradual stabilisation, and following countervailing motion, which means the lifting of tunnels, was thoroughly monitored and progressively evaluated thanks to a system automatically measured deformations within dilatations, and inclinations. Integral and fundamental components of the excavations and monitoring complex included regular verification geodetic measurements, inspections carried out by the supplier of geotechnical monitoring, and an all-encompassing exchange of information with the metro operator, including utilisation of their operating inspections, measurements, and tests. Both the track tunnels in the affected section went through gradually changing states of stress over the course of exploratory works, to which they reacted with deformations and faults. With progressively gathered experience about the behaviour of the structure, the monitoring system was modified and supplemented such that unfavourable effects were examined and reduced to an acceptable rate.

1. ÚVOD

V červnu roku 2019 začal v širší lokalitě pražské Pankráce Doplnkový geologický průzkum pro výstavbu trasy I.D metra s plánovaným ukončením v létě 2021. Náplní tohoto projektu bylo hloubení čtyř šachet, na které ve třech případech navázaly ražby průzkumných štol, z nichž většina bude či již byla využita pro budoucí trasu metra D, respektive přestupní chodbu mezi stanicemi Pankrác C a Pankrác D. Hlavním cílem bylo rozšíření znalostí o horninovém prostředí a vlivu činností prováděných hornickým způsobem na přilehlé území a objekty, detekce rizik a posouzení nástrojů k jejich řízení. Provedení průzkumu takového rozsahu v zastavěné oblasti této městské části vyžadovalo maximální připravenost nejen ze strany dodavatele průzkumných prací, ale i ze strany dodavatele geotechnického monitoringu (dále GTM).

Průběžné poznatky doplňkového geologického průzkumu a výsledky GTM vedly k rozšíření průzkumných prací a prodloužení termínu ukončení v březnu roku 2022.

1. INTRODUCTION

In June 2019, a supplementary geological survey for the construction of the Metro Line I.D began in the wider area of Pankrác, Prague, with completion planned for the summer of 2021. The content of this project was the excavation of four shafts, which were followed in three instances by excavations of exploratory galleries from which the majority will be or already were utilised for the future Metro Line D, or rather an interchange corridor between the Pankrác C and Pankrác D stations. The main goal was to broaden the knowledge of the rock environment, and the impact of activities carried out in a mining-like way on the adjacent area and objects, risk detection, and to assess the tools for their management. The execution of a survey of such extent in a densely built-up area of this city district required maximum preparedness not only on the side of the supplier of exploratory works, but also on the side of the supplier of geotechnical monitoring (hereinafter GTM).

2. PRŮZKUMNÉ OBJEKTY

Úkol byl rozdělen na čtyři průzkumná díla, PAD1b, PAD4, VO-OL a OL1 umístěná podél osy budoucí trasy D, tedy ulice Na Strži v úseku mezi magistrálou 5. května a ulicí Antala Staška. V tomto textu jsou zmiňována jen průzkumná díla PAD4 a VO-OL s přímým vlivem na konstrukce trasy C pražského metra.

Objekt PAD4, který sestává ze šachty a průzkumné štoly, se nachází v oblasti křižovatky ulic Na Strži, Na Pankráci a Budějovická. Vlastní šachta má průměr 8,6 m a je téměř 30 m hluboká. Na ni navázala přibližně 117 m dlouhá průzkumná štola, složená ze čtyř typů příčných profilů, půdorysně vedená do tvaru „S“, která bude po dobudování v rámci výstavby sloužit jako součást přestupní chodby mezi stanicemi Pankrác C a Pankrác D [1]. Kromě průzkumných prací provedených ze šachty a štoly byly z tohoto objektu provedeny rozsáhlé injektáže za účelem zlepšení geotechnických vlastností horninového masivu před aktivní čelbou, v jejím okolí, ve směru budoucí stanice, ke štolám VO-OL a pod traťové tunely trasy C. Ražba průzkumné štoly PAD4 probíhala v prostředí kosovského souvrství (paleozoikum – ordovik) [2].

Průzkumný objekt VO-OL má šachtu umístěnou jižněji v blízkosti ulice Na Strži, konkrétně mezi ulicemi Neveklovská a Pacovská. Ze šachty o průměru 21 m a hloubce přes 36 m vycházela severním směrem průzkumná štola o délce přes 322 m. Ta byla vyražena v trase budoucího traťového tunelu metra D a nyní je jeho součástí. Profil této průzkumné štoly měl po celé délce 10 rozdílných typů, lišících se dle budoucího účelu velikostí i tvarem [3]. Půdorysně tato průzkumná štola směřovala až pod křižovatku ulic Na Strži, Na Pankráci a Budějovická a podcházela výše zmíněný průzkumný objekt PAD4. Z geologického hlediska byla štola ražena v proměnlivém prostředí, neboť postupně procházela nejprve ordovickými horninami (bohdaleckým, královským a kosovským souvrstvím) a následně silurskými horninami (liteňským souvrstvím) [4]. I z této štoly byly v poslední fázi prováděny

Continuous knowledge from the supplementary geological survey and GTM results led to an expansion of exploratory works and the prolonging of the completion deadline in March 2022.

