

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

*Edice Habilitační a inaugurační spisy, sv. 670*

*ISSN 1213-418X*

**Petr Daněk**

**VYBRANÉ ASPEKTY  
EXPERIMENTÁLNÍ  
ANALÝZY KONSTRUKCÍ**

**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta stavební**

**Ústav stavebního zkušebnictví**

**Ing. Petr Daněk, Ph.D.**

**VYBRANÉ ASPEKTY EXPERIMENTÁLNÍ  
ANALÝZY KONSTRUKCÍ**

**SELECTED ASPECTS OF THE EXPERIMENTAL ANALYSIS  
OF STRUCTURES**

**ZKRÁCENÁ VERZE HABILITAČNÍ PRÁCE  
OBOR: KONSTRUKCE A DOPRAVNÍ STAVBY**



**BRNO 2020**

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Smrštění, dotvarování, pracovní diagram, odporové tenzometry, strunové tenzometry, ME snímače, měření deformace, dlouhodobý monitoring, zatěžovací zkoušky, experimentální analýza

## **KEYWORDS**

Shrinkage, creep, L-D curve, resistance strain gauges, vibrating wire strain gauges, ME sensors, measurement of deformation, long-term monitoring, load tests, experimental analysis

## **MÍSTO ULOŽENÍ:**

Originál práce je uložen v archívu Oddělení pro vědu a výzkum Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně, Veveří 331/95, 602 00 Brno

# OBSAH

PŘEDSTAVENÍ AUTORA.....	4
1 ÚVOD .....	5
2 LABORATORNÍ EXPERIMENTY .....	6
2.1 Vývoj zařízení pro kontinuální měření hmotnostních úbytků cementových kompozitů v raném stádiu tuhnutí a tvrdnutí .....	6
2.2 Ověření reologických vlastností ztvrdlého betonu.....	7
3 SKLADOVÉ KAPACITY LOUKOV .....	9
3.1 Popis sledované konstrukce .....	9
3.2 Vystrojení nádrží měřicími snímači .....	9
3.3 ME snímače.....	9
3.4 Doprovodné laboratorní experimenty .....	10
3.5 Zatěžovací zkouška .....	10
3.6 Dlouhodobé sledování.....	10
4 DLOUHODOBÉ SLEDOVÁNÍ MOSTNÍCH KONSTRUKCÍ.....	11
4.1 Most D4708.2 přes Odru.....	11
4.2 Most D8-062 dálniční most mezi tunely Radejčín.....	13
5 AKTIVNÍ MONITOROVACÍ SYSTÉM – VIDA – MOR. SCIENCE CENTRE BRNO.....	14
5.1 Důvody použití aktivních monitorovacích systémů.....	14
5.2 Předmětná konstrukce – pavilon D BVV.....	15
5.3 Stavebně-technický průzkum a statický přepočít konstrukce .....	15
5.4 Návrh aktivního monitorovacího systému .....	16
5.5 Realizace systému .....	16
5.6 Zatěžovací zkouška .....	18
5.7 Obslužný software monitorovacího systému .....	21
5.8 Změny v hydrostatickém systému v průběhu provozu .....	21
5.9 Dlouhodobý provoz.....	22
5.10 Závěry k provozu monitorovacího systému.....	22
6 EDU – MONITORING BARBOTÁŽNÍCH VĚŽÍ PŘI PŘETLAKOVÝCH ZKOUŠKÁCH ..	23
6.1 Sledovaná konstrukce .....	23
6.2 Průběh zkoušek integrity.....	24
6.3 Vnitřní měření deformací ŠLH s kontinuálním záznamem .....	24
6.4 Pevné kotevní body pro vnitřní měření.....	26
6.5 Vztažné linie pro tenzometrické snímače deformací – lanka .....	26
6.6 Tenzometrické snímače deformací - OSTD.....	27
6.7 Potenciometrické snímače deformací .....	28
6.8 Ostatní přístrojové vybavení měřicího systému.....	29
6.9 PERIZ 4. RB .....	30
7 ZÁVĚR – ZHODNOCENÍ VÝZNAMU EXPERIMENTÁLNÍ ANALÝZY KONSTRUKCÍ.	33
POUŽITÁ LITERATURA .....	33
ABSTRAKT.....	36

## PŘEDSTAVENÍ AUTORA

Jméno a příjmení: Petr Daněk

Datum a místo narození: 19. 1. 1978 v Brně



Adresa zaměstnání:

Ústav stavebního zkušebnictví, Fakulta stavební VUT v Brně,  
Veveří 331/95, 602 00 Brno, ČR  
Telefon: 541 147 492  
E-mail: petr.danek@vutbr.cz

Vzdělání, pedagogické a vědecké hodnosti:

- maturita – 1996, Gymnáziu tř. kpt. Jaroše 14 v Brně, všeobecné zaměření;
- Ing. – 2001, Fakulta stavební VUT v Brně, obor Konstrukce a dopravní stavby;
- Ph.D. – 2005, Fakulta stavební VUT v Brně, obor Konstrukce a dopravní stavby.

Zaměstnání, pracovní zařazení a funkce:

- 2001 – 2003 Ústav stavební a zkušebních metod, Fakulta stavební VUT v Brně, interní doktorand;
- 2004 – 2006 Ústav stavebního zkušebnictví, Fakulta stavební VUT v Brně, asistent;
- 2007 – dosud Ústav stavebního zkušebnictví, Fakulta stavební VUT v Brně, odborný asistent;
- 2014 – 2019 Centrum AdMaS, Fakulta stavební VUT v Brně, vědecko-výzkumný pracovník;
- 2019 – dosud BESTEX, spol. s r.o., Křenová 42, 602 00 Brno, konzultační činnost.

Odborné a výzkumné zaměření:

Problematika plánování a provádění experimentů vzhledem k následnému analytickému vyhodnocení napjatostního stavu u konstrukcí a konstrukčních prvků ze železobetonu, předpjatého betonu a u hybridních a kompozitních konstrukcí. Experimentální ověřování fyzikálně mechanických parametrů stavebních materiálů a chování betonových a zděných konstrukcí. Dlouhodobá měření a sledování mostních konstrukcí při použití strunových, odporových a mechanických tenzometrů a měření mechanického napětí v předpínací výztuži pomocí magnetoelastické metody.

Výzkumné úkoly a projekty:

Do roku 2019 člen řešitelských kolektivů více než 18-ti výzkumných projektů, řešitel 1 vnitřního projektů FAST VUT.

Pedagogická činnost:

Výuka v předmětech Stavební látky a Zkušebnictví a technologie, vedoucí 5-ti obhájených diplomových a 5-ti bakalářských prací. V období 2012 – 2019 školitel 3 doktorandů, předpokládaný termín odevzdání disertačních prací všech tří doktorandů je v roce 2020.

Publikační činnost a tvůrčí činnost do r. 2019:

Celkem více než 160 publikací, spoluautor 1 patentu, 1 certifikované metodiky, dvou užitných vzorů a 4 funkčních vzorků.

# 1 ÚVOD

Experimentální analýza konstrukcí má za cíl nejen porovnávat reálné hodnoty sledovaných charakteristik s předpoklady uvažovanými při projektování konstrukcí, ale také může významným způsobem přispět k bezpečnému provozu dle norem ne zcela vyhovujících stavebních objektů, či prokázat spolehlivost konstrukce v případech, kdy statický přepočítání není průkazný z důvodů nedostupnosti potřebných vstupních údajů a parametrů.

Zejména u předpjatých železobetonových či sprážených ocelobetonových konstrukcí dochází vlivem reologických vlastností betonu k redistribuci vnitřních sil. Dlouhodobým sledováním konstrukce je možné potvrdit či vyvrátit správnost předpokladů uvažovaných při projektu dané konstrukce a zvláště pak ověřit předpokládaný stav na konci predikované životnosti objektu. Časově závislé analýzy konstrukcí mohou vycházet z rozdílných modelů pro výpočet reologických vlastností betonu, které vyžadují nejen znalost vstupních parametrů použitého betonu, ale také zadání různých koeficientů zohledňujících jak geometrické tvary, tak i charakteristiky prostředí (teplotu, vlhkost) především v době zrání betonu. Vzhledem k velkému počtu relativně neznámých parametrů se stále častěji verifikují tyto modely laboratorními zkouškami prováděnými na konkrétních recepturách použitých betonů. Jde tedy hlavně o měření smrštění betonu, a to jak v raném stádiu tuhnutí a tvrdnutí, tak i v pozdějších fázích, dotvarování betonu a stanovení pracovních diagramů a modulů pružnosti v rozličném stáří. Předkládaná práce v úvodní kapitole řeší právě problematiku stanovení těchto fyzikálně mechanických a reologických vlastností betonu. Jedná se zejména o vývoj zařízení pro kontinuální měření hmotnostních úbytků cementových kompozitů v raném stádiu tuhnutí a tvrdnutí. Pro určení parametrů ztvrdlých betonů jsou zde popsány metody využívající zejména odporové a strunové tenzometry k měření poměrných přetvoření nezbytných pro stanovení hodnot smršťování, dotvarování, modulu pružnosti a vyhotovení pracovních diagramů.

Na základě předem provedených výpočtů (ověřených laboratorními zkouškami) lze pak účelně stanovit rozsah a cíle experimentálních měření in-situ na projektované konstrukci. Vybrat sledované kritické řezy a určit měřené veličiny, které mají rozhodující význam pro objektivní posouzení reálnosti analytické predikce dlouhodobého chování posuzované konstrukce. Kapitoly 3 a 4 prezentují příklady realizovaných staveb, u kterých bylo v rámci projektové přípravy, vzhledem k jejich významnosti či výjimečnosti, rozhodnuto o osazení měřícími snímači pro ověření předpokládaného chování konstrukcí během výstavby a následného provozu. Diskutováno je především využití strunových tenzometrů pro měření poměrných přetvoření betonu a oceli a magnetoelastických snímačů (dále jen ME snímače) pro sledování napětí v ocelových předpínacích kabelech či výztužích.

V případě nesplnění normami požadované spolehlivosti konstrukce především z hlediska mechanické odolnosti je možné místo nákladného statického zajištění přistoupit k tzv. řízení rizik při provozu konstrukce. Tím je myšleno omezení zatížení, například změnou způsobu využívání konstrukce či režimu přístupu osob, a monitoring konstrukce a zatížení, který by měl vést k identifikaci stavů sledované konstrukce, kdy přestává být dostatečně spolehlivá a je nutné přijmout mimořádná opatření [2]. Využití tohoto odstavce zmíněné normy je v práci prezentováno v kapitole 5, kde je popsán návrh a realizace aktivního monitorovacího systému sledování střešní příhradové konstrukce během přestavby pavilonu D v areálu Brněnského výstaviště (dále jen BVV) na Moravian Science Centre Brno. Základem instalovaného systému je sledování průhybu střechy za použití hydrostatické nivelace a sledování poměrného přetvoření ve vybraných kritických prutech ocelové příhradové konstrukce odporovými tenzometry.

Poslední oblastí řešenou v předkládané práci je měření deformací konstrukčních prvků (stěn, podlah, stropů) velkoobjemových objektů při provádění zatěžovacích zkoušek. V těchto případech je vždy zásadním problémem vytvoření vztažné soustavy (pevných bodů) pro uchycení snímačů. Neopomenutelnou otázkou je též výběr vhodných typů snímačů splňujících jak požadavky na

přesnost měření, tak kompatibilitu s navrženým způsobem vztažných bodů. V 6. kapitole je tato problematika popsána na příkladu osazení měřicího systému pro sledování deformací barbotážních věží Jaderné elektrárny Dukovany během provádění přetlakových zkoušek.

## 2 LABORATORNÍ EXPERIMENTY

### 2.1 VÝVOJ ZAŘÍZENÍ PRO KONTINUÁLNÍ MĚŘENÍ HMOTNOSTNÍCH ÚBYTKŮ CEMENTOVÝCH KOMPOZITŮ V RANÉM STÁDIU TUHnutí A TVRDNUTÍ

Zařízení pro kontinuální měření hmotnostních úbytků a objemových změn v raném stadiu tuhnutí a tvrdnutí cementových kompozitů a ostatních materiálů nebylo v době vývoje váhového stolu známo. Jedinou variantou bylo vážení pomocí standardních laboratorních vah, na kterých je umístěn měřicí smršťovací žlab (např. Schleibinger). Tato varianta však naráží na zásadní problém s přesností měření. Je třeba si uvědomit, že měřicí žlab naplněný čerstvým betonem či maltou váží kolem 25 kg a hmotnostní úbytky, které jsou potřeba měřit, se pohybují řádově v desítkách g.

#### 2.1.1 Podstata váhového stolu

Podstatou vyvinutého měřicího zařízení je eliminace „mrtvé“ váhy měřicího žlabu (vystrojeného indukčností snímačem deformací a přídatným vybavením pro dlouhodobé měření po vyjmutí vzorku ze žlabu) a měřeného vzorku za použití vahadla s nastavitelným protizávažím [9]. Tato koncepce umožňuje použití váhového členu s nižší váživostí, který detekuje pouze změnu hmotnosti způsobenou úbytkem vody.

#### 2.1.2 Popis vyvinutého váhového stolu

Jedná se o stolicí v podobě pevného, robustního rámu, který lze nastavit do vodorovné polohy. Hlavní součástí zařízení je vahadlo s minimálním třením, které je upevněno na stolicí pomocí ložiskového uložení. Vahadlo je na jednom konci opatřeno závažím pro vyvážení hmotnosti zkušební vzorku a zkušební žlabu. Na vahadle je dále umístěno posuvné dovažovací závaží a na druhém konci je opatřeno stavitelným ložem pro uložení zkušební smršťovacího žlabu. Vahadlo je bodově podepřeno rektifikačním šroubem, který je spojen s váhovým členem PW6D3 o váživosti 3000 g uloženým na stolicí. Vyvinuté měřicí zařízení a detail váhového členu jsou na následujících obrázcích Obr. 1 a Obr. 2.



Obr. 1 Finální provedení váhového stolu.



Obr. 2 Detail váhového členu s rektifikačním šroubem.

#### 2.1.3 Využití váhové stolice

Zařízení umožňuje kontinuální měření hmotnostních úbytků (vody) cementových kompozitů v raném stadiu tuhnutí a tvrdnutí s vysokou přesností, díky čemuž je možno specifikovat obsah

vody, tím vymezit vlivy jednotlivých druhů objemových změn a dosáhnout lepšího poznání vlastností zkoumané hmoty. Popsaný způsob měření hmotnostních úbytků umožňuje měření bez nutnosti manipulace se zkušebními vzorkem, čímž nedochází ke znehodnocení výsledků měření.

Toto zařízení je intenzivně využíváno nejen na FAST VUT v Brně pro řešení výzkumných projektů a smluvního výzkumu, ale i v jiných laboratořích (např. BETOTECH, s.r.o.). Výše popsané zařízení je předmětem patentu vytvořeného na Ústavu stavebního zkušebnictví, FAST VUT [10].

## 2.2 OVĚŘENÍ REOLOGICKÝCH VLASTNOSTÍ ZTVRDLÉHO BETONU

Jedním z rozhodujících jevů z hlediska statického výpočtu předpjatých konstrukcí jsou reologické vlastnosti betonu.

### 2.2.1 Vystrojení zkušebních těles

Měření reologických vlastností betonu se většinou provádí na zkušebních hranolech  $100 \times 100 \times 400$  mm. Před jejich betonáží jsou na boky formy připevněny speciální přechodové bloky s kotevními trny umožňující následné připevnění strunových tenzometrů. Po dosažení manipulační pevnosti jsou tělesa odformována a do předem zalitých kotevních bloků jsou našroubovány strunové tenzometry (např. TSR/5,5/WP/RT). Tento způsob upevňování strunových tenzometrů umožňuje jejich instalaci i na mokré vzorky. Díky tomu jsme schopni sledovat průběh smršťování betonu od samého počátku. Po instalaci jsou tenzometry připojeny k měřicí ústředně (lze použít např. ústředny DataTaker DT80G) a je zahájeno jejich dlouhodobé měření [12].

### 2.2.2 Sledování smršťování betonu

Ve vodním uložení jsou vzorky umístěny po předepsanou dobu, která odpovídá délce doby ošetřování na stavbě nebo ve výrobě. Poté jsou hranoly pro měření smršťování, dotvarování a hmotnostních úbytků postupně přemístovány z vodního uložení na pracovní plochu v klimatizované místnosti, kde jsou prováděna měření. V případě požadavku měření hmotnostních úbytků jsou tyto hranoly umístěny na plošinovou váhu, viz Obr. 3. Příklad výsledků reálného měření je uveden na Obr. 5.



