



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta stavební
Speciální geodézie**

Určení charakteristik přesnosti senzoru SAA

Estimating the accuracy characteristics of the SAA sensor

DISERTAČNÍ PRÁCE

Jan Balek

Doktorský studijní program: G

Studijní obor: Geodézie a kartografie

Školitel: prof. Ing. Martin Štroner, Ph.D.

Praha, 2019



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Thákurova 7, 166 29 Praha 6

PROHLÁŠENÍ

Jméno doktoranda: Ing. Jan Balek

Název disertační práce: Určení charakteristik přesnosti senzoru SAA

Prohlašuji, že jsem uvedenou disertační práci vypracoval/a samostatně pod vedením školitele prof. Ing. Martin Štroner, Ph.D.

Použitou literaturu a další materiály uvádím v seznamu použité literatury.

Disertační práce vznikla v souvislosti s řešením projektu:

SGS13/059/OHK1/1T/11

SGS14/049/OHK1/1T/11

SGS15/053/OHK1/1T/11

SGS16/060/OHK1/1T/11

SGS17/067/OHK1/1T/11

SGS18/055/OHK1/1T/11

SGS19/047/OHK1/1T/11

V Praze dne 29. 10. 2019

.....
podpis

Poděkování

Děkuji svému vedoucím Martinu Štronerovi za trpělivé vedení disertační práce a cenné odborné rady. Dále děkuji Rudolfu Urbanovi za pomoc při realizaci některých experimentů. V neposlední řadě děkuji Janu Klimešovi za rady a pomoc v otázkách týkajících se geologické problematiky.

Abstrakt

Tento text se věnuje problematice určení charakteristik přesnosti senzoru SAA (ShapeAccellArray). Zařízení, které je v současné době svou konstrukcí jedinečné, ale zároveň zařízení jehož charakteristiky přesnosti měření nebyly dosud spolehlivě ověřeny testováním a přesně definovány.

První část textu se věnuje testování senzoru v laboratorních podmínkách. V úvodu jsou popsány cíle práce, je popsán jednak princip fungování senzoru SAA a je prezentována stručná rešerše prací věnujících se SAA s důrazem na publikace přinášející jakékoli informace o vlastnostech senzoru co se týká měření a především jeho přesnosti. Dále jsou popsány parametry dosud provedených experimentů, výsledky a jejich hodnocení. Testování bylo provedeno ve všech třech základních variantách instalace senzoru, tj. vodorovné, svislé a kombinované. Na základě experimentů byly určeny střední chyby měřené deformace ve vztahu k určitým faktorům, jako je způsob instalace senzoru, počet měření, velikost deformací atd.

Druhá část textu se zabývá testováním senzoru v podmínkách jeho typického použití, tedy jako alternativy ke klasickým inklinometrickým měřením. Senzor SAA byl instalován na lokalitě, kde dochází k pomalým svahovým posunům, jejichž charakter je dobře známý z výsledků dlouhodobých sledování a je popsán několika v dostupných publikacích. Měřené posuny jsou hodnoceny jak ve vztahu k terestrickým měřením, tak ve vztahu k vnějším podmínkám na lokalitě. Výsledkem práce jsou tak nejen charakteristiky přesnosti senzoru za určitých podmínek, ale také nové poznatky o příčinách a vývoji deformací v nestabilních sedimentárních horninách Českého středohoří.

Klíčová slova

SAA, monitoring, přesnost, směrodatná odchylka, testování, experiment, senzor, sesuv.

Abstrakt

This text deals with the issue of determining the accuracy characteristics of a SAA (ShapeAccellArray) sensor. A device that is currently unique in its design, but as well as a device whose measurement accuracy characteristics have not yet been reliably tested and accurately defined.

The first part of the text is devoted to testing the sensor in laboratory conditions. The introduction describes the objectives of the work, the principle of functioning of the SAA sensor and presents a brief review of the work on SAA with emphasis on publications bringing any information about the characteristics of the sensor in terms of measurement and especially its accuracy. Parameters of experiments performed so far, results and their evaluation are described. Testing was carried out in all three basic variants of sensor installation, ie horizontal, vertical and combined. Based on the experiments, the standard deviations of the measured deformation were determined in relation to certain factors, such as the method of sensor installation, number of measurements, magnitude of deformation, etc.

The second part of the text deals with testing the sensor in conditions of its typical use, ie. as an alternative to classical inclinometric measurements. The SAA sensor has been installed at a site where slow landslide occurs, the nature of which is well known from the results of long-term observations and is described by several in the available publications. The measured shifts are evaluated both in relation to terrestrial measurements and in relation to external conditions in the locality. The results of this work are not only characteristics of sensor accuracy under certain conditions, but also new knowledge about causes and development of deformations in unstable sedimentary rocks of České středohoří Mts.

Keywords

SAA, monitoring, accuracy, standard deviation, testing, experiment, sensor, landslide

Obsah

Úvod.....	6
1. Cíle disertační práce	7
I. SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	8
2. Přesná inklinometrie.....	8
2.1. Současný stav inklinometrických měření.....	8
2.2. Princip měření náklonu	9
2.2.1 MEMS akcelerometry.....	11
2.3. Automatizace inklinometrických měření	12
2.3.1 Modulární systémy složené z jednotlivých sond.....	12
2.3.2 Kompaktní inklinometrické řetězce.....	14
3. Senzor SAA a jeho vlastnosti	20
3.1. Konstrukce senzoru SAA	21
3.2. Využití a způsoby instalace senzoru SAA	24
3.2.1 Vertikální instalace senzoru SAA.....	25
3.2.2 Horizontální instalace senzoru	26
3.2.3 Kombinovaná instalace senzoru	26
3.3. Dosavadní testování přesnosti a využitelnosti senzoru SAA	27
II. ŘEŠENÉ PROBLÉMY	43
4. Testování senzoru v laboratorních podmínkách	43
4.1. Horizontální test senzoru bez PVC opláštění	44
4.1.1 Vyhodnocení dat ze zdviháných úseků.....	46
4.1.2 Vyhodnocení dat z fixovaného koncového kloubu řetězce.....	47
4.2. Horizontální test s PVC opláštěním.....	48
4.2.1 Vyhodnocení dat ze zdviháných úseků.....	49
4.2.2 Vyhodnocení dat z fixovaného koncového kloubu řetězce.....	50
4.3. Vertikální test senzoru bez PVC opláštění	52
4.3.1 Vyvolání libovolné deformace.....	52
4.3.2 Vyvolání deformace známé velikosti	52
4.4. Vertikální test s PVC opláštěním	55
4.4.1 Vyvolání libovolné deformace.....	55
4.4.2 Vyvolání deformace známé velikosti	56
4.5. Experiment s kruhovou montáží.....	57
4.6. Shrnutí výsledků testování	62
4.6.1 Vliv orientace senzoru.....	62
4.6.2 Vliv instalace senzoru	62
4.6.3 Vliv PVC opláštění.....	62
4.6.4 Vliv navýšení počtu měření.....	63
4.6.5 Vývoj směrodatné odchylky z opakování.....	63

4.6.6	Vliv velikosti deformací, vliv namáhání	63
4.6.7	Porovnání výsledků s pracemi jiných autorů.....	63
5.	Senzor SAA jako součást dlouhodobého monitoringu sesuvu u Třebenic	65
5.1.	Popis lokality jako celku.....	65
5.1.1	Geologie	66
5.1.2	Klimatické podmínky	66
5.1.3	Sledovaná reaktivace.....	67
5.2.	Současná aktivita sesuvu z terestrických měření.....	68
5.2.1	Měření v lokální trigonometrické síti	68
5.2.2	Určení posunů v globálním souřadnicovém systému	71
5.2.3	Hodnocení výsledků terestrických měření.....	78
5.3.	Vrtné práce a instalace senzoru SAA.....	78
5.4.	Realizace automatického odečítání senzoru	79
5.5.	Monitoring přírodních podmínek	80
5.6.	Zpracování dat	81
5.7.	Současná aktivita sesuvu z měření senzoru SAA.....	81
5.8.	Shrnutí nejdůležitějších výsledků prací na lokalitě.....	85
6.	Diskuze.....	87
6.1.	Laboratorní testování senzoru.....	88
6.2.	Doposud publikované výsledky	89
6.3.	Monitoring svahových pohybů	90
Závěr.....		93
Použitá literatura.....		95

Seznam obrázků

Obr. 2.1	Princip inklinometrických měření.....	9
Obr. 2.2	Metody měření náklonu	10
Obr. 2.3	"In Place" inklinometrické systémy	14
Obr. 2.4	IPI systém GeoFlex	16
Obr. 2.5	Instalace senzoru DSM.....	17
Obr. 2.6	Směrodatné odchylky měření náklonu na segmentech senzoru DMS	19
Obr. 3.1	Prototyp senzoru SAA (WSAA) na transportní roli.....	21
Obr. 3.2	Konstrukce a použití senzoru SAA	22
Obr. 3.3	Použití senzoru SAA na sesuvu Šance-Řečica	25
Obr. 3.4	Horizontální instalace senzoru SAA do kanalizační stoky	26
Obr. 3.5	Kombinovaná instalace senzoru SAA	27
Obr. 3.6	Časové řady vysokofrekvenčních měření senzorem SAA a snímači LVDT	29
Obr. 3.7	Kumulovaná horizontální deformace senzoru nad smykovou plochou.....	30
Obr. 3.8	Horizontální posun měřený senzorem SAA, přizpůsobená AE a srážky....	31
Obr. 3.9	Instalace senzoru SAA do širokého pažení.....	34
Obr. 3.10	Grafické srovnání SAA a inklinometrické sondy.....	35
Obr. 3.11	Rozdíly mezi velikostí sedání měřeném senzorem SAA a transversální inklinometrickou sondou	37
Obr. 3.12	Experiment provedený na prototypu senzoru SAA	38
Obr. 3.13	Experiment s bočním zatížením mostní piloty	39
Obr. 3.14	Umístění jednotlivých zařízení během experimentu s SAA, RTS a GPS.	40
Obr. 4.1	Schéma provedení experimentu v horizontální poloze senzoru	45
Obr. 4.2	Článek inklinometrického řetězce uložený v kolejnici, zdvihané trojicí šroubů.....	45
Obr. 4.3	Závislost směrodatné odchylky σ_0 na velikosti deformace.....	50
Obr. 4.4	Mikroposuv pro vyvolání horizontálních posunů.....	53
Obr. 4.5	Nominální (modrá) a určené (zelená) posuny v horizontální rovině	54
Obr. 4.6	Nominální (modrá) a určené (zelená) polohy koncového kloubu řetězce ..	57
Obr. 4.7	Stabilní uchycení segmentu pomocí instalátérských objímek	57
Obr. 4.8	Instalace přístroje v kombinované (kruhové) poloze.....	58
Obr. 4.9	Volné a fixované části senzoru při kruhové montáži.....	58
Obr. 4.10	Graf směrodatných odchylek z opakování	59
Obr. 4.11	Graf směrodatných odchylek z opakování	60
Obr. 5.1	Klimatická data popisující podmínky na lokalitě v období měření senzorem SAA	67
Obr. 5.2	Projevy svahových deformací na lokalitě u Třebenic.....	68
Obr. 5.3	Umístění opěrných (modrá) a kontrolních (červená) bodů trigonometrických sítí	69
Obr. 5.4	Relativní posuny kontrolních bodů určené vzhledem k železniční trati	71
Obr. 5.5	Stabilizace bodů extenzometrického profilu	73

Obr. 5.6 Umístění kontrolních a referenčních bodů pro určení absolutních hodnot posunů	74
Obr. 5.7 Trimble S6 Robotic	75
Obr. 5.8 Leica GMP111 mini hranol	75
Obr. 5.9 hranol Trimble	75
Obr. 5.10 GNSS sestava Ashtech	75
Obr. 5.11 Horizontální (červená) a vertikální (modrá) posuny kontrolních bodů	76
Obr. 5.12 Horizontální (červená) a vertikální (modrá) posuny kontrolních bodů	77
Obr. 5.13 Senzor instalovaný na lokalitě v Třebenicích	79
Obr. 5.14 Hladina podzemní vody, srážky a efektivní srážky	81
Obr. 5.15 Detail pohybu koncového bodu senzoru v ose y	82
Obr. 5.16 Deformace senzoru v čase a vertikální horninový profil	82
Obr. 5.17 Polární grafy zobrazují horizontální pohyb kloubů senzoru	83
Obr. 5.18 Komponenty pohybu	84
Obr. 5.19 Celkový horizontální posun detekovaný senzorem SAA	85

Seznam tabulek

Tab. 3.1 Technická specifikace senzoru SAA uváděná výrobcem	24
Tab. 3.2 Směrodatná odchylka posunů SAA vzhledem k měření RTS	41
Tab. 4.1 Přesnost určení vertikální souřadnice kloubu v závislosti na velikosti deformace	47
Tab. 4.2 Směrodatná odchylka vertikální souřadnice koncového kloubu senzoru	48
Tab. 4.3 Závislost směrodatné odchylky na velikosti deformace	49
Tab. 4.4 Směrodatná odchylka vertikální souřadnice koncového kloubu senzoru	51
Tab. 4.5 Směrodatné odchylky ve směru osy x a z	60
Tab. 4.6 Směrodatné odchylky velikosti posunu	61
Tab. 4.7 Směrodatné odchylky ve směru osy x a z	61
Tab. 4.8 Směrodatné odchylky velikosti posunu	61
Tab. 5.1 Celkové posuny od prosince 2013 do prosince 2016 a průměrné roční rychlosti	70

Seznam použitých zkratk

AE	Acoustic Emission
DGSI	Durham Geo-enterprises Slope Indicator
EPN	European Permanent Network
EUREF	Regional Reference Frame Sub-Commission for Europe
GEONAS	GEodynamic Network of the Academy of Sciences of the CR
GPS	Global Navigation System
GNSS	Global Navigation Satellite System
HPV	Hladina podzemní vody
IPI	In Place Inclinator
LVDT	Linear Variable Differential Transformer
MEMS	MicroElectroMechanical Systems
MNČ	Metoda nejmenších čtverců
QIF	Quasi Ionosphere Free
RTS	Robotic Total Station
SAA	ShapeAccelArray
SAAF	ShapeAccelArray Field version
SAAR	ShapeAccelArray Research version
SAR	Synthetic aperture radar

Úvod

Trendem dnešní doby je automatizace ve všech oborech lidské činnosti. Jinak tomu není ani v geodézii a geotechnice. Automatický sběr geoprostorových dat a jejich přenos uživateli v reálném čase se často stává základním požadavkem. Platí to zejména v případě potřeby dlouhodobého monitoringu - tradiční metody závislé na práci kvalifikované obsluhy jsou nejen neúnosně drahé, ale také prakticky neumožňují kontinuální sledování s vyšší frekvencí.

V současnosti je možné značnou část geotechnických měření provádět automaticky s pomocí jednoduchých čidel. V některých případech je to naopak značně obtížné. Takovým případem jsou inklinometrická měření ve k tomu vystrojených vrtech. Ta jsou již 50 let základní geotechnickou metodou k určování prostorových změn sledovaných objektů. Obsluha spouští inklinometrické čidlo do vystrojeného vrtu a postupně proměřuje jednotlivé úseky, na pokyn operátora je provedeno elektronické odečtení přístroje. Dosavadní snahy o automatizaci spočívaly v trvalém umístění několika čidel v jednom vrtu v několika vybraných úsecích. Nejednalo se však o komplexní řešení, protože takto bylo možné vystihnout pouze deformace velmi omezeného úseku. Senzor SAA je komplexním řešením, neboť umožňuje sledování profilu v celé jeho délce a v reálném čase přinášet informace o deformacích profilu o délce až několika desítek metrů.

Výrobce senzoru SAA udává relativně vysokou přesnost senzoru, ta není dosud v žádné dostupné publikaci plně doložena vhodnými experimenty. Tato práce se zabývá určením charakteristik přístroje pomocí série laboratorních experimentů a dále pak jeho použitím pro sledování pomalých svahových pohybů v reálných podmínkách. Účelem prováděných laboratorních testů bylo stanovit přesnost jednak samotného senzoru bez vlivu přídatného opláštění, jednak přesnost senzoru instalovaného v krytí z plastových trubek, které se standardně používá při instalaci v polních podmínkách.

1. Cíle disertační práce

Práce se zabývá určením charakteristik přesnosti senzoru SAA, problémy jeho instalace a použití v podmínkách svahových deformací, vyhodnocením detekovaných svahových pohybů ve vztahu k výsledkům dosavadního monitoringu a měnícím se vnějším faktorům. Stručně byly její cíle definovány takto:

- Určení vlivu způsobu instalace senzoru na přesnost výstupů
- Určení vlivu velikosti deformací senzoru na přesnost výstupů
- Určení vlivu instalace senzoru v PVC opláštění na přesnost výstupů
- Určení vlivu mechanického namáhání kloubů na přesnost výstupů
- Určení vlivu počtu měření na přesnost výstupů
- Instalace senzoru na vybrané lokalitě a realizace pravidelných odečtů
- Detekce aktivních smykových ploch sesuvu, zhodnocení stability svahu
- Srovnání výsledků inklinometrických měření a výsledků jádrového vrtání
- Srovnání výsledků inklinometrických měření s výsledky terestrických měření
- Konfrontace detekovaných svahových pohybů s měřeními se podmínkami prostředí

I. SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

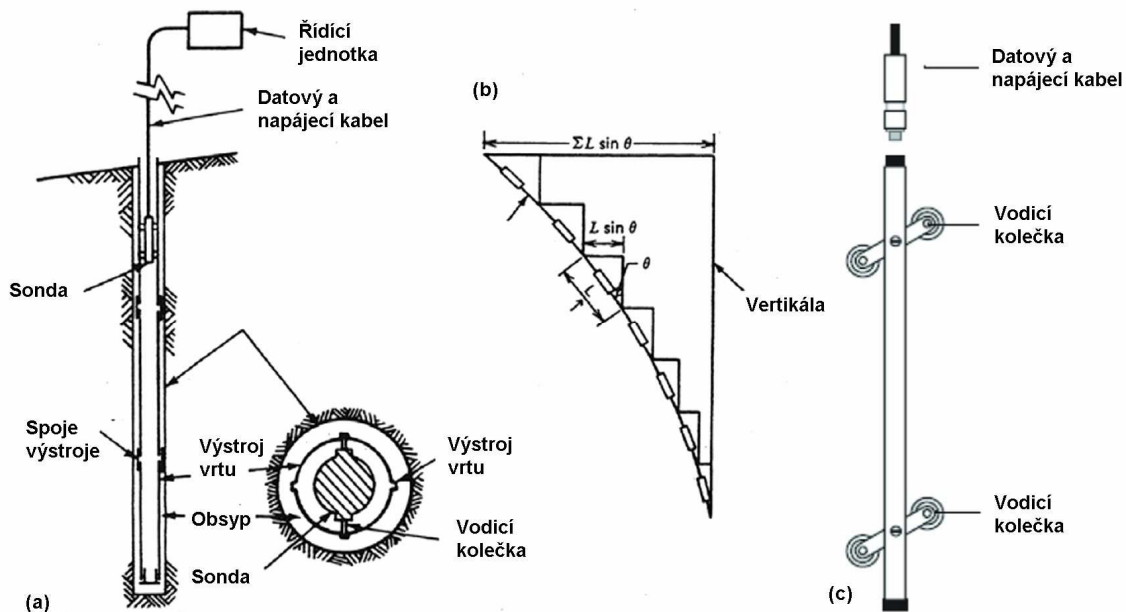
2. Přesná inklinometrie

Inklinometrie (celým názvem "přesná inklinometrie") je základní metodou geotechnického monitoringu posunů a přetvoření horninového prostředí nebo stavebních konstrukcí. Inklinometrie umožňuje, na rozdíl od metod geodetického monitoringu, získat informace o deformacích přímo uvnitř horninového prostředí nebo stavební konstrukce a zachytit takové jevy jako jsou například sesuvné pohyby, sedání zemin, vertikální i horizontální průhyby konstrukcí atp.

2.1. Současný stav inklinometrických měření

Princip inklinometrických měření je založen na sledování deformací vystrojení vrtu relativně ke stabilním vrstvám podloží. Na rozdíl od geodetických měření, kde se referenční body nacházejí mimo oblast sledovaného území, je v tomto případě referenčním bodem pata vrtu stabilizovaná ve vrstvách neovlivněných deformacemi nadloží. Ta se v případě lokalit postižených sesuvy půdy nachází pod nejhlubší smykovou plochou. Vrt je osazen (vystrojen) zpravidla plastovou trubkou se dvěma páry drážek umožňujících pohyb inklinometrické sondy ve dvou na sebe kolmých svislých rovinách. Standardní průměr plastové výstroje je 70 mm nebo 85 mm. Inklinometrická měření jsou prováděna postupným proměřováním sklonu výstroje po úsecích, jejichž délka je dána délkou sondy (obr. 2.1). Odečítací zařízení (sonda) je vybaveno jednoosým nebo dvouosým náklonoměrným čidlem. Některé sondy bývají zároveň vybaveny deformmetrem umožňujícím určovat délkové změny jednotlivých úseků pažnice. Například sondy TRIVEC kombinují funkci inklinometru a deformmetru, pro určení deformací pažnice ve všech směrech pak postačí jediný senzor. Z hlediska použití inklinometrické sondy rozlišujeme dva různé systémy: pojezdový inklinometrický systém a systém, kdy je inklinometrická sonda pevně upevněna v určitém úseku pažnice (IPI – In Place Inclinator). Pojezdový systém je nejběžnějším způsobem provádění inklinometrických měření a umožňuje podávat informace o celém úseku pažnice. IPI systém představuje nejjednodušší způsob automatizace inklinometrických měření. Nevýhodou takového způsobu měření je, že počet sledovaných úseků je limitovaný počtem datových kabelů, které se spolu s inklinometrickou sondou mohou vejít do průřezu pažnice, maximálně na několik kusů a není proto možné provádět kontinuální monitoring celé pažnice. Potřeba kontinuálního monitoringu v celém úseku profilu vedla k

vývoji IPI systémů do podoby inklinometrických řetězců, které jsou jako celek ovládány jedním datovým a napájecím kabelem. Délka těchto systémů je pak v praxi limitována jen váhou celého ústrojí a požadavkem na napájení celého řetězce. Přesná inklinometrie tak může být v současné době prováděna jednak inklinometrickými sondami a jednak inklinometrickými řetězci. V těchto zařízeních se využívá několika různých způsobů měření náklonu.



Obr. 2.1 Princip inklinometrických měření: (a) Vrt vystrojený pro inklinometrická měření; (b) Výpočet souřadnic v rovině měření inklinometrického senzoru; (c) Schéma inklinometrické sondy (Machan a Bennett 2008)

2.2. Princip měření náklonu

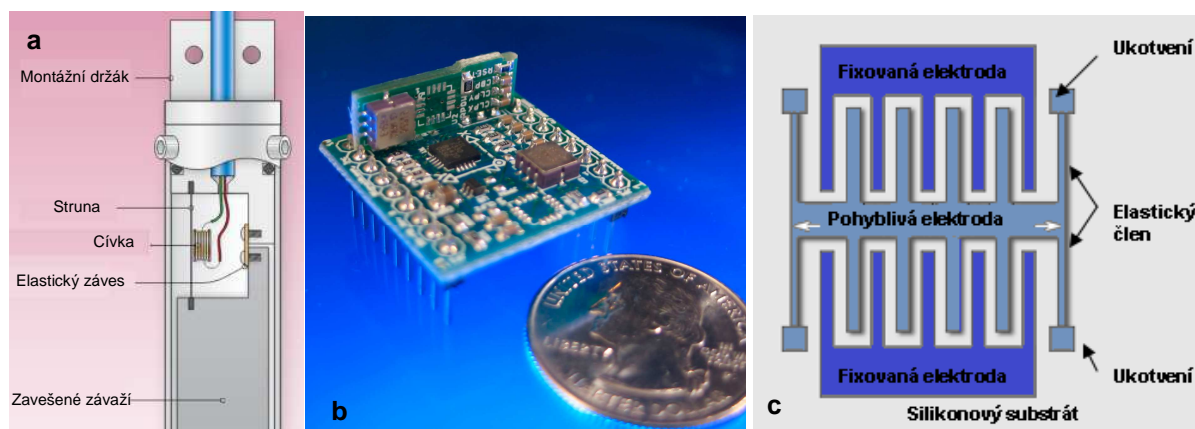
V zásadě se v současné době používá k měření deformací jednak inklinometrických sond, které mohou být instalovány trvale v jednom vrtu nebo mohou být v rámci manuálního monitoringu použity ke sledování většího počtu vrtů, jednak inklinometrických řetězců, které jsou po dobu monitoringu na lokalitě instalovány trvale a umožňují kontinuální automatický monitoring celého profilu.

Obecně se u sond a řetězců používá různých metod měření náklonu. Sondy jsou nejčastěji vybaveny buď servo-akcelerometry nebo MEMS (MicroElectroMechanical Systems) akcelerometry. Použití servo-akcelerometrů je tradiční a nejstarší metodou využívanou pro realizaci inklinometrických měření, historie jejich využití sahá až do roku 1969 (Mikkelsen 2003). Maximální přesnost (preciznost) inklinometrických sond používajících servo-akcelerometry 1,2 mm/30m definoval Mikkelsen na základě analýzy

rozsáhlého souboru inklinometrických měření (Mikkelsen 2003). Rozsah měření inklinometrických sond je zpravidla omezený a nejčastěji se pohybuje v rozmezí $\pm 10^\circ$ až $\pm 30^\circ$ od svislice. Poměrně nedlouho je u transversálních inklinometrických sond je měření náklonu realizováno s využitím MEMS akcelerometrů.

IPI systémy jsou dnes realizovány dvojitým způsobem, buď jako modulární systém, kdy je řetězec složen z dílů, které vychází z konstrukce inklinometrické sondy, nebo jako komplexní nedělitelné řetězce vyrobené přímo v požadované délce. U IPI systémů se v současnosti k měření náklonu používá nejčastěji MEMS akcelerometrických čidel řetězce firmy GECON pracují také na principu měření frekvence vibrací struny.

Princip měření náklonu pomocí měření frekvence vibrující struny („vibrating wire“) je následující. Při náklonu sondy udržuje zavěšené závaží konstantní orientaci vzhledem ke směru tíhového zrychlení (obr. 2.2). Vlivem náklonu zařízení tak dochází k protahování nebo ke zkracování struny, přičemž frekvence kmitání struny je úměrná jejímu protažení. Z uvedeného principu měřidla je zřejmé, že rozsah měření takovouto sondou bude omezený, standardně nebývá rozsah větší než $\pm 30^\circ$. Pro měření vertikálního profilu je pak nutné použít jinou sondu než pro měření horizontálního profilu. Měření náklonu tradičními metodami jako jsou servo-akcelerometry nebo měření vibrací struny je dnes čím dál častěji nahrazováno použitím MEMS akcelerometrů. MEMS akcelerometry přináší řadu výhod a jejich přesnost je dnes prakticky srovnatelná výše zmíněnými metodami.



Obr. 2.2 Metody měření náklonu: (a) Schéma principu určování náklonu pomocí vibrací struny (Geocon 2019); (b) Trojosý MEMS akcelerometr (SignalQuest 2019); (c) Schéma kapacitního MEMS akcelerometru

2.2.1 MEMS akcelerometry

MEMS (MicroElectroMechanical Systems) je zkratkou pro technologii i produkty touto technologií vyráběné, jejichž velikost se pohybuje v řádech mikrometrů. MEMS (česky mikroelektromechanické systémy) jsou elementy na bázi křemíku, které se vyrábějí podobně jako integrované obvody a mohou být jejich součástí. Jedná se kompaktní výrobek, kdy elektrická i mechanická část senzoru je umístěna ve společném zapouzdření. Dnes již prakticky každý elektromechanický senzor má svoji MEMS obdobu – gyroskopy, akcelerometry, spínače nebo dokonce i mikročerpadla a mikroventily. Obecně mohou MEMS senzory pracovat na různém principu, a to podle způsobu převodu mechanické změny na elektrický signál (piezorezistivní, tepelný, kapacitní). Mezi hlavní výhody MEMS akcelerometrů a MEMS čidel obecně patří možnost miniaturizace zařízení, malá spotřeba elektrické energie, vysoká mechanická odolnost a nízké náklady při výrobě ve velkých sériích. Nevýhodou MEMS systémů je například nemožnost jakékoli opravy takovýchto prvků a drahá výroba při malém množství kusů.

***Akcelerometr** neboli snímač zrychlení je elektronické zařízení, které může měřit zrychlení a přeměnit zrychlení na elektrické signály. Zrychlení může mít obecně formu statickou (například tíhové zrychlení) nebo dynamickou vyvolanou pohybem nebo vibracemi (Andrejašič 2008).*

MEMS akcelerometry jsou dnes standardně součástí velkého množství běžně používaných výrobků jako jsou mobilní telefony, automobily, ale i domácí spotřebiče, jako například pračka. Rozrůstá se počet firem, které se zabývají výrobou MEMS akcelerometrů a MEMS čidel obecně (Bosh, Honeywell, Freescale, atd.).

Princip kapacitního MEMS akcelerometru je relativně jednoduchý, skládá se vždy z jedné fixované a jedné pohyblivé elektrody, které dohromady tvoří kondenzátor. Vychýlením pohyblivé elektrody se změní kapacita kondenzátoru. Změna kapacity je tak úměrná zrychlení, které je nutné k vyvolání vychýlení pohyblivé elektrody. V praxi se pak používá celé soustavy pevných a pohyblivých elektrod (obr. 2.2c). V případě dvouosého MEMS akcelerometru tvoří jeho mechanickou část dvě takové struktury vzájemně natočené o 90°. Trojosý MEMS akcelerometr je výrobně složitější, neboť vyžaduje přidání výškově pohyblivé struktury v rovině kolmé na rovinu plošného spoje (obr. 2.2b).

2.3. Automatizace inklinometrických měření

V porovnání s výše popsaným principem měření představuje koncepce senzoru SAA a "in-place" inklinometrických senzorů obecně výrazný krok kupředu. Počátky automatizace inklinometrických měření spočívaly v permanentním umístění několika inklinometrických sond do společné výstroje. Počet sledovaných úseků tak byl omezen počtem datových a napájecích kabelů, které se mohly vejít do průměru výstroje společně s inklinometrickou sondou. Při použití pažnice standardního průměru se jednalo o jednotky kusů. Dále bylo nutné mít jasnou představu o tom, v jakém úseku pažnice dochází k největším deformacím, případně v jaké hloubce se nachází smyková plocha a do těchto míst pak byly sondy umístěny. Snaha o automatizaci v současnosti dospěla do fáze dvou rozdílných statických tzv. „in place“ inklinometrických systémů, a to jednak modulárních systémů složených z jednotlivých inklinometrických sond, které jsou vzájemně propojené a celá soustava je ovládána společným datovým a napájecím kabelem, jednak komplexních inklinometrických senzorů, již z výroby konstruovaných na konkrétní délku vrtu, které tvoří řetězec neoddělitelně spojených segmentů.

Obecně se jedná o řetězce inklinometrických čidel, jejichž délka je volena tak, aby pokryla celý rozsah sledovaného profilu. Tyto systémy nejčastěji pracují na principu měření náklonu pomocí MEMS akcelerometrů nebo na principu měření vibrací struny. U stacionárních systémů se z důvodu vysoké spotřeby elektrické energie nepoužívají servo-akcelerometry. Spotřeba elektrické energie je u těchto systémů kritickým faktorem, neboť základním požadavkem je kontinuální měření s vyšší frekvencí odečtů než v případě manuálních inklinometrických měření a navíc jsou požadavky na energii násobené počtem senzorů v řetězci.

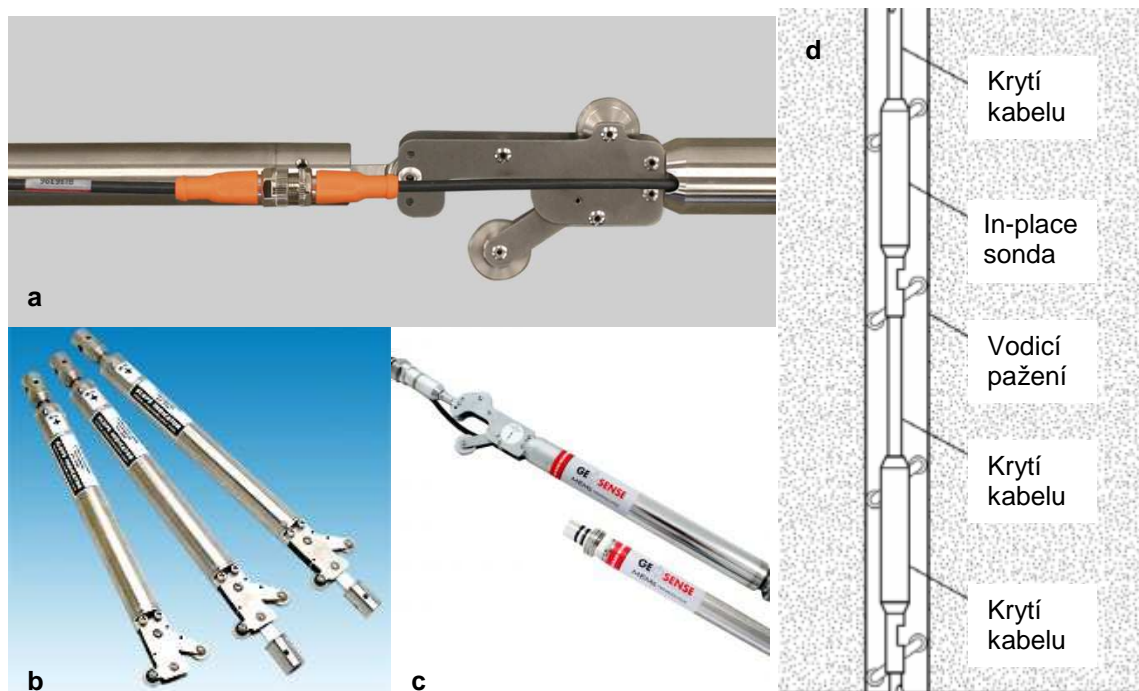
2.3.1 Modulární systémy složené z jednotlivých sond

Jedná se o systémy, které konstrukčně vycházejí z podoby inklinometrické sondy (obr. 2.1.; obr. 2.3a,b,c,d) To umožňuje jednoduchou instalaci těchto zařízení do stávajících vrtů osazených standardními pažnicemi průměru 70 mm a 85 mm a umožňují tak kontinuální pokračování již započatého monitoringu. Celý řetězec je složen až na lokalitě, přičemž lze kombinovat segmenty různé délky. Použití jednotného napájecího kabelu a datového propojení sond umožnilo instalaci vysokého počtu senzorů do jedné výstroje a jejich počet tak již není limitován průřezem pažnice.

Na takovém principu pracuje například inklinometrický řetězec firmy Geocon. Jedná se o modulární systém tvořený nerezovými segmenty osazenými MEMS akcelerometry nebo inklinometrickými čidly pracujícími na principu frekvence kmitání struny. Řetězec je

instalován do vrtu vystrojeného inklinometrickou výstrojí standardních rozměrů 70 mm nebo 85 mm. Varianta systému pro vertikální měření využívá technologii kmitající struny, přičemž senzory mají rozsah $\pm 10^\circ$. Rozlišení a deklarovaná přesnost senzoru přibližně odpovídají hodnotám testovaného zařízení SAA. Maximální možná délka řetězce je v současnosti 32 segmentů, což při délce segmentu 0,362 m znamená přibližně 11,6 m. Horizontální varianta IPI systému používá k měření náklonů čidel MEMS. Přesnost senzorů byla podle výrobce určena testováním v laboratorních podmínkách. Výrobce uvádí přesnost 0,05 mm/m při rozlišení 0,02 mm/m jak u vertikální, tak u horizontální varianty systému. Rozsah měření horizontální varianty senzoru je $\pm 15^\circ$ a délka segmentu 0,305 m – stejně jako u SAA. Pro ovládání senzoru, registraci dat a jejich odesílání používají systémy firmy Geocon řídicí jednotku vlastní výroby (Geocon 2018). Mechanická část konstrukce systému je velmi podobná ostatním IPI systémům uvedeným v této kapitole (obr. 2.3).

