

## Výsledky monitorovania stability vybratých historických objektov na území SR

LUBOMÍR PETRO<sup>1</sup>, MARTIN BRČEK<sup>2</sup>, JÁN VLČKO<sup>3</sup>, IVANA ŠIMKOVÁ<sup>3</sup>,  
DOMINIK BALÍK<sup>4</sup> a ANDREJ ŽILKA<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Štátny geologický ústav D. Štúra, Jesenského 8, 040 22 Košice; lubomir.petro@geology.sk

<sup>2</sup>Katedra geotechniky, Stavebná fakulta, Slovenská technická univerzita,  
Radlinského 11, 813 68 Bratislava

<sup>3</sup>Katedra inžinierskej geológie Prírodovedeckej fakulty UK, Mlynská dolina – G,  
842 15 Bratislava

<sup>4</sup>Štátny geologický ústav D. Štúra, Mlynská dolina 1, 817 04 Bratislava

### Stability of selected historical objects in Slovakia: Monitoring results

A systematic monitoring of the subgrade beneath selected historic objects in Slovakia, endangered by geological hazards (slope movements, weathering, karstification, etc.), has started in 1992. Different monitoring techniques, especially linear and space extensometers, are used for the data capturing. Monitoring is focused on acquisition of reliable data, which are necessary for interpretation of the main causes of the slope instabilities, suggestion of potential remedial measures and prognosis of possible risks of disruption of historic objects or their subgrade. Results of the long-term monitoring are described in this contribution.

**Key words:** monitoring of subgrade, historic objects, extensometers, Slovakia

### Úvod

V súčasnosti sa venuje veľká pozornosť ochrane historických pamiatok, a to na národnej aj medzinárodnej úrovni (UNESCO). Jednou z aktivít zameraných na elimináciu negatívnych účinkov geologických hazardov sú rekonštrukčné a sanačné práce vychádzajúce z inžinierskogeologického prieskumu a monitoringu. Porušenie historických objektov najčastejšie spôsobujú svahové pohyby typu plazenia, zosúvania a rútenia, zvetrávanie, krasovatenie hornín a tektonické poruchy. V dôsledku pôsobenia uvedených geologických hazardov dochádza nielen k zníženiu stability podlažia, ale aj k poškodeniu jednotlivých konštrukčných častí stavieb, nezriedka aj k ich zrúteniu.

Jedným z hlavných cieľov pri záchrane historických objektov je zabezpečenie ich stability. Stabilitným výpočtom a návrhom rekonštrukčných a sanačných prác predchádza inžinierskogeologický a geotechnický prieskum spočívajúci v podrobnej charakteristike hornín v podlaží (vrátane opisu hlavných diskontinuit), ďalej všetkých porúch v hornej stavbe, najmä tých, čo majú úzky súvis so štruktúrne-tektonickými prvkami horninového masívu, ako aj charakteristike najdôležitejších geohazardov. Monitoring horninového podlažia, ako aj svahových porúch typu plazenia a zosúvania, je neoddeliteľnou súčasťou geologických prác zameraných na ochranu pamiatkových objektov. Jeho cieľom pred rekonštrukciou a sanáciou je pozorovanie dynamiky horninového prostredia, po rekonštrukcii zase zhodnotenie účinnosti sanačných opatrení.

Monitorovanie v oblasti ochrany historických stavieb na Slovensku začalo koncom sedemdesiatych rokov na Spišskom hrade, ktorý je od roku 1993 zapísaný do zoznamu kultúrnych a historických pamiatok UNESCO, a začiatkom osemdesiatych rokov na Oravskom hrade. V roku 1992 bol v rámci čiastkovej úlohy „Inžinierskogeologický výskum pre optimálne využitie krajiny a ochranu životného prostredia“, ktorú zastrešovala štátna výskumná úloha „ZP-547-008-03 Výskum geologických faktorov životného prostredia“, monitoring na Spišskom hrade rozšírený o ďalších 6 stanovišť. V roku 1993 sa v Geologickom ústave Dionýza Štúra začala riešiť geologická úloha „Čiastkový monitorovací systém geologických faktorov životného prostredia“, ktorú dodnes garantuje a finančne zabezpečuje Ministerstvo životného prostredia SR. V rámci subsystemu 06 „Stabilita horninových masívov pod historickými objektmi“ uvedenej úlohy sa sieť monitorovaných objektov od roku 1995 postupne rozšírila na ďalšie objekty v stredovekom kláštore pri Skalke nad Váhom (1995, 2000 – začiatok monitoringu, pozri tab. 1), na hradoch Lietava (2000) a Strečno (1996), na Spišskom hrade (1997, 2000, 2003), v kostole v Kostolanoch pod Tribečom (2000), na hrade Uhrovec (2000), na Plaveckom hrade (2002), na hradoch Pajštún a Čachtice (2003), Devín (2004) a na Trenčianskom hrade (2006). V dôsledku rôznych príčin (napr. zničenia prístrojov, dlhodobého nepreukázania nestability) boli niektoré monitorovacie zariadenia demontované a niektoré lokality opustené (obr. 1). V súčasnosti je monitorovaných celkovo 7 lokalít s historickými objektmi, a to dvomi monitorovacími metódami. V tomto príspevku je prezentovaná stručná

charakteristika lokalít so skončeným monitoringom, výsledky monitoringu v existujúcich lokalitách a ich interpretácia.

### Monitorovacie metódy

Výber monitorovacích prístrojov do jednotlivých lokalít bol podmienený výsledkami predchádzajúceho inžinier-

dilatometer je pripevnený medzi dvomi ocelovými konzolami, votknutými do protiahlych stien trhliny. Pri výpočte sa zohľadňuje rozťažnosť použitého materiálu. Presnosť merania posunov vo všetkých troch osiach je 0,01 mm, presnosť rotácie blokov je 0,01 gr. Uvedeným spôsobom možno monitorovať trhliny šírky cca 0,5 – 2,0 m, v prí-



**Obr. 1.** Lokality na území SR monitorované dilatometrami typu TM-71 a SOMET v súčasnosti (1 – Spišský hrad; 2 – Oravský hrad; 5 – hrad Strečno; 7 – Uhrovec hrad; 8 – Plavecký hrad; 9 – hrad Pajštún; 12 – Trenčiansky hrad) a v minulosti (3 – Skalka nad Váhom; 4 – Lietavský hrad; 6 – Kostolany pod Tribečom; 10 – Čachtický hrad; 11 – hrad Devín).

**Fig. 1.** Sites monitored by the TM-71 and SOMET crack gauges in the Slovak Republic at the present time (1 – Spiš Castle; 2 – Orava Castle; 5 – Strečno Castle; 7 – Uhrovec Castle; 8 – Plavecký Castle; 9 – Pajštún Castle; 12 – Trenčín Castle) and in the past (3 – Skalka nad Váhom; 4 – Lietava Castle; 6 – Kostolany pod Tribečom; 10 – Čachtice Castle; 11 – Devín Castle).

skogeologického prieskumu, terénnej rekognoskácie, štruktúrnych meraní, charakterom zistených tektonických porúch (puklín a trhlín), charakterom a predpokladanou rýchlosťou svahových pohybov, resp. posunov horninových blokov, prístupnosťou lokality, odolnosťou prístrojov voči poveternostným podmienkam, náročnosťou údržby a v neposlednom rade aj ich cenou. Pre vybrané lokality sa ako najvhodnejšie ukázali dva typy dilatometrov – mechanicko-optický dilatometer TM-71 (Košťák, 1969, 1991) a posuvné meradlo s odchýlkomerom (analogovým/digitálnym) od firmy SOMET.

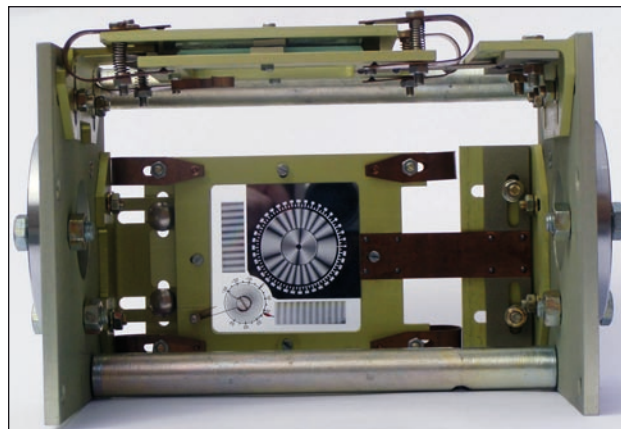
#### Mechanicko-optický dilatometer TM-71

Dilatometer tohto typu (obr. 2) je vhodný na dlhodobé a veľmi presné 3D meranie pomalých plazivých pohybov dvoch susedných horninových blokov (častí objektov) oddelených od seba puklinou (trhlinou), resp. zlomom. Vzhľadom na použitý materiál (sklo, hliník, chróm, nerez a meď) sa prístroj vyznačuje vysokou odolnosťou voči korózii, bludným prúdom a elektrickým výbojom. Dilatometer pracuje na princípe moiré, t. j. využíva interferenciu svetla prechádzajúcu cez dve na seba naložené sklenené doštičky, na povrchu pokryté tenkou chrómovou vrstvou s vyleptanými veľmi tenkými sústrednými kružnicami. Výsledkom interferencie je sústava prúžkov, z ktorých možno vypočítať veľkosť a smer pohybu (os x – rozširovanie alebo zužovanie trhliny, os y – horizontálny šmykový posun pozdĺž trhliny, os z – vertikálny pohyb blokov pozdĺž trhliny), ako aj rotácie monitorovaných blokov. Keďže je dvojica doštičiek skonštruovaná vo dvoch na seba kolmých rovinách (dva segmenty prístroja), možno určiť pohyb blokov v priestore, a to aj vo vzťahu k trhline. Samotný

pade použitia lomených konzol aj trhliny široké menej ako 0,5 m, resp. zovreté trhliny.

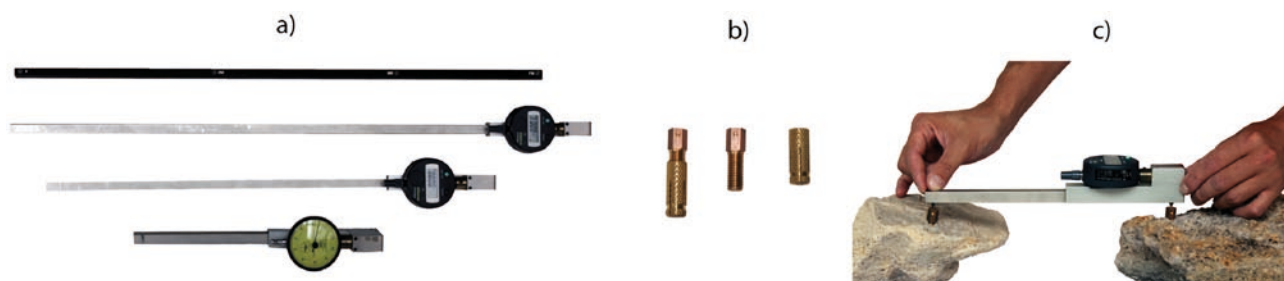
#### Dilatometer SOMET

Tento pomerne jednoduchý a cenovo dostupný prenosný prístroj (obr. 3) sa u nás začal používať na monitorovanie lineárnych (jednoosových) deformácií v dôsledku pôsobenia rôznych geologických procesov v podloží historických objektov v roku 2000. Patrí do skupiny prístrojov, ktoré sa v zahraničí označujú *Demountable Mechanical Strain Gauge* alebo *Crack Gauge*. Je vhodný na meranie v takých lokalitách, resp. trhlínach, kde TM-71 nemožno inštalovať pre vysokú mieru rizika jeho poškodenia (veľké finančné straty), alebo menšiu šírku trhliny než 50 cm.



**Obr. 2.** Mechanicko-optický dilatometer typu TM-71. Foto L. Petro.

**Fig. 2.** A mechanical-optical crack-gauge of TM-71 type. Photo L. Petro.



**Obr. 3.** Prenosný dilatometer typu SOMET. Základná zostava prístroja (a), meracie body zhotovené z mosadze (b), názorná ukážka merania (c). Foto M. Brček.

**Fig. 3.** Demountable mechanical crack gauge SOMET. Basic configuration of the crack gauge (a), measuring console made from brass (b), visual demonstration of measuring (c). Photo M. Brček.

V prípade použitia lepených konzol ide o nedeštruktívnu monitorovaciu metódu, ktorá je aplikovateľná aj v interiéroch vzácných historických pamiatok.

Prenosný dilatometer SOMET pozostáva z invarovej tyče s výstupkami – trňmi pre osadené pevné body. Jeden trň je fixný, druhý prenáša zmenu vzdialenosti pevných bodov na meracie zariadenie. Dĺžka tyče je voliteľná (25, 50, 75 a 100 cm), takže meradlom možno merať posuny pozdĺž trhlín rôznej šírky. Meracie zariadenie tvorí analógový alebo digitálny odchýlkomer s presnosťou záznamu 0,001 mm. Bežne sa v praxi osadzujú tri meracie body po oboch stranách trhliny (poruchy, diskontinuity)

tak, že dva body sú na kvázi stabilnom bloku a tretí na bloku, kde sa očakáva pohyb. Uvedené rozmiestnenie meracích bodov umožňuje meranie translačného pohybu, t. j. relatívnej zmeny vzdialenosti medzi bodmi.

### Prehľad lokalít so skončeným monitoringom

Monitoring niektorých historických objektov, resp. ich podlažia, dilatometrami typu TM-71 alebo prenosným prístrojom typu SOMET musel byť z rôznych dôvodov skončený. Prehľadná charakteristika lokalít s ukončeným monitoringom je v tab. 1.