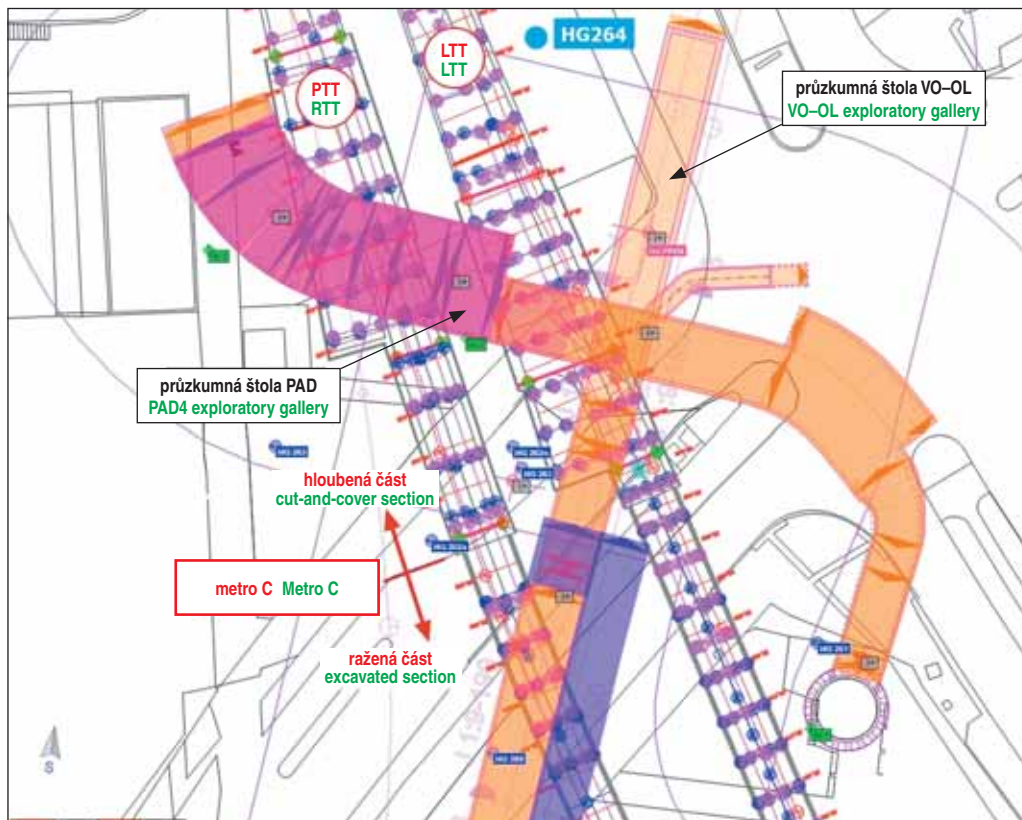
2. EXPLORATORY OBJECTS

The task was divided into four exploratory works, PAD1b, PAD4, VO-OL, and OL1, located along the axis of the future Line D, which means Na Strži Street in the section between the 5. května arterial road, and Antala Staška Street. This text only mentions the PAD4 and VO-OL exploratory works that have a direct impact on Line C of the Prague Metro.

The PAD4 object, which consists of a shaft and an exploratory gallery, is located in the area of an intersection of streets Na Strži, Na Pankráci, and Budějovická. The shaft itself has a diameter of 8.6m and is almost 30m deep. It is followed by an approximately 117m long exploratory gallery made up of four types of cross profiles, made as an “S” shape in plan view, which will serve within the construction as a part of the interchange corridor between the Pankrác C and Pankrác D stations after its completion [1]. Excluding exploratory works carried out from the shaft and gallery, extensive grouting was carried out from this object with the intent to improve geotechnical conditions of the rock mass in front of the active face, in its vicinity, and in the direction of the future station, towards VO-OL shafts, and underneath Line C track tunnels. The excavation of the PAD4 exploratory gallery took place in an environment of the Kosov series of strata (Ordovician, Paleozoic) [2].

The VO-OL exploratory object has a shaft located more southwards near Na Strži Street, more precisely between streets Neveklovská and Pacovská. An exploratory gallery more than 322m long extended in a northern direction from a shaft with a diameter of 21m and a depth of more than 36m. It was excavated

along the route of the future Metro D track tunnel, and now it is a part of it. The profile of this exploratory gallery had 10 different types along its entire length, differing according to the future purpose by size and even shape [3]. This exploratory gallery reached in plan view up to beneath the intersection of streets Na Strži, Na Pankráci, and Budějovická, and it passed under the above-mentioned PAD4 exploratory object. From a geological standpoint, the gallery was excavated in a variable environment, since it gradually passed under Ordovician rocks first (Bohdalec, Králův Dvůr, and Kosov series of strata) and then Silurian rocks (Liteň series of strata) [4]. Even from this gallery, the grouting under Line C was carried out in the last phase. A slight impact of Metro C tunnels manifested itself even during pressure grouting from the face.



Obr. 1 Situace průzkumných štol PAD4 a VO-OL a sledovaných traťových úseků metra C
Fig. 1 Layout plan of the PAD4 and VO-OL exploratory galleries and monitored Metro C track sections

injektáže pod trasu C. Mírné ovlivnění tunelů Metra C se projevilo i při tlakových injektážích z čelby.

Na celkové náročnosti projektu se, kromě komplikované geologické stavby, podílela také hustota okolní zástavby, čítající nejen nadzemní obytné a administrativní objekty, ale také významné podzemní konstrukce a inženýrské sítě. Jako nejvíce rizikové bylo možné z hlediska bezpečnosti a samotného ovlivnění provozované linky metra bezpochyby považovat oblast křížení průzkumných štol s trasou C, kde se směrově protínají podzemní díla ve třech výškových úrovních (obr. 1), přičemž nejvýše vedené jsou stávající traťové tunely metra C. Pod touto trasou probíhala nejprve ražba štoly PAD4 a následně ražba štoly VO-OL. Primárním úkolem GTM zde bylo získání všech potřebných informací a bezprostředního přístupu k nim, pro umožnění okamžité reakce na nepříznivé vlivy průzkumných činností, s cílem vyloučit všechna provoz ohrožující rizika [5, 6].

3. MĚŘICÍ LINKA V TUNELECH METRA C

Aby bylo možné reagovat na nepříznivé jevy bez prodlení, byla měřicí linka založena na metodikách měření probíhajících v režimu s automatickým sběrem dat (dále ASD), s rychlým přenosem a zpracováním dat do centrálního počítače a s následným bezprostředním vložím do webového Informačního Systému Monitoringu „ISM Sahure“. V automatickém režimu byly sledovány změny náklonů v podélných a příčných řezech konstrukcí a chování dilatačních celků hloubené části rozpletů tunelů mezi stanicí Pankrác C a mezistaničními tunely. Celý sledovaný úsek trasy C se skládá z částí zhotovených různými technologiemi, a to z již zmíněné dilatované monolitické konstrukce přiléhající ke stanici Pankrác C, zbudované ve hloubené jámě a na ni navazují mezistaniční ražené tunely kruhového průřezu vystrojené tubingy z lité oceli (obr. 2) [7].