Na podobném principu pracují In-Place inklinometry DGSI (Durham Geo Slope Indicator), jejichž výrobcem je společnost Durham Geo-Enterprises založená v roce 1957 ve Spojených státech amerických. Vyráběna je jednoosá nebo dvouosá varianta inklinometrického systému. Řetězec je složen ze segmentů délky 1 m, 2 m nebo 3 m, které jsou instalovány do standardního inklinometrického pažení o průměru 70 mm nebo 85 mm. Každý modul je vybaven teplotním čidlem a MEMS senzorem kalibrovým v rozsahu $\pm 10^\circ$. V tomto rozsahu výrobce uvádí rozlišení 0,04 mm/m a přesnost charakterizuje hodnotou opakovatelnosti $\pm 0,1$ mm/m. Počet segmentů řetězce je omezen délkou datového a napájecího kabelu. Při délce kabelu do 40 m může být složen až z 50 segmentů. Pro záznam měřených hodnot a jako řídicí jednotka je použit univerzální datalogger Cambell Scientific CR1000.



Obr. 2.3 "In Place" inklinometrické systémy: (a) detail napojení jednotlivých segmentů (RST Instruments); (b) Segmenty in-place systému DGSi (DGSi); (c) Segmenty in-place systému RST (RST Instruments); (d) základní součásti podzemní části modulárního IPI systému

MEMS akcelerometry jsou rovněž základem „in-place“ inklinometrického systému vyvinutého kanadskou společností RST Instruments Ltd. , založené v roce 1977 a zabývající se vývojem a výrobou geotechnických monitorovacích systémů. Koncepce produktu je velmi podobná předchozím dvěma řešením. Segmenty senzoru jsou vyráběny v délkách 0,5 m, 1 m, 1,5 m, 2 m, 2,5 m nebo 3 m a jsou osazeny jedním nebo dvěma MEMS senzory (jednoosá nebo dvouosá varianta systému) standardně kalibrovanými v rozsahu $\pm 15^\circ$. Výrobce uvádí rozlišení senzoru $\pm 0,01$ mm/m a opakovatelnost měření $\pm 0,03$ mm/m, dále však bohužel nezmiňuje, při jaké délce segmentu jsou uvedené hodnoty platné. Z principu konstrukce systému je evidentní, že přesnost měření senzoru na určitou vzdálenost je závislá na počtu použitých segmentů resp. na jejich délce. Podobně jako u předchozích řešení je řetězec instalován do standardní výstroje o průměru 70 mm nebo 85 mm. Výrobce se nezmiňuje o tom, zda a jakým způsobem je senzorem měřena teplota jednotlivých segmentů senzoru.

2.3.2 Kompaktní inklinometrické řetězce

V principu se jedná o řetězce tvořené pevnými segmenty a oddělené flexibilními spoji, umožňujícími senzoru reagovat na deformace okolí. Zásadním rozdílem od

modulárních systémů uvedených v předchozí kapitole je skutečnost, že jsou tyto řetězce již vyráběny na přesnou délku profilu a jednotlivé segmenty jsou v terénu neoddělitelné. Tato systémy tvoří poslední článek ve vývoji automatických inklinometrických systémů. Na trhu je k dispozici několik řešení od maximálně jednoduchého „low-cost“ systému až po velmi robustní multiparametrický systém. Společným znakem těchto senzorů je použití MEMS technologie pro měření náklonu.

Systém GeoFlex

Systém GeoFlex vyráběný kanadskou společností Durham Geo-Enterprises je tvořen segmenty o délce 0,6 m a klouby se dvěma stupni volnosti (obr. 2.4, vlevo). Poskytuje tak vertikální rozlišení podobné jako při použití manuální inklinometrické sondy. Jednotlivé segmenty jsou osazeny teplotními čidly a čidly měřícími náklon segmentu. Pro měření náklonu se používají buď uniaxiální nebo biaxiální MEMS náklonoměrné senzory. Řetězec lze doplnit o libovolný počet segmentů bez senzorů, tak, aby bylo možné dosáhnout nižších nákladů na instalaci. Senzor je umístěn vertikálně do PVC trubky průměru 1,5“ (38 mm) nebo do standardní inklinometrické výstroje 70 mm, v tom případě je nutné použití centrátorů. Inklinometrický řetězec je připojen ke kontrolní jednotce, odkud jsou data přenášena do zpracovatelského software, vyhodnocena a případně jsou vyhlášeny varovné stavy, a to prakticky v reálném čase. Celý systém je ovládán a napájen pouze jedním kabelem. V závislosti na jeho délce a na velikosti napájecího napětí může být řetězec tvořen až 200 segmenty. Klouby senzoru dovolují ohyb až 90°, to v kombinaci s relativně nízkou váhou senzoru (0,9 kg/m) umožňuje snížení nákladů na dopravu (obr. 2.4, vpravo). Senzor je kalibrován pro měření v rozsahu $\pm 30^\circ$ od vvislice. Standardně je systém vyráběn po úsecích délky 3 m (10 stop). Pro záznam měřených hodnot a řízení senzoru jsou použity univerzální datalogery společnosti Campbell Scientific. Napájení je realizováno stejnosměrným proudem o napětí 12 V až 24 V. Výrobce uvádí rozlišení 9“ resp. 0,04 mm/m a přesnost charakterizuje hodnotou opakovatelnosti měření ± 82 “ resp. 0,4 mm/m.



Obr. 2.4 IPI systém GeoFlex:(vlevo) Detail propojení jednotlivých segmentů; (vpravo) Sensorická část segmentu je zvnějšku umístěna na ocelovém profilu segmentu.

Systém DMS italské společnosti CSG

Italská společnost CSG s.r.l. byla založena v roce 1997. V současné době sídlí v historickém městečku Ricaldone v italském kraji Piemont. DMS je multiparametrický plně automatizovaný „in place“ systém pro geotechnická měření o průměru 42 mm a délce segmentů 1 m. Výrobce nabízí mnoho variant systému s různým sensorickým osazením a různým rozsahem měření. Kromě náklonoměrných a teplotních čidel může každý ze segmentů obsahovat ještě senzor pórového tlaku, akcelerometr, magnetometr nebo extenzometr (3D varianta). Konstrukce DMS je, v porovnání se systémem GeoFlex i SAA, velmi robustní. Tuhé segmenty, které jsou osazeny jednotlivými čidly, jsou odděleny flexibilními klouby.

Senzor pracuje na obdobném principu jako ostatní IPI řetězce. Zásadní rozdíl je však v systému zpracování dat a řízení senzoru, a to především v případě, je-li senzor součástí systému včasného varování. Senzor SAA samotný obsahuje mikročipy, které slouží pouze pro zpracování signálů z jednotlivých čidel a jejich odesílání do kontrolní jednotky, kde jsou data uchovávána a případně dále odesílána na server, kde dochází k jejich zpracování a vyhodnocování a případně vyhlášení varovných stavů (obr. 3.2e). U senzoru DMS jsou data v kontrolní jednotce jednak uchovávána a odesílána obdobně jako u senzoru SAA, ale současně jsou ihned po odečtu jednotlivých senzorů měřená data z jednotlivých senzorů porovnávána s daty předchozího čtení a při překročení mezních odchylek jsou vyhlášeny varovné stavy a odesílány varovné zprávy. Systém tedy pracuje částečně autonomně a varovný systém je funkční i při přerušení datového spojení se serverem.

Dalším zásadním rozdílem mezi oběma řešeními je v robustnosti celého zařízení, s čímž souvisejí charakteristické znaky instalace. Senzor SAA je instalován do výstroje o průměru 40 mm a průměr samotného senzoru není větší než 27 mm. To umožňuje

minimalizovat náklady spojené s dopravou a instalací senzoru, kdy není potřebná žádná těžká technika. V praxi zvládnou instalaci senzoru dvě osoby bez dalšího zvláštního vybavení. Senzor DSM je výrazně robustnější a v terénu je instalován buď přímo pracovníky společnosti CSG pomocí pásového dopravníku, nebo je celý systém dodáván v přepravním kontejneru obsahujícím veškeré zařízení nutné k provozu senzoru společně s hydraulickým systémem umožňujícím instalaci senzoru do vrtu (obr. 2.5). V nepřístupném terénu může být senzor spuštěn do vrtu nebo extrahován pomocí vrtulníku (Lovioso 2017).



Obr. 2.5 Instalace senzoru DSM (CSG s.r.l. 2019): (vlevo) Instalace s použitím univerzálního kontejneru; (vpravo) Instalace pomocí speciálního pásového dopravníku

Senzor DSM je od jara 2018 nainstalován v 30 m hlubokém vrtu v místě jednoho z našich největších sesuvů nedaleko obce Čeřeniště v Českém středohoří. Zajímavé tedy bude porovnání výstupů ze senzoru DSM a SAA.

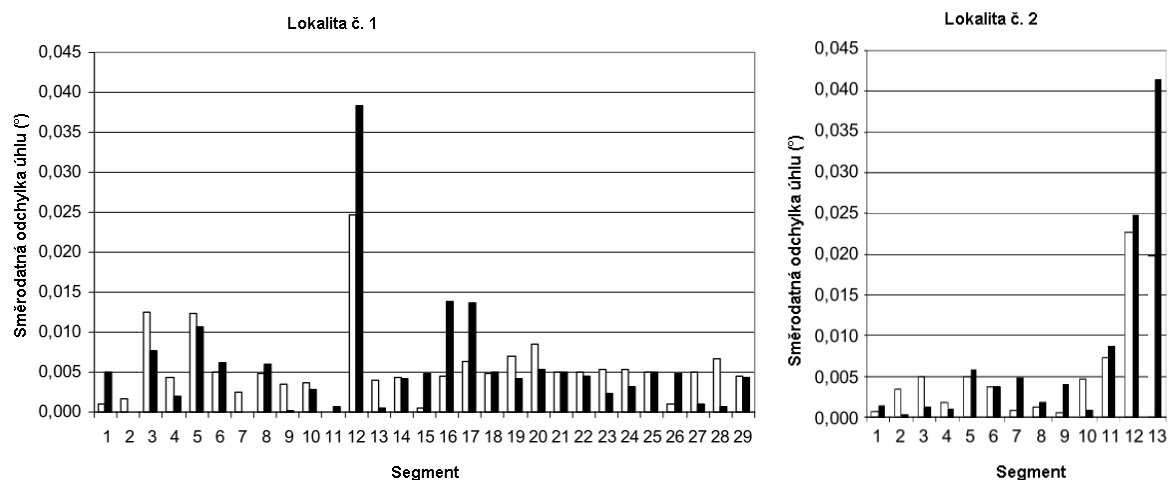
Výrobce udává přesnost měření náklonu dvouosým inklinometrickým MEMS čidlem hodnotou opakovatelnosti 0,01°, 0,02° a 0,05° a rozsahem $\pm 30^\circ$, $\pm 45^\circ$ a $\pm 60^\circ$, a to v závislosti na konkrétním typu výrobku. Pro všechny typy řetězce jsou použity stejné typy MEMS senzorů, které jsou po otestování na automatickém kalibračním poli rozděleny podle prokázané přesnosti do tří kvalitativních skupin. Pro kompenzaci teplotních změn je na každém segmentu řetězce umístěno teplotní čidlo.

Výrobce se podrobně zabývá přesností senzoru v publikaci (Lovioso a Giusta 2005) a podrobuje 30 m dlouhý senzor testování jak v laboratorních, tak v polních podmínkách.

Na automatickém rotačním kalibračním stole byly určeny charakteristiky náklonoměrných senzorů s deklarovanými parametry: rozsah $\pm 20^\circ$, opakovatelnost měření $0,02^\circ$. Pro polní testování byly vybrány jen ty senzory, jejichž charakteristiky byly lepší než udává výrobce. Výsledky experimentů a jejich provedení poskytují zajímavé srovnání s testy a jejich výsledky provedenými v rámci této disertační práce.

Polní testování bylo provedeno v délce tří a šesti měsíců na dvou lokalitách. Řetězce o délce 13 m a 30 m, tvořené 13 a 30 segmenty o délce 1 m byly instalovány svisle do vrtu v místech potenciálně stabilního vertikálního profilu. Senzor byl odečítán s frekvencí 1 odečet za minutu a registrován byl vždy průměr ze 120 měření. Směrodatná odchylka měření náklonu pro každý segment řetězce byla vypočtena na základě odchylek od dlouhodobého průměru. Jedná se tedy o směrodatnou odchylku z opakování, charakterizující dlouhodobá měření.

Zajímavé srovnání nabízí výsledky z první a druhé lokality ve vztahu k měřením provedeným na lokalitě u Třebenic. Na první lokalitě byl vrchní konec senzoru umístěn 3,5 m pod úroveň terénu, ve druhém případě byl konec 13 m dlouhého řetězce umístěn v rovině terénu. Na první lokalitě byly směrodatné odchylky náklonu určené pro jednotlivé segmenty velmi podobné. Zatímco na druhé lokalitě byla směrodatná odchylka měření úhlu na hlouběji umístěných segmentech $\pm 0,003^\circ$, tak na segmentech umístěných blízko povrchu (12,13) tato směrodatná odchylka výrazně narůstá až k hodnotám $0,04^\circ$ (obr. 2.6). To je výrazně vyšší hodnota, než jaká odpovídá specifikaci výrobce a výsledkům laboratorního testování. Autoři tento skokový nárůst nepřesnosti odůvodňují mikropohyby, které probíhají v mělkých vrstvách do 2 až 3 metrů pod povrchem a které jsou způsobené střídavou saturací vodou a jejím vysycháním v kombinaci s teplotními změnami v podmínkách koluviálních (svahových) sedimentů, které jsou na tyto objemové změny náchylné (Lovioso a Giusta 2005).



Obr. 2.6 Směrodatné odchylky měření náklonu na segmentech senzoru DMS určené v polních podmínkách (Lovioso a Giusta 2005)

Přesnost (opakovatelnost) měření v polních podmínkách byla určena 0,5 mm na konci 30 m dlouhého segmentu, to odpovídá opakovatelnosti 0,09 mm/metr. Autoři předpokládají, že směrodatná odchylka z opakování narůstá s odmocninou počtu senzorů. Systematické chyby měření nejsou v této práci zohledněny, což vzhledem k hlavnímu účelu využití senzoru není na závadu. Hlavním cílem senzoru je zachycení nadlimitní změny v náklonu některého ze segmentů a vyhlášení varovného stavu různého stupně. Současně upozorňují na problém mikropohybů, které byly registrovány v mělkých vrstvách blízko povrchu, a které mohou negativně ovlivnit systém včasného varování a teoreticky by mohly vést k falešně pozitivním varovným hlášením. Výsledky tohoto polního experimentu se v některých ohledech velmi podobají výsledkům polních měření na lokalitě u Třebenic, které jsou podrobněji popsány v kap. 5. Autor bohužel neuvádí, zda měly změny probíhající v přízemních vrstvách periodický charakter.

3. Senzor SAA a jeho vlastnosti

Společnost Measurand vyrábějící senzor SAA byla založena v roce 1993 v kanadském městě Fredericton. Zpočátku se zabývala vývojem a výrobou senzorů pro mapování pohybu těla „motioncapture“, a to především ve filmu a animaci. Až posléze se začala věnovat detekci pohybů a přetvoření v geotechnice, konkrétně automatizaci inklinometrických měření pomocí IPI řetězců. V roce 2004 byla společností patentována technologie výroby nového senzoru (Danisch 2004). Prototyp senzoru SAA s názvem WSAA (Wireless Shape-Acceleration Array) byl vyvinut týmem výzkumných pracovníků Rensselaer Polytechnic Institute (RPI) a zaměstnanců společnosti Measurand Inc (Abdoun et al. 2007b, obr. 3.1). Postupem času se společnost Measurand rozrostla. V současnosti má 69 zaměstnanců a vyváží svoje výrobky do přibližně 25 zemí celého světa. IPI systém SAA (ShapeAccellArray) je vyráběn v několika variantách a do konce roku 2017 ho bylo dle výrobce ve světě instalováno přes 80 000 metrů.

SAA byl od počátku designován jako „low-cost“ monitorovací systém tak, aby se cena celého zařízení stala přijatelnou pro komerční sektor a mohla být použita jako alternativa ke klasickým inklinometrickým měřením (Abdoun et al. 2005a). Bylo nutné aby se cena jednoho segmentu řetězce dostala řádově níže, než jaká je cena inklinometrické sondy. I z tohoto důvodu byly v senzoru pro měření náklonu použity relativně levné senzory MEMS. To přineslo řadu výhod, jako je menší velikost senzoru, možnost měření s vysokou frekvencí odečtů nebo nižší spotřebu elektrické energie. Skutečnost, že měření MEMS akcelerometrů je zatíženo značnými náhodnými chybami, je při měření relativně pomalých pohybů kompenzována průměrováním vysokého počtu měření.

Řetězec samotný se skládá z modulárních komponent, které umožňují variabilní rozestup senzorů a multiplexování. Od počátku byly vyvíjeny dvě základní varianty SAA: verze Field (SAAF) a verze Resarch (SAAR) umožňující ještě vyšší frekvenci odečtů. Senzor nachází uplatnění při sledování nestabilních svahů, deformací stavebních konstrukcí, stability náspů a výkopů nebo při různých laboratorních měřeních.

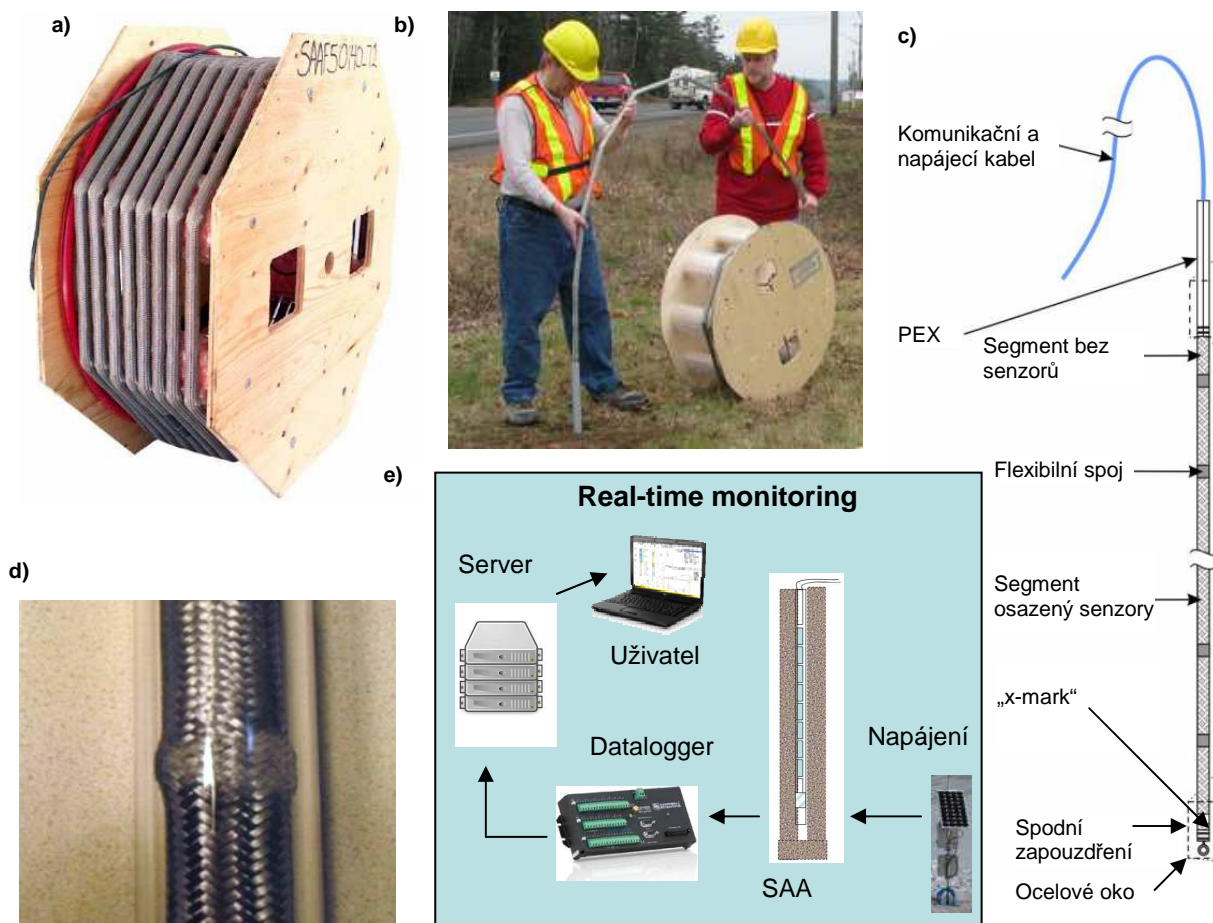


Obr. 3.1 Prototyp senzoru SAA (WSAA) na transportní roli.

3.1. Konstrukce senzoru SAA

Senzor SAA je řetězcem pevných a flexibilních prvků, který je schopen s vysokou přesností registrovat polohu jednotlivých segmentů řetězce vzhledem ke směru tíhového zrychlení. Pevné části (segmenty) jsou vybaveny senzory, flexibilní spoje umožňují senzoru reagovat na prostorové změny okolí (obr. 3.2c). Každý ze segmentů je osazen trojicí triaxiálních MEMS akcelerometrů, mikroprocesorem a teplotním čidlem. Mimoto může být senzor osazen magnetometrickým čidlem umožňujícím sledovat orientaci jednotlivých segmentů vzhledem ke světovým stranám. Teplotní čidlo umožňuje opravu délky segmentů o vliv teplotní roztažnosti a především korekci měření MEMS akcelerometrů. Měření elektrických a elektromechanických čidel obecně jsou totiž obecně velmi závislá na teplotě. Mikroprocesor zpracovává měřené veličiny do formy pro export do záznamového zařízení. Z těchto dat je následně v příslušném software vypočtena poloha kloubů přístroje v lokálním souřadnicovém systému, a to tak, že souřadnice lomových bodů jsou určeny relativně k libovolnému z krajních bodů řetězce.

Spoje senzoru nejsou klouby v pravém slova smyslu. Jedná se o flexibilní spoje, které jsou konstruovány tak, aby měly 2 stupně volnosti. Konkrétně, aby umožňovaly ohyb, ale byly maximálně odolné proti kroucení – rotaci podél osy senzoru (obr. 3.2d). V polních podmínkách je senzor instalován vždy do PVC krytí tvořeného PVC trubkou o vnitřním průměru 27 mm a délkou, která odpovídá délce senzoru nebo delší (obr. 3.2a). Kompresí řetězce v axiálním směru poté dochází k rozšíření ocelového opletu v místech flexibilních spojů z 25 mm na průměr trubky a k fixaci senzoru v PVC trubce (obr. 3.2d).



Obr. 3.2 Konstrukce a použití senzoru SAA (Measurand 2015): (a) Senzor na transportní roli; (b) Instalace senzoru SAA do vrtu; (c) Základní součásti senzoru SAA; (d) Roztažení kloubu senzoru v PVC výstroji při axiální kompresi; (e) Zjednodušený princip systému včasného varování.

Segmenty řetězce jsou vyráběny ve dvou různých délkách 305 mm (1 stopa) a 500 mm – přesná délka každého segmentu je součástí kalibračního protokolu. Řetězec může mít délku až 100 metrů (při použití 500 mm segmentů) – délka senzoru je limitována maximálním počtem 200 segmentů. Senzorické osazení segmentů se liší podle toho, zda se jedná o variantu SAAF (Field) nebo SAAR (Research). SAAR je vybaven větším počtem mikroprocesorů, tak aby bylo možné navýšit frekvenci odečtů celého řetězce na hodnotu umožňující zachycení vibrací. Při tomto testování i při všech ostatních experimentech byla používána polní varianta přístroje – SAAF.

Kromě segmentů a kloubů se skládá senzor SAA ještě z dalších důležitých částí, kterými jsou komunikační kabel, PEX, segment bez senzorů, ocelové oko a navigační značky (obr. 3.2c). Komunikační kabel o volitelné délce slouží jak k napájení senzoru, tak k přenosu dat. Maximální délka komunikačního kabelu se odvíjí od počtu segmentů

senzoru – pro senzor tvořený 50 segmenty je mezní délka komunikačního kabelu 1200 m při napájecím napětí 16,5 V. PEX je ¾“ polyetylenová trubka volitelné délky (standardně 1,5 m) chránící komunikační kabel proti mechanickému poškození během instalace do vrtu. Koncový segment bez senzorů slouží k vodotěsnému zapouzdření senzoru a obsahuje spoje datových kabelů. Ocelové oko na spodním konci senzoru se využívá ke vtažení senzoru do PVC trubky při instalaci v horizontální poloze. Dále jsou to značky sloužící ke správnému uložení senzoru na transportní roli a značky značící směr osy x senzoru („x-mark“), tak jak byla nastavena během kalibrace. V terénu pak se obvykle jedna z os (x nebo y) nastavuje ve směru deformace.

Přesnost určení souřadnic kloubů přímo závisí na přesnosti měření náklonů – přesnosti akcelerometrů MEMS. Uváděná přesnost 1,5 mm na 32 m by – podle výrobce – měla být garantována v celém rozsahu úhlových měření. Uváděná přesnost je přesností relativní, tedy je přesností měření deformace (Measurand 2014). Výrobce udává hodnotu přesnosti 1,5 mm pro 32 m dlouhý řetězec. Na základě deklarované úhlové přesnosti akcelerometrů je zřejmé, že tato hodnota platí pro řetězec s délkou segmentů 305 mm, tj. řetězec o 104 segmentech. Přesnost pro jeden segment řetězce je pak 0,05 mm. V dostupných publikacích není blíže popsán experiment, na jehož základě byla hodnota přesnosti $\pm 1,5$ mm pro 32 m dlouhý řetězec určena. Abdoun et al. (2007a) uvádí, že se jedná o opakovatelnost. Dle Bennett (2009) jsou hodnoty přesnosti určeny empiricky na základě výsledků dlouhodobých měření. Je však zřejmé, že se nejedná o přesnost v pravém slova smyslu, ale o opakovatelnost určenou na základě dlouhodobých měření. To je ve shodě s tvrzením Rollinse et al. (2009), že SAA poskytuje srovnatelnou přesnost jako standardní inklinometrická sonda, popsaná v kapitole 2.2. Toto tvrzení zakládá na analýze výsledků na dlouhodobých měření z nichž byly určeny hodnoty opakovatelnosti a rozlišení senzoru (Mikkelsen 2003). Podrobná technická specifikace senzoru je uvedena níže (tab. 3.1).

Tab. 3.1 Technická specifikace senzoru SAA uváděná výrobcem (Measurand 2014)

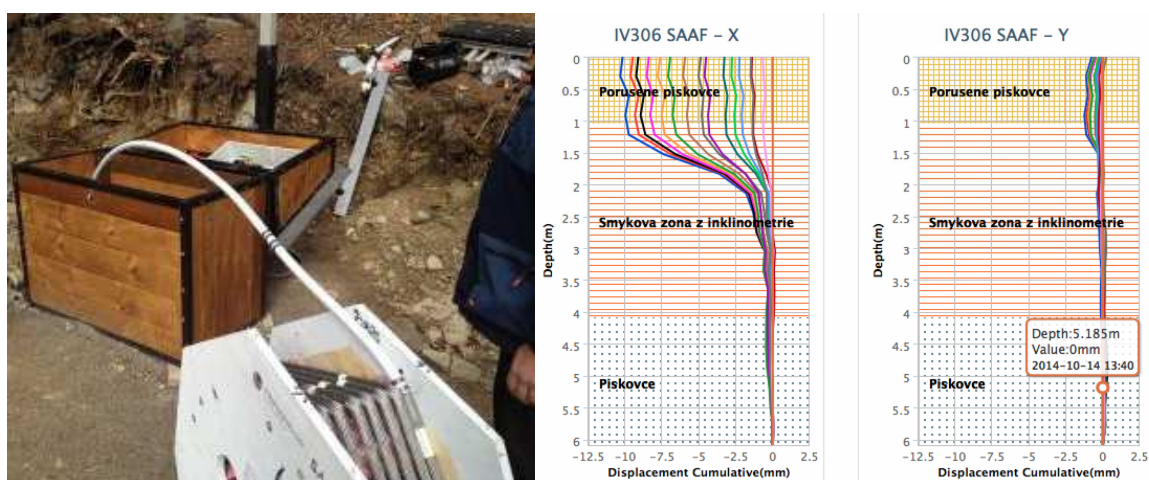
Fyzické vlastnosti	
Délka segmentu	305 nebo 500 mm
Maximální délka SAAF	100 m (500 mm segmenty) nebo 60,96 m (305 mm segmenty)
Maximální počet segmentů	200
Délka spodního zakončení senzoru	60 mm
Délka segmentů bez senzorů (nultý segment)	340 mm
Délka tvrzeného kabelu uvnitř PEX	175 mm
Standardní délka PEX zapouzdření	1,5 m
Délka komunikačního kabelu	standardně 15 m
Váha senzoru	0,6 kg/m
Průměr spoje senzoru (jointu) při extenzi	25 mm
Průměr spoje senzoru (jointu) při kompresi	27 mm
Maximální pevnost v tahu	320 kgf (3138 N)
Maximální axiální komprese	45 kgf (441 N)
Minimální axiální komprese zajišťující roztažení spoje na 27 mm	10 kgf (98 N)
Maximální ohyb v kloubech	45°
Maximální poloměr ohybu senzoru umožňující jeho extrakci	3,5 m pro SAAF500 2,0 m pro SAAF305
Rozpětí teplot pro skladování	-40°C až 60°C
Rozpětí teplot pro instalaci	-5°C až 60°C
Provozní teplota	-35°C až 60°C
Vodotěsnost	980 kPa
Požadavky na napájení	12 V DC při 3,9 mA/segment
Měření dynamické akcelerace	
Rozsah	± 1,7 G
Šířka přenosového pásma při poklesu o 3dB	50 Hz
Práh šumu	110 µG/Hz 0,5
Přenosová rychlost (SAA232)	38,4 kbps to 230,4 kbps
Statická měření	
Rozsah úhlových měření MEMS senzorů	± 360°
Rozsah úhlových měření při 3D módu (vertikální instalace)	± 60°
Rozsah úhlových měření při 2D módu (horizontální instalace)	± 60°
Rozsah úhlových měření při 2D módu (H/V instalace)	± 180°
Dlouhodobá přesnost relativně k výchozímu tvaru senzoru	± 1,5 mm pro 32 m dlouhé SAA (100 segmentů)
Krátkodobé rozlišení relativně k výchozímu tvaru senzoru	± 0,5 mm pro 32 m dlouhé SAA (100 segmentů)
Dlouhodobá přesnost měření náklonu v rozsahu 20° od vertikály	±0,0005 rad = 0,029°
Chyba azimutu pro kloub	< ±0,25°
Ortogonalita uvnitř segmentů	± 0,1°

3.2. Využití a způsoby instalace senzoru SAA

Jak již bylo uvedeno, akcelerometrická MEMS čidla senzoru SAA jsou schopna provozu v plném rozsahu 360°. To na rozdíl od klasické inklinometrické sondy značně rozšiřuje možnosti použití senzoru a sensor se tak může stát více než automatizovanou formou inklinometrického monitoringu. V praxi se obecně používají konstrukčně rozdílné sondy k proměřování vertikálních inklinometrických vrtů, případně vrtů mírně ukloněných pro sledování horizontálních deformací a pro sledování vertikálních deformací přibližně vodorovných profilů. Senzor SAA je schopný měření v jakékoli poloze. V zásadě je možné sensor instalovat třemi různými způsoby: vertikálně, horizontálně nebo kombinovaně. Možnosti použití senzoru výrazně rozšiřuje i schopnost vysoké frekvence odečtů, v závislosti na typu senzoru až desítky Hz.

3.2.1 Vertikální instalace senzoru SAA

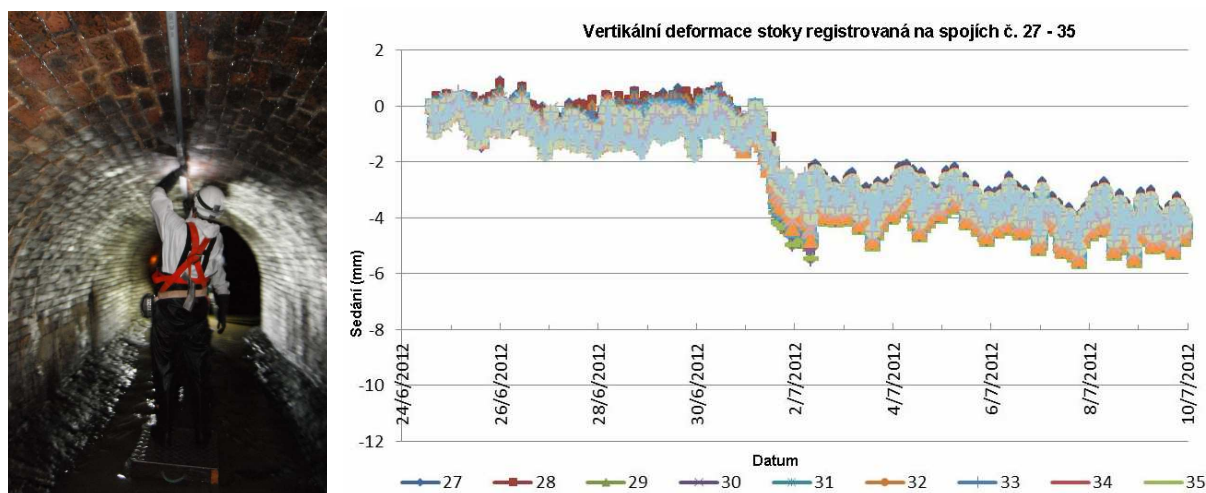
Vertikální nebo přibližně vertikální instalace senzoru SAA je obdobou klasických inklinometrických měření prováděných transversální sondou. Senzor poskytuje informace o horizontálních deformacích senzoru ve dvou na sebe kolmých svislých rovinách. Pata senzoru by měla být fixována v dostatečné hloubce, tedy v takové hloubce, kde již nedochází k deformacím, které chceme sledovat (typicky pod smykovou plochou sesuvu, pod patou opěrné zdi atd.). Před umístěním samotného senzoru je nutné osadit do vrtu PVC trubku předepsaného vnitřního průměru 27 mm. Vertikální instalace senzoru se využívá nejčastěji v situacích, jako je monitoring sesuvů nebo sesuvem ohrožených území (Dasenbrock et al. 2010), sledování stability náspů a zářezů (Hendry et al. 2013), zachycení deformací pilot nebo opěrných stěn následkem bočního zatížení (Lipscombe et al. 2013), deformace přehradních hrází (Measurand 2011, Abdoun et al. 2012). Hendry et al. (2019) používají SAAR verzi senzoru SAA pro sledování cyklických horizontálních deformací železničního tělesa během průjezdu vlakové soupravy. Zajímavým příkladem vertikální instalace je instalace senzoru na jednom z našich nejexponovanějších sesuvů na svazích přehradní nádrže Šance (obr. 3.3, Novosad 2015). Často je senzor SAA využíván během různých experimentů a zátěžových testů, které slouží k modelování různých geotechnických jevů. Takové experimenty vyžadují v relativně krátkém časovém úseku shromáždit maximum informací o procesech probíhajících ve zkoumaném objektu. Je nutné proto měření provádět kontinuálně často s frekvencí, jaká by v případě použití transversální inklinometrické sondy nebyla možná (Chiou 2012).