Tab. 1  
Prehľad lokalít so skončeným monitoringom  
Preview of former monitoring sites

| Lokalita               | Typ prístroja<br>TM-71    SOMET |     | Inštalácia                                                          | Monitorovacie<br>obdobie |      | Dôvod opustenia lokality                                                                           | Výsledky                                                             |
|------------------------|---------------------------------|-----|---------------------------------------------------------------------|--------------------------|------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| Skalka nad Váhom       | áno                             | áno | TM-71 – trhlina smeru SV – JZ za kaplnkou jezuitského kláštora      | 1995                     | 2004 | Stavebné úpravy objektu znemožňujúce bezpečný prístup k dilatometru.                               | Do roku 2000: Vlčko a Petro, 2002; Vlčko et al., 2002.               |
|                        |                                 |     | SOMET – pevné body pri trhlíne v jaskyni                            | 2000                     | 2005 | Zamedzenie vstupu do objektu vlastníkom objektu.                                                   | Do roku 2004: Jezný et al., 2007. Do roku 2008: Jánová et al., 2009. |
| Lietava                | áno                             | áno | TM-71 – trhlina v skalnom podlaží pod hradom                        | 1995                     | 1996 | Zničenie prístroja vandalmi 5 mesiacov po inštalácii.                                              | Namerané údaje nebolo možné interpretovať.                           |
|                        |                                 |     | SOMET – pevné body (trhliny v obvodových/vnútrotných stenách hradu) | 2000                     | 2006 | Zničenie jedného stanovišťa, minimálne posuny na monitorovaných trhlínach pre rekonštrukciu hradu. | Nemožnosť interpretácie v dôsledku zničenia pevných bodov.           |
| Kostoľany pod Tribečom | nie                             | áno | SOMET – pevné body (trhliny v interiéri kostola)                    | 2000                     | 2008 | Stabilizácia monitorovaného objektu po rekonštrukcii.                                              | Prispeli k úspešnej rekonštrukcii interiéru.                         |
| Čachtice               | nie                             | áno | SOMET – pevné body (trhliny v skalnom podlaží)                      | 2003                     | 2006 | Opakovaná deštrukcia pevných bodov vandalmi.                                                       | Nemožnosť interpretácie pre malý počet údajov.                       |
| Devín                  | nie                             | áno | SOMET – pevné body (trhliny v interiéri hradu)                      | 2004                     | 2009 | Stabilizácia monitorovaných objektov po rekonštrukcii.                                             | Prispeli k úspešnej rekonštrukcii múrov.                             |

Tab. 2  
 Prehľad dilatometrov TM-71 a stanovišť dilatometra SOMET na Spišskom hrade  
 Preview of the TM-71 extensometers and the SOMET measuring points at the Spiš Castle

| Prístroj/stanovište                    | Pozícia na hrade<br>(obr. 4)                                               | Monitorovacie<br>obdobie      | Dôvod ukončenia<br>merania                                 | Poznámka                                                                                          |
|----------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| (TM-71) P1<br>(od r. 1997<br>TM-71-h1) | Trhlina v podloží v južnej časti<br>II. nádvoría<br>(za Perúnovou skalou). | 1980 – 1997<br>1997 – doteraz | –                                                          | V roku 1997 bol starý prístroj v dôsledku<br>poškodenia náhlým pohybom blokov<br>nahradený novým. |
| (TM-71) P2<br>(od r. 1997<br>TM-71-h2) | Trhlina vo vnútornom múre<br>v západnej časti II. nádvoría.                | 1979 – 1994<br>1997 – doteraz | –                                                          | Kvôli prerušeniu meraní ide o dva<br>časové cykly údajov.                                         |
| (TM-71) P3                             | Trhlina na severnom okraji<br>travertínovej kopy.                          | 1980 – 1987                   | Zničenie prístroja<br>vandalmi.                            | Riziko zničenia TM-71 – merania<br>ukončené.                                                      |
| TM-71-1                                | Trhlina v skalnom podloží<br>za Perúnovou skalou (II. nádvorie).           | od roku 1992                  | –                                                          | Dlhodobý trend rozširovania trhliny.                                                              |
| TM-71-2                                | Trhlina v podloží pod Perúnovou<br>skalou (vstup do Podhradskej jaskyne).  | od roku 1992                  | –                                                          | Dlhodobý trend uzatvárania trhliny.                                                               |
| TM-71-3                                | Trhlina v podloží na S strane<br>hradného vrchu.                           | 1992 – 1993                   | Zničenie prístroja<br>vandalmi.                            | Pre veľké riziko opätovného zničenia<br>dilatometra boli merania ukončené.                        |
| TM-71-4                                | Trhlina v podloží na Z okraji<br>hradného vrchu.                           | 1992 – 1999                   | Zničenie prístroja<br>vandalmi.                            |                                                                                                   |
| TM-71-5                                | Trhlina v podloží na Z okraji<br>hradného vrchu.                           | 1992 – 1994                   | Zničenie prístroja<br>náhlým poklesom<br>jedného z blokov. | Kvôli posunutiu konzol o cca 2 cm<br>neboli merania obnovené.                                     |
| TM-71-6                                | Trhlina v podloží na Z okraji<br>hradného vrchu.                           | 1992 – 1995                   | Zničenie prístroja<br>vandalmi.                            | Riziko zničenia TM-71 – merania<br>ukončené.                                                      |
| TM-71-jaskyňa                          | Trhlina v skalnom podloží<br>(Puklinová jaskyňa).                          | od roku 2003                  | –                                                          | Pozvolné otváranie trhliny a pokles<br>jedného z blokov.                                          |
| SM1                                    | Zamurovaná trhlina v západnej časti<br>II. nádvoría (nad TM-71-h2).        | od roku 2000                  | –                                                          | –                                                                                                 |
| SM2                                    | Trhlina za Perúnovou skalou<br>(nad TM-71-1).                              | od roku 2000                  | –                                                          | –                                                                                                 |
| SM3                                    | Zamurovaná trhlina za Perúnovou<br>skalou (nad TM-71-h1).                  | od roku 2000                  | –                                                          | –                                                                                                 |
| SM4                                    | Trhlina na severnom okraji hradnej<br>skaly (pod Románskym palácom).       | od roku 2001                  | –                                                          | –                                                                                                 |
| SM5                                    |                                                                            | od roku 2001                  | –                                                          | –                                                                                                 |

K najzaujímavejším výsledkom monitorovania historických objektov so skončeným monitoringom patrí preukázanie trendu šmykového pohybu na tektonickej poruche za kaplnkou jezuitského kláštora Skalka nad Váhom dilatometrom TM-71, ktorý v roku 2004 dosiahol 0,23 mm. Z meraní lineárneho pohybu prístrojom SOMET sú najvýznamnejšie výsledky na hrade Devín a v kostole v Kostolnoch pod Tribečom, ktoré prispeli k úspechu rekonštrukčných prác v oboch lokalitách.

#### Výsledky monitoringu dilatometrami TM-71 a SOMET v existujúcich lokalitách

V príspevku zameriavame prvoradá pozornosť na lokality, ktorých historické objekty sú v súčasnosti monitorované.

Ide o lokality Spišský a Oravský hrad, hrady Strečno a Uhrovec, Plavecký hrad, hrad Pajštún a Trenčiansky hrad.

#### Lokalita Spišský hrad

Spišský hrad je najväčším stredovekým opevneným hradom v strednej Európe. Bol založený v roku 1120. V priebehu histórie prešiel viacerými stavebnými úpravami, ktoré skončili v období baroka. V roku 1780 hrad vyhorel a odvtedy je opustený. Jeho súčasný stav podmieňujú prírodné, ale aj antropogénne faktory.

Hradný vrch tvorí výraznú morfológickú eleváciu v Hornádskej kotline. Ide o travertínovú kopy, ktorá leží na flyšových ílovcach a pieskovcoch hutianskeho súvrstvia



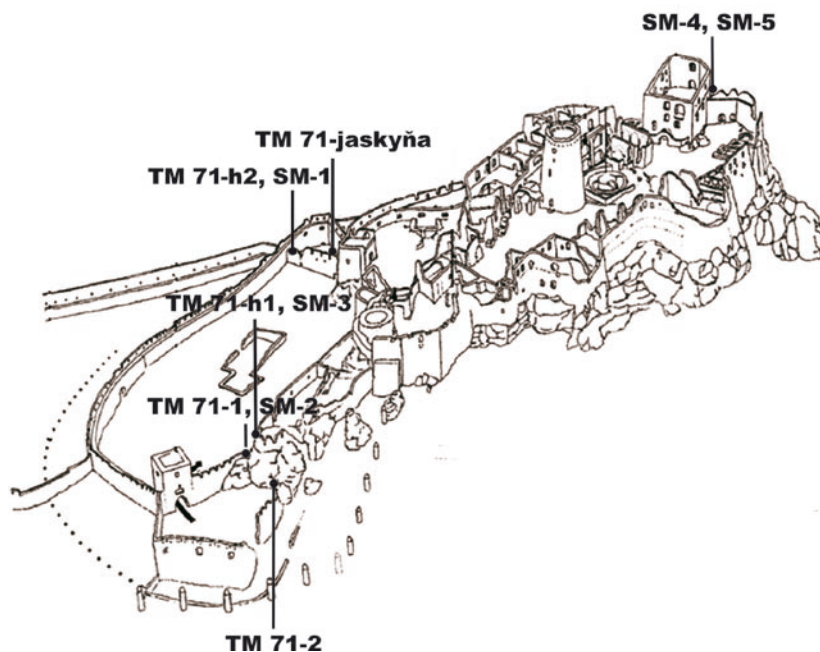
podtatranskej skupiny (Gross et al., 1999). Travertínové teleso je porušené početnými zlomami, trhlinami a puklinami a jeho hrúbka presahuje 50 m. Medzi puklinami dominujú dva subvertikálne systémy (Vlčko a Petro, 2002) so smermi sklonu  $220^\circ - 250^\circ/80^\circ - 90^\circ$  (SZ – JV) a  $250^\circ - 270^\circ/85^\circ$  (SSZ – JJV až S – J). Práve na zlomy a pukliny sú viazané tri jaskyne (Podhradská, Puklinová a Temná), ktoré boli registrované na hrade pri terénnom výskume (Fussgänger, 1985). V dôsledku pôsobenia gravitácie, ale aj zvetrávania a krasovatenia, došlo k rozpadu travertínového telesa na množstvo rôzne veľkých a hrubých blokov. Vzhľadom na mäkké ílovité podložie sa tieto bloky postupne pomaly posúvali po podloží a podliehali procesu mechanického rozpadu a chemického rozkladu (krasovatenie). Tento proces prebieha aj v súčasnosti a má charakter plazenia (creep). Kým v centrálnej, najvyššej časti, má kopa charakter blokovej rozpadliny, v periférnych častiach ide o formu blokového poľa. Mnohé bloky dosahujú výšku 25 až 30 m, sklon  $70^\circ - 80^\circ$ , niekedy až  $90^\circ$ , ba vyskytujú sa i previsy. Z antropogénnych faktorov zhoršujúcich stabilitu hradného vrchu treba spomenúť jeho prirážanie samotnými historickými objektmi, odstraňovanie vegetácie zo svahov a v minulosti aj seizmické otrasy spôsobované ostrelmi v kameňolome Dreveník.

V období rokov 1979 – 2003 bolo na hrade postupne inštalovaných 10 dilatometrov TM-71. Prvé tri (P1 – P3) boli inštalované v rokoch 1979 a 1980 (tab. 2). Ich hlavným cieľom, podobne ako aj ostatných neskôr inštalovaných dilatometrov, bolo priame sledovanie vývoja plazivých blokových pohybov v priestore. Už predbežné výsledky za roky 1980 – 1983 preukázali výrazný pohyb v trhline v západnej časti hradu (TM-71-P2, Fussgänger, 1985). Z týchto troch pôvodných starších typov prístrojov, ktoré boli schopné zaznamenávať iba posun v dvoch na

seba kolmých rovinách, sa nezachoval, žiaľ, ani jeden. Dilatometer P3 bol niekoľkokrát zničený vandalmi a v roku 1987 odinštalovaný. Výsledky ním získané nebolo možné seriózne interpretovať. Dilatometer P2 bol v roku 1994 odstránený pri stavebných prácach a monitorovaná trhlina vo vnútornej stene hradu bola zamurovaná. Výsledky do roku 1994 preukázali až 14 mm šmykový pohyb, takmer 5 mm rozšírenie trhliny a šikmý pokles vonkajšieho múra a príľahlej vnútornej steny hradu na druhom nádvorí. Prístroj P1 fungoval až do roku 1997, keď bol silne poškodený. Výsledky preukázali predovšetkým rozširovanie trhliny (až o 4,91 mm), t. j. nakláňanie Perúnovej skaly na východ.

V druhej etape bolo v roku 1992 v rámci štátnej výskumnej úlohy „ZP-547-008-03 Výskum geologických faktorov životného prostredia“ inštalovaných ďalších 6 dilatometrov TM-71 (tab. 2, TM-71-1 – TM-71-6). Štyri z uvedených prístrojov boli v ďalších rokoch poškodené vandalmi, niektoré i viacnásobne, resp. náhlym výrazným poklesom jedného z blokov, takže museli byť postupne (v rokoch 1993, 1994, 1995 a 1999) odinštalované bez náhrady. Všetky z nich preukázali plazivý pohyb monitorovaných blokov v podloží vonkajších múrov hradu.

V tretej etape, t. j. v rámci úlohy „Čiastkový monitorovací systém geologických faktorov životného prostredia“, ktorej riešenie začalo v roku 1993 a je dodnes garantované a finančne zabezpečované Sekciou geológie a prírodných zdrojov Ministerstva životného prostredia SR, presnejšie v rámci subsystému 06 „Stabilita horninových masívov pod historickými objektmi“ tejto úlohy, boli na hrade obnovené dva pôvodné, staré dilatometry P1 a P2, obidva v roku 1997. V prvom prípade sa podarilo po výmene prístroja za nový nadviazať na dovtedajšie merania, t. j. zachovať ich kontinuitu. V druhom prípade sa monitorovacie obdobia 1979 – 1994 a od 1997 po súčasnosť považujú za dve



Obr. 4. Stanovišťa na Spišskom hrade monitorované v súčasnosti dilatometrami TM-71 a SOMET.

Fig. 4. The TM-71 and SOMET locations monitored at the Spiš Castle nowadays.

samostatné časové epochy. Nové (náhradné) prístroje boli pre prehľadnosť označené TM-71-h1 a TM-71-h2. V roku 2003 bol v širokej trhline (cca 1,9 m) vo vnútri Puklinovej jaskyne nainštalovaný doteraz posledný dilatometer (TM-71-jaskyňa).

Na podporu meraní dilatometrami TM-71 boli na hrade v roku 2000 zriadené tri stanovišťa (SM1 – SM3) a v roku 2001 dve stanovišťa (SM4 a SM5) na meranie posunov prenosnými dilatometrami typu SOMET (obr. 4).

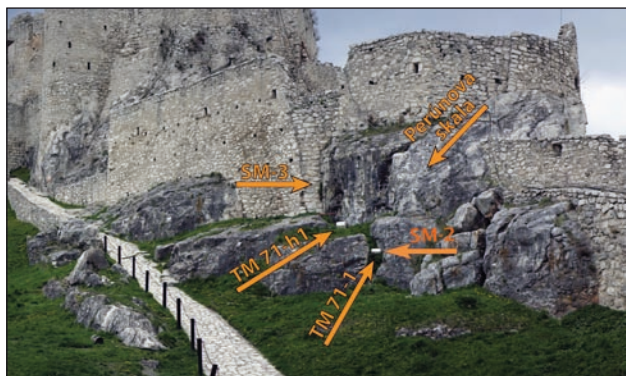
V nasledujúcej časti príspevku sumarizujeme výsledky dlhodobého monitoringu plazivých pohybov travertínových blokov a trhlínami (puklinami) porušených častí historických objektov získané dilatometrami TM-71 a SOMET, fungujúcimi od ich inštalácie do konca roku 2011. Tieto výsledky nadväzujú na výsledky publikované

v starších prácach (napr. Vlčko et al., 1998; Vlčko, 2001, 2004; Vlčko et al., 2002; Vlčko a Petro, 2002; Vlčko et al., 2007).

