

TUNEL HŘEBEČ – DLOUHODOBÝ MONITORING SANOVANÉHO SESUVU U VÝCHODNÍHO PORTÁLU

HŘEBEČ TUNNEL – LONG-TERM MONITORING OF STABILISED LANDSLIDE AT EASTERN PORTAL

PETR KARLÍN

ABSTRAKT

Silniční tunel Hřebeč je jednou z významných podzemních staveb na území ČR. Byl vyražen mezi roky 1994–1997 a již během ražeb, a především následně v průběhu let po dokončení, se projevily mnohé geodynamické jevy (skalní řícení a proudový sesuv), které přerušily funkčnost tunelu jako důležité dopravní spojnice Čech a Moravy. Vlivem geodynamického procesu odsedání pískovců, při kterém dochází k postupnému vertikálnímu členění částí skalního masivu, došlo v roce 2006 k rozsáhlému sesuvu. Po sanaci posledního sesuvu byl v roce 2006 vybudován systém dlouhodobého geotechnického monitoringu sledující stabilitu realizované konstrukce i jejího bezprostředního okolí. Po deseti letech byl tento systém výrazně zmodernizován, částečně obměněn a doplněn o nové prvky, které mají za cíl co nejvíce zefektivnit měření na lokalitě a poskytnout tak úplnější data o sledovaných jevech. Společně s touto změnou je užitečným benefitem varovný systém, jenž při překročení nastavených parametrů okamžitě odesílá zprávu s výzvou k provedení bezpečnostní prohlídky. Příspěvek se zabývá jak naměřenými daty získanými z monitoringu, tak i zkušenostmi s provozem automatického měření.

ABSTRACT

The Hřebeč road tunnel is one of important underground structures in the Czech Republic. It was driven between 1994 and 1997. Numerous geodynamic phenomena (rock falls and flow landslides) manifested themselves already during the tunnel excavation and, above all, subsequently during the years after the works completion. They interrupted the function of the tunnel forming an important transport link between Bohemia and Moravia. A vast landslide happened in 2006 as a result of a geodynamical process of separation of cretaceous sandstone, where parts of the rock massif are gradually vertically separated. A system of long-term geotechnical monitoring following the stability of the realised structure and its immediate surroundings, was installed after the last landslide in 2006 had been stabilised. After ten years, the system was significantly upgraded, partially modified and new elements designed to increase the effectiveness of measurements were carried out in the location as much as possible. In this way, more complete data on the phenomena observed is available. An alert system sending a message together with a requirement for safety inspection in the case that the set parameters are exceeded is, together with the above-mentioned change, a useful benefit. This paper deals with both the data obtained from the monitoring and the experience with the operation of the automated measurement system.

ÚVOD

Tunel Hřebeč, usnadňující cestu mezi Svitavami a Moravskou Třebovou, je součástí silnice I. třídy, která prochází šesti kraji České republiky a patří mezi tři nejdelší silniční tahy. Je tudíž vedena i evropská silnice E442, která propojuje severojižní evropské páteřní trasy E55, E65, E75 s mezinárodními silnicemi E48, E50, E67, E461 a E642. Důležitosti spojení Moravy a Čech odpovídá i intenzita dopravy. Při měření v roce 2016 tudy denně projelo průměrně 15 170 aut, což činí takřka 5,54 milionu aut ročně. Téměř třetina dopravy je tvořena nákladními auty. [1] Tunel byl vyprojektován pro jednodušší a bezpečnější překonání hřebečského sedla, kde původně silnice vedla po svahu hřbetu s mnohými úzkými a nepřehlednými úseky. Tunel je jednotubusový, 354 m dlouhý, s jedním klesajícím a dvěma stoupajícími pruhy. Od sanace sesuvu v roce 2006 je celý východní portál tunelu kontinuálně sledován a dochází k pravidelnému vyhodnocení stavu na jednotlivých prvcích monitoringu i portálu jako celku.

GEOLOGICKÉ POMĚRY

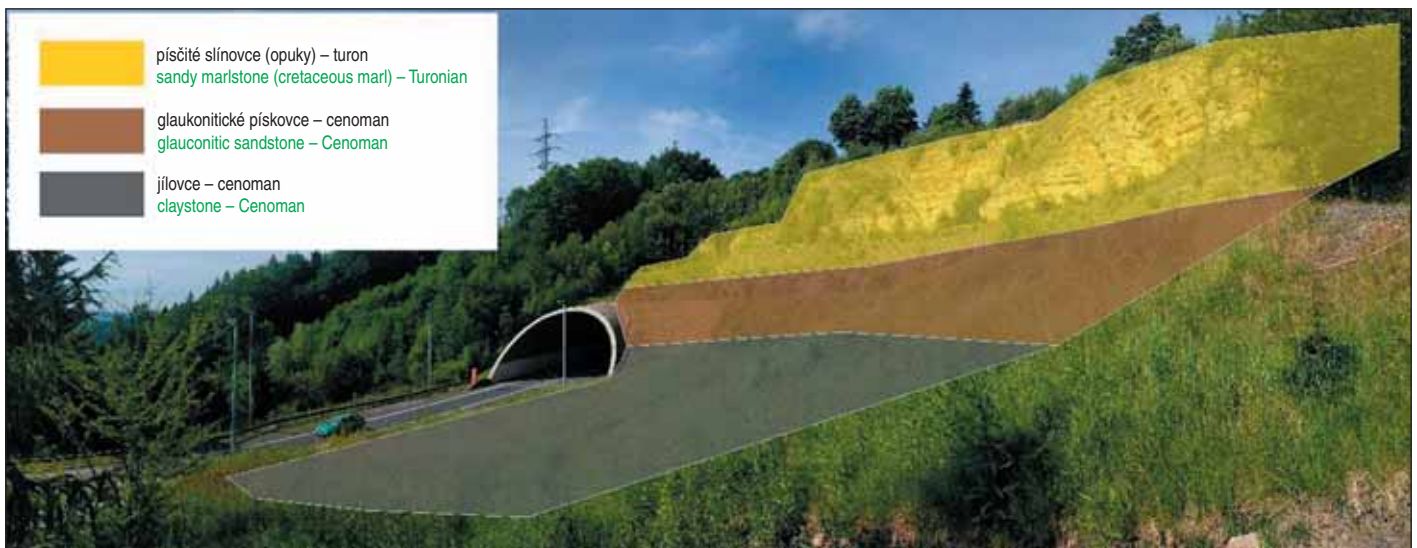
Území východního portálu leží ve strmém terénním stupni omezujícím na východě hřebečský hřbet. Geologicky je hřbet tvořen výraznou kuestou křídových sedimentů. Čela jejich vrstev tvoří v portálové části skalní stěnu. Vrstvy mají subhorizontální uložení, místy s mírným úklonem k západu. Ve skalní stěně vystupují

INTRODUCTION

The Hřebeč tunnel, facilitating the travel between the towns of Svitavy and Moravská Třebová, is part of the primary road running over six regions of the Czech Republic, belonging among three longest trunk routes. Even the European road E442 linking the north-south European trunk roads E55, E65 and E75 with international roads E48, E50, E67, E461 and E642 is led along this route. The traffic flow also corresponds to the importance of the link between Bohemia and Moravia. At the moment of the measurements completion in 2016, daily traffic volume amounted to 15,170 vehicles on average, which means nearly 5.54 million vehicles per year. Nearly a third of the volume is formed by lorries. [1] The tunnel was designed for simpler and safer overcoming of the Hřebeč Pass, where the road originally led on the slope of the ridge, with numerous narrow and confusing sections. The 354m long single-tube tunnel has one descending and two ascending traffic lanes. The whole eastern portal of the tunnel has been continually monitored since the stabilisation of the landslide in 2006 and the condition of the individual elements of the monitoring and the portal as a whole has been regularly assessed.

GEOLOGICAL CONDITIONS

The area of the eastern portal lies within a steep terrain step limiting the Hřebeč ridge in the east. Geologically, the ridge is



Obr. 1 Schematický geologický řez východním portálem
Fig. 1 Schematic geological section through eastern portal

shora turonské písčité slínovce (opuky) a u paty stěny cenomanské glaukonitické pískovce. Hluběji se vyskytují cenomanské jílovce a pískovce perucko-korycanského souvrství. V podloží křídý jsou permské pískovce a prachovce, v okolí sesuvu oddělené od křídý zlomem směru SSV-JJZ. [2] Pohled na východní portál se zjednodušenou geologickou stavbou je na obr. 1.

