

VÝVOJ OPTOVĚKOVÝCH SNÍMAČŮ DEFORMACE PRO GEOTECHNICKÝ MONITORING A PŘÍKLADY APLIKACÍ DEVELOPMENT OF OPTICAL FIBRE STRAIN SENSORS FOR GEOTECHNICAL MONITORING AND EXAMPLES OF APPLICATIONS

MAREK ZÁLESKÝ, JAN ZÁLESKÝ, LADISLAV ŠAŠEK

ABSTRAKT

Pracovní skupina SG Geotechnika a.s., Stavební fakulta ČVUT v Praze a SAFIBRA, s.r.o., zkoumá a vyvíjí možnosti užití optovláknových snímačů pro sledování deformací v geotechnice od roku 2010. Společný výzkum je založen na využití metod Brillouin Time Domain Analysis (BOTDA) a Fiber Bragg Gratings (FBG). V prvním případě se jedná o distribuované snímání deformace a teploty, ve druhém o vývoj jednotlivých snímačů a jejich propojování k popisu vývoje deformací v prostředí staveb a v souvisejících geotechnických konstrukcích. V článku jsou představeny pilotní instrumentace a vybrané výsledky optovláknových měření: sledování deformací primárního ostění při výstavbě pražského metra a užití snímačů FBG ke sledování svislých deformací podloží historických staveb – tento systém měření může být užíván i pro sledování vývoje poklesové kotliny při ražbě například městských tunelů. Dále je popsána laboratorní část vývoje FBG měřidla deformací primárního ostění podzemních staveb.

ABSTRACT

The working group of SG Geotechnika a.s., the Faculty of Civil Engineering of the Czech Technical University in Prague and SAFIBRA, s.r.o. researches and develops applications of fibre optic sensors for strain monitoring in geotechnical engineering since 2010. The joint research is based on the use of the Brillouin Time Domain Analysis (BOTDA) and the Fibre Bragg Gratings (FBG) methods. In the first case, the subject of the research is the distributed sensing of strain and temperature, in the second case, it is the development of discrete sensors and chains of sensors in order to describe development of strains in the environment of constructions and in related geotechnical structures. The paper presents pilot instrumentations and selected results of fibre optic measurements: monitoring of deformations of primary lining during the construction of Prague Metro V.A and the use of FBG sensors for monitoring of vertical strains in the subsoil of historic buildings – this measurement system can be used for monitoring of the development of settlement troughs, for example during the advance of urban tunnels. Further, a laboratory phase of development of FBG sensor for monitoring of primary lining deformation in underground structures is described.

ÚVOD

Optovláknové snímače používané ve výzkumu jsou velmi citlivé na podélné deformace v ose optického vlákna, ale i na teplotu. Optická vlákna pro měření deformací od různých výrobců musejí být většinou opatřena dodatečnou ochranou, aby byla dostatečně odolná jako měřicí prvky v horninovém masivu nebo v geotechnické konstrukci, kde je součástí instrumentace například monitorovacího vrtu nízkotlaká injektáž. Snímače osazované v podzemních stěnách a v pilotách jsou vystaveny vlivům betonáže. Snímače v masivu a na zemních nebo horninových kotvách jsou osazovány do prostředí s cementovou injektáží (kompenzační injektáž a injektáž kotev). V tělesech násypů nebo při sledování vyztužených zemin jsou optická vlákna vystavena vlivům hutnění a mechanickým vlivům ve styku s jejich blízkým okolím. Vlákna s FBG mřížkami jsou od výrobce většinou chráněna pouze sekundární ochranou optického vlákna, měřicí kabely pro metodu BOTDA jsou opatřeny např. plastovou ochranou, která není většinou dostatečná pro přímé užití v prostředí výstavby geotechnických konstrukcí. Proto je výzkum a vývoj zaměřen i na způsoby ochrany optických vláken, a to především proti mechanickému poškození a vlhkosti. Ochrana měřicího optického vlákna musí zároveň umožnit přenos deformací ze sledovaného prostředí do jádra optického vlákna beze ztrát.

Současně probíhá výzkum postupů upínání při instrumentacích, protože se u měřicího vlákna musí v režimu měření udržet alespoň minimální předpětí k zachování jeho mechanické stability. Další nutnou součástí optovláknových instrumentací jsou postupy

INTRODUCTION

Fibre optic sensors used in the research are very sensitive to longitudinal deformations along the optical fibre axis, but also to temperature. Optical fibres for deformation measurement from various manufacturers usually have to be provided with additional protection to be sufficiently resistant as measurement elements in rock massif or in a geotechnical construction. For example, instrumentation of a monitoring borehole consists of low-pressure grouting. Sensors installed in diaphragm walls and piles are exposed to the influence of concreting. Sensors in massif and at earth anchors or rock anchors are installed into an environment containing cement grout (compensation grouting and anchor bolt grouting). In the bodies of embankments or in the cases of monitoring reinforced soil structures, optical fibres are exposed to compaction and mechanical effects at contact with their surroundings. The fibres with FBG gratings are protected by the manufacturer only by secondary protection of the optical fibre, whilst the measurement cables for the BOTDA method are manufactured, for example, with plastics protection, which is mostly insufficient for direct use in the environment of construction of geotechnical structures. That is why research and development is focused also on methods of optical fibre protection, especially against mechanical damage and moisture. However, the protection of measuring optical fibres must allow the transmission of strains from the monitored environment to the optical fibre core without losses.

Research of optical fibre fixing during instrumentation is carried out, because at least a minimum pre-stress must be maintained

zajištění polohopisu osazených vláken pro interpretaci naměřených dat a vyjádření deformací sledovaného masivu, konstrukčních prvků i geotechnické konstrukce jako celku.

Postupy zpracování dat a vyhodnocení deformací vyžadují zvláštní pozornost vzhledem k možným parazitním vlivům na senzorské kabely vyvolané upínáním kabelů do sledovaného prostředí i přímými vlivy prostředí, které je třeba omezit. Pro pilotní návrhy instrumentací jsou snímače testovány nejdříve v laboratoři.

UŽITÉ METODY MĚŘENÍ DEFORMACÍ OPTICKÝMI VLÁKNY

Brillouin Optical Time Domain Analysis

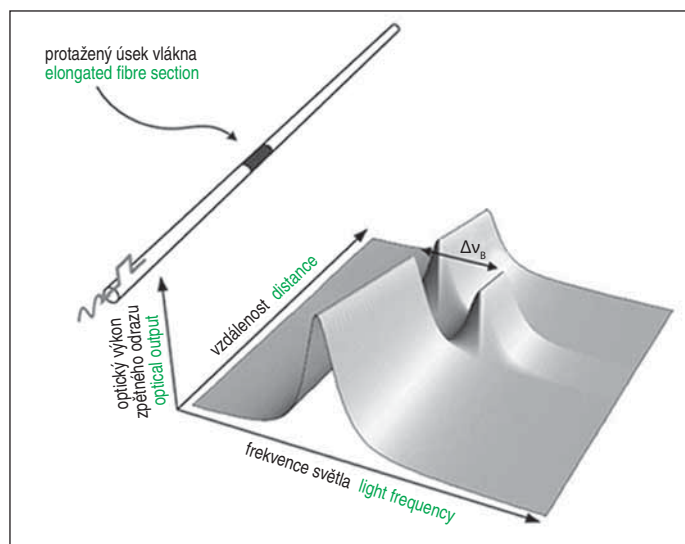
Metoda BOTDA je založena na Brillouinově zpětném rozptylu, který umožňuje tzv. distribuované snímání přetvoření nebo teploty v optickém vlákne. Samotná optická vlákna jsou snímačem. Laserový signál prochází optickým vláknem od zdroje v analyzátoru. K analyzátoru se vrací zpětný rozptyl, který je způsoben velmi malými nehomogenitami v chemickém složení optického vlákna a je řádově slabší než optický signál procházející vláknem ve směru od zdroje. Brillouinův rozptyl je charakterizován Brillouinovou frekvencí η_B . Její změna (posun) je přímo úměrná/y změně přetvoření nebo teploty měřicího optického vlákna. Umístění změny deformace nebo teploty na měřicím vlákně je analyzátozem určeno z časového posunu vstupu signálu do vlákna a návratu jeho odrazu. Princip měření je znázorněn na schématu v obr. 1.