#### Dilatometre TM-71-h1 (pôvodne P1) a SM3

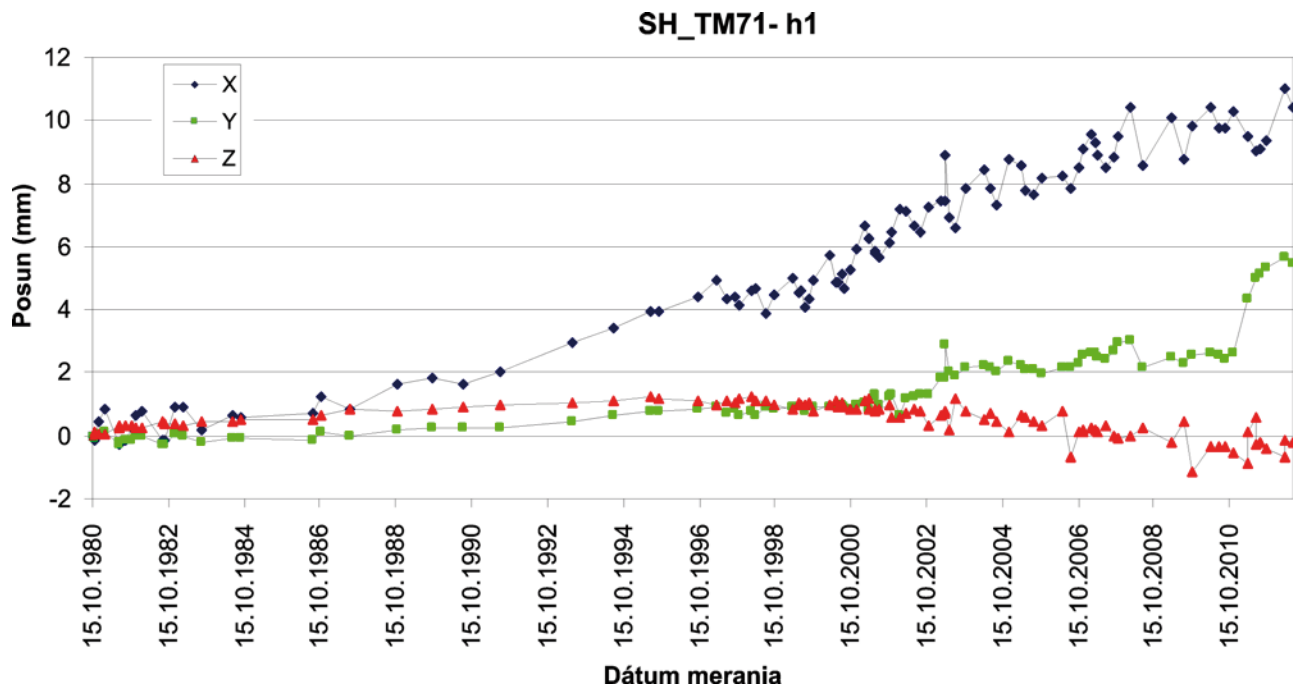
Obidva prístroje monitorujú plazivý pohyb dvoch travertínových blokov (na východnejšom bloku stojí Perúnova skala) pozdĺž trhliny širokej 113 cm v podloží vonkajšieho obvodového múra na východnej strane hradu (obr. 5). Trhlina má orientáciu 283/87° (smer sklonu/sklon). V minulosti sa trhlina prejavila aj v nadložnom vonkajšom múre, ktorý musel byť rekonštruovaný (vyplnený murivom).

Dilatometer TM-71-h1 je najstarším nepretržite fungujúcim prístrojom na Spišskom hrade. Od inštalácie starého typu prístroja prešlo 32 rokov. V roku 1997 bol pôvodný prístroj P1 poškodený náhlym posunom bloku (cca 1,5 cm pokles) do takej miery, že musel byť nahradený novým. Vďaka novému softvéru MSDilat (Stercz, 2004) sa podarilo zachovať kontinuitu meraní. Do roku 2009 sa údaje namerané prístrojom odčítavali s frekvenciou 1 – 7 x ročne (výnimkou bol rok 1992, z ktorého údaje chýbajú). Od roku 2010 sa frekvencia zberu údajov zvýšila na 2 x mesačne. Výsledky dlhodobého monitoringu do konca roku 2011 (obr. 6) preukázali výrazný pohyb oboch monitorovaných blokov v blízkosti Perúnovej skaly, a to vo všetkých troch osiach. Celkové rozšírenie trhliny ( $x$ ) dosiahlo 11,14 mm, šmykový posun pozdĺž trhliny ( $y$ ) 5,76 mm a pokles vonkajšieho bloku smerom do Podhradskej jaskyne 0,218 mm. Pohyb blokov spôsobil opätovné porušenie steny vonkajšieho múra, a to aj napriek tomu, že stará trhlina bola v roku 1992 opravená (vyplnená murivom). Výsledky



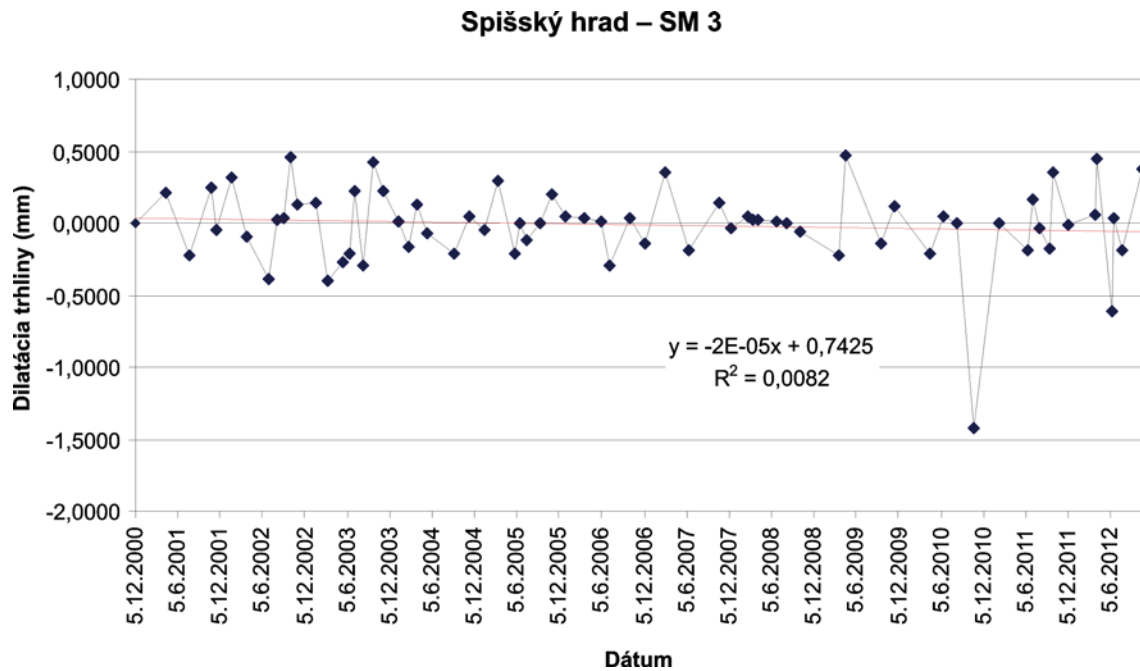
Obr. 5. Pozícia dilatometrov TM-71-h1 (P1), TM-71-1 a stanovišť dilatometrov SM2 a SM3.

Fig. 5. Location of the TM-71-h1 (P1), TM-71-1 crack gauges and positions of the extensometers SM2 and SM3.



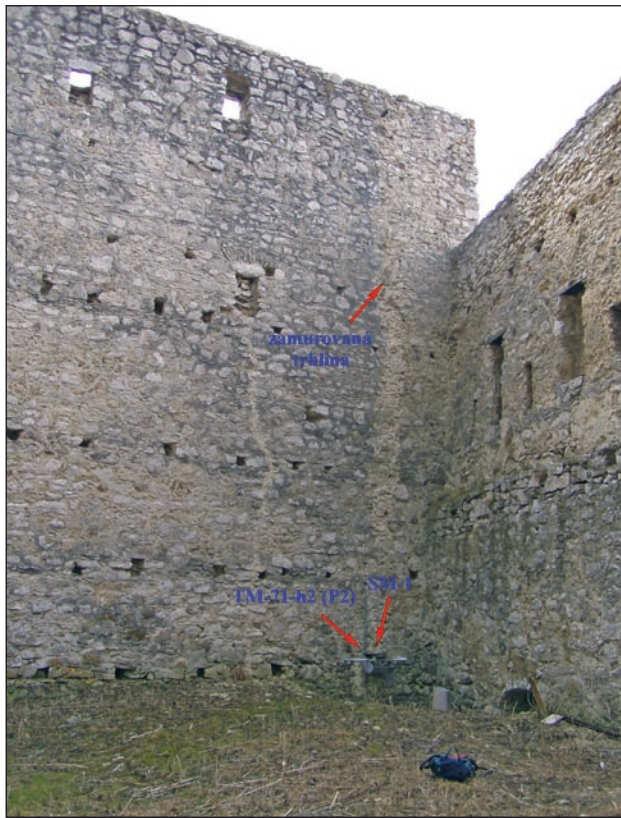
Obr. 6. Graf posunu travertínových blokov pozdĺž osí  $x$ ,  $y$  a  $z$  zaznamenaný dilatometrom TM-71-h1.

Fig. 6. Diagram of travertine block displacements along axes  $x$ ,  $y$  and  $z$  detected by the TM-71-h1 extensometer.



**Obr. 7.** Výsledky meraní pohybu blokov dilatometrom SM3 ( $y$  = regresná rovnica lineárnej trendovej čiary,  $R^2$  = koeficient determinácie).

**Fig. 7.** Results of block displacement measurements by the extensometer SM3 ( $y$  = equation of linear regression line,  $R^2$  = coefficient of determination).



**Obr. 8.** Inštalácia dilatometra TM-71-h2 na zamurovanej trhline priečného múra na II. nádvorí a pozícia stanovišťa SM1.

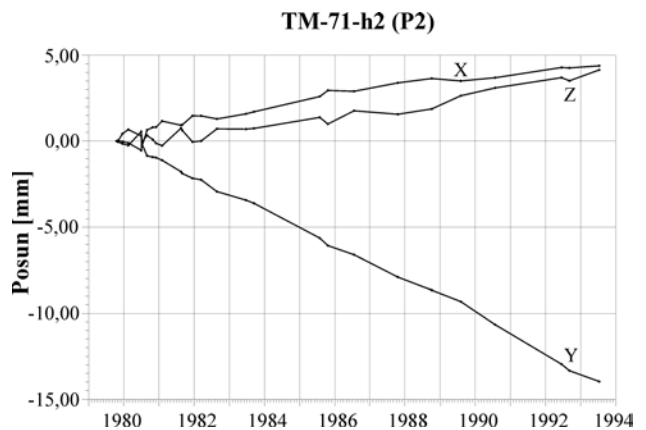
**Fig. 8.** The TM-71-h2 installation on built-in transverse crack located at II. courtyard and position of the extensometer SM1.

potvrdili, že otváranie trhliny je progresívne a dosahuje v priemere 0,359 mm za rok.

Výsledky meraní dilatometrom SOMET SM3 do roku 2011 otváranie trhliny nepotvrdili (obr. 7).

#### *Dilatometre TM-71-h2 (pôvodne P2) a SM1*

Obidva dilatometre zaznamenávajú priamo vývoj trhliny v priečnej stene na II. nádvorí, zamurovanej v roku 1994 (obr. 4 a 8), resp. plazivý pohyb podložných travertínových blokov pod stenou. Pôvodný prístroj P2 bol nainštalovaný v roku 1979 priamo v širokej trhline (cca 50 cm)



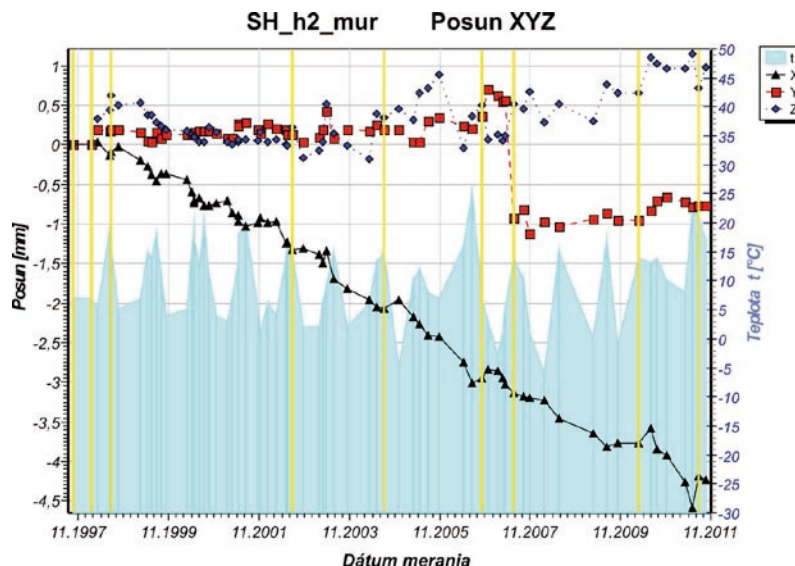
**Obr. 9.** Graf posunu travertínových blokov pozdĺž osí x, y a z zaznamenaný dilatometrom P2 (TM-71-h2) v rokoch 1979 – 1994.

**Fig. 9.** Diagram of travertine block displacements along axes x, y and z detected by the P2 (TM-71-h2) extensometer during the period 1979 – 1994.



