

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice Habilitační a inaugurační spisy, sv. 607

ISSN 1213-418X

Jiří Bureš

**VYBRANÁ REALIZOVANÁ
TECHNOLOGICKÁ ŘEŠENÍ
V INŽENÝRSKÉ GEODÉZII**

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta stavební

Ústav geodézie

Ing. Jiří Bureš, Ph.D.

**VYBRANÁ REALIZOVANÁ TECHNOLOGICKÁ
ŘEŠENÍ V INŽENÝRSKÉ GEODÉZII**

**SELECTED REALIZED TECHNOLOGICAL SOLUTIONS
IN ENGINEERING GEODESY**

**TEZE HABILITAČNÍ PRÁCE
K DOCENTSKÉMU JMENOVACÍMU ŘÍZENÍ
V OBORU GEODÉZIE A KARTOGRAFIE**



BRNO 2018

KLÍČOVÁ SLOVA

inženýrská geodézie, stavba, technologie měření, přetvoření, GNSS, monitoring, mostní konstrukce

KEYWORDS

engineering geodesy, structure, measurement technology, deformation, GNSS, monitoring, bridge construction

MÍSTO ULOŽENÍ PRÁCE:

Archiv PVO FAST

© Jiří Bureš, 2018

ISBN 978-80-214-5663-1

ISSN 1213-418X

OBSAH

PŘEDSTAVENÍ AUTORA.....	4
1 ÚVOD	7
2 FORMULACE METODIKY MĚŘENÍ BODŮ PRIMÁRNÍ SÍTĚ ŽBP TECHNOLOGIÍ GNSS V REÁLNÉM ČASE	8
2.1 Zásady přesného měření technologií GNSS v reálném čase.....	9
2.2 Pilotní ověření technologie v podmínkách železnice	10
2.3 Optimalizace terénního měření	11
2.4 Ukázka vybraných výsledků vyhodnocení	12
2.5 Dílčí závěry	13
3 TECHNOLOGIE MĚŘENÍ PŘI REKONSTRUKCI MOSTU GAGARIN.....	13
3.1 Mostní konstrukce a princip její rekonstrukce.....	14
3.2 Technologie měření.....	15
3.3 Průběžné sledování mostní konstrukce během její rekonstrukce.....	18
3.4 Dlouhodobý vývoj průhybů středů polí 2 a 3 v průběhu dílčích etap od počátku sledování do roku 2015	19
3.5 Vliv vnějších podmínek na sledovanou konstrukci	19
3.6 Vzájemná závislost tenzometrických a geodetických měření.....	21
3.7 Dílčí závěry	22
4 TECHNOLOGIE MONITORINGU PŘI TLAKOVÉ ZKOUŠCE ŠACHTY LOKALIZACE HAVÁRIE V JADERNÉ ELEKTRÁRNĚ DUKOVANY	23
4.1 Specifikace dílčích fází měření	23
4.2 Geodetický měřicí systém na sledovaném objektu	24
4.3 Monitoring vnějších teplot	25
4.4 Ukázky vyhodnocení deformací	25
4.5 Soulad robotizovaného monitoringu a klasické nivelační metody měření	26
4.6 Dílčí závěry	26
5 ZÁVĚRY	27
6 KONCEPCE DALŠÍ ČINNOSTI	29
7 POUŽITÉ ZDROJE A LITERATURA	30
8 SUMMARY	34

PŘEDSTAVENÍ AUTORA

Jméno a příjmení: **Jiří Bureš, Ing. Ph.D.**

Datum a místo narození: 2. 10. 1971 v Olomouci

Adresa do zaměstnání:

Vysoké učení technické v Brně

Fakulta stavební

Ústav geodézie

Veveří 331/95, 602 00 Brno



Kontakt:

Telefon: +420 541 147 136

E-mail: bures.j@fce.vutbr.cz

Vzdělání, pedagogické a vědecké hodnosti:

- 1989 – 1994 – Ing., Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, obor Geodézie a kartografie, magisterské studium, téma diplomové práce: „Sledování svahových deformací na lokalitě Dub na Moravě“
- 1994 – 1997 - Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, obor Geodézie a kartografie, doktorské studium
- 2005 – Ph.D. - Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, obor Geodézie a kartografie, téma doktorské disertační práce na téma „Experimentální analýza měření GPS“

Odborná stáž:

- 1996 - Švýcarsko, Astronomical Institute of the University of Bern, Bernese GPS software

Autorizace, oprávnění:

- 1999 – dosud – Úředně oprávněný zeměměřický inženýr v rozsahu písm. b), c) dle zákona č. 200/1994 Sb., oprávnění vydal Český úřad zeměměřický a katastrální
- 1997 – dosud - Živnostenského oprávnění pro „Výkon zeměměřických činností“

Zaměstnání:

- 1990 – 1995 Dopravní stavby Olomouc (dnes Skanska a.s.), geodet staveb
- 1995 – 1997 Geodézie Brno a.s., geodet inženýr
- od 1997 – dosud Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav geodézie, odborný asistent
- od 1997 – dosud OSVČ - „Výkon zeměměřických činností“

Pedagogická činnost:

- Výuka na plný úvazek na oboru Geodézie a kartografie FAST VUT v Brně.
- Vyučované předměty: Inženýrská geodézie, Stavební a průmyslová geodézie, Vyšší geodézie, Komplexní projekt, Geodézie při výstavbě, Geodézie pro stavební obory.
- Garant předmětů: Geodézie v podzemních prostorech, Metrologie a standardizace
- Vedení bakalářských, diplomových a doktorských závěrečných prací: počty úspěšně obhájených závěrečných prací od 2007 – dosud – bakalářské práce – 18, od 1999 – dosud – diplomové práce – 47, od 2009 – dosud – disertační práce – 1

Vědecko výzkumná a odborná činnost:

- Oblast inženýrské stavební a průmyslové geodézie, oblast globálních družicových měřicích technologií, geometrická přesnost staveb, vytyčování, monitoring staveb

odpovědný řešitel, spoluřešitel:

- 2000 - odpovědný řešitel projektu FRVŠ 1680/2000 "Vybudování moderního pracoviště Geodézie a kartografie"
- 2006 - odpovědný řešitel projektu RP MŠMT č. 679 "Integrovaný multidisciplinární výukový informační systém pro GIS řešený ve spolupráci s Fakultou strojního inženýrství, architektury a podnikatelskou"
- 2007 - spoluřešitel vnitřního grantu VUT č. 38A "Aplikovaná satelitní měření", odpovědný řešitel: Ing. Petr Holcner, Ph.D.
- 2008 - odpovědný řešitel vnitřního grantu VUT č. 131C "Inovace infrastruktury pro výuku geografických informačních systémů (GIS) provozované ústavy GED, VST a AIÚ na FAST VUT v Brně"
- 2008 - odpovědný řešitel vnitřního grantu VUT č. 106 "Inovace webových stránek mezinárodní družicové permanentní stanice TUBO provozované Ústavem geodézie FAST VUT v Brně"
- 2014 – spoluřešitel projektu specifického výzkumu VUT v Brně - FAST-S-14-2298 "Řešení masivních úloh v GIS", odpovědný řešitel: doc. Ing. Dalibor Bartoněk, CSc.
- 2014 – 2017 – odpovědný řešitel projektu specifického výzkumu FAST-S-14-2464 a S-16-3507 "Výzkum skutečného chování stavebních konstrukcí v provozních podmínkách geodetickými metodami"
- 2014 – 2017 spoluřešitel projektu specifického výzkumu FAST-S-15-2723 a S-17-4746 "Vývoj metod kvalitativního zhodnocení dat progresivních měřicích technologií nástroji GIS na bázi operační analýzy", odpovědný řešitel doc. Ing. Dalibor Bartoněk, CSc.

spolupracovník týmů výzkumných projektů:

- 1996 – 1998 - spolupracovník na projektu GAČR 103/96/1648 "Metodika integrovaných lokálních geodetických sítí", odpovědný řešitel doc. Ing. Otakar Švábenský, CSc.
- 1999 – 2004 - spolupracovník a koordinátor dílčího výzkumného týmu (DVT-GED) na výzkumném záměru MSM 261100007 "Teorie, spolehlivost a mechanismus porušování staticky a dynamicky namáhaných stavebních konstrukcí", odpovědný řešitel prof. Ing. Jindřich Melcher, DrSc.
- 2002 – 2004 - spolupracovník, koordinátor dílčího výzkumného týmu (DVT-GED) na projektu - GAČR 103/02/0749 "Moderní metody zesilování betonových a zděných konstrukcí a optimalizace návrhu", odpovědný řešitel: Prof. RNDr. Ing. Petr Štěpánek, CSc.
- 2007 – 2012 spolupracovník na projektu MSM0021630519 "Progresivní spolehlivé a trvanlivé nosné stavební konstrukce", odp. řešitel: Prof. RNDr. Ing. Petr Štěpánek, CSc.

Smluvní výzkum:

- 2013 – odpovědný řešitel projektu smluvního výzkumu 9413002074 (HS12357021212200) "Analýza povrchů nad plynovody RWE na území ČR", zadavatel RWE GasNet, s.r.o.
- 2014 – 2015 – odpovědný řešitel projektu smluvního výzkumu S 23488/2014-O13 (HS124570210501) "Metodika budování a údržby Železničního bodového pole (ŽBP) technologiemi Globálních navigačních satelitních systémů (GNSS) v reálném čase s metrologickou návazností na geodetické referenční systémy ČR", zadavatel SŽDC, s.o.

Univerzitní aktivity:

- 2004 až 2010 - zástupce vedoucího Ústavu geodézie
- od 2004 - dosud - člen komise pro státní závěrečné zkoušky pro obor Geodézie a kartografie na Fakultě stavební VUT v Brně
- 2007 až 2011 - člen týmu Útvaru transferu technologií VUT v Brně pro obor Geodézie a kartografie
- od 2011 – dosud člen komise pro státní závěrečné zkoušky pro obor Konstrukce a dopravní stavby na Fakultě stavební VUT v Brně
- od 2011 - dosud - člen komise pro státní doktorské zkoušky pro obor Geodézie a kartografie na Fakultě stavební VUT v Brně
- od 2013 – dosud člen komise pro státní závěrečné zkoušky pro obor Geodézie a kartografie na Fakultě stavební ČVUT v Praze
- od roku 2006 – 2009 - člen lektorského týmu, organizační garant kurzů CŽV pro stavební praxi a veřejnou správu „Seminář z GPS“
- zpracovatel znaleckých posudků pod Znaleckým ústavem Fakulty stavební

Ocenění:

- 2000 - Cena rektora VUT v Brně za vynikající výsledky v pedagogické a vědecké práci
- 2011 - Cena rektora TOP 10 Excelence VUT 2010 za 6. místo v kategorii technologické

Publikační činnost:

- autor a spoluautor více než 100 publikací ve sbornících na odborných celostátních, zahraničních konferencích nebo v časopisech
- spoluautor elektronických studijních opor GE16 - Inženýrská geodézie – 4 moduly, HE03 – Inženýrská geodézie – 3 moduly, HE08 – Měření podzemních prostor – 2 moduly, HE11 – Výuka v terénu IV – 1 modul
- 16 publikací v databázi SCOPUS (počet citací 7, H-index 1), 13 publikací v WoS
- 3 publikace v impaktovaných časopisech (IF 1,177, IF 1, 666, IF 1,666)

Ostatní aktivity, členství v profesních organizacích:

- od 1995 – dosud - člen organizačního výboru odborných seminářů GNSS na Fakultě stavební VUT v Brně
- od 2000 – dosud -člen předsednictva Českého svazu geodetů a kartografů, člen odborné skupiny Inženýrská geodézie
- od 2002 – dosud - odborný garant nebo člen organizačního týmu celostátních tradičních odborných seminářů a konferencí Geodetické informační dny v Brně (2003 – 2018), Aktuální problémy inženýrské geodézie (2004 – 2012), Geodézie ve stavebnictví a průmyslu (2013 – 2018), Zeměměřická díla v územním plánování, stavebním řádu a GIS (2004 – 2013), Geodézie a kartografie v dopravě (2011, 2014, 2017)
- od 2009 - dosud - předseda celostátní odborné skupiny pro inženýrskou geodézii Českého svazu geodetů a kartografů
- od 2011 – dosud - člen Technické normalizační komise ÚNMZ (TNK 24) - Geometrická přesnost budov a staveb
- od 2012 – dosud - člen zkušební komise Českého úřadu zeměměřického a katastrálního pro udělování úředního oprávnění dle zákona č. 200/1994 Sb.

1 ÚVOD

Předložená habilitační práce se zabývá třemi vybranými, předkladatelem habilitační práce v praxi realizovanými, technologickými řešeními v inženýrské geodézii. První část práce se zabývá formulací metodiky měření bodů primární sítě železničního bodového pole (ŽBP) technologií GNSS v reálném čase s metrologickou návazností na geodetické referenční systémy ČR, jejíž zpracování bylo vyvoláno požadavkem Správy železniční dopravní cesty, státní organizace (SŽDC). Problematika byla řešena v rámci projektu smluvního výzkumu S 23488/2014-O13, jehož zadavatelem byl Útvar technického rozvoje SŽDC. V současnosti je metodika z velké části implementována do vnitřních předpisů SŽDC. V textu habilitační práce je uvedena kompletně formulace metodiky a nejdůležitější výsledky jejího pilotního ověření v podmínkách železnice.

Druhá část práce se zabývá problematikou etapového monitoringu v průběhu rekonstrukce železobetonového železničního mostu Gagarin z roku 1961, který byl v roce 2009 pilotně zesílen unikátní technologií předepínání ocelovými lany, přičemž o této technologii rekonstrukce bylo uvažováno i pro zesílení mnoha dalších železničních mostních konstrukcí podobného typu v ČR. Po rekonstrukci mostu byl realizován i dlouhodobý monitoring spodní stavby a mostovky v provozních podmínkách, který trvá od roku 2009 dodnes. K tomu účelu byl na mostní konstrukci již v době rekonstrukce zřízen tenzometrický a geodetický měřicí systém. V textu habilitační práce je popsána technologie monitoringu, zejména její geodetická část a vybrané výsledky monitoringu, včetně propracování technologie určení vzájemné korelace tenzometrických a geodetických dat s cílem jejich vzájemného přepočtu a integrovaného využití pro eliminaci vnějších vlivů při vyhodnocení dlouhodobého monitoringu.

Třetí část práce se zabývá realizovaným geodetickým monitoringem při ověřovací zkoušce integrity kontejnmentu (OZIK) všech čtyř bloků jaderné elektrárny Dukovany. Jednalo se o tlakovou zkoušku ochranné obálky reaktoru, která souvisela s velkými plánovanými odstávkami jaderných bloků po 10 letech provozu. Tlaková zkouška byla zároveň jako jeden z dílčích posuzovaných podkladů v souvislosti s prodloužením životnosti provozu Jaderné elektrárny Dukovany. Celá zkouška OZIK byl proces skládající se z geodetického a negeodetického monitoringu a procesu technických kontrol tlakovaného objektu šachty lokalizace havárií (ŠLH) v průběhu 65 hodin tlakové zkoušky. Objekt ŠLH je železobetonový objekt tvaru budovy o rozměrech 40 x 22 x 50 m (délka, šířka, výška) o tloušťce železobetonové stěny 1 m, který byl postupně po 25 kPa tlakován až na tlak 130 kPa a následně v obdobných cyklech odtlakován do 0 kPa. Předmětem geodetického a negeodetického monitoringu bylo průběžné měření deformací (průhybů) stěn ve statikem vybraných místech a liniích objektu. Velikost tlaku vnášeného do hermeticky uzavřené ŠLH simulovalo cca trojnásobný tlak, který by vznikl při havárii jaderného reaktoru. Hodnoty očekávaných deformací stěn ŠLH v kritických místech se pohybovaly na takto velké konstrukci pouze cca do 3,5 mm. Předmětem zájmu bylo měření 48 hodin před tlakovou zkouškou s cílem určení vlivu vnějších podmínek na sledovanou konstrukci a 48 hodin po skončení tlakové zkoušky s cílem prokázání navrácení konstrukce do výchozího stavu. Geodetická část monitoringu byla technologicky zajištěna celkem 5 robotizovanými totálními stanicemi. Zkouška OZIK se realizovala na podkladě projektu, jehož geodetickou část zpracoval předkladatel habilitační práce a rovněž se následně podílel na realizaci geodetické části monitoringu při OZIK jako garant geodetické části.

V habilitační práci jsou použity technologie výhradně navržené a realizované předkladatelem habilitační práce. Kompletní data a vyhodnocení jsou předmětem dílčích a závěrečných zpráv řešených projektů, jejichž odpovědným řešitelem byl předkladatel habilitační práce. Některé části řešení byly již publikovány.

2 FORMULACE METODIKY MĚŘENÍ BODŮ PRIMÁRNÍ SÍTĚ ŽBP TECHNOLOGIÍ GNSS V REÁLNÉM ČASE

Celá problematika byla řešena v [1], [2], [3].