Tato metoda umožňuje detekovat změny přetvoření nebo teploty a zároveň určit místo, kde k příslušné změně došlo. Je to nejvýznamnější výhoda oproti „klasickým“ postupům geotechnického kontrolního sledování, kdy je ve většině případů nutné před instrumentací poměrně přesně předpovědět, kde bude docházet k deformacím, a právě tato místa vystrojit vhodnými měřidly pro geotechnický monitoring.

Měřicí linie může dosahovat až kilometrových délek. V závislosti na délce linie se mění parametry měření: prostorové rozlišení, tedy vzdálenost mezi jednotlivými proměřovanými body, a rozlišení změny přetvoření nebo teploty.

Fiber Bragg Gratings

Bragg grating, „braggovská mřížka“, je periodická změna indexu lomu jádra optického vlákna. Mřížka daných vlastností se v optickém vlákně vytvoří při výrobě. Při průchodu širokopásmového záření (světla) optickým vláknem dochází na braggovské mřížce



Obr. 1 Schéma principu měření metodou BOTDA, podle [1]
Fig. 1 Diagram of the BOTDA method measurement principle, according to [1]

in the sensing fibre to keep its mechanical stability. Methods for determination of the position of the installed fibres for the interpretation of measured data and evaluation of deformations of the monitored massif, structural elements and geotechnical structures as a whole are another part of optical fibre instrumentations.

Data processing and strain determining procedures require special attention with respect to possible spurious effects on sensing cables induced by fixing the cables into the monitored environment and direct influences of the environment, which need to be reduced. The sensors are first tested for the purpose of pilot designs for instrumentations in a laboratory.

METHODS USED FOR STRAIN MEASUREMENT WITH OPTICAL FIBRES

Brillouin Optical Time Domain Analysis

The BOTDA method is based on the Brillouin backscattering applied for the so-called distributed sensing of strain or temperature in the optical fibre. The optical fibres themselves form the sensors. The laser signal passes through the optical fibre from the source in the analyser. The backscatter, which is caused by very small inhomogeneities in the chemical composition of the optical fibre, is weaker in an order of magnitude than the optical signal passing through the fibre in the direction from the source. The Brillouin scattering is characterised by Brillouin frequency η_B . Its change (frequency shift) is directly proportioned to the change of strain or temperature of the measuring optical fibre. The position of the change of the strain or the temperature on the measuring fibre is determined by the analyser from the time delay between the entry of the light pulse into the fibre and the return of its reflection. The measurement principle is demonstrated in the diagram in Fig. 1.

This method allows detections of changes of strain or temperature and, at the same time, determination of the location where the particular change took place. This is the most significant advantage over “classic” geotechnical monitoring procedures, where it is in most cases necessary to predict relatively exactly where deformations will take place before instrumentation and to equip these locations with gauges suitable for geotechnical monitoring.

The measurement line may reach even the lengths of kilometres. Measurement parameters vary depending on the length of the line: spatial resolution, i.e. the distance between individual measured points and determination of the change of the strain or the temperature.

Fibre Bragg Gratings

Bragg grating is a periodic change of the refraction index of the optical fibre core. The grating with the particular properties is created during the fibre production. As broadband radiation (light) passes through the optical fibre, a narrow portion of the spectrum is reflected at the Bragg grating back to the source. The reflected radiation is defined by Bragg wave length λ_B (see Fig. 2). The λ_B change is proportional to axial deformation of the optical fibre or its temperature change.

Every FBG sensor is defined by λ_B wave length as the fibre was manufactured. Sensors with various wave lengths can be “connected” in series (in a chain), because the passing signal, therefore also reflections from individual sensors, can be further used. Parallel connection of sensors and use of optical switch in the FBG analyser is also possible. Combination of serial and parallel connection is available as well.

The FBG method offers higher deformation resolution than the distributed sensing method, BOTDA. Regarding the geotechnical

k odrazu úzké části spektra zpět ke zdroji. Odražené záření je charakterizováno braggovskou vlnovou délkou λ_B (obr. 2). Změna λ_B je přímo úměrná osové deformaci optického vlákna nebo změně jeho teploty.

Každý snímač FBG je definován vlnovou délkou λ_B z výroby. Snímače s různými vlnovými délkami mohou být zapojeny v sérii za sebou (v řetězci), protože procházející signál, a tedy i odrazy z jednotlivých snímačů, lze dále využít. Možné je i paralelní zapojení snímačů přes optický přepínač v analyzátoru FBG a kombinace obou způsobů.

Metoda FBG má oproti distribuovanému snímání BOTDA vyšší rozlišení měřené deformace. Z hlediska provádění geotechnických instrumentací je délka řetězců snímačů omezena na cca 15 až 20 m kvůli manipulaci s optickými vlákny bez dodatečné ochrany při výrobě měřidel (např. řetězec snímačů deformací pro vystrojení monitorovacího vrtu).

Nejdůležitějšími výhodami metod BOTDA i FBG jsou:

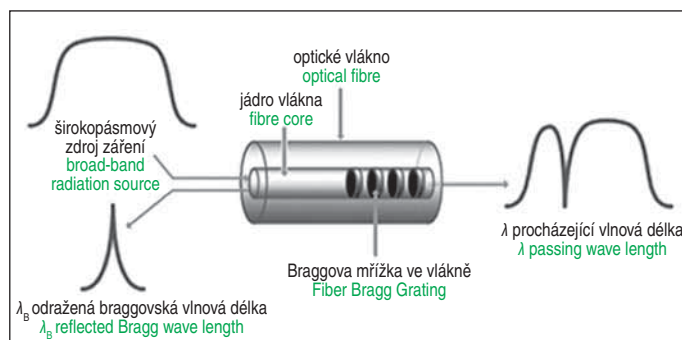
- imunita měřících linií vůči elektromagnetickým polím a částečně i proti radiaci;
- měřicí linie jsou vhodné i do prostředí s nebezpečím výbuchu;
- pro přenos měřicího signálu z místa měření k elektronickému analyzátoru se využívá běžných optických telekomunikačních kabelů;
- analyzátor může být až v kilometrové vzdálenosti od sledované lokality;
- při provádění měření není třeba přístup měřiče k sledované oblasti;
- přechod od „manuálního“ (etapového) měření ke kontinuálnímu monitoringu nevyžaduje změny instrumentace.

Nevýhody:

- doposud vysoká pořizovací cena analyzátorů;
- choulostivost optických vláken bez dodatečné ochrany;
- značná citlivost na změny teploty;
- elastická deformace (protažení) optického vlákna v řádu prvních jednotek procent.