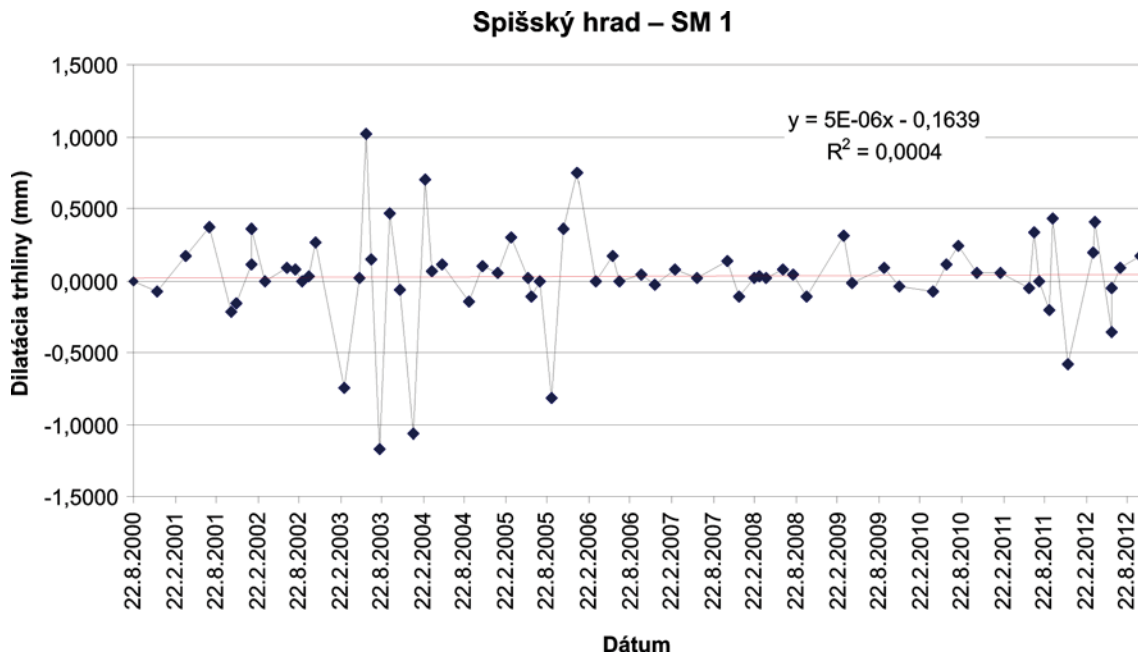
v spodnej časti steny a fungoval do decembra roku 1994, keď bol odmontovaný pre rekonštrukciu hradu. Výsledky 15-ročných meraní (obr. 9) preukázali najväčší pohyb blokov na hrade, ktorý bol interpretovaný ako rozširovanie trhliny (4,5 mm), ľavostranný posun (14 mm) a pokles spodnej časti steny (4 mm). Pohyby rovnakého charakteru platia aj pre obidva travertínové bloky pod stenou. Priestorový pohyb možno interpretovať ako šikmý ľavostranný pokles spodného bloku sprevádzaný súčasne jeho nakláňaním na západ.

Po takmer troch rokoch (december 1994 – október 1997) bol na rovnakom mieste nainštalovaný nový typ dilatometra TM-71, ktorý dostal označenie TM-71-h2. Vzhľadom na odlišný spôsob jeho inštalácie v porovnaní so starým prístrojom a dlhé obdobie bez zberu údajov nebolo možné spojiť obidva súbory údajov. Merania od roku 1997 sú považované za samostatné monitorovacie obdobie. Z grafu posunov (obr. 10) je zrejmé, že plazivý pohyb blokov pokračoval aj počas ďalších 15 rokov, ale bol výrazne pomalší. Lavostranný posun spodnej časti steny



**Obr. 10.** Graf posunu travertínových blokov pozdĺž osí x, y a z zaznamenaný dilatometrom TM-71-h2 (P2) v rokoch 1997 – 2011 (t – teplota v okolí prístroja počas merania, zvislá žltá čiara – prestavenie prístroja).

**Fig. 10.** Diagram of travertine block displacements along axes x, y and z detected by the TM-71-h2 (P2) extensometer during the period 1997 – 2011 (t – temperature near by the extensometer during measurement, vertical yellow line – reset of the extensometer).



**Obr. 11.** Výsledky meraní pohybu blokov dilatometrom SM1 na Spišskom hrade.

**Fig. 11.** Results of block displacement measurements by the extensometer SM1 at the Spiš Castle.



sa podstatne spomalil a dosiahol len 1,48 mm, podobne aj jej pokles (0,98 mm). Rýchlosť otvárania zamurovanej trhliny (pohyb pozdĺž osi  $x$ ) však zostala v porovnaní s predchádzajúcim obdobím približne rovnaká (celkový posun dosiahol 4,29 mm). Berúc do úvahy výsledky inžinierskogeologického prieskumu realizovaného na hrade (Malgot et al., 1992) a staršiu interpretáciu pohybu blokov na tomto stanovišti (Fussgänger, 1985), možno konštatovať, že pokles spodného bloku a jeho lavostranný posun sa po realizácii II. etapy sanačných prác (1997 – 1998) podstatne spomalil. Trend a rýchlosť otvárania trhliny nasvedčujú tomu, že spodný blok sa nakláňa smerom na západ.

Dilatometrom SOMET SM1 bolo pomalé otváranie trhliny potvrdené (obr. 11).

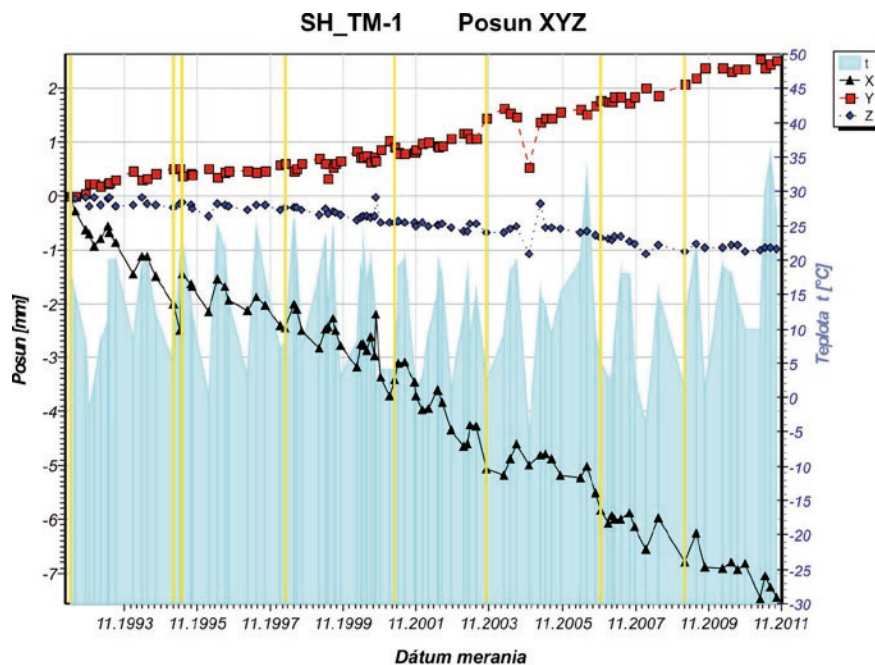
#### Dilatometre TM-71-1 a SM2

Prístroje zabezpečujú monitoring spodnej časti širokej trhliny za Perúnovou skalou, čím dopĺňajú merania z jej vrchnej časti, v ktorej je inštalovaný dilatometer TM-71-h1 (obr. 5). Dilatometer TM-71-1 bol inštalovaný v roku 1992. Berúc do úvahy jeho orientáciu, výsledky dlhodobého monitoringu pohybu blokov oddelených trhlinou (obr. 12) tiež potvrdzujú jej dlhodobé a rovnomerné rozširovanie (7,45 mm), lavostranný šmykový posun (2,51 mm) a pozvoľný pokles (0,99 m) východného bloku (Perúnovej skaly). V priestore sa pohyb dá interpretovať ako vzdalovanie sa Perúnovej skaly od susedného západne ležiaceho bloku (masívu), jej poklesávanie do priestoru Podhradskej jaskyne a zároveň nakláňanie na SV. Priemerná rýchlosť otvárania trhliny zistená týmto dilatometrom je 0,37 mm za rok.

Dilatometrom SOMET SM2 bolo tiež potvrdené pomalé otváranie trhliny (obr. 13).

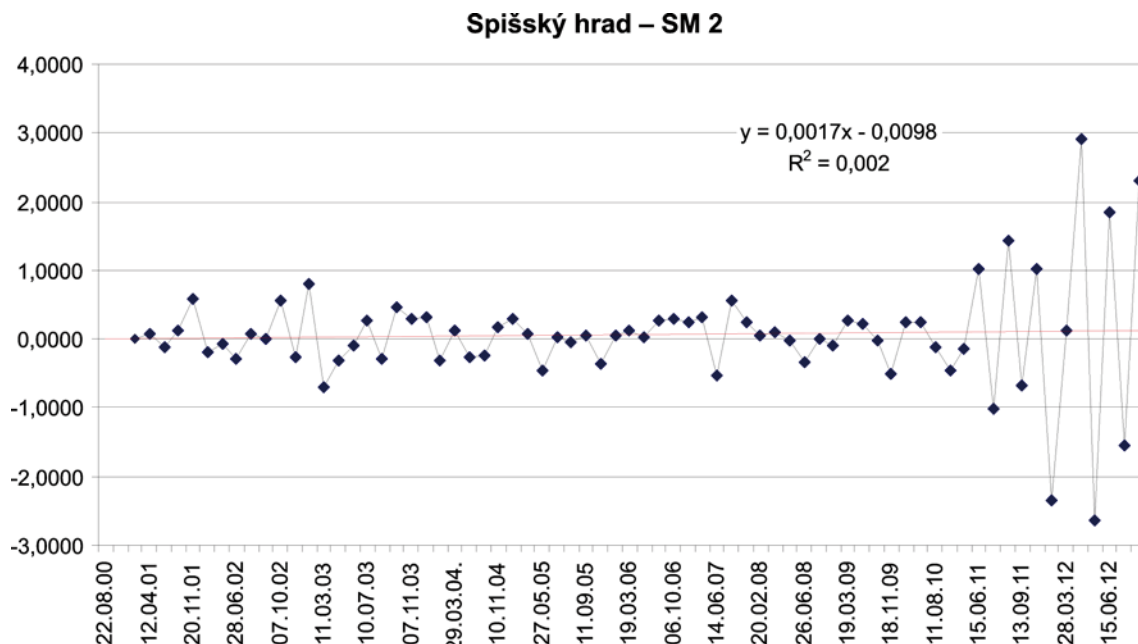
#### Dilatometer TM-71-2

Prístroj bol inštalovaný v trhlíne pod Perúnovou skalou, presnejšie pri vchode do Podhradskej jaskyne, ktorý sa nachádza na východnej strane hradu (obr. 4 a 14). Spodný (okrajový) travertínový blok je podopretý pod ním stojacim blokom, resp. priečnou murovanou stenou, ktorá je na ňom postavená. Merania od roku 1992 preukazujú výrazný pohyb obidvoch monitorovaných blokov, a to vo všetkých troch osiach  $x$ ,  $y$ ,  $z$  (obr. 15). Do konca roku 2011 bol zistený celkový posun presahujúci 5,2 mm (5,22 až 5,64 m). V priestore to znamená nakláňanie Perúnovej skaly (zužovanie trhliny), jej pokles do Podhradskej jaskyne a súčasne rotáciu doprava (lavostranný šmykový posun). Do konca roku 2000 sa nad vchodom do jaskyne nachádzal veľký travertínový balvan. Balvan tvoril prirodzenú oporu Perúnovej skaly, spomaľoval jej klesanie a zároveň prenášal časť hmotnosti na vrchnú časť rekonštruovanej murovanej steny. Dlhodobým tlakovým pôsobením došlo k vzniku deformácií v murovanej stene. Na zastavenie deštrukčných účinkov balvana na túto stenu bolo navrhnuté jeho odstránenie, a to použitím trhavy. Pred samotným odstrelom bolo nevyhnutné dočasne odinštalovať dilatometer, ktorý by mohol byť poškodený. Po odstrel balvana došlo k náhlemu poklesu Perúnovej skaly asi o 1,5 cm, čo sa prejavilo poklesom ľavej konzoly prístroja (obr. 16). Po jej oprave bol dilatometer 19. 12. 2000 opäť nainštalovaný. Z priebehu posunov pozdĺž osi  $x$  je zrejme (obr. 15), že po odstránení balvana došlo k zrýchleniu otvárania trhliny, t. j. k poklesu Perúnovej skaly. Z tohto



Obr. 12. Graf posunu travertínových blokov pozdĺž osí  $x$ ,  $y$  a  $z$  zaznamenaný dilatometrom TM-71-1.

Fig. 12. Diagram of travertine block displacements along axes  $x$ ,  $y$  and  $z$  detected by the TM-71-1 extensometer.



**Obr. 13.** Výsledky meraní pohybu blokov dilatometrom SM2 na Spišskom hrade.

**Fig. 13.** Results of block displacement measurements by the extensometer SM2 at the Spiš Castle.



**Obr. 14.** Inštalácia dilatometra TM-71-2 v trhline pod Perúnovou skalou (vchod do Podhradskej jaskyne).

**Fig. 14.** The TM-71-2 installation inside the crack beneath the Perun's rock (entrance to the Podhradska cave).

pohľadu bolo rozhodnutie odstrániť balvan z priestoru vchodu do Podhradskej jaskyne nesprávne.

#### *Dilatometer TM-71-jaskyňa*

Merania v Puklinovej jaskyni (obr. 4 a 17) začali v októbri roku 2003. Dilatometer bol nainštalovaný v širokej (cca 1,9 m) trhline, ktorá sa nachádza v najspodnejšej časti dvoch mohutných travertínových blokov. Doterajšie výsledky preukázali rozdielny pohyb v smere jednotlivých osí (obr. 18). Jednoznačný je trend pomalého otvárania trhliny, ktoré koncom roku 2011 dosiahlo cca 0,2 mm. Počiatkový rýchly a významný pokles jedného z blokov, ktorý dosiahol do konca roku 2005 hodnotu 2,48 mm, sa spomalil a od polovice roku 2006 dokonca zmenil na malý zdvih. Takýto vývoj by sa dal vysvetliť rozdielnou zmenou plasticity podložných zvetraných flyšových ílovcov (ílov) pod blokmi. Výrazný, ale krátkodobý (do konca roku 2004) bol šmykový pohyb pozdĺž trhliny. Pri hodnote posunu 1,76 mm sa pohyb ustálil a pretrváva do súčasnosti.

Doterajšie výsledky meraní dilatometrami SOMET SM4 a SM5 v trhline pod Románskym palácom nachádzajúcim sa na severnom okraji hradu (obr. 4) preukazujú navzájom protichodný (opačný) pohyb, t. j. mierne otváranie na západnej a mierne zatváranie na východnej strane monitorovanej trhliny.

#### *Lokalita Oravský hrad*

Hrad je jedným z našich najkrajších stredovekých historických objektov a je národnou kultúrnou pamiatkou. Bol postavený v 13. storočí a stal sa sídlom Oravskej

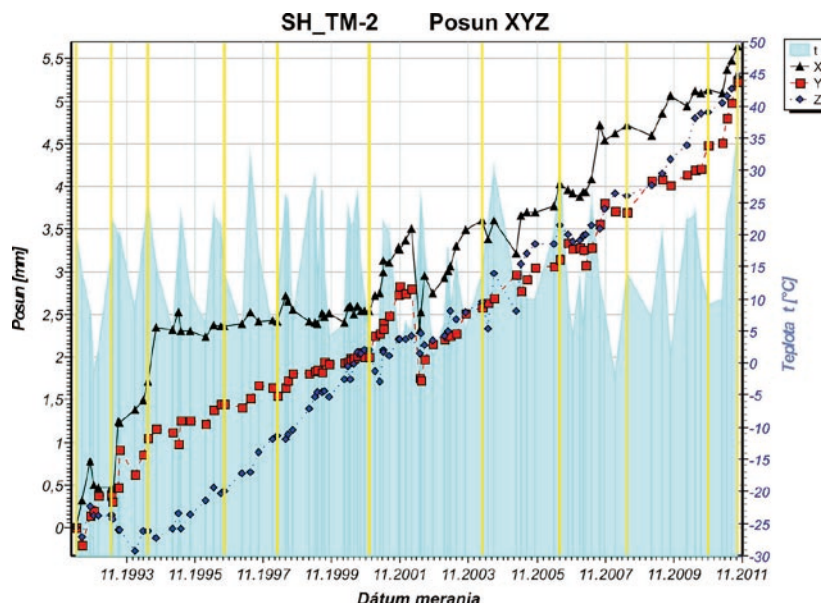
župy. V minulosti prešiel viacerými rekonštrukciami a prestavbami. Za svoj dnešný vzhľad vďačí posledným majiteľom, Pálfiomcom. V roku 1800 vyhorel a bol veľmi poškodený. Posledná a najvýznamnejšia komplexná obnova hradu sa uskutočnila v rokoch 1953 – 1968. Interiér budov sa zachoval z čias gotiky, renesancie a romantizmu. Najzachovalejší je interiér kaplnky so zariadením z roku 1752.