Řešení projektu vycházelo z těchto východisek, problémů a potřeb SŽDC:

1. Problém častého opakovaného zničení vytyčovací sítě nebo její částí v průběhu výstavby. Obnova vytyčovací sítě je přenesena v současnosti na zhotovitele, který ji řeší nejednotně, často nedostatečně, bez širších souvislostí a z toho vznikají nehomogenity v ŽBP, které se projeví při kontrolním měření investora, při převzetí koleje, při jejím uvedení do provozu. Není-li kolej převzata vyplývají z toho technické i ekonomické následky.
2. Problém až několikaletého časového odstavu fáze přípravy a projektování od fáze realizace stavby a z toho vyplývající nehomogenity způsobené znovuoobením zpravidla zcela nebo z velké části zničené původní geodetické sítě vybudované ve fázi přípravy a projektování.
3. Problém nestability geodetických bodů způsobený provozem dráhy a její údržbou.
4. Problém omezené možnosti umístění geodetických bodů mimo pozemek SŽDC.
5. Potřeba 100% kompatibility s katastrem nemovitostí ČR, standardy INSPIRE, TMO, GeoInfoStrategie ČR aj.
6. Potřeba jednoznačné převoditelnosti souřadnic v S-JTSK do jiných mezinárodních souřadnicových systémů např. ETRS, UTM aj. z důvodu mezinárodní dopravní kompatibility.
7. Potřeba automatizované údržby koleje automatizovanými strojními podbíječkami (ASP).
8. Potřeba jednotnosti, homogenní přesnosti, technické udržitelnosti a jednoduchosti.

Základním principem řešení bylo technologicky propracovaným, relativně jednoduchým měřickým postupem, zajistit možnost přesného určení souřadnic v místě potřeby primárně v návaznosti na stávající funkční vysoce přesnou a vědecky udržovanou síť permanentních GNSS stanic CZEPOS [4], popř. jinou síť (Trimble VRS NOW [5], TOPNET [6], apod.), ale zahrnutou do celostátního systému jednotného monitoringu permanentních stanic [7].

Dalším cílem bylo zastoupení nutnosti dlouhodobé stability geodetických bodů, která se obtížně zajišťuje za provozu dráhy v terénu a to technologicky propracovaným postupem měření s vysokou přesností v poloze v mezní odchylce ve dvou kolmých směrech do ± 10 mm.

Širší souvislosti navrhované metodiky

1. Cílem metodiky je formulace postupů budování a údržby primárního železničního bodového pole (ŽBP), resp. primárních vytyčovacích sítí (PVS) železničních staveb, technologiemi Globálních navigačních satelitních systémů (GNSS) v reálném čase s metrologickou návazností na geodetické základy ČR.
2. Účelem metodiky je technologické zajištění potřebné přesnosti ŽBP v přímé návaznosti na závazné geodetické referenční systémy ČR [8] prostřednictvím družicové sítě permanentních stanic CZEPOS [4] garantované Českým úřadem zeměměřickým a katastrálním při zachování možnosti využití privátních sítí TRIMBLE VRS NOW [5] anebo TOPNET [6] systematicky monitorovaných v rámci sítě permanentních stanic [7] VÚGTK, v.v.i.
3. Metodikou lze řešit obnovu ekvivalentu měřické sítě při, často mnohaletém odstavu, přípravné, projektové a realizační fáze stavby, včetně řešení problému stárnutí, popř. zničení měřické sítě nebo její částí.
4. Metodikou lze řešit vybudování, údržbu nebo obnovu primární vytyčovací sítě v průběhu výstavby.
5. Metodika zajišťuje splnění přísných kritérií na přesnost geometrických parametrů železničních staveb při jejich výstavbě [9] a také zajistit realizaci a údržbu prostorové polohy koleje

při jejím uvedení do provozu a v průběhu provozu a to zejména automatizovanými měřicími systémy.

6. Metodika splňuje legislativní požadavky na předepsanou přesnost v zeměměřictví a katastru nemovitostí [10], [11], [12], [13], [14] a tím i pro jiné potřeby veřejné správy (např. územně analytické podklady, Technická mapa obce, geodata pro INSPIRE, aj.).
7. Návaznost ŽBP na Evropský terestrický referenční systém (ETRS) je zajištěn primárně prostřednictvím sítě permanentních stanic CZEPOS, což zaručuje možnost jednoznačného oboustranného převodu dat do národního geodetického referenčního S-JTSK a jiných geodetických referenčních systémů specifikovaných v Nařízení vlády č. 430/2006 Sb. [8].
8. Převod z ETRS do S-JTSK je zajištěn prostřednictvím jednotného globálního transformačního klíče (GTK) definovaného VÚGTK, v.v.i. [15]. Možnost transformace i do jiných geodetických referenčních systémů je zajištěna na Geoportálu ČÚZK veřejnou transformační službou [16].
9. Metodika se dále vyznačuje zejména těmito parametry:
 - a) zajišťuje jednotnost, přesnost a homogenitu ŽBP po celém území ČR,
 - b) lze ji použít na elektrifikovaných i neelektrifikovaných tratích,
 - c) řeší mimo jiné i vazbu na deformovaný stav ŽBP poplatný historickým souvislostem jeho vzniku,
 - d) vyznačuje se relativní jednoduchostí realizace v měřické praxi,
 - e) vyznačuje se větší efektivností oproti dosavadně používaným postupům,
 - f) garantuje dlouhodobější udržitelnost.
10. Metodika z hlediska přesnosti vychází z požadavku ČSN 73 6360-2 (2013) [9], čl. 6.4.1, který specifikuje mimo jiné, že *“Absolutní příčná polohová odchylka osy koleje od její projektované polohy nesmí být při přejímce prací v koleji s vložením nového materiálu větší než ± 10 mm, s vložením užitého materiálu ± 15 mm a při přejímce ostatních prací nesmí být větší než ± 20 mm, přičemž vzájemná odchylka příčné vzdálenosti osy koleje a hrany nástupiště musí být dodržena v hodnotách $+20$ mm od projektované polohy, -0 mm od jmenovité hodnoty”*. A dále *“Absolutní výšková odchylka nivelety temene nepřevýšeného kolejnicového pásu od její projektované nadmořské výšky nesmí být při přejímce prací v koleji větší než $+10$ mm, -20 mm, přitom vzájemná výšková vzdálenost spojnice temen kolejnicových pásů a horní plochy nástupiště v projektované výšce 550 mm musí být dodržena v hodnotách -20 mm, $+0$ mm”*.
11. Prostorová poloha koleje se vztahuje k soustavě zajišťovacích značek, které se vztahují k sekundární geodetické síti a tato se vztahuje k primární geodetické síti ŽBP, přičemž se u ŽBP předpokládá jeho trvalá stabilita. V případě jeho nestability lze touto metodikou obnovit body primární sítě s přesností prostorové polohy dle odst. 1.10. (mezní odchylka ± 10 mm).
12. Metodika je součástí metodického systému SŽDC a nevyklučuje použití jiných metodik budování primárního ŽBP podle potřeb a efektivnosti, tj. např. [17].

2.1 ZÁSADY PŘESNÉHO MĚŘENÍ TECHNOLOGIÍ GNSS V REÁLNÉM ČASE

Technologie GNSS v reálném čase je velmi efektivní pro přesné pozicování, poněvadž na délku 1 km umožňuje dosáhnout v příčném směru vyšší přesnosti oproti klasickým metodám. Geodetickým základem je síť permanentních stanic CZEPOS nebo v rámci CZEPOS monitorované sítě TRIMBLE VRS NOW nebo TOPNET s hustotou stanic po 20 až 30 km [6]. Tyto sítě permanentních stanic se vyznačují vysokou relativní přesností určení prostorové polohy (do 5 mm mezi stanicemi).

Pro dosažení vysoké přesnosti měření technologií GNSS v reálném čase je třeba dodržovat tyto principy [1]:

- 1) souřadnicový systém JTSK s návazností na ETRS
- 2) příprava a plánování observace s ohledem na zákryty obzoru

- 3) použití přesných dvoufrekvenčních aparatur GNSS
- 4) metoda GNSS v reálném čase (síťové řešení VRS)
- 5) signál GPS+Glonass
- 6) délka observace 5 min.
- 7) opakování observací nejméně 3x s optimálním časovým odstupem
- 8) převod do národního systému JTSK jednotným globálním transformačním klíčem (100% homogenita se stavem KN)

Variabilita při realizaci postupu v provozních podmínkách:

- 1) začínat měřit 30 – 60 s po ustálení fixace polohy v GNSS aparatuře,
- 2) délku observace 5 min. lze složit z dílčích kratších intervalů při dodržení 1),
- 3) lze měřit 2 měření s časovým odstupem 6 h a opakovat 2x a vícekrát,
- 4) lze měřit 3 měření s časovým odstupem 4 h a přidávat po 1 měření a více,
- 5) odlehle hodnoty měření lze hned filtrovat nastavením mezních odchylek v GNSS v aparatuře (polohová a výšková odchylka, mezní DOP),
- 6) s ohledem na zákryty obzoru realizovat přípravu a plánování observace,
- 7) výsledné souřadnice exportem z GNSS aparatury bez nutnosti postprocessingu,
- 8) efektivita – „one-man system“, při předpokladu 0,5 h režijního času na 1 bod = 8 bodů /1 den = cca 8 km trasy /1 den

2.2 PILOTNÍ OVĚŘENÍ TECHNOLOGIE V PODMÍNKÁCH ŽELEZNICE

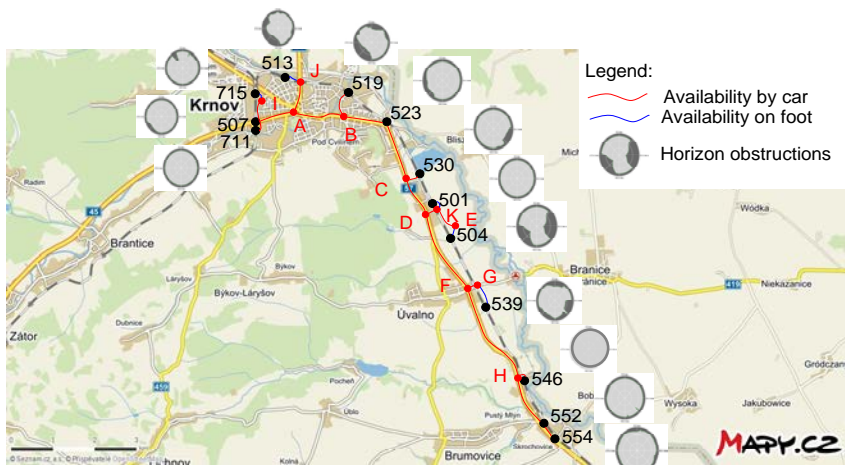
Potřeba přesného pozicování GNSS-RTK vzniká při výstavbě nových tratí nebo při jejich rekonstrukci a také při průběžné údržbě prostorové polohy koleje. Cílem pilotního ověření byla realizace přesné technologie měření GNSS ve specifických podmínkách železnice.

Ověření bylo vykonáno na vybraných třech různých úsecích železničních tratích:

1. Opava – Krnov v úseku Krnov – Skrochovice v km 86,743 – km 100,402, tj. v úseku délky 13,659 km, trať je neelektrifikovaná, měření provedeno na 13 účelově vybraných bodech stávajícího ŽBP v příznivých, méně příznivých a nepříznivých observačních podmínkách. (ukázka na Obr. 1, Obr. 2).
2. Hranice na Moravě – Valašské Meziříčí v úseku u obce Černotín v km 7,204 - 8,767, tj. v úseku délky 1,563 km, trať je elektrifikovaná, měření provedeno na 10 účelově vybraných bodech stávajícího ŽBP umístěných převážně na trakčních stožárech v příznivých, méně příznivých a nepříznivých observačních podmínkách.
3. Beroun – Rakovník, v úseku Nižbor – Roztoky u Křivokláta, v km 9,161 – km 26,521, tj. v úseku délky 17,360 km, trať je neelektrifikovaná, měření provedeno na 8 účelově vybraných bodech stávajícího ŽBP v příznivých, méně příznivých a nepříznivých observačních podmínkách.

Použité GNSS měřicí systémy:

Na ověřovacích tratích (1) a (2) byla vykonána tři nezávislá měření a to třemi nezávislými subjekty a třemi různými družicovými aparaturami - Leica 1200 s anténou AT504GG a síťová služba GNSS CZEPOS MAX, Trimble GeoXR 6000 s anténou Trimble Tornado a síťová služba GNSS Trimble VRS, Trimble R8-2 a síťová služba Trimble VRS. Na ověřovací trati (3) bylo vykonáno jedno měření družicovou aparaturou Leica 1200 s anténou AT504GG a síťová služba GNSS CZEPOS MAX. Měření byla vykonána v návaznosti na síť permanentních stanic CZEPOS nebo Trimble VRSNow a do S-JTSK převedena jednotným transformačním klíčem GTK verze 1202. Celkový rozsah výběrového souboru pilotních ověřovacích trojic měření byl $n=79$.



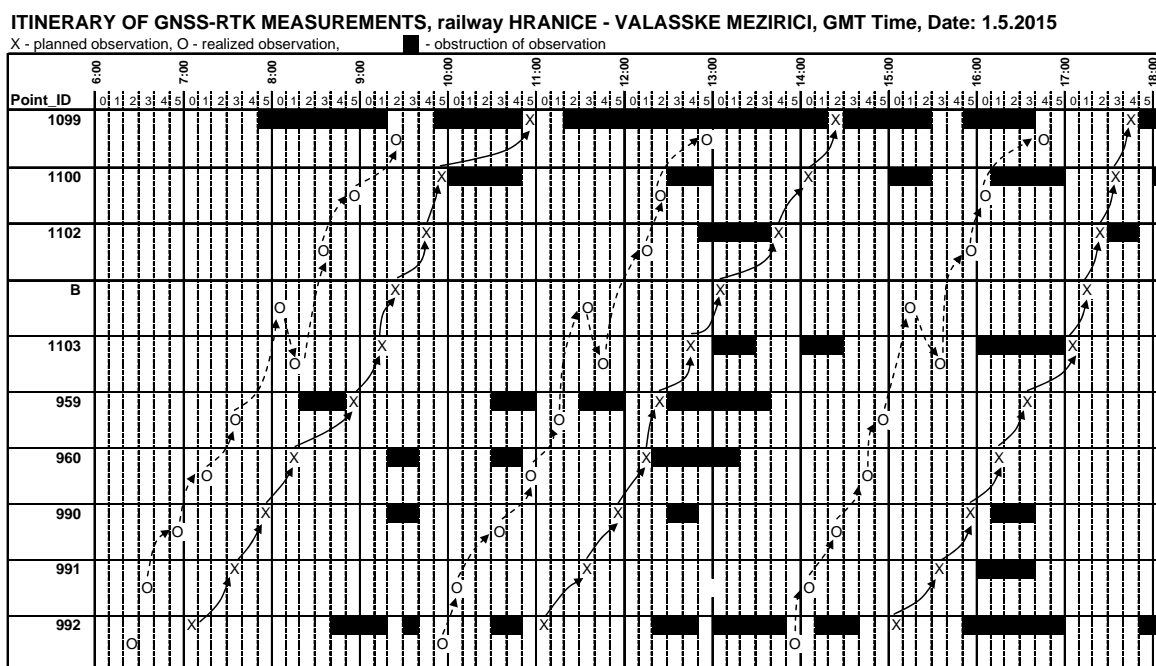
Obr. 1 Experimentální pilotní úsek neelektrifikované tratě Opava - Krnov



Obr. 2 GNSS-RTK observace na bodě 507

2.3 OPTIMALIZACE TERÉNNÍHO MĚŘENÍ

GNSS měření geodetické body jsou zpravidla různě dostupné buď automobilem nebo pěšky nebo kombinací těchto způsobů. Přesun po cestě, obecně z bodu A do bodu B, je konkrétní časovou režii, se kterou je třeba počítat při plánování observací. Pro každý bod byly, s ohledem na zákryty horizontu, s využitím software pro plánování GNSS měření, identifikovány vhodné intervaly možné observace. Při plánování terénní observace se ukázalo, že je vhodné řešit problematiku efektivní cesty přesunu měřicí aparatury GNSS s ohledem na různé podmínky observace na dílčích geodetických bodech z důvodů zákrytů obzoru a dodržení intervalu časového odstupu opakovaných měření. K efektivnosti zaměření sítě může přispět i nasazení více družicových apatur současně. Princip nalezení efektivní cesty pro zaměření sítě geodetických bodů, s ohledem i na různé neočekávané události v terénu, vycházelo z aplikace optimální Hamiltonovy cesty v grafu s dodatečnými podmínkami v uzlech [30], [31].



Obr. 3 Ukázka optimalizace postupu měření GNSS-RTK formou itineráře pro jednu GNSS aparaturu a železniční trať Hranice na Moravě – Valašské Meziříčí.