Obr. 3 Měření smršťování a hmotnostních úbytků.



Obr. 4 Dotvarovací lisy s osazenými hranoly.

### 2.2.3 Sledování dotvarování betonu

Hranoly rozměrů  $100 \times 100 \times 400$  mm určené pro měření dotvarování betonu jsou centricky zatíženy ve stáří betonu 28 dnů, případně ve stáří, které odpovídá největšímu skutečnému zatížení konstrukce. Pro měření dotvarování betonu v laboratoři i in-situ jsou nezbytné speciální lisy, viz Obr. 4 pro dlouhodobé zatěžování vzorků. Je třeba především zajistit centrické vnášení síly do

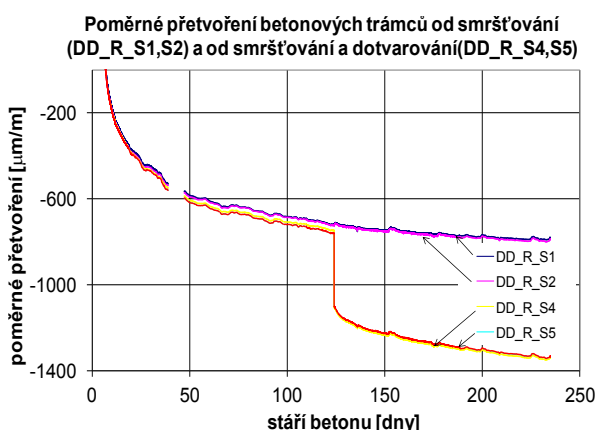


vzorků přes kloub, aby nedocházelo k drcení okrajů vzorku a k nerovnoměrnému namáhání. Nutná je i dlouhodobá stálost vnášené síly nebo alespoň možnost měření této síly v průběhu zatěžování [12].

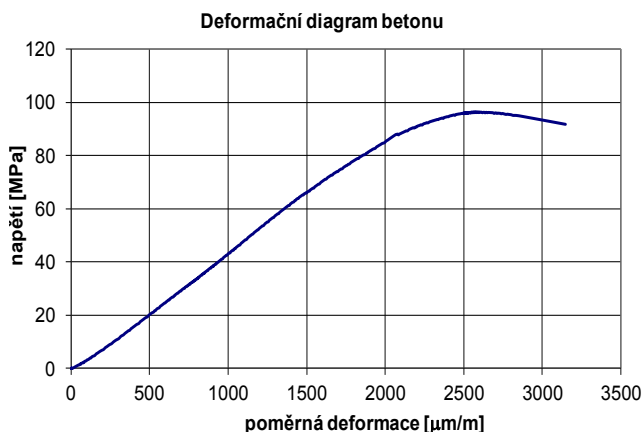
#### 2.2.4 Pracovní diagramy vysokohodnotných betonů - užití odporové tenzometrie

Odporová tenzometrie je velice silný a účinný nástroj pro měření deformačních vlastností prvků a konstrukčních dílců při provádění a vyhodnocování zatěžovacích zkoušek prakticky jakéhokoliv typu prvku a způsobu zatěžování. Při jejich užití je nespornou výhodou přímé kontaktní měření deformací sledované oblasti.

Pro určení deformačního diagramu na Obr. 6 je třeba na zkoušený hranol nalepit dva odporové tenzometry (typ resp. velikost dle maximální frakce kameniva, většinou však 100 mm, např. tedy 100/120LY41, [35]) na protilehlé strany a určit aritmetický průměr hodnot poměrného přetvoření, čímž jsou vyloučeny účinky od ohybu vlivem nedokonalé centrace tělesa a nerovnosti dosedacích ploch. Vysokohodnotné betony jsou křehké materiály a mají poměrně vysoký modul pružnosti. K destrukci těchto betonů dochází náhle bez předešlého výrazného poklesu zatěžovací síly. Proto pro zachycení sestupné větve pracovního diagramu je třeba zvolit vzorkovací frekvenci alespoň 100 Hz.



**Obr. 5** Reálné výsledky měření dotvarování a smršťování betonu.



**Obr. 6** Deformační diagram HPC betonu.

#### Statický modul pružnosti

Obdobným způsobem, jak jsou určeny pracovní diagramy, je možné stanovovat statické moduly pružnosti. Rozdíl je pouze v průběhu zatěžovací síly. Při určování modulu pružnosti zatěžovací síla nenarůstá spojitě až do porušení, ale cyklicky nabývá hodnot základní síly a přibližně třetiny hodnoty hranolové pevnosti.

Výše popsané laboratorní experimenty jsou určeny k získání reologických a přetvárných charakteristik jednoho z nejpoužívanějších stavebních materiálů – betonu. Znalost těchto charakteristik je potřebná jak pro provedení numerických analýz konstrukcí či konstrukčních prvků, tak i pro vyhodnocení zatěžovacích zkoušek či dlouhodobého sledování konstrukcí.

### 3 SKLADOVÉ KAPACITY LOUKOV

#### 3.1 POPIS SLEDOVANÉ KONSTRUKCE

Jedná se o čtyři podzemní nádrže o objemu 35 000 m<sup>3</sup> určených pro skladování motorové nafty firmy ČEPRO a. s. v Loukově u Bystřice pod Hostýnem. Nádrže jsou kruhového půdorysu o vnitřním průměru 47,8 m s max. výškou hladiny náplně 20,4 m. Zastřešení je provedeno ve tvaru kopule se vzepětím 4,8 m. Stěny a dno jsou navrženy jako betonové dodatečně předpjaté s dvojitou laminátovou výstelkou. Po dokončení výstavby byly nádrže vsazeny do terénu. Projekt nosné konstrukce zpracovala firma SHP spol. s r. o. Brno, generálním dodavatelem stavby byla firma Metrostav a. s. - Divize 7 [13]. Celkový pohled na rozestavěné nádrže je zobrazen na Obr. 7.



**Obr. 7** Pohled na rozestavěné nádrže.

#### 3.2 VYSTROJENÍ NÁDRŽÍ MĚŘÍCÍMI SNÍMAČI

Při statickém řešení konstrukce čtyř nádrží bylo potřeba přijmout řadu předpokladů o statickém chování, které bylo třeba ověřit dlouhodobým sledováním. Hlavním cílem monitoringu bylo ověření úrovně napjatosti betonu v různých stádiích výstavby, během zatěžovací zkoušky i následně během provozu nádrží.

##### *Poměrné přetvoření (napětí) betonu*

Do konstrukce nádrží byly osazeny strunové tenzometry typu GT TES/5.5/TR od firmy Gage Technique. Tenzometry byly osazovány do všech konstrukčně důležitých a nejvíce namáhaných částí: základové desky, stěn, konzol, věnce skořepiny a vlastní skořepiny. Ve všech čtyřech nádržích bylo osazeno celkem 160 ks strunových tenzometrů.

##### *Sledování napjatosti v předpínacích tyčích a ve výztuži konzol*

Na přepínací tyče průměru 36 mm bylo navrženo osadit magenetoelastické (ME) snímače od firmy Projstar Bratislava pro měření úbytků předpínací síly. Snímače byly osazeny na tyče mimo konzoly a to jako součást chráničky tyče. Celkem byly osazeny 4 snímače na každou nádrž.

Dále byly osazeny ME snímače na svislou část betonářské výztuže průměru 28 mm konzol. Celkem byly opět osazeny 4 snímače na každou nádrž.

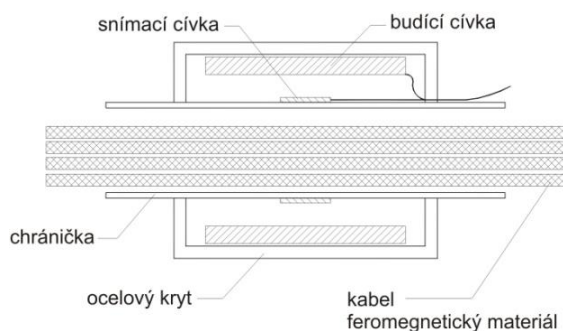
Veškeré snímače osazené do konstrukce byly prostřednictvím kabelů umístěných v kabelových chráničkách vyvedeny do šachet na střeších nádrží. V těchto bodech je kdykoliv možné připojit snímače k měřícím ústřednám.

#### 3.3 ME SNÍMAČE

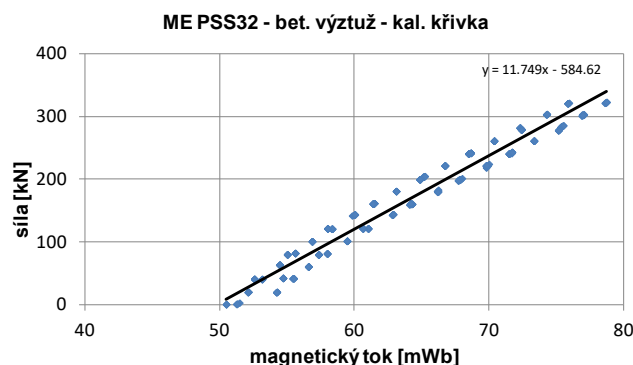
##### *Popis ME snímačů*

Magnetické vlastnosti oceli závisí na aktuálním mechanickém napětí a teplotě. ME snímač se skládá ze dvou vinutí patrných na Obr. 8. Primárním vinutím prochází impulsový

budící proud a změny magnetického toku indukují napětí v sekundárním vinutí. Síla působící na měřený feromagnetický materiál mění jeho magnetické vlastnosti, což se projeví změnou indukovaného napětí [12], [14].



**Obr. 8** Řez ME snímačem.



**Obr. 9** Kalibrační křivka snímače PSS32.

### Kalibrace ME snímačů

Vzhledem k odlišným magnetickým vlastnostem použité oceli a geometrickým parametrům kabelu, výztuže či předpínací tyče je třeba ME snímače kalibrovat. V případě malých snímačů probíhá kalibrace v lise. Výsledkem je kalibrační křivka (závislost indukčního toku na mechanickém napětí ve výztuži) pro daný typ snímače a danou výztuž, jak je zobrazeno na Obr. 9.

Protože magnetické vlastnosti oceli záleží i na její teplotě, je třeba provádět teplotní korekce naměřených magnetických toků s ohledem na teploty výztuže při daném měření. K těmto účelům slouží experimentálně zjištěná teplotní korekční křivka rozdílná pro každý typ snímače a použitou výztuž, předpínací tyč či lano.

## 3.4 DOPROVODNÉ LABORATORNÍ EXPERIMENTY

Nad rámeček běžných laboratorních zkoušek předepsaných normami pro kontrolu kvality a rovnoměrnosti výroby betonu byly provedeny nezávislé zkoušky pevností betonu a modulu pružnosti. Dále bylo prováděno ověřování reologických vlastností betonu popsanych v kap. 2.2 na hranolech  $100 \times 100 \times 400$  mm vyrobených z betonové směsi při betonáži nádrží.

## 3.5 ZATĚŽOVACÍ ZKOUŠKA

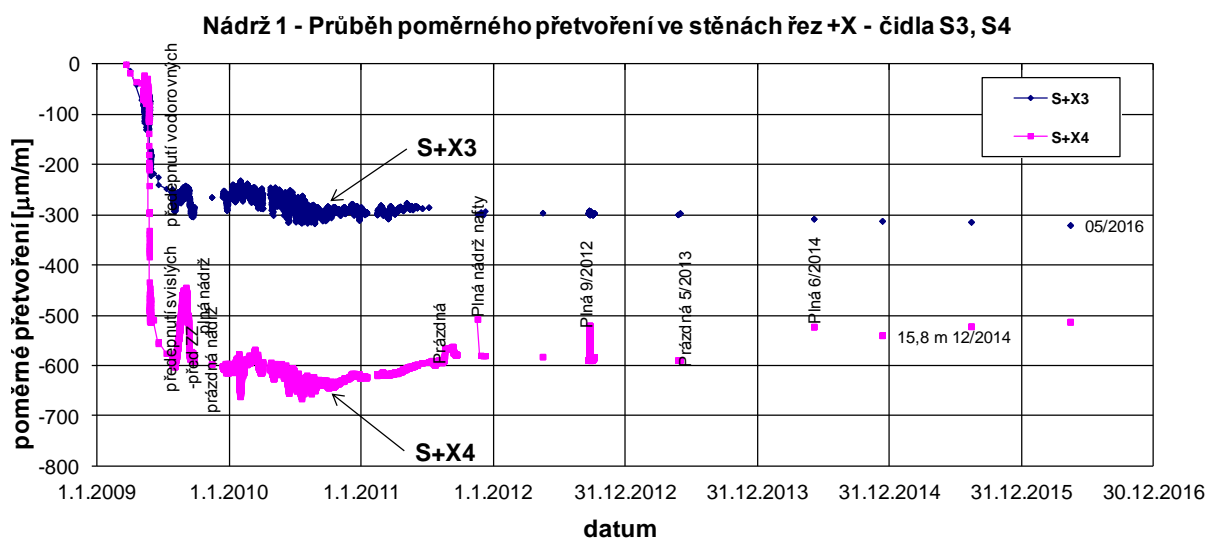
Hlavním cílem zatěžovací zkoušky bylo ověřit sedání nádrží před aplikací laminátové vystýlky tak, aby došlo k dosednutí nádrže a vystýlka již nebyla namáhána účinky nerovnoměrného poklesu konstrukce od náplně. Pro zatěžovací zkoušku byla použita voda, která vyvodí stejný tlak při výšce sloupce 16,9 m jako nafta při havarijní hladině 20,4 m.

Vyhodnocování naměřených výsledků, zejména poměrného přetvoření, probíhalo v součinnosti s projektantem nádrží firmou SHP spol. s r.o. Výsledky monitoringu během zatěžovací zkoušky potvrdily předpoklady projektovaného stavu. Měření namáhání stěn bylo potvrzeno lineárně pružné chování stěn. Po zatížení nádrže a jejím odtížení došlo k návratu na hodnoty měřené před zatěžovací zkouškou. Nebyla zjištěna trvalá deformace. Přírůstky poměrného přetvoření (napětí) odpovídají projektovanému stavu.

## 3.6 DLOUHODOBÉ SLEDOVÁNÍ

Po dokončení výstavby nádrží v roce 2009 probíhalo do roku 2016 dlouhodobé sledování chování nádrží při provozu. Graf na Obr. 10 znázorňuje průběh poměrného přetvoření betonu měřeného strunovými tenzometry ve stěně nádrže N1 v řezu +X. Z grafu je patrný ustálený trend sledovaných veličin (drobné výchylky jsou způsobené hlavně provozem nádrží – změnou hladiny

nafty), což svědčí nejen o správném návrhu konstrukce samotné, ale také o dobře navrženém a provedeném monitorovacím systému.



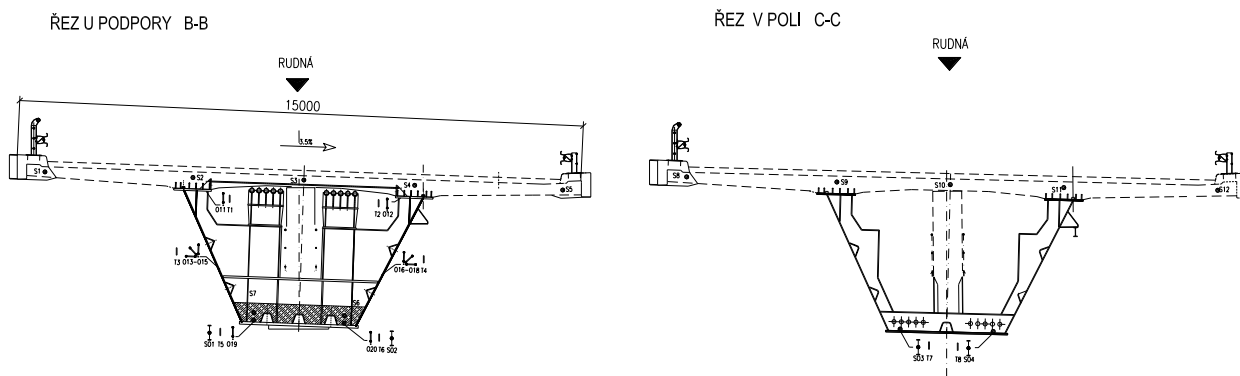
**Obr. 10** Poměrné přetvoření ve stěně nádrže N1, řez +X – dlouhodobé sledování.