Horná časť hradu je pomerne dobre zachovaná a leží na vápencovom brale cca 112 m nad riekou Orava. Bralo tvoria rôzne druhy vápencov (hľuznaté, rádiolárové, kremité) jurského veku. Objekty v spodnej časti hradu boli postavené

na zvetraných slienitých vápencoch a slieňovcoch a na viacerých miestach sú porušené puklinami a trhlinami. Horniny hradného brala reprezentujú podbielsku sukcesiu bradlového pásma (Gross et al., 1994).

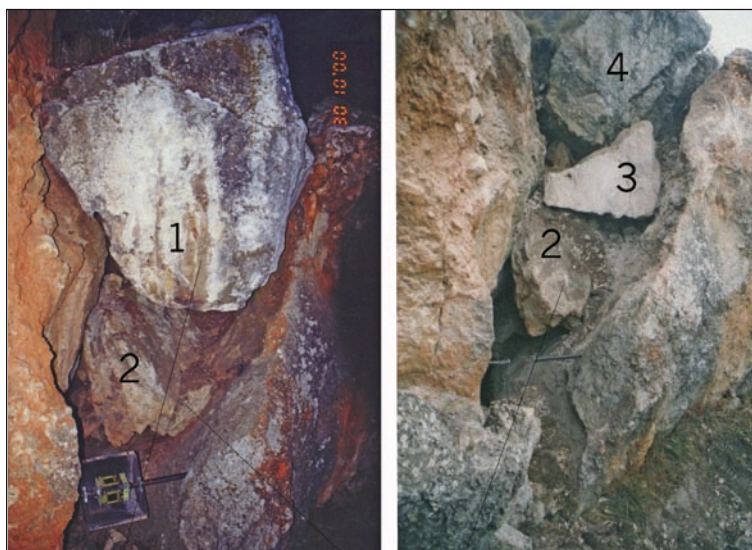
Dilatometer TM-71 staršieho typu (nemeria rotáciu blokov) bol nainštalovaný v spodnej časti hradu (obr. 19), presnejšie v hrubom obvodovom múre objektu stojaceho na tektonickej poruche prebiehajúcej v skalnom podloží, v roku 1983.

Lokalita je monitorovaná v spolupráci s pracovníkmi *Ústavu štruktúry a mechaniky hornin Akadémie vied ČR* v Prahe, ktorí prístroj inštalovali. Za viac než 28 rokov boli



Obr. 15. Graf posunu travertínových blokov pozdĺž osí x, y a z zaznamenaný dilatometrom TM-71-2.

Fig. 15. Diagram of travertine block displacements along axes x, y and z detected by the TM-71-2 extensometer.



Obr. 16. Stanovište dilatometra TM-71-2 pod Perúnovou skalou: prístroj pred odstreľom balvana (1) v roku 2000 (vľavo), situácia po odinštalovaní prístroja, následnom odstrele a rozpade balvana na menšie kusy (3 a 4).

Fig. 16. The TM-71-2 site located beneath the Perún's rock: extensometer before blasting of boulder (1) in 2000 (left), situation after the extensometer removal and boulder falling to smaller pieces (3 and 4).



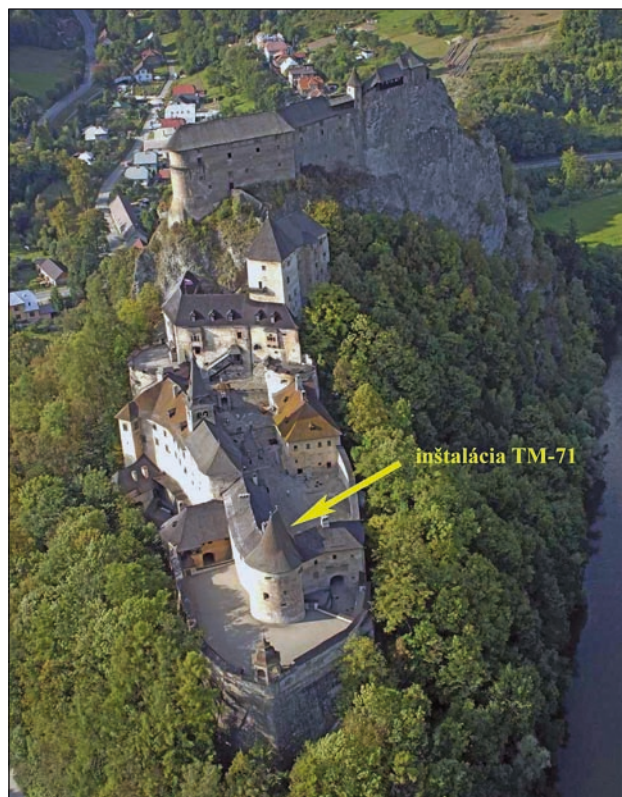
údaje z prístroja odčítavané 1 – 6 x ročne. Získané výsledky preukázali, že posuny na meranej trhline nepresiahli 3 mm (obr. 20). Z obrázku je zrejmé, že s výnimkou začiatku roka 2003, keď nastal výrazný posun vo všetkých 3 osiach, a to

v rozsahu 0,35 – 0,87 mm, sa porušovanie podzákladia a obvodového muriva minimalizovalo. Napriek malému poklesávaniu (od roku 1995) a šmykovému pohybu (1995 až 2003) možno považovať sanačné práce realizované



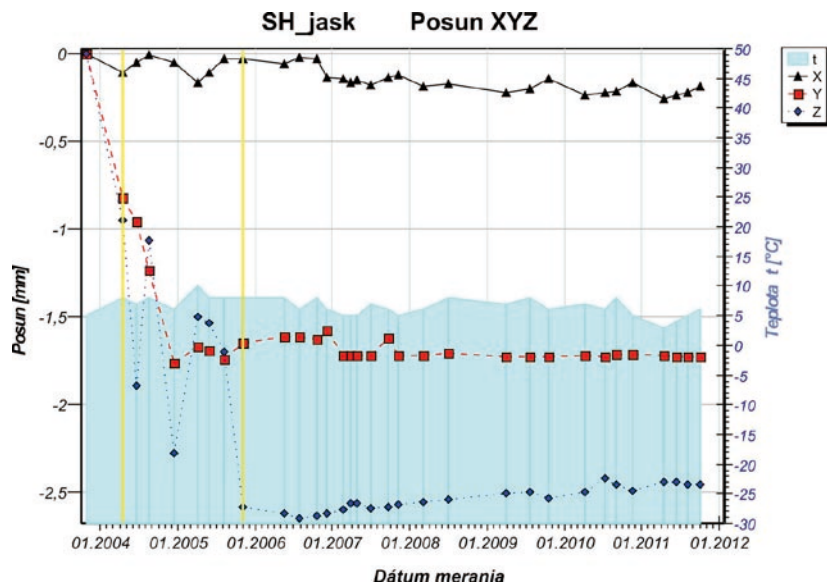
**Obr. 17.** Vchod do Puklinovej jaskyne (TM-71-jaskyňa je na inštalovaný vnútri jaskyne).

**Fig. 17.** Entrance to the Puklinová cave (TM-71-jaskyňa is installed inside the cave).



**Obr. 19.** Pozícia dilatometra TM-71 (starý typ) na Oravskom hrade.

**Fig. 19.** Location of the TM-71 extensometer (old type) at the Orava Castle.



**Obr. 18.** Graf posunu travertínových blokov pozdĺž osí x, y a z zaznamenaný dilatometrom TM-71-jaskyňa.

**Fig. 18.** Diagram of travertine block displacements along axes x, y and z detected by the TM-71-jaskyňa extensometer.



v roku 1995 za účinné. Na stabilizáciu podložia boli použité mikropilóty a kotvy. Hlavné výsledky sanácie hradného brala publikovali Košťák a Sikora (2000). Tri merania v roku 2011 potvrdili len nepatrný pokles (0,027 mm) oproti predošlému roku. Trend pomalého poklesávania jedného z monitorovaných blokov, ktorý sa v roku 2003 zmiernil, je evidentný. Celkový pokles od roku 2003 dosiahol 0,36 mm. Posuny v ďalších 2 smeroch (osi x a y) sú zanedbateľné.

### Lokalita Strečno

Hrad Strečno sa nachádza na severnom okraji Malej Fatry (JJV od Žiliny), presnejšie na 103 m vysokom skalnom brale nad riekou Váh. Pôvodná stavba sa datuje do 13. – 14. storočia. V 17. storočí vojská kráľa Leopolda I. strhli časť vonkajších obranných múrov a niekoľko budov. Od tohto obdobia bol hrad opustený, chátral a postupne sa stával zrúcaninou. Ruiny hradu boli zakonzervované v rokoch 1978 – 1994. V súčasnosti patrí k našim najlepšie zachovaným historickým pamiatkam.

Z geologického hľadiska je hradný vrch súčasťou chočského príkrovu (hronika), ktorý je tu litologicky zastúpený rôznymi druhmi karbonátových hornín, predovšetkým gutensteinskými vápencami a vápencami s vložkami dolomitických vápencov a dolomitov (Rakús et al., 1988). Vysoký stupeň gravitačného rozvolnenia je dôsledkom porušenia hornín v podloží hradu viacerými zlomami a puklinovými systémami, ako aj intenzívneho zvetrávania. Predovšetkým objekty vo východnej časti hradu boli postavené na silno tektonicky a zvetrávaním porušených dolomitových blokoch, ktoré majú miestami charakter previsu. Tieto miesta predstavujú potenciálne riziko zrútenia hradných objektov alebo ich častí. Jedným z najnebezpečnejších je skalné bralo (previs) pod kaplnkou v najvýchodnejšej časti hradu, pod ktorým vedie frekventovaná cesta I. triedy spájajúca Žilinu s Martinom (obr. 21). Práve do trhliny za ním bol v roku

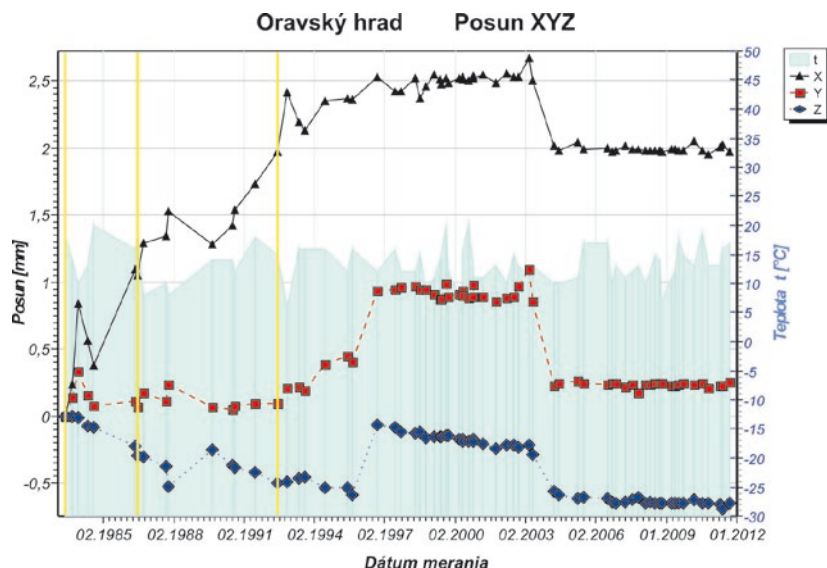


Obr. 21. Pozícia dilatometra TM-71 v trhline pod kaplnkou hradu Strečno.

Fig. 21. Location of the TM-71 extensometer inside the crack beneath the chapel at the Strečno Castle.

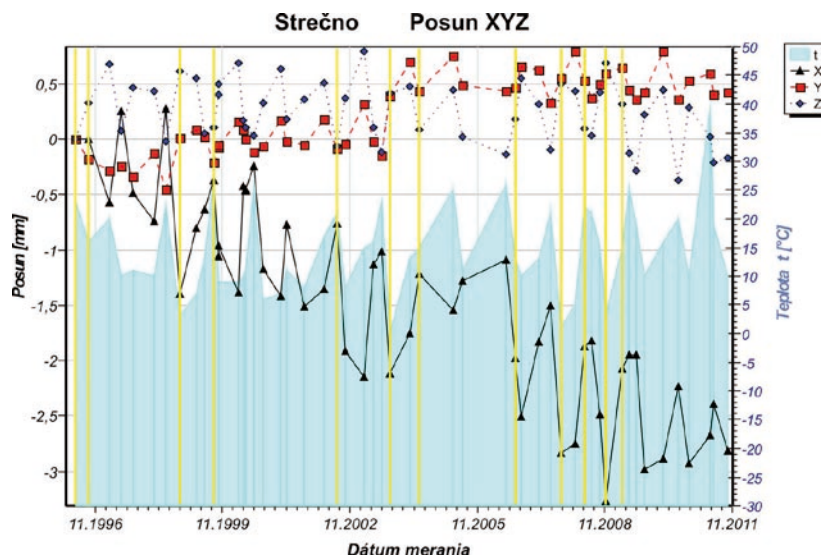
1996 nainštalovaný dilatometer TM-71. Hlavným cieľom monitoringu bolo zistenie dlhodobej účinnosti starších sanačných opatrení, resp. vývoja deformácií okrajového bloku ohraničeného trhlinou.

Výsledky monitorovania do roku 2011 preukázali jasný trend progresívneho rozširovania trhliny, t. j. pohyb v smere osi x (obr. 22). Napriek kolísaniu hodnôt spôsobenému sezónnymi zmenami teploty celkové otvorenie trhliny dosiahlo 2,82 mm (prepočítaná stredná hodnota), čo predstavuje priemerný ročný posun 0,18 mm. Toto zistenie naznačuje, že účinnosť kotiev spevňujúcich skalný previs sa od ich realizácie znížila do takej miery, že nestačia prenášať napätia vyvolávané jeho tiažou. Celkový pokles skalného bloku dosiahol 0,17 mm. Hoci je pokles minimálny, je zreteľný (obr. 22). Posun v smere osi y (šmykový pohyb pozdĺž trhliny) je zanedbateľný.