Obr. 3.3 Použití senzoru SAA na sesuvu Šance-Řečica: (vlevo) Instalace senzoru do vrtu; (vpravo) Deformace senzoru v čase zřetelně vymezují smykovou zónu sesuvu Šance-Řečica

3.2.2 Horizontální instalace senzoru

Na rozdíl od klasické inklinometrické sondy, jejíž rozsah je omezen, a kterou lze použít jen do určitého sklonu pažnice, je možné senzor SAA instalovat i horizontálně. Znamená to, že segmenty řetězce jsou umístěny tak, že úhel odklonu osy jednotlivých segmentů od vodorovné roviny není větší než $\pm 60^\circ$. Při takovémto umístění senzoru je možné sledovat deformace pouze ve svislé rovině procházející osou senzoru. Takovéhoho postupu se nejčastěji používá ke sledování sedání nebo vertikálních deformací při přetížení a zatěžovacích zkouškách. Dostupné publikace ukazují na širokou škálu aplikací senzoru v jeho horizontální poloze: sedání sypané přehradní hráze (Smith 2015), sedání náspu během zátěžového testu (Abdoun 2010), deformace železničního tělesa (Measurand 2015), deformací podélného profilu tunelu (obr. 3.4, Bradley a Prado 2014) nebo například sledování pohybů zemních trhlin (Liu 2019).



Obr. 3.4 Horizontální instalace senzoru SAA do kanalizační stoky: (vlevo) Instalace senzoru do podélného profilu stoky; (vpravo) vertikální deformace stoky v čase (Bradley a Prado 2014)

3.2.3 Kombinovaná instalace senzoru

Při kombinované instalaci se využívá toho, že MEMS akcelerometrická čidla jsou schopna měření v plném rozsahu (tj. 360°). Tento způsob instalace senzoru SAA se využívá například při měření konvergencí nebo při sledování deformací tunelového ostění (obr. 3.5). V příspěvku (Meyer a Schütz 2011) je prezentováno použití SAA jako součást automatizovaného kontrolního systému (SwissMon) soustavy tunelů v Curychu. SAA se zde používá pro sledování deformací tunelového ostění.



Obr. 3.5 Kombinovaná instalace senzoru SAA: (vlevo) Senzor instalovaný v kanalizační stoce (Measurand), (vpravo) Instalace senzoru SAA do ostění tunelu ve Švýcarsku (Meyer a Schütz 2011)

3.3. Dosavadní testování přesnosti a využitelnosti senzoru SAA

Vzhledem k tomu, že se jedná o relativně nový měřicí přístroj, je počet článků zabývajících se testováním senzoru SAA nebo jeho použitím při různých druzích monitoringu relativně vysoký. Z části se však jedná o publikace pouze popisující funkci SAA nebo možnosti jeho použití v rámci různých aplikací. Prezентují tak spíše schopnosti kontinuálního měření a předávání dat v reálném čase, než jejich kvalitu. Je zde však také celá řada prací, které se buď primárně nebo alespoň okrajově věnují přesnosti senzoru. Ve většině takových případů je měření senzoru SAA konfrontováno s metodami, jejichž přesnost není výrazně vyšší než očekávaná přesnost senzoru. Velmi často jsou výsledky experimentů prezentovány pouze graficky, kdy se hodnotí podobnost průběhu křivek. Jako referenční metoda měření nejčastěji slouží data pořízená tradičními inklinometrickými sondami. Nevýhodou této referenční metody je jednak to, že její přesnost je přibližně stejná jako přesnost senzoru SAA, jednak to, že není možné oběma metodami sledovat deformace stejného pažení.

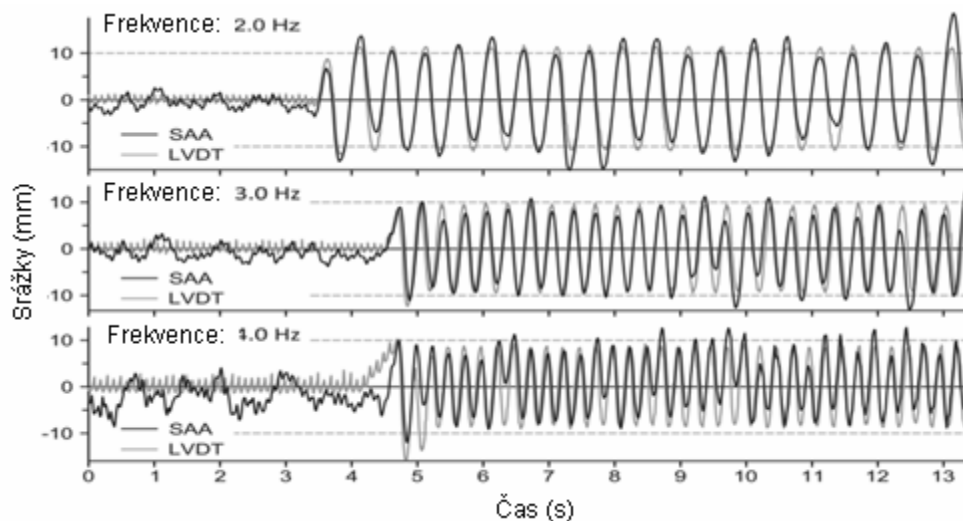
Dasenbrock et al. (2010, 2011) popisují použití SAA v rámci automatického sledování svahových pohybů, způsobujících deformace silničního tělesa. K sesuvu došlo v roce 2003 v centru města Crookston v USA a způsobil značné škody na majetku. V létě roku 2007 byl do stále aktivního sesuvu instalován první senzor SAA a v roce 2008 byl nedaleko osazen druhý. Data z obou senzorů byla prakticky v reálném čase předávána do ústředí a zpracovávána. Tři měsíce po instalaci druhého senzoru nato došlo k masivní reaktivaci sesuvu, která však byla na základě měřených dat dopředu predikována a doprava na komunikaci byla zastavena. Autor konstatuje, že se jednalo o pilotní projekt a cílem práce bylo ukázat na možnost použití SAA jako součástí

automatických varovných systémů schopných včas detekovat aktivaci smykových ploch a uzavřít komunikaci pro dopravu. Ověřuje dlouhodobou funkčnost senzoru v polních podmínkách. Udává, že i po 900 dnech používání a frekvenci čtení každých 6 hodin zůstává senzor plně funkční, a to i poté, co velikost posunů dosáhla hodnoty 250 centimetrů. Přesnost senzoru není v publikaci nijak řešena. Z graficky publikovaných posunů je zřetelně viditelné, že senzor byl schopen zaznamenat i počáteční velmi pomalé deformace v řádu jednotek milimetrů a rychlosti 0,25 mm/den.

V příspěvku (Measurand 2011) je popisováno využití SAA pro sledování pohybů přehradní nádrže, způsobených expanzí betonu. Výsledky měření 27 m dlouhého senzoru SAA srovnává s hodnotami určenými pomocí kyvadel, jejichž přesnost udává hodnotou 0,3 mm. Z uvedeného grafického porovnání jsou patrné rozdíly v poloze kontrolních bodů, které se v obou osách x,y pohybují do 1 mm při maximální velikosti deformací 4 mm. Směrodatné odchylky měření SAA autor neuvádí, píše pouze, že rozdíly mezi měřeními těmito dvěma metodami vyjádřené směrodatnými odchylkami byly v rámci přesnosti kyvadel (autor uvádí směrodatnou odchylku posunu určeného kyvadlem 0,3 mm). Graficky je prezentováno 5 etap paralelních měření v rozsahu 7 měsíců. Příspěvek je bohužel velmi stručný a neobsahuje prakticky žádné číselné údaje. Srovnání s metodou inverzního kyvadla je však velmi vhodné neboť poskytuje porovnání s metodou velmi vysoké přesnosti. Na vzdálenost 27 m je přesnost kyvadla několikanásobně vyšší než u klasické transversální inklinometrické sondy. Výsledky měření ukazují, že SAA při malých a pomalých deformacích může dosahovat velmi vysoké přesnosti. Publikované výsledky je však nutné brát s rezervou, neboť se jedná o experiment publikovaný společností, která senzor vyrábí.

Deformace železničního náspu v úseku s nestabilním rašelinovým podložím je sledována v rámci experimentu prováděného na třech lokalitách v Kanadě (Hendry et al. 2013). Autor sleduje reakci náspu zatíženého projíždějící soupravou, projevující se změnou pórových tlaků a vertikální a horizontální deformací tělesa. Horizontální posuny byly měřeny vertikálně umístěným senzorem SAA. Výsledky byly porovnány s numerickým modelem založeným na elastické odezvě prostředí na přitížení projíždějícím vlakem. Autoři identifikují místa potenciálně ohrožená vytlačením materiálu u paty náspu. Nijak nezabývají přesností senzoru SAA, ale ukazují na nestandardní možnosti aplikace senzoru, jež se dostávají za možnosti klasických inklinometrických sond. Hendry se obecně zabývá přesností a využitím SAA pro měření s vysokou frekvencí. Zmíněný polní experiment je reakcí na výsledky laboratorního testování, které ukázaly významný pokles přesnosti při měření periodických deformací s frekvencí vyšší než 2Hz (obr. 3.6). Na

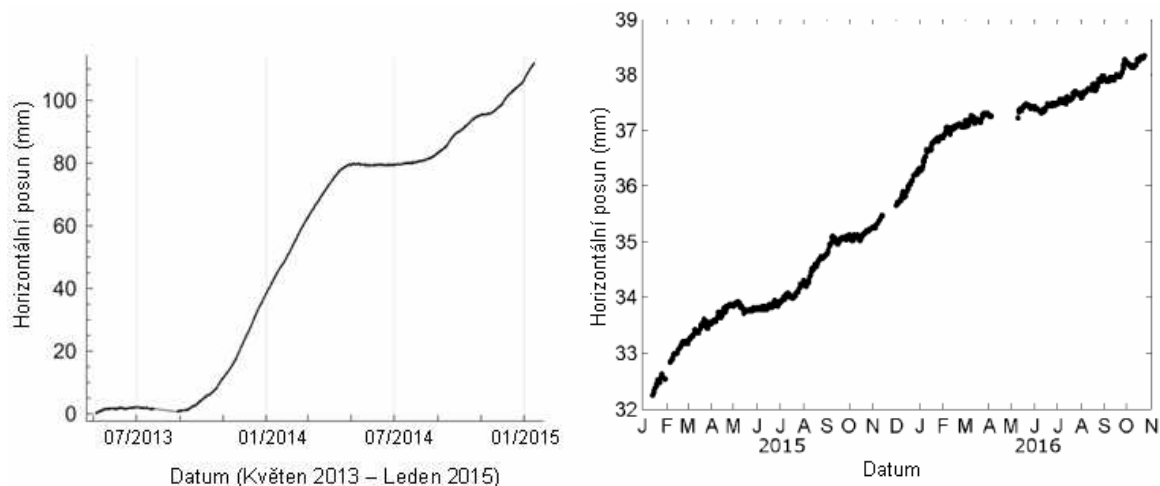
základě dat získaných při laboratorních experimentech autor vyvíjí metodiku kompenzace systematické chyby v měření vysokofrekvenčních cyklických posunů. Konstatuje, že SAA senzor byl původně vyvinut pro měření dlouhodobých, relativně pomalých deformací. Poukazuje na to, že výsledky presentované ve dřívější studii (Abdoun et al. 2005a) ukazují dobrou shodu mezi SAA a LVDT snímači mezi 0,05 a 0,2 Hz. Podobnou shodu ukazuje také publikace Abdoun et al. 2007, kdy jsou senzorem měřeny velmi pomalé frekvence (0,006 Hz). Ukazuje, že rozdíl mezi LVDT a SAA jsou velmi malé (cca 2% z velikosti deformace).



Obr. 3.6 Časové řady vysokofrekvenčních měření senzorem SAA a snímači LVDT (Hendry 2013)

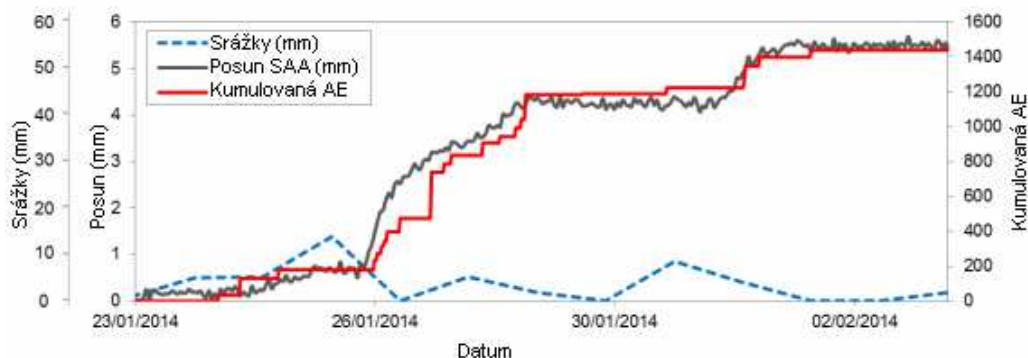
Macciotta et al. (2015) popisují monitoring pomalého sesuvu na lokalitě v Britské Kolumbii v rámci vývoje systému včasného varování. Roční sesuvné pohyby se pohybují v rozsahu 60 - 100 mm horizontálně a 20 až 80 mm vertikálně. Rychlost sesouvání se cyklicky mění s roční periodou (obr. 3.7 vlevo). Nejrychlejší pohyby jsou zaznamenávány mezi zářím a květnem, tedy v období s vyššími efektivními srážkami. Autor předpokládá, že zrychlení pohybů v těchto měsících souvisejí se zvýšenou saturací zemin vodou. Monitoring je realizován s využitím statické GPS antény a senzoru SAA o délce 10 m a 33 segmentech instalovaného vertikálně do vrtu. Systém včasného varování je pak založen na znalosti dlouhodobého ročního chování sesuvu a je schopen identifikovat odchylky od normální vývoje sesuvných pohybů. Takovýto přístup umožňuje okamžité vyhodnocení chování sesuvu a omezení výskytu falešných varování. Autor porovnává denní GPS pozice průměrované z hodinových měření a denní průměry pozic SAA průměrované taktéž z hodinových dat. Pohyby registrované senzorem SAA jsou v

souladu s pohyby registrovanými pomocí GPS. Sledovaná lokalita se v mnoha ohledech podobá sesuvu u Třebenic. Pohyb sesuvu na svahu s relativně malým sklonem (průměrně 11°) je umožněn vysoce plastickým jílem na smykové ploše.



Obr. 3.7 Kumulovaná horizontální deformace senzoru nad smykovou plochou (Macciotta et al. 2015 – vlevo; Berg et al. 2018 – vpravo)

Komplexní monitoring svahových pohybů s použitím různých geodetických a geotechnických metod je realizován na nestabilním svahu ve Velké Británii (Uhlemann 2016). Autor prezentuje a srovnává výsledky měření RTK GPS, konvenčních inklinometrických sond, náklonoměrů, snímačů akustických emisí a piezometrů. Popisuje výhody a nevýhody jednotlivých metod pro monitoring svahových pohybů. Senzory SAA byly na lokalitě instalovány do vrtů se stávajícím inklinometrickým opláštěním průměru 85 mm, přičemž byly použity centrátory. Graficky autor prezentuje srovnání mezi výsledky SAA měření posunů metodou akustické emise (AE) a senzorem SAA. Výstupem z AE je bezrozměrné křivka, proto byla křivka AE přizpůsobena na rozměr křivky SAA. Je tak možné porovnávat pouze jejich průběh. Jednotlivé akcelerace a decelerace jsou oběma metodami viditelně detekovány shodně (obr. 3.8). Měření deformací senzorem SAA v tomto případě slouží jako referenční metoda experimentálnímu použití AE pro monitoring svahových nestabilit.



Obr. 3.8 Horizontální posun měřený senzorem SAA, přizpůsobená AE a srážky (Uhlemann 2016)

Extrémně pomalé sesuvné pohyby jsou experimentálně sledovány pomocí SAA a AE v oblasti Peace River v Kanadě. Sesuv půdy se pohybuje průměrnou rychlostí 5 mm/rok, občas se však pohyb zrychluje a dochází k potenciálně katastrofickým svahovým selháním. Hlavním smyslem článku je testování možnosti využití systému AE k detekci kritického zrychlení svahu. Z časové řady horizontálních posunů nad smykovou plochou jsou jasně patrné sezónní změny v rychlosti pohybu (obr. 3.7 vpravo). Měření senzorem stejně SAA je stejně jako v předchozím případě použito jako referenční metoda. Křivky SAA a AE vykazují stejné trendy chování a jsou vysoce korelované (Berg et al. 2018). Z grafu týdenních kumulovaných pohybů je zřetelná reakce senzoru na prvotní submilimetrové pohyby.

V další publikaci je popsáno použití senzoru SAA v rámci automatického monitoringu nestabilního svahu porušujícího dálniční komunikaci Trunk Highway v kanadské Manitobě, na němž došlo k několika katastrofálním epizodám. Automatický monitorovací systém se skládá ze dvou laserových měřičů vzdálenosti (LDM) a jednoho senzoru SAA. LDM měřiče jsou umístěny nad odlučnou hranou sesuvu a měří vzdálenost k cílům v aktivní části sesuvu. Senzor SAA o délce 25 m je umístěn mezi terčí pro LDM. Data jsou shromažďována a odesílána do centrály každou hodinu. Senzor SAA detekoval pohyby podél smykové plochy v hloubce 18 m. Autoři graficky prezentují podobnost průběhu pohybů měřených LDM a SAA, které jsou reprezentovány 4 denními průměry měření. Za prezentované časové období došlo k horizontálnímu posunu o 60 mm. Z grafu nelze přesně vyčíst velikost odchylek, ale pohybují se v jednotkách milimetrů. (Alexander a Tallin 2017).

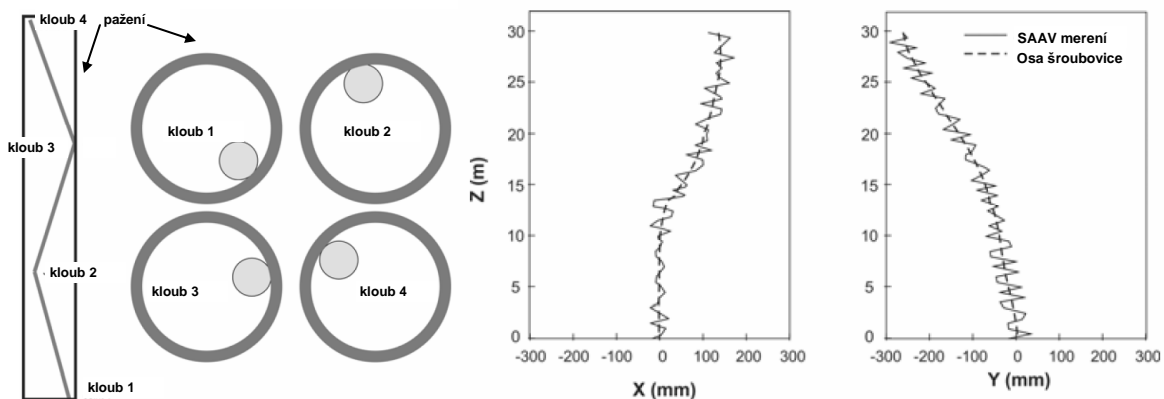
Liu (2019) se zabývá analýzou pohybů na zemních trhlinách, jejichž aktivita představuje ohrožení pro podzemní liniové stavby. Trhlina je sledována pomocí 4 m dlouhého vertikálně uloženého senzoru SAA a 8 m dlouhého horizontálně umístěného

senzoru SAA. Hodnoty deformací jsou registrovány každou hodinu. Autor se podrobně zabývá rozkladem časových řad zahrnujících 466 dní monitoringu a jejich následnou interpretací. Prvních 8 segmentů senzoru bylo umístěno na referenční (stabilní) straně trhliny, kde maximální změny polohy dosáhly hodnoty 0,6 mm. Segmenty 9 – 16 byly umístěny na opačné straně trhliny, kde během čtyř měsíců došlo k vertikálnímu posunu o více než 12 mm. Autor prezentuje křivky vertikálního pohybu každého z kloubů senzoru. Rozdíly vertikálního posunu měřené segmenty 9-12 dosahují na konci sledovaného období hodnot 3 mm, což je výrazně více, než odpovídá přesnosti senzoru zjištěné při laboratorním testování. Příčinou může být to, že se vzájemná poloha segmentů 9-16 během experimentu skutečně měnila – ať už z důvodu nekompaktnosti sledovaného bloku, nebo částečné volnosti pohybu PVC opláštění v zemině. V rámci odstranění vlivu šumu autor uvádí hodnotu šumu směrodatnou odchylkou 0,097 mm na konci čtvrtého segmentu senzoru. Tato hodnota odpovídá směrodatné odchylce z opakování 0,049 mm/segment, která je ve shodě s hodnotou uváděnou výrobcem (tab. 3.1). Autor nijak nehodnotí přesnost senzoru, avšak příspěvek je přínosný z hlediska metodiky zpracování časových řad získaných senzorem SAA. Autor se podrobně zabývá problematikou odstranění šumu a rozkladu časové řady. Jedná se totiž o problematiku, která zpravidla není v prostředí přesné inklinometrie řešena. Nástupem automatických IPI systémů se však zásadně mění frekvence sběru dat a je žádoucí, aby se odpovídajícím způsobem změnila i metodika jejich zpracování. Převažuje podobný přístup jako k výstupům z klasické inklinometrické sondy, kdy se graficky zobrazují vertikální profily po určitém časovém úseku (obr. 3.10) a ty jsou pak hodnoceny. V případě takového zpracování dat z IPI systému včetně SAA je ale opomíjena drtivá většina měřených dat a potenciál vysokofrekvenčních měření proto není plně využit. Snaha aplikovat metody využívané při zpracování signálů je proto logickým krokem. Takové řešení je totiž vysoce vhodné zejména v případech, kdy jsou sledovány velmi pomalé deformace a časové řady mohou obsahovat periodické složky, často neznámého původu.

Problémem životnosti SAA v tvrdých půdách a skalních masivech se zabývají Danisch et al. (2014). Střih v tvrdých horninách často omezuje životnost inklinometrů. Autor se zmiňuje o tom, že SAA bez problému přežívá deformace v řádu metrů, v případě, kdy se jedná o měkké jílovité zeminy. V kontrastu s tím je skutečnost, že ke zničení senzoru v tvrdé skalní hornině dochází již při posunu 25 mm. Větší rezistence může být dosaženo při použití centralizátorů a instalaci do širšího pažení. Centralizátory však přináší do měření nepřesnosti, protože dochází k větší deformaci bez změny náklonu segmentu.

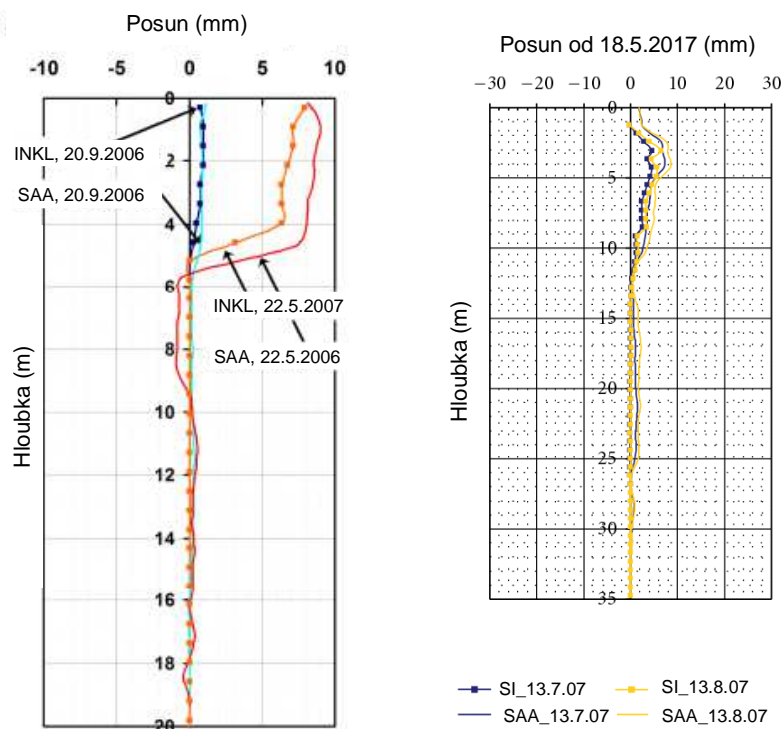
V reakci na tyto skutečnosti se autor zabývá vývojem nového typu senzoru o menším průměru, který je možné instalovat do PVC trubky průměru 20 mm. Menší průměr opláštění dovoluje stočení senzoru do spirály uvnitř pažení o průměru několikrát vyšším než je průměr SAA (obr. 3.9). Pak má šroubovice stoupání přibližně 5-6 m na otáčku. Vznikne tak spirála bez nároků na upevnění, která poskytuje senzoru dostatek prostoru v případě velkého stříhu. Článek se dále zabývá testováním šroubovicové instalace senzoru uvnitř opláštění o průměru 58 mm a metodikou měření při takovémto způsobu instalace senzoru. Osa spirály představuje taktéž osu vrtu a může být popsána spline křivkou (obr. 3.9 vpravo). Při experimentu byly pomocí přípravku vyvolávány stříhové deformace plastové výstroje o dané velikosti 5 mm, 15 mm, 20 mm a 25 mm. Experiment byl proveden s různými délkami stříhové zóny 0,0 m, 0,5 m a 1,0 m. Hodnoty měřené senzorem byly poté porovnány s hodnotami danými na posuvu a z jednotlivých rozdílů byla vypočtena směrodatná odchylka. Autor dokládá, že velikost směrodatné odchylky horizontálního posunu nebyla závislá na délce stříhové zóny a její hodnota činila 0,6 mm, a to ve vzdálenosti 0,6 m od počátečního fixovaného bodu senzoru (Danisch et al. 2014). Při délce segmentu 0,305 m to znamená směrodatnou odchylku 0,2 mm/segment. To je hodnota výrazně vyšší, než byla zjištěna při laboratorním testování. Jestliže by však tento způsob instalace zabránil zničení senzoru při relativně malých stříhových posunech, byl by jistě přínosem.

Problémem nové techniky instalace senzoru SAAV a její přesnosti se zabývají i Levesque et al. (2017). Provádějí experiment s vyvoláním posunu na velmi úzké smykové zóně, přičemž používá novou variantu senzoru. Autor, v krocích po 3 mm až 5 mm, vyvolává deformace až do velikosti 20 mm. Při experimentu byl použit 16 m dlouhý senzor instalovaný v PVC výstroji o průměru 59 mm. Směrodatná odchylka vypočtená z rozdílů měřených hodnot SAA a mikrometru (strojírenské hodinky s přesností 0,02 mm) byla 0,44 mm. Největší podíl na velikosti směrodatné odchylky mají rozdíly měřené přímo na smykové zóně.



Obr. 3.9 Instalace senzoru SAA do širokého pažení:(Danish et al. 2014) (vlevo) Umístění senzoru SAAV v širokém pažení, (vpravo) Měřený tvar senzoru a osa šroubovice

Příspěvek (Abdoun *et al.* 2007a) popisuje konstrukci a princip senzoru SAA, přičemž v závěru porovnává výsledky monitoringu pomocí senzoru SAA a manuální inklinometrické sondy ve dvou obdobích. V červnu roku 2006 byl 22 m dlouhý senzor instalován na lokalitě v Kalifornii v místě aktivního sesuvu ve vzdálenosti přibližně 1 m od vrtu proměřovaného transversální inklinometrickou sondou. Pouze graficky jsou prezentovány ohybové čáry po jednom a pěti měsících měření. Z grafů je patrná podobnost trendu u obou druhů měření. Maximální rozdíl mezi oběma měřidly dosahuje přibližně 1 mm, při maximální velikosti deformace 4 mm oproti počátečnímu stavu. Autoři se blíže nezmiňují, jakým způsobem experiment probíhal, konkrétně jakým způsobem bylo provedeno současné měření oběma metodami. Po devíti měsících jsou autorem znovu prezentovány výsledky monitoringu (Abdoun *et al.* 2009). Měřené deformace byly relativně malé, a to vlivem období sucha se soustavným poklesem hladiny podzemní vody. Při deformacích do 10 mm vykazují obě metody podobný trend. Křivky profilů SAA a inklinometrické sondy se dále kopírují s maximální odlehlostí 2 mm při velikosti deformace cca 7 mm. Transversální inklinometrická sonda detekovala smykovou plochu v hloubce 5 metrů pod povrchem, senzor SAA přibližně o 30 cm hlouběji. Vzhledem k délce sondy 0,5 m a délce segmentu senzoru SAA senzoru 0,3 m je tento rozdíl zanedbatelný. Dosažené výsledky odpovídají očekávané přesnosti SAA a inklinometrické sondy (Measurand 2014, Mikkelsen 2003).



Obr. 3.10 Grafické srovnání SAA a inklinometrické sondy (vlevo - Abdoun et al. 2009 - vlevo; vpravo - Bennett et al. 2009)

Dále Abdoun et al. (2008) prezentuje porovnání hodnot měřených senzorem SAA s hodnotami měřenými potenciometrem, sklonoměrem a akcelerometrem během experimentu simulujícího vliv zemětřesení na ztekucení půdy. Dvojice 7 metrů dlouhých senzorů SAA, z nichž každý je složen z 24 segmentů, byla použita pro měření deformací kontejneru tvořeného soustavou soustředných prstenců a naplněného pískem a vodou během uměle vyvolaných vibrací. Autoři graficky prezentují srovnání hodnot bočního posunu kovových skruží sledovaných nezávisle pomocí potenciometru a SAA. Při velikosti posunů až 300 mm jsou odchylky mezi oběma metodami řádově v jednotkách mm. Výsledky experimentu mimo jiné naznačují, že při řádově větších deformacích senzoru může docházet k výraznému poklesu přesnosti senzoru.

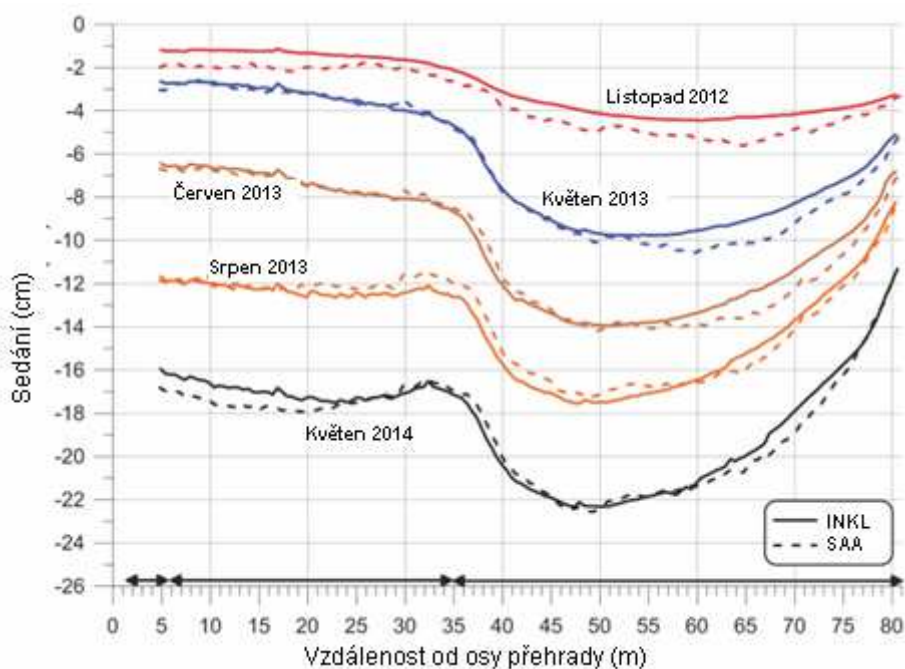
V textu (Lipscombe et al. 2013) jsou prezentovány mimo jiné i výsledky současného monitoringu senzorem SAA a manuální inklinometrickou sondou při sledování náklonů pažících zdí. V části textu autoři graficky prezentují výsledky měření ve dvou vertikálních profilech vzdálených od sebe 1,25 m. Z mřížky grafu lze vypočítat rozdíly v průběhu křivek měřených profilů SAA a transversální inklinometrické sondy okolo 2 mm. V některých úsecích ohybové čáry je však patrný rozdílný průběh obou profilů, který autor vysvětluje různou deformací pažení v závislosti na poloze profilu. Výsledky tohoto experimentu ukazují na komplikovanost srovnání senzoru SAA a klasické inklinometrie

v polních podmínkách, neboť i ve vzájemně si velmi blízkých profilech může deformace výstroje probíhat rozdílným způsobem.

Podobné srovnání nabízí Rollins et al. (2009), který navíc do srovnání zahrnuje i výsledky potenciometrických měření. Experiment je proveden na bočně zatížené pilotě. Sledovaný profil je 13 m hluboký, avšak senzor SAA je instalován pouze do hloubky 7,3 m. Porovnání je proto možné pouze na tomto úseku. Z grafického znázornění výsledků je patrná shoda mezi inklinometrickým měřením a SAA, křivky se vzájemně kopírují s maximální odlehlostí do 2 mm (tuto hodnotu autor uvádí i v závěru). Potenciometrickým měřením jsou sledovány pouze dva koncové body řetězce. Rozdíly v poloze takto sledovaných bodů se, dle autora, liší průměrně o 2,3 mm. Autor uvádí apriorní přesnost použitých zařízení 1,25 mm/30 m pro inklinometr, 1,5 mm/30 m pro SAA a 0,25 mm pro strunový potenciometr. Maximální hodnota odlehlosti mezi senzorem SAA a inklinometrickou sondou 2 mm odpovídá meznímu rozdílu měření vypočtenému na základě výše uvedených charakteristik přesnosti obou metod, tj. 2,0 mm. Je třeba počítat s tím, že hodnota přesnosti uvedená pro inklinometr, je silně podhodnocená, neboť podle Mikkelsena (2003) hodnota 1,25 mm/30 m zahrnuje pouze vliv náhodných chyb měření. Mimoto takovéto porovnání odráží i skutečné rozdíly v deformacích jednotlivých pažení, neboť inklinometrická sonda a senzor SAA nemohou používat tu samou výstroj.

Problémem měření sedání 112 m vysoké sypané přehradní hráze se zabývá Smith (2015). Během výstavby přehrady byl do jejího tělesa zabudován senzor SAA společně s výstrojí pro inklinometrickou sondu. Oba horizontální profily byly umístěny v těsné blízkosti, aby bylo možné konfrontovat měřené vertikální deformace. Délka senzoru SAA byla 76 metrů a totožná byla délka profilu měřeného inklinometrickou sondou. Autor odhaduje náhodnou chybu měření na konci profilu na 2,4 mm (směrodatná odchylka pro 50 metrových úseků je 1,4 mm a narůstá s odmocninou počtu proměřovaných úseků). Konstatuje, že systematické chyby nemohou být během měření a zpracování zcela odstraněny a že mohou dosáhnout i vyšších hodnot. Na základě výrobcem deklarované přesnosti senzoru SAA $\pm 1,5$ mm/32 m počítá autor s přesností měření senzorem $\pm 2,3$ mm na konci profilu. Rozdíly mezi deformacemi určenými SAA a inklinometrickou sondou nepřesáhly ± 10 mm při maximální deformaci v poslední etapě měření o velikosti 220 mm (obr. 3.11). Autor uvádí, že je to hodnota akceptovatelná při sledování sedání takto vysoké přehradní hráze, ale dále uvedené rozdíly nehodnotí. Jestliže vypočteme mezní rozdíl na základě uvedených hodnot přesnosti, dostaneme hodnotu 10,0 mm pro rozdíl měření inklinometru a SAA resp. 14 mm pro rozdíl měřených

deformací platný pro koncový segment řetězce. Jak je vidět, zjištěné rozdíly mezi měřeními oběma metodami jsou konzistentní s jejich odhadovanou přesností.