## 4 DLOUHODOBÉ SLEDOVÁNÍ MOSTNÍCH KONSTRUKCÍ

### 4.1 MOST D4708.2 PŘES ODRU

#### 4.1.1 Popis sledované konstrukce a vyzbrojení měřícími snímači

Předmětnou konstrukcí se autor podrobně zabýval ve své disertační práci [12]. V následujících kapitolách je uveden jen stručný popis a záznamy dlouhodobého měření. Most D4708.2 přes Odru je pětipolový most s největším rozpětím středního pole 99,5 m – sledované pole. Tato stavba patřila k jedné z nejsložitějších spřažených ocelobetonových konstrukcí realizovaných ve střední Evropě. Nosná konstrukce je tvořena jednodokorovým nosníkem, jehož spodní deska a stěny jsou ocelové (v oblasti podpor je spodní deska zesílena betonem) a mostovka je tvořena spřaženou železobetonovou příčně předepnutou deskou, viz Obr. 11. Konstrukce byla postupně montována a dodatečně předepnutá volnými kabely. Při statickém řešení konstrukce bylo třeba přijmout řadu předpokladů o statickém chování jednotlivých prvků i celé konstrukce, které bylo třeba ověřit měřeními v průběhu montáže konstrukce.



**Obr. 11** Schematické příčné řezy mostu u podpory a v poli.

## Sledování poměrného přetvoření ocelové komory

Z důvodů problémů spojených s antikorozi ochranou bylo nutno měření poměrných deformací ocelových částí konstrukce rozdělit na dvě následující etapy s rozdílným způsobem měření:

**1. etapa:** do otryskání a provedení antikorozi nátěrů (20 odporových a 4 strunové tenzometry)

**2. etapa:** po provedení finální antikorozi ochrany (4 strunové tenzometry)

## Sledování poměrného přetvoření betonu

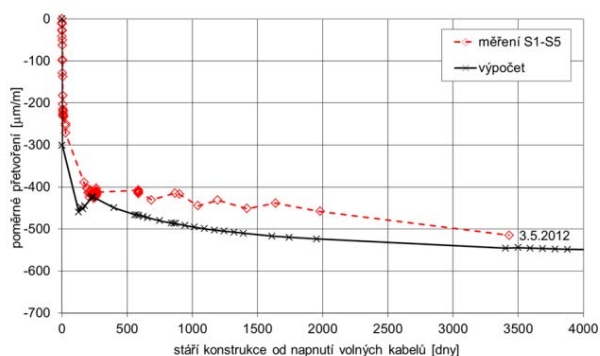
Poměrné deformace v betonu byly sledovány pomocí dvanácti zalitých strunových tenzometrů ve dvou řezech a to 4,5 m od osy podpory a uprostřed pole.

## Měření napětí v předpínací výztuži

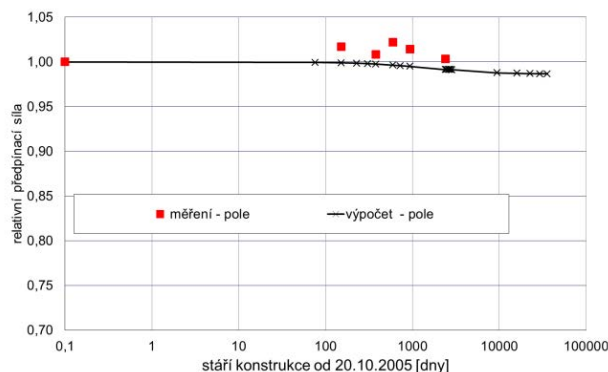
Měření napětí v předpínací výztuži bylo realizováno pomocí magnetoelastických snímačů na jednom volném kabelu K6, a to těsně za kotvou a v polovině kabelu v prostředním poli před spodním deviátorem. Toto uspořádání snímačů umožňuje sledovat průběh ztrát napětí v kabelu. Podélné předpětí je realizováno prostřednictvím 10 volných kabelů o délce cca 540 m, kde každý kabel je tvořen 27 lany LP 15,5.

### 4.1.2 Výsledky dlouhodobého měření a srovnání s výpočtovým modelem

Pro ověření reálného chování mostu byl vytvořen prutový výpočetní model mostu v programu TDA [12] a [16]. Jedná se o rovinný prutový výpočetní model respektující spřažený průřez. Ocelová a betonová část průřezu byly zadány samostatnými konečnými prvky na excentricitě vůči referenční ose mostu. Další konečné prvky představují jednotlivé volné předpínací kabely, spojené tuhými prvky s ocelovou částí v místě deviátorů a sedel.



**Obr. 12** Průběh poměrného přetvoření betonu – horní deska – řez B.



**Obr. 13** Průběh relativní předpínací síly – pole.

Obr. 12 uvádí srovnání naměřených a vypočtených hodnot poměrného přetvoření pro čidla zabetonovaná v horní desce nad podporou. Poměrná přetvoření jsou vždy vynášena od doby napnutí volných kabelů. Je patrná dobrá shoda naměřených a vypočtených hodnot.

Průběh relativní předpínací síly na čidle v poli (poměr sil vztažených k síle v čase měření ve dne 20. 10. 2005) je uveden na Obr. 13. Za období 7 let (je k dispozici 5 měření) jsou naměřeny velmi malé změny předpínací síly, které dobře odpovídají výpočtům [16].

Sledování mostu probíhá více než deset let. Za tuto dobu je zřejmá velmi dobrá shoda naměřených a vypočtených hodnot poměrného přetvoření betonu i oceli. Změny velikosti předpínací síly v čase jsou minimální. Konstrukce mostu nevykazuje neočekávané zvýšené deformace a namáhání. Most se chová v souladu s výpočtovými předpoklady projektu.

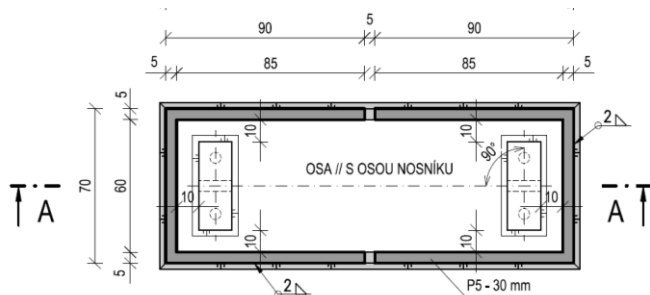
## 4.2 MOST D8-062 DÁLNIČNÍ MOST MEZI TUNELY RADEJČÍN

### 4.2.1 Popis sledované konstrukce

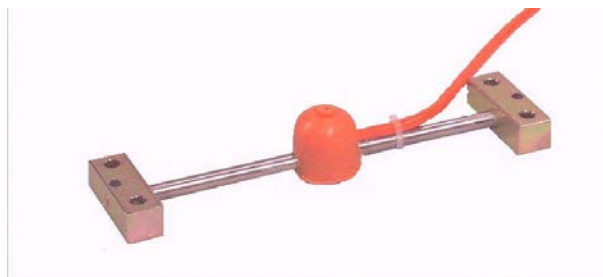
Most převádí dálnici D8 přes údolí Uhelné strouhy mezi tunely Prackovice a Radejčín. Mostní objekt se skládá ze dvou samostatných mostních konstrukcí (levý a pravý most), které převádějí vždy jednu polovinu dálnice. Jsou od sebe umístěny na vzdálenost tunelových trub a mají samostatné směrové a výškové vedení. Most je navržen jako spřažená ocelobetonová konstrukce trámového typu, spojitý nosník o 3 polích. Teoretická rozpětí jednotlivých polí, vztažená na osu ocelové nosné konstrukce jsou 38,80 + 54,00 + 38,80 m. Konstrukční výška nosné konstrukce je 3,585 m. Uložení nosné konstrukce je navrženo na hrncových ložiscích. Spodní stavba mostu je tvořena dvojicí krajních železobetonových opěr a dvojicí vysokých štíhlých železobetonových pilířů [17].

#### *Sledování poměrného přetvoření ocelové konstrukce*

Na ocelovou nosnou konstrukci levého mostu byly ve výrobně osazeny podkladnice pro upevnění strunových tenzometrů. Podkladnice z oceli S235 (profilu tyč 15/15) byly osazeny v páru na každé měřicí místo ocelové konstrukce, viz Obr. 14. Celkem bylo na ocelovou konstrukci osazeno 14 ks strunových tenzometrů TSR/5,5/T firmy Gage Technique, Obr. 15.



**Obr. 14** Schéma podkladnice pro upevnění strunových tenzometrů.



**Obr. 15** Strunový tenzometr TSR/5,5/T určený pro montáž na povrch.

#### *Sledování poměrného přetvoření spřažené železobetonové desky*

Pro sledování poměrných přetvoření ŽB desky bylo použito 11 ks strunových tenzometrů TES/5,5/T Gage Technique. Jednotlivé tenzometry byly osazovány na armokoš ŽB desky mostovky těsně před betonáží daných úseků.

#### *Teplotní snímače*

ŽB deska byla ještě v jednom řezu, mimo míst osazených strunovými tenzometry (a tedy i zabudovanými termistory), doplněna ve čtyřech bodech teplotními snímači PT1000 firmy Comet Rožnov.

#### *Měřicí ústředny*

Veškeré snímače byly propojeny pomocí kabelů HeluTronic LIYCY 4 × 0,35 do společného místa nad 3. podpěrou a osazeny konektory. Byly požívány následující měřicí ústředny :

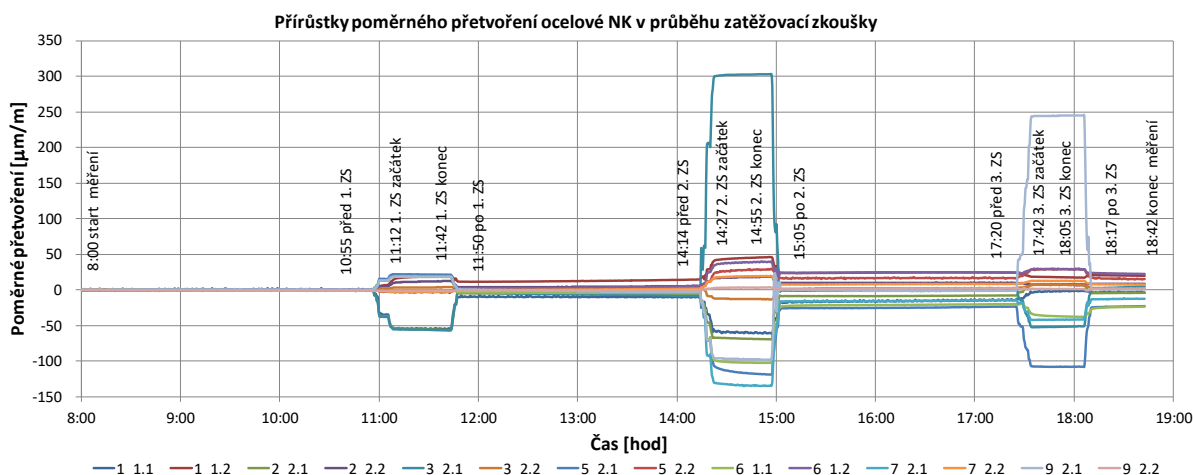
DataTaker DT80G – 5-ti kanálová měřicí ústředna – použita pro bodová měření,

DataTaker DT605 – 10-ti kanálová měřicí ústředna – použity 3 ks pro spojitý záznam,

MS6D – 16-ti kanálová měřicí a záznamová ústředna pro teplotní sondy. Použita pro spojitý záznam teplotních čidel (PT1000).

#### 4.2.2 Měření při zatěžovací zkoušce

Zatěžovací zkouška byla provedena v každém poli pravého i levého mostu. Jako zatěžovací zkušební vozidla byly použity čtyřnápravové sklápěče Mercedes-Benz Actros 4141 nebo Tatra 815 o hmotnosti 34 t. Pro každý zatěžovací stav bylo použito 9 těchto vozidel. Mostní objekt byl sledován v průběhu výstavby a při provádění zatěžovací zkoušky. Veškerá naměřená data byla průběžně předávána projektantovi pro verifikaci výpočtového modelu. Odezva konstrukce (poměrné přetvoření ocelové NK) na vnesené zatížení v průběhu ZZ je uvedena na Obr. 16.



**Obr. 16** Přírůstky poměrného přetvoření ocelové konstrukce v průběhu zatěžovací zkoušky.

## 5 AKTIVNÍ MONITOROVACÍ SYSTÉM – VIDA – MORAVIAN SCIENCE CENTRE BRNO

Uváděná problematika byla řešena v rámci projektu TA02011368 „*Systémy proti přetížení lehkých střešních konstrukcí klimatickým zatížením*“. Vlastní návrh systému, výsledky a průběh řešení je obsahem publikací a zpráv [18] až [26], ze kterých je čerpáno.

### 5.1 DŮVODY POUŽITÍ AKTIVNÍCH MONITOROVACÍCH SYSTÉMŮ

V případě nesplnění normami požadované spolehlivosti konstrukce je nutno přikročit k návrhu řešení, které umožní konstrukci bezpečně provozovat v souladu s platnými normami. Danou problematiku řeší především norma ČSN 73 2604 – Ocelové konstrukce – Kontrola a údržba ocelových konstrukcí pozemních a inženýrských staveb [2]. V [2] je uvedeno, že v případě, kdy konstrukce nevyhovuje, se použijí pro zajištění nápravy ustanovení uvedená v kapitole 7.2.3., kde je jako jedno z možných řešení nastalé situace uvedena možnost využít tzv. řízení rizik při provozu konstrukce a v jeho souvislosti též aktivní monitoring jejího chování. Norma [2] jasně definuje situace a podmínky, za kterých je možno konstrukci nevyhovující dle statického výpočtu provedeného v souladu s [1] dále provozovat bez provedení konstrukčních (tedy po většinou velmi nákladných) opatření.

K indikaci stavu nevyhovující konstrukce je třeba navrhnout a osadit vhodný monitorovací systém, který je vždy individuálně navržen a upraven pro potřeby dotčené konstrukce. Aplikací vhodného monitorovacího systému spojeného s kalibrovaným výpočtovým modelem je možno účinně předejít havárii konstrukce, kdy dosažení limitní míry spolehlivosti je včas indikováno, a může být přikročeno k příslušným opatřením.

## 5.2 PŘEDMĚTNÁ KONSTRUKCE – PAVILON D BVV

Nosná ocelová konstrukce zastřešení pavilonu D, viz Obr. 17, byla navržena a realizována v 70. letech minulého století. Z hlediska statického uspořádání se jedná o příhradovou desku o půdorysném rozměru  $108,0 \times 46,5$  m. Konstrukce zastřešení je podporována 8 vnitřními sloupy, které jsou v obou směrech osově vzdáleny 30,0 m, přičemž střešní deska přesahuje základní rastr nosných sloupů. Samotná nosná střešní příhradovina je tvořena stavebnicovou soustavou z jednotlivých dílensky svařovaných jehlanů (čtyřstěňů), které jsou tvořeny svařenými ocelovými trubkami různých dimenzí. Na místě stavby je potom konstrukce z těchto jehlanů sestavena za pomoci montážních šroubovaných styčníků Obr. 18. Celková výška střešní příhradoviny je 2,4 m, což definuje osovou vzdálenost horní a spodní roviny prutů [20], [21]. Objekt pavilonu D byl připravován pro nové využití (Moravian Science Centre Brno). Tyto práce byly prováděny jako přestavba a rekonstrukce objektu.



**Obr. 17** Objekt pavilonu "D" v areálu BVV - původní stav.



**Obr. 18** Pohled v rovině původní konstrukce zastřešení.

## 5.3 STAVEBNĚ-TECHNICKÝ PRŮZKUM A STATICKÝ PŘEPOČET KONSTRUKCE

Stavebně-technický průzkum prováděný firmou BESTEX spol. s r.o. (z výsledků získaných při realizaci vycházela navazující činnost v rámci řešení projektu TA02011368) se zaměřil především na vizuální prohlídku vybraných částí nosné ocelové konstrukce a vybraných konstrukčních detailů střechy. Velmi důležité bylo též ověření kvality použitého konstrukčního materiálu.

Statická analýza nosné ocelové konstrukce zastřešení objektu (pavilonu D) byla provedena metodou konečných prvků programovým systémem Scia Engineer. Numerickým výpočtem byl analyzován podrobný prostorový model konstrukce a též zjednodušený ortotropní deskový model. Na základě výpočtů a výsledků získaných z prostorového modelu byly následně označeny kritické prvky konstrukce (přepočít: BZK FAST VUT v Brně v rámci řešení projektu TA02011368) [24].