DISTRIBUOVANÉ MĚŘENÍ DEFORMACÍ PRIMÁRNÍHO OSTĚNÍ TUNELU NA PRODLOUŽENÍ LINKY A PRAŽSKÉHO METRA

V roce 2011 byla provedena pilotní instrumentace a měření pomocí optických kabelů pro detekci deformací metodou BOTDA ve středním tunelu na stavbě prodloužení linky A metra. Primární ostění středního tunelu před stanicí Petřiny bylo dokončeno a v těsné blízkosti opěří měly postupně procházet dva tunelovací stroje s tlakovou ochranou čelby – zeminové štíty (Earth Pressure Ballance) při ražbě dvojice traťových tunelů vedoucích do stanice Petřiny. Nejmenší vzdálenost hranic teoretických výrubů středního a sousedních traťových tunelů byla 0,68 m. Střední tunel zároveň sloužil jako jediná přístupová cesta pro techniku, odvoz rubaniny i pro transport stavebního materiálu do stanice Petřiny při výstavbě. Instrumentace vláknové optiky probíhala s výjimkou jedné noční směny za provozu. Cílem bylo umožnit detekci deformací primárního ostění středního tunelu, které mohly vzniknout vlivem těsného průchodu zeminových štítů. Na hotové primární ostění byly osazeny dvě podélné měřicí linie na levém opěří. První linie byla upevněna bodově pomocí kovových úchytek a druhá byla rychlovažnou cementovou směsí zafixována v předem vyfrézované mělké drážce ve stříkaném betonu. Výsledky měření v obou typech uchycení optického kabelu byly velmi dobře srovnatelné. Z hlediska časové náročnosti a pracnosti instalace je výhodnější bodové uchycení měřicího kabelu. Třetí část měřicí linie byla umístěna v příčném profilu středního tunelu



Obr. 2 Schéma principu měření Fiber Bragg Grating [2]

Fig. 2 Diagram of the Fibre Bragg Grating measurement principle [2]

instrumentations, the length of FBG sensor chains is limited to about 15 to 20m because of handling of optical fibres without additional protection during the fabrication sensors (sensor chains for instrumentation of a monitoring borehole).

The most important advantages of the BOTDA and FBG methods are:

- immunity of measurement lines to electromagnetic fields and partly to radiation;
- the measurement lines are suitable for explosive environments;
- common optical telecommunication cables are used for transmission of measurement signal from the monitored structure to the analyser;
- the analyser can be located at kilometre distances from the monitored structure;
- the access of personnel to the monitored structure is not required during the measurement;
- change from “manual” (episode) measurements to continual monitoring does not require changes in the instrumentation.

Disadvantages:

- still high price of analysers;
- optical fibres are fragile without additional protection;
- significant sensitivity to temperature changes;
- elastic deformation (elongation) of the optical fibre within the order of first units of percent.

DISTRIBUTED DEFORMATION MEASUREMENT OF PRIMARY LINING AT THE EXTENSION OF PRAGUE METRO LINE A

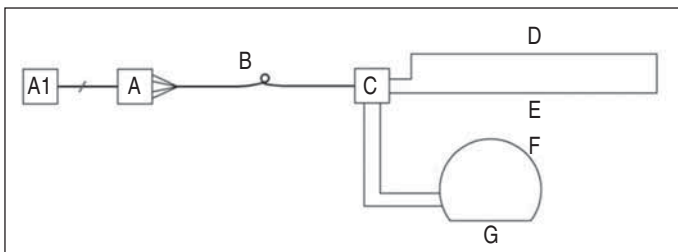
In 2011, pilot instrumentation and measurement with optical cables using the BOTDA method was performed at the central tunnel during construction of the Prague metro Line A extension in order to detect deformations of the primary lining. The primary lining of the central tunnel at front of Petřiny Station was finished and two tunnel boring machines, Earth Pressure Balance Shields (EPBS), were passing after each other in close vicinity of the top heading during the advance of excavation of the pair of track tunnels leading to Petřiny Station. The smallest distance between the limits of the theoretical excavation of the central tunnel and the neighbouring track tunnels was 0.68m. The central tunnel was used during the construction as the only way for construction equipment, mucking out and transport of building materials to Petřiny station. Except one night shift, the instrumentation of the fibre optics was carried out without interruption of the construction operations. The aim was detection of the deformations of the primary lining of the central tunnel which could be induced due to the close passage of the EPBS. Two longitudinal measurement lines were installed on the completed primary lining at the left-hand bench. The first

před rozfáráním stanice Petřiny. V počvě byl optický kabel rovněž zacementován rychlovažnou směsí do vyfrézované drážky. Podmínky pro instalaci byly ztíženy, při cementaci musela být voda z drážky vypuzována stlačeným vzduchem. Ihned po dokončení byla zacementovaná měřicí linie pojížděna stavební technikou. V opěří a v kalotě byl příčný měřicí profil upevněn opět pomocí bodových úchytek. V příčném profilu bylo, obdobně jako u podélných linií, cílem detekovat případné deformace vyvolané ražbou sousedních traťových tunelů.



Obr. 3 Instalace měřicího kabelu BOTDA na primární ostění středního tunelu před stanicí Petřiny; červená šipka značí měřicí linii v příčném profilu, zelená vedení kabelu k optickému rozvaděči

Fig. 3 Installation of a BOTDA measurement cable on primary lining of the central tunnel before Petřiny Station; red arrow marks the measurement line in the cross-section, green arrow marks the cable line leading to the optical switchboard



Obr. 4 Schéma optické trasy ve středním tunelu: A – analyzátor BOTDA, A1 – síťové připojení k analyzátoru pomocí vzdálené plochy, B – pasivní optický kabel, C – optický rozvaděč na ostění tunelu, D a E – podélné měřicí linie, D – uchycená bodově k ostění v sériovém propojení s linií spojitě upevněnou pod povrchem ostění – E, F – bodově upnutá část příčného profilu nad opěřím a v kalotě tunelu v sérii se spojitě upnutou linií pod povrchem pojížděné počvy – G [3]

Fig. 4 Diagram of the optical line in the central tunnel: A – BOTDA analyser, A1 – network connection of the analyser by means of a remote desktop, B – passive optical cable, C – optical switchboard on tunnel lining, D and E – longitudinal measurement lines, D – fixed point-wise to the lining, connected in series with the line fixed continuously under the lining surface – E, F – part of the cross-section above the bench fixed point-wise and in the tunnel top heading in series with the continuously fixed line under the ridden-on bottom – G [3]

line was fixed point-wise using metal clamps and the other was fixed in a pre-cut shallow groove in the shotcrete with fast-setting mortar. The results of measurements of both types of fixing of the optical cable were very well comparable. Regarding the need of time and manpower for instrumentation, the point-wise fixation of measurement cable is more favourable. The third part of the measurement line was installed in the the central tunnel cross-section at front of the widening of the tunnel profile for the Petřiny Station. The optical cable in the tunnel invert was also fixed by the fast-setting cement mixture in a pre-cut groove. The installation conditions were more difficult because water had to be blown from the groove with compressed air. The construction machines drove over the measurement line immediately after its completion. In the bench and top heading, the measurement cross-section was fixed point-wise with clamps. Similarly to the longitudinal lines, the objective in the cross-section was to detect possible deformations induced by the excavation of the neighbouring track tunnels.