Jednotlivé uzly grafu jsou přístupné jen v určitých časových intervalech. Je všeobecně známo, že exaktní algoritmus Hamiltonovské cesty není dosud vyřešen a existují jen různé varianty heuristického řešení. Podstatou našeho řešení je transformace relevantních veličin (vzdálenosti mezi uzly) a časové intervaly, v nichž jsou uzly přístupné, z Euklidovského a časového prostoru do společné časově uspořádané množiny posloupností. Výsledkem této transformace je množina objektů uspořádaná podle dvou hledisek: 1. podle času výskytu události na objektu a 2. podle pozice objektu v grafu. Pro řešení optimalizace cesty byla vyvinuta i softwarová aplikace v Borland Delphi. Výsledkem je sestavení itineráře měření s možností průběžné reoptimalizace přímo v terénu na základě průběžného skutečného provádění observací. Ukázka itineráře je na Obr. 3. Plnými šipkami je vyznačen původně navržený optimalizovaný postup observace, čárkovanými šipkami je vyznačen skutečně realizovaný postup observace.

2.4 UKÁZKA VYBRANÝCH VÝSLEDKŮ VYHODNOCENÍ

Ukázka části výsledků vyhodnocení opakovaného měření ve trojici je uvedena v Tabulka 1. Výsledky nového určení souřadnic byly porovnány i se stávajícím stavem ŽBP a vyčísleny rozdíly. Hodnoty σ – výběrová směrodatná odchylka, %out – procento odlehlých hodnot v 5 minutové sérii měření, v – odchylka od střední hodnoty, Op – polohová odchylka.

Tabulka 1: Ukázka sestavení výsledků dílčích měření ve trojici

Bod	Datum, čas obs.	Délka obs.	Metoda	VA	Y [m]	X [m]	H [m]	Vnitřní přesnost obs.				Odchylky od průměru				
								σ_Y	σ_X	σ_H	% out	GDOP	v_Y	v_X	v_H	Op
992_1	1.5.2015 6:09:37	0:04:59	MAX	0,904	509447,694	1132376,271	252,871	0,002	0,002	0,008	9,3	1,5	0,009	0,003	-0,012	0,009
992_2	1.5.2015 9:53:01	0:07:04	MAX	0,888	509447,698	1132376,279	252,844	0,003	0,003	0,008	4,7	1,5	0,005	-0,006	0,015	0,007
992_3	1.5.2015 13:45:20	0:04:51	MAX	0,845	509447,717	1132376,271	252,863	0,002	0,004	0,006	9,7	1,6	-0,014	0,003	-0,004	0,014
992 střední hodnota					509447,703	1132376,274	252,859	0,002	0,003	0,007	max. - min.		0,023	0,009	0,027	0,010
992 ŽBP					509447,693	1132376,253	252,876									
rozdíl od ŽBP					0,010	0,021	-0,017									
991_1	1.5.2015 6:27:25	0:04:53	MAX	0,939	509672,569	1132410,176	251,993	0,005	0,004	0,006	5,7	1,3	0,005	0,000	-0,012	0,005
991_2	1.5.2015 10:11:30	0:04:59	MAX	0,932	509672,584	1132410,163	251,957	0,005	0,006	0,006	3,3	1,8	-0,010	0,014	0,023	0,017
991_3	1.5.2015 14:01:15	0:04:59	MAX	0,857	509672,569	1132410,191	251,991	0,003	0,004	0,005	8,0	1,4	0,005	-0,014	-0,011	0,015
991 střední hodnota					509672,574	1132410,177	251,980	0,004	0,005	0,006	max. - min.		0,015	0,028	0,036	0,012
991 ŽBP					509672,558	1132410,179	251,999									
rozdíl od ŽBP					0,016	-0,002	-0,019									
990_1	1.5.2015 6:53:49	0:04:59	MAX	0,852	509915,643	1132421,891	252,189	0,004	0,017	0,013	5,7	1,9	0,008	0,011	0,001	0,013
990_2	1.5.2015 10:35:48	0:04:59	MAX	0,867	509915,653	1132421,901	252,194	0,008	0,011	0,013	6,7	2,9	-0,002	0,001	-0,004	0,003
990_3	1.5.2015 14:18:34	0:04:59	MAX	0,859	509915,656	1132421,915	252,186	0,005	0,013	0,011	6,0	1,8	-0,006	-0,012	0,004	0,014
990 střední hodnota					509915,651	1132421,902	252,190	0,006	0,014	0,012	max. - min.		0,013	0,023	0,008	0,010
990 ŽBP					509915,638	1132421,886	252,167									
rozdíl od ŽBP					0,013	0,016	0,023									
960_1	1.5.2015 7:11:14	0:04:59	MAX	1,337	510040,497	1132445,939	251,990	0,005	0,006	0,013	4,3	1,6	-0,002	-0,002	0,001	0,003
960_2	1.5.2015 10:52:10	0:04:59	MAX	1,250	510040,495	1132445,943	251,988	0,005	0,004	0,007	6,0	1,7	0,000	-0,006	0,003	0,006
960_3	1.5.2015 14:35:43	0:04:59	MAX	1,343	510040,494	1132445,930	251,994	0,003	0,006	0,010	4,7	1,8	0,002	0,007	-0,003	0,007
960 střední hodnota					510040,495	1132445,937	251,991	0,004	0,005	0,010	max. - min.		0,003	0,013	0,006	0,005
960 ŽBP					510040,480	1132445,935	252,004									
rozdíl od ŽBP					0,015	0,002	-0,013									
959_1	1.5.2015 7:38:17	0:04:59	MAX	1,200	510275,346	1132443,692	252,640	0,005	0,004	0,010	6,7	1,6	0,005	0,005	-0,020	0,007
959_2	1.5.2015 11:09:44	0:04:59	MAX	1,177	510275,349	1132443,702	252,608	0,006	0,005	0,007	5,0	1,8	0,002	-0,005	0,012	0,006
959_3	1.5.2015 14:56:01	0:05:29	MAX	1,208	510275,357	1132443,697	252,613	0,003	0,002	0,006	5,3	2,4	-0,006	0,000	0,008	0,006
959 střední hodnota					510275,351	1132443,697	252,620	0,005	0,004	0,008	max. - min.		0,011	0,011	0,032	0,006
959 ŽBP					510275,344	1132443,700	252,637									
rozdíl od ŽBP					0,007	-0,003	-0,017									

Z rozptylu realizovaných sérií měření byly vypočteny výběrové směrodatné odchylky, které dokládají přesnost měření geodetického bodu z trojice nezávislých měření v 5 minutovém intervalu s časovým odstupem 4 hodiny. Dosažená přesnost měření byla analyzována z rozptylu výběrového souboru n trojic nezávislých měření. Výběrové standardní odchylky ve dvou kolmých směrech v horizontální rovině jsou uvedeny v Tabulka 2.

Tabulka 2: výběrové směrodatné odchylky nezávislých trojic měření

Pilotní úsek železniční tratě	σ_X [mm]	σ_Y [mm]	Rozsah souboru trojic n
Opava - Krnov	5	4	39
Hranice na Moravě – Valašské Meziříčí	4	5	30
Beroun – Rakovník	4	4	10

2.5 DÍLČÍ ZÁVĚRY

Přesná technologie měření [1] byla pilotně ověřena na třech různých vybraných úsecích železničních tratí Opava – Krnov, Hranice na Moravě – Valašské Meziříčí a Beroun – Rakovník. Experimentálně bylo ověřeno dosažení vysoké přesnosti optimalizovanou technologií GNSS-RTK, jak na elektrifikované, tak i na neelektrifikované železniční trati. Směrodatná odchylka v horizontální rovině ve dvou kolmých směrech souřadnicových os X a Y nepřekročila 5 mm. Signifikantní vliv elektrické trakce a blízkosti trakčních sloupů na přesnost v horizontální poloze se neprokázal.

Přesnost technologie měření lze i řídit dle potřeby. Případné mírné zvýšení přesnosti lze realizovat zvýšením počtu opakování měření za novou metodikou měření stanovených podmínek. Případné mírné snížení přesnosti lze realizovat zaměřením nejméně dvojice nezávislých měření.

Prioritou pro umístění bodů primární sítě jsou dobré podmínky pro observaci technologií GNSS oproti variantě využití kvalitní trvanlivé stabilizace takového geodetického bodu s horšími podmínkami pro observaci GNSS. Přitom se předpokládá, že vybudování sekundární sítě bude následovat bezprostředně po určení bodů primární sítě a tím případné použití běžné stabilizace bodů primární sítě nebude hrát roli.

Efektivnost metodiky, při uvažované časové režijní náročnosti cca 30 min. pro určení jednoho bodu ŽBP, je určení 7 až 8 nezávisle 3x observovaných bodů s odstupem 4 hod. v průběhu časového intervalu 12 hod., tj. za 1 den jedním měřičem, s jednou družicovou aparaturou.

Efektivnost metodiky, při uvažované časové režijní náročnosti cca 30 min. pro určení jednoho bodu ŽBP, je určení 11 až 12 nezávisle 2x observovaných bodů s odstupem 6 hod. v průběhu časového intervalu 12 hod., tj. za 1 den jedním měřičem, s jednou družicovou aparaturou.

Výsledky měření na elektrifikovaných a neelektrifikovaných tratích jsou z hlediska přesnosti sobě odpovídající, tj. neprokázal se signifikantní rozdíl v přesnosti výsledků měření na elektrifikovaných a neelektrifikovaných tratích.

Nově navržená metodika přesného měření [1] vyhovuje a je efektivní pro potřeby určování polohové složky primárních bodů ŽBP železnici.

3 TECHNOLOGIE MĚŘENÍ PŘI REKONSTRUKCI MOSTU GAGARIN

Tato část textu se zabývá technologiemi měření při rekonstrukci mostu Gagarin, která byla realizována ve spolupráci Ústavu betonových a zděných konstrukcí (Ing. Ladislav Klusáček, CSc.) za statickou a stavební část a Ústavu geodézie (Ing. Jiří Bureš, Ph.D.) za geodetickou část. Most „Gagarin“ je železniční mostní předpjatá železobetonová konstrukce o pěti prostých polích uvedený do provozu roku 1961 nacházející se v km 5,872 na trati Český Těšín – Ostrava Kunčice.

Diagnostika [46] a zatížitelnost mostu „Gagarin“ byla provedena předem za účelem prokázání dostatečné kvality materiálů jako základního předpokladu pro plánovanou rekonstrukci mostu a pro rozhodnutí, zda je smysluplné ponechat a zesílit stávající konstrukci nebo zda je nutné snesení mostu a realizace výstavby mostu zcela nového. Diagnostika mostu „Gagarin“ prokázala dostatečnou kvalitu betonu hlavní nosné konstrukce, která byla nutným předpokladem pro další, odhadem 50 leté využívání mostu a která také umožňuje realizovat zesílení konstrukce. Konstrukci bylo možné efektivně zesílit spřažením s novým korytem kolejového lože a dodatečným předepnutím pro zatížení SW/2 a přechodnost zvýšit až na 180 % UIC. Objednatel rekonstrukce byla stavební společnost FIRESTA – Fišer, rekonstrukce, stavby a.s., která realizovala rekonstrukci v době 4-10/2009. S ohledem na unikátnost technologie rekonstrukce a s ohledem na pilotní realizaci tohoto typu rekonstrukce mostu v ČR a její následnou aplikaci na mostní konstrukce stejného typu, byl vypracován na podkladě návrhu sledování [47] projekt sledování [48], který zahrnoval tenzometrickou a geodetickou část monitoringu vybraných dvou mostních polí. Fáze rekonstrukce byla zakončena statickou ověřovací zkouškou v 10/2009 a následně byla

zesílená konstrukce mostu Gagarin nadále systematicky dlouhodobě sledována za provozu pro Správu železniční dopravní cesty, s.o. až do roku 2015. Realizované měřicí systémy jsou na konstrukci funkční dodnes.

3.1 MOSTNÍ KONSTRUKCE A PRINCIP JEJÍ REKONSTRUKCE

Původní konstrukce mostu „Gagarin“ byla postavena v letech 1960 - 1961. Směrově je most řešen v oblouku s poloměrem $R=450$ m. Jednotlivá mostní pole jsou prostá s teoretickým rozpětím 30,00 m. Nosná konstrukce je složena ze čtyř předpjatých nosníků tvaru „I“ o výšce 2,0 m a šířce 0,96 m se stejnou šířkou přírub. Nosníky jsou sestaveny ze tří dílců. Dílce jsou spojeny dobetonovanou příčnou spárou a podélným předpětím. K podélnému předpětí bylo užito 30 kabelů z usměrněných patentovaných drátů $\varnothing P 4,5$ mm. Podélné spáry mezi nosníky byly zabetonovány a všechny čtyři nosníky byly příčně tuze spojeny (zmonolitněny) příčnými předpínacími kabely procházejícími dolní a horní přírubou. Založení mostu je plošné. Stávající mostní svršek byl tvořen štěrkovým ložem, které z hlediska šířkových a výškových parametrů v dnešní době již nevyhovovalo a to zejména pro technologii průběžného strojního čištění.

Zesílení konstrukce mostu „Gagarin“ bylo vyvoláno plánovanou potřebou celkové rekonstrukce z důvodu jeho modernizace s cílem převedení vlaků UIC a také nového zatížení uvedeného v evropské normě pod zkratkou SW2 – tzv. „Schwerwagen“. Původní předpjatá konstrukce byla tedy zesílena spřaženou deskou ve tvaru koryta s průběžným štěrkovým ložem a dodatečným předpětím volnými kabely Obr. 8. Součástí sanace spodní stavby byla oprava a nové osazení ložisek. Statický výpočet předpokládal výstavbu zesilující konstrukce na původní nosné konstrukci po odstranění všech stávajících vrstev svršku až na horní povrch nosníků. Betonáž nového koryta štěrkového lože probíhala bez podepření nosníků, tedy tíha čerstvého betonu byla přenášena původní, ale po snesení svršku odlehčenou, nosnou konstrukcí. Vliv zvětšené vlastní tíhy byl následně zmenšen dodatečným předpětím volnými kabely. Dále následovalo zabetonování kotevnic oblastí, ošetření původních kotev, zhotovení štěrkového lože a koleje. Stav mostu Gagarin před rekonstrukcí je na Obr. 4 a Obr. 5. Stav mostu po jeho rekonstrukci je na Obr. 7 a Obr. 8.



Obr. 4 Most Gagarin z roku 1961 před rekonstrukcí



Obr. 5 Most Gagarin před rekonstrukcí – pohled zespodu

Rekonstrukcí se hmotnost nového koryta se štěrkovým ložem se zvýšila o 50%, ovšem analýza dokládala téměř dvojnásobné zmenšení průhybů vlivem významného zvýšení tuhosti hlavní nosné konstrukce. Zvýšení vlastní tíhy konstrukce umožnilo nejen zvýšení zatížitelnosti, ale také umožnění automatizovaného strojního čištění průběžného štěrkového lože. Účinky zvýšení předpětí novými kabely na plně předpjatou konstrukci vyžadovaly provést podrobná měření deformační odezvy konstrukce i spodní stavby v průběhu rekonstrukce a následně i dlouhodobě.

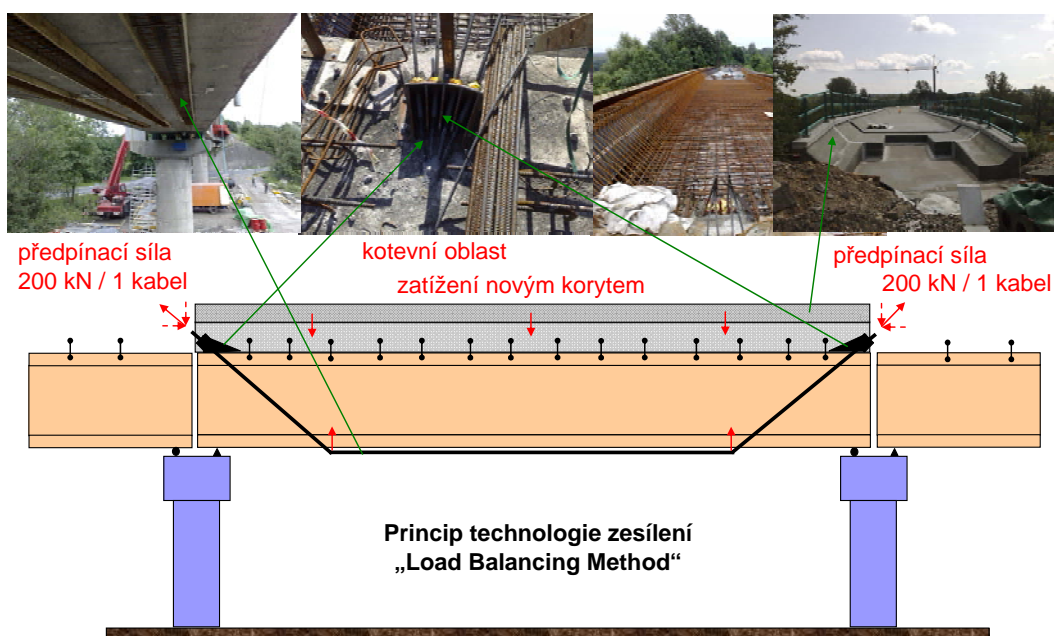


Obr. 6 Most Gagarin po rekonstrukci – pohled zespodu



Obr. 7 Most Gagarin po rekonstrukci

Porovnáním skutečného chování s chováním uvažovaných modelů konstrukce umožnilo verifikovat jejich správnost.