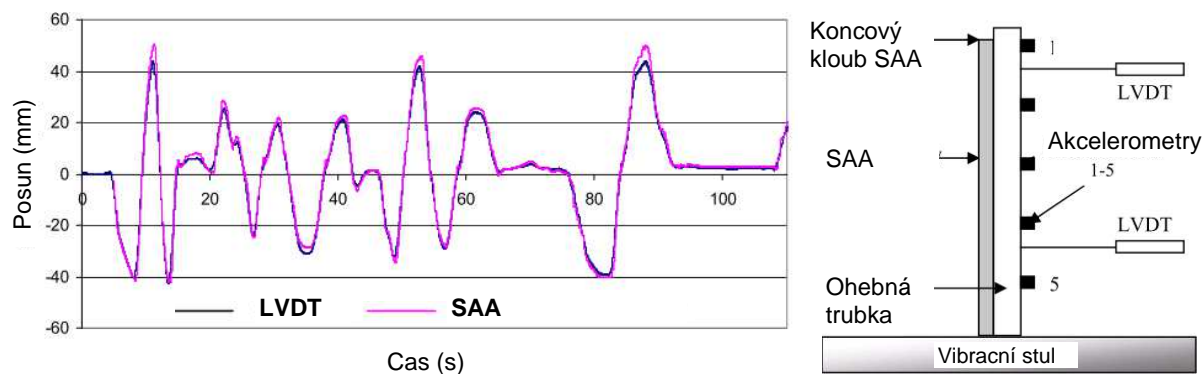


Obr. 3.11 Rozdíly mezi velikostí sedání měřeném senzorem SAA a transversální inklinometrickou sondou (Smith 2015)

Primárním cílem výše uvedených publikací nebylo testování přesnosti senzoru, přesto bylo na základě publikovaných výsledků možné vyvodit množství informací, které přesnost senzoru ilustrují. Následující práce se již primárně zabývají testováním senzoru SAA.

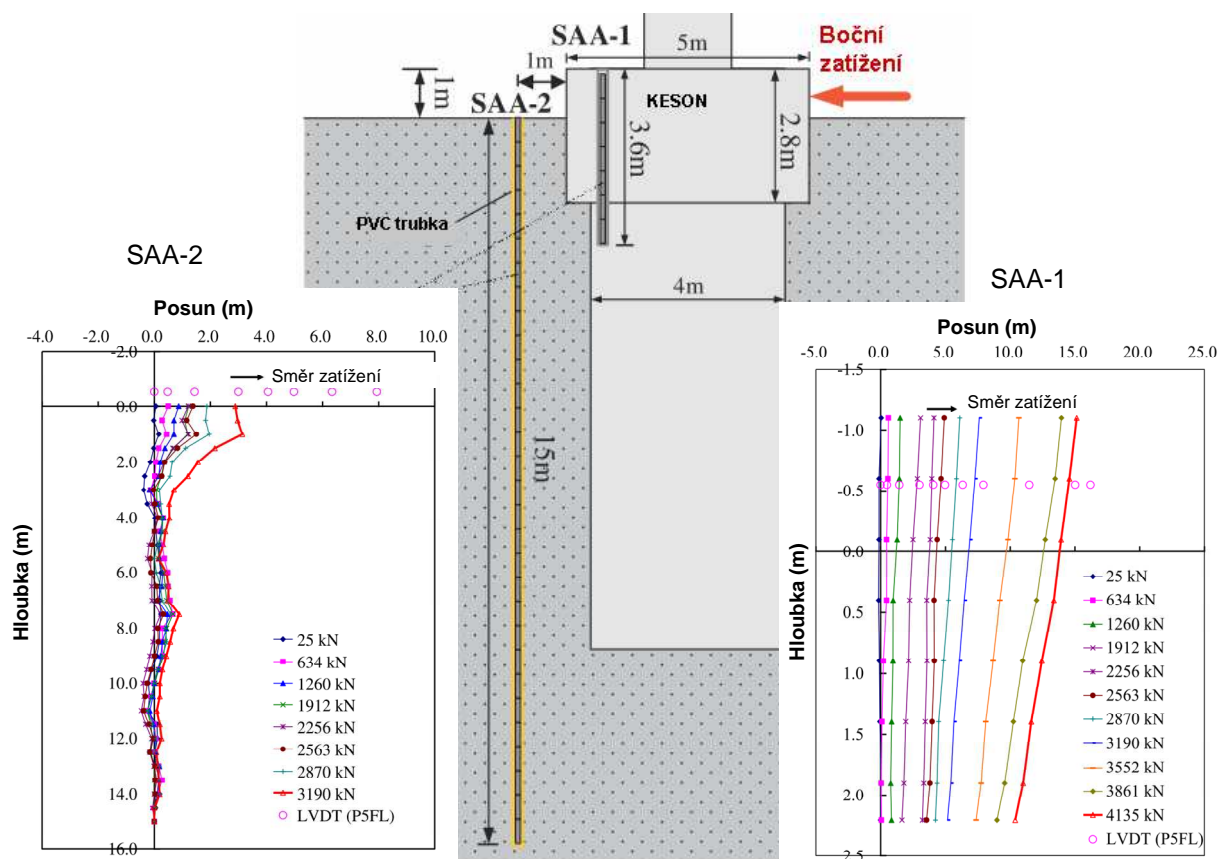
Abdoun et al. (2005b) prezentuje vývoj systému SAA jako „low-cost“ IPI monitoringu. Autor shrnuje výsledky prvotních laboratorních testů prototypu senzoru, které mají dokazovat, že senzor je schopen kontinuálního měření vibrací a deformací půd do hloubky několika metrů. Autor prezentuje výsledky experimentů provedených na prvním prototypu senzoru SAA, 1,5 metru dlouhém řetězci složeném z pěti segmentů, který je testován na vibračním stole (obr. 3.12 vpravo). Porovnávají jsou výsledky měření zrychlení s měřením akcelerometrickými senzory a výsledky měření horizontálních deformací senzoru v porovnání s posuny určenými pomocí LVDT snímačů. Posuny stolu byly realizovány s frekvencí 0,5 Hz, každá registrovaná hodnota je průměrem z 200 odečtů SAA. Při velikosti deformací řádově v desítkách mm se rozdíly mezi LVDT a SAA pohybují maximálně v jednotkách milimetrů. Z prezentovaných grafických výsledků je zřejmé, že k maximálním rozdílům mezi LVDT a SAA dochází při extrémních

krátkodobých výchylkách (obr. 3.12 vlevo). Celkově jsou autorem srovnávána data o relativně vysoké frekvenci – o několik řádů vyšší než je frekvence odečtů používaná při většině aplikací.



Obr. 3.12 Experiment provedený na prototypu senzoru SAA (Abdoun et al. 2005b): (vlevo) Výsledky srovnání SAA a LVDT; (vpravo) Schéma experimentu s vibračním stolem

Také v další publikaci jsou výstupy ze senzoru SAA porovnávány s měřením LVDT snímači (Chiou 2012). V rámci zátěžového testu na kesonovém základu starého železobetonového mostu jsou sledovány a modelovány horizontální posuny vyvolané bočním zatížením kesonu. Horní část kesonu byla během experimentu vychýlena až o 15,5 mm. Při experimentu byly použity dva senzory SAA, oba byly instalovány vertikálně jeden do 15 dlouhé PVC trubice 1 m od kesonu. Druhý SAA byl umístěn přímo uvnitř horní části piloty, do vyvrtaného otvoru o délce 3,6 m. Publikace sice není primárně cílena na určení přesnosti senzoru SAA, z výsledků provedeného experimentu je však možné vyčíst zajímavé informace o přesnosti a citlivosti senzoru během krátkodobých měření. Výsledky poskytují jednak srovnání s hodnotami měřenými snímači LVDT a jednak je z nich možné vyzkoušet reakci senzoru na minimální deformace. Odezva země byla menší než odezva kesonu, proto senzor SAA-2 naměřil nižší hodnoty deformace. Senzor SAA-1 registroval již první pohyb o velikosti 0,6 mm na konci 6. segmentu, LVDT snímačem byl detekován posun 0,5 mm. Z grafu je zřejmý výskyt systematické složky, a tak rozdíly od počátečního nulového čtení narůstají až na 1,5 mm při maximální deformaci (obr. 3.13). Tato systematická chyba je pravděpodobně způsobena chybou v určení posunu paty senzoru, jejíž poloha se v důsledku vyklánění piloty také mění. Předpokládaný posun paty senzoru je pak odvozen z modelu chování piloty. Rozdíly mezi velikostí posunů registrovanými LVDT a SAA mezi sousedními etapami jsou přibližně na úrovni 0,1 – 0,2 mm (tj. 0,4 – 0,8 mm/segment). Takovéto hodnoty jsou konzistentní s výsledky laboratorních testů uvedenými v kapitole 4.4.



Obr. 3.13 Experiment s bočním zatížením mostní piloty (Liu 2019)

Publikace (Danisch *et al.* 2008) popisuje experiment založený na umělém vyvolání posunu a jeho sledování pomocí SAA, RTS (robotické totální stanice) a GPS. Hlavním cílem experimentu je podle autora demonstrovat možnosti použitých metod a možnosti jejich propojení v integrovaném systému sledování deformací. Senzor skládající se z osmi segmentů délky 0,362 mm byl umístěn horizontálně na betonovém pilíři, přičemž jeho koncový bod byl fixován k teleskopické výtyčce upevněné ve stativu, na jejímž vrcholu byly umístěny GPS anténa a odrazný hranol. V blízkém okolí, byly podobným způsobem osazeny další dva referenční body. V průběhu experimentu byly na segmentech 1, 3 a 5 umístěny odrazné hranoly pro měření pomocí RTS (obr. 3.14). Poté byly provedeny následující deformace a posuny: a) horizontální deformace řetězce mezi segmenty 3 a 4 o velikosti 32 mm; b) posun totální stanice a GPS o 6 mm horizontálním směrem; c) vertikální posun koncového bodu řetězce (č. 8) spolu s odrazným hranolem a GPS anténou o 20 mm. Ve výsledcích je uvedena tabulka porovnávající očekávanou hodnotu svislého (c) a horizontálního (a) posunu s hodnotami svislého posunu určenými zmíněnými metodami. Technologií SAA byl určen svislý posun

19 mm, pomocí RTS posun 20 mm a metodou GPS posun 19 mm. Vodorovný posun nebyl senzorem registrován, současně se dle uvedené tabulky vyvolaná deformace řetězce neprojevila ve změně vertikální souřadnice žádného z kloubů řetězce v takové míře, aby ovlivnila výsledky uváděné v jednotkách milimetrů. Z textu není uvedeno, jak a s jakou přesností byly deformace vyvolány. Vyvolání vertikální deformace pomocí posunu na výtyčce s milimetrovým dělením odpovídá použité přesnosti výstupů v jednotkách milimetrů. Závěrem autor uvádí, že SAA je schopné měřit deformace s milimetrovou přesností, což je sice pravděpodobné, ale z tohoto experimentu to jednoznačně nevyplývá. Celkově tato publikace nepřináší nové informace ohledně přesnosti senzoru SAA. Publikované výsledky odpovídají přesnosti, jakou lze od senzoru očekávat na základě hodnot uvedených v technické specifikaci. Kontinuální měření RTS a GPS trvalo více než 24 hodin, autor se v textu nezmiňuje o tom, zda odečítání senzoru SAA probíhalo po celou dobu experimentu nebo jen bezprostředně před a po vyvolané deformaci. Zajímavé by bylo sledovat vývoj dat měřených senzorem v závislosti na měnících se klimatických podmínkách, které byly - dle publikovaných fotografií - relativně extrémní.



Obr. 3.14 Umístění jednotlivých zařízení během experimentu s SAA, RTS a GPS (Danisch et al. 2008)

Zajímavé je srovnání, které přináší Beran et al. (2014). Autor srovnává senzor SAA v přibližně vertikální instalaci s automatizovaným měřením robotickou totální stanicí.

Senzor SAA skládající se z osmi segmentů o délce 0,5 m byl v předstihu dvou měsíců umístěn ve volně stojící ocelové trubce o délce 4 metry stabilizované v betonovém základu. Sledovány byly deformace trubky způsobené cyklickými změnami teploty. Během měření pomocí SAA byl zjištěn maximální posun vrcholového bodu o 2 mm převážně v severojižním směru. Na základě znalosti přibližné velikosti pohybů byla zvolena metoda kontrolního měření pomocí robotické totální stanice Leica TCA s úhlovou přesností 3^{cc}. Přístroj byl umístěn tak, aby záměrná přímka byla přibližně kolmá na směr maximálních deformací. Na trubce a v jejím okolí byly umístěny kontrolní body signalizované minihranoly. Současné měření oběma systémy probíhalo po tři dny v průběhu dne i noci. Měření byla opravena o vliv teploty měřené s přesností 0,06 °C. Měření totální stanicí bylo provedeno vždy ve 3 skupinách, přičemž měření jedné etapy trvalo 30 minut. Sběr dat pomocí SAA trval pouze 10 minut, ale počátek měření byl pro obě metody vždy stejný. V článku jsou publikovány grafy pohybu vrcholového bodu ve směru sever – východ srovnávající výsledky měření SAA a RTS. Z grafu je patrné, že trend pohybu, zaznamenaný oběma metodami, je stejný. Dále jsou publikovány grafy srovnávající naměřené posuny v čase. Směrodatná odchylka rozdílů posunů mezi SAA a RTS byla ve všech případech menší než 1 mm (tab. 3.2).

Tab. 3.2 Směrodatná odchylka posunů SAA vzhledem k měření RTS (Beran et al. 2014) a směrodatné odchylky přepočtené na jeden segment řetězce

	σ_x	σ_{x0}	σ_y	σ_{y0}
Koncový bod	0,30 mm	0,11 mm	0,25 mm	0,09 mm
Koncový bod	0,49 mm	0,17 mm	0,60 mm	0,21 mm
Prostřední bod	0,26 mm	0,13 mm	0,24 mm	0,12 mm
Prostřední bod	0,17 mm	0,09 mm	0,23 mm	0,12 mm

Z uvedené rešerše dostupné literatury je zřejmé, že i když byl senzor SAA použit v mnoha aplikacích, nebyly dosud publikovány výsledky testování, které by přesně definovaly charakteristiky přesnosti senzoru. Jedinou publikací, ve které byly číselné hodnoty charakteristik přesnosti nějakým způsobem určovány a prezentovány, je Beran et al. (2014). Zde je ale přesnost hodnocena komparační metodou, která není významně přesnější, jak by bylo vhodné. Zároveň zde hraje neznámou roli způsob umístění senzoru v PVC trubce, jelikož obal může mít značný vliv na přenos deformací mezi trubkou a měřidlem. Důležitým přínosem této publikace je informace o vztahu mezi změnami teploty a přesností měření senzoru umístěném v platové trubce, totiž že ani při

několikanásobně vysokých teplotních výkyvech, než k jakým běžně dochází v podmínkách vrtů, jsou měření stále konzistentní a směrodatné odchylky měření nedosahují nijak extrémních hodnot.

II. ŘEŠENÉ PROBLÉMY

4. Testování senzoru v laboratorních podmínkách

Celá řada prací se zabývala problematikou použití senzoru SAA, přičemž převážná část titulů se snaží ukázat funkčnost systému v různých situacích a pro konkrétní účel a demonstrovat tak jeho použitelnost jako automatického monitorovacího zařízení. V případě polních experimentů pak s porovnáním s referenční metodou (nejčastěji klasickou inklinometrií) dokázat, že takto získané výsledky jsou srovnatelné s doposud používanými postupy. Zvolené referenční metody však většinou měly pouze srovnatelnou přesnost a nejsou tak vhodnou srovnávací metodou k určení přesnosti senzoru. Celkově bylo provedeno minimum experimentů, které popisují přesnost senzoru pomocí směrodatných odchylek.

Senzor testovaný v rámci této práce je variantou SAAF, jedná se tedy o variantu, kde jsou každým mikroprocesorem zpracovávána data z 8 segmentů. Tato polní varianta senzoru obecně není schopna vysokofrekvenčních měření. Mimoto problematika přesnosti vysokofrekvenčních měření byla již řešena v několika publikacích a byla předmětem poměrně obsáhlého testování (Hendry et al. 2011, Hendry et al. 2013, Abdoun et al. 2005). Frekvence prováděných měření během testování byla obecně taková, aby umožňovala změnu tvaru senzoru nebo vyvolání určitých deformací. V zásadě nebyla frekvence prováděných deformací při laboratorním testování nikdy vyšší než 0,1 Hz. Většinou se pohybovala v rozmezí 0,03 – 0,01 Hz. Prováděná měření lze vzhledem k výše uvedenému charakterizovat jako krátkodobá experimentální nízkofrekvenční měření v laboratorních podmínkách.

Navržené testy měly za cíl stanovit charakteristiky přesnosti měření senzoru při třech základních způsobech instalace, tj. vodorovné, svislé a kombinované (kruhové) instalaci. Senzor SAA by měl mít dle výrobce stejnou přesnost ve všech směrech, otázkou však je jejich kalibrace. SAA senzor byl kalibrován pro vertikální (3D) polohu a horizontální (2D) polohu odděleně. Dalším faktorem může být potenciálně odlišné chování kloubních spojů důsledku různého namáhání při vertikální a horizontální poloze řetězce. Testována byla přesnost měřené deformace, tedy přesnost změny tvaru řetězce, nikoli jeho absolutní tvar. V první fázi experimentu byla testována přesnost samotného zařízení bez vlivu zapouzdření, k němuž se používá PVC trubky o průměru 27 mm. V další fázi bylo pak obdobné testování provedeno se senzorem instalovaným v PVC opláštění. Testování senzoru v kruhové instalaci nebylo provedeno pro přílišnou tuhost PVC opláštění.

Vzhledem k charakteru testovaného zařízení nebylo jednoduché nalézt vhodnou referenční metodu, neboť očekávaná přesnost celého senzoru se i na konci řetězce pohybuje pod 1 mm (Measurand 2011). Situaci navíc komplikuje skutečnost, že na senzoru nejsou viditelné žádné referenční body, které by bylo možné sledovat ať už geodeticky, nebo fotogrametricky. Ocelový oplet celého senzoru tedy prakticky znemožňuje absolutní testy určující okamžitý tvar senzoru (obr. 3.2a,d). Vzhledem k tomu, že hlavním smyslem senzoru je určování deformací, tedy změn jeho tvaru, nebyl tento fakt až tak limitující.

Při experimentech byl testován senzor SAA o délce 15,250 m tvořený 50 segmenty dlouhými 305 mm. Každý ze segmentů je osazen trojicí triaxiálních MEMS akcelerometrů. Celý řetězec je rozdělen na části po 8 segmentech (oktety), z nichž každý je vybaven mikroprocesorem a teplotním senzorem. Přesná délka každého ze segmentů je uvedena v kalibračním protokolu. Přesnost senzoru je v této práci reprezentována směrodatnou odchylkou vztahenou k jednomu segmentu σ_0 . Směrodatná odchylka měření na n-tém segmentu řetězce byla vypočtena jako $\sigma_0 \cdot \sqrt{n}$. Pro směrodatnou odchylku jednoho segmentu, určenou na základě hodnot měřených na posledním segmentu přístroje platí $\sigma_0 = \sigma / \sqrt{50}$. Jednotlivé segmenty jsou vyráběny stejným technologickým postupem a pro jejich osazení jsou používány stejné MEMS akcelerometry, proto je odůvodněné předpokládat, že měření na každém segmentu je zatíženo chybami stejnou měrou a lze je tedy charakterizovat jednou směrodatnou odchylkou.

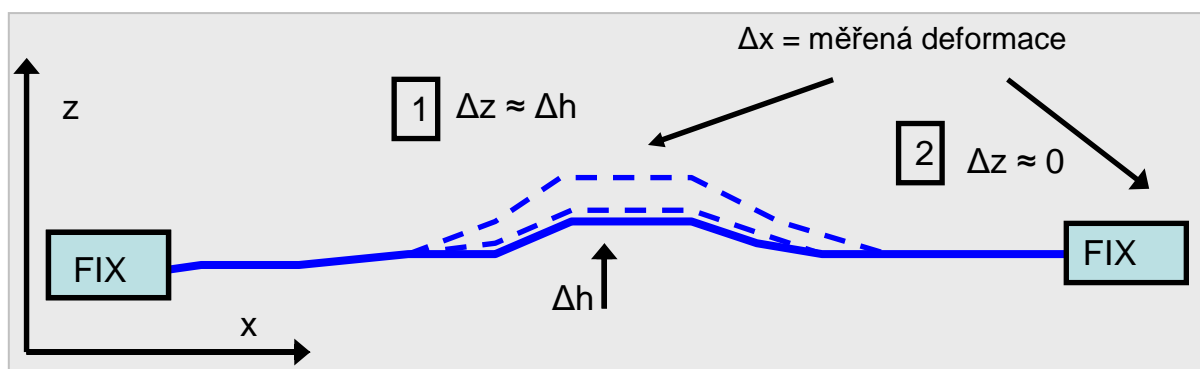
4.1. Horizontální test senzoru bez PVC opláštění

Pro vyhodnocení přesnosti senzoru při horizontální instalaci byl proveden následující experiment. Základní princip experimentu byl takový, že oba koncové segmenty senzoru byly fixovány a mezilehlé segmenty byly volné. Pohybem volných segmentů řetězce byly vyvolávány deformace senzoru. Sledovány byly jednak absolutní hodnoty posunů jednotlivých segmentů, jednak neměnnost polohy koncových (fixovaných) segmentů senzoru, dále pak závislost chyb měření na velikosti vyvolané deformace (Balek et al. 2016).

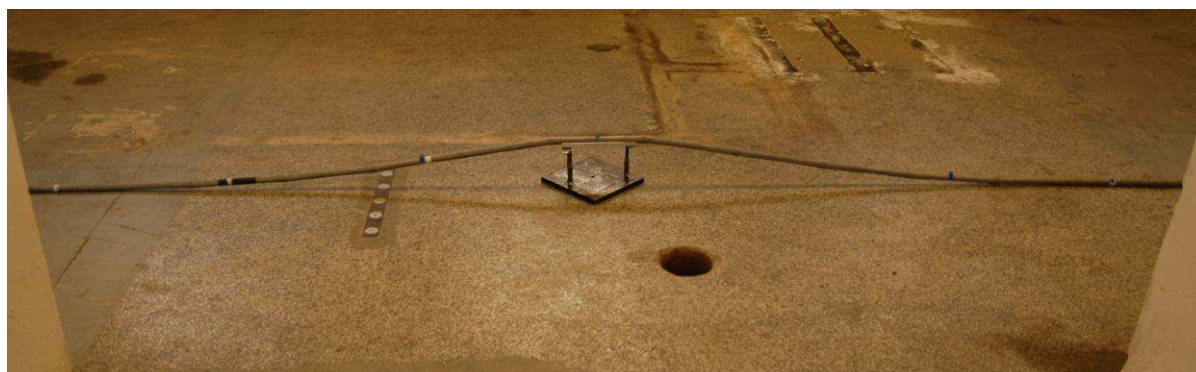
Senzor byl během experimentu umístěn na přibližně vodorovném soudržném povrchu z broušeného betonu (obr. 4.2). Počáteční a koncové segmenty přístroje byly po dobu experimentu stabilizovány několika pytlí s pískem, aby se zamezilo jejich nežádoucím pohybům. Inklinometrický řetězec byl testován dvakrát v různé orientaci přístroje – s

pootočením o 90° (I. poloha, II. poloha). Při I. poloze směřovala značka „x-mark“ směrem vzhůru, při II. poloze senzoru směřovala vodorovným směrem. Během experimentu byla teplota přístroje konstantní – přibližně 19°C. V každé poloze bylo provedeno měření na 19/18 úsecích. Pomocí speciálního zvedáku byl konkrétní úsek senzoru zvednut o přesně danou vzdálenost danou stoupáním závitů bez změny jeho náklonu.

Nejprve bylo provedeno nulté měření ve výchozí poloze zvedáku. Dále byla měněna výška soupravy podle počtu otoček metrických závitů. 1x, 3x a 5x. Stoupání použitého závitu bylo 1,5 mm/otočka. Proměřovaný úsek byl tedy vždy zvednut o 1,5, 4,5 a 7,5 mm. Po každém kroku byla provedena registrace dat (průměrná hodnota z 1000 odečtů). Po ukončení experimentu bylo k dispozici 19x4/18x4 měřených hodnot pro obě testované orientace přístroje respektive 19x3/18x3 měřených posunů tj. 111 hodnot. Pro účely experimentu byly hodnoty zdvihů odvozené ze stoupání závitů (Δh) považovány za bezchybné. Odchyly od těchto hodnot byly považovány za skutečné chyby (obr. 4.1).



Obr. 4.1 Schéma provedení experimentu v horizontální poloze senzoru (Δh - hodnota vyvolané vertikální deformace, Δz - senzorem měřená hodnota vertikální deformace, FIX – fixované části senzoru)



Obr. 4.2 Článek inklinometrického řetězce uložený v kolejnici, zdvihané trojicí šroubů

4.1.1 Vyhodnocení dat ze zdvihaných úseků

Testování byla provedena pouze pro vertikální souřadnici z porovnáním s absolutními hodnotami zdvihů určenými z otáček šroubů zvedáku Δh (obr. 4.1). Pro výpočet charakteristik přesnosti byla použita data ze zdvihaného úseku, konkrétně výšky středu zdvihaného úseku vypočtené aritmetickým průměrem z výšek sousedních kloubů (1). Z odchylek od daných hodnot byla vypočtena směrodatná odchylka změny výšky středu n -tého segmentu (2). Její hodnota se rovná hodnotě směrodatné odchylky souřadnice z n -tého kloubu řetězce - počáteční kloub $n=0$ (3). Poté byla pro každý zdvihaný segment vypočtena směrodatná odchylka pro jeden segment řetězce (4). Z těchto směrodatných odchylek byla kvadratickým průměrem vypočtena výsledná hodnota směrodatné odchylky σ_0 : $^I\sigma_0 = 0,040 \text{ mm}$, v poloze II. $^II\sigma_0 = 0,036 \text{ mm}$. Dále byla pomocí Fisherova testu ověřena nulová hypotéza $H_0: ^I\sigma_0 = ^II\sigma_0$ o shodné přesnosti měření v obou polohách senzoru (5). Testování bylo provedeno na hladině významnosti $\alpha = 0,05$, přičemž vypočtená hodnota testovacího kritéria byla porovnána s kritickou hodnotou pro F-test (Anděl 1998). Výsledkem Fisherova testu bylo potvrzení nulové hypotézy ($F = 1,231 < F_{0,975} = 1,667$). Průměrná hodnota směrodatné odchylky zjištěná při experimentu je tedy $\sigma_0 = 0,036 \text{ mm}$.

$$\bar{z} = \frac{z_i + z_{i-1}}{2} \quad (1)$$

$$\sigma_{\Delta\bar{z}} = \sqrt{\frac{[vv]}{n}} \quad \text{kde} \quad v = \Delta h - \Delta\bar{z}; \quad \Delta\bar{z} = \bar{z} - \bar{z}_0; \quad \Delta h = h - h_0; \quad (2)$$

$$\sigma_z = \frac{\sqrt{2} \cdot \sigma_{\Delta\bar{z}}}{\sqrt{2}} = \sigma_{\Delta\bar{z}} \quad (3)$$

$$\sigma_0 = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (4)$$

kde: \bar{z} ...vertikální souřadnice středu zdvihaného určená senzorem

$\Delta\bar{z}$... změna vertikální souřadnice vyvolaná zdvihem a detekovaná senzorem

Δh ... změna výšky kolejnice zvedáku odvozená z otáček šroubů

$\sigma_{\Delta\bar{z}}$...směrodatná odchylka určení změny výšky středu úseku

σ_z ...směrodatná odchylka vertikální souřadnice z

n ... pořadí kloubu řetězce od počátku (počátek $n=0$)

Byly také určeny směrodatné odchytky charakterizující přesnost určení souřadnice z v závislosti na velikosti deformace (tab. 4.1). Ačkoli směrodatné odchytky s velikostí deformace mírně narůstají, vzhledem velikosti rozdílu a vzhledem k relativně malému počtu nadbytečných měření se však rozdíly jeví jako nevýznamné. Pomocí F-testu byla ověřována hypotéza $H_0: \sigma_{1,5} = \sigma_{7,5}$. Výsledkem bylo potvrzení nulové hypotézy ($F = 1,362 < F_{0,975} = 1,875$). Uvedený experiment tak neprokázal nárůst směrodatné odchytky s velikostí deformace.

$$F = \frac{s_1^2}{s_2^2} \quad \text{kde } s_1^2, s_2^2 \text{ jsou rozptyly výběrových souborů} \quad (5)$$

Tab. 4.1 Přesnost určení vertikální souřadnice kloubu v závislosti na velikosti deformace

deformace (mm)	1,50	4,50	7,50
σ_0 V poloze I. (mm)	0,038	0,036	0,044
σ_0 V poloze II. (mm)	0,032	0,036	0,040
σ_0 I a II (mm)	0,036	0,036	0,042

Dále byla pomocí jednovýběrového T-testu ověřena hypotéza o střední hodnotě souboru rozdílů od referenčních hodnot v (2),(6). Platí nulová hypotéza ($t = 0,065 < t_{0,975} = 1,983$), tedy střední hodnota souboru rozdílů μ je rovna 0 ($H_0 = 0$), což znamená, že mezi hodnotami zvedáku a měřeními senzoru není systematická odchylka.

$$t = \frac{|x - \mu|}{\sqrt{\frac{s^2}{n}}} \quad \text{kde: } \begin{array}{l} x - \text{střední hodnota výběru} \\ \mu - \text{střední hodnota základního souboru} \\ s^2 - \text{rozptyl výběrového souboru} \\ n - \text{počet členů výběrového souboru} \end{array} \quad (6)$$

4.1.2 Vyhodnocení dat z fixovaného koncového kloubu řetězce

Přesnost senzoru byla odvozena také z dat registrovaných na koncovém (fixním) segmentu senzoru (tab. 4.2). Odhad byl proveden dvěma způsoby: **(A)** Byly uvažovány pouze změny souřadnice z způsobené výzdvihem segmentů pomocí otáček zvedáku. Takto určená směrodatná odchylka odráží pouze vliv relativně malých deformací pole (1,5 - 7,5 mm). **(B)** Byly uvažovány i změny z souřadnice vyvolané změnami polohy zvedáku. Směrodatná odchylka potom odráží také vliv větších deformací způsobených změnou polohy zvedáku (deformace přibližně 150 mm).

Tab. 4.2 Směrodatná odchylka vertikální souřadnice koncového kloubu senzoru (A-deformace vyvolané šrouby zvedáku, B-deformace vyvolané změnou polohy zvedáku)

	A	B
σ_0 v poloze I (mm)	0,031	0,081
σ_0 v poloze II (mm)	0,032	0,089
Testovací kritérium (F)	1,056	1,207
Kritická hodnota ($F_{0,975}$)	1,590	1,703
σ_0 (mm)	0,032	0,085

Hodnoty směrodatných odchylek v tabulce výše opět ukazují na identickou přesnost senzoru v obou testovaných orientacích. Tento předpoklad byl ověřen pomocí F-testu, kdy byla v obou případech potvrzena nulová hypotéza ($H_0: \sigma_0 = \sigma_0$). Směrodatná odchylka určení souřadnice z byla určena, jednak porovnáním s danými hodnotami $\sigma_0 = 0,038$ mm, jednak z dat registrovaných na fixovaném posledním fixovaném úseku $\sigma_0 = 0,032$ mm. Pomocí Fisherova testu byl potvrzen předpoklad, že oběma metodami testování byla určena shodná přesnost senzoru ($F = 1,410 < F_{0,975} = 1,414$). Vyvolání řádově větších deformací vedlo k významnému snížení přesnosti $\sigma_0 = 0,085$ mm.

Výrazně nižší přesnost senzoru při větších deformacích řetězce, by mohla být způsobena větším namáháním flexibilních spojů. V případě rozměrové stálosti spojů by nebyl důvod k tak výraznému poklesu přesnosti, protože poloha segmentů řetězce není určována z úhlů v lomových bodech řetězce, ale přímo vzhledem ke směru tíhového zrychlení. Zároveň se ukázalo, že přesnost senzoru určená na základě měření na zdvíhaných úsecích a přesnost senzoru určená z měření na fixovaném koncovém segmentu řetězce byla shodná. To ukazuje na minimální nepřesnost ve velikosti vertikálních deformací vytvářených pomocí zvedáku.

4.2. Horizontální test s PVC opláštěním

Test v horizontální poloze senzoru v PVC opláštění byl proveden obdobným způsobem jako test samotného senzoru v kapitole 4.1. Opláštění bylo rozměřeno tak, aby bylo možné zvedák umístit vždy mezi dvěma sousedními klouby – ve středu úseku. Měření byla opět provedena ve dvou na sebe kolmých orientacích senzoru I a II. Konce řetězce byly stejně jako v předchozím testu fixovány několika pytli s pískem. Oproti předešlému testování byly výzdvihy provedeny ve větším počtu kroků tak, aby bylo možné lépe odhadnout závislost přesnosti měření na velikosti deformace. Jednotlivé úseky byly zdvihnuty vždy o 1,5; 4,5; 7,5; 10,5; 13,5; 16,5 mm, a to pomocí shodného

zvedáku, který byl použit v předešlém testu. Z důvodu vyšší časové náročnosti byl snížen počet zdviháných úseků na 9. Po ukončení experimentu bylo k dispozici 9x7 měřených hodnot pro obě orientace přístroje. Vyhodnocení měřených dat bylo provedeno obdobným způsobem jako v případě testu bez PVC opláštění (1,2,3,4).

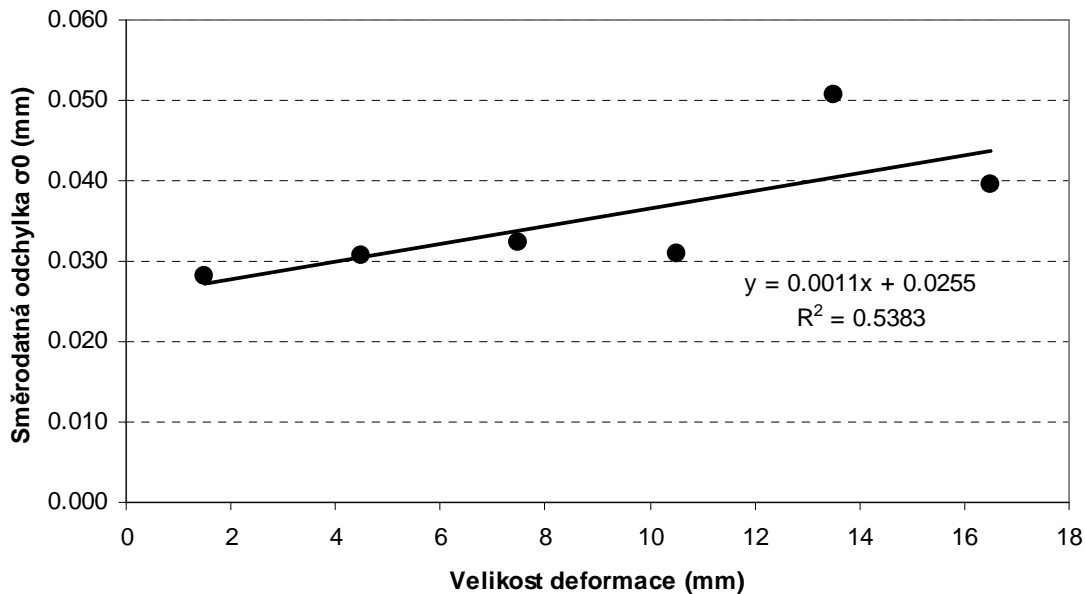
4.2.1 Vyhodnocení dat ze zdviháných úseků

V poloze I byla určena směrodatná odchylka ve vertikálním směru o velikosti $\sigma_0 = 0,036$ mm, v poloze II $\sigma_0 = 0,041$ mm, rozdíly mezi směrodatnými odchylkami jsou statisticky nevýznamné ($F = 1,297 < F_{0,975} = 1,699$). Průměrná hodnota směrodatné odchylky zjištěná při experimentu je $\sigma_0 = 0,039$ mm. Tato hodnota odpovídá hodnotě zjištěné při testování senzoru bez PVC opláštění ($\sigma_0 = 0,039$ mm). Při malých deformacích, kdy jsou flexibilní spoje řetězce minimálně namáhány, nemá instalace senzoru v horizontální poloze do PVC opláštění vliv na přesnost měřené vertikální souřadnice. Porovnání směrodatných odchylek v závislosti na velikosti deformace ukázalo mírný nárůst směrodatných odchylek se zvětšující se velikostí deformace (tab. 4.3, obr. 4.3).