It was not the case of measuring convergences since, with the chosen additional installation on the finished lining, only circumferential length changes on the external surface of the lining were measured by the optical cable. The BOTDA analyser was placed on the surface, in the construction site facility (see Figures 3 and 4). It was connected to the measuring line by a common telecommunications cable leading in parallel with other networks in the benches of the tunnel and the access gallery. During the course of the measurements, during approx. 9 months, the connection optical cable was interrupted twice and longitudinal measurement lines were broken twice due to the construction activities. All damages were successfully repaired. “Extraction” of the part of the measurement cable, which was cemented in the groove, without causing more damages, was the most difficult operation. The interrupted cable was then successfully bridged over. During repairs of the interrupted optical lines, individual optical fibres were spliced (welded) in the environment of the tunnel used as transport and access gallery during the construction of Petřiny Station.

The results of the BOTDA measurements were compared with output of common geodetic deformation monitoring of primary lining (mainly the longitudinal component of convergence monitoring with the use of spatial polar method). During the advance of the of the EPBS in the left track tunnel, the maximum deformation change detected in longitudinal measurement lines reached up to $400\mu\epsilon$ (microstrain), example of evaluation is presented in Fig. 5. This corresponds with the value of $400\mu\text{m/m}$ in the case of the point-wise fixed optical cable. The geodetic monitoring showed deformations smaller than the method accuracy of 2 mm. The detected deformations of the primary lining were most probably developed at the transverse day joints between individual sections of spraying of primary lining concrete. The deformation changes measured at the cross-section measurement profile during the advance of the right-hand track tunnel face reached up to $\pm 100\mu\text{m/m}$. The values of deformations in longitudinal measurement lines (in the left-hand bench) were within the interval of $\pm 50\mu\text{m/m}$. Experimental standard deviation of the optical fibre measurements under the given conditions reached $30\mu\epsilon$. More detailed information about the BOTDA measurements in the central tunnel is presented in [3].

DEVELOPMENT OF FBG PRIMARY LINING DEFORMATION SENSOR

The possibility of automation of underground structure’s primary lining convergence measurements and the use of fibre

Nejednalo se o měření konvergence, protože při zvolené dodatečné instalaci na hotové ostění byly optickým kabelem měřeny obvodové délkové změny pouze na vnějším líci ostění. Analyzátor BOTDA byl umístěn na povrchu v zařízení staveniště (obr. 3, 4). S měřicími linií byl propojen běžným telekomunikačním kabelem vedeným souběžně s dalšími sítěmi na opěři tunelu a přístupové štolý. V průběhu měření došlo během cca 9 měsíců k dvojnásobnému přerušení přírodního optického kabelu a k dvěma porušením podélných měřících linií vlivem provozu nebo stavební činnosti. Všechna poškození se podařilo opravit. Nejsložitější bylo „vyjmutí“ části měřícího kabelu ze zacementované drážky tak, aby mohla být přemostěna jeho poškozená část a nedošlo k dalším poškozením. Při opravách optických tras byla jednotlivá optická vlákna svářena v prostředí provozovaného tunelu během stavby.

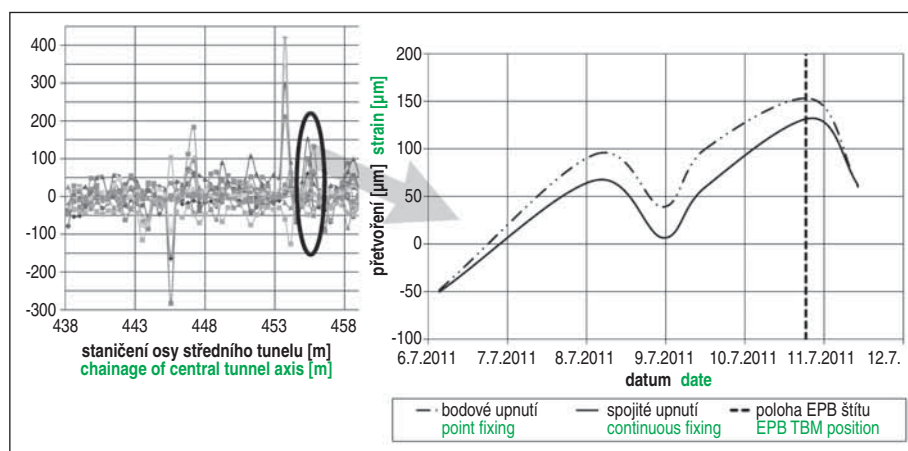
Výsledky měření metodou BOTDA byly porovnávány s výstupy obvyklých geodetických měření deformací výrubu (zejména podélná složka posunu z konvergenčních měření prostorovou polární metodou). Během ražby levého traťového tunelu zeminovým štítem dosáhla maximální změna přetvoření detekovaná v podélných měřících liniích až 400 μe (microstrain), což v případě bodové upínané linie odpovídá velikosti deformace 400 $\mu\text{m/m}$, příklad vyhodnocení části měření je uveden v obr. 5. Výsledky srovnávacích geodetických měření vykazovaly deformace menší, než je přesnost metody 2 mm. Detekované deformace vznikaly s největší pravděpodobností na příčných pracovních spárách jednotlivých záběrů stříkaného betonu primárního ostění. Během ražby pravého traťového tunelu dosahovaly změny přetvoření změřené v příčném profilu hodnot do $\pm 100 \mu\text{m/m}$. Hodnoty přetvoření v podélných měřících liniích (na levém opěři) se pohybovaly v intervalu $\pm 50 \mu\text{m/m}$. Výběrová směrodatná odchylka optovláknových měření v daných podmínkách byla 30 μe . Podrobnější informace o měření BOTDA ve středním tunelu jsou uvedeny v [3].

VÝVOJ FBG MĚŘIDLA DEFORMACÍ PRIMÁRNÍHO OSTĚNÍ

Častou otázkou je možnost automatizace konvergenčních měření primárního ostění podzemních staveb a využití vláknové optiky. Většina měření deformací optickými vlákny (metodami BOTDA, FBG i dalšími) spočívá v měření odezvy na protažení vlákna podél jeho osy. Pokud je v příčném profilu výrubu osazeno jen jedno měřící optické vlákno (obr. 4), měří se délkové změny po obvodu daného profilu. Bez dalších znalostí, nebo zjednodušujících předpokladů,

optics is a subject of frequent questions. Most strain measurements with optical fibres (the BOTDA, FBG and other methods) are based on axial strain measurement at the fibre axis. If only a single measurement optical fibre is installed in the cross-section of excavation (see Fig. 4), changes in length are measured along the perimeter of the particular profile. Without further input information or simplifying assumptions, this measurement does not provide information about radial strain. When a pair of optical fibres is installed in the cross-section, it is possible to calculate the “flexure line” of the primary lining.