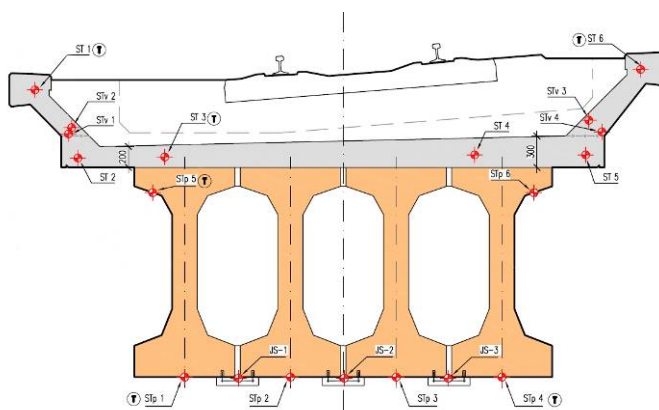
Obr. 8 - Princip technologie zesílení mostu Gagarin

Technologie zesílení konstrukce byla průběžně vyhodnocována prostřednictvím tenzometrického a geodetického měřicího monitorovacího systému pro měření přetvoření a prostorových posunů v průběhu rekonstrukce během jednotlivých fází výstavby (sledován byl zejména vliv odtížení původním svrškem a štěrkovým ložem a následné přitížení novou konstrukcí) a dále při zatěžovací zkoušce mostu.

3.2 TECHNOLOGIE MĚŘENÍ

Na rekonstruované mostní konstrukci byly instalovány dva měřicí systémy, tenzometrický a geodetický, jejich účelem bylo průběžně určovat hodnoty posunů a přetvoření jako zpětnou vazbu dílčích fází rekonstrukce. Použití dvou nezávislých typů měřicích systémů vycházelo z dobré předchozí zkušeností např. [49], [50].

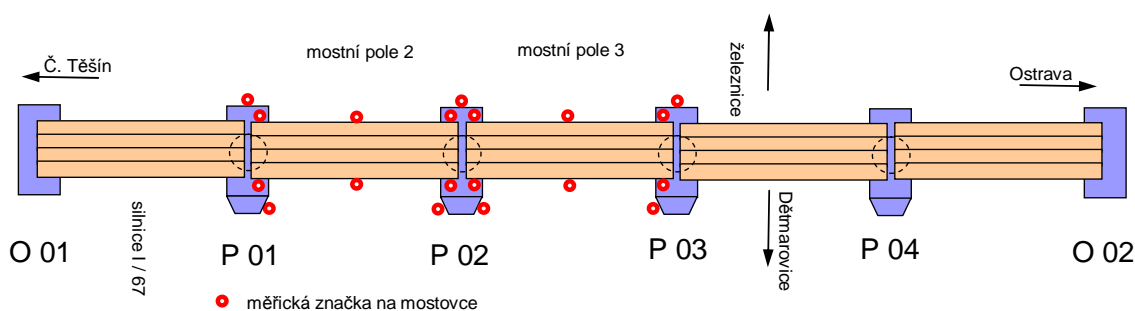
Most byl sledován v celém průběhu rekonstrukce tenzometrickým měřicím systémem, který je tvořen soustavou 36 strunových tenzometrů pro trvalé měření. Strunové tenzometry byly zabudovány pro zvýšení spolehlivosti získaných údajů do dvou mostních polí. Tenzometry byly osazeny jednak na povrch původních betonových nosníků a dále do betonu nového spráženého železobetonového koryta. Na Obr. 9 je zobrazeno schéma umístění tenzometrů v příčném řezu mostu. Získané údaje byly měřicí ústřednou osazenou na mostní konstrukci průběžně zaznamenávány a přenášeny prostřednictvím GSM do laboratoře VUT v Brně



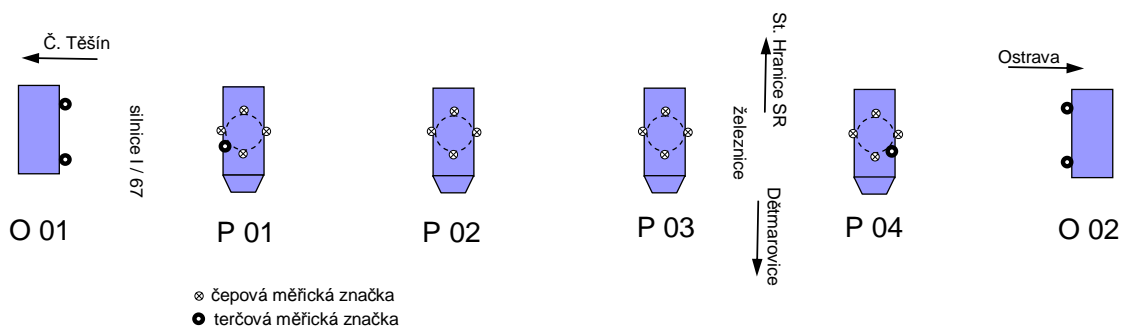
Obr. 9 Rozmístění tenzometrů v poli 2 a v poli 3

k vyhodnocení. Změny přetvoření jsou strunovými tenzometry měřeny v jednotkách frekvence kmitání struny [Hz], které se početně převádějí na výsledné hodnoty v délkové míře v mikrometrech [μm]. Součástí strunových tenzometrů je i snímač teploty umožňující měření teploty v jednotkách stupňů Celsia [$^{\circ}\text{C}$]. Měřená data byla v průběhu rekonstrukce kontinuálně registrována v intervalu 20 minut. Vybudovaný tenzometrický systém byl využíván pro průběžná měření v průběhu rekonstrukce i při ověřovací zatěžovací zkoušce. Po uvedení do provozu slouží nadále k několikaletému monitorování chování zesílené konstrukce za provozu, což bude umožňovat získání dlouhodobých dat pro její analýzu a následnou interpretaci poznatků.

Geodetický měřicí systém je tvořen soustavou vhodně rozmístěných měřických značek osazených na sledované konstrukci, vztažnou soustavou, použitými měřicími přístroji a technologií měření. Změna stavu konstrukce se projevuje změnou její geometrie a měření těchto změn geometrických parametrů je právě těžištěm geodetického měřicího systému. Na rozdíl od tenzometrického systému, který je jednou pevně zabudován dovnitř konstrukce („navždy stejně“), geodetický měřicí systém tím, že většina jeho součástí není zabudovaných do konstrukce, umožňuje modifikovatelnost a přizpůsobení se daným podmínkám a potřebám monitoringu konstrukce. Důležitým parametrem geodetického systému je počet a rozmístění měřických značek na konstrukci (objektová soustava), který byl navržen po konzultacích se specialisty (projektantem, statikem stavebních konstrukcí). Objektová soustava měřických značek pevně spojená se stavební konstrukcí je sledována od vztažné soustavy měřických značek, která není součástí stavební konstrukce a je vybudována mimo její předpokládanou deformační zónu. Geodeticky naměřené hodnoty od vztažné soustavy jsou z tohoto pohledu hodnotami absolutními. Výhodou výsledků získaných z geodetických dat je možnost vyhodnocovat prostorové geometrické vztahy na konstrukci v absolutních i ve volitelně relativních souvislostech dílčích konkrétních konstrukčních částí. Na Obr. 10 je znázorněno rozmístění měřických značek na mostovce a na Obr. 11 rozmístění měřických značek na spodní stavbě.



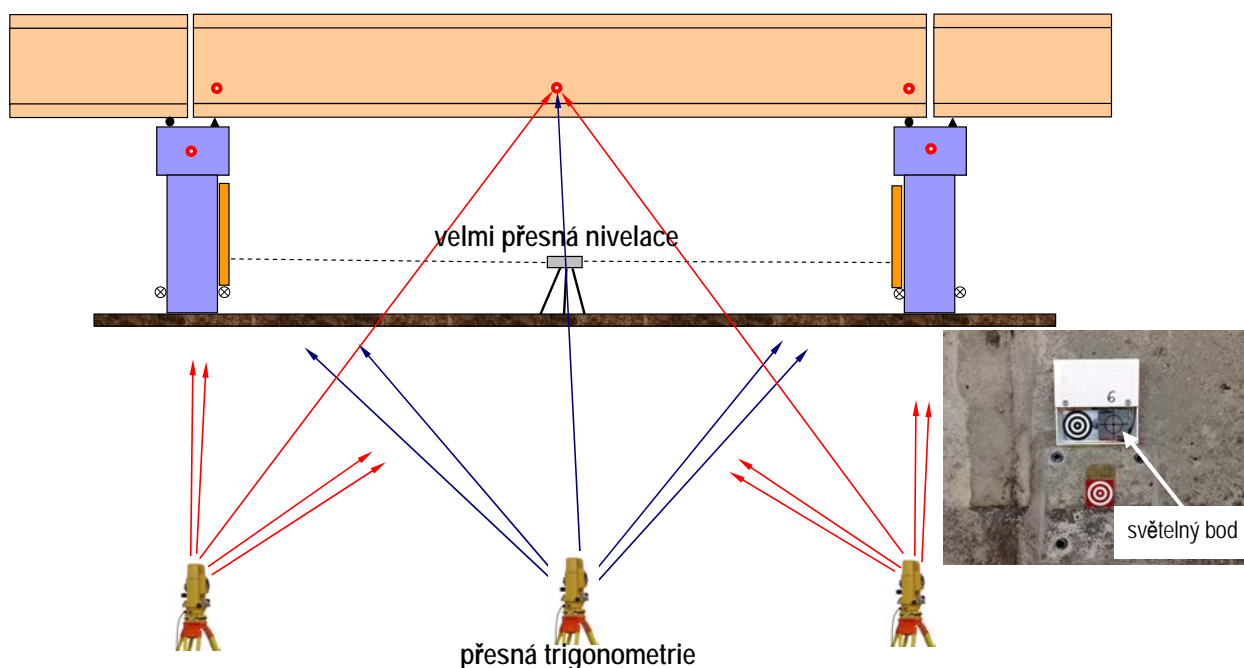
Obr. 10 Rozmístění měřických značek na mostovce



Obr. 11 Osazení měřických značek na spodní stavbě

Hodnoty svislých změn spodní stavby byly očekávány v intervalu několika desetin milimetru až 1 milimetr. Z toho důvodu byly měřeny technologií přesné nivelace s využitím elektronického nivelačního systému Leica DNA03 nivelační latí s invarovou kódovou stupnicí určenou pro přesná průmyslová měření. Svislé posuny byly měřeny od stabilizovaných bodů vztažné soustavy stabilizovaných mimo deformační zónu stavby. Rozlišovací schopnost použitého měřícího nivelačního přístroje je 0,01 mm. Směrodatná odchylka nivelačního měření převýšení činila $\pm 0,03$ až $\pm 0,05$ mm na 30 m vzdálenosti měřických značek. Signifikantní změny na spodní stavbě v rámci celé sledované části konstrukce s pravděpodobností $P=0,95$ (rozšířená nejistota) bylo možné interpretovat již od hodnot svislých změn větších než $\pm 0,1$ až $\pm 0,2$ mm.

Očekávané hodnoty průhybu středů sledovaných mostních polí se předpokládaly v intervalu několika desetin až několika milimetrů v závislosti na stavu konstrukce v konkrétní etapě její rekonstrukce.



Obr. 12 Geodetický měřící systém (v řezu) a měřická značka se světelným bodem

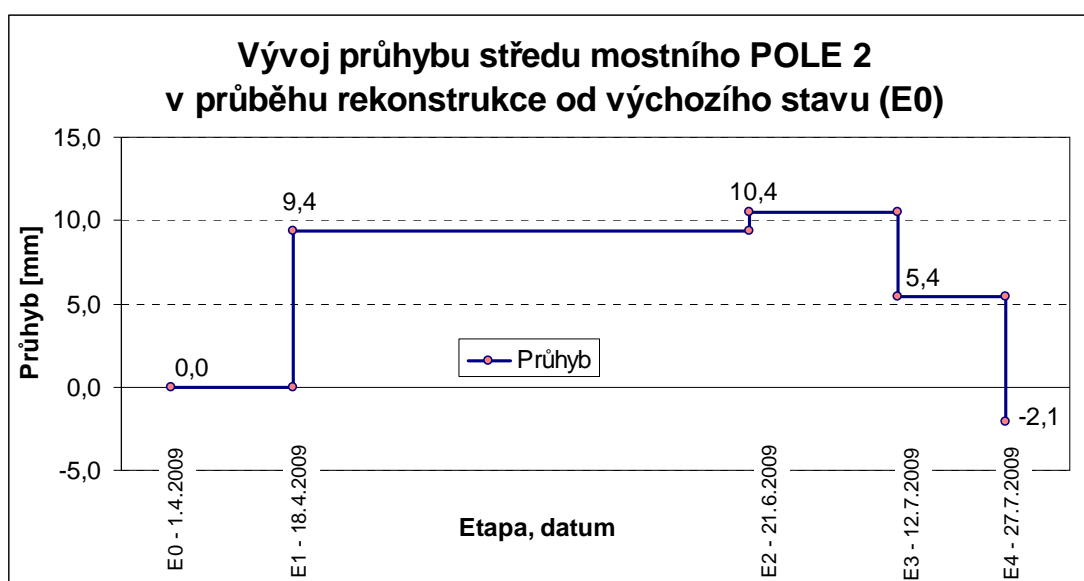
Průhyby středů mostních polí byly měřeny na vnějších nosnících nosné konstrukce mostovky. Průhyby středů mostních polí byly měřeny technologií přesné trigonometrie s využitím elektronické totální stanice Topcon GTS-300 technologií nejprve protínáním z úhlů, následně po instalaci měřických značek typu světelný bod polární metodou principem zobrazeným na Obr. 12. Průhyb byl určován relativně od podpor z rozdílu převýšení měřických značek

vypočtených z měřených zenitových úhlů měřených v jednotkách miliGon [mGon] a prostorových délek měřených v jednotkách metrů [m]. Úhly byly měřeny metodou v laboratorní jednotce s přesností $\pm 0,5$ mGon, což odpovídá přesnosti $\pm 0,24$ mm v prostorové poloze na 30 m vzdálenosti měřící stanice od měřeného místa. Signifikantní změny průhybu mostního pole s pravděpodobností $P=0,95$ (rozšířená nejistota) bylo možno interpretovat již od hodnot svislých změn větších než $\pm 0,5$ až $\pm 0,7$ mm.

Měření při statické ověřovací zkoušce a následný dlouhodobý etapový monitoring byl realizován polární metodou na měřické značky „světelný bod“, což výrazně časově zefektivnilo proces měření. Po uvedení do provozu byla použita i technologie monitoringu s automatizovaným cílením robotizovanou totální stanicí ze stativu nebo měřící stanice upnuté na mostní podpoře.

3.3 PRŮBĚŽNÉ SLEDOVÁNÍ MOSTNÍ KONSTRUKCE BĚHEM JEJÍ REKONSTRUKCE

Cílem sledování mostní konstrukce během její rekonstrukce bylo ověření vlivu původní tíhy kolejového svršku na hlavní nosnou konstrukci, ověření vlivu zvětšené tíhy nového koryta a kolejového svršku na hlavní nosnou konstrukci a potvrzení vlivu dodatečného předpětí. Průběžně byly tenzometricky měřeny hodnoty pretvoření v nosné konstrukci, v dílčích etapách byly geodeticky měřeny svislé posuny mostních podpor a průhyby středů mostních polí. Na Obr. 13 je na časové ose ukázka vyhodnocení vývoje průhybů středu mostního pole v průběhu dílčích etap rekonstrukce. Průhyby jsou vyhodnoceny od základního (výchozího) stavu – před rekonstrukcí (E0). Velmi obdobně se projevovalo i mostní pole 3.