Obr. 20. Graf posunu blokov pozdĺž osí x, y a z zaznamenaný dilatometrom TM-71 na Oravskom hrade.

Fig. 20. Diagram of block displacements along axes x, y and z detected by the TM-71 installed at the Orava Castle.



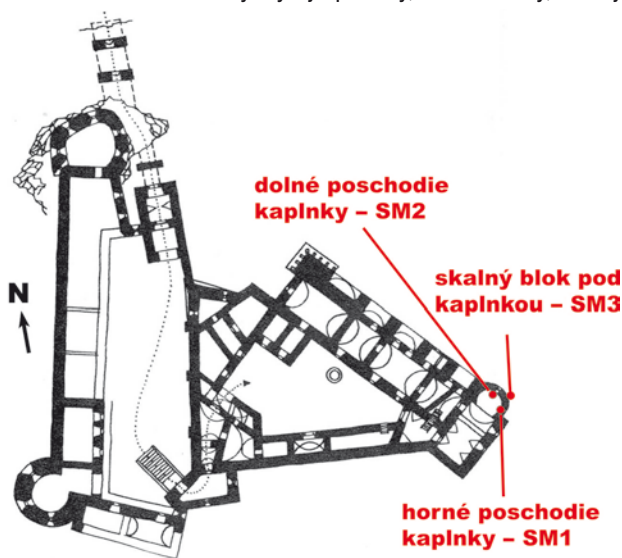
Obr. 22. Graf posunu blokov pozdĺž osí x, y a z zaznamenaný dilatometrom TM-71 na hrade Strečno.

Fig. 22. Diagram of block displacements along axes x, y and z detected by the TM-71 installed at the Strečno Castle.

### Lokalita Uhrovec

Ruina hradu sa nachádza neďaleko Uhrovského Podhradia (Strážovská vrchovina) na brehu v nadmorskej výške 591 m. Hrad bol postavený v polovici 13. storočia. Neskororománska pevnosť onedlho prešla do rúk Matúša Čáka, neskôr ju vlastnili napríklad Žigmund Luxemburský, Ctibor zo Ctiboríc alebo rod Zaiovcov. Po odstahovaní majiteľov do iných kaštieľov význam hradu upadal a hrad začal chátrať.

Hradný vrch ohraničujú zo severu, severovýchodu a východu skalné steny vysoké 2 – 15 m s veľmi strmým sklonom. Lokálne sa vyskytujú previsy, zvislé steny, ale aj



Obr. 23. Pozícia stanovišť dilatometrov SM1 – SM3 na hrade Uhrovec.

Fig. 23. Locations of the extensometers SM1 – SM3 at the Uhrovec castle.

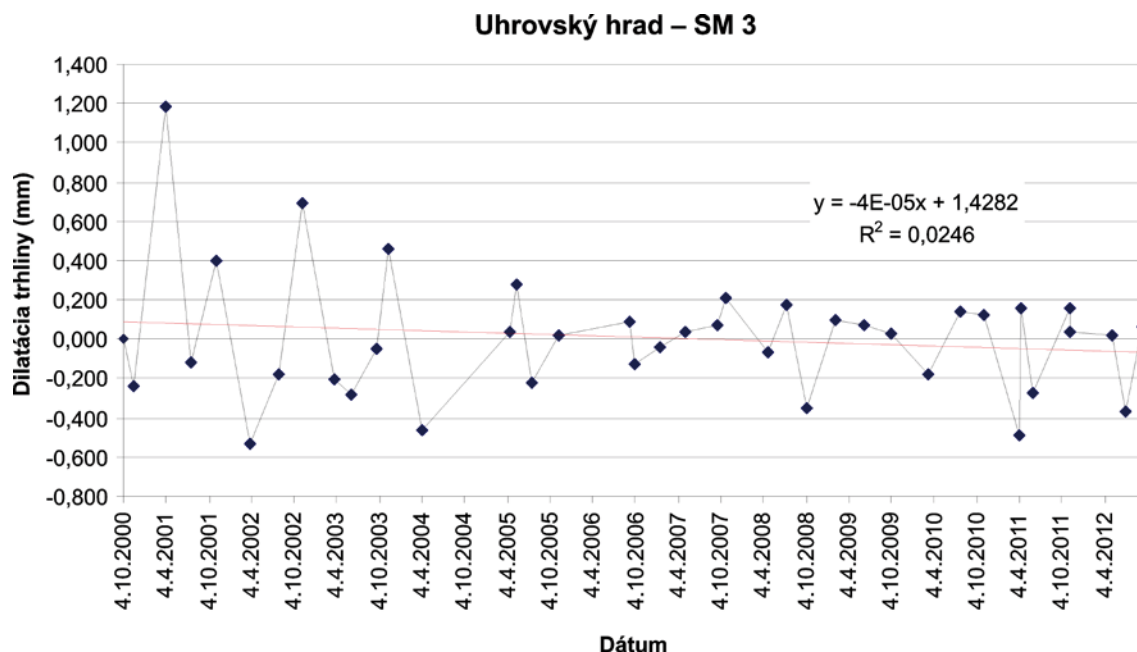
skalné veže a bloky s náznakmi nakláňania a oddeľovania od masívu (skalné bralo pod kaplnkou). Podložie hradu aj celý hradný vrch je budovaný mezozoickými (stredný trias) dolomitmi a brekciovitými dolomitmi svetlosivej farby. Skalné podložie je porušené viacerými zlomami a puklinovými systémami, medzi ktorými prevládajú smery VSV – ZJZ (sklon na SSZ), SSV – JJZ (sklon na ZSZ) a S – J až SSV – JJZ (sklon na Z až ZSZ) (Holzer a Letko, 1993). Mnohé pukliny sú geneticky späté so zónou uvoľňovania napätí súvisiacou so zdvihom masívu, resp. vznikli v dôsledku spolupôsobenia erózie a gravitačného rozpadu blokov.

V roku 2000 boli na hrade zriadené tri stanovišťa dilatometrov typu SOMET (SM1 – SM3). Všetky sú situované pozdĺž zvislej pukliny, ktorá vedie cez Románsku kaplnku až do jej podzákladia (obr. 23). Stanovište dilatometra SM1 je umiestnené na hornom poschodí hradnej kaplnky. V rokoch 2001 – 2004 bolo nedostupné v dôsledku zrútenia hradného múru. Pevné body dilatometra SM2 sú umiestnené v interiéri kaplnky, dilatometra SM3 na brehu pod kaplnkou.

Merania na všetkých troch stanovištiach potvrdzujú pomalé zatváranie trhliny a jej spojitost s kaplnkou. Najvyššia hodnota posunu (0,157 mm) bola zaznamenaná na stanovišti SM3 (obr. 24).

### Lokalita Pajštún

Hrad sa nachádza v juhozápadnej časti Malých Karpát. V minulosti patril do sústavy pohraničných hradov, ktoré od 13. storočia plnili funkciu ochrany severozápadných hraníc uhorského štátu. Hradná skala má tvar šošovky a tvoria ju borinské vápence spodnojurského veku, ktoré boli zaradené do borinskej sukcesie tatrika (Polák et al., 2011). Tie majú vyššiu odolnosť voči zvetrávaniu ako okolité vrstevnaté pieskovce striedajúce sa s ílovitými bridlicami. V dôsledku toho masív vystupuje z okolitého mierne zvlneného reliéfu. Južná, východná a čiastočne

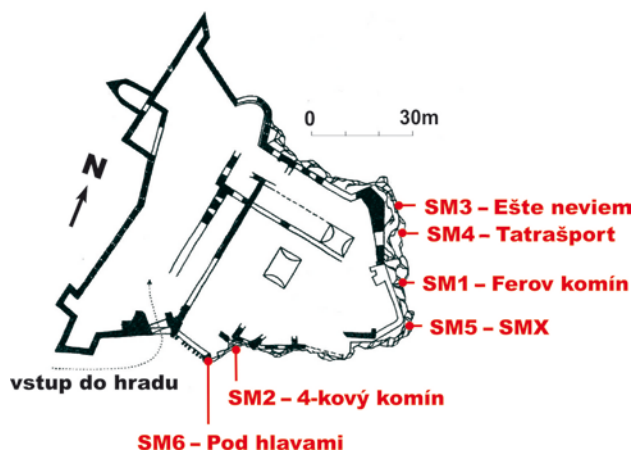


Obr. 24. Diagram posunov zistených dilatometrom SM3 v trhline pod kaplnkou na hrade Uhrovec.

Fig. 24. Diagram of displacements detected by the extensometer SM3 inside the crack beneath the chapel of the Uhrovec Castle.

aj severná stena masívu hradnej skaly má strmý sklon ( $40^\circ - 50^\circ$ ), miestami sa vyskytujú previsy. Horninový masív je porušený viacerými dislokačnými systémami (zlomami, trhlinami/puklinami), medzi ktorými dominujú dva s protiklonnou orientáciou VSV – ZJZ a SSZ – JJV so strmým sklonom ( $80^\circ - 89^\circ$ ). Vo východnej časti masívu sa vplyvom ťahových napätí vytvorili optimálne podmienky na vznik pomalých, podpovrchových svahových deformácií, predovšetkým na gravitačné rozvolnenie svahov a odvalové rútenie (Vlčko et al., 1997).

V tejto lokalite bolo zriadených 6 monitorovacích stanovišť (obr. 25), tri v roku 2003 a tri v roku 2004.



Obr. 25. Pozícia stanovišť dilatometrov SM1 – SM6 na hrade Pajštún.

Fig. 25. Locations of the extensometers SM1 – SM6 at the Pajštún Castle.

Na všetkých stanovištiach sa prejavuje výrazná oscilácia pohybov, ktoré pravdepodobne odrážajú extrémne teplotné alebo zrážkové výkyvy. Interval maximálnych hodnôt posunov sa pohyboval v rozmedzí 0,42 – 0,95 mm. Trendy pohybov v troch prípadoch potvrdili pozvoľné otváranie trhliny (SM2 – SM4), v troch jej zatváranie (SM1, SM5, SM6). Najvýraznejší trend rozširovania trhliny je dokumentovaný na stanovišti SM3, kde celkový pohyb dosiahol 0,266 mm (obr. 26).

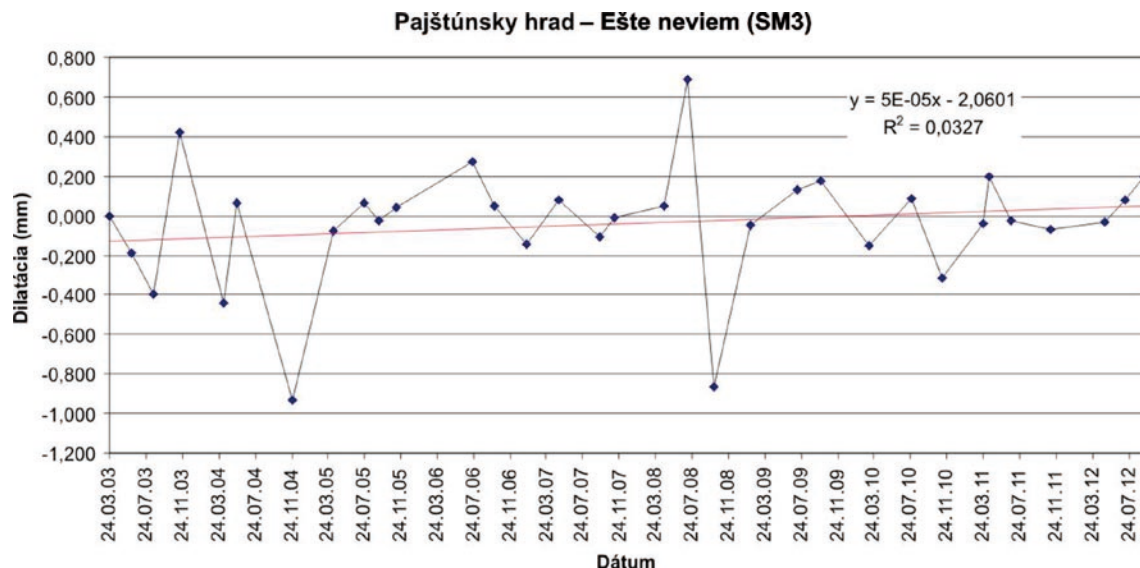
### Lokalita Plavecký hrad

Plavecký hrad patrí svojou architektúrou medzi najlepšie zachované hrady v oblasti Malých Karpát. Zrúcanina sa nachádza na západnom úpätí pohoria nad obcou Plavecké Podhradie. Bralo, na ktorom je hrad postavený, tvorí výraznú dominantu okrajovej časti pohoria na jeho styku s Borskou nížinou. Prevýšenie brala dosahuje oproti nížine 170 – 180 m.

Hrad vznikol ako kráľovská pohraničná pevnosť v rokoch 1256 – 1273. Vlastnil ho i Ctibor zo Ctiboríc, neskôr grófi zo Sv. Jura a Pezinka, Szerédyovci, Salmovci, Fugerovci a Balasovci. Od roku 1641 až do 20. storočia boli pánmi hradu Pálfiiovci. V roku 1707 hrad počas troch dní ostreľovalo cisárske vojsko v boji proti kuruckým povstalcem, čím zničilo jeho 450-ročnú slávu.

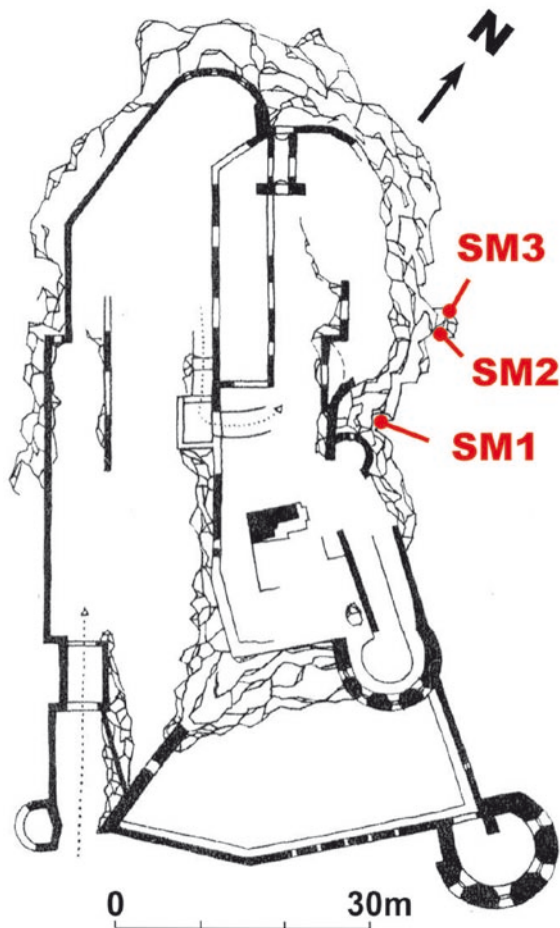
Hradný vrch je zo severnej, severovýchodnej a východnej strany ohraničený skalnými stenami výšky 25 – 40 m s priemerným sklonom  $70^\circ - 80^\circ$ . Miestami sú steny vertikálne. Horninový masív hradnej skaly je intenzívne porušený systémom tektonických línií, puklín a gravitačných trhlín s rozdielnym hĺbkovým a priestorovým dosahom. Najvýraznejší systém tektonických diskontinuit





**Obr. 26.** Diagram posunov zistených dilatometrom SM3 v trhline nazvanej Ešte neviem (hrad Pajštún).

**Fig. 26.** Diagram of displacements detected by the extensometer SM3 inside the crack named Ešte neviem at the Pajštún Castle.