Na základě provedené statické analýzy a posouzení prutů nosného systému bylo možno konstatovat následující závěr:

**Konstrukce zastřešení na kombinaci účinků zatížení** (vlastní tíha prvků nosné ocelové konstrukce, vl. tíha nového střešního pláště, tíha nového VZT zařízení a rozvodů, tíha ostatních zařízení, **sníh v plné hodnotě definované normou [5]**, vítr – tlak/sání) **nevyhoví**. Konstrukce není s požadovanou mírou spolehlivosti schopna přenést normou [5] definovanou hodnotu zatížení sněhem. Je však možno nalézt takovou hodnotu zatížení sněhem, při které budou splněny všechny předpoklady definované [1] a konstrukce bude bezpečně plnit svoji funkci. Z výsledků je zřejmé, že je možno na střeše připustit až 44 kg sněhu na jeden metr čtvereční (55% normově dané hodnoty zatížení sněhem) při působení veškerých dalších očekávaných zatížení. Na základě těchto závěrů bylo rozhodnuto o aplikaci aktivního monitorovacího systému.

Podklady o konstrukci a statickém přepočtu jsou čerpány z [24] a [25].



## 5.4 NÁVRH AKTIVNÍHO MONITOROVACÍHO SYSTÉMU

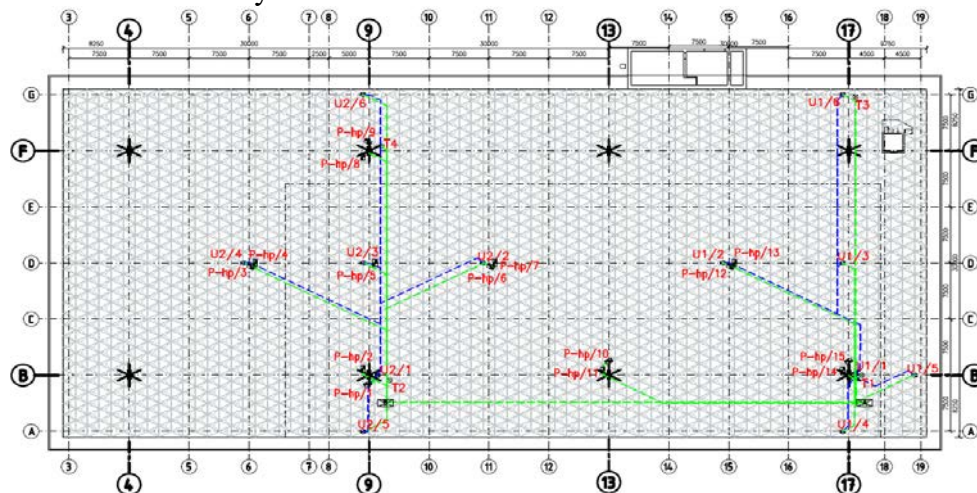
Princip měřicího systému na řešené střešní konstrukci je založen na instalaci měřících čidel v kritických místech konstrukce, napojených na měřící ústřednu vybavenou speciálním softwarem. Pro automatické sledování průhybů (deformace) střešní konstrukce od nahodilého zatížení lze použít celou řadu elektronických snímačů, ať už pro přímé měření průhybu, či pro sledování poměrných přetvoření vybraných nosných prvků, ze kterých se dá následně odvodit průhyb konstrukce. Na výběr vhodné metody pro konkrétní typ objektu má zásadní význam především: dispozice, účel objektu, způsob jeho využívání a v neposlední řadě typ nosné konstrukce střechy a popřípadě typ a přítomnost podhledů [20].

Čidly měřené hodnoty jsou v každém okamžiku porovnávány s hodnotami odpovídajících veličin stanovených na kalibrovaném a verifikovaném matematickém modelu konstrukce střechy. Při překročení jisté (předem definované) hodnoty tíhy sněhu, kterou je stávající nosná konstrukce zastřešení stále ještě schopna bezpečně přenést, je nutno zajistit odstranění sněhové pokrývky tak, aby nedošlo k překročení maximální přípustné hodnoty zatížení sněhem z hlediska spolehlivosti konstrukce střechy.

Navržený monitorovací systém sleduje celkem 3 základní charakteristiky střešní konstrukce:

- měření poměrných přetvoření prutů příhradoviny odporovými tenzometry (46 míst),
- měření teplot konstrukce (4 místa),
- měření průhybů nosné kce. v charakteristických místech hydrostatickou nivelací (12 míst).

Pro měření a vyhodnocení naměřených dat ze vstupních čidel slouží měřící systém, jehož jádrem jsou dvě měřící ústředny EMS DV 803.



**Obr. 19** Schéma rozmístění měřících bodů na horním pásu konstrukce zastřešení včetně tras hlavní kabeláže.

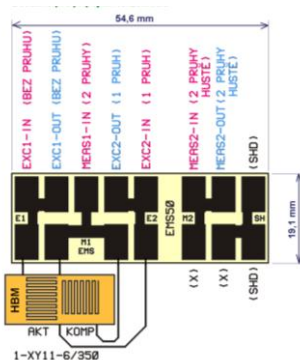
Čidla pro měření poměrných přetvoření jsou rozmístěna tak, aby obsáhla oblasti s maximálním namáháním prutů horního a spodního pásu a dále diagonály s největší hodnotou napjatosti. Místa, ve kterých jsou monitorovány průhyby, jsou volena v oblastech, kde konstrukce dosahuje maximálních hodnot průhybů při zatížení střechy sněhem [20], [25].

## 5.5 REALIZACE SYSTÉMU

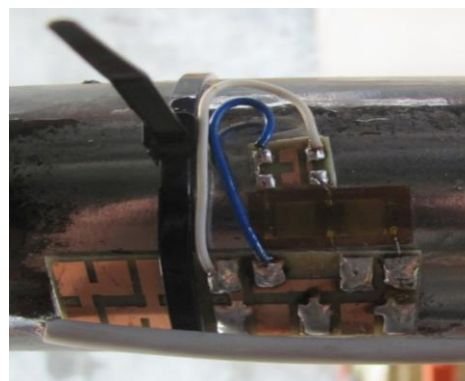
Montáž čidel detekčního systému a kabelových tras byla v rozsahu výstavní plochy realizována z nůžkové plošiny (výšková úroveň pracovní plošiny 13,5 m), na galeriích bylo využito pojízdného lešení (ve výšce 5 m). Pro provedení instalace kabeláže a osazení jednotlivých čidel na předem projektem definovaná místa (styčníky konstrukce) bylo provedeno jejich definitivní zapojení do dvojice instalovaných měřících ústředn.

### 5.5.1 Měření poměrných přetvoření

Osové poměrné přetvoření v prutech příhradové střešní konstrukce je měřeno pomocí odporových tenzometrů. Vzhledem k rozměrům a typu konstrukce se jeví jako nejvhodnější použití tenzometrů HBM 1-XY11-6/350 [35]. Jedná se o tenzometrické kříže, které jsou z důvodu teplotní kompenzace zapojeny do polomostu. Vzhledem k architektuře měřící ústředny a minimalizaci množství propojovacích kabelů byly vždy dva tenzometry (většinou horní a spodní pás v jednom místě konstrukce) propojeny za použití bezhalogenových kabelů DATAFLAMM-C  $3 \times 0,34 \text{ mm}^2$  a speciálně navržené svorkovnice, viz Obr. 20 a Obr. 21, do jednoho místa a z ní vedeny nehořlavými čtyřžilovými kabely J-H(ST)H Brandmeldekabel  $2 \times 2 \times 0,8$  do jedné ze dvou měřících ústředn EMS DV 803.



**Obr. 20** Propojovací svorkovnice pro připojení dvou tenzometrů 1-XY-6/350.



**Obr. 21** Odporový tenzometr 1-XY-6/350 nalepený na spodním pásu se svorkovnicemi.

### 5.5.2 Měření průhybu střešní konstrukce

Měření průhybu střešní konstrukce je realizováno pomocí hydrostatické nivelace. Jedná se o spojené nádoby naplněné kapalinou, v nichž vystoupí hladina do stejné výšky. Stejná výška hladin ve spojených nádobách je důsledkem hydrostatického tlaku, jehož velikost závisí na hloubce a ne na množství kapaliny. Zavěšení nádob je navrženo na styčník umístěný v horní rovině příhradoviny, viz Obr. 22.

Na konstrukci střechy jsou instalovány dva nezávislé okruhy měření průhybů, přičemž hlavní primární sloupová nádoba je instalována do konstrukce hlavice v blízkosti sloupu, který je z hlediska sledování průhybu střešní konstrukce považován za pevný bod. V ostatních měřených bodech jednoho okruhu, v každém okruhu je pomocí hadic připojeno 5 nádob umístěných na sledovaných styčnicích viz Obr. 22, je vyhodnocován vždy rozdíl váhy kapaliny (a tedy výšky hladiny) v nádobě vztažené k referenční sloupové nádobě. Z rozdílu výšky hladin v referenční nádobě a jednotlivých nádobách lze vypočítat pokles jednotlivých styčniců. Výška hladiny je určována pomocí měření hmotnosti nádob s kapalinou za použití váhových členů singlepoint HBM, viz Obr. 23.

Zvolené trasy hydrostatického propojení nádob byly nejdříve protaženy ocelovými lanky  $\phi 3 \text{ mm}$ , přichytávanými k prutům příhradové konstrukce střechy objímkami. Minimální spád trasy je 1% směrem k hlavním primárním nádobám U1/1 a U2/1. Následně byly ve vytyčených trasách protaženy hadice NOVAPLAST  $\phi 10 \text{ mm}$ . Pro zachování spádu jsou hadice přichyceny k vodícím ocelovým lankům pomocí plastových stahovacích pásek.

Váhové tenzometrické členy umístěné pod každou nádobou byly připojeny do měřících ústředn EMS DV 803 nehořlavými čtyřžilovými kabely.

Po propojení celého systému (jak hydrostatickým, tak elektrickým) bylo třeba oba okruhy naplnit kapalinou. Do jednotlivých okruhů bylo načerpáno cca 60 l kapaliny.



**Obr. 22** Měřící bod - jedna z nádob prvního okruhu umístěná na horní styčník příhradové konstrukce.



**Obr. 23** Detail váhového členu umístěného na závěsu s osazenou patní deskou pro nádobu.

### 5.5.3 Měření teplot

Pro měření teplot ocelových částí jsou použita platinová teplotní čidla Pt100, která pracují na principu změny elektrického odporu vlivem změny teploty.

### 5.5.4 Měřící ústředny

Jádrem celého systému jsou dvě měřící ústředny EMS DV 803, Obr. 24 a Obr. 25, které jsou určeny pro rozsáhlá dynamická i statická měření v průmyslovém prostředí. Každá ústředna umožňuje přímé měření až 32 kanálů.



**Obr. 24** Hardware měřící ústředny EMS DV 803.



**Obr. 25** Měřících ústředn EMS DV 803 osazená v konstrukci zastřešení.

## 5.6 ZATĚŽOVACÍ ZKOUŠKA

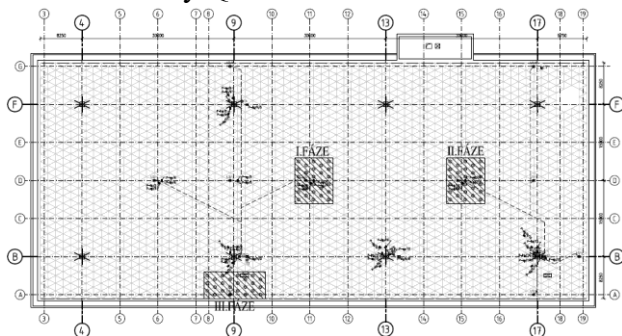
### 5.6.1 Popis provedené zatěžovací zkoušky

Zatěžovací zkouška sledované střešní konstrukce pavilonu D proběhla ve dnech 19. dubna a 20. dubna 2014. Vlastní realizaci ZZ prováděla firma BESTEX spol. s r.o. ve spolupráci s FAST VUT v Brně. Zatěžovací zkouška sledovala odezvu konstrukce na vložené statické zatížení umístěné v extrémních pozicích pro maximalizaci účinku působící hmoty. Zkouška probíhala v souladu s normou [7].

Výstupem provedené zatěžovací zkoušky bylo především zjištění průhybu střešní konstrukce od přidaného zatížení přesně definované intenzity. Získané údaje poté sloužily pro verifikaci (a případné zpřesnění) a následnou extrapolaci dat obdržených z numerické simulace. Zároveň

bylo provedeno nezávislé ověření funkčnosti instalovaného měřicího systému, neboť data o průhybu konstrukce byla ověřena dalšími dvěma nezávislými měřeními.

Základními údaji získanými ze zatěžovací zkoušky byly průhyby konstrukce v místech instalovaných váhových členů – poloha váhových členů viz Obr. 19. Ty byly čteny pomocí instalovaného měřicího systému ústřednami EMS DV 803. Nezávislé ověření funkčnosti a přesnosti měřicího systému bylo provedeno především pomocí externího měření odporovými potenciometrickými snímači, které měřily změnu dráhy mezi pevně definovanou základnou (podlahou pavilonu) a prohýbající se střešní konstrukcí. Tyto snímače byly připojeny do nezávislé měřicí ústředny Quantum X.



**Obr. 26** Rozmístění zatížení (I. až III. fáze).



**Obr. 27** Rozmístění sudů ve II. fázi zatěžovací zkoušky.

### 5.6.2 Zatěžovací stavy

Jednotlivé zatěžovací stavy (fáze) byly provedeny (s ohledem na geometrii zatěžované konstrukce) dle schematického rozmístění patrného z Obr. 26. Jednotlivé zatěžovací stavy byly uvažovány následovně:

- I. Fáze** - zatížení v poli uprostřed – 26 sudů (nad váhovým čidlem U2/2)
- II. Fáze** - zatížení v poli na kraji – 26 sudů (nad váhovým čidlem U1/2)
- III. Fáze** - zatížení na konzole – 24 sudů (nad váhovým čidlem U2/5)

### 5.6.3 Postup vnášení zatížení

Pracovní postup byl volen tak, aby byl maximalizován účinek vloženého statického zatížení a zatěžovací zkouška probíhala ve shodě s normou [7]. V žádné fázi provádění zatěžovací zkoušky však nesmělo dojít k přetížení střešní konstrukce. Stanovené zatížení, jeho rozmístění a postup jeho vložení na konstrukci proto respektovalo limitní dovolené zatížení, které bylo určeno na základě statického přepočtu střešní konstrukce. Zatížení bylo realizováno pomocí plastových sudů o objemu 260 l postavených na roznášecí OSB desky a postupně plněných vodou, Obr. 27.

### 5.6.4 Výsledky ze zatěžovací zkoušky měřené potenciometrickými snímači

Měření svislých deformací konstrukce pomocí potenciometrů, kdy je snímač lankem spojen s měřenou konstrukcí, umožňuje kontinuální a okamžité snímání měřených hodnot. Veškeré potenciometrické snímače byly připojeny k nezávislé měřicí ústředně Quantum X. S ohledem na povahu obdržených dat tak byly uvažovány jako hlavní nezávislý zdroj údajů sloužících k ověření funkčnosti a přesnosti instalovaného měřicího systému (respektive váhových členů měřicího systému). Z tohoto důvodu byly potenciometrické snímače osazeny na konstrukci v půdorysné poloze odpovídající poloze váhových členů.

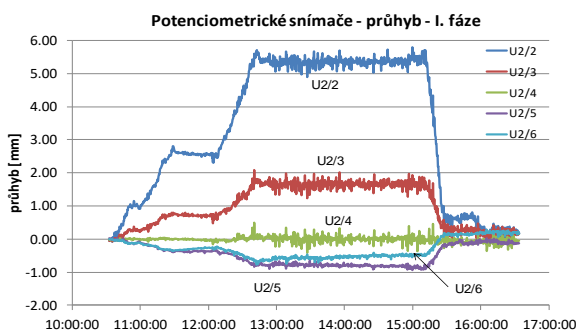
Výsledné získané údaje o relativních svislých posunech střešní konstrukce při ZS I jsou uvedeny v grafu na Obr. 28. Jedná se vždy o relativní deformace, tj. s odečtením kompenzačních

hodnot způsobených teplotní změnou. Tyto hodnoty lze přímo srovnávat s údaji získanými z váhových členů monitorovacího systému, neboť tyto jsou opět stanoveny jako relativní.

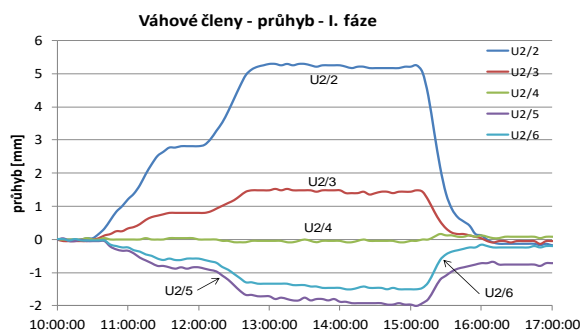
Na grafu je patrný vliv větru (zachyceno tzv. „rozkmitání“ snímačů), při provádění I. fáze byla naměřena jeho největší rychlost – 8 m/s (až 13 m/s v nárazech) oproti II a III. fázi, při kterých panovalo prakticky bezvětří. Tento jev lze pozorovat pouze u potenciometrů, které okamžitě reagují na rychlé kmitání střešní konstrukce. Váhové členy díky „pomalému“ transportu vody v hadičkách nejsou tímto jevem zřetelně ovlivněny [19], [25].