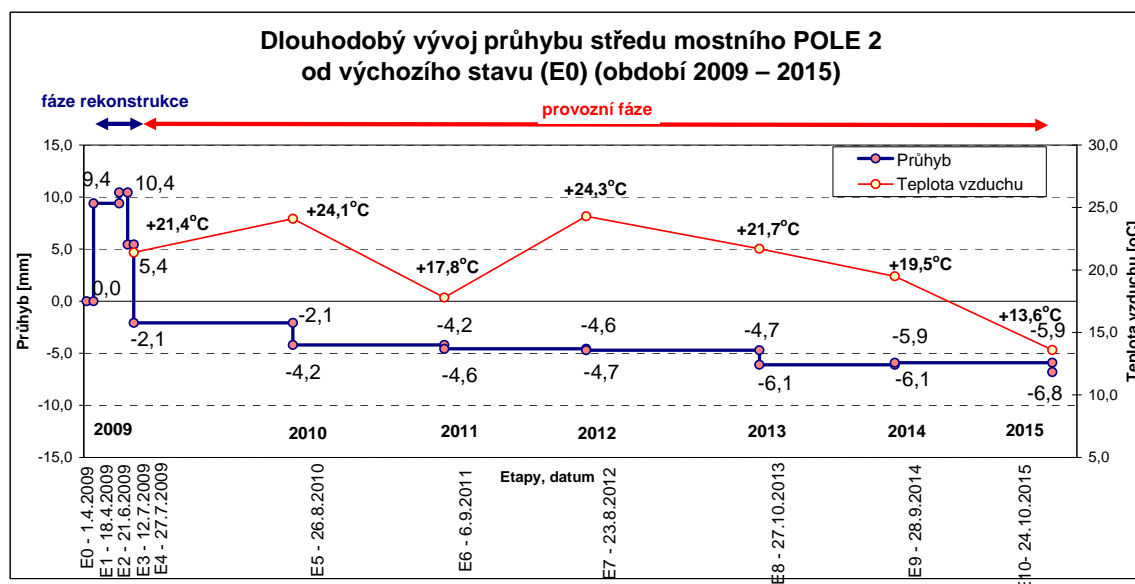
Obr. 13 Vývoj průhybu středu mostního pole 2 v průběhu rekonstrukce od výchozího stavu

Hodnota průhybu +9,4 mm (nahoru) ve stavu E1 vyjadřuje změnu stavu nosné konstrukce po odbourání původního kolejového svršku, koryta a římsy až na úroveň nosné konstrukce, která tím byla odlehčena. Statikem vypočtená modelová hodnota byla +11 mm. Změna průhybu o +1 mm ve stavu v E2 oproti stavu E1 (celkově +10,4 mm od E0) vyjadřuje stav konstrukce těsně před betonáží. Změna průhybu je výsledkem manipulace s nosnou konstrukcí (nadzvednutí nosné konstrukce z ložisek a jejího opětovného uložení do původního stavu) a jejího částečného mírného předepnutí před betonáží. Relativní změna průhybu o -5 mm (pokles vůči E2) ve stavu E3 vyjadřuje účinek přetížení nosné konstrukce novým betonovým korytem s římsou a vliv předpětí (statikem vypočtené modelové hodnoty vlivu přetížení nové spřažené desky mostovky - 8,4 mm,

účinek dodatečného předpětí +2,3 mm, výsledný modelový průhyb -6,1 mm). Nosná konstrukce je v této fázi ve středu mostního pole stále nadvýšená oproti původnímu výchozímu stavu (E0) o +5,4 mm. Ve stavu E4 je nosná konstrukce již v cílovém stavu po přitížení novým kolejovým ložem, tedy ve stavu těsně před ověřovací zatěžovací zkouškou a uvedením do provozu. Průhyb středu mostního pole se změnil vůči předchozímu stavu E3 o hodnotu -7,5 mm, přičemž výsledný průhyb činil -2,1 mm (pokles) od výchozího stavu E0 (statikem vypočtená modelová hodnota od ostatního stálého zatížení -5,9 mm) . Výsledný stav po rekonstrukci korespondoval s teoretickým statickým modelem.

3.4 DLOUHODOBÝ VÝVOJ PRŮHYBŮ STŘEDŮ POLÍ 2 A 3 V PRŮBĚHU DÍLČÍCH ETAP OD POČÁTKU SLEDOVÁNÍ DO ROKU 2015

Na Obr. 14 je vyhodnocen na časové ose dlouhodobý vývoj průhybů středů mostních polí 2 a 3 v průběhu dílčích etap měření ve fázi rekonstrukce (modře) a v období 6 let od uvedení do provozu po rekonstrukci. Průhyby jsou vyhodnoceny od základního stavu – před rekonstrukcí. Uvedené hodnoty průhybů byly vypočteny aritmetickým průměrem z průhybů naměřených na vnějších nosnících nosné konstrukce. Současně je v grafu vynesena průběh teploty vzduchu v dílčích etapách.



Obr. 14 Dlouhodobý vývoj průhybu středu pole 2 od výchozího stavu (2009-2015)

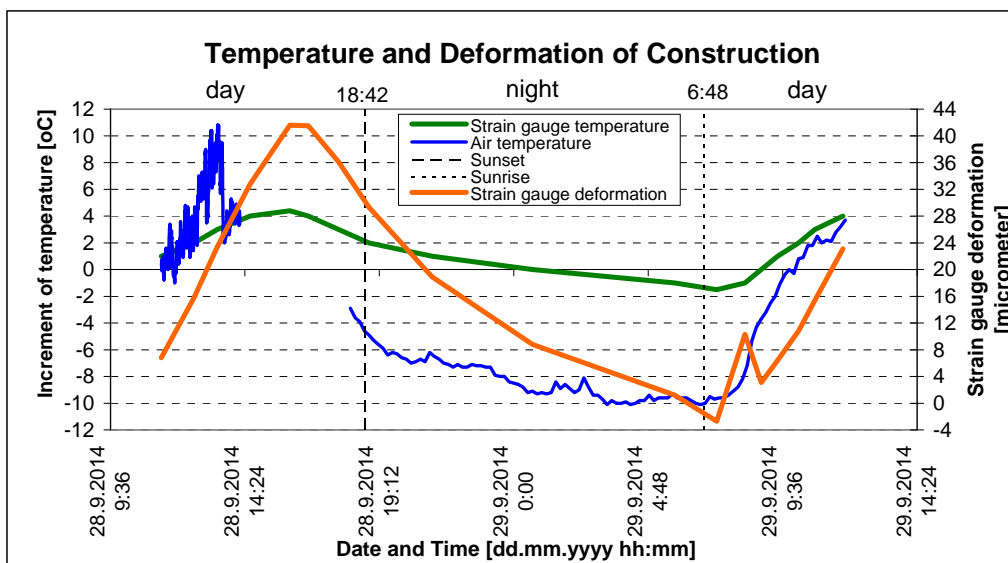
Výsledky dlouhodobého geodetického sledování mostní konstrukce od roku 2010 do roku 2015 prokázaly, že změny trvalých průhybů korigovaných z vlivu teploty středů polí za 5 let po znovu uvedení mostu do provozu dosáhly v mostním poli 2 hodnotu 3,4 mm směrem dolů, v mostním poli 3 hodnotu 3 mm směrem dolů. Mostní pole 2 a pole 3 vykazují mírný nerovnoměrný průhyb obou okrajů nosné konstrukce vyplývající z nerovnoměrného oslunění (prohřátí) konstrukce. Hodnoty průměrných průhybů pole 2 a pole 3 se mírně vzájemně liší, ale korespondují spolu.

Geodetické měření sedání spodní stavby prokázalo se mírný dlouhodobý nárůst zatlačení podpor do podloží až 3,4 mm.

3.5 VLIV VNĚJŠÍCH PODMÍNEK NA SLEDOVANOU KONSTRUKCI

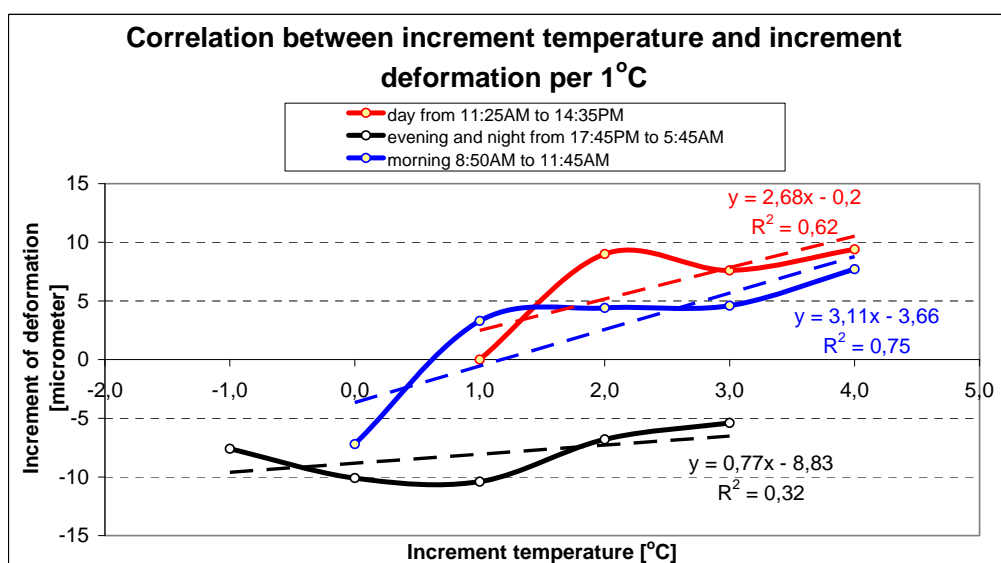
Vliv změny vnějších podmínek (zejména změny teploty) na sledovanou konstrukci byl analyzován z účelového kontinuálního 24 hodinového monitoringu v 9/2014 mostního pole 2.

Povrchová teplota konstrukce byla měřena kontaktně kalibrovanými teplotními měřidly Comet s přesností 0,1 až 0,3°C. Umístění čidel bylo na severní a jižní straně mostovky z boku betonové vany, z boku nosné konstrukce (NK), zespodu NK. Most "Gagarin" je v terénu orientován podélným směrem východ – západ a v příčném směru sever – jih. Z hlediska působení slunečního záření je během dne osluněn převážně jižní strana mostu. Z průběhu teplot v řezu je patrný rozdíl teplot severního a jižního okraje mostu a z důvodu jeho jednostranného oslunění. Rozdíl teplot vzduchu v průběhu 24 hodin v září 2014 např. činil až 15°C. Na Obr. 15 je znázorněn průběh teploty vzduchu měřené ve stínu 2 m nad povrchem terénu a průběh teploty měřené strunovým tenzometrem umístěným ze spodu nosné konstrukce. Zároveň je znázorněn průběh deformace měřené strunovým tenzometrem. Vyznačeny jsou časy západu a východu Slunce ohraničující přechod dne a noci.



Obr. 15 Teploty a tenzometricky měřené přetvoření

Na Obr. 16 je vyhodnocena závislost mezi změnou teploty a změnou deformace pro den, noc a ráno. V nočních podmínkách je vliv změny teploty cca 3.5x menší, než za denních podmínek při oslunění. Ohřívání konstrukce vlivem oslunění je intenzivnější oproti chladnutí konstrukce, které je pozvolnější.



Obr. 16 Korelace mezi přírůstkem teploty a přírůstkem přetvoření

3.6 VZÁJEMNÁ ZÁVISLOST TENZOMETRICKÝCH A GEODETICKÝCH MĚŘENÍ

Princip řešení vzájemného vztahu mezi výsledky tenzometrického a geodetického měření je založen na bázi stochastické regresní analýzy a korelačního počtu.

Mějme obecně funkci $y = f(x)$ reprezentující měřenou veličinu podélného přetvoření měřeného tenzometricky a funkci $x = g(y)$ odpovídající geodeticky měřené veličině průhybu.

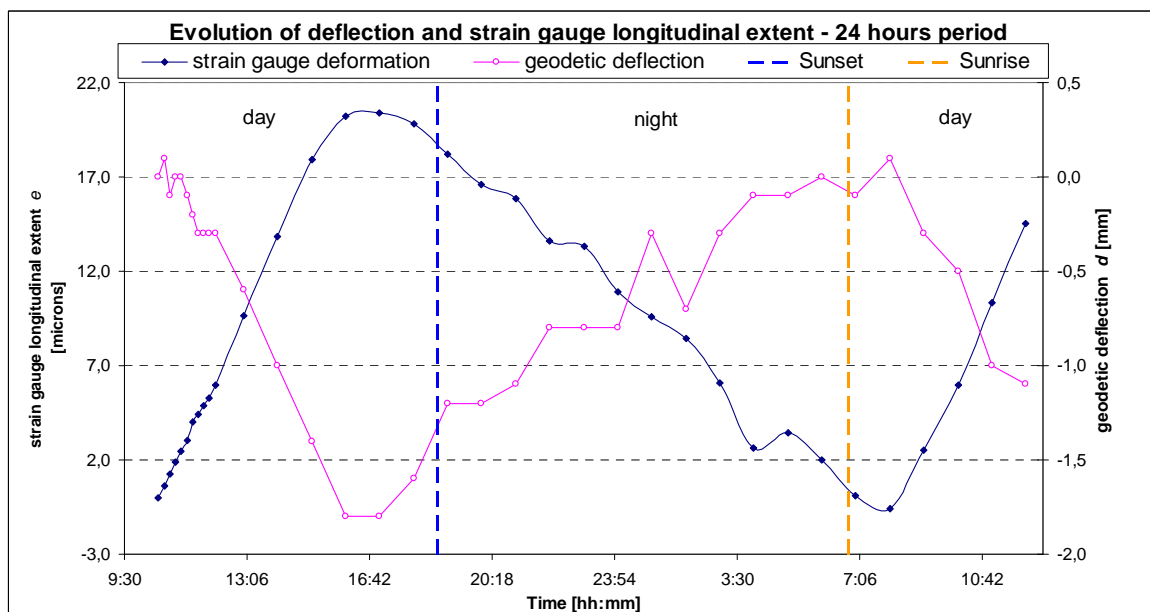
Funkci aproximujeme regresní přímkou $\bar{y} = a_y + b_y x$ a $\bar{x} = a_x + b_x y$, přičemž $b_x \neq \frac{1}{b_y}$. Regresní

přímky pořešíme metodou nejmenších čtverců za podmínky minimálního součtu čtverců residuálních odchylek $\sum \rho_x^2 = \min$ a $\sum \rho_y^2 = \min$. Koeficienty $b_y = \text{tg} \alpha_y$ a $b_x = \text{tg} \alpha_x$ jsou směrnice regresních přímek, které se díky rozptylu vzájemně liší. Koeficient korelace R se vypočte

$R = \sqrt{\frac{b_y}{b_x}}$. Když $0 < |R| < 0.4$ je vzájemná závislost (korelace) dvou veličin malá, když

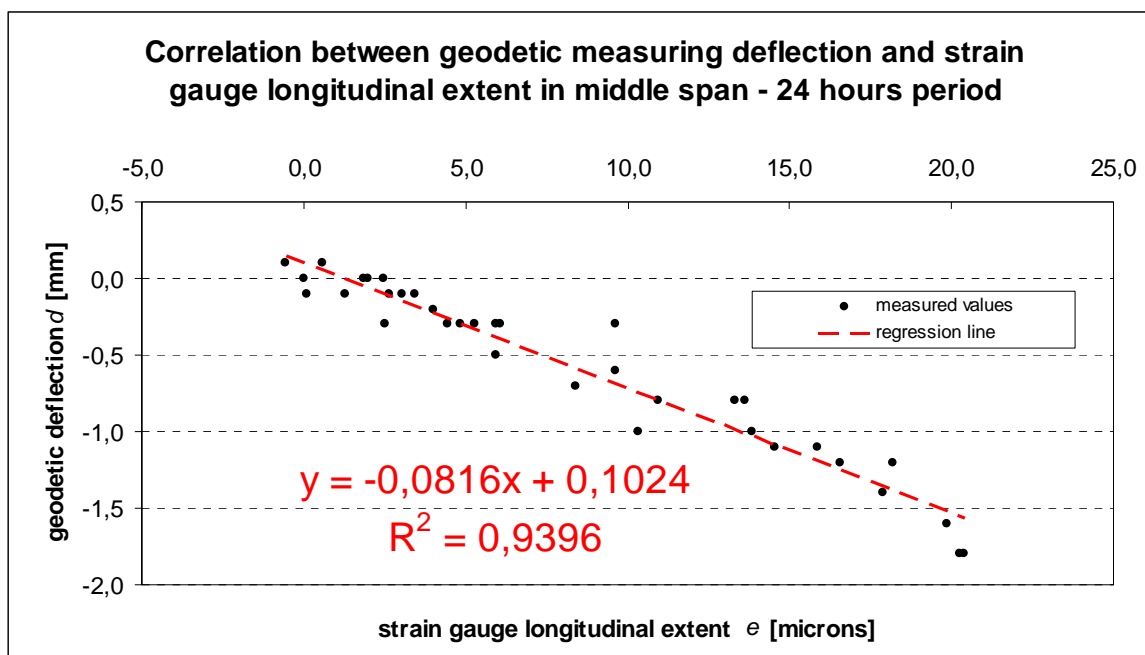
$0.4 < |R| < 0.85$ lze korelaci považovat za prokázanou a když $0.85 < |R| < 1$ jde o silnou korelaci.

Na Obr. 17 je znázorněn vývoj změny geodeticky měřeného průhybu d a tomu odpovídající vývoj změny tenzometricky měřeného podélného přetvoření e ve středu mostního pole v průběhu 24 hodin. Znaménko (-) u průhybu značí, že průhyb směřuje svisle dolů. Znaménko (+) u podélné deformace značí vzájemné přiblížení konců tenzometru, tedy zkrácení jeho základny. Se změnou hodnoty vodorovného přetvoření e se zároveň mění hodnota průhybu. V Obr. 17 je znázorněn i čas západu a východu Slunce, aby byl zřejmý průběh za nočních a denních podmínek.