PŘEHLED UDÁLOSTÍ

- 1994 – začátek ražeb tunelu;
- 1995 – skalní řízení, které postihlo levou opěrovou štolu tunelu – blok cca 20×10×15 m;
- 1997 – tunel uveden do provozu;
- 1999 – proudový sesuv v pravé části východního portálu;
- 2000 – rozšíření zátrhů od sesuvu z roku 1999 k tunelové troubě, trhliny v ostění portálu;
- 2000 – injektáž trhlín a instalace uhlíkových lamel v ostění tunelu;
- 2001 – sanace proudového sesuvu z roku 1999;
- 2006 – sesuv svahu a skalní řízení v oblasti východního portálu (vpravo při pohledu na portál) (obr. 2);
- 2006 – začátek geotechnického monitoringu;
- 2016 – začlenění automatických monitorovacích prvků se systémem rychlého varování.

SANACE SESUVU Z ROKU 2006

Při sesuvu došlo k sesunutí materiálu o odhadovaném objemu 10 000 m³ a plošném rozsahu 65×80 m s průměrnou mocností 3–6 m, při horní části až 10 m. Sanace sesuvu spočívala v odtěžení sesutého materiálu a následném vybudování přítěžovací šterkové lavice u paty svahu. Na ní byla postavena ochranná konstrukce Green Terramesh z lehčeného kameniva Liapor frakce 8–16 mm. Tato konstrukce má za cíl chránit vrstvu geotechnicky málo vhodných cenomanských glaukonitických pískovců a jejich kontakt s nadložními turonskými slínovci (opukami) před povětrnostními vlivy. Opuková skalní stěna je v ploše sanována samozávrtnými svorníky délky 2 m v rastru 4×4 m a instalací nosných lanových panelů s drátěným pletivem. [3]

formed by a distinct cuesta formed by Cretaceous sediments. The ends of the layers form a rock wall in the portal part. The layers are deposited sub-horizontally, locally dipping west. In the rock wall, Turonian sandy marlstone (cretaceous marl) emerge at the top and Cenomanian glauconitic sandstone layers are found at the rock wall bottom. Cenomanian claystone and Peruc-Korycany Formation sandstone are found at greater depth. Underlying are Permian sandstone and siltstone, which are separated from the Cretaceous formation in the landslide surroundings by a NNE-SSW fault. [2] A view of the eastern portal with the simplified geological structure is presented in Fig. 1.

OVERVIEW OF EVENTS

- 1994 – commencement of tunnel excavation;
- 1995 – rock fall striking the left-hand side drift – ca 20×10×15m block;
- 1997 – tunnel opening to traffic;
- 1999 – flow landslide in the right-hand part of the eastern portal;
- 2000 – expansion of the tension cracks caused by the landslide in 1999, reaching up to the tunnel tube; cracks in the tunnel portal lining;



Obr. 2 Sesuv z roku 2006 – převzato z [5]
Fig. 2 Landslide from 2006 – borrowed from [5]



Obr. 3 Sanace z roku 2006 – převzato z [5]

Fig. 3 Stabilisation from 2006 – borrowed from [5]

Současně byl zřízen systém geotechnického monitoringu, jehož součástí byly inklinometrické vrtky, vícetupňové horizontální tyčové extenzometry na geomřížích v přítěžovací lavici, měřidla pórových tlaků, tlakové podušky pro měření kontaktního napětí na styku sanačního tělesa se skalním podložím a systém trigonometrických bodů pro komplexní sledování deformací portálu tunelu, skalní stěny, přítěžovací lavice vybudované v rámci sanace sesuvu a dalších důležitých míst ve sledované lokalitě (obr. 3).

AKTUALIZACE SYSTÉMU MONITORINGU

Po 10 letech provozu bylo v roce 2016 nutno systém monitoringu kvůli nefunkčnosti některých prvků z části obměnit. Jednalo se zejména o měřidla pórových tlaků – pneumatické snímače s kompenzačním ventilem Glötzl (typ P4 10 Lager), u nichž pravděpodobně došlo k porušení membrány. Dále bylo rozhodnuto o instalaci krátkých puklinoměrů (ang. crackmeter) na pukliny v horní části opukové stěny. Z původního systému monitoringu byly převzaty inklinometrické vrtky, tyčové extenzometry a síť trigonometrických stabilizovaných bodů. V současnosti tak systém monitoringu obsahuje celkem 5 inklinometrických vrtů, 4 puklinoměry na vybraných puklinách ve skalní stěně, 4 měřidla pórových tlaků, 2 tyčové extenzometry na výztužných geosyntetikách zabudovaných v přítěžovací lavici a 40 trigonometrických bodů (obr. 4).

PRVKY MONITORINGU

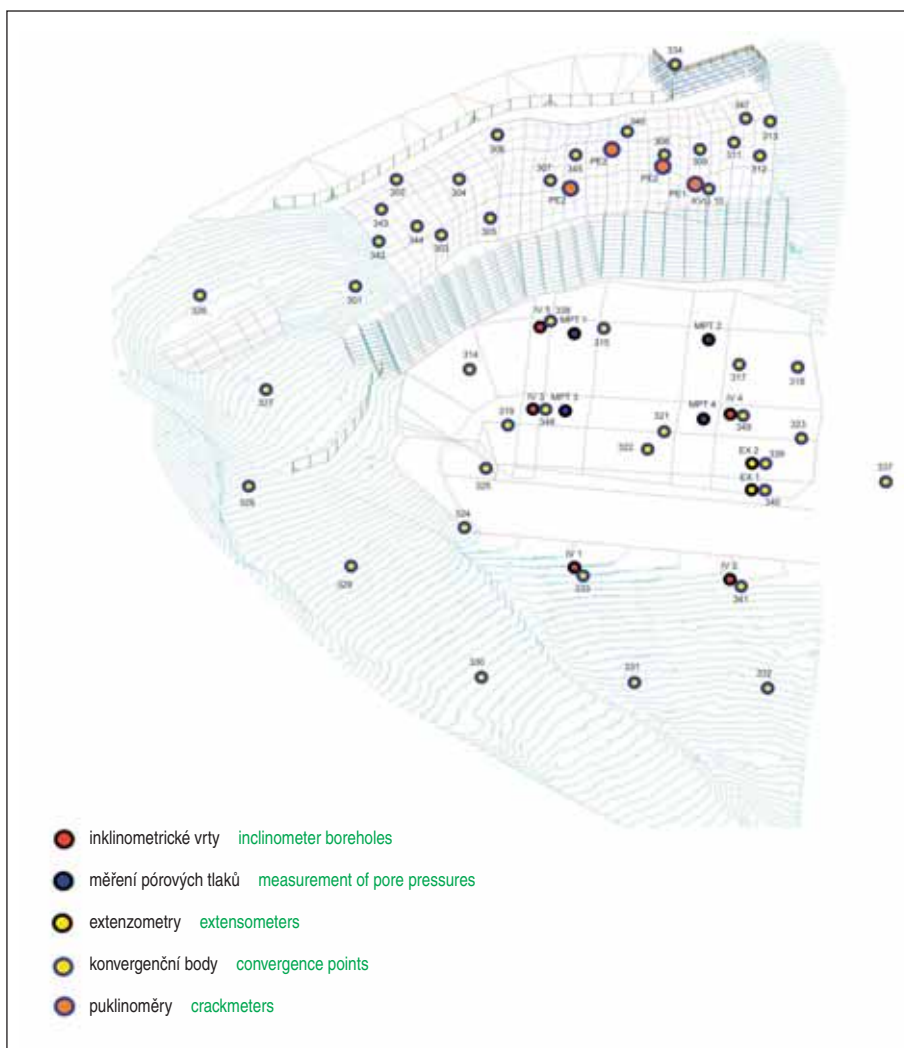
Celý systém je postaven na dílčích částech, které se komplementárně doplňují a vzájemně potvrzují zjištěné závěry. Tím je zaručena zpětná kontrola výsledků a ověření platnosti měření. Monitorovací systém je možné rozdělit do dvou skupin podle způsobu a četnosti získávání měřených dat. (A) Manuální sledování vyžaduje osobní prohlídku a měření dat přímo na lokalitě. U sledovaných prvků se

- 2000 – injecting grout into cracks and installation of carbon lamellas in the tunnel;
- 2001 – stabilisation of the flow landslide from 1999;
- 2006 – slope-slide and rock fall in the area of the eastern portal (right-side of the portal, see Fig. 2).;
- 2006 – beginning of geotechnical monitoring;
- 2016 – incorporation of monitoring elements into the rapid alert system.