### 5.6.5 Výsledky ze zatěžovací zkoušky měřené instalovaným systémem

Při vyhodnocení dat získaných z váhových členů instalovaného měřicího systému je třeba vzít v úvahu především jisté „zpoždění“ měřené veličiny. Na rozdíl od potenciometrických snímačů, které určují deformaci měřeného místa okamžitě, je zde deformace dopočítávána z rozdílu hladin mezi danou a referenční nádobou (respektive váhovým členem). S ohledem na nutný čas, potřebný k transportu kapaliny mezi jednotlivými měřicími členy je nutno uvažovat s pomalejší reakcí systému na relativně rychle vnášené zatížení. Naměřené hodnoty při provádění ZS I jsou patrné z grafu na Obr. 29.



**Obr. 28** Průhyb střešní konstrukce při I. fázi ZZ měřený potenciometrickými snímači.



**Obr. 29** Naměřené hodnoty průhybů určené z váhových členů – I. fáze ZZ.

### 5.6.6 Teoretický výpočet

Před zatěžovací zkouškou byl na numerickém modelu proveden statický výpočet z důvodu určení průhybu od uvažovaného zatížení (pro danou fázi) a pro posouzení konstrukce zatížené v průběhu experimentu zatížením koncentrovaným do jednotlivých uzlů. Teoretické hodnoty průhybu byly stanoveny lineárním výpočtem na prostorovém prutovém modelu střešní konstrukce.

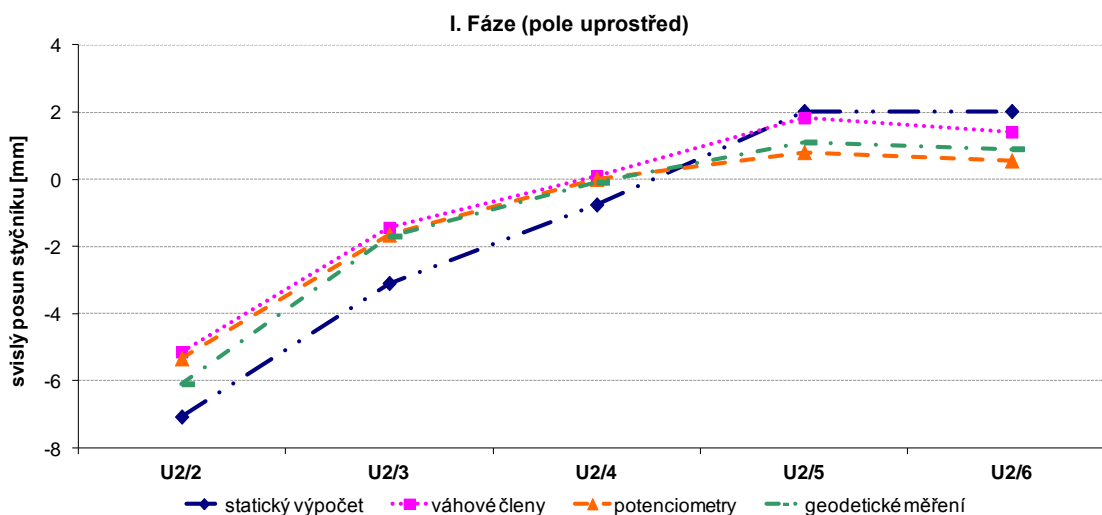
### 5.6.7 Geodetické měření průhybů

K nezávislému ověření výsledků ze snímačů osazených na střešní konstrukci (tj. v půdorysných polohách váhových členů a tedy i potenciometrů) bylo využito geodetického zaměření. Geodetické měření bylo provedeno pro I. a II. fázi zatěžovací zkoušky.

### 5.6.8 Vyhodnocení výsledků zatěžovací zkoušky

Porovnání teoretických hodnot s naměřenými údaji ZS I je provedeno v grafu na Obr. 30. Z uvedeného grafu je dobře patrná shoda experimentálně měřených dat získaných z potenciometrických snímačů, váhových členů a geodetického měření. Při srovnání je zřejmé, že tuhost numerického modelu je nižší než tuhost skutečné konstrukce.

Pro každý měřený bod bylo z tohoto důvodu nutno stanovit převodní koeficienty, které tyto rozdíly zohlední a umožní tak mezní hodnoty stanovené pomocí numerického výpočtu převést na reálné deformace skutečné konstrukce.



**Obr. 30** Porovnání teoretických hodnot s naměřenými údaji - I. fáze ZZ.

Z výše uvedeného srovnání hodnot průhybů stanovených potenciometrickými snímači a instalovanými čidly je dobře patrná funkčnost navrženého systému. Hodnoty indikované instalovanými čidly jsou srovnatelné s hodnotami získanými potenciometrickým měřením. Správnost potvrdilo i nezávislé měření prováděné pomocí velmi přesné nivelace, které s oběma měřeními velmi dobře korelovalo. Numericky predikované průhyby vykazovaly ve všech měřených bodech vyšší (absolutně) hodnoty, které jsou způsobeny ve výpočtu přijatými zjednodušeními.

## 5.7 OBSLUŽNÝ SOFTWARE MONITOROVACÍHO SYSTÉMU

Pro uživatelsky přívětivější možnost vyhodnocení naměřených dat byl ve spolupráci s UAM Vítkovice a.s. zpracován měřicí software „Monitor“, jenž on-line zpracovává systémem detekovaná data a vyhodnocuje je. Program slouží k automatickému vyhodnocování působícího zatížení na střešní konstrukci a při překročení limitních hodnot definovaných na základě numerické simulace, provedených měření a zatěžovací zkoušky vyhlásí poplach [26].

## 5.8 ZMĚNY V HYDROSTATICKÉM SYSTÉMU V PRŮBĚHU PROVOZU

Systém spojených nádob je otevřený a tudíž dochází k odparu kapaliny, proto musí být do systému doplňována jednou ročně při pravidelných servisních prohlídkách (popřípadě při zjištění kriticky nízké hladiny v nádobách).

Po dokončení rekonstrukce celého objektu, kdy již systém nemohl být vystaven záporným teplotám, došlo v obou větvích hydrostatického systému k výměně nemrznoucí kapaliny za vodu.

Po cca dvou letech provozu vznikly vlivem relaxace hadic jejich větší průvěsy mezi jednotlivými přichytnými body k ocelovým lankům. V červnu 2015 tedy byl celý systém v rámci velkého servisu vypuštěn, vyčištěn, dopnuty hadice a znovu napuštěn čistou vodou.

Po dalších dvou letech bezproblémového provozu se začala prodlužovat reakční doba systému a u některých nádob (váhových členů) docházelo k samovolnému posunu signálu. Tento jev se projevoval hlavně v 1. větvi, zejména u nádob nad vestavěnými kanceláři. Při vizuální prohlídce systému bylo zjištěno značné zanesení nádob prachem a voda v nádobách začínala zahnívat. Na základě těchto skutečností byl opět proveden servis celého hydrostatického systému. Voda byla zcela vypuštěna a nádoby vyčištěny. Pro zamezení vniku prachu do kapaliny byly na otvory ve víkách nádob instalovány vzduchové filtry.

Pro zabránění zahnívání vody byl systém spojených nádob napuštěn roztokem síranu měďnatého (modré skalice).

Po výše popsaných změnách a úpravách se měřicí systém chová stabilně a nevykazuje žádné problémy při provozu.

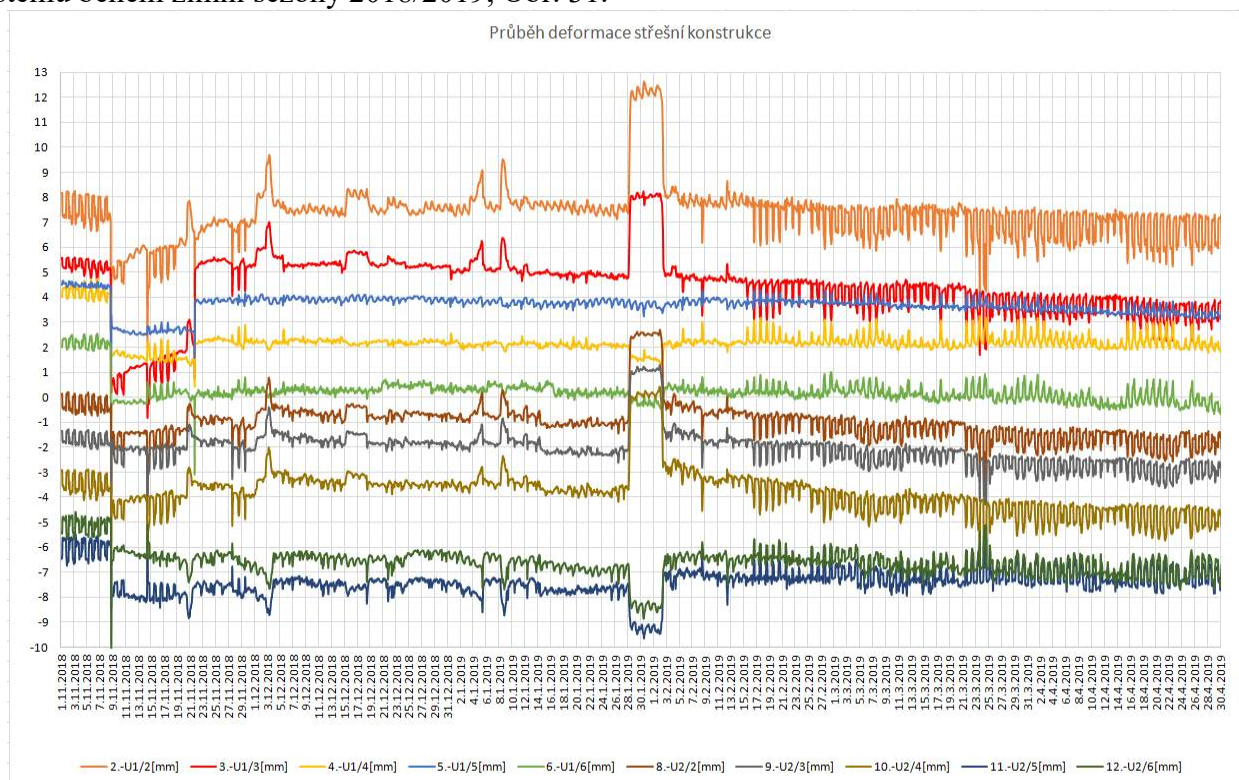
## 5.9 DLOUHODOBÝ PROVOZ

Celý systém proti přetížení střešní konstrukce MSCB podléhá pravidelným servisním prohlídkám vždy před zahájením zimní sezóny. Při těchto prohlídkách je doplňována kapalina v jednotlivých okruzích a prováděna zkouška funkčnosti.

Dalším krokem prohlídky je ověření vlastní kalibrace váhových členů, která se provádí položením kalibrovaného závaží na horní víko nádoby a sleduje se odezva daného váhového čidla.

Funkčnost tenzometrů osazených na prutech příhradové konstrukce se kontroluje průběžně ze záznamů kontinuálního měření.

Funkčnost a chování systému je prezentováno na následujícím grafu zachycujícím měřené průhyby styčníků horního pásu příhradové střešní konstrukce váhovými členy hydrostatického systému během zimní sezóny 2018/2019, Obr. 31.



**Obr. 31** Průhyb měřených styčníků v zimním období 2018/2019.

Skoky v záznamu od 9. 11. 2018 do 29. 11. 2018 jsou způsobeny servisní činností, která touto dobou probíhala na hydrostatickém systému. Z hlediska funkčnosti systému je zajímavé období od 28. 1. do 3. 2. 2019, kdy jsou patrné výrazné pohyby jednotlivých měřených bodů. V tomto případě se jedná opravdu o odezvu na napadený sníh. Výkmity v následujícím období jsou zaznamenány denní teplotní cykly konstrukce a vliv klimatizace.

## 5.10 ZÁVĚRY K PROVOZU MONITOROVACÍHO SYSTÉMU

Pro daný objekt byl navržen a realizován automatický monitorovací systém deformací (průhybů) styčníků a poměrných přetvoření prutů příhradové střešní konstrukce. Zejména způsob měření průhybů pomocí hydrostatické nivelace, který si vynutily účel a dispozice objektu, je neobvyklý a inovativní. Použitím spojených nádob zavěšených ve střešní konstrukci nedochází

k žádnému narušení či omezení užitého prostoru a nehrozí ovlivnění měření průhybů náhodným zásahem do měřicího systému ze strany návštěvníků centra. Systém je dále doplněn o tenzometrické měření prutů příhradové konstrukce, z něhož je patrná změna napětí v jednotlivých měřených prvcích.

Monitorovací systém, který byl uveden do provozu na podzim roku 2013 a ověřen zatěžovací zkouškou na jaře 2014, je plně funkční, o čemž svědčí i záznamy měření za dobu cca šesti let.

Pro udržení systému v plném funkčním provozu je nezbytná pravidelná údržba, kontrola a zajištění požadované odbornosti obslužného personálu.

## 6 EDU – MONITORING BARBOTÁŽNÍCH VĚŽÍ PŘI PŘETLAKOVÝCH ZKOUŠKÁCH

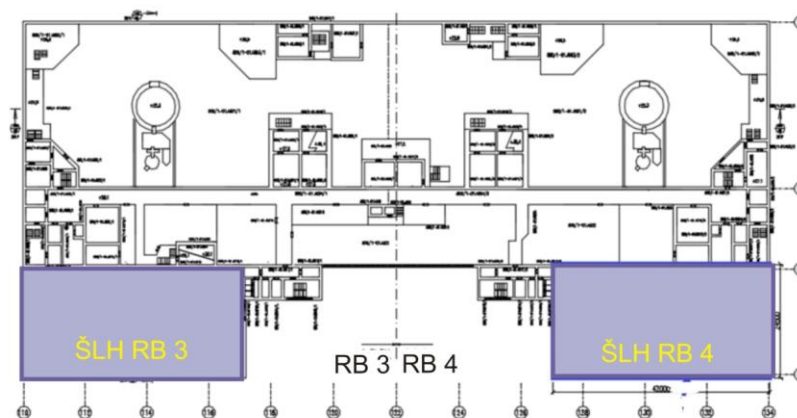
V rámci spolupráce FAST VUT v Brně s firmou BESTEX spol. s r.o. se autor již 6 let aktivně podílí na vývoji a instalaci měřicího systému deformací při přetlakových zkouškách hermetických zón (především barbotážních věží) v jaderné elektrárně Dukovany.

### 6.1 SLEDOVANÁ KONSTRUKCE

Jaderná elektrárna Dukovany obsahuje dva hlavní výrobní bloky (HVB), přičemž každý z nich dále obsahuje dva reaktorové bloky (RB). Součástí HVB 1 jsou tedy reaktorové bloky RB 1 a RB 2, a součástí HVB 2 jsou reaktorové bloky RB 3 a RB 4. Z funkčního hlediska jsou tedy reaktorové bloky v HVB členěny na hermetickou a nehermetickou část. Hlavním účelem hermetické zóny je zamezení šíření radioaktivních látek mimo prostory HZ.

Pro ověření spolehlivosti a funkčnosti HZ se provádí dva typy zkoušek integrity:

- OZIK – ověřovací zkouška integrity kontejnmentu,
- PERIZ – periodická integrální zkouška.



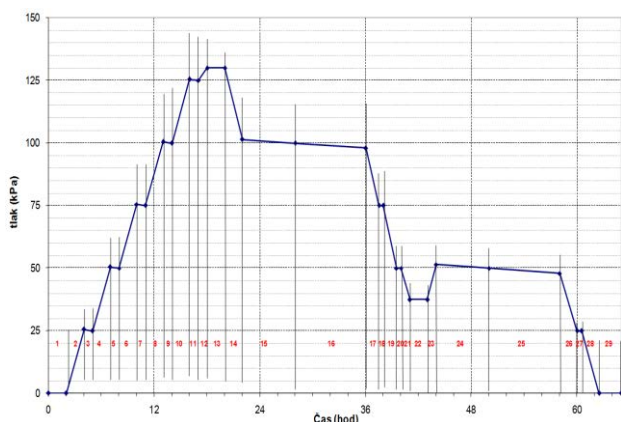
**Obr. 32** Schematické zobrazení polohy šachet lokalizace havárie v rámci HVB 2.