Obr. 17 Vývoj změny geodeticky měřeného průhybu a tomu odpovídající vývoj změny podélného přetvoření v průběhu 24 hodin

Regresní analýzou byly vypočteny parametry regresní přímky vzájemné závislosti mezi hodnotami geodeticky změřeného průhybu a hodnotami tenzometricky změřeného podélného přetvoření. Koeficient korelace R se vypočte jako odmocnina z uvedeného koeficientu determinace R². Mezi zkoumanými veličinami je zřejmá silná korelace (Obr. 18).



Obr. 18 Korelace mezi geodeticky měřeným průhybem a tenzometricky měřeným podélným přetvořením ve středu mostního pole v průběhu 24 hodin

Vyhodnocení této vzájemné závislosti dvou různě měřených veličin dává možnost vzájemného přepočtu výsledků jednoho měření na druhé. Vyšší vnitřní přesnost tenzometrického měření dává vyhlazenější křivku průhybu, než je křivka z geodetického měření. Geodetické měření je zatíženo cca 15% poměrnou chybou k hodnotě měřené veličiny, tenzometrické měření je zatíženo cca 5% až 10% poměrnou chybou k hodnotě měřené veličiny.

3.7 DÍLČÍ ZÁVĚRY

Realizovaný tenzometrický a geodetický měřicí systém na mostní konstrukci splnil cíle a umožnil zachytit, číselně zdokumentovat a interpretovat všechny důležité fáze rekonstrukce, především míru vlivu tíhy původního koryta s kolejovým svrškem na hlavní nosnou konstrukci, míru vlivu manipulací s nosnou konstrukcí před betonáží nového koryta, stav zpětného uložení nosné konstrukce na renovovaná ložiska, míru vlivu zvětšené tíhy nového koryta na hlavní nosnou konstrukci, míru vlivu přetížení nosné konstrukce novým kolejovým svrškem, a míru vlivu přetížení břemenem 120 tun při ověřovací zatěžovací zkoušce [51], [52], [53], [54].

Při ověřovací zatěžovací zkoušce se dále prokázalo, že přetížením břemenem 120 tun dochází k příčnému náklonu konstrukce, což se projevilo příčným trendem přetvoření v místě ložisek. Příčný náklon konstrukce se rovněž jednoznačně projevil po jejím odlehčení odbouráním původního svršku a koryta a po přetížení novým korytem a svrškem. Příčný náklon se projevil i v základech podpor a pravděpodobně souvisí s pružností základové půdy. Ve všech fázích se prokázala korespondující reakce podloží i nosné konstrukce. Sledování v průběhu rekonstrukce bylo přínosným neboť umožnilo průběžnou verifikaci statického modelu a kontrolu stavu konstrukce, která průběžně prokazovala kvalitu a úspěšnost rekonstrukce.

Konstrukce předpjatého mostu z roku 1961 byla zesílena a zatížitelnost byla zvýšena na 180% vlaku UIC. Rozšířená mostovka umožňuje automatizovanou údržbu železničního svršku, její vlastní hmotnost je zvětšená o 50 % vzhledem k původní hmotnosti mostovky. Přitom bylo dosaženo významného ztužení hlavní nosné konstrukce a pružné průhyby při srovnatelném zatížení klesly na 60% původních hodnot. Vybalancováním zvětšené tíhy nové mostovky dodatečným předepnutím kabely se dosáhlo dalšího trvání tlakové rezervy v betonu nosníků. Cena

rekonstrukce byla cca 50 mil. Kč oproti ceně nového mostu cca 150 mil. Kč. Ukazuje se, že původní plně předpjaté železniční mosty je možné efektivně rekonstruovat a zesílit.

Realizovaný měřicí systém umožňuje dlouhodobé několikaleté sledování konstrukce, přičemž takto získaná data budou sloužit pro detailní analýzu chování a vlastností zesílené konstrukce. Dlouhodobý monitoring hraje významnou roli z hlediska výzkumu a verifikace modelů chování stavebních konstrukcí a působí jako zpětná informační vazba o skutečném statickém chování konstrukce, přičemž výsledky lze využívat zejména pro vývoj nových stavebních konstrukcí.

Zdvojení tenzometrického a geodetického měřicího systému se ukazuje jako prozíravé. Zejména z dlouhodobého hlediska, kdy dochází k uklidňování nárůstu přetvoření hlavní nosné konstrukce, toto zdvojení umožňuje pravdivou orientaci v získaných a interpretovaných hodnotách. Dále lze konstatovat, že uskutečněná etapová geodetická měření korelují s výsledky měření tenzometrických.

Prokázala se výhoda vzájemné kombinace kontinuálního sledování konstrukce strunovými tenzometry a méně častých geodetických etapových měření. Integrovaný přístup umožňuje na základě rozporů obou měření hlouběji analyzovat zejména teplotní namáhání konstrukce v důsledku přímého oslunění. Tenzometrické měření dává relativní změny s vysokou vnitřní přesností, geodetické měření určuje absolutní hodnoty. Nezbytnou součástí integrace je měření teplotního pole konstrukce. Integrovaným přístupem lze spolehlivěji interpretovat poměr vlivu vnějšího prostředí a trvalých deformací.

4 TECHNOLOGIE MONITORINGU PŘI TLAKOVÉ ZKOUŠCE ŠACHTY LOKALIZACE HAVÁRIE V JADERNÉ ELEKTRÁRNĚ DUKOVANY

Předmětem geodetického monitoringu byl objekt šachty lokalizace havárií (ŠLH), která je součástí hlavního výrobního bloku (HVB) - budovy reaktorů. Cílem monitoringu bylo průběžné geodetické měření posunů a deformací během celé tlakové ověřovací zkoušky integrity kontejnmentu (OZIK), tj. ochranné obálky, bloku v celkové době trvání 65 hodin a navíc 48 hod. před OZIK (pro účel stanovení vnějších vlivů na nezatíženou konstrukci) a 48 hod. po OZIK (pro účel prokázání návratu konstrukce do výchozího stavu).

Předmětem geodetického měření byly:

- 1) svislé deformace (průhyby) a absolutní svislý posun střešní konstrukce – etapové měření metodou velmi přesné nivelace a kontinuální monitoring svislých posunů a deformací,
- 2) vodorovné deformace (odklon od svislice, průhyby) vnějších stěny E ve střední linii,
- 3) vodorovné deformace vnitřních stěn D (průhyby) stěny zkoušeného bloku a stěny nezkoušeného sousedního bloku.

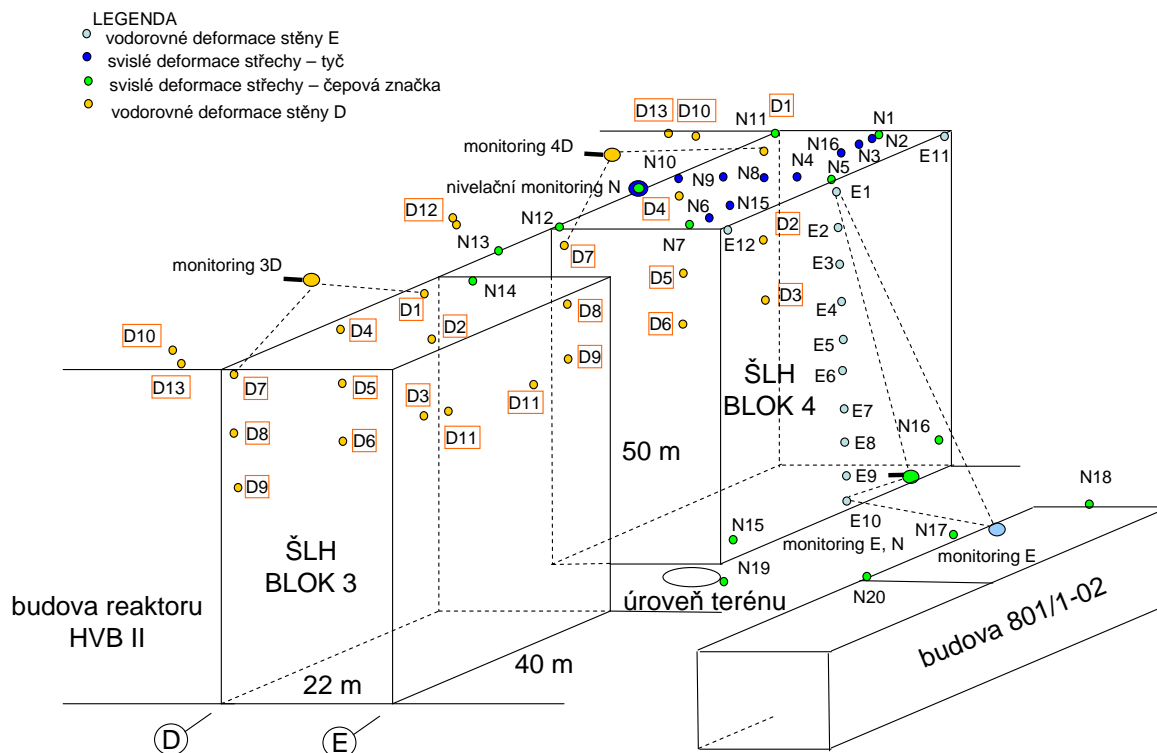
Očekávané deformace dle statického modelu – průhyby střechy do 2,5 mm, odklony od svislice stěny v ose E do 3 mm, deformace (průhyby) stěny E do 1,5 mm a deformace (průhyby) stěny D max. do 3,5 mm [62], [63], [64], [65].

4.1 SPECIFIKACE DÍLČÍCH FÁZÍ MĚŘENÍ

1. měření nezatížené konstrukce 48 hod. před jejím tlakováním,
2. fáze OZIK - 0kPa (výchozí stav), 25kPa, 50kPa, 75kPa, 100kPa, 125kPa, 130kPa, 100kPa,
3. fáze OZIK - 100 kPa, 75 kPa, 50 kPa, 37,5 kPa, 50 kPa,
4. fáze OZIK - 50 kPa, 25 kPa, 0 kPa),
5. měření nezatížené konstrukce 48 hod. po odtlakování.

4.2 GEODETICKÝ MĚŘICÍ SYSTÉM NA SLEDOVANÉM OBJEKTU

Na Obr. 19 je rozmístění měřických značek celého monitorovacího systému na objektu ŠLH v axonometrickém pohledu. Principem geodetického měření byla polární metoda.

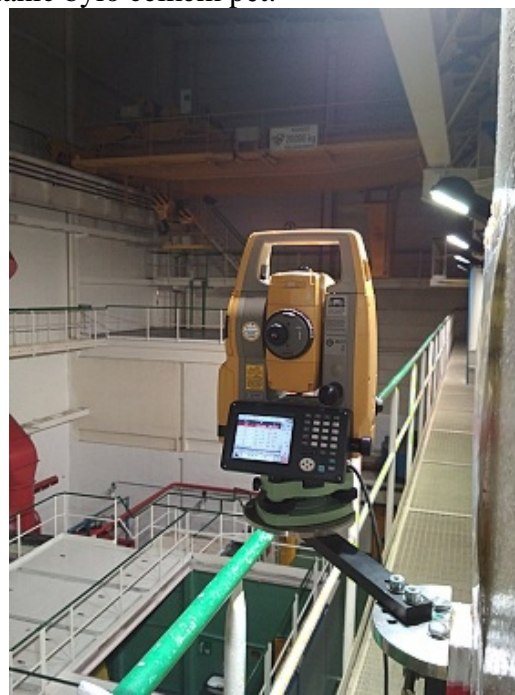


Obr. 19 Schéma rozmístění měřických značek monitorovacího systému na objektu ŠLH

Na Obr. 20 a Obr. 21 jsou ukázky realizace umístění geodetických robotizovaných měřících stanic na sledovaném objektu vně a uvnitř. Měřících stanic bylo celkem pět.



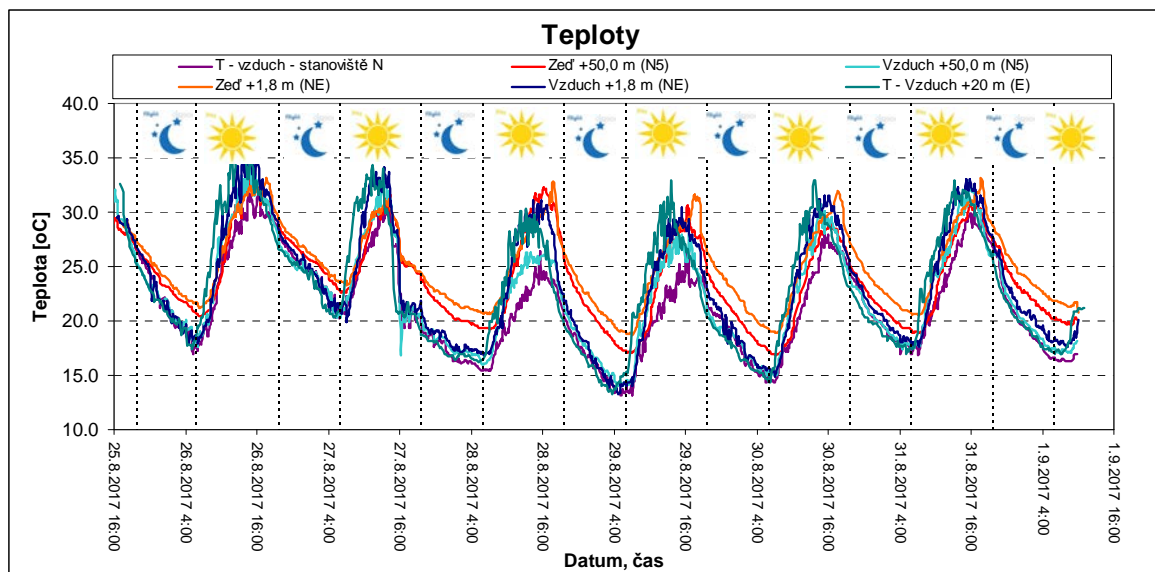
Obr. 20 - Stanoviště monitoringu EN



Obr. 21 - Stanoviště monitoringu 4D

4.3 MONITORING VNĚJŠÍCH TEPLOT

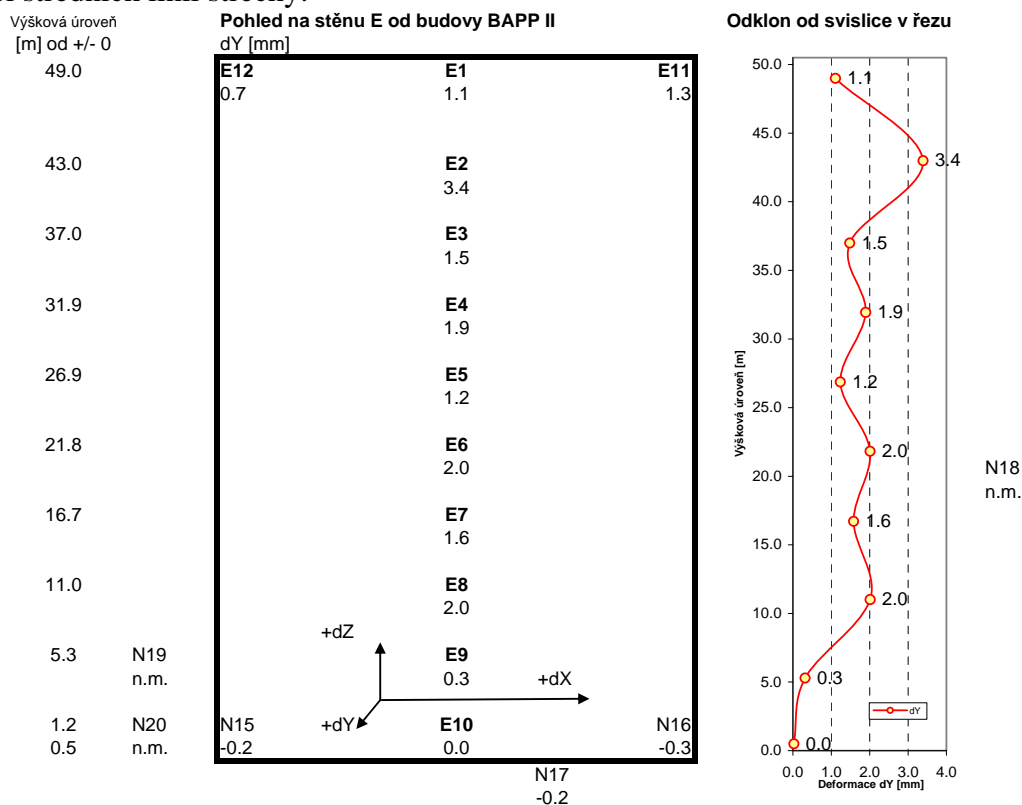
Na Obr. 22 je znázorněn průběh teplot (vzduch a kontaktně zeď) vně budovy za celou dobu geodetického monitoringu 25.8.-1.9.2017. Rozdíly teplot den – noc dosahovaly až 15°C.