Měření příčných náklonů bylo realizováno snímači uspořádanými do měřicích profilů s pěti až osmi snímači, vzájemně vzdálenými zhruba 5 nebo 10 m. Ke každému příčnému profilu byl přidružen nejméně jeden snímač podélného sklonu. Všechny byly prostřednictvím kabeláže propojeny s řídicím počítačem, umístěným v zázemí stanice Pankrác C.

Apart from the complicated geological arrangement, even the density of the surrounding built-up area was involved in the overall difficulty of the project, comprising not only above-ground residential and administrative objects but also important subsurface structures and engineering utilities. As the most risky from the viewpoint of safety and impact on the operated metro line itself, it was possible to consider without a shadow of a doubt the area of intersecting exploratory galleries with Line C, where underground works intersect directionally in three vertical levels (Fig. 1), whilst the uppermost are the current Metro C track tunnels. The excavation of the PAD4 gallery was carried out beneath this route first, followed by the excavation of the VO-OL gallery. The primary task of GTM here was to gather all the necessary information and provide immediate access to facilitate an instant reaction to adverse effects of exploratory activities, with a goal to exclude all risks jeopardising the operations [5,6].

3. MEASURING SERVICE IN METRO C TUNNELS

So that it would be possible to react to unfavourable effects without delay, the measuring service was based on a methodology of measurements taking place in a mode with automatic data collection (hereinafter ASD), with fast data transfer and processing in a central computer, and with a subsequent immediate input into a web Information Monitoring System “ISM Sahure”. In the automatic regime, changes in inclinations in the longitudinal and transverse sections of structures and the behaviour of dilatation groups of the cut-and-cover tunnel junction section between the Pankrác C station and interstation tunnels were monitored. The entire observed section of Line C consists of parts constructed with different technologies, being the aforementioned dilated monolithic structure adjoining the Pankrác C station constructed in a cut-and-cover pit, and connected interstation excavated tunnels with a circular cross-section equipped by segments from cast steel (Fig. 2) [7].

The measuring of transverse inclines was realised with sensors arranged into measuring profiles with five to eight sensors, mutually distanced roughly 5 or 10m. At least one longitudinal incline sensor was associated with each of the transverse profiles. All of them were connected using cables to a management computer located in the utility rooms of the Pankrác C station.

Dilatation joints in the cut-and-cover section of the monitored Metro C tunnels were spaced out approximately 25m. They were typically equipped with sensors arranged along both sides of the tunnels, on the floor, and ceiling, and with an orientation for the monitoring of mutual position changes of neighbouring parts (monolithic dilatation units) in the horizontal and even vertical direction. The number and location of sensors in a profile were given by particular conditions in each place.



Obr. 2 Instalace náklonoměrných snímačů v ražené části traťového tunelu metra C
Fig. 2 Installation of inclinometer sensors in the excavated part of the Metro C track tunnel

Dilatační spáry v hloubené části sledovaných tunelů metra C byly vzdáleny přibližně 25 m. Byly typicky osazeny snímači rozmístěnými po obou stranách tunelů, u podlahy a stropu a s orientací pro sledování vzájemných změn pozic sousedících partií (monolitických dilatačních celků) ve vodorovném i svislém směru. Počet a umístění snímačů v profilu bylo dáno konkrétními podmínkami v každém místě.

Výsledky ASD měření byly průběžně zpřístupňovány výše zmíněným systémem ISM Sahure. Intervaly odečtů měřených dat byly nastavovány s ohledem na míru ovlivnění a podobně byl, dle aktuální potřeby, měněn i interval jejich publikování. Při provádění průzkumných činností s vysokou mírou ovlivnění prostředí byla data automatického monitoringu poskytována realizační firmě on-line, přímo z řídicího počítače na pracoviště stavby, s přenosem informací do podzemí. Takový nadstandardní přístup, jenž nebyl před zahájením průzkumných prací předpokládán, umožňoval zhotoviteli ražeb reagovat na nepříznivé odezvy vůči sledovaným konstrukcím okamžitě bez prodlevy. Tato možnost byla využívána opakovaně, zejména při provádění injektážních prací pod tubusy trasy metra C.

Kromě průběžného automatického měření byla v metru C prováděna cyklická geodetická měření konvergencí prostřednictvím měření prostorových souřadnic a sledování sedání tunelů metodou přesné nivelace. Geodetická 3D konvergenční měření byla prováděna v týdenním až měsíčním intervalu podle míry ovlivnění, s připojením na pevné body mimo ověřovanou oblast vlivu průzkumných prací. Podobně byly řízeny i délka a rozsah aktuálně měřeného úseku v dané etapě. Geometrická nivelace ze středu byla prováděna v několikaměsíčním intervalu, v celkové délce cca 300 m a vždy v celém úseku, který byl na počátku zvolen tak, aby ověřoval skutečný rozsah poklesové kotliny v trase metra C.

Na základě pasportizace a dalších dostupných informací o sledovaných konstrukcích byly vypracovány znalecké posudky, jejichž obsahem bylo, mimo jiné, stanovení varovných stavů pro všechny sledované typy deformačních projevů na těchto konstrukcích a jejich průběžné hodnocení. Na základě postupně získávaných informací pak bylo posuzování výsledků modifikováno.

Všechna měření GTM byla dále doplněna pravidelnými místními prohlídkami, při kterých se porovnával aktuální stavební technický stav tunelů se stavem zaznamenaným při pasportizaci, případně se stavem zaznamenaným při předchozí prohlídce.

Sledování traťových tunelů metra C bylo, kromě zmíněných metodik měření, poskytovaných kompletně dodavatelem GTM, doplňováno měřeními a kontrolami zajišťovanými správcem a provozovatelem objektu (Dopravní podnik hl. m. Prahy, a.s.). Všechny výsledky, jejich interpretace a návrhy opatření byly předmětem vzájemné komunikace a těsné spolupráce.

4. MONITORING BĚHEM PRŮZKUMNÝCH PRACÍ

Po celou dobu průzkumu byly traťové tunely metra C ovlivňovány množstvím činitelů. Pro účely tohoto textu jsou jednotlivá ovlivnění zjednodušeně popsána v tab. 1 [8, 9].