STABILISATION OF LANDSLIDE FROM 2006

During the landslide, material with the estimated volume of 10,000m³ and the areal extent of 65×80m slid down; the average thickness amounted to 3–6m, up to 10m at the upper part. The landslide stabilisation lay in removing the slid material and subsequent building a loading gravel berm at the slope base. Green Terramesh structure made from 8–16mm fraction of Liapor lightweight aggregates was carried out on it. The objective of this structure is to protect the layer of geotechnically little suitable Cenomanian glauconitic sandstone and its contact with the overlaying Turonian marlite (Cretaceous marl) against weather effects. The Cretaceous marl rock wall is stabilised with 2m long self-drilling rock bolts on 4×4m grid and by the installation of supporting cable panels with wire mesh. [3]

A geotechnical monitoring system was established concurrently, containing inclinometer boreholes, multi-stage horizontal rod extensometers on geogrids in the loading berm, pore pressure



Obr. 4 Schéma prvků monitoringu – převzato z [6]

Fig. 4 Chart of monitoring elements – borrowed from [6]



Obr. 5 Pohled z východního portálu směrem na Moravskou Třebovou s inklinometry pod silnicí

Fig. 5 A view from eastern portal towards Moravská Třebová, with inclinometers under the road

jedná o měření pohybu či deformací, jež jsou z podstaty umístění zpravidla nevratné. Měření probíhá pravidelně dvakrát ročně – na jaře a na podzim. (B) Automatické sledování je z hlediska samotného měření plně soběstačné a umožňuje periodické každodenní měření bez ohledu na čas a počasí v lokalitě. Vysoká četnost a kon-

meters, pressure cells for measuring the stress at the contact of the stabilisation body with bedrock and a system of trigonometric points for comprehensive monitoring of deformations of the tunnel portal and the rock wall, loading berms carried out within the framework of the stabilisation of the landslide and other important places in the locality being observed (see Fig. 3).

UPDATING OF MONITORING SYSTEM

In 2016, after 10 years of operation, it was necessary to partially modify the monitoring system with respect to the loss of functionality of some elements. First of all, pore pressure meters – pneumatic transducers with Glötzel P4 10 Lager-type compensation valves, the membranes of which were probably damaged. In addition, a decision was made that short crackmeters were to be installed on cracks in the upper part of the cretaceous marl wall. Inclinometer boreholes, rod extensometers and the network of stabilised trigonometric points were taken over from the original monitoring system. The monitoring system currently comprises 5 inclinometer boreholes, 4 crackmeters on selected cracks in the rock wall, 4 pore pressure meters, 2 rod extensometers on the reinforcing geosynthetics incorporated into the loading berms and 40 trigonometric points (see Fig. 4).

MONITORING ELEMENTS

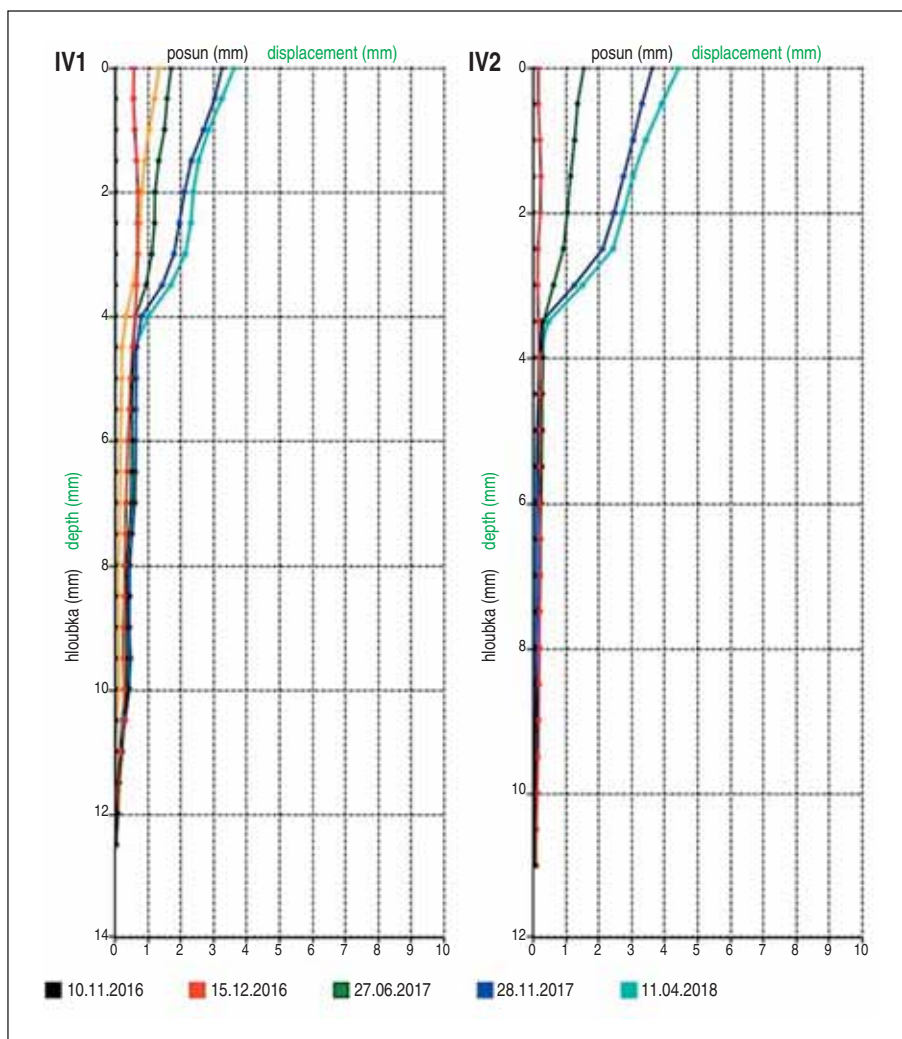
The entire system is built on partial elements complementing each other and mutually confirming the conclusions determined.

In this way back-checking of results and verifying of the validity of measurement results is ensured. The monitoring system can be divided into two groups according to the method and frequency of obtaining the measured data. (A) Manual monitoring requires inspection and measurement of data in person, directly in situ. In the case of the elements being monitored it is the measurement of movement or deformations, which are, with respect to their location, usually irreversible. The measurement is carried out regularly, twice a year – in spring and autumn. (B) Automatic monitoring is fully self-contained from the aspect of measurements themselves and allows for periodic daily measurements without respect to time and weather in the locality. The high frequency and continuity of the measurements readily covers development of irreversible changes with time. Another advantage lies in the elimination of human factor.

- A) Manual monitoring:
 - I) Inclinometer boreholes;
 - II) Rod extensometers on a reinforced structure;
 - III) Trigonometric monitoring of fixed points.
- B) Automatic monitoring:
 - I) Measurement of pore pressures ;
 - II) Measurements of cracks using crackmeters.

Inclinometer boreholes

Measurements in inclinometer boreholes belong among most widespread elements of



Obr. 6 Inklinometry IV1 a IV2 – výsledky měření

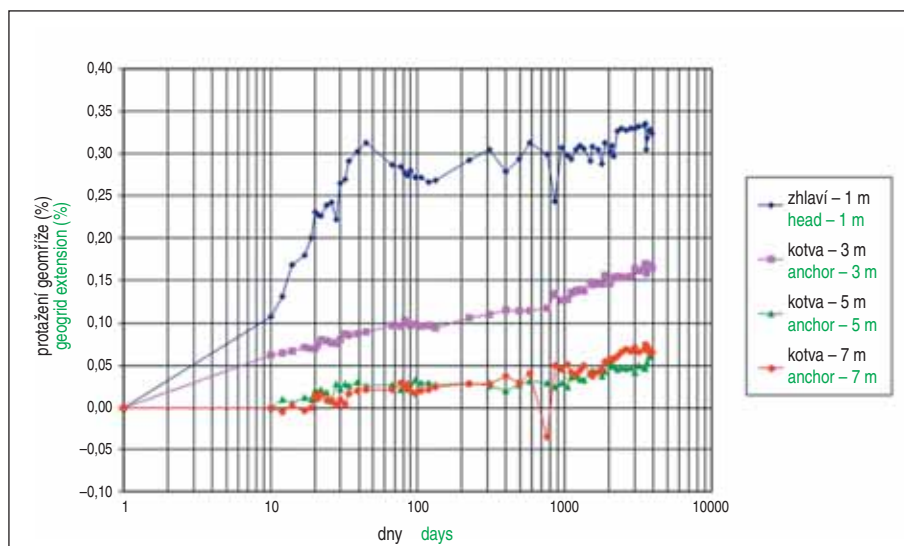
Fig. 6 Inclinometer boreholes IV1 and IV2 – measurement results

tinuita měření pohotově postihuje ireverzibilní změny v čase. Další výhodou je eliminace lidského faktoru.