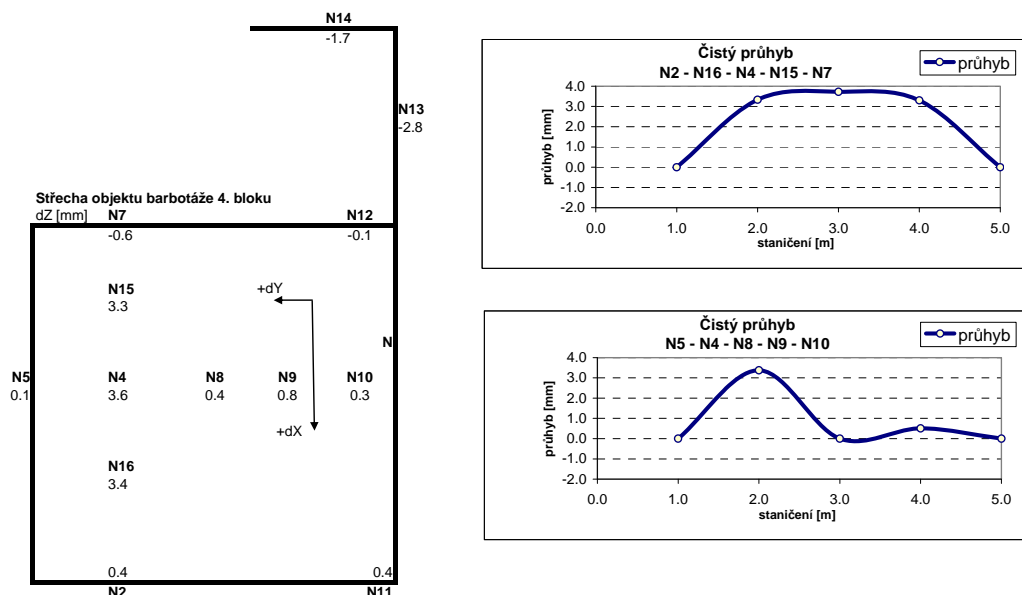
Obr. 22 Průběh vnějších teplot (25.8.-1.9.2017)

4.4 UKÁZKY VYHODNOCENÍ DEFORMACÍ

V následujícím jsou uvedeny ilustrativní ukázky vyhodnocení deformací dílčích částí sledovaných konstrukcí ŠLH. Na Obr. 23 je ukázka vyhodnocení a znázornění náklonů a průhybů ve střední linii vnější stěny E. Na Obr. 24 je ukázka vyhodnocení a znázornění svislých posunů a deformací středních linií střechy.



Obr. 23 Grafické znázornění posunů v dY stěny E v pohledu a řezu



Obr. 24 – Grafické znázornění posunů v dZ střechy (půdorys)

4.5 SOULAD ROBOTIZOVANÉHO MONITORINGU A KLASICKÉ NIVELAČNÍ METODY MĚŘENÍ

Porovnání čistých průhybů na sledovaných bodech N4 a N9 ve střední linii pro dílčí zatěžovací stavy s výsledky velmi přesné nivelace (VPN) pro fázi tlakování je v Tabulka 3. Odchytky obou nezávislých metod nepřekročily 0,1 mm a jsou v rámci nejistot metod měření.

Tabulka 3: Porovnání čistých průhybů nivelačního monitoringu a VPN

Stav	N5-N4-N8 (rozpětí 13,7 m) čistý průhyb [mm]	N8-N9-N10 (rozpětí 10,0 m) čistý průhyb [mm]
ZS0 - 0kPa	0,0 (VPN 0,0)	0,0 (VPN 0,0)
ZS1 - 25kPa	+0,3 (VPN +0,4)	+0,1 (VPN 0,1)
ZS2 - 50kPa	+0,8 (VPN +0,9)	+0,1 (VPN +0,2)
ZS3 - 75kPa	+1,5 (VPN +1,5)	+0,2 (VPN +0,3)
ZS4 - 100kPa	+2,2 (VPN +2,3)	+0,3 (VPN +0,3)
ZS5 - 125kPa	+3,2 (VPN +3,3)	+0,4 (VPN +0,4)
ZS6 - 130kPa	+3,4 (VPN +3,5)	+0,5 (VPN +0,5)

4.6 DÍLČÍ ZÁVĚRY

Na základě průběhu měření a vyhodnocení výsledků geodetického měření při tlakové zkoušce OZIK mohlo být konstatováno:

- Skutečné absolutní posuny na celé sledované konstrukci při natlakování na 130kPa nepřekročily na střeše hodnotu ve výškové složce dZ +3,7 mm (N4), na stěně E hodnotu vodorovné složky dY +3,8 mm (E2) a na stěně D průhyb hodnoty -2,0 mm v dY (D5).
- Skutečné posuny střechy na protokolárně sledovaném bodě N4 byly menší, než kritické posuny specifikované projektem. V místě N4 na střeše naměřená hodnota svislého čistého průhybu dosáhla hodnoty 43% projektem specifikovaného limitního svislému posunu. Čistý průhyb N4 vůči N5 a N8 při tlaku 130kPa dosáhl +3,4 mm (na rozpětí 13,7 m). Niveláčnický monitoring a nezávislou velmi přesnou nivelaci lze považovat za nezávislá kontrolní měření vzájemně spolu dobře korespondující.

- c) Absolutní svislý posun střechy ve smyslu změny svislé délky stěny E ŠLH naměřené na bodě E1 ve výškové úrovni +50,0 m při tlaku 130kPa se projevil hodnotou +1,1 mm.
- d) Po odtlakování se sledované části konstrukce ŠLH (střecha, stěna E, stěna D) prakticky vrátily z hlediska geometrie do výchozího stavu v rámci nejistot měření a míry jejich ovlivnění proměnlivými vnějšími podmínkami (teplota, oslunění).
- e) Měření 48 hodin před tlakováním a po odtlakování splnilo očekávání tým, že kvantifikovalo chování sledované konstrukce bez účinku tlakování za proměnlivých vnějších atmosférických podmínek a přispělo k verifikaci návratu stavu konstrukce do původního stavu.
- f) Monitoring vnějšího teplotního pole detailně ukázal na extrémní teplotní stavy povrchu konstrukce ŠLH a data budou sloužit jako podklad pro hlubší teplotní analýzu konstrukce. Kompletní dokumentace geodetické části vyhodnocení je v [66], [67], [68], [69], [70].

5 ZÁVĚRY

Habilitační práce řeší formulaci technologického řešení metodiky měření bodů primární sítě železničního bodového pole (ŽBP) technologií GNSS v reálném čase s metrologickou návazností na geodetické referenční systémy ČR umožňující dosáhnout přesnosti v mezní odchylce ± 10 mm, která byla z velké části implementována do vnitřních předpisů SŽDC. Za nejdůležitější považuji skutečnost, že metodika umožňuje technologicky měřením udržet vysokou přesnost a lze relativně jednoduše obnovit geodetickou síť v průběhu stavby, když dojde k jejímu zničení provozem stavby. Dále je důležité, že metodiku lze bezproblémově použít na většinu území ČR. Jako problematické se jeví podmínky, kde není dostupnost signálu GSM pro příjem korekcí a dalším problémem jsou nepříznivé podmínky v dlouhých úsecích podél trasy pro měření GNSS, tzn. lesy, hluboká údolí. Částečně je tato skutečnost řešitelná s využitím kombinace GNSS observované v dobrých podmínkách někde v blízkosti místa potřeby a klasických metod, které dotáhnou polohu na problematické místo dle potřeby. Řešením v nepřístupných podmínkách je i použití dronu s GNSS a optickým hranolem, kterým lze vylétnout několik desítek metrů nad překážky (stromy, budovy) nebo poodletět do vhodnějších observačních podmínek od strmého úbočí svahu nebo skály, po kterém vede trasa železnice. Tam kde nejde aplikovat výše uvedené se nabízí použití gyroteodolitu pro usměrnění polygonového pořadu, obdobně jako v tunelovém stavitelství. Z hlediska přesnosti je vhodné si GNSS aparáturu kalibrovat touto metodikou na geodetické základně v prakticky ideálních podmínkách a poté v provozních podmínkách železnice porovnáním vzájemné přesnosti z rozptylu usuzovat na vliv vnějších podmínek, případně multipath a tím lépe interpretovat případné odlehle hodnoty.

Druhým technologickým řešením byl tenzometrický a geodetický monitoring mostu Gagarin, který byl unikátní stavební technologií zesílen a výsledky zesílení dlouhodobě monitorovány po uvedení mostu do provozu. Za důležité poznatky považuji to, že dlouhodobá měření, která jsou ovlivněna vnějšími podmínkami, lze analýzou tenzometrického a geodetického měření z velké části korigovat z teplotní závislosti a získat tím hodnoty trvalých deformací. A dále při použití 24 hodinového geodetického monitoringu mostní konstrukce společně s tenzometrickým monitoringem lze dosáhnout jejich vzájemného nakalibrování na sebe a tedy možnosti vzájemného převodu výsledků tenzometrických měření na geodetické a naopak na podkladě korelační analýzy. Tuto skutečnost lze efektivně využít např. při zatěžovacích zkouškách, kdy zpravidla kontinuální vnitřně přesnější tenzometrické měření podélných pretvoření lze velmi jednoduše koeficientem přepočítávat na změny průhybu a geodetickým měřením průhybu přímo kontrolně v etapách měřit. Tím je dosaženo důležitého kontrolního zdvojení metod při jinak neopakovatelných stavech měřených při zatěžovacích zkouškách mostů uváděných do provozu po výstavbě nebo jejich rekonstrukci. Z dlouhodobého hlediska geodetická etapová měření určují absolutní změny konstrukce a umožňují správně vyhodnotit dlouhodobá relativní tenzometrická měření, ve kterých

vlivem vnějších podmínek na konstrukci a dlouhodobosti se ztratí přehled o absolutnu, tj. zda je konstrukce ve stavu zdvihu nebo poklesu.

Třetím technologickým řešením byl rozsáhlý geodetický monitoring realizovaný při ověřovací tlakové zkoušce ochranné obálky reaktoru v Jaderné elektrárně Dukovany. Měření s vysokou přesností prokázala spolehlivě velmi malé deformace do 3,5 mm stěn objektu šachty lokalizace havárií vyvolané změnami tlaku. Součástí vyhodnocení monitoringu bylo určení vlivu vnějších podmínek na sledovanou konstrukci. Za důležité na výsledcích bylo úspěšné nasazení geodetické technologie komplexního monitoringu pro měření malých deformací na poměrně velké stavební konstrukci. Ukázala se složitost související s nutností umístění měřicích geodetických stanic na ovlivněné části zkoušené konstrukce a to z důvodu zkrácení délek záměr a tím dosažení vysoké přesnosti měření deformací. Následné vyhodnocení vyžadovalo v těchto případech transformací deformací k vhodným bodům na konstrukci, aby výsledky byly logicky interpretovatelné. Nabízelo se řešení on-line přenosu dat měření, které ovšem nebylo v tomto případě realizováno a to jednak z důvodu ne všude dostupného signálu GSM (zejména nedostupnost signálu ve vnitřních uzavřených prostorech) a jednak také z důvodu finanční náročnosti pro prakticky jednorázový úkon tlakové zkoušky opakující se 1x za 10 let to nebylo efektivní. Z hlediska působení vnějších podmínek byla realizace monitoringu vysoce náročná. Ukázalo se, že i v případě lehké mlhy geodetický monitoring kolabuje, proto je žádoucí myslet na maximální zkrácení záměr měřicích stanic. V letních podmínkách je problémem změna teploty a oslunění, přičemž je nutné chránit měřicí stanici monitorovací budkou, ale v průběhu dne stejně nelze zajistit její částečné neoslunění z důvodu působení oslunění z boku monitorovací budky. Ukázalo se, že měřicí stanice (konkrétně Trimble S8) může zkolabovat při otáčení dalekohledu do druhé polohy tehdy, když do objektivu zasvítí přímo slunce, což se stávalo při východu resp. západu slunce. Vliv oslunění působí jak na sledovanou konstrukci, tak na měřicí stanici a teprve interpretací výsledků na více bodech lze logicky dojít k logice mechaniky pohybu. Je tedy třeba při navrhování soustavy sledovaných a vztažných bodů na tuto skutečnost myslet. Ukázalo se, že dosahovaná přesnost několika desetin milimetru geodetickými metodami je technicky realizovatelná a vysoká, ale také zrádná z hlediska interpretace výsledků. Měření s vysokou přesností se zjistí, že se hýbe všechno, tedy nejen objektová soustava, ale také vztažná soustava. Nejdůležitější je při návrhu těchto soustav brát v úvahu možné dilatační účinky stavebních konstrukcí. Přestože byly měřicí stanice upnuté prostřednictvím nucené centrace na zdech sousedních objektů (z mnoha důvodů to nešlo jinak), nebylo to nic platné a vliv dilatačních účinků a to byly v některých případech až několikamilimetrové hodnoty, se projevoval v měřeních. Při vyhodnocení se tato skutečnost musela dodatečně zohlednit, např. vhodnou redukcí k jednomu sledovanému bodu. Použitá monitorovací technologie byla použita pro měření všech čtyř zkoušených bloků jaderné elektrárny za všech možných podmínek (jasno, slunečno, déšť, vítr, mlha, velké výkyvy teplot, sníh, vysoká vlhkost, mraz). V zimních podmínkách za mrazu se ukázalo jako klíčové udržení napájení měřicí stanice externí autobaterií, jejíž kapacita ovšem dramaticky klesá s nízkou teplotou. Proto byla baterie umístěna do plastové krabice s polystyrenovou vložkou a uvnitř byla zapálena standardní hrobní svíčka ve skleněném obalu, která vytopila prostor krabice po dobu noci a baterie tolik nepodléhala snížení kapacity v důsledku nízké venkovní teploty. Prakticky vždy musela být technologie v detailech modifikována a dopracovávána i např. z hlediska zákrytů některých sledovaných bodů překážkami. U použitých stanic Trimble S8 a S9 bylo využito komerčně prodávaného modulu „Monitoring“, který se ukázal jako velmi dobře použitelný. U stanic Topcon musel být použit vlastní software pro monitoring NetSurv, který upravila a implementovala do svého řešení EasyNet firma GeoTEL Geodézie Telemetrie Elektronika s.r.o. na návrh předkladatele habilitační práce. Pro účel monitoringu pro tlakovou zkoušku byla softwarová aplikace postupně vyvíjena na základě zkušeností z jejího nasazení.

Autor habilitace považuje realizovaná technologická řešení za nadstandardní řešení, navíc úspěšně realizovaná v obtížných provozních podmínkách.

6 KONCEPCE DALŠÍ ČINNOSTI

Další výzkumná činnost v oblasti monitoringu staveb bude směřována do oblasti využití elektronických komunikačních technologií a internetu pro účel ukládání dat monitoringu a jejich zpřístupnění prostřednictvím standardizovaného informačního systému monitoringu. Výsledky výzkumné činnosti budou prostřednictvím publikovány na tuzemských i zahraničních odborných konferencích nebo v časopisech. Nové poznatky a zkušenosti budou formou inovací postupně implementovány i do studijních opor a pedagogické praxe.