The results of ASD measurements were continuously made available through the aforementioned ISM Sahure system. Reading intervals of measured data were set with regard to the rate of interference, and likewise, the interval of their publishing was altered according to current need. When performing exploratory activities with a high rate of environment interference, automatic monitoring data was provided to the realisation firm online, directly from the management computer to the construction site, with information transfer to the underground. Such an above-standard approach, which was not expected before commencing exploratory works, enabled the excavations contractor to respond to adverse reactions in relation to monitored structures instantly without delay. This option was made use of repeatedly, particularly while executing grouting works underneath Metro Line C tubes.

Apart from continuous automatic measuring, cyclic geodetic convergence measuring was carried out in the Metro C, using spatial coordinates measuring and tunnel settlement monitoring with the precise levelling method. Geodetic 3D convergence measuring was carried out at a weekly to monthly interval according to the rate of interference, with connections to fixed points beyond the verified area influenced by exploratory works. The length and extent of the currently measured section in a given stage were managed similarly. Geometric levelling from the centre was carried out at intervals of several months, at a total length of roughly 300m and always in an entire section, which was selected at the start in such a way that it would check the actual extent of the settlement trough on the Metro C route.

On the basis of a condition survey and other available information about the monitored structures, expert reports were prepared, containing, besides other things, determining warning states for all the tracked types of deformation manifestation on these structures and their continuous assessment. The assessment of results was then modified on the basis of gradually gathered information.

All the GTM measurements were further complemented by periodical local inspections, during which the current construction technical state of the tunnels was compared to the state recorded

Tab. 1 Exploratory works beneath Metro Line C

Phase of interference	Exploration activity	Commencement	Termination
1	PAD4 shaft sinking	23.10.2019	07.01.2020
2	PAD4 exploration gallery excavation – TYP1, TYP2 left part, TYP3 and TYP4 left part	13.01.2020	13.07.2020
3	grouting works PAD4 – 1 st part	14.07.2020	19.11.2020
4	PAD4 exploration gallery excavation – TYP2 right part and TYP4 right part	20.11.2020	23.02.2021
5	grouting works PAD4 – 2 nd part	23.02.2021	22.03.2021
6	PAD4 geotechnical side stub excavation	22.03.2021	07.05.2021
7	VO-OL exploration gallery excavation	13.08.2020	18. 4.2021
8	grouting works from PAD4 – 3 rd part	26.07.2021	24. 8.2021
9	PAD4 exploration gallery enlargement in areas TYP3 and TYP4	31.08.2021	07.12.2021
10	grouting works from VO-OL – 1 st part	15.07.2021	23.07.2021
11	VO-OL exploration gallery enlargement in areas o. v. 4.5m and interchange tunnel	24.07.2021	30.09.2021
12	grouting works from VO-OL – 2 nd part	01.10.2021	18.10.2021

Tab. 1 Průzkumné práce pod trasou metra C

Fáze ovlivnění	Činnost průzkumu	Zahájení	Ukončení
1	hloubení šachty PAD4	23. 10. 2019	07. 01. 2020
2	ražba průzkumné štoly PAD4 – TYP1, TYP2 levá část, TYP3 a TYP4 levá část	13. 01. 2020	13. 07. 2020
3	injektažní práce PAD4 – 1. část	14. 07. 2020	19. 11. 2020
4	ražba průzkumné štoly PAD4 – TYP2 pravá část a TYP4 pravá část	20. 11. 2020	23. 02. 2021
5	injektažní práce PAD4 – 2. část	23. 02. 2021	22. 03. 2021
6	ražba geotechnické rozrážky PAD4	22. 03. 2021	07. 05. 2021
7	ražba průzkumné štoly VO-OL	13. 08. 2020	18. 4. 2021
8	injektažní práce z PAD4 – 3. část	26. 07. 2021	24. 8. 2021
9	rozšíření průzkumné štoly PAD4 v oblastech TYP3 a TYP4	31. 08. 2021	07.12. 2021
10	injektažní práce z VO-OL – 1. část	15. 07. 2021	23. 07. 2021
11	rozšíření průzkumné štoly VO-OL v oblastech o. v. 4,5 m a přechodového tunelu	24. 07. 2021	30. 09. 2021
12	injektažní práce z VO-OL – 2. část	01. 10. 2021	18. 10. 2021

Hloubení šachty a ražby průzkumné štoly PAD4 (fáze ovlivnění 1 a 2)

Při hloubení šachty, ale především při ražbě průzkumné štoly, se geologické prostředí kosovského souvrství projevilo jako významně propustné. Zvláště se jednalo o rozpukané polohy křemenných pískovců, které se střídaly s polohami jílovitých břidlic. Po celou dobu razicích prací v této etapě bylo čerpáno nezanedbatelné množství podzemní vody, což mělo významný vliv na pokles její hladiny (HPV) (obr. 3) a zprostředkovaně na sedání sledovaných traťových tunelů (obr. 4). Pozvolna narůstající deformace byla dobře pozorovatelná především z měření podélných náklonů a z konvergenčních měření. Jako nejvíce rizikové se dle předpokladů stalo místo styku ražené a hloubené části traťových tunelů.

Výsledky monitoringu byly s vysokou četností komplexně vyhodnocovány a formou komentovaných grafů zasílány všem odpovědným pracovníkům zúčastněných subjektů projektu, včetně provozovatele tunelů metra. Ten svými měřeními pravidelně ověřoval mimo jiné sjízdnost trati, která byla stěžejním ukazatelem pro pokračování průzkumných prací.

Injektažní práce ze štoly PAD4 – 1. část (fáze ovlivnění 3)

Po dokončení první části razicích prací přišly na řadu práce injektažní. Jejich účelem bylo především zlepšit geotechnické vlastnosti horninového masivu v nejbližším okolí štoly PAD4 a preventivně tím omezit nežádoucí deformace stávajících tunelů metra C předpokládanými vlivy budoucí výstavby nové linky metra D. Vliv injektaží na konstrukce tunelů byl významný, jak dobře ilustruje zdvih na grafickém zobrazení pro chování podélného profilu levého traťového tunelu (LTT) (obr. 5) a rovněž tak změny přímo měřených podélných náklonů, především v LTT (obr. 6, 7).