Nedílnou součástí hermetické zóny jsou šachty lokalizace havárie (ŠLH) tzv. barbotážní věže. Účelem budovy ŠLH je zabezpečit, aby při případné havárii uniklé chladivo zůstalo bezpečně shromážděné ve formě z kondenzované radioaktivní parní směsi a nedocházelo k jeho úniku mimo hermetické prostory. Konstrukce ŠLH tak tvoří poslední bariérovou ochranu v případě havarijní události. Šachta lokalizace havárií má vnější půdorysné rozměry  $24,5 \times 42,0$  m [27]. Tloušťka železobetonových svislých konstrukcí je 1,5 m, vodorovné prvky mají tloušťku 1,0 m. Hermetičnost vnitřních prostor je zajištěna ocelovou vystýlkou tl. 6 mm kotvenou k nosné konstrukci z vnitřního líce. Poloha ŠLH v půdorysu HVB 2 je na Obr. 32.

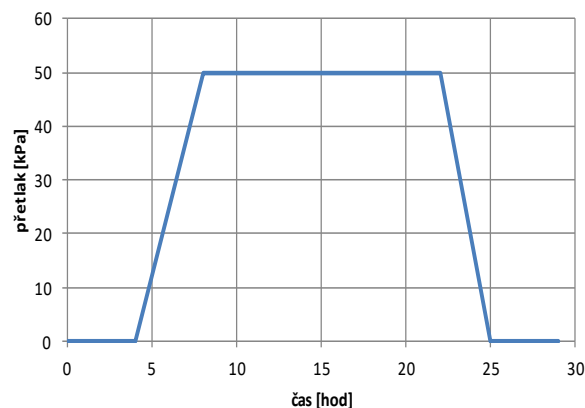


## 6.2 PRŮBĚH ZKOUŠEK INTEGRITY

Jedná se o zkoušky, kdy je konstrukce vystavena zatížení a sleduje se její deformační odezva a těsnost. Jako zkušební zatížení je uvažován vnitřní přetlak o maximální velikosti 130 kPa pro OZIK, viz Obr. 33 a 50 kPa při zkoušce PERIZ, Obr. 34.



**Obr. 33** Harmonogram ověřovací zkoušky integrity kontejnmentu ochranné obálky.



**Obr. 34** Harmonogram periodické integrální zkoušky.

Měření deformací konstrukce v průběhu přetlakové zkoušky probíhá ve třech fázích:

- **Referenční měření před zahájením přetlakové zkoušky.** Měření je zahájeno nejpozději 24 hodin před teoretickým počátkem tlakování.
- **Měření v průběhu přetlakové zkoušky.** Měření probíhá po celou dobu zkoušky.
- **Následné měření po ukončení přetlakové zkoušky.** Měření pokračuje i po odtlakování hermetizovaných prostor. Délka následného měření je až 24 hodin. Cílem následného měření je sledovat chování konstrukce po odtížení.

## 6.3 VNITŘNÍ MĚŘENÍ DEFORMACÍ OBJEKTU ŠLH S KONTINUÁLNÍM ZÁZNAMEM

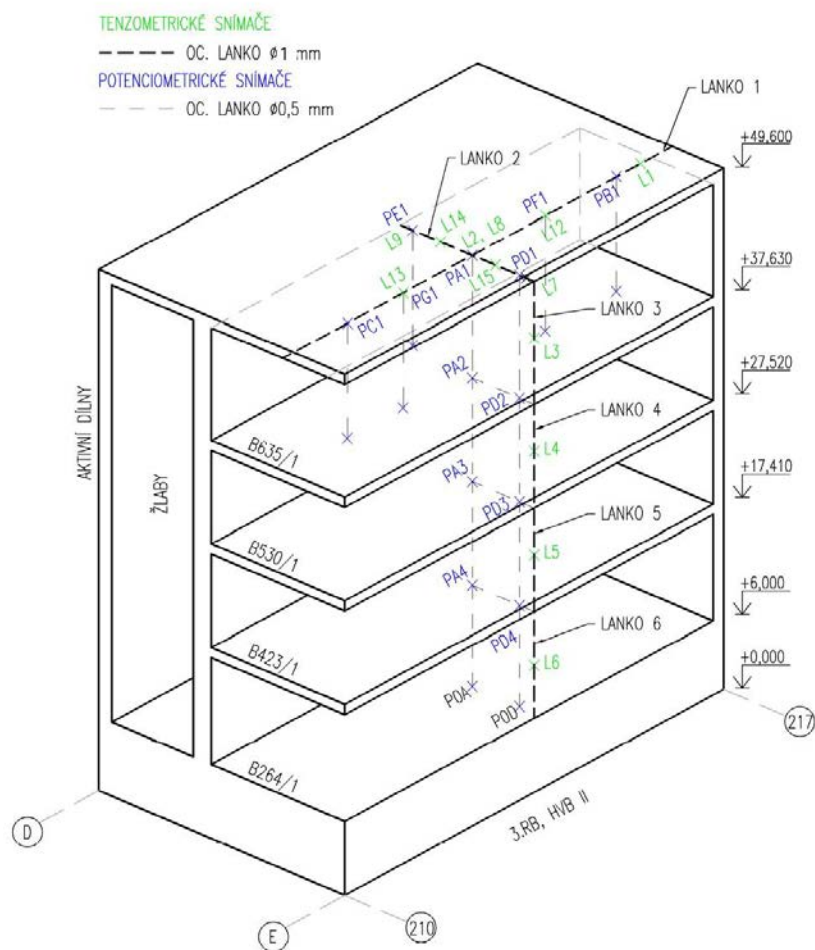
Měření barbotážních věží při OZIK jsou rozdělena dle typu na „vnitřní“ měření s kontinuálním záznamem a „vnější“ geodetické měření. Konstrukce je z důvodu získání potřebných dat měřena pomocí dvou na sobě nezávislých metod. Při PERIZ jsou prováděna jen vnitřní měření. Vystrojení konstrukce pro vnitřní měření a princip jeho provádění je však pro obě zkoušky (OZIK i PERIZ) shodný. V následujícím textu a kapitolách bude rozebráno především vnitřní měření, které je v dané problematice hlavním úkolem autora této práce.

### 6.3.1 Poloha bodů vnitřního kontinuálního měření snímači

Navržené rozmístění a počet sledovaných míst umístěných uvnitř konstrukce (strop na úrovni + 49,6 m a stěna v ose E) a na vnějším líci ŠLH na stěně v ose D (z prostoru aktivních dílen) je patrný z Obr. 35 (Na obrázku je uvedeno konkrétní rozmístění snímačů pro 3. RB HVB 2, toto rozmístění je shodné pro 1. RB HVB 1 a osově souměrné pro 2. RB HVB1 a 4. RB HVB 2).

Celkový počet míst vnitřního měřicího systému je 28 při OZIK resp. 26 při PERIZ. Jejich rozložení je následující:

- měření průhybů stropů potenciometrickými snímači – 13 míst,
- měření průhybů stropů tenzometrickými snímači – 9 míst,
- měření deformací stěn tenzometrickými snímači – 6 míst (4 místa při PERIZ).



**Obr. 35** Schéma polohy jednotlivých čidel a vztažných lanek vnitřního kontinuálního měření v rámci objektu ŠLH.

### 6.3.2 Měření průhybů střešní konstrukce na úrovni + 49,6 m

Měření je prováděno pomocí potenciometrických snímačů a ohybových tenzometrických snímačů deformaci (OSTD).

**Potenciometrické snímače** monitorují změnu vzdálenosti mezi podlahou a stropem daného plynoměru. Při tomto způsobu měření je nutno uvážit vztažný (nedeformovatelný, stacionární) bod na podlaze nejnižšího plynoměru, schéma viz Obr. 35, body P0A a P0D, v místě uložení této podlahové konstrukce na svislé stěny pod úrovní + 6,00 m.

**Tenzometrické ohybové snímače** stanovují změnu vzdálenosti mezi stropní konstrukcí a teoretickou základnou definovanou napnutým lankem. U této metody je třeba věnovat zvýšenou pozornost provedení vztažné (stacionární) přímký – lanka, neboť je nutno počítat s jeho relaxací a průvěsem. Je navrženo měření vůči dvojici vodorovných vztažných lanek – Lanko 1 a Lanko 2, viz Obr. 35 – napnutých v podélném a příčném směru pod stropem horního plynoměru.

### 6.3.3 Měření vodorovné deformace stěny v ose E

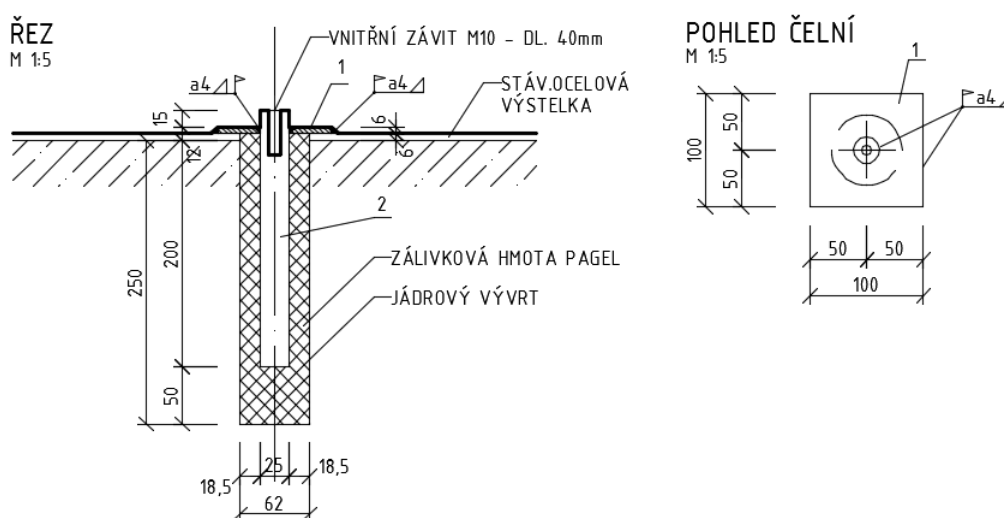
Deformace stěny v ose E je při působení vnitřního přetlaku měřena tenzometrickými ohybovými snímači. Tenzometrické snímače měří vodorovný posun (vyboulení) této konstrukce vůči teoretické základně, kterou tvoří svisle napnuté ocelové lanko, Obr. 35.

### 6.3.4 Měření vodorovné deformace stěny v ose D

Deformační chování stěny v ose D je navrženo měřit (pouze při provádění zkoušky OZIK) tenzometrickými ohybovými snímači (shodně se stěnou v ose E). Jsou zde použita dvě svislá lanka (Lanko 7 a 8) kotvená v pevném bodu u stropu místnosti aktivních dílen do konstrukce ŠLH.

## 6.4 PEVNÉ KOTEVNÍ BODY PRO VNITŘNÍ MĚŘENÍ

Pro kotvení snímačů, závěsů a vztažných lanek vnitřního systému měření s kontinuálním záznamem jsou navrženy pevné body kotvené v nosné konstrukci budovy ŠLH. Konstruktivní řešení pevného kotevního bodu je patrné z Obr. 36. Provedení pevných kotevních bodů musí vyloučit možné rozdílné chování měřeného povrchu (vnějšího, vnitřního) a železobetonové nosné konstrukce. Měřicí čidla jsou buď přímo kotvena do vnitřního závitu kotevního trnu, nebo jsou magneticky osazena na kotevní desku šroubovanou do kotevního trnu.



Obr. 36 Provedení pevných kotevních bodů (vnitřní závit M10, resp. M6).

Pevné kotevní body nejsou instalovány pouze do podlah plynojemů. Potenciometrické snímače, resp. stojánky snímačů, jsou tedy volně položeny na ocelovou výstelku stropních konstrukcí. Aby nedocházelo k ovlivnění měření případnými dutinami mezi ocelovou výstelkou a betonovou konstrukcí, umísťují se nohy stojánků ke svarům ocelové výstelky, v jejichž blízkosti jsou plechy kotveny do podlahy.

## 6.5 VZTAŽNÉ LINIE PRO TENZOMETRICKÉ SNÍMAČE DEFORMACÍ – LANKA

Při měření deformací konstrukcí (obzvláště takto rozsáhlých jako jsou ŠLH) je vždy největším problémem pevný vztažný bod, ke kterému deformace měříme. Sebejpřesnější snímače nebudou vykazovat správné výsledky, pokud nebudou mít pevnou neměnnou vztažnou rovinu / bod.

### 6.5.1 Vodorovné vztažné linie – vodorovná lanka

Pro měření průhybu stropu nad prvním plynojemem jsou mimo jiné využity ohybové tenzometrické snímače (viz kapitola 6.6), pro které jsou za vztažnou linii použita ocelová lanka  $\phi$  1 mm natažená cca 300 mm pod úroveň stropu. Napnutí lanek je realizováno pomocí ocelových pružin s označením T2540, viz Obr. 37. Tuhost použitých pružin je výrobcem definována hodnotou 1,11 N/mm. Každé lanko je pružinami předepruto na sílu cca 420 N. Velmi nízká tuhost pružiny zajišťuje, že při délkových změnách lanka způsobených teplotními rozdíly takřka nedochází ke změně tažné síly a tudíž ke změně průvěsu.



**Obr. 37** Pružina T2540 napínající podélné lanko v horním plynojemu zakotvená do pevného bodu.

Takto napnuté lanko však také nemůžeme považovat za absolutně pevnou vztaznou linii (to by šlo pouze za předpokladu nulového odporu planžety tenzometrického snímače). Proto byly v laboratořích stanoveny tzv. tuhostní koeficienty vodorovného lanka pro použitý typ tenzometrických snímačů uvedených v kapitole 6.6. Jde o poměr absolutní změny polohy tenzometrického snímače (vyvozené posunem rektifikovatelného stojanu) měřené kalibrovaným indukčností snímačem dráhy a hodnoty naměřené tímto snímačem.

### 6.5.2 Svislé vztazné linie – svislá lanka

Měření vyboulení stěn v ose E plynojemů viz Obr. 35 je opět řešeno pomocí ohybových tenzometrických snímačů deformací (viz kapitola 6.6), pro které jsou za vztaznou linii použity ocelová lanka  $\phi$  1 mm zavěšená na stropu cca 150 mm od stěny a spuštěná dolů. Závěsy jsou kotveny na stropy plynojemů do pevných bodů a napínány na sílu cca 120 N pružinou s napínacím šroubem upevněným pomocí magnetu KRH-42 (s magnetickou silou 670N) k ocelové výstelce podlahy daného plynojemů, Obr. 39.

Obdobným způsobem jako u vodorovného lanka byl i zde stanoven tzv. tuhostní koeficient svislého lanka pro použitý typ tenzometrických snímačů, Obr. 38.



**Obr. 38** Experimentální stanovení koeficientu tuhosti svislého lanka.



**Obr. 39** Reálné přikotvení v plynojemů.

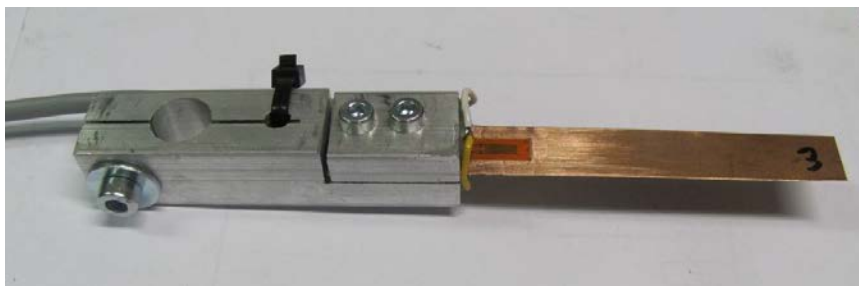
## 6.6 TENZOMETRICKÉ SNÍMAČE DEFORMACÍ - OSTD

Jde o snímače založené na ohybu planžety, jejíž deformace je snímána odporovými tenzometry. Aktivním členem tohoto snímače je ohebná planžeta z pružinového bronzu osazená dvojicí odporových tenzometrů zapojených do půlmůstku. Tento způsob zapojení tenzometrů, kdy jeden

tenzometr je na horní straně a druhý na spodní straně planžety, způsobí zdvojení výstupního signálu (zvýšení citlivosti) a také zajistí teplotní kompenzaci snímače. Při deformaci konstrukce dochází k jejímu oddálení od ocelového lanka (stacionárního bodu), a tím ke změně ohybové deformace planžety snímače, jež vyvolá změnu výstupního signálu z tenzometrického pŕlmŕstku.