7 POUŽITÉ ZDROJE A LITERATURA

- [1] BUREŠ, J.: Metodika budování a údržby Železničního bodového pole (ŽBP) technologiemi Globálních navigačních satelitních systémů (GNSS) v reálném čase s metrologickou návazností na geodetické referenční systémy ČR. Projekt S 23488/2014-O13, zhotovitel VUT v Brně, 4/2015.
- [2] BUREŠ, J.: Výsledky pilotního ověření metodiky - Příloha č. 1. Projekt S 23488/2014-O13, zhotovitel VUT v Brně, 4/2015
- [3] BUREŠ, J.: Závěrečná zpráva. Projekt S 23488/2014-O13, zhotovitel VUT v Brně, 4/2015
- [4] CZEPOS [on-line]. Zeměměřický úřad. Praha. Dostupné z: <http://czepos.cuzk.cz/>
- [5] TRIMBLE VRS NOW [on-line]. Trimble Trimble Navigation Limited.
Dostupné z: <http://www.trimble.com/positioning-services/vrs-now.aspx>
- [6] TOPNET [on-line]. Geodis Brno, spol. s r.o. Dostupné z: <http://topnet.gb-geodezie.cz/>
- [7] Monitoring permanentních stanic GNSS, VÚGTK, v.v.i.
Dostupné on-line: <http://oko.pecny.cz/monitor/>
- [8] Nařízení vlády č. 430/2006 Sb. o stanovení geodetických referenčních systémů a státních mapových děl závazných na území státu a zásadách jejich používání, ve znění nařízení vlády č. 81/2011 Sb.
- [9] ČSN 73 6360-2 (2013): Konstrukční a geometrické uspořádání koleje železničních drah a její prostorová poloha. Část 2: Stavba a přejímka, provoz a údržba.
- [10] Zákon č. 200/1994 Sb., o zeměměřictví.
- [11] Vyhláška č. 31/1995 Sb., kterou se provádí zákon č. 200/1994 Sb., o zeměměřictví.
- [12] Zákon č. 256/2013 Sb., o katastru nemovitostí (katastrální zákon).
- [13] Vyhláška č. 357/2013 Sb., o katastru nemovitostí (katastrální vyhláška).
- [14] Vyhláška č.233/2010 Sb., o základním obsahu technické mapy obce.
- [15] Kostelecký Jan, Kostelecký Jakub, Pešek Ivan: Metodika převodu mezi ETRF2000 a S-JTSK, varianta 2. VÚGTK, v.v.i., 2010
Dostupné on-line: <http://cuzk.cz/Zememerictvi/Geodeticke-zaklady-na-uzemi-CR/GNSS/etrf00-jtsk-v1012-a-etrf00-jtsk-v1203.aspx>
- [16] Český úřad zeměměřický a katastrální, Geoportál, Transformace souřadnic.
Dostupné on-line:
<http://geoportal.cuzk.cz/Default.aspx?mode=TextMeta&text=wcts&menu=191>
- [17] OŘ37 Metodický návod pro budování a správu železničního bodového pole. Změna č. 1, 2013, č.j. 138/2013-SŽG
- [18] ČSN 73 0415 (2010): Geodetické body.
- [19] ČSN ISO 7078 (1996): Pozemní stavby. Postupy měření a vytyčování. Slovník a vysvětlivky.
- [20] ČSN 73 04 20 (1986): Přesnost vytyčování stavebních objektů. Základní ustanovení.
- [21] ČSN 73 04 21 (1986): Přesnost vytyčování objektů s prostorovou skladbou.
- [22] ČSN 73 04 22 (1986): Přesnost vytyčování liniových a plošných stavebních objektů.
- [23] ČSN 73 04 20-1 (2002): Přesnost vytyčování staveb. Základní ustanovení.
- [24] ČSN 73 04 20-2 (2002): Přesnost vytyčování staveb. Vytyčovací odchylky.
- [25] Pravidla pro vzájemnou výměnu digitálních dat mezi SŽDC s.o. a jinými subjekty (verze č. 2.2, od 6.3.2013)
- [26] OŘ28 Zajištění metrologického pořádku
- [27] OŘ34 Metodický pokyn pro měření prostorové polohy koleje na tratích SŽDC u SŽG Olomouc
- [28] OŘ36 Opatření k zaměřování objektů železniční dopravní cesty
- [29] OŘ39 Technické zadávací podmínky pro geodetické a projekční práce

- [30] AKANDWANAHU, S. M., ADEWUMI, A. O., ADEBIYI, A. A., 2014. Solving Dynamic Traveling Salesman Problem Using Dynamic Gaussian Process Regression. JOURNAL OF APPLIED MATHEMATICS. Article Number: 818529.
- [31] HUSSAIN A. Z., 2014. The Ordered Clustered Travelling Sale-sman Problem: A Hybrid Genetic Algorithm. SCIENTIFIC WORLD JOURNAL. Article Number: 258207.
- [32] ŠVÁBENSKÝ, O., VITULA, A., BUREŠ, J.: Inženýrská geodézie I, elektronická studijní opora pro kombinovanou formu studia, VUT v Brně, Fakulta stavební, 2016
- [33] MICHALČÁK, O., VOŠKA, O., VESELÝ, M., NOVÁK, Z.: Inžinierska geodézia I, Vydavateľství Alfa, 1985
- [34] Předpis SŽDC S3 díl III (2014): Železniční svršek, Zajištění prostorové polohy koleje.
- [35] Předpis ČD S3 díl III (2003): Železniční svršek, Zajištění prostorové polohy koleje.
- [36] BUREŠ, J.: Dálkoměrná a GNSS základna Brno-Jih. Projektová dokumentace, VUT v Brně, 2016

Vybrané publikace autora ke kapitole 2:

- [37] BARTONĚK, D.; BUREŠ, J.; ŠVÁBENSKÝ, O., Optimized GNSS RTK measurement planning for effective point occupation via heuristic analysis, článek v ENGINEERING COMPUTATIONS, ISSN 0264-4401, Emerald Publishing Limited, United Kingdom, 2017
- [38] BARTONĚK, D.; BUREŠ, J.; PETRUCHA, J., Fast Heuristic Algorithm of Searching Hamiltonian Path in Graph. Příspěvek na konferenci Informatics, ISSN 1314-2704, ISBN 978-619-7408-01-0, STEF92, Sofia, Bulharsko, 2017
- [39] BUREŠ, J.; ŠVÁBENSKÝ, O.; HOŘEJŠ, M., K problematice kontroly přesnosti aparatur GNSS, příspěvek na konferenci Družicové metody v geodézii a katastru, ISBN 978-80-86433-64-6, 2017
- [40] BARTONĚK, D.; BUREŠ, J.; ŠVÁBENSKÝ, O., Optimization of Process Field Measurement GNSS-RTK for Railway Infrastructure, článek v Solid State Phenomena, ISSN 1012-0394, ISBN 978-3-03835-626-4, Solid State Phenomena , Switzerland, 2016
- [41] BUREŠ, J., Návrh metodiky budování primárního železničního bodového pole technologií GNSS v reálném čase., příspěvek na konferenci Geodézie ve stavebnictví a průmyslu, ISBN 978-80-02-02656-3, Český svaz geodetů a kartografů, Brno, 2016
- [42] BUREŠ, J., Návrh nové metodiky budování a údržby železničního bodového pole technologií GNSS v reálném čase, příspěvek na konferenci 51. Geodetické informační dny, ISBN 978-80-02-02645-7, Český svaz geodetů a kartografů - Spolek zeměměřičů Brno, Brno, 2016
- [43] BUREŠ, J., Využití GNSS-RTK a permanentních sítí GNSS pro železniční bodové pole, příspěvek na konferenci Družicové metody v geodézii a katastru, ISBN 978-80-86433-60-8, ECON Publishing, s.r.o., Brno, 2016
- [44] BARTONĚK, D.; BUREŠ, J., Usage of Heuristic Algorithm for Optimization of Precise GNSS RTK Measurement. Příspěvek na konferenci 15th GeoConference on Informatics, Geoinformatics and Remote Sensing, ISSN 1314-2704, ISBN 978-619-7105-35-3, STEF 92 Technology Ltd., Bulgaria, 2015
- [45] BUREŠ, J., Přesné pozicování technologií GNSS-RTK na liniových stavbách, příspěvek na konferenci XII. mezinárodní konference GEODÉZIE A KARTOGRAFIE V DOPRAVĚ, ISBN 978-80-02-02553-5, Český svaz geodetů a kartografů, Olomouc, 2014
- [46] KLUSÁČEK, L.: Diagnostika železničního mostu „Gagarin“ v km 5,872 trati Český Těšín – Ostrava Kunčice. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav betonových a zděných konstrukcí, 10/2008
- [47] KLUSÁČEK, L.: Návrh sledování mostu stavby „Rekonstrukce mostu v km 5,872 trati Český Těšín - Ostrava Kunčice“. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav betonových a zděných konstrukcí, 10/2008.

- [48] KLUSÁČEK, L.; BUREŠ, J.; NEČAS, R.: Projekt sledování železničního mostu „Gagarin“ v km 5,872 trati Český Těšín – Ostrava Kunčice – realizační dokumentace. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav betonových a zděných konstrukcí a Ústav geodézie, 6/2009.
- [49] TERŠEL, M.; KLUSÁČEK, L. : Závěry z tenzometrického měření Jezernického viaduktu. Konference ŽELEZNIČNÍ MOSTY A TUNELY, Praha, 2004
- [50] KLUSÁČEK, L.; PĚNČÍK, J.; BUREŠ, J.; VITULA, A. : Měření přetvoření kleneb železničního viaduktu. Příspěvek na konferenci Experiment 04, ISBN 80-7204-354-4, Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., Brno, 2004
- [51] KLUSÁČEK, L.; BUREŠ, J.; NEČAS, R.: Železniční most "GAGARIN" v km 5,872 trati Český Těšín – Ostrava Kunčice. Sledování mostu v průběhu rekonstrukce. Souhrnná zpráva HS12938003, VUT v Brně, Fakulta stavební, 2009.
- [52] KLUSÁČEK, L.; BUREŠ, J.; NEČAS, R.: Železniční most "GAGARIN" v km 5,872 trati Český Těšín – Ostrava Kunčice. Ověřovací zatěžovací zkouška. Závěrečná zpráva HS12938003, VUT v Brně, Fakulta stavební, 2009.
- [53] ČSN 73 6209 Zatěžovací zkoušky mostů
- [54] ČSN 73 2030 Zatěžovací zkoušky stavebních konstrukcí

Vybrané publikace autora ke kapitole 3:

- [55] BUREŠ, J.; BARTONĚK, D.; ŠVÁBENSKÝ, O.; VOJKŮVKA, M., Integrated Information System of Building Structures Monitoring. Příspěvek na konferenci Informatics, ISSN 1314-2704, ISBN 978-619-7408-01-0, STEF92, Sofia, Bulharsko, 2017
- [56] OLŠÁK, M.; KLUSÁČEK, L.; BUREŠ, J.; NEČAS, R., Rekonstrukce a dlouhodobé sledování železničního mostu "Gagarin", příspěvek na konferenci 23. BETONÁŘSKÉ DNY 2016 Sborník ke konferenci, ISBN 978-80-906097-6-1, Česká betonářská společnost ČSSI, Litomyšl, 2016
- [57] BUREŠ, J.; KLUSÁČEK, L.; NEČAS, R.; FIXEL, J., Verification of Strain Gauge and Geodetic Measurements during Long-term Monitoring of Gagarin Bridge in Working Conditions , kapitola v Applied System Innovation: Proceedings of the 2015 International Conference on Applied System Innovation (ICASI 2015), ISBN 978-1-138-02893-7, CRC Press , Osaka, Japan, 2016
- [58] BUREŠ, J.; KLUSÁČEK, L.; NEČAS, R.; ŠVÁBENSKÝ, O., Measuring Technology During Reconstruction of Prestressed Gagarin Bridge, příspěvek na konferenci INGEO 2011 Proceedings of the 5th International Conference on Engineering Surveying, ISBN 978-953-6082-15-5, University of Zagreb, Zagreb, Croatia, 2011
- [59] KLUSÁČEK, L.; BUREŠ, J.; NEČAS, R., Průběžné sledování rekonstrukce předpjatého železničního mostu z roku 1961, příspěvek na konferenci 16. mezinárodní symposium Mosty 2011, ISBN 978-80-86604-52-7, SEKURKON s.r.o., Brno, 2011
- [60] KLUSÁČEK, L.; BUREŠ, J.; NEČAS, R., Měřicí technologie při rekonstrukci předpjatého mostu Gagarin, článek v Silnice a železnice, ISSN 1801-822X, KONSTRUKCE Media, s.r.o., Ostrava, 2011
- [61] KLUSÁČEK, L.; BUREŠ, J.; NEČAS, R., Průběžné tenzometrické a geodetické sledování rekonstrukce železničního mostu "Gagarin" v km 5,872 na trati Český Těšín - Ostrava Kunčice, příspěvek na konferenci Železniční mosty a tunely, SUDOP Praha a.s., Praha, 2011
- [62] GIRGLE, F.; BUREŠ, J.; DANĚK, P.: Projekt měření deformací konstrukcí šachty lokalizace havárie. Ověřovací zkouška integrity kontejmentu ochranné obálky 1. bloku Jaderné elektrárny Dukovany. Zpracovatel VUT v Brně, Fakulta stavební, 9/2015
- [63] GIRGLE, F.; BUREŠ, J.; DANĚK, P.: Projekt měření deformací konstrukcí šachty lokalizace havárie. Ověřovací zkouška integrity kontejmentu ochranné obálky 2. bloku Jaderné elektrárny Dukovany. Zpracovatel VUT v Brně, Fakulta stavební, 1/2017

- [64] GIRGLE, F.; BUREŠ, J.; DANĚK, P., HASALA, I.: Projekt měření deformací konstrukcí šachty lokalizace havárie. Ověřovací zkouška integrity kontejmentu ochranné obálky 3. bloku Jaderné elektrárny Dukovany. Zpracovatel VUT v Brně, Fakulta stavební, 8/2017
- [65] GIRGLE, F., BUREŠ, J., DANĚK, P., HASALA, I., ŠTĚPÁNEK, P.: Projekt měření deformací konstrukcí šachty lokalizace havárie v rámci ověřovací zkoušky integrity kontejmentu ochranné obálky 4. bloku jaderné elektrárny Dukovany. VUT v Brně, 8/2017
- [66] BUREŠ, J.: Měření šachty lokalizace havárie GO 1. bloku, technická zpráva k měřením prováděným pro objekt šachty lokalizace havárie. Geodetický monitoring 14.-19.12.2015. 1/2016
- [67] BUREŠ, J.: Měření šachty lokalizace havárie GO 1. bloku, technická zpráva k měřením prováděným pro objekt šachty lokalizace havárie. Geodetický monitoring 14.-19.12.2015. DODATEK vyhodnocení vlivu dilatačních účinků stěny D z 1/2016 (6/2016)
- [68] BUREŠ, J.: Měření šachty lokalizace havárie GO 2. bloku, technická zpráva k měřením prováděným pro objekt šachty lokalizace havárie. Geodetický monitoring 23.-28.2.2017, 3/2017
- [69] BUREŠ, J.: Měření šachty lokalizace havárie GO 4. bloku, technická zpráva k měřením prováděným pro objekt šachty lokalizace havárie. Geodetický monitoring 25.8. až 1.9.2017 a monitoring vnějšího teplotního pole konstrukce, 9/2017
- [70] BUREŠ, J.: Měření šachty lokalizace havárie GO 3. bloku, technická zpráva k měřením prováděným pro objekt šachty lokalizace havárie. Geodetický monitoring 12. až 19.10.2017 a monitoring vnějšího teplotního pole konstrukce, 11/2017
- [71] ČSN ISO 17123-3 (73 0220, 2005) Optika a optické přístroje – terénní postupy pro zkoušení geodetických a měřických přístrojů. Část 3: Teodolity
- [72] ČSN ISO 17123-4 (73 0220, 2005) Optika a optické přístroje – terénní postupy pro zkoušení geodetických a měřických přístrojů. Část 4: Elektrooptické dálkoměry
- [73] ČSN 73 0405 Měření posunů stavebních objektů

8 SUMMARY

The presented habilitation thesis deals with three selected technological solutions in engineering geodesy realized in practice by the author. The first part of the thesis deals with the formulation of methodology of measurement of points of the primary network of railway point field (ŽBP) with real-time GNSS technology, with metrological linking to geodetic reference systems of the Czech Republic, elaboration of which was triggered by the requirement of Railway Infrastructure Administration, s. o. (SŽDC). The text of the habilitation thesis describes the complete methodology and the most important results of its pilot verification in railway conditions. The basic principle of the solution was a technologically sophisticated, relatively simple measurement procedure, ensuring the possibility of accurately determining the coordinates with a limit deviation of up to ± 10 mm at the point of need primarily in connection to the existing functional high-precision and scientifically maintained network of permanent GNSS stations CZEPOS, eventually other network (Trimble VRS NOW, TOPNET, etc.), but included in the national unified permanent station monitoring system.

The second part of the thesis deals with stage monitoring during the reconstruction of reinforced concrete bridge Gagarin built in 1961, which was in 2009 strengthened by the unique technology of steel wire pre-tensioning, and this reconstruction technology was also considered to reinforce many other railway bridge structures of a similar type in Czech Republic. After the reconstruction of the bridge, the long-term monitoring of the supporting construction and the bridge was carried out under operating conditions, which has been going on since 2009 to this day. For this purpose, the strain gauge and geodetic measuring system was established on the bridge construction at the time of the reconstruction. In the habilitation thesis is described the technology of monitoring, especially its geodetic part, and selected results of monitoring, including elaboration of technology for determination of mutual correlation of tensometric and geodetic data with the aim of their mutual recalculation and integrated use for elimination of external influences in evaluation of long-term monitoring.

The third part of the thesis deals with the geodetic monitoring carried out during the verification of the containment integrity (OZIK) of all four blocks of the Dukovany Nuclear Power Plant. It was a pressure test of the reactor envelope which was associated with large scheduled shutdowns of nuclear blocks after 10 years of operation. The pressure test was also one of the partial assessments in connection with the extension of the service life of the Dukovany Nuclear Power Plant. The complete OZIK test was a process consisting of geodetic and non-geodetic monitoring and the sequence of technical controls of the pressure-tested building of the accident localization shaft (ŠLH) during a 65-hour pressure test. The subject of geodetic and non-geodetic monitoring was the continuous measurement of deformations (wall deflections) in places and lines of the object selected by static engineer. The size of the pressure introduced into the hermetically sealed ŠLH simulated about three times the pressure that would have occurred in a nuclear reactor accident. The geodetic part of the monitoring was technologically provided by a total of 5 robotic total stations. The values of the expected deformation of the ŠLH walls in the critical locations varied to only about 3.5 mm. The subject of interest was to measure 48 hours before the pressure test in order to determine the influence of external conditions on the monitored construction, and 48 hours after the end of the pressure test in order to prove the restoration of the structure to the initial state.