When the monitoring of underground structures is designed, the deployment of convergence monitoring profiles is mostly determined in advance with the use of information gained also within the geotechnical investigation. High resolution of fibre optic measurements in order of $\mu\text{m/m}$ is required for convergence monitoring. Changes in the shape of primary lining center line can be computed from pairs of strain changes at the outer and inner surface of the primary lining. Vertical and horizontal deformations of the center line can be subsequently computed at chosen points. These requirements are very well met by measurements with the use of the Bragg gratings. One of the objectives of the R&D project FW01010384 project “Development of fibre optic measurement instruments for underground constructions and retaining structures” is to develop chain of FBG strain and temperature sensors, which will be installed to primary lining reinforcement frames (e.g. “Bretex”) in advance, prior to the assembly of the whole reinforcement frame at the tunnel face. The newly developed monitoring of primary lining deformations with the use of FBG sensors can begin immediately after the reinforcement frame (excavation support) is assembled and fixed in place by the first shotcrete layer. The sensors will be designed so that it will be possible to shape them during assembly according to the curvature of primary lining reinforcement frames. The development of the FBG primary lining deformation sensor has started in 2020. In the presented applications, the optical fibres (or cables) were installed to perform measurement in a series of straight sections, for example between clamps. At the beginning of the research, it was necessary to determine the influence of friction of the curved optical fibre in the micro-tube (a component of its additional protection) on the measured values of the axial strain. For this purpose, a “cradling” was developed. A chain of FBG sensors is led as follows: clamp – arc – horizontal section – arc – clamp. The cradling is fixed to a test bench equipped with high precision potentiometric displacement sensors including independent temperature measurement. The optical fibre is strained under controlled conditions. A 3D model was created and the components of cradling as well as other smaller tools for the installation of optical fibres were manufactured by 3D printing (see Fig. 6). The size of the cradling components was limited by the maximum dimensions of 3D print with the use of printer available in inventory of the Department of Geotechnics of the Faculty of Civil Engineering of the Czech Technical University in Prague. Nevertheless, the arc radius of about 1m was achieved. The radii of a commonly monitored primary lining will be greater.



Obr. 5 Vývoj přetvoření v podélné měřící linii v levém opěři: vlevo vybrané výstupy z analyzátoru BOTDA, vpravo časový průběh deformace ve vyznačeném staničení osy středního tunelu; čárkovaná svislá čára značí, kdy dosáhla řezná hlava štítu S609 sledovaného staničení [3]

Fig. 5 Development of deformation on the longitudinal measurement line in the left-hand bench: selected outputs from the BOTDA analyser on the left side, development of deformation with time in the set-off chainage of the central tunnel axis; the dashed vertical line marks where the cutterhead of the S609 reached the monitored chainage [3]

The results of model measurements in the laboratory show that, with appropriate selection of additional protection of the

The results of model measurements in the laboratory show that, with appropriate selection of additional protection of the



Obr. 6 Ramenáť pro laboratorní testování zakřivených snímačů deformace
Fig. 6 A cradling for laboratory testing of curved sensors of deformations

neposkytuje takové měření informace o příčných deformacích. Je-li v příčném profilu osazena dvojice optických vláken, lze vypočítat „ohybovou čáru“ vystrojeného profilu.

Při návrhu monitoringu podzemních staveb jsou na základě geotechnického průzkumu v návrhu podzemního díla většinou předem určena místa sledování konvergence. Při použití vláknové optiky je nutné měření s vysokým rozlišením v řádu $\mu\text{m}/\text{m}$. Z dílčích délkových změn na obvodě vnitřního a vnějšího líce ostění je třeba vypočítat změny tvaru jeho střednice a pro zvolené body svislé a vodorovné deformace v příčném směru. Těmto požadavkům velmi dobře vyhovuje měření pomocí braggovských mřížek. Jedním z cílů projektu FW01010384 „Vývoj optovláknových měřidel pro podzemní a opěrné konstrukce“ je vývoj řetězce měřidel přetvoření a teploty FBG, který bude předem, mimo výrub, osazen na montážní díly ocelových příhradových rámu (např. „bretex“). Nově navrhované kontrolní sledování s využitím FBG snímačů tak bude možné zahájit ihned po osazení výztuže a jejího upnutí nástřikem první vrstvy stříkaného betonu. Snímače budou konstruovány tak, aby je bylo možné při montáži tvarovat podle zakřivení montážních dílů výztužného rámu. Vývoj tvarovatelného snímače byl zahájen v roce 2020. V prezentovaných aplikacích byla optická vlákna (nebo kabely) osazena tak, že měřila v sérii přímých úseků, například mezi úchytkami. V úvodu výzkumu bylo nutné zjistit vliv tření zakřiveného optického vlákna v mikrotrubičce (součást jeho dodatečné ochrany) na měřené hodnoty délkového přetvoření. Za tím účelem byl vyvinut „ramenáť“, ve kterém je řetězec FBG snímačů veden následovně: úchytka – oblouk – vodorovný úsek – oblouk – úchytka. Ramenáť je upevněn na měřicí stoličce vybavené velmi přesnými potenciometrickými snímači posunu včetně nezávislého měření teploty. Optické vlákno je řízeně protahováno. Z ideových návrhů ramenáťu byl sestaven 3D model. Jednotlivé díly i další drobné pomůcky pro instalaci byly vyrobeny 3D tiskem (obr. 6). Velikost jednotlivých částí ramenáťu je omezena maximálními rozměry 3D tisku na tiskárně v inventáři katedry geotechniky Stavební fakulty ČVUT v Praze. Přesto byl dosažen poloměr oblouku cca 1 m. Poloměry běžně sledovaného skutečného primárního ostění budou větší.

Z výsledků modelových měření v laboratoři vyplývá, že při vhodné volbě dodatečné ochrany optického vlákna je vliv jeho zakřivení na měření přetvoření zanedbatelný. Dalšími kroky je vývoj připevnění tvarovatelných snímačů na výztužné rámy a způsob jejich propojení na místě montáže výztužných rámu do výrubu.

NIVELACE PRO SLEDOVÁNÍ VÝVOJE DIFERENČNÍHO SEDÁNÍ NAVÁZANÁ NA MONITOROVACÍ VRTY

V projektu „Zhodnocení stabilitního a stavebně-technického stavu Broumovské skupiny kostelů a návrh opatření k zachování tohoto jedinečného evropského kulturního dědictví“ je využíván systém podpory monitoringu diferenčního sedání pomocí instrumentovaných vrtů pro velmi přesná 3D sledování deformací podloží

optical fibres, the influence of its curvature on measured strain is negligible. The next steps are development of fasteners of the FBG sensors to the reinforcement frames and methods of their connection after installation of the assembled reinforcement frames near the actual tunnel face.

LEVELLING FOR MONITORING OF DEVELOPMENT OF DIFFERENTIAL SETTLEMENT RELATED TO MONITORING BOREHOLES

A system of support of monitoring of differential settlement in the project “Evaluation of stability and technical conditions of the Broumov group of churches and proposal of remediation of this unique Europe culture heritage” is based on instrumented boreholes for very accurate 3D monitoring of deformations of the subsoil and foundation structures. The system of reference points based on instrumented boreholes and the technique of link to surveying was developed in projects of long-term monitoring of historic buildings in the Prague Castle area [4] and is used in the local survey network covering the entire area. The boreholes for stabilisation of the reference points of the local survey network of precise levelling are located in the monitored buildings usually in places where indications of differential settlement are observed or where it is necessary to investigate the technical conditions of foundation structures and the subsoil [5]. Measurements with a sliding micrometer are carried out manually in selected time intervals simultaneously with surveying.

To a lesser extent, the system of monitoring of the differential settlement is used for the Broumov group of churches. Within the framework of further development of optical fibre sensors, measurement casings for very accurate 3D monitoring of deformations were equipped by FBG sensors connected to measuring marks of the sliding micrometer outside the measurement casing using a system of small anchors [5]. This measurement casing with added FBG sensors allows continual monitoring of the development of axial deformations, as well as possible linking to the system of warning stages depending on the development of axial deformations in the subsoil. In the presented case, the warning system is not necessary since the development of deformations is very slow. The connection of the FBGuard analyser to the GSM module enables continual monitoring even from remote places, such as churches of the Broumov group are.