Obdobným způsobem jako při experimentu bez PVC opláštění byla pomocí jednovýběrového T-testu ověřena hypotéza o střední hodnotě souboru rozdílů od referenčních hodnot $v(2),(6)$. Platí nulová hypotéza ($t = 0,792 < t_{0,975} = 1,982$), tedy střední hodnota souboru rozdílů μ je rovna 0 ($H_0 = 0$), což znamená, že mezi hodnotami zvedáku a měřeními senzoru není systematická odchylka.

Tab. 4.3 Závislost směrodatné odchylky na velikosti deformace

Deformace (mm)	1,50	4,50	7,50	10,5	13,5	16,5
σ_0 v poloze I. (mm)	0,026	0,032	0,021	0,035	0,050	0,040
σ_0 v poloze II. (mm)	0,030	0,029	0,037	0,028	0,051	0,037
σ_0 I a II (mm)	0,028	0,031	0,032	0,031	0,051	0,041



Obr. 4.3 Závislost směrodatné odchylky σ_0 na velikosti deformace

4.2.2 Vyhodnocení dat z fixovaného koncového kloubu řetězce

Tak jako v případě testu bez PVC opláštění bylo vyhodnocení provedeno dvěma způsoby: **(A)** Byly uvažovány pouze změny souřadnice z způsobené výzdvihem segmentů. Takto určená směrodatná odchylka odráží pouze vliv relativně malých deformací pole (1,5 – 16,5 mm). **(B)** Byly uvažovány i změny souřadnice z vyvolané změnami polohy zvedáku. Směrodatná odchylka souřadnice z koncového bodu potom odráží také vliv větších deformací řetězce způsobených změnou polohy zvedáku (deformace přibližně 150 mm).

Hodnoty směrodatných odchylek v následující tabulce ukazují v případě **A** prakticky identické hodnoty jako v případě testu bez PVC opláštění (tab. 4.2). Tato skutečnost potvrzuje logický předpoklad, že při minimálním namáhání spojů řetězce nezáleží na tom zda je senzor umístěn v ochranném opláštění nebo ne. Na variantě B je zřetelné, že v případě vyvolání řádově větších deformací dochází v případě použití ochranného opláštění k výraznému snížení směrodatných odchylek oproti testu bez opláštění.

Tab. 4.4 Směrodatná odchylka vertikální souřadnice koncového kloubu senzoru (A-deformace vyvolané šrouby zvedáku, B-deformace vyvolané změnou polohy zvedáku)

	A	B
σ_0 v poloze I (mm)	0,029	0,054 (0,029)
σ_0 v poloze II (mm)	0,032	0,034
Testovací kritérium (F)	1,218	2,522 (1,375)
Kritická hodnota ($F_{0,975}$)	1,645	1,641 (1,920)
σ_0 (mm)	0,031	0,034

I při tomto experimentu se potvrdilo, že senzor vykazuje při malých deformacích v obou polohách prakticky identickou přesnost $\sigma_0 = 0,039$ mm resp. **0,031** mm. Během vyhodnocení experimentu v I poloze senzoru vzniklo podezření z posunu koncového bodu senzoru. Soubor měřených hodnot byl v polovině rozdělen na dva podvýběry (první a druhá polovina původního výběru). Dále byla otestována shoda středních hodnot pomocí dvouvýběrového T-testu na hladině významnosti $\alpha = 0,05$. Hypotéza o shodě dvou výběrů byla jednoznačně zamítnuta ($T = 7,354 > T_{0,975} = 2,042$). Pomocí T-testu byl ověřen posun střední hodnoty během experimentu v I poloze senzoru, a to pravděpodobně v důsledku posunu koncového bodu senzoru, v první polovině experimentu ($s_1 = 0,049$ mm, $s_2 = 0,029$ mm). Hodnota směrodatné odchylky, testovací kritérium a kritická hodnota pro podvýběr č. 2 jsou uvedeny v závorkách (tab. 4.4).

Vezmeme-li v úvahu jen zdvihy 1,5, 4,5 a 7,5 mm tak, aby byla výsledná směrodatná odchylka porovnatelná s předchozím testem, vykazuje senzor umístěný v opláštění mírně nižší směrodatnou odchylku ($\sigma_0 = 0,030$ mm) než v případě testu bez opláštění ($\sigma_0 = 0,038$ mm). Na základě provedeného F-testu je rozdíl prokazatelný ($F = 1,604 > F_{0,975} = 1,433$).

Při vyhodnocení dat registrovaných na posledním (fixovaném) kloubu řetězce byla zjištěna prakticky identická směrodatná odchylka $\sigma_0 = 0,031$ mm jako při testu bez opláštění ($\sigma_0 = 0,032$ mm).

Senzor instalovaný v PVC opláštění vykazuje při malých deformacích (A) stejnou přesnost, jako senzor samotný. V případě vyvolání větších deformací (B), došlo instalací senzoru do plastového opláštění k výraznému navýšení přesnosti měření a to prakticky na hodnotu, která odpovídá směrodatné odchylce určené v A (tab. 4.4).

4.3. Vertikální test senzoru bez PVC opláštění

Podobně jako u testování senzoru v horizontální poloze bylo i testování ve vertikální poloze senzoru provedeno nezávisle dvěma způsoby. Jednak se jednalo o vyvolání deformace známé velikosti pomocí mikroposuvu, jednak o vyvolání deformace neznámé velikosti při vyhodnocení odchylek polohy fixovaných segmentů řetězce. Koncové segmenty senzoru byly fixovány ve schodišťové šachtě k ocelovým kotvicím prvkům zábradlí v místech křížení se schodišťovými rameny.

4.3.1 Vyvolání libovolné deformace

Během tohoto experimentu byly první a poslední segment řetězce pevně fixovány. Tvar řetězce byl mezi jednotlivými etapami měněn s výchyly až 150 mm. V každé z 15 etap měření byl 5x registrován průměr z 1000 měření. Odhad přesnosti byl založen na změnách souřadnic registrovaných na posledním (fixovaném) segmentu přístroje. Bez vlivu chyb přístroje by takto registrované hodnoty měly být konstantní a rozdíly mezi etapami by tudíž měly být nulové. Na základě změn souřadnic na posledním kloubu byly určeny tyto směrodatné odchylky vždy pro celý řetězec a pro jeden segment: $\sigma_x = 0,81$ mm ($\sigma_{x0} = 0,114$ mm) a $\sigma_y = 0,70$ mm ($\sigma_{y0} = 0,100$ mm) charakterizující přesnost průměru z 5000 měření.

Výsledky tohoto testu ukázaly na negativní vliv zatížení kloubů vahou snímače, které pravděpodobně způsobují nežádoucí pohyb v kloubech. Je pravděpodobné, že instalace přístroje v plastové trubce by tento problém eliminovala. Přesto přesnost měřené polohy dosáhla velmi zajímavé hodnoty $\sigma_p = 1,07$ mm ($\sigma_{p0} = 0,152$ mm).

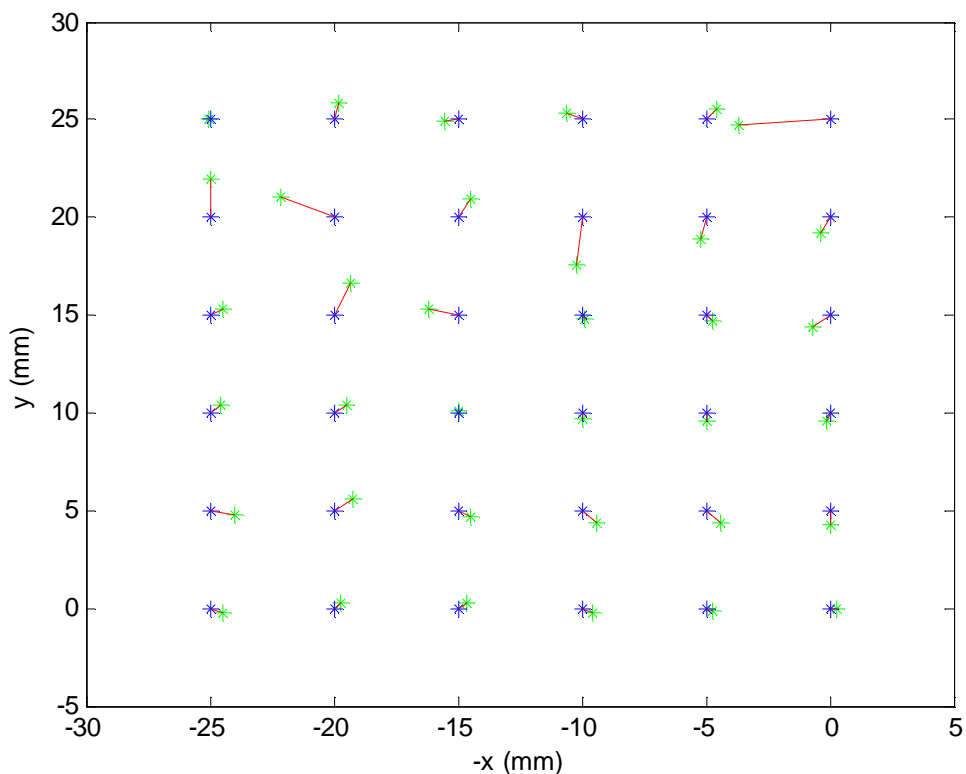
4.3.2 Vyvolání deformace známé velikosti

Tento experiment byl proveden podobně jako předchozí s tím rozdílem, že poslední segment nebyl fixován, ale upevněn k mikroposuvu (obr. 4.4) umožňujícímu pohyb od 0 do 25 mm ve dvou na sebe kolmých směrech. Předpokládaná přesnost čtení posunu je 0,05 mm (řádově větší než předpokládaná přesnost měření na konci řetězce).



Obr. 4.4 Mikroposuv pro vyvolání horizontálních posunů

Posuny byly realizovány v kroku 5 mm tak, že na ose y byla nastavena hodnota 0 mm a na ose x potom postupně hodnoty 0, 5, 10, 15, 20, 25 mm. Poté byl proveden posun na ose Y na hodnotu 5 mm a na ose X byly opět opakovány posuny jako v předchozím kroku. K dispozici byla tedy měření z 36 různých pozic resp. 35 posunů. Pro každou pozici koncového kloubu byl registrován 5x průměr z 1000 měření - odchylky mezi těmito hodnotami ukazují na stálost/opakovatelnost měření. Takto určené hodnoty posunů byly poté transformovány do souřadnicového systému mikroposuvu. Na následujícím obrázku jsou zobrazeny na mikroposuvu nastavené a senzorem určené hodnoty posunů (obr. 4.5).



Obr. 4.5 Nominální (modrá) a určené (zelená) posuny v horizontální rovině

V první fázi vyhodnocení byly porovnány velikosti zjištěných posunů. Stejně jako v předchozím testu se během vyhodnocení objevily zjevně hrubé chyby, a to konkrétně od 22. etapy měření. Pro další vyhodnocení byl tedy soubor rozdělen na dvě části (etapy 1 - 21 a úplný soubor). Při dalším hodnocení byly oba soubory hodnoceny odděleně. Hodnocení přesnosti bylo založeno na porovnání velikosti posunů určených měřením a nastavených na mikroposuvu. Tyto rozdíly byly považovány za skutečné chyby.

Z tohoto hodnocení vyšly následující charakteristiky přesnosti: směrodatná odchylka velikosti posunu $\sigma_p = 0,76$ mm, směrodatná odchylka pro jeden segment $\sigma_{p0} = 0,109$ mm. Pro částečný soubor prvních 21 měření byly však směrodatné odchylky značně odlišné: $\sigma_p = 0,38$ mm a $\sigma_{p0} = 0,055$ mm. Dále byly pomocí transformace metodou MNČ transformovány souřadnice ze senzoru na souřadnice dané na mikroposuvu. Takto byly určeny charakteristiky přesnosti pro oba vodorovné směry x,y. Pro celkový soubor dat byly stanoveny $\sigma_x = 0,84$ mm ($\sigma_{x0} = 0,120$ mm) a $\sigma_y = 0,77$ mm ($\sigma_{y0} = 0,110$ mm). Pro dílčí soubor hodnoty $\sigma_x = 0,38$ mm (**$\sigma_{x0} = 0,054$ mm**) a $\sigma_y = 0,32$ mm (**$\sigma_{y0} = 0,046$ mm**) platné pro průměr z 5000 měření. F-testem byla prokázána platnost nulové hypotézy o shodě směrodatných odchylek v obou svislých rovinách ($F = 1,378 < F_{0,975} = 2,409$).

Obdobné srovnání bylo provedeno také pro průměr z 1000 měření tak, aby bylo možné výsledky lépe porovnat s výsledky testů provedených v ostatních orientacích senzoru. Směrodatné odchylky uvedené v tabulce níže jsou kvadratickým průměrem ze směrodatných odchylek určených pro každý z pěti odečtů. Pro dílčí soubor hodnot byly určeny tyto směrodatné odchylky: $\sigma_x = 0,51$ mm ($\sigma_{x0} = \mathbf{0,073}$ mm) a $\sigma_y = 0,51$ mm ($\sigma_{y0} = \mathbf{0,074}$ mm).

Stejně jako v předchozím testu se během měření objevily hrubé chyby způsobené pravděpodobně vysokým zatížením některých kloubů řetězce, který nebyl zapouzdřen v plastové trubce. Značné namáhání kloubů pravděpodobně způsobuje nežádoucí pohyby ve spojích (kloubech) senzoru. Senzor vykazoval v obou svislých, na sebe kolmých rovinách (xz, yz) prakticky identickou přesnost, což je ve shodě s výsledky testování v horizontální poloze senzoru. Snížením počtu průměrovaných hodnot z 5000 na 1000 došlo k prokazatelnému poklesu přesnosti ($F = 2,190 < F_{0,975} = 1,823$).

4.4. Vertikální test s PVC opláštěním

Test byl proveden obdobně jako v případě testování samotného senzoru bez PVC opláštění. Z důvodu značné hmotnosti celé sestavy bylo provedeno nejen fixní uchycení obou konců, ale také uchycení v jednom mezilehlém bodě přibližně v polovině řetězce, které nadlehčovalo váhu sestavy a přitom umožňovalo změny jejího tvaru. Jako v předchozím případě byl test proveden ve dvou modifikacích. V prvním případě byl konec PVC opláštění uchycen k mikroposuvu (obr. 4.4), na kterém byly vyvolávány deformace ve dvou na sebe kolmých osách. V druhém případě byly oba konce senzoru fixovány a byl měněn tvar řetězce s výchyly až 150 mm. V obou případech byl registrován průměr z 1000 měření.

4.4.1 Vyvolání libovolné deformace

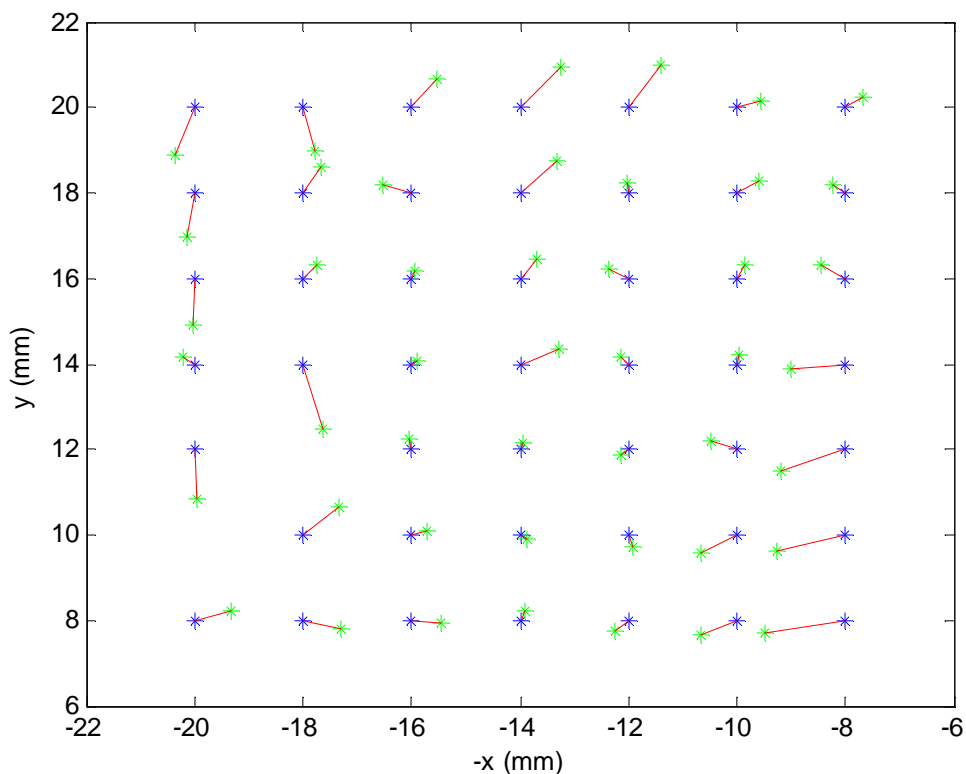
Na základě změn souřadnic na posledním kloubu byly určeny tyto směrodatné odchylky vždy pro celý řetězec a pro jeden segment: $\sigma_x = 0,37$ mm ($\sigma_{x0} = \mathbf{0,053}$ mm) a $\sigma_y = 0,38$ mm ($\sigma_{y0} = \mathbf{0,054}$ mm). Výsledky tohoto experimentu potvrdily negativní vliv zatížení kloubů vahou snímače (viz kap. 4.3). Zároveň se potvrdil předpoklad, že instalace senzoru v plastovém opláštění do značné míry eliminuje mechanické namáhání senzoru. Chyby zjištěné při tomto experimentu se blíží chybám zjištěným při horizontální instalaci přístroje, kdy je podélné zatížení kloubů senzoru minimální.

4.4.2 Vyvolání deformace známé velikosti

Pomocí mikroposuvu byly vyvolány posuny ve dvou na sebe kolmých osách v rozsahu 12 mm v každém směru. Rozsah indukovaných posunů byl menší nežli při testu bez opláštění, a to z důvodu značné tuhosti zařízení a značnému namáhání mikroposuvu. V každém směru bylo realizováno 7 čtení 8,10,12,14,16,18 a 20 mm (celkem 49 hodnot). Souřadnice určené senzorem byly transformovány na souřadnice nastavené na mikroposuvu. Rozsah posunů byl oproti kapitole 4.3.2 omezen na maximálně 12 mm v každém směru, z důvodu značné tuhosti PVC opláštění.

Dále byly pomocí transformace metodou MNC transformovány souřadnice ze senzoru na souřadnice dané na mikroposuvu (obr. 4.6). Takto byly určeny charakteristiky přesnosti pro oba vodorovné směry x,y: $\sigma_x = 0,39$ mm ($\sigma_{x0} = \mathbf{0,056}$ mm) a $\sigma_y = 0,37$ mm ($\sigma_{y0} = \mathbf{0,053}$ mm).

Oběma experimenty byly stanoveny prakticky identické směrodatné odchylky. Tyto hodnoty se blíží hodnotám zjištěným analýzou dílčího souboru hodnot v kapitole 4.3.2. Stejně jako u předchozích testů vykazuje senzor v obou rovinách (xz,yz) identickou přesnost. Ta se blíží hodnotám zjištěným při experimentu v horizontální poloze senzoru. Rozdíl ve velikosti směrodatných odchylek však není zdaleka zanedbatelný. Uvažujeme-li průměrnou hodnotu směrodatné odchylky polohy v jedné rovině procházející osou senzoru při vertikálním experimentu v PVC opláštění $\sigma_0 = \mathbf{0,054}$ mm a $\sigma_0 = \mathbf{0,035}$ mm při horizontální instalaci, hypotéza o rovnosti směrodatných odchylek je jednoznačně zamítnuta ($F = 2,380 < F_{0,975} = 1,320$).



Obr. 4.6 Nominální (modrá) a určené (zelená) polohy koncového kloubu řetězce

4.5. Experiment s kruhovou montáží

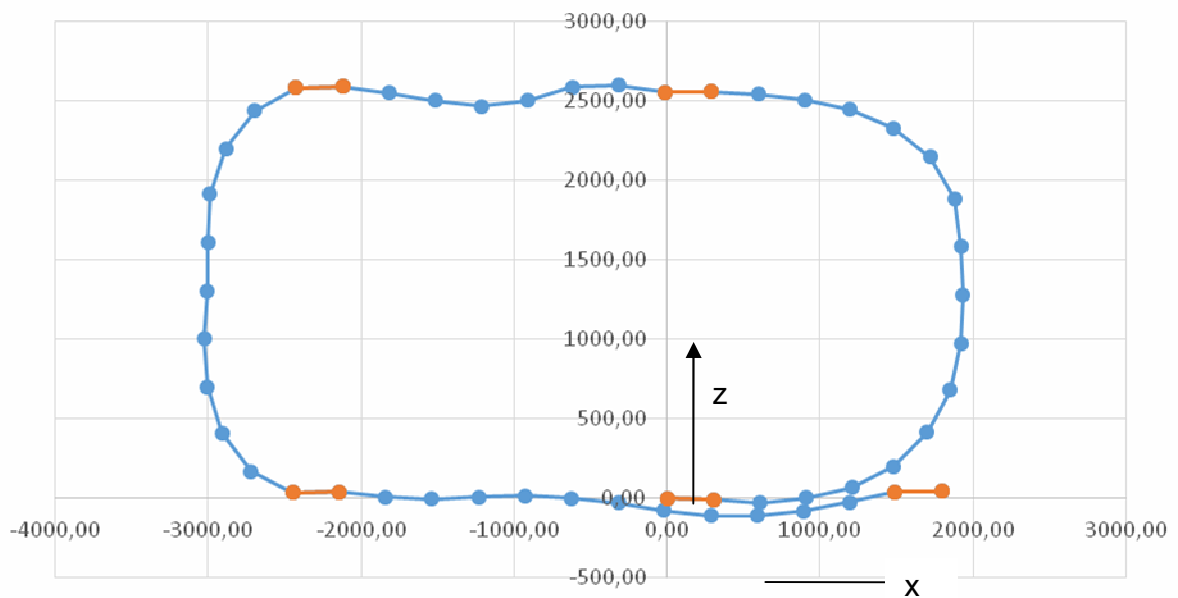
Senzor byl během experimentu upevněn na dřevěné konstrukci kotvené do zdi tak, aby jeho tvar přibližně odpovídal tvaru konvergenčního profilu (obr. 4.8). Segmenty senzoru jsou v takovém případě různě orientovány vzhledem ke směru tíhového zrychlení. Senzor byl na stěnu ukotven instalátorskými objímkami (obr. 4.7). V této poloze senzoru by bylo velmi obtížné vyvolávat deformace přesně dané velikosti, proto nebyl při této instalaci tento druh experimentu proveden.



Obr. 4.7 Stabilní uchycení segmentu pomocí instalátorských objímek



Obr. 4.8 Instalace přístroje v kombinované (kruhové) poloze



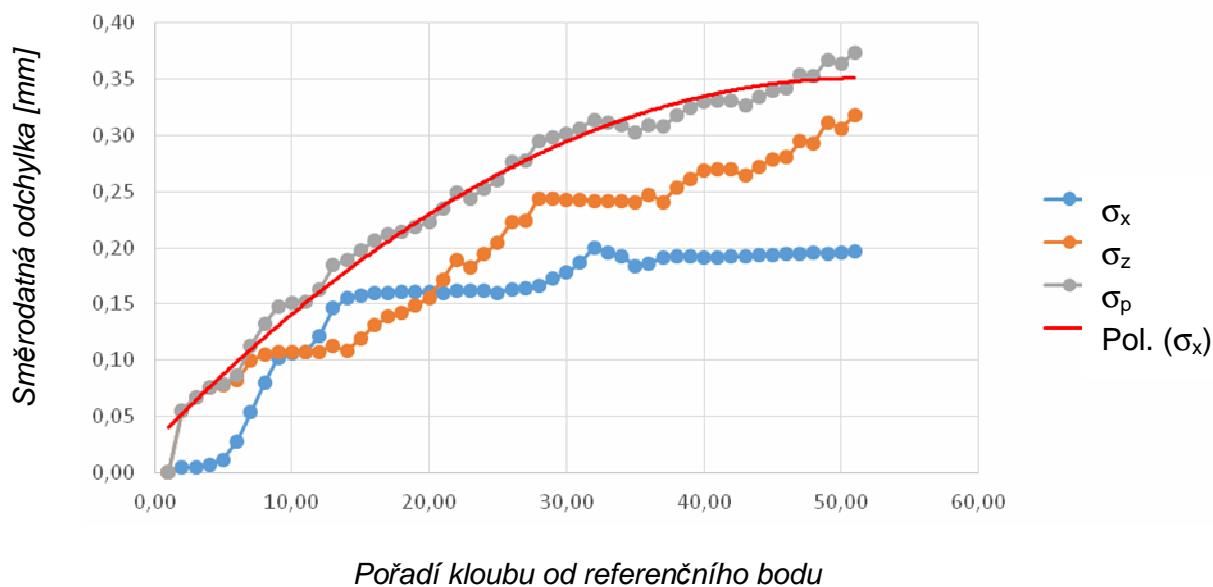
Obr. 4.9 Volné a fixované části senzoru při kruhové montáži

Během testu byla opatrně měněna poloha volných segmentů, a to řádově o jednotky milimetrů až centimetrů, tak, aby nedocházelo k přetěžování kloubních spojů. Charakteristiky přesnosti byly určovány na základě hodnot registrovaných v koncových

bodech fixovaných segmentů (obr. 4.9). Tyto hodnoty by, bez vlivu chyb měření, měly být během testu konstantní. Celkem bylo provedeno 15 etap měření, přičemž během každé etapy byl registrován pětkrát průměr z 1000 měření.

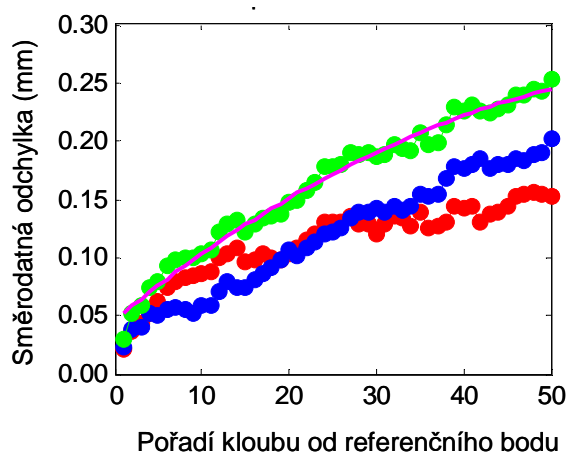
Výsledkem experimentu byly jednak směrodatné odchylky určené pouze z opakování z rozdílů pěti měření opakovaných během každé etapy (bez změny polohy segmentů) a jednak směrodatné odchylky určené z hodnot registrovaných mezi etapami na stabilních bodech (zahrnující vliv změny tvaru senzoru).

Směrodatná odchylka z opakování byla vypočtena jako kvadratický průměr odchylek v jednotlivých etapách. Směrodatná odchylka z opakování platná pro průměr z 1000 měření byla určena $\sigma_{p0} = 0,052$ mm. Z grafu (Obr. 4.10) je vidět, že směrodatná odchylka z opakování prakticky přesně narůstá s odmocninou z pořadí segmentu od počátku řetězce. Velikost směrodatné odchylky je ve shodě s velikostí směrodatné odchylky z opakování určené v rámci testu ve vertikální poloze senzoru. Velikost takto určené směrodatné odchylky se ve světle výsledků předchozích experimentů jeví jako nepravděpodobně vysoká. Její hodnota je zároveň v přímém rozporu se směrodatnými odchylkami z opakování zjištěnými během polní instalace senzoru, kdy byly směrodatné odchylky z opakování výrazně menší ($\sigma_{p0} = 0,033$ m, kap. 5.7). To je s největší pravděpodobností způsobeno tím, že během časového úseku, po který byla prováděna opakovaná měření bez změny tvaru senzoru, docházelo ještě stále k určitým reziduálním změnám jeho tvaru.



Obr. 4.10 Graf směrodatných odchylek z opakování (σ_x .. směrodatná odchylka v souřadnici x, σ_z ... směrodatná odchylka v z, σ_p ... směrodatná odchylka v poloze $\sigma_p = (\sigma_x^2 + \sigma_z^2)^{1/2}$, Polyg. (σ_p) ... σ_p proložená polynomem 2. stupně.

V reakci na výše zmíněné výsledky opakovaných měření v kombinované poloze senzoru, byla dodatečně analyzována data registrovaná během zkušebního provozu řídicí jednotky. Jednalo se o sérii odečtů senzoru umístěného na transportní roli v intervalu 15 min. během 18 hodin, přičemž byl registrován průměr z 1000 čtení. Z výsledků experimentu je zřetelně viditelná podobná závislost mezi počtem segmentů a směrodatnou odchylkou jako v předchozím testu, avšak hodnoty směrodatných odchylek jsou výrazně nižší: $\sigma_{x0} = 0,023$ mm a $\sigma_{z0} = 0,025$ mm, $\sigma_{p0} = 0,034$ mm.



Obr. 4.11 Graf směrodatných odchylek z opakování: směrodatná odchylka v souřadnici x (červená), v souřadnici z (modrá), v poloze (zelená) a aproximace polynomem 2. stupně (růžová)

V druhém případě byly **směřodatné odchylky určovány pro všechny fixované body řetězce** - kromě počátečního kloubu (tab. 4.5 a tab. 4.6). Poloha kloubu v každé etapě byla určena aritmetickým průměrem z 5 měření, uvedené směrodatné odchylky jsou proto platné pro průměr z 5000 měření.

Tab. 4.5 Směřodatné odchylky ve směru osy x a z

Směřodatná odchylka	Fixovaný kloub								
	1	17	18	25	26	36	37	49	50
σ_x (mm)	0,002	0,120	0,120	0,119	0,120	0,208	0,207	0,224	0,224
σ_{x0} (mm)	0,002	0,029	0,028	0,024	0,023	0,035	0,034	0,032	0,032
σ_z (mm)	0,031	0,166	0,188	0,173	0,171	0,222	0,232	0,237	0,232
σ_{z0} (mm)	0,031	0,040	0,044	0,035	0,033	0,037	0,038	0,034	0,033

Tab. 4.6 Směrodatné odchyly velikostí posunu

Směrodatná odchylnka	Fixovaný kloub								
	1	17	18	25	26	36	37	49	50
σ (mm)	0,031	0,205	0,223	0,210	0,208	0,304	0,311	0,326	0,322
σ_0 (mm)	0,031	0,050	0,053	0,042	0,041	0,051	0,051	0,047	0,046

Největší vypovídající hodnotu má směrodatná odchylnka určená na základě měření na posledním segmentu řetězce. Ta v sobě zahrnuje chyby měření na všech předcházejících segmentech senzoru. Naopak směrodatná odchylnka vztažená k prvnímu lomovému bodu řetězce je jen velmi hrubým odhadem. Průměrná hodnota směrodatné odchylnky byla proto vypočtena váženým kvadratickým průměrem, přičemž váha směrodatné odchylnky byla dána odmocninou z počtu segmentů resp. odmocninou z pořadového čísla příslušného kloubu (7).

Obdobné srovnání bylo provedeno také pro průměr z 1000 měření tak, aby bylo možné výsledky lépe porovnat s výsledky testů provedených v rámci předchozích experimentů. Směrodatné odchyly uvedené v tabulce níže, jsou kvadratickým průměrem ze směrodatných odchylek určených pro každý z pěti odečtů (tab. 4.7, tab. 4.8)

Tab. 4.7 Směrodatné odchyly ve směru osy x a z

Směrodatná odchylnka	Fixovaný kloub								
	1	17	18	25	26	36	37	49	50
σ_{x0} (mm)	0,005	0,047	0,045	0,039	0,038	0,046	0,045	0,041	0,041
σ_{z0} (mm)	0,039	0,049	0,050	0,046	0,045	0,048	0,049	0,045	0,045

Tab. 4.8 Směrodatné odchyly velikostí posunu

Směrodatná odchylnka	Fixovaný kloub								
	1	17	18	25	26	36	37	49	50
σ_0 (mm)	0,039	0,067	0,067	0,060	0,059	0,066	0,067	0,061	0,061

Experimentem při kruhové instalaci senzoru byly určeny hodnoty směrodatných odchylek průměru z 5000 měření $\sigma_{x0} = 0,030$ mm, $\sigma_{z0} = 0,036$ mm, $\sigma_{p0} = 0,047$ mm. Pro průměr z 1000 měření to bylo $\sigma_{x0} = 0,042$ mm, $\sigma_{z0} = 0,047$ mm, $\sigma_{p0} = 0,063$ mm. Uvedené hodnoty jsou kvadratickým průměrem ze směrodatných odchylek určených na fixovaných segmentech řetězce.

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k \sigma_i^2 \cdot p_i}{\sum_{i=1}^k p_i}} ; p_i = \frac{1}{\sqrt{n_i}} \quad \text{kde: } n - \text{pořadové číslo fixovaného kloubu} \quad (7)$$

4.6. Shrnutí výsledků testování

V této kapitole jsou shrnuty výsledky provedených laboratorních testů ve vztahu s cílům definovanými v kapitole č. 1.

4.6.1 Vliv orientace senzoru

Při vertikálním a horizontálním testu se prokázalo, že přesnost senzoru nezávisí na směru deformace v rovině kolmé k ose senzoru, tj. na natočení senzoru kolem jeho osy vzhledem ke směru deformací. Rozdíly mezi polohami senzoru při horizontálním testu resp. mezi směrodatnými odchylkami v osách x a y u testu ve vertikální poloze senzoru byly vždy minimální. Jedinou výjimkou je test ve vodorovné instalaci senzoru s opláštěním (tab. 4.4, varianta B), kdy pravděpodobně došlo k pohybu sledovaného fixního bodu, při testu senzoru v I. poloze.

4.6.2 Vliv instalace senzoru

Nejmenší směrodatné odchylky byly zjištěny při horizontální instalaci. To je pravděpodobně dáno tím, že při tomto způsobu instalace jsou flexibilní spoje senzoru nejméně namáhány. Naopak největší směrodatné odchylky byly určeny při vertikální instalaci senzoru bez opláštění. Při takovéto instalaci docházelo k značnému zatížení kloubních spojů. Instalace senzoru v plastovém opláštění vedla u vertikální instalace k výraznému snížení směrodatných odchylek.

4.6.3 Vliv PVC opláštění

Při instalaci senzoru v ochranném PVC opláštění byly směrodatné odchylky obecně menší než bez použití opláštění. Test senzoru v PVC opláštění při kombinované instalaci nebyl proveden pro přílišnou tuhost sestavy. Při vodorovné instalaci senzoru byl efekt použití opláštění v případě menších deformací (do 20 mm) senzoru minimální. Při vyvolání větších deformací (až 150 mm) se efekt instalace v opláštění projevil výrazným snížením směrodatných odchylek prakticky na hodnoty zjištěné při řádově menších

deformacích řetězce. Při vertikální instalaci senzoru došlo po instalaci senzoru do PVC opláštění k výraznému poklesu směrodatných odchylek. Výsledky tohoto testu ukazují, že instalace senzoru v PVC opláštění vede ke snížení namáhání spojů senzoru, což má za následek často výrazné snížení směrodatných odchylek měření.