- A) manuální sledování:
 - I) inklinometrické vrty;
 - II) tyčové extenzometry na vyztužené konstrukci;
- III) trigonometrické sledování pevných bodů;
- B) automatické sledování:
 - I) měření pórových tlaků;
 - II) měření na puklinách pomocí puklino-měrů.

Inklinometrické vrty

Měření v inklinometrických vrtech patří mezi nejrozšířenější prvky geotechnického monitoringu sesuvů a podzemních staveb. Na lokalitě bylo vystrojeno pět vrtů inklinometrickými pažnicemi s orientací po předpokládaném směru pohybu. Dva vrty jsou umístěny pod silnicí (délky 13,5 a 12,0 m), dva na první přítěžovací lavičce (délky 21,0 a 18,0 m) a pátý na druhé přítěžovací lavičce (délky 26,5 m). Během 12 let měření na vrtech bylo dosud provedeno 40 měření, která dokazují, že stabilita navržené geotechnické konstrukce je velmi dobrá. Do roku 2018 byl zaznamenán zanedbatelný kumulovaný posun nepřesahující 2,1 mm. Z měření však zároveň vyplývá, že na dvou vrtech pod silnicí, tedy mimo oblast postiženou sesuvem roku 2006, dochází k velmi pomalému plouživému pohybu (creepu) násypového tělesa silnice. V hloubce 3,0



Obr. 7 Extenzometr EX1 – výsledky měření – převzato z [6]

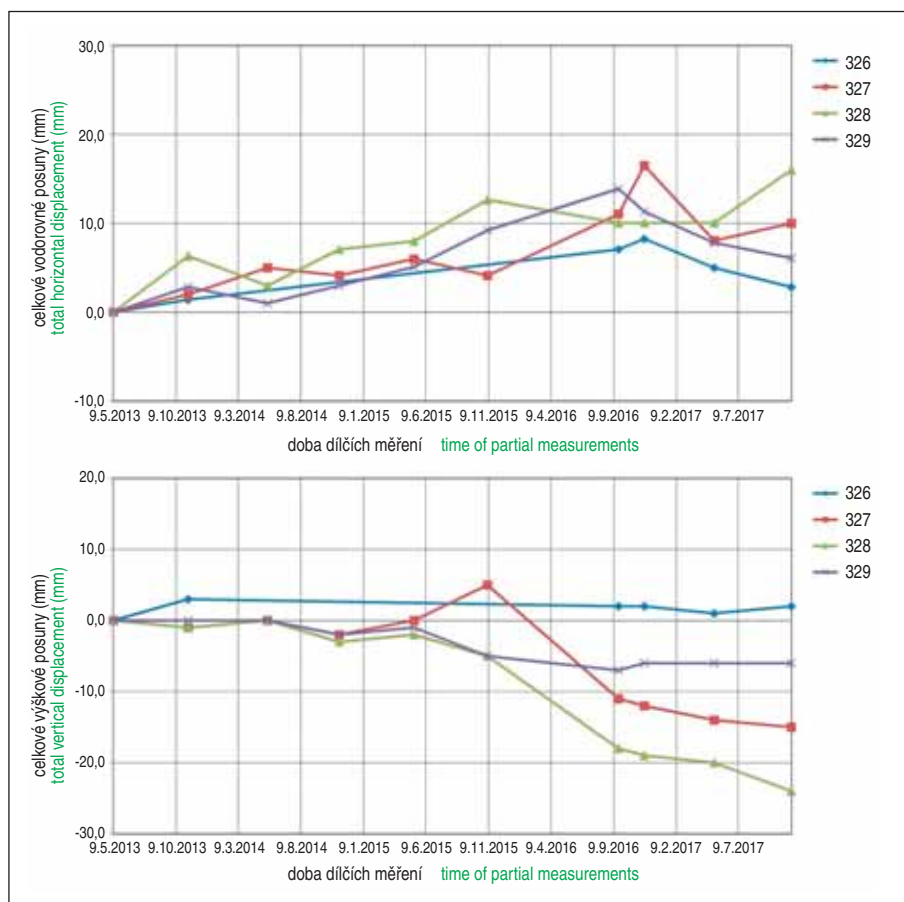
Fig. 7 Extensometer EX1 – measurement results – borrowed from [6]

geotechnical monitoring of landslides and underground structures. Inclinator hole casing oriented in the assumed direction of the movement is installed in five boreholes. Two boreholes are located under the road (13.5 and 12.0m long), two boreholes are located in the first loading berm (21.0 and 18.0m long) and the fifth borehole is in the second loading berm (26.5m long). During the course of the 12 years of measuring on boreholes, 40 measurements have been carried out till now. They prove that the stability of the geotechnical structure designed is very good. A negligible



Obr. 8 Trigonometrické body na zhlaví extenzometrů EX1 a EX2

Fig. 8 Trigonometric points on the heads of extensometers EX1 and EX2



Obr. 9 Trigonometrické body – v oblasti starého proudového sesuvu – výsledky měření – převzato z [6]

Fig. 9 Trigonometric points – in the area of the old flow landslide – measurement results – borrowed from [6]



Obr. 10 Provádění vrtu pro osazení nových snímačů pórového tlaku – 2016
Fig. 10 Drilling holes for installation of new pore pressure transducers – 2016

až 4,0 m byly doposud naměřeny kumulované hodnoty 22,13 mm, respektive 26,50 mm. Rychlost pohybu je na základě posledních měření cca 1,8 mm, respektive cca 1,3 mm za rok. Během uplynulých let byl trend posunu na inklinovrtu IV1 zmírněn až pozastaven dodatečnými opatřeními spočívajícími v oddrénování portálové části. Pohled z tubusu východního konce tunelu směrem k Moravské Třebové s vyznačenými inklinovrtami ukazuje obr. 5 a výsledky z jejich měření od roku 2016 do léta 2018 jsou na obr. 6.

Tyčové extenzometry na vyztužené konstrukci

Extenzometry byly během výstavby konstrukce osazeny na vyztužnou geometrii do 5. a 8. vrstvy přítěžovací lavice. Každý ze 2 extenzometrů má 4 samostatné kotvy zakončené v hloubce 1 až 9 m od zhlaví. Tímto způsobem je zajištěno sledování protažení geometrii v jednotlivých vzdálenostech od líce svahu. Měření probíhá digitálním deformometrem s přesností $\pm 0,01$ mm. Projekt monitoringu byl nastaven na hodnoty v řádu centimetrů a zároveň umožňoval v případě potřeby z hlediska větších deformací přestavení zhlaví a následné kontinuální měření deformací až do řádu několika decimetrů. Z výsledků měření lze posoudit bezpečnost návrhu geotechnické konstrukce z hlediska vyztužení první přítěžovací lavice, tj. stability. Podle posledních měření je konstrukce již plně zkonsolidována a hodnoty poměrného přetvoření se pohybují mezi 0,05 a 0,39 % s ustalujícím trendem. Kritérium mezního přetvoření (1 %) používané pro svislé opěrné konstrukce z vyztužených zemín [4] je tak bezpečně splněno. Výsledky naměřené na extenzometru EX1 ukazuje obr. 7.