Na obou grafech nerovnoměrného sedání podélného profilu LTT je zjevná koncentrace deformací do místa odpovídajícího poloze styku ražené a hloubené části.

during the condition survey, alternatively to a state recorded during the previous inspection.

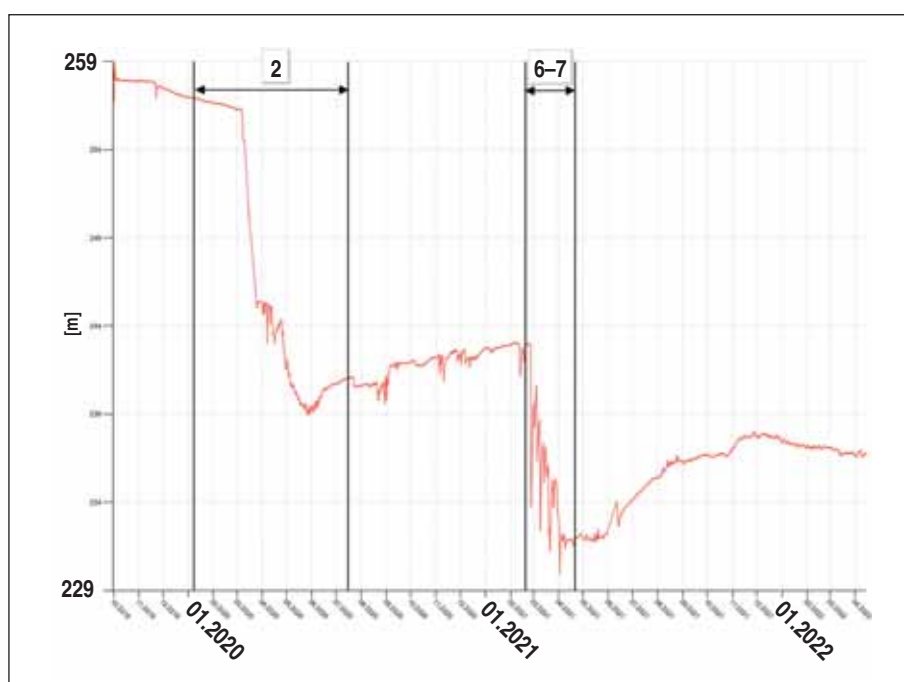
Besides the mentioned methods of measuring, completely supplied by the GTM contractor, the monitoring of Metro C track tunnels was complemented by measurements and checks provided by the manager and operator of the object (Prague Public Transit Company). All the results, their interpretation, and proposals of measures were the topic of mutual communication and close cooperation.

4. MONITORING DURING EXPLORATORY WORKS

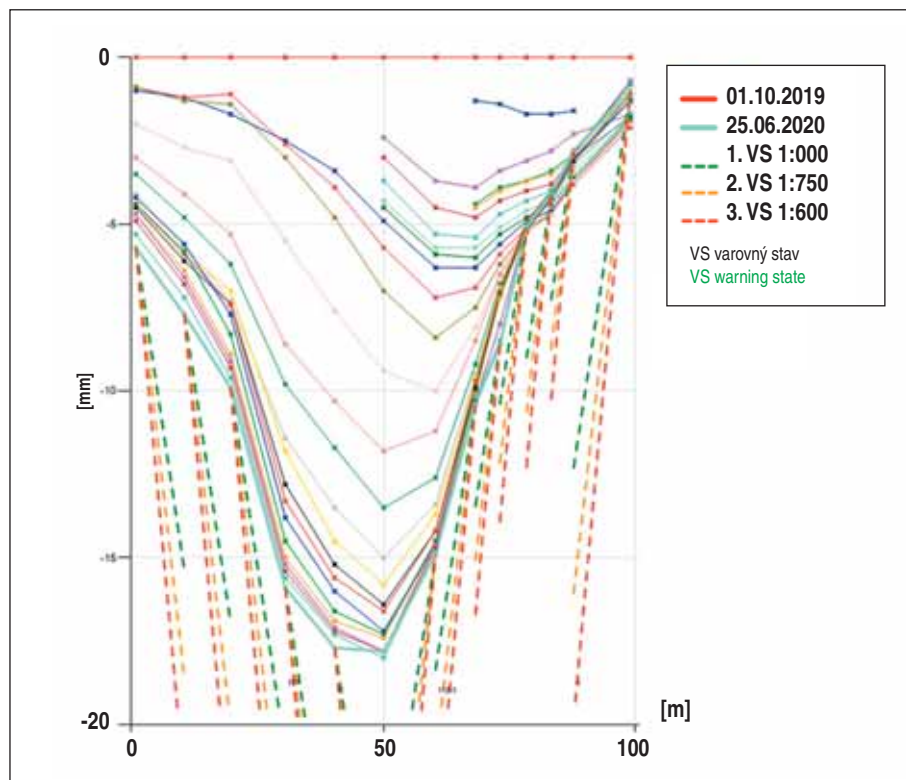
Throughout the entire duration of exploration, the Metro C track tunnels were affected by a number of factors. The individual interferences are described in a simplified way in the Tab. 1 for the purposes of this text [8, 9].