4.6.4 Vliv navýšení počtu měření

Navýšení počtu hodnot při kombinované instalaci senzoru z 1000 na 5000 vedlo k prokazatelnému poklesu směrodatných odchylek (kapitola 4.5). Velmi podobná závislost byla zjištěna i při vertikálním testu senzoru. I při registrování průměru z 1000 měření zůstává velikost zbytkových náhodných chyb nezanedbatelná. V tomto světle se jeví výrobcem doporučený počet odečtů (1000) jako smysluplný, avšak při pomalých deformacích s vysokými nároky na přesnost je výhodné jednotlivé odečty senzoru dále průměrovat.

4.6.5 Vývoj směrodatné odchylky z opakování

Testem při kombinované instalaci senzoru byl potvrzen předpoklad vývoje směrodatné odchylky z opakování. Směrodatná odchylka z opakování narůstá s odmocninou počtu segmentů řetězce, potažmo s pořadovým číslem lomového bodu řetězce.

4.6.6 Vliv velikosti deformací, vliv namáhání

S narůstající velikostí deformací dochází k narůstání směrodatných odchylek. Tento jev je pravděpodobně úzce spojen s narůstajícím mechanickým namáháním flexibilních spojů senzoru. Bylo prokázáno že zvýšené mechanické namáhání kloubních spojů výrazně snižuje přesnost senzoru. Instalace senzoru v PVC opláštění v některých případech významně snižuje mechanické namáhání kloubních spojů a tím i směrodatnou odchylku měření.

4.6.7 Porovnání výsledků s pracemi jiných autorů

Výsledky některých z publikovaných prací naznačují na vysokou přesnost senzoru. Hodnoty přesnosti převážně nejsou v publikacích nikterak číselně popsány, avšak na základě nejčastěji grafických srovnání lze usuzovat, že přesnost senzoru udávaná výrobcem je reálná a lze jí dosáhnout i v polních podmínkách. Výsledky některých

experimentů naznačují velmi vysokou přesnost senzoru při malých deformacích, kdy jsou senzorem zachyceny submilimetrové posuny. Jak už bylo řečeno, výsledky experimentů jsou hodnoceny převážně graficky a přesnost není hodnocena pomocí směrodatných odchylek (Chiou 2012).

Jedním z mála porovnatelných testování senzoru SAA je uvedeno v publikaci (Beran et al. 2014). Autor porovnává měření senzorem SAA s měřeními robotickou totální stanicí. V experimentu používá senzor dlouhý 4 m sestávající se z osmi segmentů délky 50 cm. Průměrná směrodatná odchylka polohy na konci senzoru je 0,58 mm resp. $\sigma_{p0} = 0,21$ mm. Tento experiment je porovnatelný s experimentem uvedeným v kapitole 4.4. Hodnoty prezentované v publikaci (Beran et al. 2014) jsou však vyšší. Tato skutečnost je způsobena tím, že autor nepoužívá srovnávací metodu s výrazně vyšší přesností než je přesnost senzoru. Prezentované odchylky jsou tedy významně zatíženy chybami měření RTS, jejichž velikost není v publikaci řešena.

Tato práce přináší ještě jednu důležitou informaci, a tou je vliv změn teploty na přesnost měření senzoru. Negativní vliv teplotních změn na přesnost měření elektronických měřicích zařízení je dobře známým problémem. Korekce měření MEMS akcelerometrů o vliv teplotních změn je nezbytnou součástí zpracování surových měřených dat. Během experimentu je senzor vystaven extrémním teplotním změnám, které jsou výrazně vyšší než k jakým by mohlo docházet při umístění senzoru ve vrtu. Směrodatné odchylky měření senzorem nedosahují nijak extrémních hodnot. Není možné sice určit velikost vlivu teploty na celkovou směrodatnou odchylku, ale je možné konstatovat, že i v takto extrémních podmínkách lze měřit v rámci přesnosti deklarované výrobcem a nedochází k nijak extrémnímu nárůstu směrodatných odchylek.

Zajímavým porovnáním je srovnáním výsledků testování SAA s prací (Lovioso a Giusta 2005). Autoři se zabývají testováním přesností senzoru podobné konstrukce ve smyslu opakovatelnosti měření. Autor deklaruje přesnost 0,5 mm na konci řetězce s 29 segmenty o délce 1 metr, to odpovídá směrodatné odchylce $\sigma_{p0} = 0,09$ mm/segment.

5. Senzor SAA jako součást dlouhodobého monitoringu sesuvu u Třebenic

Během laboratorních zkoušek byly odhadnuty charakteristiky přesnosti měření jak samotného senzoru, tak senzoru instalovaného v předepsané výstroji. Tyto hodnoty se vztahují ke krátkodobým měřením provedených za konstantních podmínek. Charakterizují tak vnitřní přesnost metody. Při reálném použití senzoru však na senzor další působí další vlivy a dlouhodobá přesnost senzoru v měnících se podmínkách v terénu může být značně odlišná od hodnot zjištěných laboratorně. Z tohoto důvodu je vhodné zvolit vhodnou referenční lokalitu, a to takovou, na které máme k dispozici maximum informací o charakteru pohybů a jejich vývoji v čase, o složení vertikálního horninového profilu nebo hydrologických podmínkách .

Kromě testování senzoru v reálných provozních podmínkách bylo smyslem instalace senzoru na této lokalitě také určení směru a rychlosti svahových pohybů s vyšší frekvencí než dosud, detekce aktivních smykových ploch a analýza detekovaných svahových pohybů ve vztahu k měnícím se podmínkám prostředí. Paralelně s inklinometrickým měřením proběhlo několik etap terestrických měření, která měla za cíl podat nezávislou informaci o stabilitě jednotlivých částí sesuvu včetně pohybů zhlaví inklinometrického vrtu.

5.1. Popis lokality jako celku

Lokalita se nachází na jižním okraji Českého středohoří, kde dochází k častému výskytu různých svahových deformací. Studovaná oblast má povahu mělkého až středně hlubokého sesuvu křídových sedimentárních hornin s různou propustností na jižním okraji terciárního sopečného komplexu Českého středohoří. Celý sesuv byl poprvé identifikován v roce 1916 (Novotný 2002) a jeho nedávno zmapovaná celková plocha činí 28 000 m² s průměrným sklonem svahu 12° a nadmořskou výškou 240 až 285 metrů. V minulosti byly v této lokalitě pozorovány opakované reaktivace svahových pohybů. Po katastrofické reaktivaci v 80. letech byla realizována opatření, která měla stabilizovat svah a zejména železniční těleso (Rybář 1983). Železniční těleso a část sesuvu ležící nad ním jsou od té doby považovány za stabilní, ale tento předpoklad nebyl nikdy ověřen měřením. Od 90. let jsou v oblasti pod železničním přejezdem realizována měření na extenzometrických profilech, přičemž mechanicky stabilizované drážní těleso bylo zvoleno jako referenční objekt. Od roku 2013 do roku 2015 bylo provedeno monitorování povrchu vozovky pomocí trigonometrických měření, změny polohy

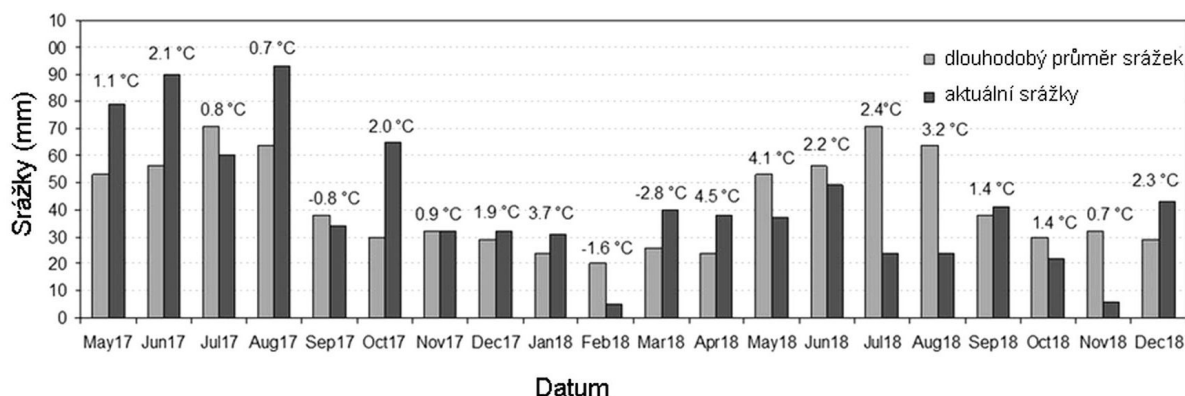
kontrolních bodů byly vztaženy taktéž k drážnímu tělesu. Výsledky měření ukázaly významné pohyby silničního tělesa, ale také ukázaly, že minimálně některé části železničního tělesa nejsou absolutně stabilní (Balek et al. 2015). Tento fakt podnítil otázku, zda by nemohlo docházet k pomalým pohybům taktéž podle hlubších smykových ploch, které Pašek (1964) určil v hloubce 9 - 12 m. Pro takto hluboce založený sesuv totiž nebyla stabilizační opatření koncipována.

5.1.1 Geologie

Komplexní sesuv u Třebenic vznikl v pozdně křídových, špatně stmelенých sedimentech, které pokrývají jižní okraj terciárního sopečného komplexu Českého středohoří, kopcovité krajiny budované třetihorními vulkanity překrytými křídovými sedimenty (jílovců a slíny). Reliéfu dominují terciární sopečné horniny (Novotný a Kobr 2008). Malá Kozí Horka (329 m nm) tvořená izolovaným sopečným tělem budovaným olivínovým nefelínem a nefelitovými bazanity (Voráček, 1991). Křídové horniny komplexního sesuvu jsou reprezentovány monotonicou sekvencí vápnatých jílovců pozdního turonu, koniacianských jílovců a slínovců (Zoubek a Škvor et al., 1963), které jsou vysoce citlivé na objemové změny způsobené nasycením půdní vody (Rybář 2007). Hydrogeologický monitoring ukázal, že podzemní voda proudí přednostně zónou o vyšší propustnosti v 8 až 10 m pod povrchem ohraničenou horninou s 1-2 řády nižší vodivosti (Novotný a Kobr 2008).

5.1.2 Klimatické podmínky

Studovaná lokalita se nachází v teplém klimatickém regionu České republiky, který je definován klimatickými charakteristikami měřenými v letech 1961-2000 (Vondráková et al., 2013) s využitím klasifikačního schématu Quitta (1971). Tato oblast je charakterizována nízkými srážkami během vegetačního období (300-350 mm) a vyššími průměrnými teplotami v lednu (-2 až -3 °C) a červenci (19 až 20 °C). Viz srovnání dlouhodobých (1981-2010) měsíčních průměrných srážek a průměrných teplot se skutečnými srážkami měřenými v průběhu sledovaného období (obr. 5.1).



Obr. 5.1 Klimatická data popisující podmínky na lokalitě v období měření senzorem SAA: Aktuální měsíční srážkové průměry a odchylky od průměrných teplot byly měřeny na meteorologické stanici (meteostanice Třeбенice); dlouhodobé (1981 - 2010) měsíční srážkové průměry (meteostanice Doksany), provozované Českým hydrometeorologickým ústavem (ČHMÚ).

5.1.3 Sledovaná reaktivace

První novější pohyby byly zaznamenány v souvislosti s deformací železniční trati v r. 1938 a 1939. Sesuvem se podrobně zabývá Pašek (1964) ve zprávě o inženýrsko-geologickém průzkumu sesuvu u Třeбенic. V té době je železniční svršek udržován občasným podsypáváním škvárou. Deformace jsou pozorovány v km 6,9 - 7,1. Podobně je udržováno i silniční těleso Třeбенice-Dlažkovice. Pašek (1964) určuje hloubku smykové plochy v rozmezí 9 - 12 m.

V nedávné historii došlo k několika částečným reaktivacím sesuvu (Balek et al., 2015). Tyto dílčí sesuvy jsou podle (Rybář 1983) označovány jako sesuvy A,B,C. Dále bude sesuvem myšlena reaktivace A (obr. 5.3). Dílčí sesuv půdy popsany v této práci má komplikovanou smykovou plochu až do hloubky 5 m, je sledován od roku 1994 (Novotný 1998, Novotný 2002). Hladiny podzemní vody byly manuálně zaznamenávány a během několika let byly instalovány různé typy piezometrů (Novotný a Kobr, 2008, Novotný et al. 2006). Zjištěné sezónní pohyby (Novotný 2002) a opakované hlavní pohybové fáze (1938, 1939, 1970, 1981, Balek et al., 2015) naznačují, že jeho stabilita je blízko rovnovážného stavu s obdobími nestabilních podmínek. Proto byl studovaný sesuv počátkem 80. let seshora stabilizován výstavbou odvodňovacích kanálů, vodních infiltračních stěn nad železnicí a pilotové stěny bezprostředně pod tělesem železnice (Zuzánek a Vaněček 1982). Sanační opatření byla primárně zaměřena na zajištění provozuschopnosti železnice, přičemž stabilita místní asfaltové komunikace řešena nebyla.



Obr. 5.2 Projevy svahových deformací na lokalitě u Třebenic: Destrukce trati následkem reaktivace sesuvu v roce 1981 (Rybář 1983); deformace silniční komunikace zřetelně vymezená trhlinami v asfaltovém povrchu 2016

5.2. Současná aktivita sesuvu z terestrických měření

Od roku 1994 do roku 2015 probíhala v oblasti pod železničním přejezdem pravidelná měření na dvou extenzometrických profilech (Novotný 2002). Z výsledků dlouhodobých měření je zřejmé, že oblast pod tratí, a to i v její bezprostřední blízkosti, je stále nestabilní, i když velikost deformací již zdaleka nedosahuje hodnot před sanací. V současnosti jsou indikovány pohyby řádově v jednotkách milimetrů až centimetrů ročně (Balek et al. 2015).

5.2.1 Měření v lokální trigonometrické síti

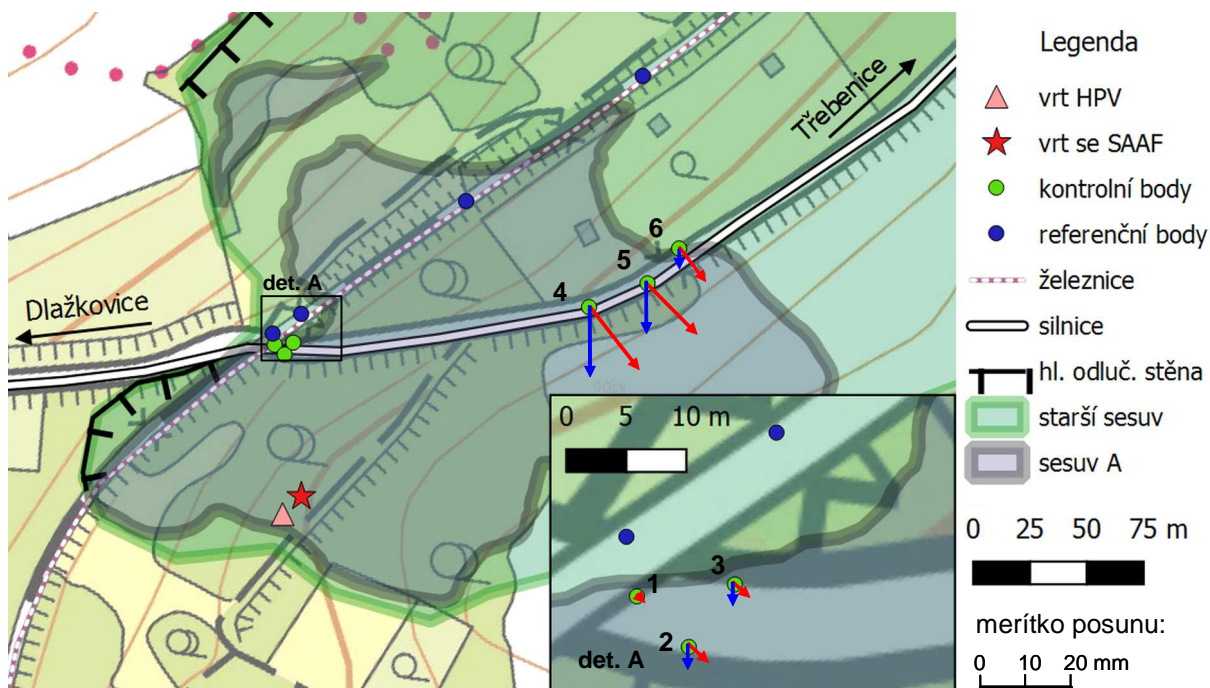
V listopadu 2013 byla, v souvislosti se zrychlenými pohyby po nadnormálních srážkách (zřetelně se projevujících destrukcí povrchu komunikace), zahájena měření na třech lokálních trigonometrických sítích. Sledováno bylo celkem 7 kontrolních bodů, přičemž v rámci reaktivace A byly monitorovány body 1-6 (obr. 5.3), kontrolní bod. č. 7 leží mimo výřez mapy a je stabilizován v asfaltovém povrchu komunikace v místě reaktivace C. Body 1-3 byly stabilizovány bezprostředně pod železničním přejezdem. Body 4 a 5 byly osazeny v místech vizuálně nejaktivnější části sesuvu A. Od prosince 2013 do prosince 2016 bylo provedeno celkem 14 etap trigonometrických měření. Měření bylo ukončeno v roce 2016 v souvislosti s rekonstrukcí železničního tělesa, během níž byly zničeny všechny referenční body.

Měření úhlu a vzdáleností bylo provedeno v jedné skupině s použitím totální stanice Geodimeter S640, a to vždy ze dvou sousedních referenčních bodů. Vzdálenost mezi referenčním bodem a kontrolním bodem nebyla nikdy větší než 100 metrů. Měřené délky

byly korigovány o fyzikální redukce. Přesnost měření přístroje Geodimeter S640 je charakterizována směrodatnou odchylkou měřeného vodorovného a svislého směru $\sigma_z = \sigma_\varphi = 0,3 \text{ mgon}$ a směrodatnou odchylkou měřené délky $\sigma_d = 1,5 \text{ mm} + 2 \text{ ppm}$. Výška přístroje byla určována nepřímo, z úhlového měření na výškovou značku. Z důvodů minimalizace chyb z centrace byla používána trojpodstavcová soustava. Při měření délek na kontrolní body byl vždy používán minihranol o výšce 0,1 m.

Výpočty byly realizovány s pomocí software EasyNET vyvinutého na stavební fakultě ČVUT (Třasák 2015). Jednotlivé sítě byly vyrovnány jako volné a poté byly vždy pomocí shodnostní Helmertovy transformace transformovány na souřadnice referenčních bodů z nulté etapy. Během sledování nepřesáhly aposteriorní směrodatné odchylky na určených bodech hodnotu 1 mm.

Na kontrolních bodech (1-6) docházelo v letech 2013 až 2016 k neustálým pomalým pohybům ve směru sklonu svahu (obr. 5.3). Sesuvné pohyby se na silničním povrchu projevovaly viditelným zvětšováním trhlin. Ty se objevují na stejných místech, kde byly pozorovány již dříve (Rybář 1983, Voráček 1991, Novotný 2002). Nejvyšších hodnot dosahují roční sesuvné pohyby na bodech 4 (19 mm horizontálně a 16 mm vertikálně) a 5 (14 mm horizontálně a 10 mm vertikálně). V této oblasti, která je nejaktivnější částí sesuvu A, byly detekovány prostorové posuny až 76 mm během tří let měření (obr. 5.2 vpravo).



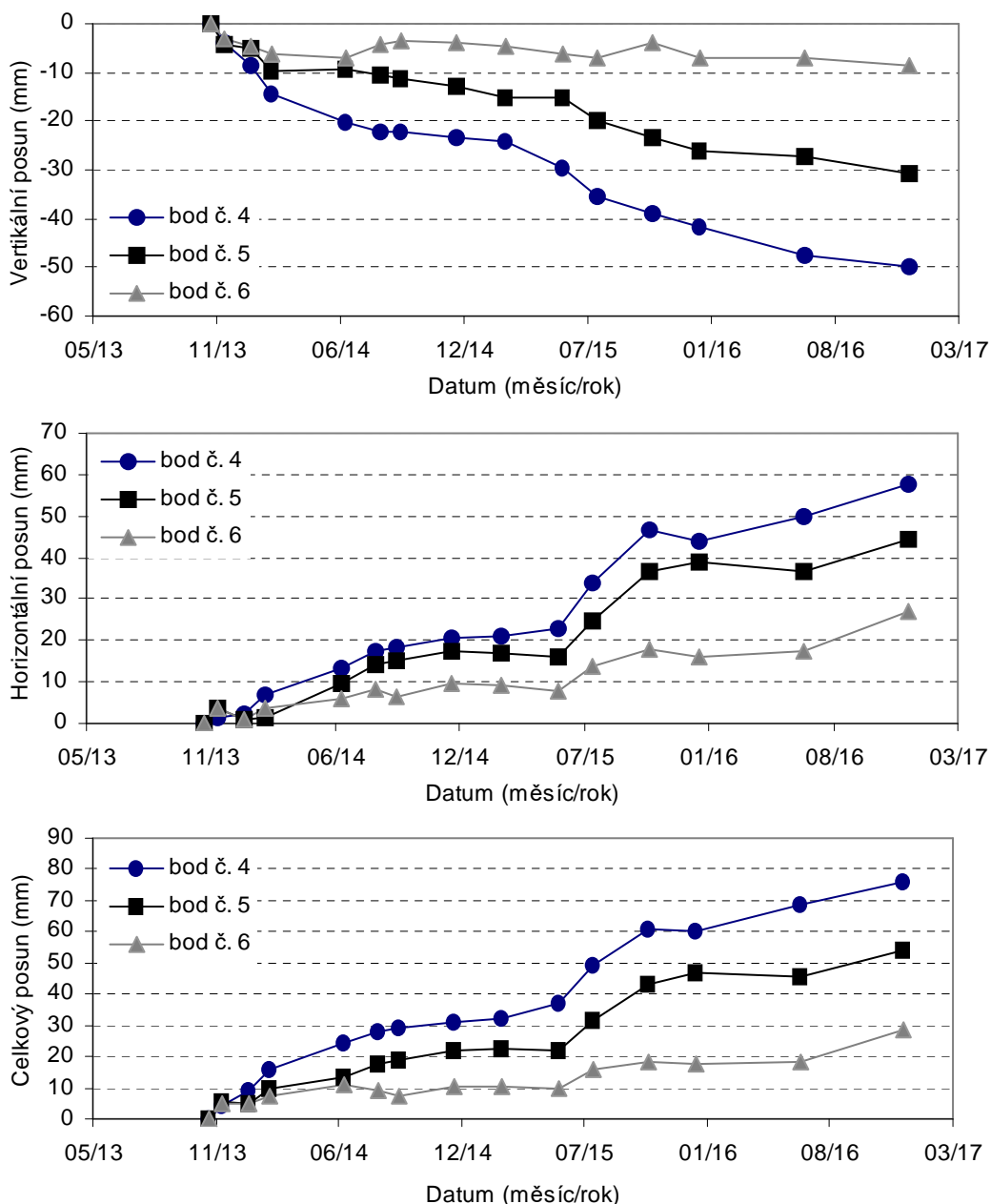
Obr. 5.3 Umístění opěrných (modrá) a kontrolních (červená) bodů trigonometrických sítí a průměrné roční rychlosti vertikálního (modrá) a horizontálního (červená) pohybu v letech 2013 -2016 (podklad ZMVM10)

Z výsledků provedených měření je zřejmé, že části sesuvů A, B ležící pod drážním tělesem jsou stále značně aktivní (tab. 5.1). Největší deformace jsou pozorovány u sesuvu A, kde byly během jednoho roku zaznamenány změny prostorové polohy kontrolních bodů až 25 mm. Sesuvné pohyby se projevují viditelnými deformacemi silničního svršku. Z grafů měřených pohybů je zřejmé, že se rychlosti během sledovaného období výrazně měnily. Značně rozdílné jsou rychlosti pohybů v rámci sesuvu A. Po stabilizaci železniční trati jsou některé části pod ní stále velmi aktivní, rychlosti pohybu v takových místech se pohybují v jednotkách centimetrů za rok.

Sesuv se nepohybuje konstantní rychlostí, epizody zrychlení se střídají s epizodami relativního klidu (obr. 5.4). Sesuv A se nechová jako kompaktní masa, je tvořen souhrnem bloků, které se v různých časových obdobích pohybují různými rychlostmi (obr. 5.4, tab. 5.1). Takovému pojetí sesuvu odpovídá i schematický řez publikovaný Novotným (Novotný 2008). Je tedy značně komplikované odhadovat rychlost v místech mimo sledované kontrolní body. Na základě měření provedených na komunikaci proto nelze spolehlivě odvozovat rychlost sesuvu v místech instalace senzoru SAA.

Tab. 5.1 Celkové posuny od prosince 2013 do prosince 2016 a průměrné roční rychlosti (dz – svislý posun, dph – horizontální posun, dp – prostorový posun, vz – vertikální rychlost, vph – horizontální rychlost, rychlost prostorového pohybu)

Číslo bodu	Posun (mm)			Rychlost (mm/rok)		
	dz	dph	dp	vz	vph	vp
1	0.2	4.6	4.6	0.1	2.3	2.3
2	-9.8	10.7	14.5	-5.0	5.5	7.4
3	-7.0	7.6	10.3	-3.6	3.9	5.3
4	-49.7	57.7	76.2	-16.1	18.7	24.7
5	-30.7	44.6	54.2	-9.9	14.4	17.5
6	-8.5	27.0	28.3	-2.8	8.7	9.2



Obr. 5.4 Relativní posuny kontrolních bodů určené vzhledem k železniční trati

5.2.2 Určení posunů v globálním souřadnicovém systému

Největším problémem při monitorování sesuvů je vybudování dostatečně stabilních bodů referenčních pro určení posunů. Takovýmto problémům je nutné čelit i na studované lokalitě u Třebenic, neboť sledovaná oblast a její okolí jsou dlouhodobě nestabilní. Na základě analýzy doposud provedených měření vzniklo podezření na nestabilitu některých částí drážního tělesa. Cílem navržených kontrolních měření bylo proto absolutní určení posunů kontrolních bodů, nezávisle na potenciálně nestabilním nejbližším okolí sledované reaktivace. Posuny byly určovány, jak v nestabilní části

sesuvu pod přejezdem, tak i v potenciálně stabilních částech sesuvného území včetně mechanicky stabilizovaného drážního tělesa (Urban et al. 2017). Měření byla realizována tak, aby jejich výsledky byly porovnatelné s měřeními registrovanými senzorem SAA. Při dodržení podmínky fixování senzoru do stabilního podloží jsou totiž horizontální posuny registrované senzorem absolutní.

Systém měření byl založen na prostorové polární metodě v kombinaci s GNSS (statická metoda). V každé monitorovací epoše byla použita metoda GNSS pro stanovení absolutního posunu celé oblasti resp. sítě referenčních bodů. Konkrétně, relativní posuny určené měřeními v trigonometrické síti byly korigovány o změnu polohy referenčních bodů určenou pomocí metod GNSS. Každá etapa měření zahrnuje jak určení absolutní prostorové polohy referenčních bodů sítě umístěných mimo oblast sledovaného sesuvu, tak soustavy kontrolních bodů. Před zahájením vlastních měření byla provedena apriorní analýza přesnosti takového řešení v specializovaném software PreciPlanner 3D (Štroner 2012), pro úpravu a komplexní zpracování měření byl použit software pro vyrovnání sítí EasyNet (Štroner 2015), který umožňuje robustní analýzu odlehlých hodnot.

Realizace měření

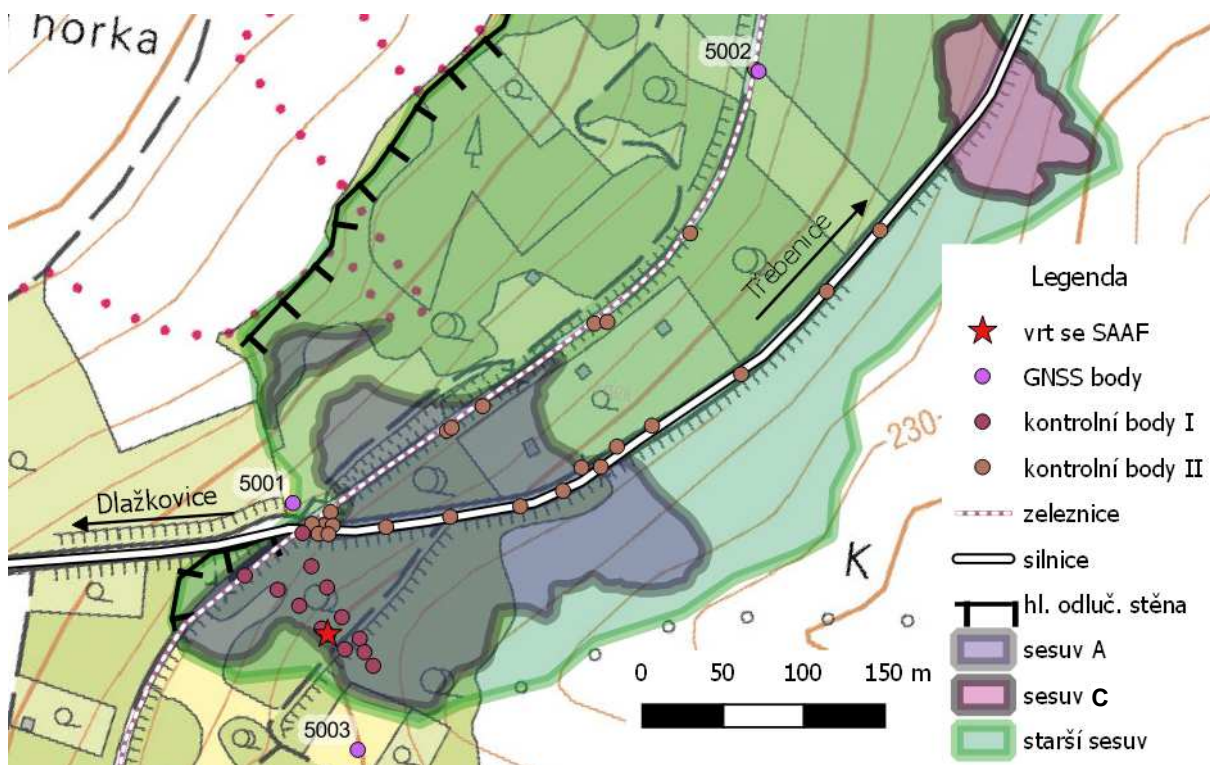
Studovaná oblast byla rozdělena na dvě části. První část je umístěna v oblasti pod železničním přejezdem, v místech aktivního sesuvu (reaktivace) A (obr. 5.6). Oblast je nejméně antropogenně ovlivněnou aktivní nestabilitou v lokalitě, proto byla v minulosti podrobně sledována Novotným (Novotný 2002, Novotný 2008). Sledování posunů však Novotný realizoval výhradně extenzometrickým měřeními (body 101 - 113). Body extenzometrických profilů jsou v terénu stabilizovány zabetonovanými ocelovými tyčemi s navařeným okem. (obr. 5.5). Pro účely trigonometrického měření byl ve vrchní části ocelového oka vyvrtán malý dolík, umožňující maximálně přesné umístění minihranolu. Kontrolní bod č. 109 je osazen ve zhlaví inklinometrického vrtu s umístěným senzorem SAA. Bod 5001 byl stabilizován v blízkosti přejezdu, a to pouze lehce pomocí 50 cm dlouhého trnu plastového mezníku. Bod 5002 byl stabilizován zabetonovanou závitovou tyčí v bezprostřední blízkosti stabilizovaného drážního tělesa mimo oblast reaktivovaných sesuvů. Bod 5003 je stabilizován taktéž zabetonovanou závitovou tyčí, v potenciálně stabilním území v místech nízkého terénního hřebene, stranou hlavního sesuvu.



Obr. 5.5 Stabilizace bodů extenzometrického profilu

Druhá sledovaná oblast byla situována do oblasti severovýchodně od železničního přejezdu. Kontrolní body byly stabilizovány ocelovými hřebi v asfaltovém povrchu komunikace v délce přibližně 500 m od železničního přejezdu směrem k městu Třebenice a dále pak obdobným způsobem v souběžném úseku železniční trati. Zde byly hřebi stabilizovány v betonových částech drážního tělesa, stabilizačních pilotech a propustkách. (body 1 - 28). Celá síť byla navázána na tři základní body (body 5001 - 5003). Obě sledované oblasti byly měřeny totální stanicí během jednoho dne. Současně byla poloha základních bodů určována technologií GNSS. Bod 5001 byl společný pro obě sledované oblasti.

Na základě podrobného průzkumu terénu byla navržena trigonometrická síť, koncipovaná tak, aby bylo možné ověřit stabilitu vybraných částí sesuvného území. Z důvodu dosažení požadované přesnosti, bylo nutné modelovat měření a jeho přesnost. K tomuto účelu byl použit software PrecisPlanner 3D (Štroner 2012), s využitím přibližné konfigurace pozorovaných bodů a stanovisek (obr. 5.6). Předpokládaná přesnost metody GNSS byla přibližně 1,5 mm v poloze a 3 mm na výšku. Směrodatná odchylka denního řešení polohy v síti GEONAS byla určena základě analýzy dlouhodobých časových řad permanentních stanic sítě a charakterizuje přesnost prostorové polohy základních bodů 5001, 5002, 5003. Očekávané směrodatné odchylky určené na základě modelu sítě při měření v jedné skupině a s použitím přístroje výše zmíněné přesnosti byly určeny takto: směrodatná odchylka volných stanovisek a kontrolních bodů nebyla větší než 3 mm ve výšce a 2,5 mm v poloze.



Obr. 5.6 Umístění kontrolních a referenčních bodů pro určení absolutních hodnot posunů (podklad ZMVM10)

Body obou trigonometrických sítí byly zaměřeny prostorovou polární metodou s využitím trojpodstavcové soustavy (obr. 5.9). Horizontální úhly, zenitové úhly a šikmé délky byly měřeny v jedné skupině, přičemž každý kontrolní bod byl zaměřen minimálně ze dvou stanovisek na minihranol (obr. 5.8). Pro měření byl použit robotický přístroj Trimble S6 ($\sigma_\varphi = 0,3 \text{ mg}$, $\sigma_D = 1 \text{ mm} + 1 \text{ ppm}$) s automatickým cílením na hranol (obr. 5.7). Souřadnice opěrných bodů byly v každé etapě nově určeny měřením GNSS, konkrétně statickou metodou s použitím GNSS přijímačů Ashtech Z-MAX s anténami Ashtech, Magellan a Thales (obr. 5.10).