Trigonometrické sledování bodů

Ve sledovaném území bylo osazeno 40 geodetických bodů tak, aby měření pokrylo jednotlivé části sanační konstrukce i vybraná místa z bezprostředního okolí portálu. Body jsou upevněny na stabilizovaných geotnech s odraznými terčíky. Měření je prováděno klasickým trigonometrickým měřením pomocí automatické totální stanice Leica TCA 2003. Z naměřených hodnot lze usuzovat, že na lokalitě probíhá určitá deformační aktivita zahrnující čtyři oblasti: skalní opukovou stěnu, staré sesuvné území vedle portálu (proudový sesuv z roku 1999), násyp silnice a zhlaví extenzometrů EX1 a EX2. Opuková stěna vykazuje chaotické pohyby dílčích bloků v řádech jednotek až prvních desítek milimetrů. Podobné hodnoty byly získány u creepu starého sesuvného území. V násypovém tělese dochází k pohybům (u inklinometru IV2) v řádu jednotek milimetrů ročně. Jedná se o dlouhodobě pozorovaný jev potvrzený

cumulated displacements not exceeding 2.1mm have been registered until 2018. However, at the same time, it follows from the measurements that very slow creep of the road embankment exists on two boreholes under the road (outside the area affected by the landslide 2006). Cumulated values of 22.13mm, respectively 26.50mm, have been measured till now at the depth of 3.0 up to 4.0m. The annual movement rate determined on the basis of last measurements amounts to ca 1.8mm and 1.3mm, respectively. During the past years, the trend of development of displacement on inclinometer hole IV1 was moderated up to stopped by additional measures lying in draining the portal section. A view from the tube of the eastern end of the tunnel towards Moravská Třebová with inclinometer boreholes marked in it (see Fig. 5) and results of measurements conducted

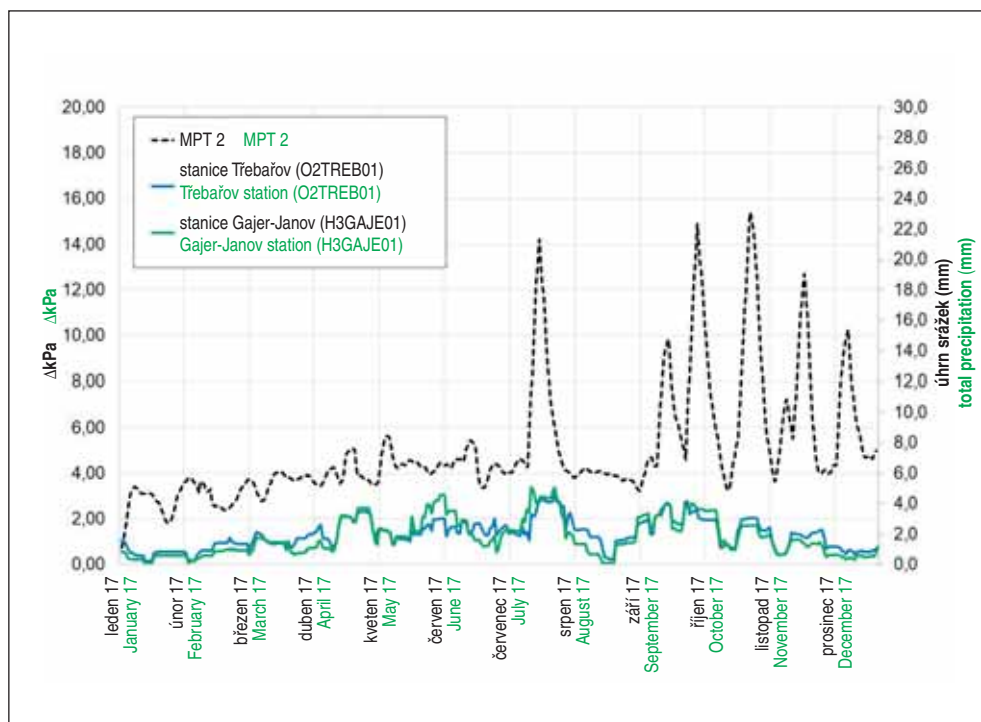
on them from 2016 to summer 2018 is presented in Fig. 6.

Rod extenzometrů na vyztužené konstrukci

Extenzometry were installed during the course of the construction on the reinforcing grid into the 5th and 8th layer of the loading berm. Each of the two extensometers has four separate anchors ending at the depth of 1 to 9m from the extensometer head. The monitoring of the elongation of geogrids at individual distances from the slope surface is ensured in this way. The measurement is carried out using a digital deformation meter with the accuracy of ± 0.01 mm. The monitoring design was set for values in the order of centimetres and, at the same time, allowed for subsequent altering of the head and continual measurements of deformations up to the order of several decimetres in case of need from the aspect of larger deformations. It is possible to assess the safety of the geotechnical structure design from the point of view of the reinforcement of the first loading berm design, i.e. the stability. According to last measurements, the structure is already fully consolidated and the values of strain vary between 0.05 and 0.39 per cent, with the trend stabilising. The criterion for the ultimate strain (1%) used for vertical reinforced soil supporting structures is therefore safely met [4]. The results measured on extensometer EX1 are presented in Fig. 7.

Trigonometric monitoring of points

Forty survey points were installed in the monitored area so that the measurements covered individual parts of the stabilisation structure and selected places in the immediate surroundings of the portal. The points are fixed on stabilised survey bars with reflector targets. The measurements are carried out at a classical trigonometric method using Leica TCA 2003 automatic total station. It is possible to conclude from the measured data that a certain deformational activity is under way in the locality, comprising four areas: the cretaceous marble rock wall, the old landslide area next to the portal (the flow landslide from 1999), the road embankment and the heads of extensometers EX1 and EX2. The cretaceous marble wall exhibits chaotic movements of partial blocks in the order of single millimetres up to first tens of millimetres. Similar values were obtained in the creep of the old landslide area. Movements in the order of single millimetres take place annually in the embankment body (at inclinometer IV2). It is a phenomenon observed in the long term and even confirmed by inclinometer measurements. The installation of trigonometric points on extensometer heads and



Obr. 11 Graf vývoje pórových tlaků na snímači MPT 2 v porovnání s úhrnem srážek z nejbližších dvou stanic ČHMÚ

Fig. 11 Graph of development of pore pressures on transducer MPT 2 in comparison with the total precipitation from two CHMU stations

i inklinometrickým měřením. Osazení zhlaví extenzometrů trigonometrickými body a naměřená data ze starého proudového sesuvu jsou na obr. 8 a 9.

Pórové tlaky

Měření pórových tlaků bylo v původním systému řešeno manuálním sledováním (obvykle 2x ročně). Do nového systému měření pórových tlaků byly vybrány strunové snímače společnosti Sisgeo, nabízející měření pomocí automatických datalogerů. Instalace snímačů byla provedena do čtyř nově vyhloubených vrtů umístěných do obou přitěžovacích lavic vybudovaných v rámci sanace sesuvu. Hloubka vrtů byla vždy 6,0 m, z toho zhruba 4,0 m vrt procházel šterkovou konstrukční vrstvou přitěžovací lavice a následně byl 2,0 m veden silně zvětralými jílovci. V této vrstvě jsou osazeny všechny snímače a naměřené hodnoty tedy odpovídají pórovému tlaku v přípoверхové zóně podloží sanačního tělesa. Použitý dataloger Sisgeo miniOmnia je nastaven na pevně dané osmihodinové měřicí intervaly. Data jsou po každých třech měřeních jednou denně odesílána a zálohována. Spolu s tlakem je v čidle měřena i teplota, která je využita pro korekci výpočtu tlaku. U tří čidel byly naměřeny dlouhodobě stabilní hodnoty kladného přírůstku napětí o velikosti cca 10 kPa, respektive okolo 12 kPa (MPT 3). Na obr. 10 je vidět vrtná souprava při provádění vrtu pro osazení nových čidel pórového tlaku. Z naměřených dat lze vyčíst jistou pozitivní korelaci s atmosférickými srážkami, zejména u snímače MPT 2 s lokální odchylkou až okolo 15 kPa (obr. 11). Srážky jsou uvedeny pro nejbližší dvě stanice ČHMÚ (Gajev Janov – H3GAJE01, vzdálenost 14,5 km, nadmořská výška 515 m n. m. a Třebořov – O2TREB01, vzdálenost 11,5 km, nadmořská výška 375 m n. m.), lokalita (nadmořská výška cca 550 m n. m.) se nachází na rozhraní působnosti obou stanic.