**Obr. 27.** Pozícia stanovišť dilatometrov SM1 – SM3 na Plaveckom hrade.

**Fig. 27.** Locations of the extensometers SM1 – SM3 at the Plavecký Castle.

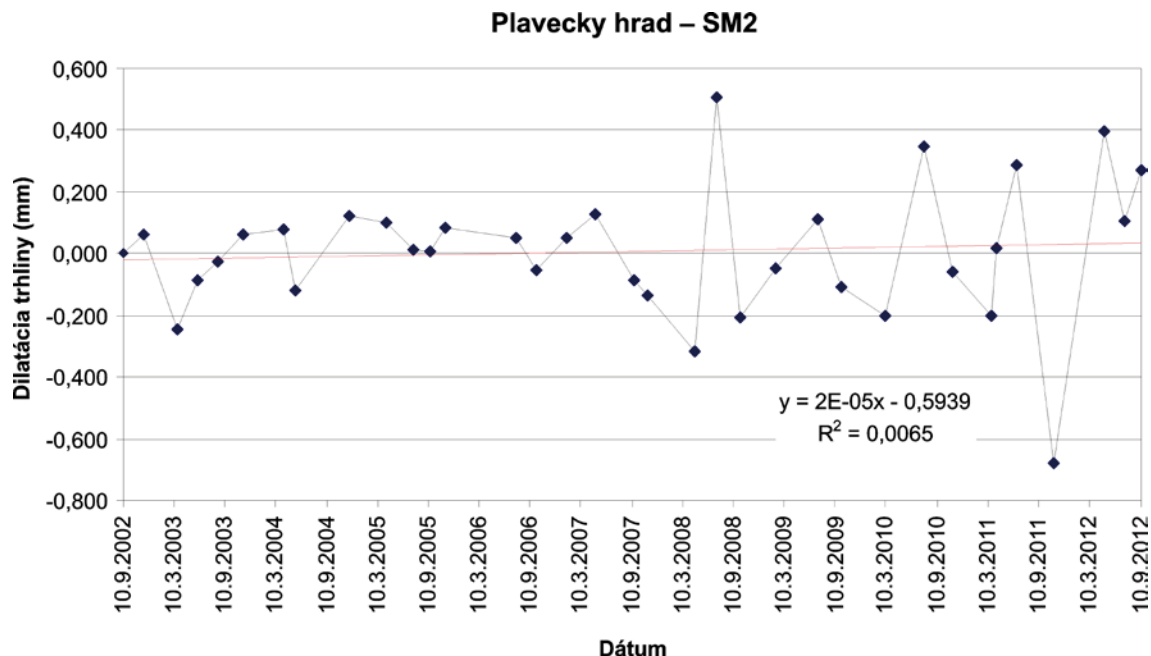
má orientáciu VSV – ZJZ s hodnotami smeru sklonu  $160^\circ - 180^\circ$ , resp.  $310^\circ - 350^\circ$ , a sklonom  $65^\circ - 85^\circ$  na JV, resp. SZ. Litologicky sú tu zastúpené prevažne svetlé wettersteinské vápence a wettersteinské dolomity hronika (Polák et al., 2011).

Vznik pomalých, podpovrchových svahových deformácií, predovšetkým rozvolňovania svahov a odvalového rútenia, bol podmienený priaznivým geologicko-geomorfologickým vývojom a štruktúro-geologickou stavbou územia v okolí Plaveckého hradu (Vičko et al., 1994).

V roku 2002 boli na vybratých ťahových trhlinách na hrade zriadené dve monitorovacie stanovišťa, v roku 2004 tretie (obr. 27). Vo všetkých troch prípadoch sa meraniami potvrdil trend slabého rozširovania monitorovaných trhlín. Oscilácia pohybov odráža kolísanie teplôt. Výrazné pohyby sa často vyskytujú v prechodných ročných obdobiach, t. j. na jeseň a na jar. Maximálne rozšírenie monitorovanej trhliny (0,054 mm) bolo zistené na stanovišti SM2 (obr. 28).

#### **Lokalita Trenčiansky hrad**

Trenčiansky hrad leží na juhozápade Strážovských vrchov, ktoré patria k jedným z najrozsiahlejších, morfoštruktúrne najpestrejších jadrových pohorí Západných Karpát. Jeho história siaha do obdobia Rímskeho impéria, o čom svedčí nápis na hradnej skale z roku 179 n. l.. Dnešný hrad vznikol zrejme na mieste pôvodného hradiska ešte v čase Veľkomoravskej ríše. Koncom 13. storočia sa vlastníkom hradu stal palatín Matúš Čák. Z ďalších významných majiteľov hradu treba spomenúť napríklad kráľa Ľudovíta z Anjou, manželku Žigmunda Luxemburského Barboru a Štefana Zápoľského. V priebehu histórie hrad podliehal postupne rozširovaniu a prestavbám už existujúcich objektov, čím sa menil aj ich architektonický štýl. V polovici 16. storočia patril hrad



**Obr. 28.** Diagram posunov zistených dilatometrom SM2 na Plaveckom hrade.

**Fig. 28.** Diagram of displacements detected by the extensometer SM2 at the Plavecký hrad.

k najrozsiahlejším európskym hradom. V roku 1790 bol poškodený rozsiahlym požiarom. Konzerváciou v polovici 19. storočia sa predišlo rozpadu niektorých objektov hradu. Od konca 50. rokov minulého storočia sa uskutočňuje komplexná obnova hradu a konzervácia jeho opevnenia.

V marci roku 2003 sa zrútila 15 m vysoká a 20 m široká časť múra vonkajšieho opevnenia na západnej strane hradu. Z hlavných prirodzených príčin treba uviesť zvetrávanie hornín v podloží, vplyv podzemnej vody a klimatické faktory (zamŕzanie a rozmŕzanie vody v horninách a v murive). Z antropogénnych faktorov sú to najmä nevhodný spôsob povrchového odvodnenia hradu a nevhodná rekonštrukcia vonkajších múrov v minulosti. Po nákladnej sanácii zrúteného múra sa v roku 2011 začala

rozsiahla rekonštrukcia objektu Kasární s plánovaným rozpočtom takmer 2,5 mil. eur.

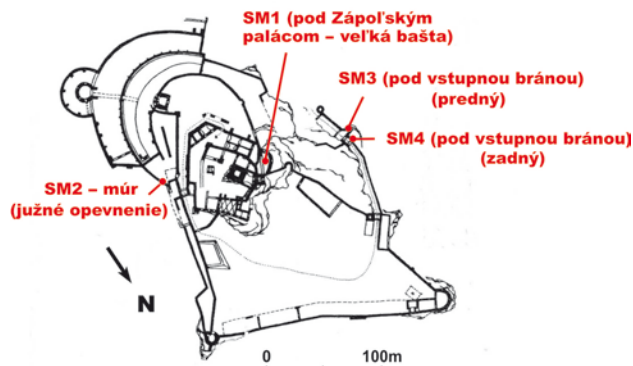
Hradné bralo tvorí troska chočského príkrovu spočívajúca na plastickom podloží krížňanského príkrovu. V areáli Trenčianskeho hradu sa nachádzajú strednotriasové (ladin) lavicovité až doskovité reiflingské hluznaté vápence bielovážskej sekvencie chočského príkrovu. Dolomity stredného triasu chočského príkrovu sa nachádzajú len v širšom okolí hradnej skaly. Bázu hradného vrchu, aj predkvartérne podložie údolia Váhu, budujú horniny pestrej pieskovcovoslieňovcovo-vápencovej formácie krížňanského príkrovu. Geologická stavba a morfológická pozícia hradného vrchu podmienili vznik a rozvoj viacerých geodynamických procesov, predovšetkým svahových pohybov.

Na hrade boli v roku 2006 na štyroch vybratých trhlínach (obr. 29) osadené meracie body na meranie pohybov dilatometrom typu SOMET (SM1 – SM4). Pohybové tendencie lineárneho charakteru na trhlínach stanovišť pod Zápoľského palácom (SM1), múr – južné opevnenie (SM2) a pod vstupnou bránou (zadný – SM4) vypovedajú o stabilite týchto parciálnych častí horninového masívu. Namerané údaje na trhlíne stanovišta pod vstupnou bránou (predný – SM3) svojím rozsahom naznačujú, že sa trhlina veľmi pomaly uzatvára. Celková hodnota posunu dosiahla 0,067 mm (obr. 30).

### Zhodnotenie výsledkov monitoringu

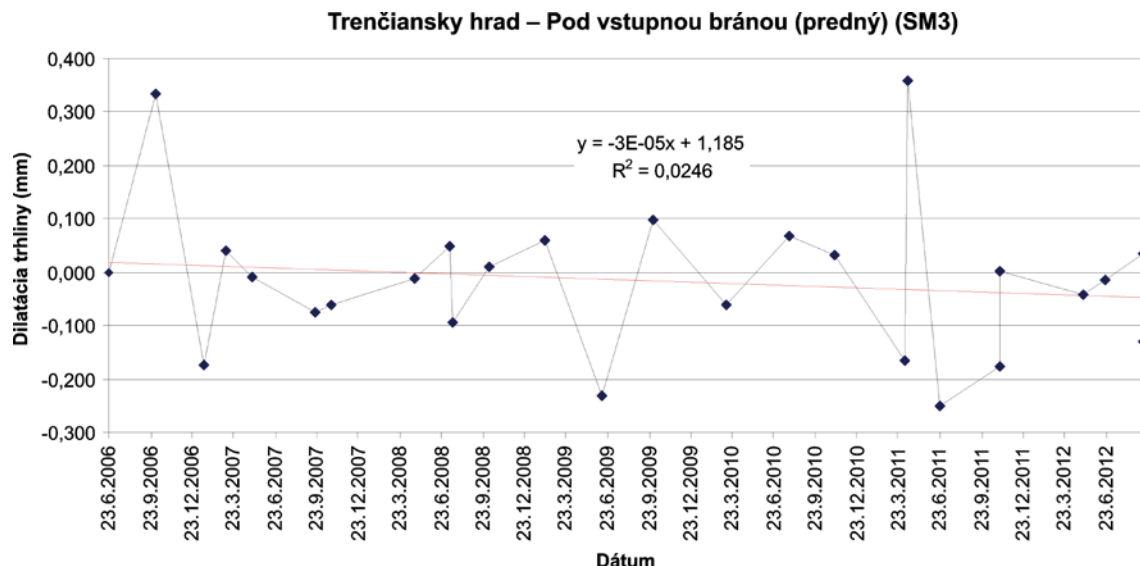
Výsledky dlhodobého monitorovania stability podložia vybratých historických objektov na území Slovenska dvoma typmi dilatometrov možno zhrnúť do nasledujúcich bodov:

1. Výsledky potvrdzujú, že dilatometre typu TM-71 je možné používať nielen na meranie pomalých



**Obr. 29.** Pozícia stanovišť dilatometrov SM1 – SM4 na Trenčianskom hrade.

**Fig. 29.** Locations of the extensometers SM1 – SM4 at the Trenčín Castle.



**Obr. 30.** Diagram posunov zistených dilatometrom SM3 (Pod vstupnou bránou – predný) na Trenčianskom hrade.

**Fig. 30.** Diagram of displacements detected by the extensometer SM3 (Pod vstupnou bránou – predný) at the Trenčín Castle.

plazivých pohybov (svahových deformácií typu plazenia) a mikroposunov pozdĺž aktívnych tektonických porúch (napr. Petro et al., 2004), ale aj posunov horninových blokov v podzákladi historických objektov a vzájomných posunov porušených častí týchto objektov. Dilatometre sú schopné zaznamenávať 3D posun s presnosťou  $\leq 0,01$  mm vo všetkých troch osiach a rotácie v dvoch na seba kolmých rovinách s presnosťou  $\leq 0,01$  gr. Vďaka použitým konštrukčným materiálom (Al, Cu, Cr, sklo) sa vyznačujú dlhodobou odolnosťou voči poveternostným vplyvom a sú nenáročné na obsluhu.

2. Tyčový dilatometer typu SOMET sa na území SR používa na monitorovanie porúch na historických objektoch a v ich podloží od roku 2000. Doterajšie skúsenosti potvrdzujú, že napriek jeho jednoduchosti a možnosti merať väčšinou iba jednoosový pohyb, je dilatometer vhodným doplnkom 3D meraní realizovaných dilatometrom typu TM-71. Jeho výhodou je vysoká presnosť ( $\leq 0,01$  mm), jednoduchosť a cenová dostupnosť. Najväčšou nevýhodou je mimoriadna citlivosť na nesprávne ciachovanie pomocou invarovej tyče a prítlak na monitorovacie body pri meraní, najmä v prípade, ak merania v jednej lokalite vykonávajú rôzne osoby.

3. Výsledky meraní vo viacerých lokalitách potvrdili výraznú aktivitu, t. j. posuny pozdĺž monitorovanej trhlíny v podloží historických objektov alebo v samotných objektoch. V prípade Spišského hradu (obr. 6, 9, 10, 12, 14) a Strečna (obr. 22) sú zreteľné výrazné trendy rozširovania (zužovania) trhlín a poklesu blokov. Hodnoty posunu travertínových blokov v prípade Spišského hradu sú mm a cm rádu (obr. 6, 9 a 10), v prípade Strečna mm rádu (obr. 22). Nakláňanie a šikmý pokles Perúnovej skaly a skalného previsu nad cestou na hrade Strečno si dokonca akútne vyžadujú návrh sanačných opatrení.

4. Merania v niektorých monitorovaných lokalitách bolo potrebné ukončiť z viacerých dôvodov (tab. 1 a 2). V prípade

lokalít Skalka nad Váhom a Lietava boli merania skončené aj v dôsledku minimálnej pohybovej aktivity, resp. aktivita nebola potvrdená. V iných lokalitách (Lietavský hrad, Spišský hrad – TM-71-P3, TM-71-3, TM-71-4, TM-71-5, TM-71-6) došlo k zničeniu dilatometrov do takej miery, že v meraniach nebolo možné pokračovať. Ďalším dôvodom skončenia monitoringu boli technické príčiny (Skalka nad Váhom, Kostolany pod Tribečom, Čachtice, Devín).

5. Na zvýšenie presnosti a spoľahlivosti interpretácie nameraných údajov treba v prípade dilatometra TM-71 v budúcom období zabezpečiť zvýšenie frekvencie meraní (odčítaní) na 4 za rok. Takýto počet meraní odporúča aj konštruktér tohto prístroja (B. Košťák).