There are cracks in the vault under the choir with organ in the Church of All Saints (Kostel Věch Svatých) in Heřmánkovice in the Náchod Region. The boreholes for the subsoil investigation and foundation of reference points were located on the external sides of the vault buttresses (see Figures 7 and 8). (Levelling marks on the perimeter of the church are not presented in Fig. 7). A pair of boreholes with combined casing for very accurate 3D monitoring of deformations, complemented by a series of FBG sensors, passes through extension of foundations to the subgrade. Each borehole toe is embedded in underlying sandstone at the depth of about 12m under the surface of the extension of the footing and is considered to be fixed. Insert tool into the top of each measuring casing forms reference point of the levelling system [5]. Vertical displacements of the tops of the measuring casings in BH1 and BH2 boreholes, in this case measured by the sliding micrometer and optical fibre sensors, are reported to a group of surveyors and taken into account in the assessment of the levelling around the church.

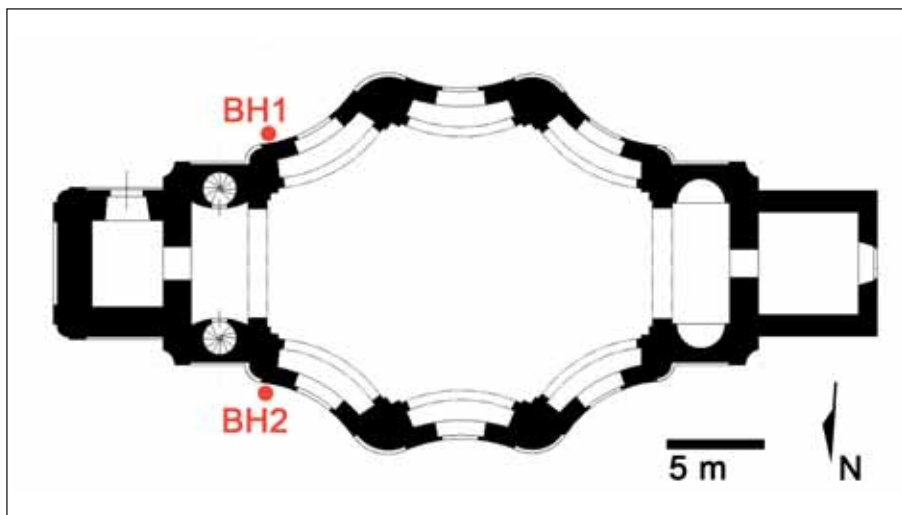
a základových konstrukcí. Systém vztažných bodů tvořených vystrojenými vrty a způsob napojení na geodetická sledování byl vyvinut v projektech dlouhodobého sledování historických objektů areálu Pražského hradu [4] a je užíván v místní geodetické síti, která pokrývá celý areál. Vrty pro zajištění vztažných bodů místního systému přesné nivelace jsou situovány ve sledovaných objektech zpravidla tam, kde jsou pozorovány projevy diferenčního sedání, nebo kde je třeba stav základových konstrukcí a podloží prozkoumat [5]. Měření klouzavým mikrometrem jsou prováděna ručně ve zvolených časových intervalech souběžně s geodetickým sledováním.

V menším rozsahu je systém sledování diferenčního sedání užíván pro broumovskou skupinu kostelů. V rámci dalšího vývoje optovláknových snímačů byly měřicí pažnice pro velmi přesná 3D sledování deformací doplněny o FBG snímače připojené na měřické značky klouzavého mikrometru vně měřicí pažnice pomocí systému kotviček [5]. Tato měřicí výstroj s přidanými snímači FBG umožňuje kontinuální sledování vývoje osových deformací i případné napojení na systém varovných stavů v závislosti na vývoji osových deformací v podloží stavby. V uváděném případě není varovný systém třeba, neboť se jedná o velmi pomalý vývoj deformací. Napojení analyzátoru FBGuard na modul GSM umožňuje kontinuální sledování i z odlehklých míst, jako jsou kostely broumovské skupiny.

Kostel Všech svatých v Heřmánkovicích v náhodském okrese vykazuje trhliny v klenbě pod kůrem s varhany, a proto byly vrty pro průzkum a zajištění vztažných bodů umístěny na vnější stranu opěr klenby (obr. 7, 8). (V obr. 7 nejsou zobrazeny niveláčnické značky na vnějším obvodu kostela.) Dvojice vrtů s kombinovanou výstrojí pro velmi přesná 3D sledování deformací, doplněná o série snímačů FBG, prochází přes rozšíření základů do podloží. Paty vrtů jsou vetknuty v podložních pískovcích v hloubce cca 12 m pod povrchem základových pasů a jsou považovány za pevné. Vložky do zhlaví vrtů tvoří vztažné body niveláčnického systému [5]. Svislé posuny zhlaví vrtů BH1 a BH2, v tomto případě stanovené pomocí klouzavého mikrometru a optovláknovými senzory, jsou předávány skupině geodetů a započteny při vyhodnocení nivelace obvodu kostela.

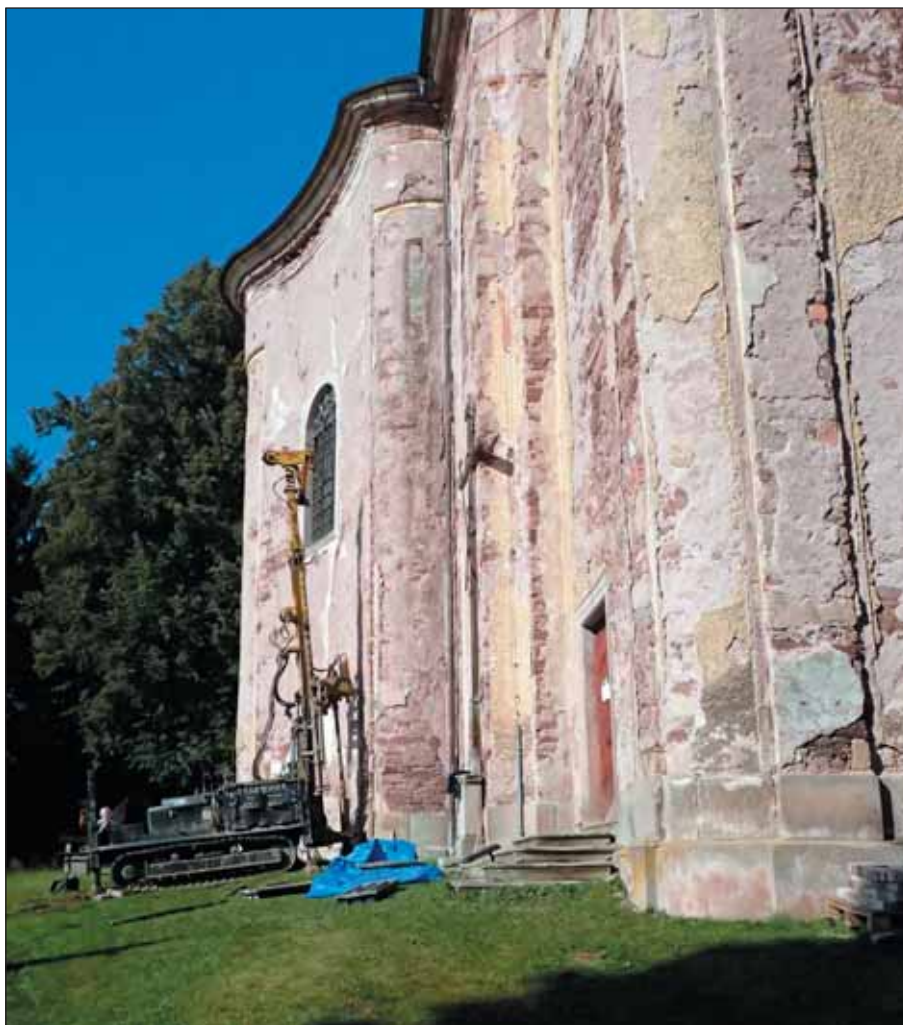
Optovláknové senzory jsou napojeny na analyzátor FBGuard s modulem GSM ve věži kostela. Příklady výsledků měření optovláknovými senzory ve vrtu BH2 jsou zobrazeny v závislosti na čase v obr. 9.