Shaft sinking and PAD4 exploration gallery excavation (phase of interference 1 and 2)

During the sinking of the shaft, but primarily during the excavation of the exploratory gallery, the geological environment of the Kosov series of strata proved to be substantially permeable. In particular, broken up attitudes of quartz sandstones, that alternated with attitudes of clayey slates. Over the entire duration of excavation works in this phase a not negligible amount of groundwater was pumped, which had a significant impact on the reduction of its surface (groundwater table, GWT) (Fig. 3), and indirectly on the settlement of monitored track tunnels (Fig. 4). Gradually increasing deformation was easily observable primarily from measurements of longitudinal inclines and from convergence



Obr. 3 Pokles hladiny podzemní vody ve vrtu HG264
Fig. 3 Fall of groundwater level in the HG264 borehole

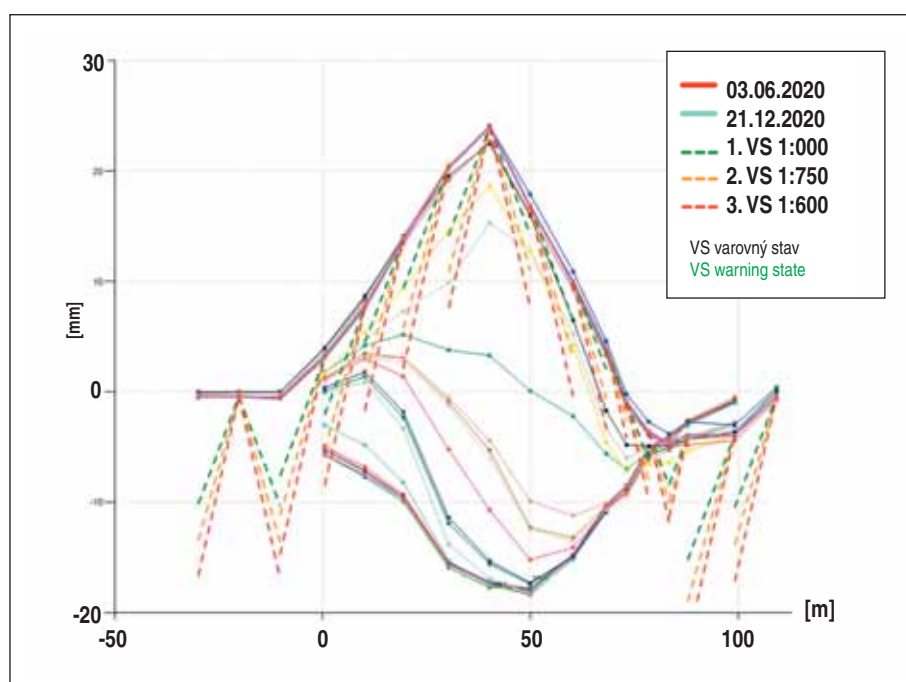


Obr. 4 Nerovnoměrné sedání LTT vlivem poklesu HPV
Fig. 4 Uneven settlement of the LTT due to the fall of GWT

Vliv injektážních prací na tunely metra C byl všemi účastníky projektu vnímán jako závažný, proto bylo komplexní vyhodnocování výsledků monitoringu v tomto období prováděno s denní četností. Díky pravidelnému ověřování sjízdnosti trati provozovatelem tunelů bylo možné injektážní práce úspěšně dokončit, což mělo příznivý vliv na všechny navazující práce.

Navazující ražby a injektážní práce (fáze ovlivnění 4 až 7)

Po dokončení první fáze injektážních prací bylo horninové prostředí v okolí tratových tunelů metra C příznivě stabilizováno



Obr. 5 Vývoj nerovnoměrného sedání LTT po injektážích z průzkumné štoly PAD4, 1. část
Fig. 5 Development of uneven settlement of the LTT after grouting from the PAD4 exploratory gallery, 1st part

measurements. According to assumptions, the location of contact of the excavated and cut-and-cover track tunnel section became the riskiest place.

The monitoring results were frequently analysed in-depth and, by way of annotated graphs, sent to all of the responsible workers of the participating entities of the project. That included the operator of the metro tunnels, who, with his measurements regularly checked, besides other things, the negotiability of the track, which was a pivotal metric for the continuation of exploratory works.

Grouting works from the PAD4 gallery – 1st part (phase of interference 3)

After completing the first part of the excavation works, it was the turn of the grouting works. Their main objective was to improve geotechnical properties of the rock mass in the closest vicinity of the PAD4 gallery, and to preventively limit undesirable deformations of the current Metro C tunnels due to expected effects of the future construction of the new Metro Line D. The impact of grouting on tunnel

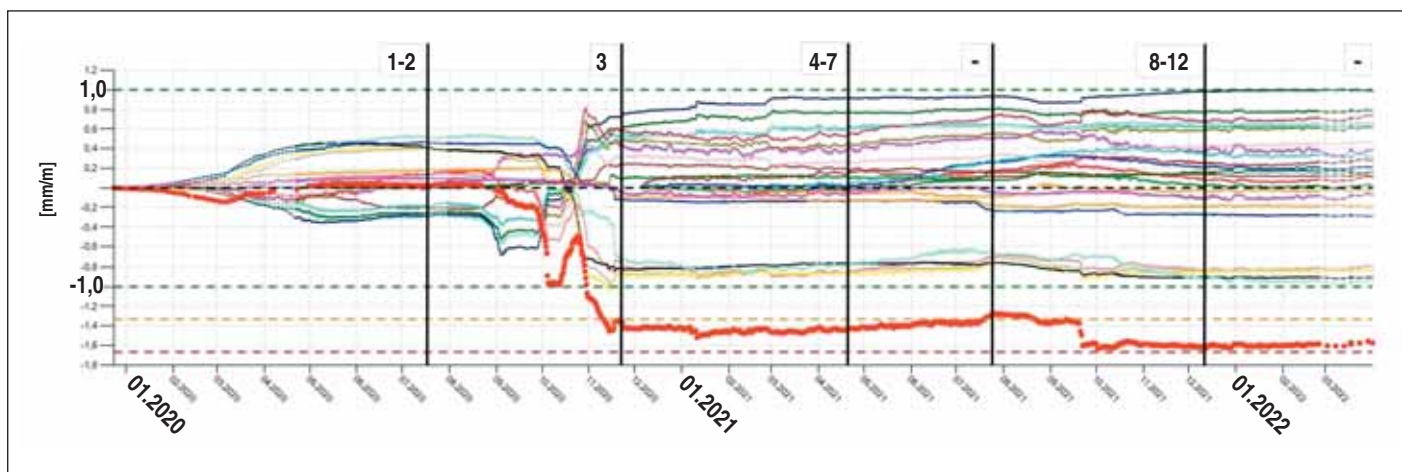
structures was substantial, which is well-illustrated by the elevation on the graphical depiction of behaviour of the longitudinal profile of the left track tunnel (LTT) (Fig. 5), and likewise the changes of directly measured longitudinal inclines, mainly in the LTT (Fig. 6, 7).