### 6.6.1 Výroba snímačŕ OSTD

Tělo snímače je vyrobeno z hliníkového profilu 20 × 20 mm, do něhož je vyvrtán otvor  $\phi$  12 mm pro nasazení na magnetický stojánek. Na druhé straně je připraven výřez pro vsazení pružné planžety. Tvar planžety (obdělík 12 mm × 100 mm) je vystřížen z pružinového bronzu tloušťky 0,15 mm, do něhož jsou vyseknuty díry pro přichycení k tělu snímače. Následně je planžeta osazena dvojicí odporových tenzometrŕ HBM 1-LY11-6/350. Po vsazení planžety do těla snímače je provedeno elektrické propojení tenzometrŕ a připojení kabeláže. Posledním krokem výroby je ochrana tenzometrŕ nátěrem laku PU 120. Hotový snímač je ukázán na Obr. 40.



**Obr. 40** Tenzometrický snímač deformací OSTD.

Při použití ohybových tenzometrických snímačŕ je odchylka měření ovlivněna následujícími faktory:

- a) přesnost záznamu dat tenzometrickými snímači,
- b) ztráty dat (datový šum) vlivem délky kabeláže,
- c) přesnost záznamu dat ŕstřednou,
- d) ohybová tuhost ocelového lanka při vzájemném kontaktu s planžetou snímače.

Celková odchylka měřicí metody zahrnující výše uvedené vlivy a) až c) je stanovena hodnotou  $\pm$  0,05 mm. Vzájemný poměr tuhosti ohybové planžety a napnutého lanka (bod d) je zohledněn při vyhodnocení měřených dat experimentálně stanoveným koeficientem tuhosti pro lanka.

Každý použitý snímač je kalibrován přímo s kabeláží o příslušné délce a na příslušném kanále měřicí ŕstředny EMS DV 803. Jako měřicí etalon je použit kalibrováný indukčnostní snímač 1-WA10-T, připojený k měřicí ŕstředně Quantum X. Kalibrace probíhá na speciálním stojanu s rektifikací polohy šnekovým převodem, výstupem kalibrace každého snímače OSTD je příslušný kalibrační list.

### 6.7 POTENCIOMETRICKÉ SNÍMAČE DEFORMACÍ

Potenciometrické snímače typu MS04 monitorují změnu vzdálenosti mezi podlahou a stropem daného plynojemu. Ocelový závěs je připevněn do pevného bodu ve stropu plynojemu a přes kladku snímače umístěného na stojánku na podlaze plynojemu je napínán závažím o hmotnosti 1 kg. Délková změna je tedy převáděna na ŕhlové natočení, které je zaznamenáváno kruhovým potenciometrem. Použité snímače MS04, zobrazené na Obr. 43, mají měřicí rozsah  $\pm$  30 mm s rozlišovací schopností 0,02 mm. Odchylka měření při použití této metody a snímače, kterou lze teoreticky stanovit, je ovlivněna následujícími faktory:

- a) přesnost záznamu dat potenciometrickými snímači,
- b) přesnost záznamu vnitřní teploty v plynojemech,

- c) rozptyl materiálových charakteristik ( $E$ ,  $\alpha$ ) použitého drátu průměru 0,5 mm pro výpočet protažení vlivem změny okolní teploty,
- d) vyrovnání lokálních imperfekcí použitého drátu (lanka),
- e) ztráty dat (datový šum) vlivem délky kabeláže,
- f) přesnost záznamu dat ústřednou.

Celková odchylka měřicí metody zahrnující výše uvedené vlivy (tj. vlivy, jež nelze v průběhu vyhodnocení měření eliminovat) je stanovena hodnotou  $\pm 0,1$  mm. Uvedená chyba zahrnuje odchylku potenciometrického snímače stanovenou včetně kabeláže a vlivu konektorů.

Každý použitý snímač je opět kalibrován přímo s kabeláží o příslušné délce a na příslušném kanále měřicí ústředny EMS DV 803. Jako měřicí etalon je použit kalibrovaný indukčnostní snímač 1-WA50-T připojený k měřicí ústředně Quantum X. Výstupem kalibrace každého snímače MS04 je opět příslušný kalibrační list.

## 6.8 OSTATNÍ PŘÍSTROJOVÉ VYBAVENÍ MĚŘICÍHO SYSTÉMU

### 6.8.1 Měřicí ústředna

Všechny snímače osazené v hermetické zóně jsou kabeláží propojeny do jedné měřicí ústředny EMS DV 803 umístěné v horním plynojemu. Ústředna sama je vybavena vnitřní záložní baterií, která je schopna překlenout výpadky napájení sítě na 4 hodiny. Vzhledem k důležitosti měření je však zapojena do sítě ještě přes záložní zdroj, který vydrží napájet ústřednu 6 dní (doba dostatečná na provedení jak OZIK tak PERIZ). Použitá EMS DV 803 je měřicí ústředna pro rozsáhlá dynamická i statická měření v průmyslovém prostředí.



**Obr. 41** Měřicí ústředna EMS DV 803 se záložním zdrojem a kabeláží.

### 6.8.2 Teplotní loggery

Během měření jsou v každém plynojemu cca uprostřed výšky (na konstrukci ocelové plošiny) a na ocelové příhradové konstrukci v aktivních dílnách umístěny zařízení na měření teploty a relativní vlhkosti Comet S3120E. Měření teploty se provádí z důvodu možnosti stanovení protažení ocelového drátu  $\phi 0,5$  mm (pro potenciometrické snímače) vlivem změny okolní teploty. Dále je pomocí čtyřkanálového loggeru S0141 [37], sledována teplota povrchu ocelové výstelky jak na stropu poblíž snímače L15, na stěně u snímače L3 tak, i teplota vzduchu v těchto bodech.

### 6.8.3 Snímač tlaku

Pro získání kontinuálního záznamu vnitřního tlaku uvnitř hermetické zóny je v horním plynojemu umístěn tlakový snímač PAB-A-500KP s nelinearitou 0,04 % měřicího rozsahu [36].

## 6.8.4 Kabeláž

Kromě snímačů teploty a vlhkosti je veškeré měřicí zařízení (potenciometrické snímače, ohybové tenzometrické snímače a snímač tlaku) napojeno pomocí kabeláže na ústřednu sloužící k záznamu a uchování dat. Jako kabeláž jsou použity stíněné třížilové kabely s označením HELU TRONIC-CY 3×0,25 (LiY-CY).

## 6.9 PERIZ 4. RB

### 6.9.1 Instalace měřicího systému

Instalace měřicího zařízení v plynojemech ŠLH proběhla dne 22. ledna 2020 od 07:30 hod. do cca 17:00 hod. Instalace byla zahájena v horním plynojemu označeném jako plynojem P1 a dále probíhala směrem ke spodnímu plynojemu s označením P4.

Celkem bylo osazeno 13 potenciometrických (viz kapitola 6.7) a 13 tenzometrických (viz kapitola 6.6) snímačů deformací a jedno čidlo pro snímání vnitřního tlaku, které byly zapojeny do měřicí ústředny EMS DV 803. Dále bylo instalováno 9 teplotních loggerů (viz kapitola 6.8).

### *Postup montáže*

Před zahájením vlastní instalace snímačů byly v horním plynojemu natažena postupně příčná a podélná vodorovná lanka (viz kapitola 6.5) pro vytvoření vztahné linie tenzometrických snímačů.

Dále následovala vlastní instalace OSTD snímačů. Přímé osazení snímačů do pevných kotevních bodů (kapitola 6.4, Obr. 36) není z důvodu přesnosti provedení těchto bodů možné. Proto byly pro tyto instalace využívány přechodové kotevní desky, ke kterým byly snímače přichyceny prostřednictvím magnetických stojánek. Před propojením kabeláží do ústředny byl každý snímač za použití jednobáňové tenzometrické měřicí ústředny ME702 předepnut oproti vztahnému lanku na požadovanou počáteční hodnotu deformace (cca 2 mm). To zajišťuje trvalý kontakt s lankem a nehrozí nebezpečí výpadku měření. Způsob instalace je patný z Obr. 42.



**Obr. 42** Nainstalovaný snímač měřicího bodu L1.



**Obr. 43** Potenciometrický snímač MS04 instalovaný v plynojemu P1.

Zároveň při instalaci OSTD snímačů byly spouštěny závěsy (ocelový drát  $\phi$  0,5 mm) se závažím pro potenciometrické snímače deformací (kapitola 6.7). Tyto závěsy byly kotveny do samostatných pevných kotevních bodů. Na podlahu v místě závěsů byly instalovány stojánky s potenciometrickými snímači MS04 viz Obr. 43.

Následně bylo instalováno svislé lanko (viz kapitola 6.5) a tenzometrický snímač vyboulení stěny v měřicím místě L3. Způsob instalace byl shodný jako v případě OSTD snímačů průhybu stropu. Napnutí lanka pomocí pružiny na předepsanou sílu dle pracovního diagramu použité pružiny a přichycení snímače je patrné z Obr. 39 a Obr. 42.

Po instalaci všech měřicích snímačů v horním plynojemu byly postupně instalovány snímače v plynojemech P2 až P4. V těchto patrech byla instalace podstatně snadnější. Zde byly osazeny

vždy jen dva potenciometrické snímače deformací stropu a jeden tenzometrický snímač vyboulení stěny. Postup instalace daných snímačů byl analogický jako v případě horního plynojemu P1.

Následovalo propojení veškerých snímačů prostřednictvím kabeláže (viz kapitola 6.8) do měřicí ústředny (Obr. 41) instalované v horním plynojemu P1 a ověření funkčnosti celého systému.



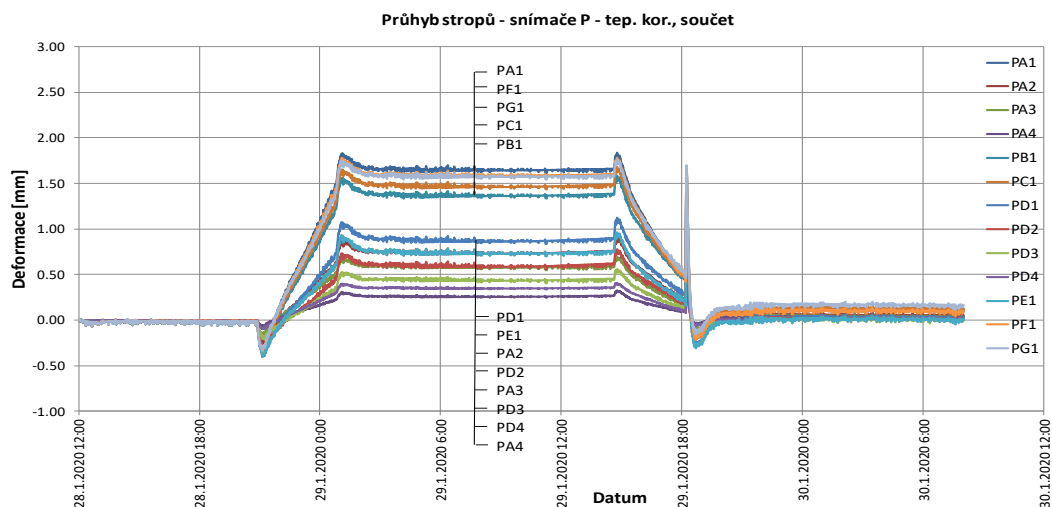
**Obr. 44** Pohled na vymezený dočasný sklad v horním plynojemu s měřicí ústřednou a záložním zdrojem po dokončení instalace celého systému.

Vlastní periodická zkouška integrity proběhla dle schématu popsaného v kapitole 6.2 Obr. 34 ve dnech 28. 1. až 29. 1. 2020.

Deinstalace celého systému byla provedena 30. 1. 2020 od 7:30 do 15:00 hod. Stažení veškerých naměřených dat z měřicí ústředny a teplotních loggerů proběhlo během deinstalace systému z důvodu možného poškození zařízení při přepravě či nutnosti nechat zařízení v prostorách JEDU z důvodu jeho případné kontaminace.

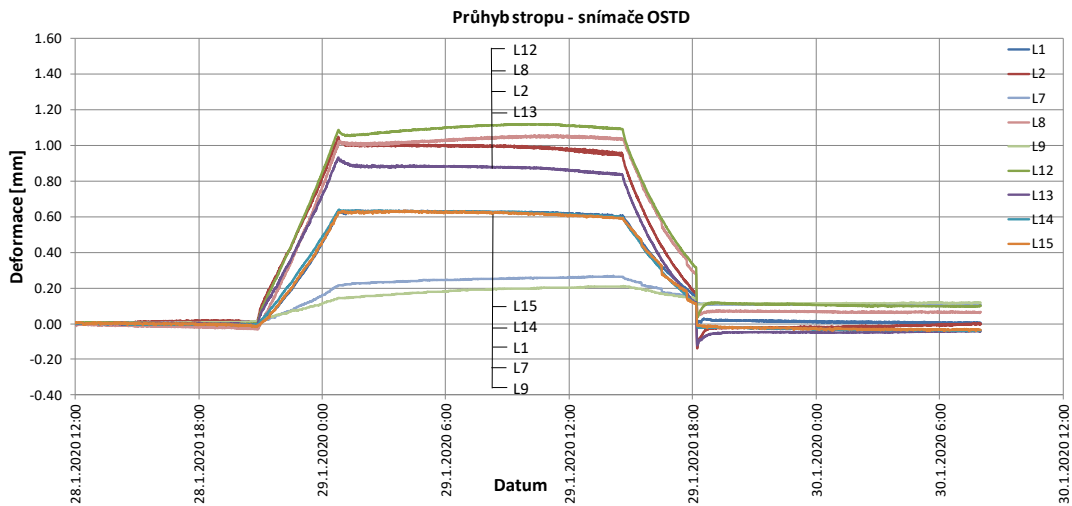
### 6.9.2 Vyhodnocení naměřených údajů

Veškeré snímače zapojené do ústředny EMS DV 803 (tedy všechny potenciometrické a tenzometrické snímače a snímač tlaku) byly měřeny frekvencí 50 Hz s periodou ukládání záznamu 1s. Následné zpracování probíhalo v software MS Excel, ve kterém byly provedeny veškeré přepočty měřených hodnot přes kalibrační konstanty použitých snímačů a tuhostní koeficienty OSTD snímačů na hodnoty deformací. V případě potenciometrických snímačů byla ještě provedena korekce délky závěsů na teplotní změny. Vybrané výstupy z měření deformací při periodické integrální zkoušce 4. reaktorového bloku jsou graficky znázorněny na následujících obrázcích Obr. 45 – Obr. 47.

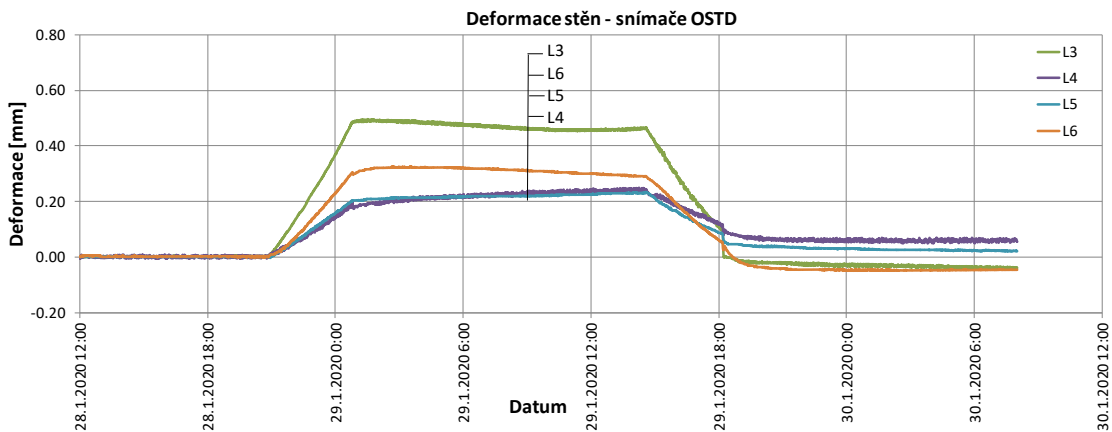


**Obr. 45** Deformace stropu měřena potenciometrickými snímači – součet po korekci.





Obr. 46 Deformace stropu horního plynojemu měřená OSTD snímači.



Obr. 47 Deformace stěn plynojemu měřená OSTD snímači.

### 6.9.3 Závěry z měření PERIZ 4. reaktorového bloku

Průběh instalace měřící aparatury v jednotlivých plynojemech ŠLH JEDU proběhl bez jakýchkoliv zásadních problémů. Měřící zařízení bylo před samotným začátkem tlakování přezkoušeno a vykazovalo správnou funkčnost. Dle grafických průběhů posunů s měřicím zařízením nebylo od počátku po ukončení tlakování nijak manipulováno a získané hodnoty tedy nejsou ovlivněny vnějším zásahem a ani jinými nepředvídatelnými jevy.