Měření puklin

Skalní masiv není po sanaci samozávrtnými svorníky délky 2,0 m v rastru 4×4 m v přirozeném stavu. Měření na puklinách probíhá pomocí puklinoměrů společnosti Sisgeo, schéma osazení

the measured date from the old flow landslide are presented in Figures 8 and 9.

Pore pressures

Measurements of pore pressures were solved in the original system by manual monitoring (usually twice a year). Vibrating wire transducers produced by the company of Sisgeo, offering measurements using automatic data loggers, were chosen for the new pore pressure measurement system. The transducers were installed in four newly bored holes located in both loading berms carried out within the framework of the stabilisation of the landslide. The boreholes were always 6.0m deep. Of this depth, about 4.0m of the borehole passed through the structural gravel layer of the loading berm and the following 2m long section ran through heavily weathered claystone. All transducers are installed in this layer, therefore the measured values correspond to the pore pressure in the near-surface zone of the subgrade of the stabilisation

body. The Sisgeo miniOmnia data logger used is firmly set to eight-hour measurement intervals. The data is sent and backed up once a day, after three measurements. Together with pressure, even the temperature used for correcting the calculation of pressure is measured in the sensor. The in the long-term stable values of positive increment of stress of ca 10kPa, respectively about 12kPa (MPT 3) were measured by three sensors. The drilling rig carrying out a borehole for the installation of new pore pressure sensors is presented in Fig. 10. It is possible to find certain positive correlation with atmospheric precipitation from the measured data, first of all the data measured on MPT 2 transducer with the local deviation up to about 15kPa (see Fig. 11). The precipitation is presented for two closest stations of the Czech Hydrometeorological Institute (CHMU) (Gajev Janov – H3GAJE01, distance of 14.5km, altitude of 515m a. s. l., and Třebořov – O2TREB01, distance of 11.5km, altitude of 375m a. s. l.), the locality (altitude of ca 550m a. s. l.) is found at the interface of the activities of the two stations.

Measurement of cracks

The rock massif is not in the natural condition after the stabilisation with 2.0m long self-drilling rock bolts installed on 4x4m grid. The measurement on cracks is conducted by means of crackmeters produced by the company of Sisgeo. The chart of the installation of the crackmeters is presented in Fig. 12. Whilst cracks 1 and 2 are widely open, cracks 3 and 4 are rather close. The vibrating wire principle is again used. It lies in measuring the difference between the resonance between two steel wires, one of which is stretched firmly and the other is being stretched out or loosened depending on the displacement of the meter arm (see Fig. 13). The resonance difference is digitised and is converted to the displacement value by calculation. The supplementary measurement of temperature in the gauge has only an informative character. The sensitivity of measuring displacements is smaller than 0.5% of the measured scope, i.e. smaller than 0.25mm. The Sisego miniOmnia data logger is applied to the measurement in three-hour intervals, with



Obr. 12 Schéma osazení puklinoměrů ve skalní stěně

Fig. 12 The pattern of installation of crackmeters in the rock wall



Obr. 13 Detail osazení puklinoměru P1 ve skalní stěně

Fig. 13 Detail of installation of crackmeter P1 in the rock wall

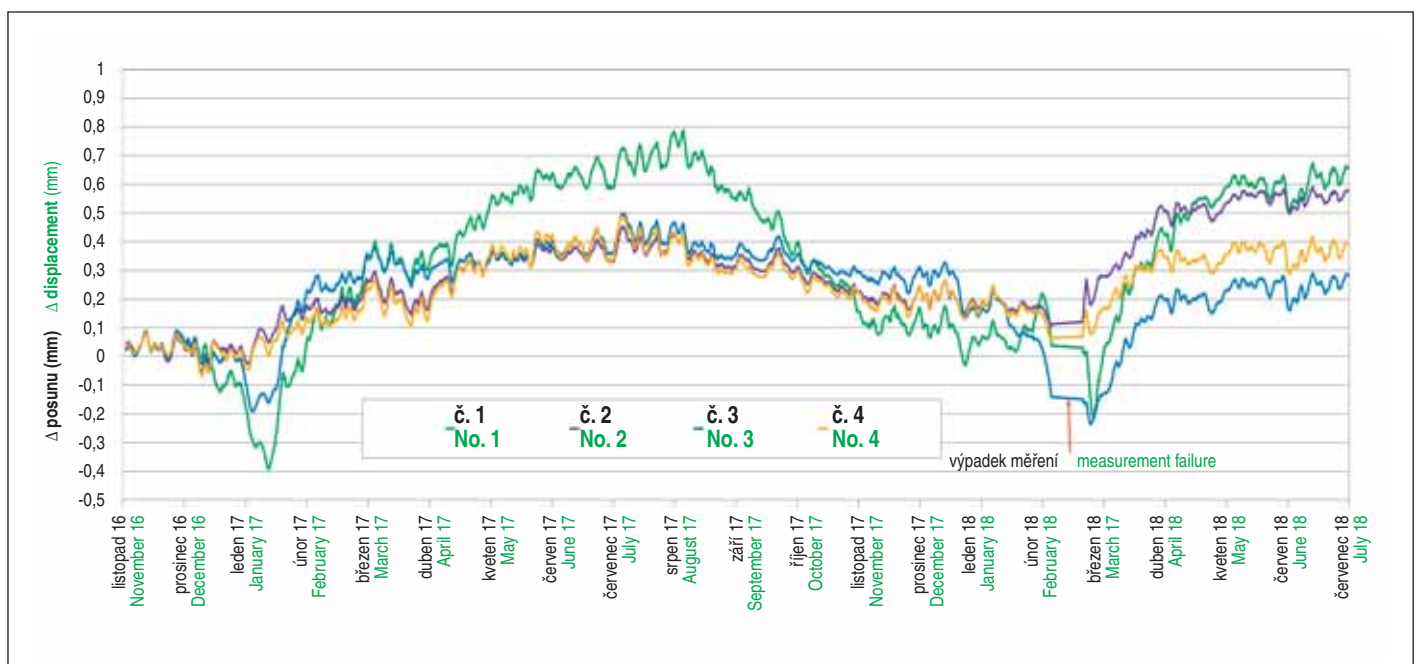
puklinoměrů je na obr. 12. Zatímco pukliny 1 a 2 jsou silně rozvřené, pukliny 3 a 4 jsou spíše uzavřené. Opět je použit princip struny, který spočívá v měření rozdílu rezonance mezi dvěma ocelovými dráty, z nichž jeden je natažen napevno a druhý je napínán či uvolňován v závislosti na posunu ramene měřidla (obr. 13). Tento rezonanční rozdíl je digitalizován a výpočetně převeden na hodnotu posunu. Doplňkové měření teploty v čidle je pouze informativního charakteru. Citlivost měření posunu je menší než 0,5 % z měřeného rozsahu, tzn. menší než 0,25 mm. Měření probíhá pomocí datalogeru Sisgeo miniOmnia v tříhodinových intervalech s denním přenosem dat. Při dlouhodobém sledování vývoje posunu na puklinách lze snáze odhalit případné trendy (například rozevírání puklin) a přistoupit k jejich řešení s časovým předstihem, který zpravidla znamená nižší finanční náročnost oproti havarijním stavům.

Posun na puklinách prochází nejen ročními, ale i denními cykly, kdy je opuková stěna zahřívána dopoledním sluncem. Se zvyšující se teplotou dochází k rozevírání a se snižující naopak k uzavírání

daily transferring of the data. In the case of long-term monitoring of the development of displacement on cracks it is possible more easily to detect potential trends (for example opening of cracks) and proceed to solving them in advance, which usually means lower financial requirements in comparison with emergency states.

Displacement on cracks passes not only through annual cycles but also through daily cycles, where the cretaceous marl wall is heated by morning sun. Cracks open with increasing temperature and vice versa, close with decreasing temperature. The trends can be seen in Fig. 14. All graphs were modified by the weighted average for smoothing the values.

The most noticeable seasonal fluctuations within the scope of ca +1.0 to -0.4mm were observed on crackmeter No. 1, the green curve, located on the most separated rock "tower". The locations of individual gauges were chosen with efforts that such discontinuities in the rock wall were selected which would be probably activated already in the initial phase in the case of destabilisation.