Obr. 5.7 Trimble S6 Robotic



Obr. 5.9 hranol Trimble

Obr. 5.8 Leica GMP111 mini hranol



Obr. 5.10 GNSS sestava Ashtech

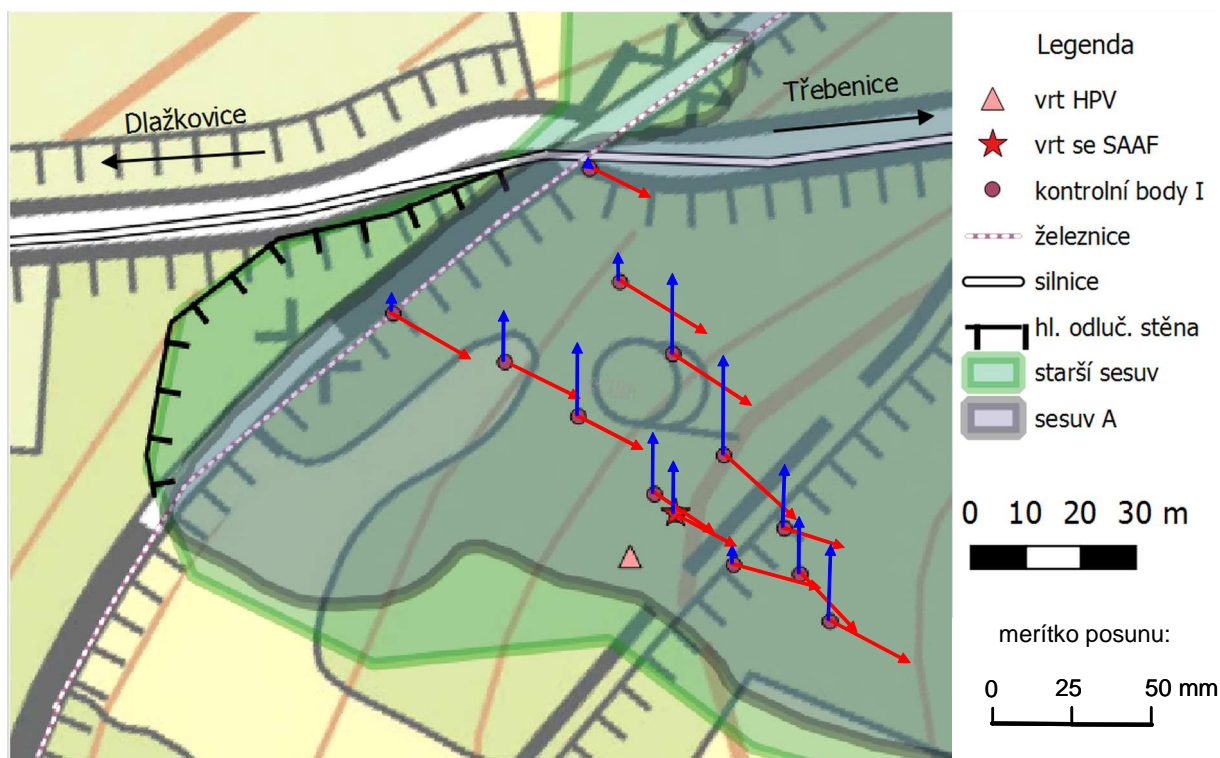
Souřadnice opěrných bodů byly určeny v rámci společného zpracování stálé geodynamické sítě GNSS stanic GEONAS (GEOdynamic Network of the Academy of Sciences of the CR) a EPN (European Permanent Network). Minimální doba observace na referenčních bodech byla 24 h (jeden celý GPS den). Pro výpočet souřadnic stanic sítě byla použita metoda dvojitych diferencí. Zpracování denních rinexů bylo provedeno v GPS softwaru Bernese v. 5.0 (Dach et al. 2007) s následujícími vstupy a nastaveními společnými pro všechna pozorování:

- Mezinárodní referenční rámec ITRF2000.
- Elevační maska 10° – měření na družice níže než 10° nad obzorem nebyla použita
- Strategie výpočtu ambiguit QIF (Quasi Iopnespere Free)
- Model pohybu tektonických desek založený na principu nulové rotace: NNR-NUVEL1A.
- Atmosférický model pro odhad zpoždění signálu v troposféře: DRY NIELL
- Předdefinovaná sada řešených vektorů
- Stálá sada opěrných referenčních stanic sítě EPN

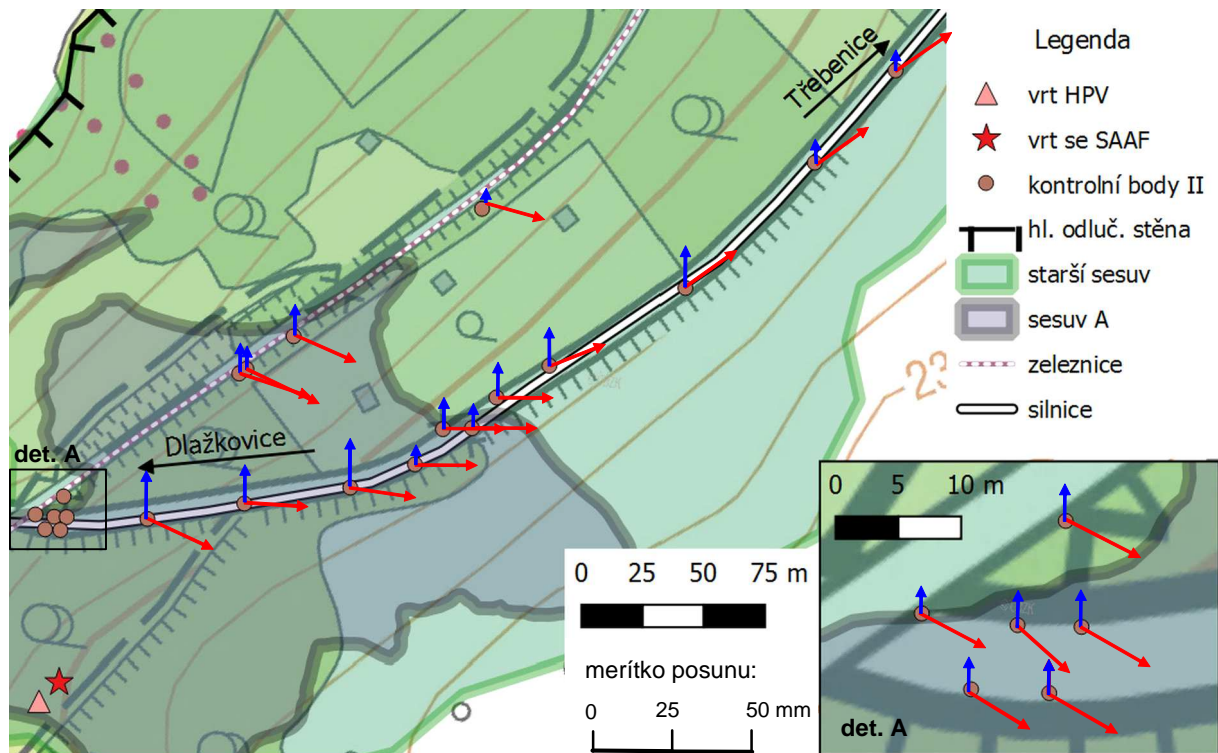
Vyrovnané souřadnice sítě GEONAS (Schenk et al. 2010) včetně základních bodů 5001, 5002, 5003 byly vypočteny v referenčním rámci ITRF2000 a v příslušné epoše měření. Dále byly transformovány z referenčního rámce ITRF2000 do souřadnicového systému ETRS89 a společné epochy 1.1.2017, aby byl eliminován vliv pohybu Euroasijské desky. K tomuto účelu byla použita webová aplikace (EUREF 2018) . Pro transformaci do českého národního souřadnicového systému byl použit software JTSK Easy Transform (Třasák 2019).

Kompletní zpracování měření v trigonometrické síti bylo provedeno v software EasyNet ver. 3.4.3 (Třasák 2015) a zahrnovalo zpracování zápisníku měření, výpočet přibližných souřadnic a vyrovnání sítě. Vyrovnání bylo řešeno kompletně ve 3D, pomocí robustního odhadu a dalších technik pro detekci odlehlých hodnot. Počet nadbytečných měření byl 377. V celkovém počtu 660 měření bylo detekováno 33 odlehlých hodnot. Při vyrovnání byla použita robustní Huberova metoda na úrovni spolehlivosti 1%. Z důvodu velmi krátké délky některých měřených vzdáleností byla navýšena směrodatná odchylka měření úhlu na 2 mgon.

Níže jsou zobrazeny velikosti horizontálního a vertikálního posunu v období listopad 2017 - duben 2018. Výzdvih na všech bodech sítě odpovídá saturaci jílovitých zemin vodou během období nízké evapotranspirace resp. vysokých efektivních srážek jež mají za následek zvětšování objemu jílovitých zemin. Velikost vertikálních posunů však nepřekročila mezní hodnotu prokazatelnosti posunu.



Obr. 5.11 Horizontální (červená) a vertikální (modrá) posuny kontrolních bodů určené kombinací GNSS a trigonometrických měření - síť I (podklad ZM10)



Obr. 5.12 Horizontální (červená) a vertikální (modrá) posuny kontrolních bodů určené kombinací GNSS a trigonometrických měření - síť II (podklad ZM10)

Pohyb kontrolních bodů je obecně způsoben kombinací gravitačních pohybů a pohybů vyvolaných objemovými změnami jílových zemin v závislosti na jejich saturaci vodou. Tyto vlivy v některých částech roku působí proti sobě. Zatímco gravitační pohyb posouvá body po svahu a tím se snižuje jejich nadmořská výška, tak saturace vodou zvětšuje objem horniny a výška sledovaných bodů narůstá. U svahů s malým sklonem je výšková složka svahového pohybu často velmi malá. U pomalých svahových pohybů pak může snadno nastat případ, kdy výška kontrolních bodů roste v důsledku saturace zemin vodou. Směr horizontálních posunů přibližně odpovídá posunům detekovaným senzorem SAA a předchozími trigonometrickými měřeními. Jejich velikost je však v rozporu s doposud výsledky doposud realizovaných měření včetně SAA. Očekávaná velikost pohybů v okolí senzoru SAA by měla dosahovat maximálně velikosti milimetrů. Taktéž pohyby detekované na stabilizovaném drážním tělese jsou velmi nepravděpodobné. Měření pravděpodobně zahrnuje systematickou chybu jejíž původ nebyl odhalen, a která je důsledkem značně komplikovaného provedení monitoringu.

5.2.3 Hodnocení výsledků terestrických měření

Na základě dlouhodobých měření ve dvou lokálních trigonometrických sítích v letech 2013-2016 byly určeny posuny kontrolních bodů v horizontálním a vertikálním směru. Rychlost pohybu se během roku mění od nuly do několika centimetrů za rok, přičemž vyšších hodnoty jsou registrovány v horizontálním směru. To souvisí s relativně malým sklonem svahu, průměrně jen 12° . Maximálních rychlostí dosahují svahové pohyby během jara a počátkem léta. Vzhledem k tomu, že senzor SAA byl instalován mimo nejaktivnější část sesuvu A, bylo možné očekávat posuny o velikosti řádově do 0,01 m/rok. Určením absolutních hodnot posunů pomocí kombinace metod GNSS a trigonometrických měření byl určen posun zhlaví vrtu o 0,017 m směrem po svahu v azimutu 120° – měřeno mezi listopadem a dubnem 2018. Tato hodnota je výrazně vyšší než hodnota určená z měření senzoru. Celkově nevěrohodné výsledky terestrických měření provedených kombinací metod GNSS a trigonometrie ukazují na komplikovanost použití geodetických metod v podmínkách nestabilních území. Přesnost použité metody je výrazně nižší než přesnost určení koncového bodu senzoru SAA (méně než 1 mm v případě SAA). Geodetické metody obecně nejsou v takovýchto podmínkách schopny poskytnout přesnější anebo alespoň stejně přesnou srovnávací metodu.

5.3. Vrtné práce a instalace senzoru SAA

V listopadu 2016 byl v místech aktivního sesuvu pod železničním přejezdem odvrtán 16,0 m hluboký vrt (obr. 5.6). Byla použita metoda jádrového vrtání, aby bylo možné získat maximum informací o složení a vlastnostech vertikálního horninového profilu. Vrtné jádro bylo zdokumentováno (obr. 5.16) a vrt byl vystrojen PVC trubkou o předepsaném vnitřním průměru 27 mm, která byla fixována cementobentonitovou směsí. Po částečném vytvrdnutí směsi bylo na vrt umístěno kovové zhlaví (obr. 5.13 vpravo).

V dubnu 2017 byl do vystrojeného vrtu umístěn senzor SAA tak, že osa +Y je orientována přibližně ve sklonu svahu (azimut 150°) a osa +X je orientována na jihozápad (azimut 240°). Nedaleko vrtu byla umístěna vodotěsná elektroinstalační krabice do níž byla instalován univerzální programovatelný datalogger CR300 od společnosti Campbell Scientific a nezbytné příslušenství (obr. 5.13 vlevo). Jelikož je hloubka vrtu o 0,8 m větší než je délka senzoru, nachází se poslední sledovaný kloub řetězce 0,8 m pod úrovní terénu.

5.4. Realizace automatického odečítání senzoru

Senzor SAA lze ovládat buď pomocí počítače nebo pomocí vhodného dataloggeru. Při laboratorních testech senzoru byl použit laptop s nainstalovaným software SAAView a USB komunikační a napájecí rozhraní SAA-USB. Při polní instalaci bylo, z důvodů potřeby automatizace odečtů, nezbytné použití programovatelného dataloggeru. Senzor SAA samotný neobsahuje žádné záznamové zařízení ani hardware a software potřebný pro řízení měření.

Společnost Measurand nedodává k senzoru vlastní datalogger, ale přístroj je schopen komunikovat s universálními programovatelnými dataloggerými třetích stran, přičemž výrobce doporučuje několik typů universálních dataloggerů od společnosti Campbell Scientific. Pro komunikaci se senzorem SAA byl vybrán universální datalogger CR300 jmenované společnosti, který je schopen komunikovat s většinou senzorů používajících digitální výstup. Jedná se o „low-cost“ alternativu k profesionálním dataloggerům CR800 a CR1000. Datalogger je ovládán pomocí skriptovacího jazyka Basic. Sestava je doplněna o rozhraní SAA232, které zprostředkovává komunikaci se senzorem a především jeho napájení. Optimální funkce snímače vyžaduje velmi přesnou voltáž, kterou nelze dodávat pouze za použití akumulátoru, jenž obvykle produkuje kolísavé napětí. SAA232 stabilizuje napětí na úroveň 13,5 V. V současné době je sestava napájena 12 V akumulátorem o kapacitě 18Ah. V závislosti na teplotě okolí je baterie schopna napájet zařízení po dobu 2 až 3 měsíců, při frekvenci odečtů 4x za hodinu. Veškeré zařízení je umístěno ve vodotěsném elektroinstalačním boxu (obr. 5.13).



Obr. 5.13 Senzor instalovaný na lokalitě v Třebenicích: (vlevo) elektroinstalační box; (vpravo) vrt s vyvedenou chráničkou

5.5. Monitoring přírodních podmínek

Kolísání hladiny podzemní vody (dále jen HPV) a množství srážek, které potenciálně zvyšují nasycenost zemin, jsou faktory, které často souvisejí s výskytem sesuvů nebo jejich pohybovou aktivitou. HPV byla sledována v 9,5 m hlubokém hydrologickém pozorovacím vrtu umístěném jen 10 m jihozápadním směrem od senzoru SAA. Vrt byl vybaven hydrostatickým hydrologickým senzorem TSH22 (rozsah měření 0-10 m s přesností 0,1% rozsahu), který registruje HPV každou 1 hodinu.

Na rozdíl od Novotného prací (Novotný et al. 2006) nebyla k dispozici žádná přímá měření saturace půdy vodou, a proto byly použity meteorologické proměnné (srážky, teplota, vlhkost) k odhadu potenciálně efektivních srážek. Teplota, srážky a vlhkost byly měřeny automatickou meteorologickou stanicí umístěnou 2 km severovýchodním směrem od sledovaného sesuvu. Meteorologické proměnné byly zaznamenány v intervalu 10 minut. Pro výpočet potenciálně efektivních srážek (definovaných jako rozdíl celkových srážek a potenciální evapotranspirace) byly použity jejich denní průměry nebo sumy. Takto určené hodnoty nepředstavují skutečný objem vody vstupující do nenasycené zóny, ale slouží jako indikátor hydrologických podmínek vhodných pro porovnání jednotlivých etap sledovaného období. Pro výpočet denních součtů potenciální evapotranspirace byly použity dvě metody vhodné pro oblasti s hustým porostem vegetace. Linacreova rovnice (Linacre 1977) umožňuje odhad potenciální evapotranspirace pouze pomocí měřené teploty (8), zatímco Ivanov (1954) vychází z měsíčních průměrů vlhkosti a teploty (9).

$$PET = \frac{[500 \cdot T_m / (100 - \varphi)] + 15(T - T_d)}{T - 80} \quad ; \quad T_m = T + 0,006 \cdot h \quad (8)$$

PET ... potenciální evapotranspirace [mm/den]

T ... průměrná teplota [°C]

φ ... zeměpisná šířka [stupně]

T_d ... průměrná teplota rosného bodu [°C]

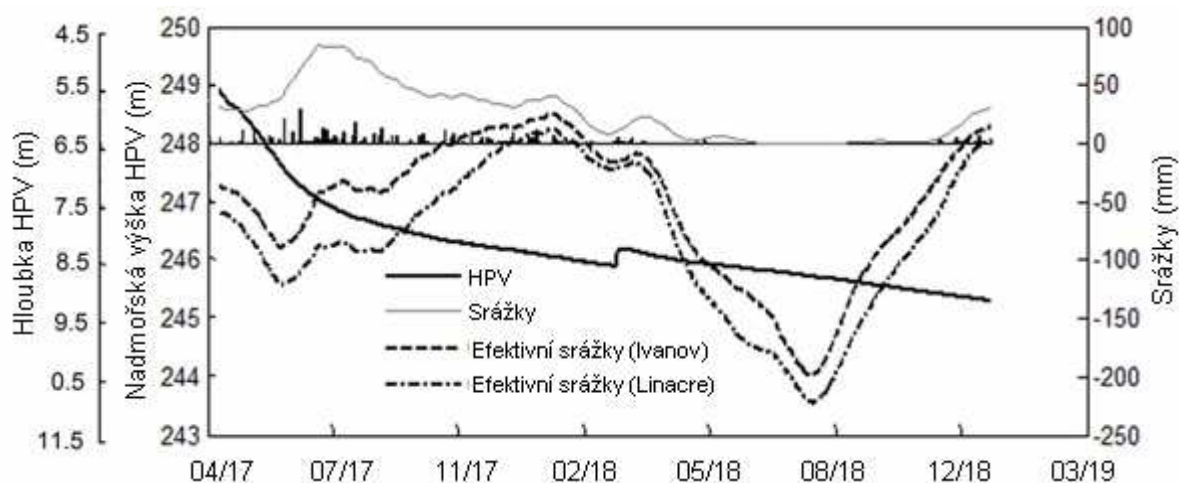
h ... nadmořská výška

$$PET = 0,0018 \cdot (25 + T)^2 \cdot (100 - rh) \quad (9)$$

PET ... potenciální evapotranspirace [mm/měsíc]

T ... průměrná měsíční teplota [°C]

rh ... průměrná měsíční hodnota relativní vlhkosti vzduchu [%]



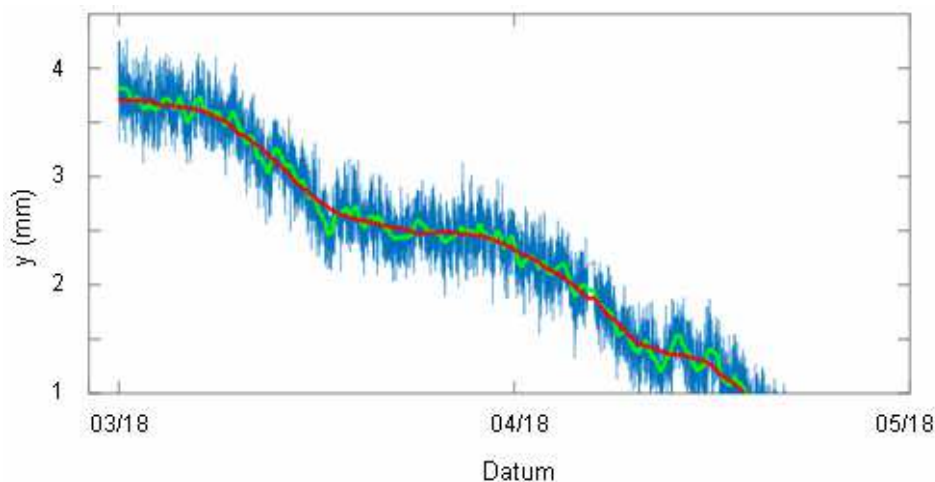
Obr. 5.14 Hladina podzemní vody, srážky a efektivní srážky

5.6. Zpracování dat

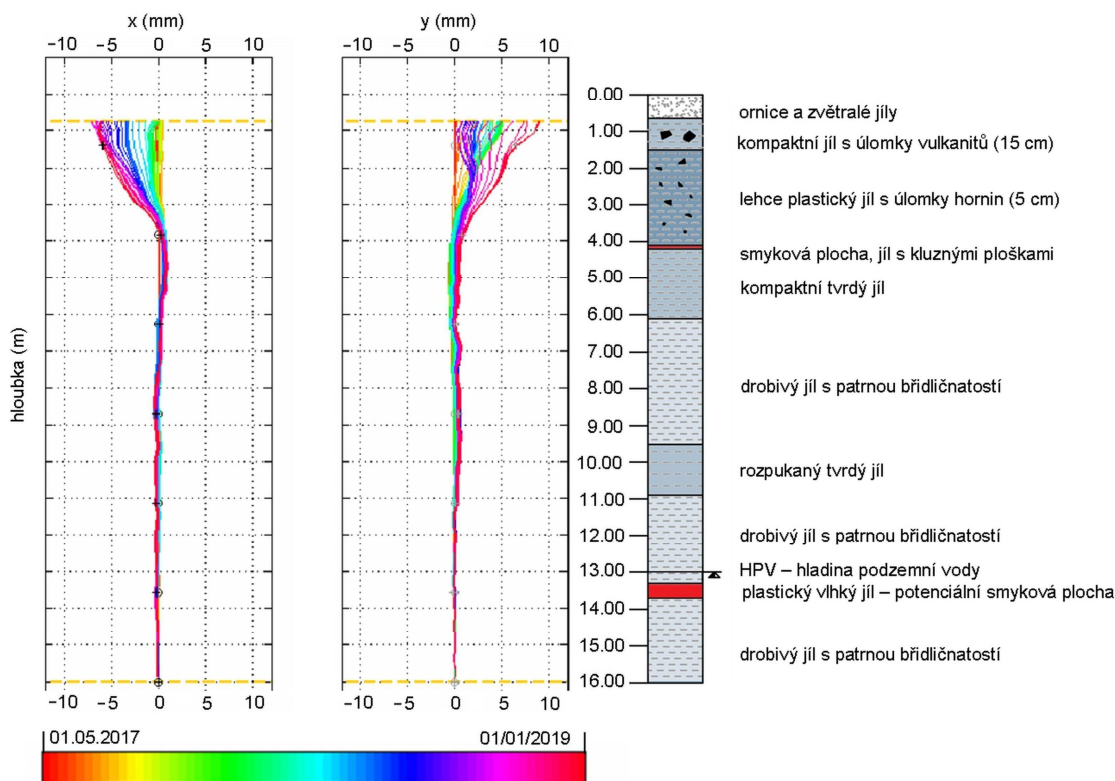
Naměřené hodnoty jsou staženy z dataloggeru pomocí obslužného programu PC200W a uloženy v textovém formátu do souboru *.dat, kde každý řádek představuje jedno odečtení senzoru a který obsahuje veškerá data měřená senzorem (průměry z přednastaveného počtu odečtů). Měřená data jsou opravena pomocí tabulky kalibračních hodnot a je vypočtena poloha kloubů v lokálním souřadnicovém systému (absolutní tvar senzoru v okamžiku odečtu senzoru). Surová měřená data i vypočtené souřadnice v lokálním souřadnicovém systému jsou uloženy v binárním formátu *.mat, který je kompatibilní se software Matlab a obsahuje všechna data ve formátu „structure array“. Deformace snímače jsou počítány jako změny jeho absolutního tvaru vzhledem k vybranému referenčnímu měření v software SAAView (referenčním datem pro zpracování měření z vrtu u Třebenic bylo 1.5.2017).

5.7. Současná aktivita sesuvu z měření senzoru SAA

Vysokofrekvenční hodnoty zachycené senzorem SAA byly významně zatíženy náhodným šumem měření MEMS akcelerometrů (obr. 5.15). Jeho směrodatná odchylka byla odhadnuta s použitím denních klouzavých průměrů na 0,16 mm pro horní kloub řetězce resp. 0,023 mm pro jeden segment řetězce. Tato hodnota je v souladu s hodnotami zjištěnými během laboratorního testování senzoru (Urban et al. 2016).



Obr. 5.15 Detail pohybu koncového bodu senzoru v ose y: modrá – měřené hodnoty, zelená – denní průměry, červená – týdenní průměry

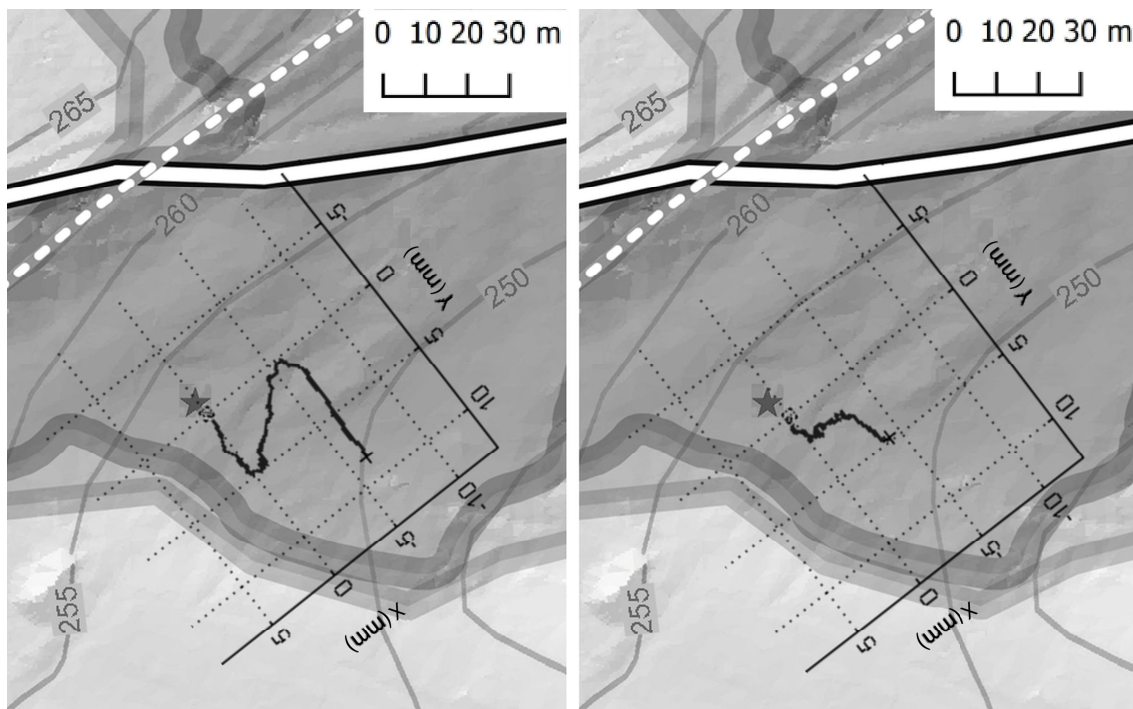


Obr. 5.16 Deformace senzoru v čase a vertikální horninový profil: (vlevo) deformace senzoru 14denní krok (1.5.2017 - 1.1.2019), hnědá plná čára znázorňuje úroveň terénu; (vpravo) Vertikální profil založený na vzorcích jádrového vrtání

V průběhu monitoringu byly registrovány horizontální posuny o velikosti řádově 5 mm za rok, což je výrazně nad mezemi přesnosti senzoru (Urban et al., 2016). Získané deformace podél hloubkového profilu se odehrávaly nad mělkou smykovou plochou v hloubce 3,8 m, zatímco v blízkosti hlubší smykové plochy v hloubce 13,5 m nebyla

detekována žádná aktivita. Nejvyšší pohybovou aktivitu zaznamenaly segmenty blíže k povrchu a to převážně ve směru sklonu svahu (obr. 5.16).

Polární grafy ukazují posuny kloubů senzoru v hloubkách 1,1 m a 2,3 m (obr. 5.17). Trend pohybu po svahu je zřejmý a k 1.1.2019 dosáhl posun velikosti 9 mm. Zároveň je viditelná periodicitu zaznamenaných pohybů. Vratná složka pohybu kolmá na směr spádnice je v hloubce 1,1 m zřetelně patrná, zatímco v hloubce 2,3 m je výrazně menší (obr. 5.17). Z deformace výstroje vrtu (obr. 5.16) je zřejmé, že ve sledovaném období nedocházelo k pohybům podle aktivní smykové plochy, ale ke gravitačním pohybům masy zemin nad smykovou plochou, které způsobily postupné vyklánění výstroje vrtu a odpovídající deformaci senzoru.

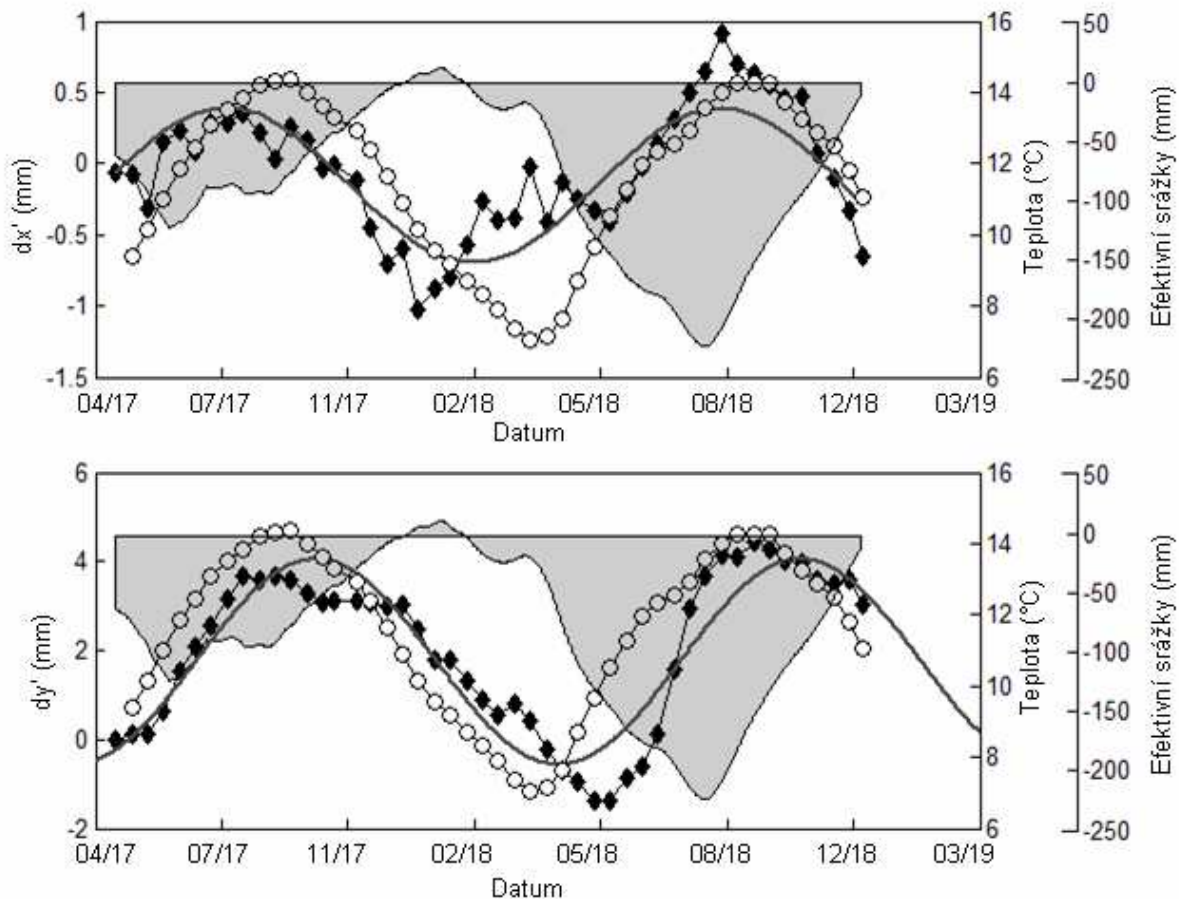


Obr. 5.17 Polární grafy zobrazují horizontální pohyb kloubů senzoru: (vlevo) v hloubce 1,1 m a (vpravo) 2,3 m (hvězda představuje polohu k 1.5.2017, zatímco černý kříž ukazuje polohu k 1.1.2019).

Dále byla určena periodicitu reverzibilních pohybů a byla konfrontována s dostupnými charakteristikami prostředí, aby bylo možné vysvětlit její možné příčiny. Z tohoto důvodu byly složky relativních posunů X v hloubce 1,1 m otočeny tak, aby byl směr pohybu rovnoběžný s osou x lokálního souřadného systému (10), přičemž směr pohybu byl odhadnut pomocí lineární regrese.

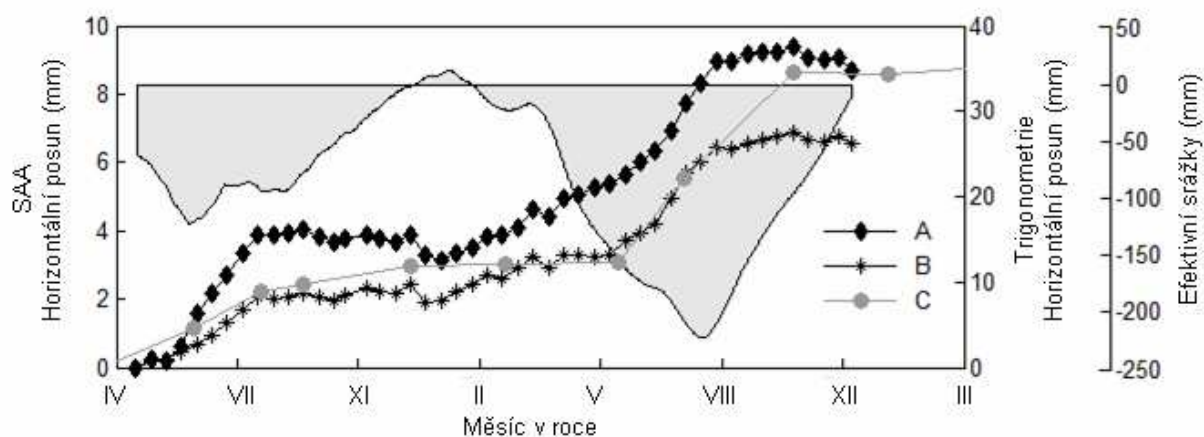
$$X' = R \cdot X \quad (10)$$

Pro odhad charakteristik periodické složky byl použit Fourierův model. Perioda reverzibilních pohybů kolmých na směr pohybu byla odhadnuta na 380 dní (+19 dní, dy' na obr. 5.18), což zhruba odpovídá roční periodě. Relativně vysoká nepřesnost odhadu periody je dána krátkou délkou časové řady měření (méně než dva roky). Amplituda harmonické funkce je 2,2 mm. Perioda reverzibilních pohybů ve směru pohybu (dx') byla odhadnuta na 390 dní (± 30 dnů) s amplitudou 0,5 mm.



Obr. 5.18 Komponenty pohybu (dy' složka kolmá ke směru pohybu, složka dx' rovnoběžná se směrem pohybu) a teplota v hloubce 1,1 m spolu s potenciálními efektivními srážkami. Diamanty s černou výplní - posuny, bílé kruhy - teplota měřená senzorem SAA v hloubce 1,1 m, šedá plná čára – aproximace Fourierovou řadou, vyplněná šedá plocha - potenciální efektivní srážky podle Linacre (1977).

Obrázek výše mimo jiné dobře ilustruje roční teplotní změny horninového prostředí měřené senzorem SAA. Jejich roční amplituda v hloubce 1,1 m je přibližně 3,5 °C, klesá na 1 °C v blízkosti první smykové plochy (3,8 m) a na méně než 0,5 °C pod úrovní 8 m. Roční průběh teploty se velmi podobá průběhu pohybových složek, zatímco křivka potenciálních efektivních srážek je fázově posunuta o několik měsíců (obr. 5.14).