V době vývoje optovláknových měřicích prvků nebyly na trhu cenově přijatelné robustní teplotní senzory FBG, a proto nebyly při vystrojování vrtů osazeny. V obr. 9 je dobře patrný vliv teploty. S rostoucí hloubkou senzorů deformace její vliv podle



Obr. 7 Kostel Všech svatých v Heřmánkovicích a vztažné body ve vrtech BH1 a BH2 [5]

Fig. 7 The Church of All Saints (Kostel Všech Svatých) in Heřmánkovic and reference points in BH1 and BH2 boreholes [5]

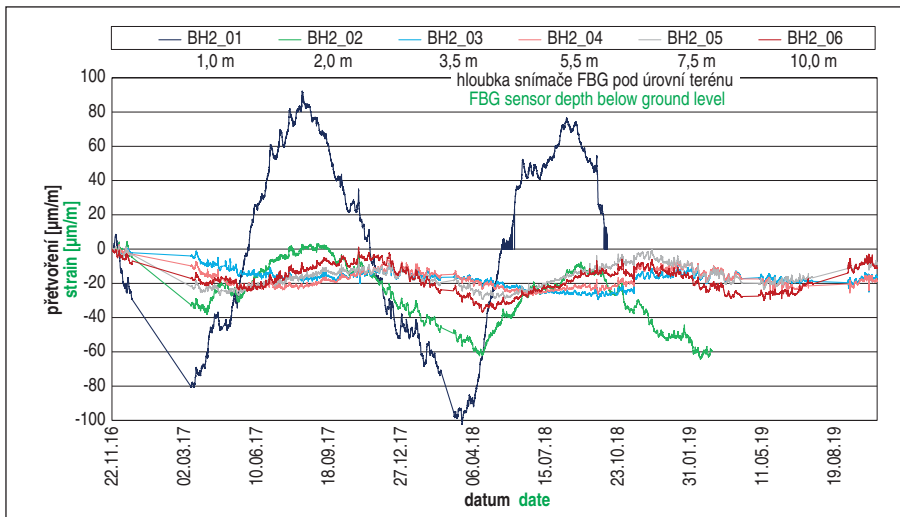


Obr. 8 Vrt BH1 vrtaný přes rozšíření základového zdiva na jižní straně kostela

Fig. 8 BH1 borehole carried out across the enlargement of the foundation masonry on the southern side of the church

The optical fibre sensors are connected to the FBGuard analyser with the GSM module in the church tower. Examples of results of measurements using optical fibre sensors in BH2 borehole are related to time and presented in Fig. 9.

At the time of the development of the optical fibre measurement, affordable robust FBG temperature sensors were not available



Obr. 9 Osové deformace ve vrtu BH2 sledované FBG senzory v závislosti na čase [5]

Fig. 9 Time depending axial deformations in BH2 borehole monitored by FBG sensors [5]

předpokladů klesá. Vrt BH2 je na severní straně kostela, která je přivrácená ke svahu. Základy a podloží jsou zde prakticky vodou nasycené, a proto je v důsledku vyšší tepelné vodivosti prostředí hloubka ovlivnění měřených hodnot deformací teplotou velká. Vyhodnocené svislé posuny jsou velmi malé a je zřejmé, že k patrným vývojovým trendům deformací nedochází. Průběhy jsou cyklické. Toto potvrzují i měření klouzavým mikrometrem, který je dobře teplotně kompenzován. Za uvedené období sledování byly hodnoty svislých posunů v úrovni zhlaví výstroje do velikosti $\pm 0,15$ mm.

Teplotní kompenzace optovláknových měření by v uvedeném případě znamenala osazení senzorů ve dvojicích (vždy deformační a teplotní) vzhledem k teplotnímu spádu k patě výstroje a teplotní setrvačnosti prostředí při změnách teploty. Cena instrumentace s teplotní kompenzací se mírně zvýší vzhledem k nízké ceně vhodných teplotních snímačů FBG s odolnými připojovacími kabely, které jsou dnes na trhu standardně dostupné.

Systém sledování diferenčního sedání tak, jak je provozován v případě vybraných broumovských kostelů, je možné užívat i pro sledování sedání objektů v rozsahu poklesové kotliny při ražbě tunelů. Při ražbě v extravilánu není obvykle třeba vysoké přesnosti měření ani vysoké četnosti. Jedná-li se o sledování poklesů při ražbě tunelů pod městskou zástavbou, je nutná zpravidla vysoká přesnost i četnost měření. Zde by mohla kontinuální měření sedání pomocí snímačů FBG ve vystrojených vrtech signalizovat bez prodlevy významnější vývoj svislých deformací a potřebu kratších intervalů sledování vývoje poklesové kotliny a vyvolaných nerovnoměrných deformací přesnou nivelací.

Volba polohy vztažných bodů systému nivelace pro sledování vývoje poklesové kotliny je třeba provést na základě inženýrsko-geologického průzkumu a předpokladů o vývoji poklesové kotliny.

ZÁVĚR

Optovláknové snímače umožňují sledování vývoje deformací i v prostředích, která vykazují nepřijatelné rušivé vlivy pro elektromechanické snímače v důsledku například vysokého procenta vyztužení železobetonových konstrukcí, přítomnosti silových vedení elektrické energie apod. Metoda distribuovaného snímání změn deformace a teploty BOTDA je vhodná pro úlohy kontrolního sledování, kde je obtížné předem odhadnout místa vzniku a rozvoje deformací. Měřicí linie mohou dosahovat až kilometrových délek. Pilotní instrumentace a měření byly úspěšně provedeny ve

on the market and, for that reason, they were not installed during the installation of measurement casings in the boreholes. The influence of temperature is well obvious in Fig. 9. As expected, it decreases with the increasing depth of sensors. BH2 borehole is on the northern side of the church, which is facing the slope. The foundations and the subsoil on this side of the church are almost saturated with water, therefore, as a result of higher thermal conductivity of the environment, the depth of the influence on measured values of deformations by temperature is significant. The vertical displacements being assessed are very small and it is obvious that development trends of deformations do not take place. The courses are cyclic. This fact is even confirmed by measurements by the sliding micrometer, which is well temperature compensated.

During the monitoring period, the values of vertical displacement at the level of the top of the monitoring casing were less than $\pm 0,15$ mm.

Thermal compensation of the optical fibre measurements would mean in the presented case that pairs of sensors (a deformation sensor and a thermal sensor) would be installed with respect to the temperature gradient toward the casing toe and the thermal inertia when temperature changes. The cost of the instrumentation with thermal compensation will increase only slightly with respect to the low price of suitable FBG thermal sensors with armoured fibre optic cables, which are available as standard on the market today.