Obr. 14 Graf naměřených hodnot puklinoměry na skalní stěně

Fig. 14 Graph of values measured by crackmeters on the rock wall

puklin. Trendy je možno vidět na obr. 14. Všechny grafy byly upraveny váženým průměrem pro vyhlazení hodnot.

Nejvýraznější sezonní výkyvy v rozsahu cca +1,0 až -0,4 mm byly pozorovány na puklinoměru č. 1 obr. 14, zelená křivka, umístěného na nejvíce oddělené skalní „věži“. Výběr umístění jednotlivých měřidel probíhal se snahou zvolit takové diskontinuity ve skalní stěně, které by byly při destabilizaci masivu pravděpodobně aktivovány již v počáteční fázi.

ZKUŠENOSTI Z PROVOZU AUTOMATICKÝCH ČIDEL A DATALOGERŮ

Na lokalitě jsou v současnosti v provozu tři datalogery, kdy dva jsou řídicí jednotkou pro měření pórových tlaků a jeden obsluhuje puklinoměry na skalní stěně.

Při instalaci datalogerů je třeba zohlednit konkrétní lokalitu a snažit se předejít jejich náhodnému, ale i úmyslnému poničení. V případě hřebečského tunelu bylo nutné vyřešit vertikální vedení kabelů od puklinoměrů po skalní stěně, vyhloubení výkopu pro chráničku kabelů měřidel pórových tlaků ve šterkové lavici, ale i mechanickou ochranu samotných datalogerů. Z vyhlídky nad stěnou by je mohly poškodit padající předměty, např. kameny či odpadky. Datalogery pro snímače pórových tlaků byly proto uloženy do ocelových chrániček (obr. 15), které vypadají identicky s osazenými inklinometry a nepřítahují tak nežádoucí pozornost.

Tato opatření byla provedena navzdory tomu, že ocelový obal tlumí mobilní signál nezbytný pro přenos dat. V případě, že signál není dostatečně silný, je možné prodloužit anténu až do trnu zhlaví, viz pravá část obr. 15. Datalogery jsou napájeny šesti speciálními lithiovými tužkovými bateriemi typu AA, které jsou méně náchylné k velkým teplotním výkyvům a jejich kapacita je tak stabilnější. Napájení je možné řešit i pomocí solárního panelu.

Nastavení datalogeru je uživatelsky snadné a intuitivní. Kapacita úložného prostoru 2 GB je zcela dostatečná – po 2 letech provozu a cca 5000 měření je zaplněnost asi 10 %. Do zařízení se vkládá klasická sim karta operátora s aktivovaným datovým přenosem. Vedle každodenního zasilání naměřených dat lze jednoduše nastavit posílání varovného emailu a sms i při nefunkčnosti čidla, překročení nastavené hodnoty posunu, teploty i tlaku. Tento systém včasného varování následovaný osobní kontrolou lokality umožňuje rychlou reakci k přijetí případných bezpečnostních opatření.

Přestože dataloger umí získaná data i vyhodnotit, jedná se o energeticky velmi náročnou činnost, a proto nelze tento způsob doporučit při výše uvedeném zdroji napájení. Samotný výpočet není komplikovaný, a tak prakticky jediným problémem může být zpracování enormního množství získaných dat. Zpra-

EXPERIENCE FROM OPERATION OF AUTOMATIC SENSORS AND DATA LOGGERS

There are currently three data loggers in operation in the locality; two of them are control units for measuring pore pressures and one serves the crackmeters in the rock wall.

When data loggers are being installed, it is necessary to take the particular locality into consideration and try to prevent their accidental, but also deliberate, damaging. In the case of the Hřebeč tunnel it was necessary to solve the vertical routes of cables leading from the crackmeters on the rock wall, digging of trenches in the loading berm for casing for cables of the pore pressure measuring gauges, but also the mechanical protection of the data loggers themselves. They could be damaged by objects, for example boulders or rubbish, falling down from the outlook platform on the top of the wall. The data loggers for pore pressure transducers were for that reason placed into steel casings (see Fig. 15), which look identically with the inclinometers installed and do not attract unwanted attention.

The above-mentioned measures were taken despite the fact that the steel casing attenuates the mobile signal necessary for transferring the data. In the case the signal strength is insufficient, it is possible to extend the antenna up to the extensometer head rod, see the right-hand part of Fig. 15. The data loggers are supplied with power by six special AA lithium batteries, which are less prone to great temperature fluctuations and the capacity of which is for that reason more stable. Power supply can be solved even by means of a solar panel.

Setting of a data logger is easy and intuitive for a user. The capacity of the storage space of 5GB is sufficient – after 2 years of operation and ca 5000 measurements about 10% of the capacity are full. A classical operator's SIM card with the data transfer activated is inserted into the logger. In addition to daily sending the measured data, it is simply possible to set sending of a warning e-mail and SMS even when the sensor does not function or when the set values of displacement, temperature or pressure are exceeded. This system of timely warning followed by personal inspection of the locality allows for quick response for adopting prospective safety measures.

Despite the fact that the data logger is even able to assess the obtained data, this activity is very power consuming and for that reason this method cannot be recommended in the case of the above-mentioned power source. The calculation itself is not complicated, so the virtually only problem may lie in processing an enormous amount of the data obtained. Data processing is the only time consuming aspect, which can be partially solved by proper import

of the data to be processed. Comprehensive processing comprises the development of, for example, universal macro for spreadsheet processor, which processes a significant part of routine operations automatically.

It is necessary for assessing the economy of operation of automatic data loggers that the planned duration of using them and the frequency of measurements are taken into consideration. With the exception of permanent monitoring of structures in difficult geological conditions, the automatic measuring system can be recommended even, for example, for the duration of the usually five-year construction warranty period. Higher initial investment is gradually



Obr. 15 Umístění datalogerů – skalní stěna a „falešný“ vrt
Fig. 15 Placement of data loggers – the rock wall and a “false” borehole



Obr. 16 Celkový pohled na východní portál tunelu Hřebeč (aktuální stav)
 Fig. 16 Overall view of eastern portal of the Hřebeč tunnel (current condition)

cování dat je jediným časově náročným aspektem, který lze částečně řešit vhodným importem dat pro zpracování. Komplexní řešení zahrnuje vytvoření např. univerzálního makra pro tabulkový procesor, který značnou část rutinních operací zpracuje automaticky.

Pro zhodnocení ekonomiky provozu automatických datalogerů je třeba zohlednit plánovanou dobu použití a četnost měření. Kromě trvalého monitoringu staveb v obtížných geologických podmínkách lze automatické měření doporučit i např. na období obvyklé pětileté záruční doby stavby. Vyšší vstupní investice je postupně kompenzována množstvím automaticky nashromážděných dat. Poté jsou náklady rovnoměrně rozprostřeny natolik, že se v souvislosti s požadavky na vyšší četnost měření dá považovat vstupní investice za bezpečně pokrytou.

Spolehlivost zařízení je z hlediska použití u obdobně náročných konstrukcí jedním z hlavních benefitů, což by mělo podpořit četnější rozšíření. Spolehlivost měření v průběhu sledovaného období na pilotní lokalitě činila 94,10 až 98,03 % (průměrně 96,3 %), kde za naprostou většinu výpadků mohlo nedostatečně tepelně stabilní napájení – baterie. Autoři věří, že na základě nabytých zkušeností lze udržet spolehlivost nad 98 %, což při ročním nepřetržitém provozu znamená výpadek přibližně 7 dní.

Celkový aktuální pohled na východní portál tunelu Hřebeč s vztuženou konstrukcí a opukovou stěnou ukazuje obr. 16.

ZÁVĚR

Díky informacím z celého systému monitoringu s následnými doporučeními a dodatečnými opatřeními v průběhu uplynulých 12 let byl například zpomalen plouživý pohyb přísypu před portálem tunelu. Samotné sanační těleso je podle výsledků měření ve stabilním stavu a na měřeních je patrný proces dlouhodobé konsolidace zemních konstrukcí. Měřeními geodetických bodů spolu s puklinoměry ve skalní stěně je možné získat lepší porozumění o pohybech jednotlivých opukových bloků a pilířů v exponované skalní stěně. Měřidla pórových tlaků následně umožňují sledovat vývoj hydrogeologických podmínek při bázi sanace sesuvu. Právě účinky podzemní vody byly jedním ze spouštěcích faktorů velkého sesuvu z roku 2006 a hrají klíčovou roli pro stabilitu lokality i v současném stavu.