The concentration of deformations into a place correlating with the location of the connection between the excavated and cut-and-cover sections is evident on both the graphs of uneven settlement of the LTT longitudinal profile.

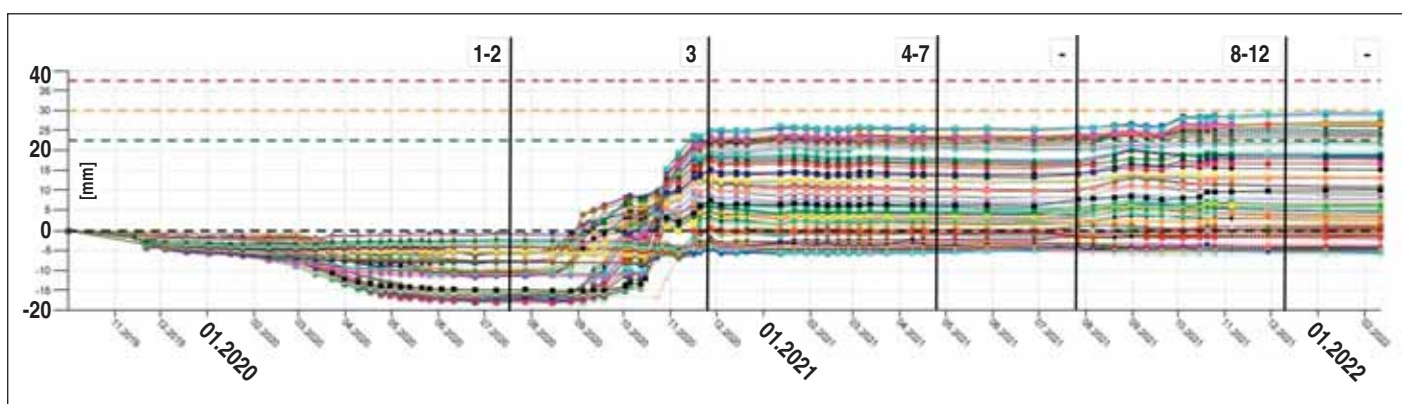
The impact of grouting works on the Metro C tunnels was perceived as serious by all participants of the project, hence; the complex evaluation of monitoring results was carried out daily during this period. Thanks to regular checks of track negotiability by the operator of the tunnels, it was possible to successfully finish grouting works, which had a positive impact on all subsequent works.

Following excavations and grouting works (phases of interference 4 to 7)

The rock mass in the environs of Metro C track tunnels was favourably stabilised after completing the first phase of grouting works, and the following excavations of the PAD4 and VO-OL galleries and subsequent grouting works no longer had any significant adverse impact on the deformations. During this period (meaning after completing the subsequent excavations and grouting), on almost all of the observed methodologies, the tracked oscillation of deformation values was around the values reached after finalising the 1st part of the grouting works.



Obr. 6 Změny podélného náklonu v LTT (barevně náklony jednotlivých snímačů, graf rozdělen do oblastí dle fází ovlivnění (číslo), případně bez ovlivnění (-)
 Fig. 6 Changes of the longitudinal incline in the LTT (coloured inclines of individual sensors, graph divided into areas by phases of interference (number), eventually without interference (-))



Obr. 7 Výškové posuny všech geodetických 3D bodů v LTT (barevně posuny jednotlivých bodů, graf rozdělen do oblastí dle fází ovlivnění (číslo), případně bez ovlivnění (-)
 Fig. 7 Vertical shifts of all 3D geodesy points in the LTT (coloured shifts of individual points, graph divided into areas by phases of interference (number), eventually without interference (-))

a navazující ražby štol PAD4 a VO-OL a následné injektážní práce už na deformace neměly významný nepříznivý vliv. V tomto období (tedy po dokončení navazujících ražeb a injektáží) byla téměř na všech sledovaných metodikách pozorována oscilace hodnot deformací okolo hodnot dosažených po dokončení injektážních prací 1. části.

Rozšíření průzkumných štol PAD4 a VO-OL a doplňující injektáže (fáze ovlivnění 8-12)

Ražby rozšíření průzkumných štol a doplňující injektáže, které probíhaly ve druhé polovině roku 2021, neměly na deformace traťových tunelů metra C zásadní vliv. Nejvýznamnější z těchto činností z hlediska ovlivnění metra C byly injektáže prováděné z čelby průzkumné štoly VO-OL.

K textu jsou přiloženy grafy příkladů reakcí na průzkum LTT metra C. Reakce druhého tubusu byly podobné, posunuté v čase, dle postupu ražeb. Celkově lze konstatovat, že ovlivnění pravého traťového tunelu (PTT) bylo vesměs o něco mírnější.

5. ZÁVĚR

Ražba průzkumných štol PAD4 a VO-OL v lokalitě pražské Pankráce byla z hlediska geotechnického monitoringu zajímavou výzvou, která vyžadovala dobrou a intenzivní přípravu a samozřejmě efektivní realizaci.

Samotný monitoring provozovaných traťových tunelů metra C hrál v tomto projektu důležitou roli, kterou, díky kvalitnímu návrhu

PAD4 and VO-OL exploratory galleries enlargement and supplementary grouting (phase of interference 8-12)

The excavations for the enlargement of exploratory galleries and supplementary grouting, which took place in the second half of 2021, did not have a significant impact on the deformations of Metro C track tunnels. The most important aspect of these activities in terms of interfering with Metro C was the grouting carried out from the face of the VO-OL exploratory gallery.

The text is accompanied by graphs with examples of responses of the Metro C LTT to the exploration. The responses of the second tube were similar, shifted in time according to the advancement of the excavations. In general, it is possible to note that the interference of the right tunnel tube (RTT) was mostly somewhat milder.

5. CONCLUSION

The excavation of PAD4 and VO-OL exploration galleries in the area of Pankrác, Prague, was, from a geotechnical monitoring standpoint, an interesting challenge, which required good and intensive preparation and, naturally, effective realisation.