The system of monitoring of differential settlement, as it has been operated in the case of the selected Broumov churches, can be used even for monitoring of settlement of buildings within the settlement trough during excavation of tunnels. In the case of driving tunnels in non-build-up areas, neither high accuracy of measurements nor high frequency is usually necessary. If it is the case of monitoring of subsidence during excavation of tunnels under urban development, high accuracy and frequency of measurements is usually necessary. Here the continual measurements using FBG sensors in cased boreholes could signal without delay the more significant development of vertical deformations and the need for shorter intervals for monitoring of the development of the settlement trough and induced differential settlement measured by precise levelling.

The selection of reference points of the levelling system for monitoring of the development of the settlement trough should be carried out based on engineering geological site investigation and assumptions about the settlement trough development.

CONCLUSION

Optical fibre sensors enable monitoring of the development of deformations even in environments exhibiting unacceptable noise disturbing measurements with use of electromechanical sensors resulting, for example, from high percentage of reinforcement of reinforced concrete, the presence of power lines etc. The BOTDA method for distributed strain and temperature sensing is appropriate for monitoring, where it is difficult to estimate the locations of origin and development of deformations. The measurement lines may reach even kilometre lengths. Pilot instrumentations and measurements were successfully carried out in the central tunnel of

středním tunelu prodlužované linky A pražského metra před stanicí Petřiny v roce 2011.

Při návrhu snímačů a systémů sledování na základě FBG, neboli optických mřížek vytvořených při výrobě senzorických vláken, je nutné zajištění jejich dostatečné ochrany pro instalace do prostředí staveb a geotechnických konstrukcí. Návrhy systémů snímačů jsou do značné míry individuální pro různé účely sledování. Vzhledem k citlivosti snímačů na teplotu je nutná jejich teplotní kompenzace pro prostředí se změnami teplot nebo s teplotními spády. V současnosti je na trhu dostatečný výběr teplotních snímačů FBG, které lze při návrhu systému použít společně se snímači deformace a vyrovnat se s teplotními vlivy.

Autoři vyvíjejí i snímače, které bude možné použít do obloukových konstrukcí a při instalaci je tvarovat podle vnějšího a vnitřního líce konstrukce. Z deformací měřených u okrajů průřezu budou vyhodnoceny změny tvaru konstrukce nebo jejích prvků.

Poděkování

V příspěvku jsou využity vybrané výstupy z projektů:

- FW01010384 Vývoj optovláknových měřidel pro podzemní stavby a opěrné konstrukce, který je spolufinancován se státní podporou Technologické agentury ČR v rámci Programu TREND;
- „Zhodnocení stabilitního a stavebně-technického stavu Broumovské skupiny kostelů a návrh opatření k zachování tohoto jedinečného evropského kulturního dědictví“ č. DG16P02R049 podpořeného v programu NAKI Ministerstva kultury České republiky. Jedná se o kapitolu „Nivelace pro sledování vývoje diferencního sedání navázaná na monitorovací vrty“.

*Ing. MAREK ZÁLESKÝ, Ph.D.,
marek.zalesky@geotechnika.cz,
SG Geotechnika a.s.,
doc. Ing. JAN ZÁLESKÝ, CSc.,
zalesky@fsv.cvut.cz,
katedra geotechniky,
Stavební fakulta ČVUT v Praze,
Ing. LADISLAV ŠAŠEK, CSc.,
ladislav.sasek@safibra.cz,
SAFIBRA, s.r.o.*

Recenzoval *Reviewed*: doc. Ing. Vladislav Horák, CSc.

extension of the Line A of the Prague metro in front of the Petřiny Station in 2011.

When designing sensors and systems of monitoring of foundations based on the FBG (optical gratings created during production of sensing fibres) it is necessary to provide sufficient resistance for installations into the subsoil and geotechnical structures. Design of sensing systems is to a large extent individual for various monitoring purposes. With respect to the sensitivity of the sensors to temperature, their thermal compensation for environments with changes in temperature or with temperature gradients is necessary. There is currently a sufficient selection of FBG temperature sensors which can be used together with deformation sensors to cope with temperature impacts when designing a system.

The authors develop in addition sensors which can be used in arched structures and be shaped during installation according to the external and internal surfaces of the structure. Changes in the shape of the structure or its elements will be assessed on the base of deformations measured at both edges of the cross-section.

Acknowledgements

Selected outputs of the following projects are used in the paper:

- FW01010384 Development of fibre optic measurement instruments for underground constructions and retaining structures, which is co-funded by the Technology Agency of the Czech Republic within the TREND Program;
- DG16P02R049 Evaluation of stability and technical conditions of the Broumov group of churches and proposal of remediation of this unique Europe culture heritage, supported in the NAKI Program of the Ministry of Culture of the Czech Republic. The chapter “Levelling for monitoring of development of differential settlement related to monitoring boreholes” is in question.

*Ing. MAREK ZÁLESKÝ, Ph.D.,
marek.zalesky@geotechnika.cz,
SG Geotechnika a.s.,
doc. Ing. JAN ZÁLESKÝ, CSc.,
zalesky@fsv.cvut.cz,
katedra geotechniky,
Stavební fakulta ČVUT v Praze,
Ing. LADISLAV ŠAŠEK, CSc.,
ladislav.sasek@safibra.cz,
SAFIBRA, s.r.o.*

LITERATURA / REFERENCES

- [1] KLAR, A., GOLDFELD, Y. A CHARAS, Z. *Measures for identifying cracks within reinforced concrete beams using BOTDR*. Proceedings of SPIE Volume 7647, Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2010, ISBN: 9780819480620, 31 March 2010
- [2] NATIONAL INSTRUMENTS CORPORATION. *Fundamentals of FBG Optical Sensing*. Dostupné na: <http://sine.ni.com/ind-app/app/p/id/app-70/lang/cs> [citováno 2012-09-9], 2012
- [3] ZÁLESKÝ, J., ČÁPOVÁ, K., ZÁLESKÝ, M., BOHÁTKA, J., ŠAŠEK, L. *Detekce deformací primárního ostění středního tunelu stavby Metro V.A vláknovou optikou*. In: Zakládání staveb Brno 2014. Brno: Česká geotechnická společnost Českého svazu stavebních inženýrů, 2014. pp. 137–142. ISBN 978-80-87920-01-5
- [4] PROCHÁZKA, J., JÍŘIKOVSKÝ, T., ZÁLESKÝ, J., SALÁK, J., MÁCA, J. et al. *Stabilita historických objektů*. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. 229 s. ISBN 978-80-01-04776-7
- [5] ZÁLESKÝ, J., KOVÁŘOVÁ, K. *Failures on Historical Buildings as a Result of Deterioration of the Foundations and the Subsoil*. In: KOSTELECKÁ, M., ed. *Rehabilitation and Reconstruction of Buildings*. 19th International Conference on Rehabilitation and Reconstruction of Buildings, Praha, Česká republika, 2017-11-23/2017-11-24. Zurich: Trans Tech Publications, 2018. s. 185–190. sv. Vol. 776. ISSN 1013-9826. ISBN 978-3-0357-1361-9. DOI 10.4028/www.scientific.net/KEM.776.185
- [6] ČÁPOVÁ, K. *Use of Optical Fibres for Deformation Monitoring in Geotechnics*. Doktorská dizertační práce. Školitel Záleský, J. katedra geotechniky, Stavební fakulta, České vysoké učení technické v Praze, 2020. 116 s.