Rovněž doplnění geotechnického monitoringu sanace sesuvu u východního portálu tunelu Hřebeč o automatická čidla splnilo očekávání. I s několika výpadky způsobenými nedostatečným na-

compensated for by the amount of automatically gathered data. The costs are subsequently evenly spread so much that, in connection with the requirements for higher frequency, the initial investment can be considered to be safely covered.

The reliability of the appliances is one of the benefits from the aspect of the use at similarly demanding structures. It should bolster the frequency of applications. The reliability of results during the course of the period being monitored in the pilot locality amounted to 94.10 to 98.03 percent (96.3% on average), with the vast majority of failures were caused by insufficiently stable power supply – batteries. We believe on the basis of gathered experience that the reliability over 98% can be maintained, which means stoppage for approximately 7 days in the case of annual continuous operation.

The overall current view of the eastern portal of the Hřebeč tunnel with the reinforced structure and the cretaceous marble wall is presented in Fig. 16.

CONCLUSION

For example, thanks to the information from the entire monitoring system with subsequent recommendations and additional measures taken over the past years the advance rate of the creep of the berm carried out in front of the portal was reduced. According to measurement results, the stabilisation body itself is in a stable condition and the process of the long-term consolidation of the ground structures is obvious from the measurements. Better understanding regarding the movements of individual cretaceous marl blocks and pillars in the exposed rock wall can be achieved by measuring on trigonometric survey points together with crackmeters. The gauges measuring pore pressures subsequently allow for monitoring of the development of hydrogeological conditions at the base of the landslide stabilisation body. The effects of groundwater were among the factors triggering the large landslide in 2006. They play a key role for the stability of the locality even in the current state.

The additional automatic sensors supplemented to the geotechnical monitoring of the landslide stabilisation at the eastern portal of the Hřebeč tunnel also met expectations. Even with several failures caused by insufficient power supply, nearly 2000 pore pressure values and over 5000 measurements on cracks were obtained over the two years of the pilot measurement. In this way, otherwise non-apparent processes and trends which would

pájením bylo získáno během dvou let pilotního měření téměř 2000 hodnot pórových tlaků a přes 5000 měření na puklinách. Jsou tak automaticky sledovány jinak nepatrné procesy a trendy, které by při konvenčním kontrolním měření dvakrát ročně šlo jen obtížně odhalit. Lze tak včas reagovat na případné změny a předejít často velmi finančně náročnému a komplikovanému odstraňování následků.

V současnosti jsou výsledky monitoringu pravidelně elektronicky odevzdávány objednateli společně s příslušnými komentáři a doporučeními pro další období. Výsledky měření automatickými čidly jsou prezentovány v podobě grafů (obr. 11, 14). Tento způsob je využit pro nepřehlednost jednotlivých denních měření a rovněž proto, že jde zejména o sledování dlouhodobých trendů či výskytů odlehklých hodnot od sledovaného trendu. V budoucnosti je uvažováno využití potenciálu automatických čidel a datalogerů ve větší míře, a to zejména za účelem možnosti rychlé prezentace měřených dat pomocí online aplikace na internetu. Tímto krokem dojde ke zjednodušení předávání výsledků dílčích měření objednateli či příslušným oprávněným uživatelům, např. projektantům, státní správě apod. Geotechnický monitoring definuje hodnoty varovných stavů, při jejichž dosažení následují příslušná opatření. V této lokalitě jsou nastavena jednotlivá dílčí kritéria pro příslušná měření i jednotlivá čidla, která jsou nastavena zejména na základě dlouhodobého sledování lokality a příslušných norem. Při jejich dosažení dochází k následným opatřením (zřízení odvodnění, kontrola ochranných sítí na skalní stěně, doplnění monitorovacích prvků o další apod.).

Získané zkušenosti z této lokality dále umožňují nasazení specializovaných sestav datalogerů na dalších lokalitách, kde je dlouhodobě nebo i jen krátkodobě potřeba znát kontinuální průběh různých sledovaných veličin (posuny, napětí, teplota) v kombinaci s potřebou rychlé analýzy měřených dat. Na použité datalogery je možné zapojit pestré spektrum různých druhů čidel od tlakových podušek, čidel tahových sil u kotev, extenzometrů, tahových čidel u výztuže či piezometrů. Pro použití u tunelových staveb představují automatizované datalogery velký posun v měření, a to zejména díky možnosti osazení kompletní škály instrumentů používaných při realizaci podzemních konstrukcí při monitoringu horninového masivu, jeho ostění a dále i vnitřního prostředí v tunelech. Komplexní prezentace dat pak může probíhat na centrální úrovni pro široké množství oprávněných uživatelů, kdy tímto odpadá mnohdy komplikované předávání aktuálních informací například na stavbě.

*Mgr. PETR KARLÍN, petr.karlin@geotec-gs.cz,
GeoTec-GS a.s., pracoviště České Budějovice*

Recenzoval Reviewed: Ing. Tomáš Ebermann, Ph.D.

be difficult to detect by conventional measurements carried out twice a year are automatically monitored. It is therefore possible to respond to possible changes and prevent often the financially very demanding and complicated elimination of consequences.

Monitoring results are currently regularly electronically delivered to the client, together with relevant comments and recommendations for the subsequent period. Results of measurements with automatic sensors are presented in the form of graphs (see Figures 11 and 14). This system is used because of the difficult transparency of individual daily measurements and also because of the fact that the main purpose is to monitor long-term trends or occurrence of values remote from the monitored trend. The use of the potential of automatic sensors and data loggers to a greater extent in the future is under consideration, first of all for the purpose of the possibility of quick presentation of the data measured using online application on the Internet. This step will simplify the process of delivering results of partial measurements to the client or to competent justified users, for example, designers, state administration etc. Geotechnical monitoring defines the trigger values which, if reached, are followed by relevant measures. In this particular locality, individual partial criteria are set for respective measurements and individual sensors, which are set mainly on the basis of long-term monitoring of the locality and relevant standards. Subsequent measures (building the drainage, inspection of protecting nets on the rock wall, adding monitoring elements etc.) are applied when the trigger values are reached.

The experience gathered from this locality further allows for application of specialised sets of data loggers to other localities, where the knowledge of the continual development of various quantities being monitored (displacements, stress, temperature) in combination with the need for quick analysis of the measured data is necessary in the long-term or even short-term. A varied range of sensors, starting from pressure cells to sensors of tensile forces on anchors, extensometers, tensile force sensors on reinforcement or piezometers, can be connected to the data loggers used. Automated data loggers represent great shifting in measurement systems applied to tunnel structures, first of all thanks to the possibility of the installation of a comprehensive range of instruments used in the process of realisation of underground structures for the monitoring of ground massif, its lining and further even in the internal environment in tunnels. The comprehensive interpretation of the data can follow at the central level for a wide range of authorised users, thus the necessity for frequently complicated handing of current information over, for example on the construction site, is eliminated.

*Mgr. PETR KARLÍN, petr.karlin@geotec-gs.cz,
GeoTec-GS a.s., workplace České Budějovice*

LITERATURA / REFERENCES

- [1] Celostátní sčítání dopravy 2016, ŘSD 2017 dostupné online na <http://scitani2016.rsd.cz> (16. 9. 2018)
- [2] ADAMOVIČ, J., ALTMANN, J. Geologické poznatky ze stavby silničního tunelu Hřebeč. Zprávy o geologických výzkumech v roce 1996. Praha, Česká geologická služba, 1997
- [3] BOHÁTKOVÁ, L., MITRENGA, P., POSPÍŠIL, J., LOSSMANN, J. Sesuv u tunelu Hřebeč, technické řešení – průvodní zpráva. Praha, Arcadis Geotechnika a. s., 2006
- [4] TP 97 – Geosyntetika v zemním tělese pozemních komunikací, technické podmínky. Praha, Ministerstvo dopravy – odbor infrastruktury, 2008
- [5] KRÁSNÝ, O. Sanace sesuvu u východního portálu tunelu Hřebeč – výsledky dlouhodobého monitoringu. Bratislava, Geotechnické problémy líniových stavieb, 2011
- [6] KRÁSNÝ, O. I/35 monitoring sanace sesuvu, dílčí zpráva geotechnického monitoringu – měření z roku 2017. Pardubice, GeoTec-GS a. s., 2017