The monitoring of the operated Metro C track tunnels itself played a key role in this project, which was successfully fulfilled over the entire duration thanks to a high-quality plan and realisation. The deployment of automatic monitoring components into the

a provádění, po celou dobu úspěšně plnil. Nasazení prvků automatického monitoringu do měřicí linky bylo během průzkumných prací zcela klíčové, neboť umožňovalo nepřetržitě sledovat vývoj měřených veličin a s volitelnou četností je vyhodnocovat. Za předpokladu využití pouze cyklických metod měření by nebylo možné zachytit nepříznivé trendy deformací dostatečně rychle a reagovat na ně včas vhodnými opatřeními. Další nevýhodou použití pouze cyklických metod měření je v tomto případě možnost jejich provádění pouze v době traťové výluky provozované linky.

Během necelých tří let trvání tohoto projektu byly traťové tunely metra C postupně vystavovány různým druhům namáhání, které se díky úzké spolupráci všech účastníků doplňkového průzkumu dařilo vyhodnocovat a účinně upravovat postupy stavebně-průzkumných činností. Významným výsledkem této spolupráce je fakt, že po celou dobu trvání projektu nebyl narušen ani průběh průzkumných prací, ani pravidelný provoz metra C.

Důležitým výsledkem z průběžného a závěrečného hodnocení trasy C byl upravený způsob posuzování varovných stavů pro navazující fázi, tj. pro výstavbu nové trasy metra D v úseku Pankrác–Olbrachtova. Ten spočíval v posuzování dílčích změn od zahájení výstavby trasy metra D k nově stanoveným zpřísněným varovným stavům, a dále k posuzování celkových deformací od zahájení doplňkového průzkumu podle aktualizovaných původních varovných stavů.

V současné době již byla dokončena většina ražeb první části metra D, tj. při výstavbě metra I.D1a (úsek Pankrác–Olbrachtova), nyní jsou dokončovány ražby jednodílné stanice Pankrác D. Velmi náročné ražby nové trasy metra D dosud neměly zásadnější negativní vliv na provoz trasy metra C i díky podrobné přípravě průzkumných prací a jejich úspěšnému provedení.

Ing. MARTIN VINTER,
vinter.martin@inset.com,
Ing. VOJTĚCH ANDERLE,
anderle.vojtech@inset.com,
INSET s.r.o.

Recenzoval *Reviewed by:* Ing. Radek Bernard, Ph.D.

measuring service during the exploratory works was absolutely key, since it enabled continuous tracking of the development of measured quantities and to evaluate them with optional frequency. Assuming that only cyclic measurement methods were utilised, it would not be possible to detect unfavourable deformation trends with sufficient speed, and to react to them in a timely manner with appropriate measures. Another disadvantage of using only cyclic measurement methods is that, in this case, it is only possible to execute them during a track closure of the operated line.

During less than three years of this project, the Metro C track tunnels were gradually subjected to various types of stress, which, thanks to the close cooperation of all the participants of the supplementary exploration, were successfully evaluated and effectively altered by the procedures of construction-exploration activities. An important result of this cooperation is the fact that not only the progress of exploratory works or the regular Metro C operations were not disrupted over the entire duration of the project.

An important result of the interim and final evaluation of Line C was an adjusted method of assessing warning states for the following phase, i.e., for the construction of the new Metro Line D in the Pankrác – Olbrachtova section. It consisted of assessing partial changes since the start of construction of Metro D in compliance with the newly established stricter warning states, and further assessing total deformations from the onset of the supplementary exploration according to updated original warning states.

The majority of excavations of the first part of Metro D have already been completed at the present time, i.e., the construction of Metro I.D1a (Pankrác – Olbrachtova section), with the excavations of the single-vault Pankrác D station being finalised. The highly demanding excavations of the new Metro D route have not yet had any significant negative impact on the operation of the Metro C route, even thanks to thorough preparation and successful completion of exploratory works.

Ing. MARTIN VINTER,
vinter.martin@inset.com,
Ing. VOJTĚCH ANDERLE,
anderle.vojtech@inset.com,
INSET s.r.o.

LITERATURA / REFERENCES

- [1] HORÁK, Lubomír. *Dokumentace pro ohlášení, Úsek PAD4 – Monitoring raženého díla, Doplňkový geologický průzkum ID1a – Monitoring*, Metroprojekt. 2017.
- [2] ANDĚL, Václav; FILIP, Miroslav a IVOR, Štefan. Geologický průzkum trasy I.D metra v Praze, úsek PAD4. *TUNEL*. 2020, roč. 2020, č. 4, s. 14–21.
- [3] HORÁK, Lubomír. *Dokumentace pro ohlášení, Úsek VO-OL – Monitoring raženého díla, Doplňkový geologický průzkum ID1a – Monitoring*, Metroprojekt. 2017.
- [4] TLAMSA, Jiří; ONYSKO, Radek a ZEMÁNEK, Jan. Metro I.D – současný stav geologických průzkumných prací na úsecích VO-OL a OL1. *TUNEL*, roč. 2020, č. 4, s. 44–53.
- [5] SPOLEČNOST GTM TRASY I.D METRA. *Realizační projekt geomonitoringu – PAD4, Komplexní geotechnický monitoring pro geologický průzkum stavby VÝSTAVBA TRASY I.D METRA*. 2020.
- [6] SPOLEČNOST GTM TRASY I.D METRA. *Realizační projekt geomonitoringu – VO-OL, Komplexní geotechnický monitoring pro geologický průzkum stavby VÝSTAVBA TRASY I.D METRA*. 2020.
- [7] SPOLEČNOST PASPORTY PRO METRO I.D. INSET-GeoTec. *Pasportizace objektů dotčených GP – T1-T4, Komplexní geotechnický monitoring pro geologický průzkum stavby VÝSTAVBA TRASY I.D METRA*. 2019
- [8] SPOLEČNOST GTM TRASY I.D METRA. *Závěrečná zpráva komplexního geomonitoringu – PAD4, Komplexní geotechnický monitoring pro geologický průzkum stavby VÝSTAVBA TRASY I.D METRA*. 2021.
- [9] SPOLEČNOST GTM TRASY I.D METRA. *Realizační projekt geomonitoringu – VO-OL, Komplexní geotechnický monitoring pro geologický průzkum stavby VÝSTAVBA TRASY I.D METRA*. 2020.