## Záver

Získané výsledky meraní z monitorovaných lokalít preukázali opodstatnenosť riešenia stanovenej výskumnej úlohy. V ďalšom období bude potrebné konfrontovať výsledky meraní dilatometrami TM-71 s väčším počtom meraní získaných prenosným meradlom SOMET, využiť výsledky dlhodobých meraní na modelovanie kinematiky sledovaných geologických procesov a posúdiť prognózu ich vývoja vzhľadom na zabezpečenie stability historických objektov. Trvalou úlohou riešiteľov projektu je integrovať do monitorovacieho systému aj ďalšie významné historické objekty, ktoré sú postihnuté pomalými svahovými deformáciami.

**Podakovanie.** Článok prezentuje výsledky projektu Ministerstva životného prostredia Slovenskej republiky č. 207 Čiastkový monitorovací systém – Geologické faktory. Autori ďakujú recenzentovi doc. RNDr. Petrovi Wagnerovi, CSc., za postrehy a námety, ktoré prispeli k vylepšeniu pôvodného manuskriptu.



## References

- FUSSGÄNGER, E., 1985: Poznatky z terénneho výskumu plazivých svahových pohybů travertínových blokov na Spišskom hrade. *Miner. Slov.*, 17, 15 – 24.
- GROSS, P. (ed.), FILO, I., HALOUZKA, R., HAŠKO, M., HAVRILA, M., KOVÁČ, P., MAGLAY, J., MELLO, J. & NAGY, A., 1994: Geologická mapa južnej a východnej Oravy 1 : 50 000. Vyd. Geol. Úst. D. Štúra, Bratislava.
- GROSS, P. (ed.), BUČEK, S., ĎURKOVIČ, T., FILO, I., KAROLI, S., MAGLAY, J., NAGY, A., HALOUZKA, R., SPIŠÁK, Z., ŽEC, B., VOZÁR, J., BORZA, V., LUKÁČIK, E., MELLO, J., POLÁK, M. & JANOČKO, J., 1999: Geologická mapa Popradskej kotliny, Hornádskej kotliny, Levočských vrchov, Spišsko-šarišského medzihoria, Bachurne a Šarišskej vrchoviny 1 : 50 000. Vyd. Geol. Úst. D. Štúra a MŽP SR, Bratislava.
- HOLZER, R. & LETKO, V., 1993: Uhrovský hrad. Čiastková záverečná správa. In: Vlčko, J. et al. (ed.), 1998: *Inžinierskogeologická pasportizácia vybraných historických objektov. MŽP SR – KIG PriF UK, Bratislava*.
- JÁNOVÁ, V., MESARČÍK, I. & BÍM, M., 2009: Stav horninového prostredia a jeho ochrana. *Enviromagazín*, 1, 16 – 18.
- JEZNÝ, M., VLČKO, J. & HVOŽDARA, M., 2007: Teplota ako faktor štruktúrneho oslabovania horninových masívov. *Geotechnika*, 10, 8 – 15.
- KOŠŤÁK, B., 1969: A new device for in-situ movement detection and measurement. *Experimental Mechanics*, 9, 8, Easton, Pa., 374 – 379.
- KOŠŤÁK, B., 1991: Combined indicator using moiré technique. In: Sorum, G. (ed.): *Field measurements in geomechanics. Proc. 3rd Int. Symp., Oslo, A. A. Balkema, Rotterdam, Brookfield*, 53 – 60.
- KOŠŤÁK, B. & SIKORA, J., 2000: Ověření účinnosti sanačních opatření na Oravském hradě. *Geotechnika*, 3, 8 – 10.
- MALGOT, J., BALIAK, F. & SIKORA, J., 1988: Engineering geological causes of failure on the middleage castles in Slovakia and the methods of their geotechnical stabilization. In: *Marinos, P. & Koukis, G. (eds.): Engineering Geology of Ancient Works, Monuments and Historical Sites. Proc. Int. Symp., Athens*, 1, 83 – 92.
- MALGOT, J., BALIAK, J., BARTÓK, J. & VLČKO, J., 1992: Inžinierskogeologický prieskum a geotechnické opatrenia Spišského hradu. In: *Zbor. Zakládání staveb, ČSVTS Brno*, 11 – 17.
- POLÁK, M., PLAŠIENKA, D., KOHÚT, M., PUTIŠ, M., BEZÁK, V., FILO, I., OLŠAVSKÝ, M., HAVRILA, M., BUČEK, S., MAGLAY, J., ELEČKO, M., FORDINÁL, K., NAGY, A., HRAŠKO, L., NÉMETH, Z., IVANIČKA, J. & BROSKA, I., 2011: Geologická mapa Malých Karpát v mierke 1 : 50 000. Vyd. MŽP SR a Štátny geologický ústav D. Štúra, Bratislava.
- RAKÚS, M. (ed.), ELEČKO, M., GAŠPARÍK, J., GOREK, J., HALOUZKA, R., HAVRILA, M., HORNIŠ, J., KOHÚT, M., KYSELA, J., MIKO, O., PRISTAŠ, J., PULEC, M., VOZÁR, J., VOZÁROVÁ, A. & WUNDER, D., 1988: Geologická mapa Lúčanskej Malej Fatry 1 : 50 000. Vyd. Geol. Úst. D. Štúra, Bratislava.
- STERCZ, M., 2004: SMDilat – aplikácia na vyhodnocovanie meraní dilatometrom TM-71 programovaná v jazyku Delphi pre platformu MS Windows (+ MS Windows XP).
- VLČKO, J., 2001: Engineering Geological Problems Related to Preservation of UNESCO Sites in Slovakia. In: Sassa, K. (ed.): *Landslide Risk Mitigation and Protection of Cultural and Natural Heritage. Proc. UNESCO/IGCP Symposium, Tokyo*, 35 – 48.
- VLČKO, J., 2004: Extremely slow slope movements influencing the stability of Spiš Castle, UNESCO site. *Landslides*, 1, 67 – 71.
- VLČKO, J. et al., 1994: Plavecký hrad. Čiastková záverečná správa. In: Vlčko, J. et al. (ed.), 1998: *Inžinierskogeologická pasportizácia vybraných historických objektov. MŽP SR – KIG PriF UK, Bratislava*.
- VLČKO, J., HYÁNKOVÁ, A., MATYS, M., MIŠÍK, M. & SZABO, Š., 1997: Hrad Pajštún. Čiastková záverečná správa. In: Vlčko, J. et al. (ed.), 1998: *Inžinierskogeologická pasportizácia vybraných historických objektov. MŽP SR – KIG PriF UK, Bratislava*.
- VLČKO, J., PETRO, L. & KOŠŤÁK, B., 1998: Monitoring svahových pohybů na Spišskom hrade. In: Wagner, P. & Durmeková, T. (eds.): *Geológia a životné prostredie. Zbor. ved. prác z 1. slov. konf., GS SR, Bratislava*, 102 – 104.
- VLČKO, J. & PETRO, L., 2002: Monitoring of subgrade movements beneath historic structures. In: van Roy, J. L. & Jermy, C. A. (eds.): *Proc. of 9th Int. Congress IAEG, Durban, South Africa, (CD-ROM)*, 1 432 – 1 437.
- VLČKO, J., PETRO, L., BAŠKOVÁ, L. & POLAŠČINOVÁ, E., 2002: Stabilita horninových masívov pod historickými objektmi. *Geol. Práce, Spr.*, 106, 89 – 96.
- VLČKO, J., GREIF, V., HOLZER, R., HENČELOVÁ, L. & JEZNÝ, M., 2007: Rock Deformation Monitoring at Cultural Heritage Sites in Slovakia. In: Sassa, K., Fukuoka, H., Wang, F. & Wang, G. (eds.): *Progress in Landslide Science. Publ. Berlin, Springer*, 261 – 273.

Rukopis doručený 30. 12. 2012

Revidovaná verzia doručená 3. 1. 2013

Rukopis akceptovaný red. radou 27.2. 2013

## Stability of selected historical objects in Slovakia: Monitoring results

Protection of historical monuments at the national and international levels is recently getting wide attention from local and international bodies. Reconstruction and remedial works resulted from engineering geological survey and monitoring represent one way of reducing negative effects of geological hazards (e.g. slope movements, weathering, karst and tectonic failures). Disintegration of subgrade very often leads to failures, in some cases even to collapse of historical structures.

Application of monitoring techniques in the field of protection of historical structures started in Slovakia by the end of the 1970s and/or in the early 1980s at Spiš Castle, which is one of the largest fortified medieval monuments in Europe. Since 1993 this castle belongs to

World Cultural Heritage (UNESCO), similarly as Orava Castle. The monitoring net at the Spiš Castle was updated by creating the 6 new monitoring sites in the frame of the project entitled “Research of geological factors of the environment – engineering geological research for optimal use and protection of the environment” in 1992. Monitoring net in Slovakia was widely extended by establishing of new monitoring locations at selected historical monuments in 1993. Within the project entitled “Partial monitoring system of geological factors of the environment in Slovakia – stability of the rock massifs under historic structures”, financed from the budget of the Ministry of the Environment of the Slovak Republic, the monitoring activity started at medieval monastery at Skalka nad Váhom (since 1995/2000 – see

Tab. 1), Lietava and Strečno Castles (2000), Spiš Castle (1997/2000/2003), Kostolány pod Tribečom Church (2000), Uhrovec Castle (2000), Plavecký Castle (2002), Pajštún and Čachtice Castles (2003), Devín Castle (2004) and Trenčín Castle (2006). Because of different reasons (e.g. damage or destruction of monitoring devices, not prove of any long-term instability), some of these sites have been abandoned and monitoring activities at them had stopped (Fig. 1). Nowadays 7 historical structures are monitored by a couple of different monitoring techniques. A brief characteristic of abandoned monitoring sites as well as results and their interpretation from sites in operation are described.

Two types of measuring devices have been selected for detection of very slow (creep) and long lasting slope movements (especially gravitational loosening, lateral spreading/block sliding) – the mechanical-optical extensometer type TM-71 and the demountable mechanical crack gauge type SOMET. Both types of devices were located inside/across selected fault (crack) planes disturbing the subgrade or upper structure of historic monuments. Accuracy of measurements after the temperature correction is very high and reaches  $\leq 0.01$  mm (displacements) and  $\leq 0.01$  gr. (rotations). The TM-71 extensometer constructed by Košťák (1969) is based on the moiré principle and is capable of detecting movements and micro displacements in three dimensions. The changes in the moiré pattern (black and white fringes) represent displacements of footwall and/or hanging wall separated by fault (crack). Data are obtained in three Cartesian coordinates ( $x$  – change of crack width,  $y$  – slip along the crack and  $z$  – subsidence/uplift footwall or hanging wall). Calculations are made from recorded interference patterns with regard the dilatibility of steel bars which fix the extensometer. The SOMET type gauge (analogue or digital) enable us to detect linear or 2D displacements at locations where a great risk of the TM-71 damage exists and where the width of the discontinuity is less than 50 cm, which is usually the smallest crack width for installation the TM-71. The use of both types of devices provides the possibility to compare the data records and to get more reliable results.

A brief review of abandoned monitoring sites, e.g. sites with finished and completed measurements comprising monitoring period, type of extensometer, main reasons of the measurements termination, as well as the way of results dissemination are presented in Tab. 1. Among the most interesting results there belongs 0.23 mm displacement along monitored crack at the Skalka nad Váhom Monastery. Measurements of linear displacements recorded by the SOMET extensometer contributed to successful performing of remedial works at the Devín Castle and Kostolány pod Tribečom Church.

The most important monitoring site among the all historical monuments represents the Spiš Castle. Results taken by the TM-71 and SOMET extensometers (Tab. 2) confirmed movement activity of travertine blocks at all locations (Figs. 6, 7, 9, 10 – 13, 15 and 18). An average velocity of cracks opening detected by the oldest TM-71 extensometers (31 years monitoring period) reaches 0.359 mm/year. Total displacements along particular axes exceeded in some cases 11 or 14 mm (Figs. 6 and 9).

The TM-71 measurements at Orava Castle started in 1980. The results confirmed the stability of monitored historic structure (Fig. 20) and effectiveness of remedial works carried out in 1995. As the stabilizing measures the

micropiles and anchors were applied (Košťák and Sikora, 2000).

Measurements by the TM-71 extensometer at the Strečno Castle started in 1996 and proved an evident trend of extension of the crack below the chapel (Fig. 22). Total value of almost 3 mm indicates the reduction of efficiency of the anchors used for stabilization the rock block (overhang) up to the rate that are not able to transmit the stress induced by its weight.

Results taken by the SOMET crack gauges revealed activity at all monitored sites. Average values of displacements did not exceed value of 0.3 mm up to the end of 2011 (Figs. 7, 11, 13, 24, 26, 28 and 30). Oscillations of movements in diagrams reflect temperature changes.

Results of long-term monitoring of the subgrade stability as well as the historical structures in Slovakia can be summarised as follows:

1. Monitoring results confirmed the suitability of TM-71 extensometers also for detection of very slow and long-term movements of rock blocks along cracks (faults) in the subgrade and/or historical structures with high accuracy ( $\leq 0.01$  mm – displacements;  $\leq 0.01$  gr. – rotations). Measurements are performed in two perpendicular planes so 3D movement changes can be calculated. Extensometers are very stable in outdoor conditions and do not need much maintenance.

2. The SOMET extensometers are very simple, cost effective and enable to detect linear or 2D displacements with high accuracy ( $\leq 0.01$  mm). The most disadvantage of crack gauge is its high sensitivity to calibration by invar rod as well as errors due to non-equally applied pressure on measuring points by a person carrying out the measurements.

3. The measurements have confirmed significant displacements along cracks (faults) in subgrade and/or in historical objects at several sites. At Spiš (Figs. 6, 9, 10, 12 and 14) and Strečno (Fig. 22) Castles there are evident trends of extension/compression and subsidence of blocks. Toppling and oblique subsidence of Perún's Rock (Spiš Castle) and overhang at Strečno Castle need urgent proposal of remedial works.

4. The measurements at some monitoring sites were terminated for several reasons (Tabs. 1 and 2). The main reasons were – very slow movement activity (Skalka nad Váhom Monastery and Lietava Castle), destruction of the TM-71 extensometers (Lietava Castle and some locations at Spiš Castle) and technical problems (Skalka nad Váhom Monastery, Kostolány pod Tribečom Church, Čachtice and Trenčín Castles).

5. To get more precise and reliable interpretations of monitoring data it is necessary to increase the frequency of measurements by the TM-71 at least up to 4/year. The same frequency is recommended also by B. Košťák as the constructor of the TM-71 extensometer.

Monitoring results from all historical sites proved the justness of the solution of this geological survey. In the future it will be necessary to correlate results taken by both types of extensometers, use results from long term measurements for modelling the kinematics of block movements and to evaluate the prognosis of their development from the point of stability of historical objects. Project and sub-project managers will try to incorporate to the monitoring net also other significant historical monuments in Slovakia in the near future.