**Posuny stropních konstrukcí měřené potenciometry**, zobrazeny na Obr. 45, mají logický trend. Hodnoty, které byly touto metodou měřeny, lze považovat za správné a výstižné. Největší hodnoty posunů byly naměřeny v bodě PA1, tedy uprostřed stropní konstrukce horního plynojemu. Změna vzdálenosti tohoto bodu vůči počátečnímu bodu P0A umístěném na podlaze spodního plynojemu činí při maximálním přetlaku 50 kPa 1,64 mm. Tato hodnota zahrnuje také vliv délkové změny navazujících konstrukcí důsledkem přetlaku a působení okolní teploty včetně dotlačení výstelky k betonové konstrukci. Pro možnost stanovení relativního posunu střešní konstrukce v bodě PA1 vůči uložení panelů na stěně v ose E bylo provedeno měření potenciometry v linii PD, kde byla stanovena hodnota 0,85 mm. Po odečtení je výsledný relativní posun stropní konstrukce určený potenciometricky cca 0,78 mm. Tato hodnota však není naprosto shodná s relativním posunem téhož bodu, který byl naměřen tenzometrickým snímačem L2, viz Obr. 46, vůči podélně napnutému vodorovnému lanku a činí 0,99 mm. Vzhledem k tomu, že byly stojánky potenciometrických snímačů umístěny na povrch výstelky stropu, je velmi pravděpodobné, že se

zde projevil na měření negativní vliv možného dotlačování výstelky k povrchu betonové konstrukce. (Tuto teorii potvrzuje i porovnání snímačů PD1 a PE1, kde je u snímače PD1 při maximálním přetlaku naměřena oproti snímači PE1 deformace větší o 0,14 mm. V případě přičtení této hodnoty se dostáváme na výslednou deformaci v bodě PA1 na 0,92 mm což již v rámci přesnosti použitých metod koresponduje s hodnotou naměřenou snímačem L2).

Z průběhů posunů stropních konstrukcí vyplývá, viz Obr. 45, že posuny vzájemně symetricky umístěných bodů PB a PC jsou téměř totožné. Z prezentovaných dat symetricky umístěných snímačů PD1 a PE1 v horním plynojemu, viz Obr. 45, je patrný větší svislý posun pro snímač PD1. Tyto rozdíly jsou již komentovány v odstavci výše.

Z grafického průběhu zobrazeného na Obr. 46, relativních **posunů střešní konstrukce měřené ohybovými tenzometrickými snímači** vůči příčně a podélně napnutým ocelovým lankům, lze sledovat logický a předpokládaný trend. Největší posuny byly získány ze snímačů L8, L2 a L13, které monitorovaly body uprostřed rozpětí střešní konstrukce a vykazují dobrou shodu v měřených hodnotách. Symetrický bod L12 k bodu L13 vykazuje o něco menší deformaci, ale v rámci přesnosti měřicího systému jde o uspokojivou shodu. Srovnáním získaných dat dvou symetricky umístěných snímačů L7 a L9 lze opět konstatovat, že rozdíl naměřených hodnot v těchto symetricky umístěných snímačích je velmi malý a je na hraně rozlišitelnosti dané metody měření.

Zde prezentovaná **data z ohybových tenzometrických snímačů**, viz Obr. 47, které měřily vodorovné relativní posuny stěny v ose E vůči svisle napnutým ocelovým lankům, mají logický trend, který odpovídá průběhu tlakové zkoušky. Při zohlednění přesnosti použité metody měření jsou relativní posuny stěny v ose E téměř shodné pro tři spodní plynojemy (ozn. P2, P3 a P4). Největší relativní posuny stěny v ose E (pro bod L3) byly naměřeny v horním plynojemu P1 a činí 0,48 mm při maximálním přetlaku 50 kPa.

## 7 ZÁVĚR – ZHODNOCENÍ VÝZNAMU EXPERIMENTÁLNÍ ANALÝZY KONSTRUKCÍ

Závěry a zhodnocení jednotlivých zde prezentovaných měřících metod a instalovaných měřících systémů jsou součástí příslušných kapitol.

Obecně lze však říci, že experimentální analýza konstrukcí má velký význam nejen u nově budovaných konstrukcí, kde se výraznou měrou podílí na verifikaci předpokladů užitých při návrhu stavebních konstrukcí, ale také u existujících konstrukcí. V případě stávajících konstrukcí se především jedná o prokázání únosnosti při zatěžovacích zkouškách či monitorovací systémy sledující odezvu konstrukce na vnější zatížení v režimu řízení rizik.

Pro správný návrh monitorovacích systémů či zatěžovacích zkoušek konstrukcí je však zapotřebí i numerická analýza. Na jejím základě lze efektivně:

- určit rozhodující řezy či kritická místa konstrukce,
- určit počet, polohu a druh měřených veličin,
- stanovit časové uzly měření respektující důležité technologické kroky,
- vypracovat harmonogram doprovodných laboratorních experimentů nezbytných pro ověření numerického modelu.

Z výše uvedených postřehů vyplývá nezbytná symbióza numerické a experimentální analýzy konstrukcí a silně interdisciplinární charakter diskutované problematiky experimentální analýzy konstrukcí a konstrukčních prvků.

## POUŽITÁ LITERATURA

- [1] ČSN EN 1990 (73 0002) Zásady navrhování konstrukcí
- [2] ČSN 73 2604 (2012) Ocelové konstrukce – Kontrola a údržba ocelových konstrukcí pozemních a inženýrských staveb

- [3] ČSN 73 0035 (1986) Zatížení stavebních konstrukcí
- [4] ČSN EN 1991-1-1 (73 0035) Zatížení konstrukci - Část 1-1: Obecná zatížení;
- [5] ČSN EN 1991-1-3 (73 0035) Zatížení konstrukci - Část 1-3: Obecná zatížení – zatížení sněhem;
- [6] ČSN ISO 13822 (ČSN 73 0038) Hodnocení existujících konstrukcí;
- [7] ČSN 73 2030 Zatěžovací zkoušky stavebních konstrukcí – 1994
- [8] ČSN 73 0405: Měření posunů stavebních objektů
- [9] KUCHARCZYKOVÁ, B., DANĚK, P., MISÁK, P. a T. VYMAZAL. *Zařízení pro měření poměrných přetvoření betonu a cementových kompozitů*. 2011. ČR. CZ 21600 U1 Užitiný vzor. Přihlášeno 13.10.2010. Uděleno 12.1.2011. Zapsáno 3.1.2011.
- [10] VYMAZAL, T., DANĚK, P. KUCHARCZYKOVÁ, B. a P. MISÁK. Způsob kontinuálního měření hmotnostních úbytků cementových kompozitů v raném stadiu tuhnutí a tvrdnutí a zařízení k provádění tohoto způsobu. 2015. ČR. CZ 304898 B6 Patent. Uděleno 26.11.2014. Zapsáno 7.1.2015.
- [11] DANĚK, P. Využití tenzometrie pro měření fyzikálně-mechanických vlastností vysokopevnostních betonů. In Juniorstav 2004.Brno. 2004. p.1- 4. ISBN 80-214-2560-1.
- [12] Daněk, P., Problematika dlouhodobého sledování Hybridních mostních konstrukcí, Disertační práce, Brno, 2005, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavebního zkušebnictví.
- [13] Zich. M, Vítek J. L., Kolečník P., Sliwka P., Předjaté nádrže Loukov, str. 233-240 sborníku konference Betonářské dny 2009, ISBN 978-80-87158-20-3.
- [14] DANĚK, Petr; SCHMID, Pavel. *Sledování napětí podélných volných kabelů hybridní mostní konstrukce*. In Experimental Stress Analysis 2003. Brno, Copyright. 2003. p. 89 - 90. ISBN 80-214-2314-5
- [15] Daněk P., Schmid P., Dlouhodobé sledování nosné konstrukce mostu - objekt 8221 na dálnici D4708.2 přes řeku Odru, průplav a sběrač D, zprávy o sledování mostu, v letech 2002-2008, VUT FAST Brno.
- [16] ZICH, M.; DANĚK, P.; HUSTÝ, F. *Dlouhodobé sledování spráženého ocelobetonového mostu přes Odru na dálnici D47*. In Sborník příspěvků 18.mezinárodního symposia MOSTY/BRIDGES2013. 2013. Brno, Sekurkon s.r.o. 2013. p. 205 - 210. ISBN 978-80-86604-60-2.
- [17] DANĚK, P., SCHMID, P., ROZSYPALOVÁ, Dlouhodobé sledování a měření v průběhu zatěžovací zkoušky objektu F211 – dálniční most mezi tunely, Objednatel: Valbek, spol s r.o., listopad 2016
- [18] GIRGLE, F.; ŠTĚPÁNEK, P.; DANĚK, P.; ŠVARŘÍČEK, L.; RŮŽIČKOVÁ, J.: Rizikové faktory ovlivňující spolehlivost stávajících lehkých střešních konstrukcí. Soudní inženýrství, 2013, roč. 24, č. 1, s. 49-55. ISSN: 1211- 443X
- [19] GIRGLE, F.; RŮŽIČKOVÁ, J.; DANĚK, P.; ŠTĚPÁNEK, P.; KOSTIHA, V. Zatěžovací zkouška velkorozponové střešní konstrukce pavilonu D. In Sborník recenzovaných příspěvků, Konference zkoušení a jakost ve stavebnictví. Brno, VUT v Brně. 2014. p. 81 - 92. ISBN 978-80-214-5032-5.
- [20] GIRGLE, F.; ŠTĚPÁNEK, P.; DANĚK, P.; RŮŽIČKOVÁ, J.; ŠVARŘÍČEK, L. Monitorovací systém proti přetížení lehkých střešních konstrukcí klimatickým zatížením. Materiály pro stavbu. 2014. 20(2). p. 46 - 50. ISSN 1213-0311.

- [21] GIRGLE, F.; ŠTĚPÁNEK, P.; DANĚK, P.; RŮŽIČKOVÁ, J. *Provoz staticky nevyhovující lehké střešní konstrukce v režimu aktivního řízení rizik*. Stavebnictví. 2015. 9(01-02). p. 44 - 49. ISSN 1802-2030
- [22] GIRGLE, F.; ŠTĚPÁNEK, P.; DANĚK, P.; RŮŽIČKOVÁ, J. *Zatěžovací zkouška střešní konstrukce - kalibrace monitorovacího systému*. *Stavebnictví*, 2015, roč. 9, č. 03, s. 48-52. ISSN: 1802-2030.
- [23] Odborná zpráva o postupu prací a dosažených výsledcích v rámci projektu TA02011368 za rok 2012, VUT FAST, Brno
- [24] Odborná zpráva o postupu prací a dosažených výsledcích v rámci projektu TA02011368 za rok 2013, VUT FAST, Brno
- [25] Odborná zpráva o postupu prací a dosažených výsledcích v rámci projektu TA02011368 za rok 2014, VUT FAST, Brno
- [26] Odborná zpráva o postupu prací a dosažených výsledcích v rámci projektu TA02011368 za rok 2015, VUT FAST, Brno
- [27] ŠTĚPÁNEK, P., GIRGLE, F., DANĚK, P., ŽÍTT, P., VESELÝ, J., HASALA, I. a KRŮPA, P.: *Jaderná elektrárna Dukovany, měření šachty lokalizace havárie - PERIZ GO 1. bloku*, 25. 9. a 26. 9. 2014; BESTEX, spol. s r. o.; Brno; říjen 2014
- [28] ŠTĚPÁNEK, P., GIRGLE, F., DANĚK, P., VESELÝ, J., HASALA, I., KRŮPA, P.: *Jaderná elektrárna Dukovany, měření šachty lokalizace havárie GO 1. bloku, Technická zpráva k měřením prováděným pro objekt šachty lokalizace havárie* 15. až 18. 12. 2015; BESTEX, spol. s r. o.; Brno; leden 2016
- [29] ŠTĚPÁNEK, P., BUREŠ, J.: *Jaderná elektrárna Dukovany, měření šachty lokalizace havárie GO 1. bloku, Technická zpráva k měřením prováděným pro objekt šachty lokalizace havárie, geodetický monitoring* 14. až 19. 12. 2015; BESTEX, spol. s r. o.; Brno; leden 2016
- [30] ŠTĚPÁNEK, P., GIRGLE, F., ZLÁMAL, M., HASALA, I.: *Vyhodnocení provedených měření při ověřovací zkoušce integrity 1. RB JE Dukovany; Vysoké učení technické v Brně; Brno; červen 2016*
- [31] ŠTĚPÁNEK, P., GIRGLE, F., DANĚK, P., VESELÝ, J., KOSTIHA, V., HASALA, I., KRŮPA, P.: *Jaderná elektrárna Dukovany, měření šachty lokalizace havárie GO 3. bloku, Technická zpráva k měřením prováděným uvnitř objektu šachty lokalizace havárie a srovnání s výsledky vnějšího geodetického měření* 18. až 19. 9. 2016; BESTEX, spol. s r. o.; Brno; listopad 2016
- [32] ŠTĚPÁNEK, P., GIRGLE, F., ZLÁMAL, M., HASALA, I.: *JE Dukovany - Studie stanovení zkušebního přetlaku šachty lokalizace havárií - Příloha 2 - Deformace měřené in-situ na blocích 1 až 4; Vysoké učení technické v Brně; Brno; únor 2015*
- [33] PRŮCHA, J. a kol.: *Draft Zadání k vypracování Projektu měření deformací ŠLH při „Ověřovací zkoušce 1. RB EDU“; Temelín; srpen 2015*
- [34] *Projektová dokumentace pro provedení pevných měřících bodů s názvem: "JE Dukovany – TPo 7459 Instalace pevných měřících bodů v plynojemech 2., 3. a 4. bloku - DC1 - 2. blok, Projektová dokumentace pro provádění stavby (PDPS)", zpracovatel EGP INVEST s.r.o. Uherský Brod, 04/2016.*
- [35] [www.hbm.cz](http://www.hbm.cz)
- [36] [www.kyowa-ei.com](http://www.kyowa-ei.com)
- [37] [www.cometsystem.cz](http://www.cometsystem.cz)

## ABSTRAKT

Práce se zabývá vybranou problematikou experimentální analýzy konstrukcí a konstrukčních prvků. V úvodní kapitole jsou popsány laboratorní experimenty vedoucí k získání fyzikálně mechanických a reologických parametrů betonu, jakožto jednoho z nejrozšířenějších, ale také nejkomplikovanějších základních stavebních materiálů. Jedná se především o metody pro stanovení smrštění a dotvarování betonu, modulu pružnosti a pracovního diagramu. Tedy o parametry nezbytné pro správný návrh a vyhodnocení dlouhodobého sledování předpjatých železobetonových konstrukcí. Následující část práce je věnována příkladům realizovaných staveb pozemního i mostního stavitelství, které byly během výstavby osazeny měřicími snímači za účelem ověření předpokládaného chování konstrukcí během výstavby a následného provozu. Dále je v práci prezentován aktivní monitorovací systém střešní konstrukce nevyhovující na zatížení sněhem. Instalací tohoto systému, který dlouhodobě monitoruje deformace a přetvoření kritických částí konstrukce, je možné objekt dále používat bez nákladného statického zajištění příhradové konstrukce střechy. V neposlední řadě je zde řešena problematika měření deformací obvodového pláště velkoobjemových šachet lokalizace havárie Jaderné elektrárny Dukovany a s tím související vývoj snímačů a realizace vztažných soustav.

## ABSTRACT

The thesis deals with selected problems of the experimental analysis of structures and structural members which are divided into five parts. The first part introduces laboratory testing techniques used for the determination of the physical, mechanical and rheological characteristics of concrete as one of the most widely used and most complicated basic building materials. Especially, the testing techniques for determination of shrinkage and creep of concrete, modulus of elasticity and Load-deflection diagrams, which are the most important parameters needed for correct design and evaluation of the long-term behaviour of prestressed reinforced concrete, are described in detail. The second and third part of the thesis deals with examples of in-situ monitoring performed during construction and after commissioning of the structures of civil and bridge engineering. The fourth part of the thesis deals with the special active monitoring system applied to the roof structure unsatisfactory to the snow-load. This monitoring system enables the long-term monitoring of the deflection and strain of the critical parts of the structure and serves thus as a fail-safe-control system of the building. The last chapter deals with the issue of the monitoring of deflection in the envelope of the large-volume shafts for accident localization of the Nuclear Power Plant Dukovany for which a special type of sensors was developed and special reference points system was designed and applied.