Obr. 5.19 Celkový horizontální posun detekovaný senzorem SAA v hloubkách 1,1 m (A) a 2,3 m (B) během dubna 2017 - prosince 2018 je zobrazen spolu s pohyby povrchu detekovanými trigonometrickými měřeními (C) během dubna 2013 - prosince 2015 (Balek et al. 2015).

Horizontální posun kloubů senzoru SAA vykazuje zrychlení během jara a počátkem léta (obr. 5.19), což se na první pohled nezdá být vysvětleno vlivem srážek. Podobný roční průběh pohybu byl detekován také při povrchových trigonometrických měřeních v letech 2013 a 2016 (Balek et al. 2015, obr. 5.19). Posuny byly měřeny v místní trigonometrické síti, která měla základnu na stabilizovaném tělese železniční tratě. Při rekonstrukci železniční trati v roce 2015 byly bohužel zničeny referenční body, takže nebylo možné porovnat stejná časová období.

5.8. Shrnutí nejdůležitějších výsledků prací na lokalitě

- 1) Při průzkumu vzorků jádrového vrtání byly zjištěny dvě smykové plochy, a to v hloubce 4 m a 13 m. Hloubka první smykové plochy (4 m) odpovídá reaktivaci z 80. let, konkrétně reaktivaci C. Hloubka smykové plochy sesuvu C byla zjištěna v hloubce 4-5 m (Rybář 1983). Smyková plocha navrtaná v hloubce 13 m by mohla odpovídat s smykové ploše staršího sesuvu (obr. 5.6).
- 2) Během 20 měsíců měření byly senzorem SAA detekovány pomalé pohyby nad mělkí smykovou plochou. Velikost posunu dosáhla na koncových kloubech senzoru hodnot kolem 9 mm. Tato hodnota je výrazně nad hranicí spolehlivosti senzoru.
- 3) K nejvýraznějším pohybům docházelo během jara a začátku léta, poté aktivita prakticky ustala. Takovýto průběh deformací odpovídá výsledkům předchozích

měření na této lokalitě, kdy k největším pohybům dochází na jaře a počátkem léta (po nasycení horninového prostředí vodou), poté aktivita sesuvu klesá.

- 4) Během roku se mění nejen rychlost, ale i směr pohybu. Časová řada vykazuje výraznou periodickou složku, jejíž směr je přibližně kolmý na složku trendu. Perioda reversibilní složky byla odhadnuta přibližně na jeden rok a amplituda 2,2 mm. Periodicita ve směru pohybu je prakticky zanedbatelná.
- 5) Sledované pohyby nebyly pohyby sesuvnými, ale byly zachyceny pouze gravitační pohyby zemin nad smykovou plochou.
- 6) Charakter a velikost pohybů detekovaných senzorem SAA v přízemních vrstvách zemin odpovídá výsledkům předchozích výzkumů provedených na lokalitě.
- 7) V souladu s výsledky laboratorních měření jsou zjištěny, že při registraci průměrů z 1000 odečtů senzoru nejsou náhodné chyby registrovaných hodnot zanedbatelné. Směrodatná odchylka z opakování, určená na základě denních průměrů měření, je 0,023 mm/segment.

6. Diskuze

Na základě rešerše dosud publikovaných prací je možné říci, že většina publikací se nezabývá primárně testováním přesnosti senzoru, ale spíše ověřením funkčnosti a použitelnosti senzoru v daných podmínkách a pro daný účel. Spíše okrajově jsou pak prezentována srovnání s jinými metodami, nejčastěji s měřeními inklinometrickou sondou. Ve značné části prezentovaných aplikací není vyžadována vysoká přesnost senzoru, důležité je zachycení určitých trendů a změn v chování sledovaného profilu, zrychlení deformací, překročení jistých mezních hodnot, které jsou však zpravidla řádově větší než potenciální přesnost senzoru. Výsledky měření senzoru SAA jsou prezentovány a porovnávány většinou graficky bez rozborů přesnosti a určení směrodatných odchylek. Takovýto postup vychází ze způsobu, jakým jsou a byly výsledky inklinometrických měření dosud prezentovány, kdy je důležité zachytit určité změny v tvaru sledovaného profilu reprezentované ohybovou čarou, které ukazují na procesy probíhající ve sledovaném prostředí, jako je například poloha smykové plochy, křivky průhybu, křivky sedání atp. Chyby měření musí být takové, aby nenarušily vypovídací hodnotu měření. Čím větší jsou deformace tím větší mohou být přípustné chyby jejich měření. To jsou také podle mého názoru důvody, proč se spíše než přesnost senzoru tyto publikace soustřeďují na použitelnost senzoru pro daný účel. Mimoto, určení přesnosti měření senzoru na základě porovnání s klasickou inklinometrickou sondou je značně komplikované a až nemožné, a to ze dvou hlavních důvodů: Za prvé, přesnost inklinometrické sondy není výrazně vyšší než přesnost SAA (Mikkelsen 2003). Za druhé, Inklinometrickou sondou je sledovaný profil proměřován obecně v jiných lomových bodech než při použití senzoru SAA. Navíc, souběžné měření oběma metodami nemůže být prováděno ve stejném vrtu. Většinou jsou pak porovnávána měření ve dvou sousedících vrtech, kde je sice očekáván stejný charakter a rychlost pohybů, ale nelze očekávat, že deformace pažení inklinometrického vrtu budou s dostatečně vysokou mírou přesnosti shodné s deformacemi PVC zapouzdření SAA senzoru. Přesto lze z dostupných publikací vyčíst mnoho velmi důležitých informací o charakteristikách přesnosti senzoru SAA a jejich závislosti na různých faktorech, jakými jsou způsob instalace senzoru, klimatické podmínky, velikost a charakter deformací, frekvence odečtů a frekvence sledovaných deformací. Ukazuje se jako nutné se otázkou přesnosti senzoru zabývat vždy ve vztahu k uvedeným faktorům.

Existují však situace, při kterých je nutné senzorem zaznamenávat relativně malé deformace s maximální možnou přesností. Často se jedná o případy, kdy je senzor

použit pro získávání vstupních dat do modelování v rámci různých experimentů, jako jsou například zátěžové testy některých konstrukcí (Liu 2019). V takových případech je velice důležité znát meze přesnosti senzoru, které lze spolehlivě určit jen vhodnými komparačními metodami.

6.1. Laboratorní testování senzoru

Přesnost senzoru samotného v laboratorních podmínkách se může značně lišit od přesnosti výsledků získaných na konkrétní lokalitě, a to v důsledku vlivu vnějších podmínek, podmínek instalace senzoru a charakteru sledovaných pohybů. Laboratorní testování tak poskytuje informaci o jakési mezní hodnotě přesnosti výsledků, jaké lze senzorem dosáhnout.

Proto bylo cílem laboratorních experimentů především určit přesnost měření senzoru samotného bez vlivu dalších vnějších faktorů. Testy byly prováděny za konstantních podmínek a přesnost měření senzoru byla charakterizována přesností měření relativní polohy lomových bodů platnou pro jeden segment řetězce. Takovýto způsob popisu přesnosti senzoru je založen na předpokladu, že se směrodatná odchylka měřené polohy šíří senzorem s odmocninou počtu segmentů, přičemž lze předpokládat přibližně konstantní nepřesnosti v měření náklonů na jednotlivých segmentech. Vzhledem k tomu, že je k výpočtu náklonu každého ze segmentů použit výpočet ze trojice identických MEMS akcelerometrů vyráběných ve velkých sériích a jejich přesnost je výrobcem garantována, je tento předpoklad opodstatněný. Skutečnost, že směrodatné odchylky měření narůstají s odmocninou počtu zapojených segmentů, byla během testování taktéž ověřována a prokázána. Pro sledování malých deformací je tedy vhodnější použít senzor s větší délkou segmentu.

Nejzásadnějším faktorem ovlivňujícím přesnost měření senzoru se během testování ukázala velikost vyvolávaných deformací, potažmo míra mechanického namáhání řetězce související s velikostí indukovaných deformací. Při experimentech na samotném senzoru (bez PVC opláštění) došlo při řádovém navýšení velikosti deformací až k několikanásobnému nárůstu směrodatných odchylek. Jakmile však bylo mechanické namáhání senzoru redukováno použitím PVC opláštění, byl nárůst nepřesnosti při vyšších deformacích výrazně nižší a v některých případech až prakticky zanedbatelný. Přesnost měření deformace tedy výrazně nezávisí na velikosti deformace, ale na míře mechanického namáhání kloubních spojů, která může být různá v závislosti na metodě senzoru a na charakteru deformací. Při experimentu v horizontální poloze senzoru krytého PVC opláštěním byl vliv velikosti deformace sledován při minimální

mechanickém namáhání senzoru. Vliv nepřesnosti v měření akcelerometru narůstá výrazně méně, než jakými chybami se projevují vlivy mechanického namáhání.

Měření MEMS akcelerometrů jsou zatížena značnými náhodnými chybami (šumem), jejichž vliv je kompenzován vysokým počtem senzorů (standardně je jeden záznam průměrem z 1000 odečtů). Velikost náhodné složky lze spolehlivě odhadnout na základě opakovaných odečtů senzoru bez jeho deformace. Směrodatné odchylky určené z rozdílů od denních průměrů při polní instalaci senzoru 0,023 mm/segment v každém směru resp. 0,032 mm/segment. Tato směrodatná odchylka odpovídá hodnotám opakovatelnosti zjištěným během testu dlouhodobé stálosti měření, kdy byly na základě 72 měření provedených během 18 hodin zjištěny směrodatné odchylky 0,023 mm a 0,025 mm resp. 0,034 mm/segment v horizontálním směru. Hodnoty opakovatelnosti měření pro 24 hodin, zjištěné při polním experimentu a během laboratorních zkoušek, jsou velmi podobné. Vyšší směrodatné odchylky z opakování, zjištěné při experimentu v kombinované instalaci, byly s největší pravděpodobností způsobeny nežádoucím pohybem volných segmentů. Doba mezi vyvoláním deformací a odečtem opakovaných měření byla příliš krátká na to, aby stačila k ustálení senzoru. Opakovaná měření bez vyvolané deformace byla prováděna mezi jednotlivými etapami. Zjištěná směrodatná odchylka z opakování 0,05 mm/segment je, vzhledem k výsledkům ostatních laboratorních experimentů i vzhledem k výsledkům polních měření, nelogicky vysoká.

Jak bylo dokázáno během laboratorního testování i z výsledků měření v terénu, směrodatná odchylka z opakování má i při registraci průměrů z 1000 měření stále relativně velký podíl na celkové přesnosti měření. V případě dlouhodobého monitoringu pomalých pohybů a přetvoření je výhodné provádět odečty senzoru s vyšší frekvencí než je požadovaná frekvence výsledné časové řady tak, aby bylo možné registrované hodnoty dále průměrovat – například na denní bázi.

Na základě výsledků laboratorních experimentů byla při polní instalaci uvažována směrodatná odchylka jednoho měření senzoru 0,05 mm/segment v každé ze dvou sledovaných svislých rovin tj. 0,07 mm/segment. Na koncovém kloubu senzoru umístěném v hloubce 0,8 m by směrodatná odchylka určeného posunu měla dosahovat hodnoty 0,50 mm tj. 0,35 mm/segment v každém směru.

6.2. Doposud publikované výsledky

Na základě uvedené rešerše a laboratorního testování je patrné, že senzor SAA může být za určitých podmínek plnohodnotnou alternativou měření klasickou transversální inklinometrickou sondou (Abdoun et al. 2005a, Abdoun et al. 2009, Bennett et al. 2009,

Smith 2015). V dostupné literatuře autoři konfrontují výsledky měření senzoru SAA s měřeními celé řady geodetických a geotechnických metod. Až na několik výjimek nejsou v těchto pracích charakteristiky přesnosti senzoru SAA určovány. Přesto lze z publikovaných prací vyčíst nebo vyvodit značné množství informací o vlastnostech senzoru SAA. Vhodnou komparační metodou pro testování senzoru se zdá být použití vysoce přesných snímačů LVDT (Abdoun et al. 2005b). Tyto snímače, podobně jako SAA, jsou schopny měření s vysokou frekvencí odečtů (Hendry et al. 2013).

Na základě prezentovaných výsledků nelze přímo usuzovat na pokles přesnosti měření senzorem SAA s rostoucí velikostí deformací. Zpravidla jsou prezentované rodíly mezi referenční metodou a měřeními senzorem SAA při vyšších deformacích vyšší avšak nelze spolehlivě určit jakou měrou je tato skutečnost zapříčiněna nepřesnostmi referenční metody. Další faktory mající potenciálně vliv na přesnost měření senzoru zatím nebyly v dostupné literatuře řešeny, vliv instalace senzoru do PVC opláštění, vliv počtu odečtů senzoru, vliv mechanického namáhání.

Nicméně se ukazuje, že senzor je schopen velmi přesně měřit relativně malé deformace v řádech milimetrů až centimetrů na širší deformační zóně (Abdoun et al. 2005b, Liu et al. 2019). Velkým problémem senzoru je naopak jeho použití ke sledování stříhové deformace typicky se vyskytující v okolí smykové plochy deskových sesuvů. To je zapříčiněno minimální volností senzoru ve výstroji vrtu tvořenou PVC trubkou o průměru 27 mm. Tento problém se snaží výrobce řešit instalací senzoru v širším pažení, ve kterém po stlačení v axiálním směru utvoří spirálu. Sledovány jsou pak změny tvaru středové čáry šroubovice. Dle prezentovaných experimentů toto řešení přináší významné snížení přesnosti (Danish et al. 2014). V takovýchto případech se jeví jako užitečnější použití co nejširšího pažení v kombinaci s klasickou inklinometerickou sondou nebo použití „in-place“ inklinometrických systémů založených na konstrukci inklinometrické sondy, které umožňují větší stříhovou deformaci pažení při zachování funkčnosti systému.

6.3. Monitoring svahových pohybů

Senzor SAA detekoval mělké svahové pohyby s jasným ročním trendem zrychlení během jara a začátku léta (březen-červenec), po kterém následovalo období několika měsíců s prakticky nulovými rychlostmi pohybu. K tomuto pohybu docházelo i v období bez extrémních srážkových událostí, kdy hladiny podzemní vody trvale klesají a leží hluboko pod aktivní rovinou posuvu. Tento vzorec je výsledkem několikaměsíčního zpoždění maxima efektivních srážek, ke kterému dochází během zimy (prosinec-leden) a

po kterém následuje snížení sání půdy, které může dosáhnout 0 kPa v hloubce 1 m (od února do května) nebo -10 až -20 kPa do hloubky 2 m vrcholem v květnu (Novotný et al. 2006). Je pravděpodobné, že postup minimálního sání pod hloubkou 2 m je dále zpožděn, což by mohlo vysvětlit vrcholový horizontální posun detekovaný v červnu až červenci. Velikost celkových horizontálních pohybů nebyla ovlivněna nadprůměrnými srážkami během léta 2017, protože potenciální efektivní srážky zůstaly stále výrazně pod nulovou hodnotou.

Senzor SAA detekoval periodické pohyby s periodou jednoho roku. Tento reverzibilní pohyb je pravděpodobně způsoben faktory s roční periodicitou, jako jsou změny teploty nebo změny nasycení půdy a s největší pravděpodobností není způsoben výkyvy hladiny podzemní vody. To proto, že hladina podzemní vody setrvale klesá a nemá ve sledovaném období roční periodicitu, a také proto, že hladina podzemní vody je po celou dobu měření pod úrovní smykové plochy posuvu. Periodické změny rychlosti pohybu detekované senzorem SAA jsou v souladu s předchozím výzkumem na této lokalitě (Novotný a Kobr 2008, Balek et al. 2015). Mimoto je roční kolísání rychlosti častým jevem pozorovaným na pomalých svahových deformacích (Maciotta et al. 2015, Berg et al. 2018). Na základě výsledků monitorování se zdá, že svahový pohyb je komplikovanější než jen pohyb po svahu s proměnlivou rychlostí. Lze předpokládat, že klouzavé pohyby a objemové změny půd jsou silně propojeny a že objemové změny mají významný vliv na kluzný proces pomalu se pohybujících sesuvů půdy, v případě, kdy se hladina podzemní vody nedotýká smykové plochy.

Zdá se pravděpodobné, že část těchto pohybů by mohla být způsobena nedostatečnou kompenzací vlivu kolísání teplot na měření akcelerometrů MEMS. Vzhledem k publikovaným výsledkům dřívějšího testování předpokládáme, že tento efekt měl v tomto případě jen minimální význam. Beran et al. (2014) prezentovali výsledek experimentu, kdy kolísání teploty v rozsahu 25 °C způsobilo submilimetrové chyby v poloze na konci 4 m dlouhého SAA senzoru, které byly charakterizovány směrodatnou odchylkou 0,6 mm. V našem případě je senzor SAA dlouhý 15,2 m, ale změny teploty neovlivňují významněji více než horní 4 metry senzoru. Kromě toho jsou teplotní změny 3-4krát nižší než ve výše uvedeném experimentu, lze proto očekávat několikanásobně menší vliv teplotních změn na změřené posuny.

Celkově nebyly během sledovaného období registrovány pohyby ani na jedné ze dvou smykových ploch určených na základě výsledků jádrového vrtání. Registrované pohyby tedy nepředstavují pohyby sesuvné, ale gravitační pohyby zemin nad nejmělkčí smykovou plochou.

Výše popsané posuny nebylo možné ověřit na základě výsledků provedených geodetických měření neboť výsledné pohyby byly tak malé, že byly na hraně nebo pod mezí detekovatelnosti. Určení absolutních hodnot posunů pomocí kombinace GNSS a trigonometrického měření se ukázalo jako metoda sice teoreticky přesná, ale časově velmi náročná a obecně dosti komplikovaná. Posuny zjištěné touto metodou mají sice prakticky stejný směr, ale jejich velikost byla ve sledovaném období výrazně odlišná a vzhledem k doposud známým skutečnostem krajně nepravděpodobná.

Závěr

Hlavními cíli této práce bylo podrobné popsání charakteristik přesnosti senzoru SAA a zapojení senzoru do monitoringu svahové nestability. Definování vlastností a přesnosti senzoru je založeno na výsledcích doposud publikovaných prací, vlastních laboratorních experimentech a poznacích pramenících z provozu senzoru v místech aktivního sesuvu.

Postup a výsledky provedených experimentů jsou uvedeny ve čtvrté části textu. Přesnost senzoru je v této práci popisována směrodatnou odchylkou měřené souřadnice vztáženou k jednomu segmentu senzoru. Tento přístup je založen na prokázané závislosti mezi délkou řetězce a směrodatnou odchylkou měřené deformace, která narůstá s odmocninou počtu jeho segmentů. Směrodatné odchylky měřené nejsou tedy pro různé senzory SAA konstantní a takovýto přístup představuje universální způsob popisu charakteristik přesnosti testovaného zařízení.

Ukázalo se, že ani při registrování výrobcem doporučeného průměru z 1000 odečtů senzoru není vliv náhodných chyb zanedbatelný. V praxi je potom výhodné vždy měřit s vyšší frekvencí než je požadovaná frekvence časové řady a registrované hodnoty dále průměrovat. Bylo též prokázáno, že senzor vykazuje identickou přesnost v obou rovinách kolmých k ose senzoru. Tedy že nezáleží na natočení senzoru, podle jeho podélné osy, vzhledem ke směru deformací. Nárůst směrodatných odchylek při zvětšující se deformaci řetězce souvisí s vyšším namáháním flexibilních spojů senzoru. Jeho nepříznivý vliv na přesnost měření senzoru byl během testování prokázán. Při instalaci senzoru v ochranném PVC opláštění je nežádoucí efekt mechanického namáhání senzoru výrazně redukován. Nejvyšší přesnosti měřených deformací dosahuje senzor instalovaný v horizontální poloze, naopak nejvyšší hodnoty směrodatných odchylek byly zjištěny při vertikální instalaci senzoru. Při minimálním mechanickém namáhání konstrukce senzoru se směrodatná odchylka měření souřadnice pohybovala v rozmezí 0,3-0,6 mm segment. Nikdy během testování hodnota směrodatné odchylky nepřekročila hodnotu udávanou výrobcem tj. 0,15 mm na segment. Ve vztahu k již publikovaným pracem zabývajících se senzorem SAA je důležité připomenout, že výše uvedené směrodatné odchylky jsou platné při relativně nízké frekvenci měření. Nejvyšší frekvence, s jakou byla měření registrována, byla přibližně 0,06 Hz.

V práci jsou dále řešeny problémy spojené realizací monitoringu v místě mělkého sesuvu u Třebenic v Českém středohoří. Cílem akce bylo jednak testování senzoru v reálném provozu, jednak určení hloubky smykových ploch a jejich aktivity v místě aktivního sesuvu a v nepolední řadě interpretace naměřených pohybů a jejich

konfrontace s měnicími se podmínkami prostředí. Analýzou jádra byly ve vrtném profilu identifikovány dvě smykové plochy a to v hloubce 4 m a 13 m. V období od 1.5.2017 do 1.1.2019 byly senzorem registrovány svahové pohyby zemin nad mělčí smykovou plochou v hloubce 4 m, jejichž horizontální složka v maximu dosáhla velikosti 9 mm v hloubce 1,1 m. Nejednalo se o sesuvné pohyby, ale o gravitační pohyby zemin nad smykovou plochou jejichž velikost s hloubkou klesá. Rychlost a směr se v průběhu roku periodicky měnila, přičemž maximálních rychlosti byly detekovány vždy na jaře a počátkem léta. Horizontální posuny detekované senzorem SAA vykazovaly velmi podobný průběh, jaký byl zjištěn na základě trigonometrických měření prováděných na lokalitě mezi lety 2013-2016 a současně jsou v souladu se závěry dřívějších výzkumů provedených na této lokalitě.

Závěrem mohu konstatovat, že cíle disertační práce definované v kapitole č. 1, byly bezezbytku naplněny.

Použitá literatura

Abdoun, T., Danisch, L., and Bennett, V., 2005a. Wireless Remote Monitoring of Geotechnical Systems. In: *Geotechnical Engineering for Disaster Mitigation and Rehabilitation, Proceedings of the First International Conference*. Singapore, s. 515–520. DOI: 10.1142/98127016050063_0063

Abdoun, T., Danisch, L., Ha, D., 2005b. Advanced Sensing for Real-Time Monitoring of Geotechnical Systems. In: *Proceedings of Sessions of the Geo-Frontiers 2005 Congress*. Austin. DOI: 10.1061/40785(164)4

Abdoun, T., Bennett, V., Danisch, L., 2007a. Innovative sensing for real-time health monitoring of geotechnical systems. In: *SPIE Newsroom*. s. 25–27. DOI: 10.1117/2.1200707.0790

Abdoun, T., Bennett, V., Danisch, L., Shantz, T., Jang, D., 2007b. Field installation details of a Wireless Shape-Acceleration Array system for geotechnical applications. In: *Proceedings of SPIE 6529*. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.714413>

Abdoun, T., Bennett, V., Dobry, R., Thevanayagam, S., Danisch, L., 2008. Full-Scale Laboratory Tests Using a Shape-Acceleration Array System. In: *Proceedings of the Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics IV Congress 2008 - Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*. s. 1–9. ISBN 0784409757.

Abdoun, T., Bennett, V., Thevanayagam, S., Dobry, R., Shantz, T., Jang, D., 2009. Wireless MEMS-based system for real-time geotechnical instrumentation of active slopes. In: *WIT Transactions on the Built Environment*. s. 617-624. DOI: 10.2495/SAFE090571

Abdoun, T., 2010. MEMS Based Real-Time Monitoring System for Geotechnical Structures. In: *Indian Geotechnical Conference 2010*. [online]. Mumbai: GEOTrendz. [cit. 24.10.2019]. Dostupné z: <https://gndec.ac.in/~igs/ldh/conf/2010/articles/v001.pdf>

Abdoun, T., Bennett, V., Desrosiers, T., Simm, J., & Barendse, M., 2012. Asset Management and Safety Assessment of Levees and Earthen Dams Through Comprehensive Real-Time Field Monitoring. *Geotechnical and Geological Engineering*, **31**(3), s. 833–843. DOI: 10.1007/s10706-012-9569-3

Alexander, S., Tallin, J., 2017. Remote Monitoring System PTH 83 Shell River Landslide Russell, Manitoba. In: *Proceedings of Conference of the Transportation Association of Canada, St. John's, NL*. [online]. [cit. 24.10.2019]. Dostupné z: www.tacatc.ca/sites/default/files/conf_papers/alexanderspth_83_shell_river_landslide_remote_monitoring_system.pdf

Anděl, J., 1998. *Statistické metody*. 2. přeprac. vyd. Praha: Matfyzpress, 274 s. ISBN 80-85863-27-8.

Andrejašič, M., 2008. *MEMS accelerometers*. [online] [cit. 21.7.2019] Ljubljana: University of Ljubljana. Dostupné z: http://mafija.fmf.uni-lj.si/seminar/files/2007_2008/MEMS_accelerometers-koncna.pdf

Balek J., Marek T., Kadlečík P., 2015. Historický a současný vývoj sesuvného území u Třebenic. *Zprávy o geologických výzkumech v roce 2014*. **48**(1), s. 51-54. ISSN 0514-8057.

Balek, J., Urban, R., Štroner, M., 2016. Laboratory testing of the precision and accuracy of the ShapeAccelArray sensor in horizontal installation. In: *SGEM2016 Conference Proceedings*. Sofia: STEF92 Technology, 2016, s. 871-878. ISBN 978-619-7105-55-1.

Bennett, V., Abdoun, T., Shantz, T., Jang, D., Thevanayagam, S., 2009. Design and Characterization of a Compact Array of MEMS Accelerometers for Geotechnical Instrumentation. *Smart Structures and Systems Journal*. **5**(6), s. 663-679. DOI: [10.12989/sss.2009.5.6.663](https://doi.org/10.12989/sss.2009.5.6.663)

Beran, T., Danisch, L., Chrzanowski, A., Bazanowski, M., 2014. Measurement of Deformations by MEMS Arrays, Verified at Sub-millimetre Level Using Robotic Total Stations. In: *Geoinformatics FCE CTU*. **12**, s. 34-40. ISSN 1802-2669. DOI: [10.14311/gi.12.6](https://doi.org/10.14311/gi.12.6)

Berg, N., Smith, A., Russell, S., Dixon, N., Proudfoot, D., Take, A., 2018. Correlation of acoustic emissions with patterns of movement in an extremely slow moving landslide at Peace River, Alberta, Canada. *Canadian Geotechnical Journal*. **55**(10), s. 1475-1488. DOI: <https://doi.org/10.1139/cgj-2016-0668>

Bradley, B. a Prado, R., 2014. The use of Shape Accel Array for monitoring utilities during urban tunnel drives. *Crossrail Learning Legacy*. [online]. London: ICE Publishing,

s. 221-237. [cit. 24.10.2019]. Dostupné z: <https://www.icevirtuallibrary.com/doi/abs/10.1680/cpid.60784.015>

CSG s.r.l., 2019 [online]. [cit. 24.10.2019]. Dostupné z: <http://www.csgrl.eu>

Dach, R., Hugentobler, U., Fridez, S., Meindl, M. (2007). *Bernese GPS software version 5.0*. [online] Astronomical Institute, Bern: University of Bern. [cit. 24.10.2019]. Dostupné z: <http://www.bernese.unibe.ch/docs50/DOCU50.pdf>

Danisch, L. A., Lowery-Simpson, M. S., Abdoun, T., 2004. *Shape-acceleration measurement device and method*, Patent Application. Dostupné z: http://www.patentverein.de/p_getfile.php?id=EP_1955013_B1.pdf&lauf=2018-11-01

Danisch, L., Chrzanowski A., Bond J., 2008. Fusion of Geodetic and MEMS sensors for integrates monitoring and analysis of deformations. In: *13th FIG International Symposium on Deformation Measurements and Analysis, Lisbon*. [online]. [cit. 24.10.2019]. Dostupné z: <https://pdfs.semanticscholar.org/bf8f/3c49f1ae874d6b44bde435f62a15cdf8aff6.pdf>

Danisch, L., Beran, T., Levesque, Ch., 2014. Toward Longer Lifetimes for Remote Deformation Monitoring Installations in Rock and Hard Soils, Using SAA Shape Sensing Arrays. In: *Congreso de la Sociedad Chilena de Ingeniería Geotécnica*. [online] Santiago de Chile: Universidad Católica de Chile. [cit. 24.10.2019]. Dostupné z: <https://www.issmge.org/uploads/publications/1/43/04-technical-committee-12-tc206-03.pdf>

Dasenbrock, D. D., 2010. Automated Landslide Instrumentation Programs on US Route 2 in Crookston. In: *Proceedings of the University of Minnesota 58th Annual Geotechnical Engineering Conference*. [online]. s. 165-185. [cit. 24.10.2019]. Dostupné z: http://www.measurandgeotechnical.com-/2010mndot-UofM-dasenbrock_final.pdf.

Dasenbrock, D. D., Abdoun, T., Bennett, V., 2011. Real-Time Structural Health Monitoring of Landslides and Geotechnical Assets with ShapeAccelArrays. In: *Geo-Frontiers 2011 Conference: Advances in Geotechnical Engineering*. s. 1585-1594. DOI: 10.1061/41165(397)162

DGSI, 2019. [online]. [cit. 24.10.2019]. Dostupné z: <https://durhamgeo.com>

EUREF, 2019. [online]. [cit. 24.10.2019]. Dostupné z: http://www.epncb.oma.be/_productsservices/coord_trans/

Geocon, 2018. *MEMS In-Place Inclinometer Systems*. Lebanon: Geocon Incorporated. Dostupné z: https://www.geokon.com/content/datasheets/6150_MEMS_In-Place_Inclinometer_Systems.pdf

Hendry, M. T., Martin, C. D., Barbour, S. L., 2013. Measurement of cyclic response of railway embankments and underlying soft peat foundations to heavy axle loads. *Canadian Geotechnical Journal*. **50**(5), s. 467–480. ISSN 0008-3674. DOI: 10.1139/cgj-2012-0118.

Hendry, M. T. , Barbour, S. L., Martin, C. D., 2011. An Evaluation of Real-Time Deformation Monitoring Using Motion Capture Instrumentation and Its Application in Monitoring Railway Foundations. *Geotechnical Testing Journal*. **34**(6), s. 1-11. DOI: 10.1520/gtj103285

Chiou, J.S., Ko, Y., Hsu, S.Y., Tsai, Y.C., 2012. Testing and analysis of a laterally loaded bridge caisson foundation in gravel. *Soils and Foundations*. **52**(3), s. 562–573. DOI: 10.1016/j.sandf.2012.05.013

Levesque, C., Danisch, L., Patterson, T., 2017. Performance of a new installation method for SAA instrumented flexures. In: *Proceedings of 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineer*. [online]. s. 1903-1906. [cit. 24.10.2019]. Dostupné z: <https://www.issmge.org/uploads/publications/1/45/06-technical-committee-12-tc206-04.pdf>

Ivanov, N. N.: 1954, *The determination of potential evapotranspiration*. Izvestiia Vsesoiuznogo Geograficheskogo Obschestva, roč. 86, no. 2, NNA.900626.0209.

Linacre, E. T., 1977. A simple formula for estimating evaporation rates in various climates, using temperature data alone. *Agricultural Meteorology*. **18**(6), s. 409–424. DOI: [https://doi.org/10.1016/0002-1571\(77\)90007-3](https://doi.org/10.1016/0002-1571(77)90007-3)

Lipscombe, R., Carter, C., Perkins, O., Thurlow, P., Guerro, S., 2013. *Use of Shape Accel Arrys (SAAs) for Measuring Retaining Wall Deflection*. [online]. [cit. 24.10.2019]. Dostupné z: <http://www.mra.pt/repositorio/6fe3/pdf/5979/2/caso-practico-muro-de-contencion.pdf?d=1>

Lovioso, M. a Giusta, D.: 2005, Precision of D.M.S. columns from real time in-place measurements and improvement in micro-movements analysis with early warning function. [online]. [cit. 24.10.2019]. In: *Proceedings of the CMEM XII Twelfth International*

Conference on Computational Methods and Experimental Measurements, s. 177-186.
DOI: 10.2495/CMEM050171

Lovioso, M., 2017. Experience with DMS® subsurface instrumentation at Åknes rockslide and new developments. [online]. [cit. 24.10.2019]. In: *Workshop - Drainage of large rockslides, Oslo*. Dostupné z: https://www.nve.no/Media/5306/dms-nve-oslo31_01_2017.pdf

Macciotta, R., Hendry, M., Martin, C. D., 2015. Developing an early warning system for a very slow landslide based on displacement monitoring. *Natural Hazards*. **81**(2), s. 887–907. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11069-015-2110-2>

Machan, G. a Bennett, V. G., 2008. *Use of Inclinometers for Geotechnical Instrumentation on Transportation Projects - State of the Practice*. [online]. [cit. 24.10.2019]. Washington DC: Transportation Research. Dostupné z: <http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/circulars/ec129.pdf>

Measurand, 2011. *Structural Monitoring: Dams*. [online]. [cit. 24.10.2019]. Dostupné z: http://www.measurandgeotechnical.com/examples_structures.html

Measurand, 2014. *SAAF technical specification*. [online]. [cit. 24.10.2019]. Dostupné z: <http://www.measurandgeotechnical.com/docs/saafspecificationmodel00341031.pdf>

Measurand, 2015. *SAAF Manual: Description and installation*. [online]. [cit. 24.10.2019]. Dostupné z: https://measureitpdf.blob.core.windows.net/pdf/pdf_datablad/measurand/measurand_saaf_manual.pdf

Meyer, C. a Schütz, S., 2011. *SwissMon – An approach to 4D Monitoring of Tunnels in Urban Environments*. [online] In: 8th International Symposium in Field Measurements in Geomechanics. Berlin. [cit. 24.10.2019]. Dostupné z: http://www.terra.ch/files/content/Publikationen/C_terra%20swissmon%204DMonitoring%20of%20tunnels%20in%20urban%20environments_2011_E.pdf

Mikkelsen E., 2003. Advances in inclinometer data analysis. [online] In: *Symposium on Field Measurements in Geomechanics*. Oslo. [cit. 24.10.2019] Dostupné z: <https://durhamgeo.com/pdf/papers/advances-in-data-analysis.pdf>

Novosad, L., 2015. *Landslide Monitoring Using Measurand ShapeAccelArray and Vista Data Vision*. [online]. Praha: Geomonitoring s.r.o. [cit. 24.10.2019]. Dostupné z:

https://www.vistadatavision.com/wp-content/uploads/2015/10/VDV-CaseStudy-GeoMonitoring_SAA.pdf

Novotný, J., 1998. First results of monitoring on Třeбенice Landslide in Czech Republic in Europe. In: *Proceeding 8th International IAEG Congress*. Rotterdam: Balkema, s. 1669–1676. ISBN 90-5410-990-4.

Novotný, J., 2002. Analysis of water effect on slope stability in clayey rocks. In: *Acta montana*. **10**(127), s. 7-47.

Novotný, J., Kohut, M., Možný, M., Herbstová V., 2006. Climatic impact to water conditions in the unsaturated and saturated zone of clayey rocks. [online]. In: *34th Congress of International Association of Hydrogeologists*. Beijing, China. [cit. 24.10.2019]. Dostupné z: http://en.cgs.gov.cn/achievements/201601/t20160112_35545.html

Novotný, J, a Kobr, M., 2008. Hydrogeological pattern of groundwater flow of landslides in Cretaceous claystones based on long-term groundwater monitoring and hydrologging measurement. *Environmental Geology*. **58**(1), s. 25-32. DOI: 10.1007/s00254-008-1486-7

Pašek, J., 1964. *Zpráva o podrobném geologickém výzkumu sesuvu u Třeбенic*. Praha: Geologický ústav ČSAV.

Quitt, E., 1971. *Klimatické oblasti Československa*. Studia Geographica, Brno: Geografický ústav ČSAV, 73 s.

K. Rollins, T. Gerber, and C. Cummins., 2009. Monitoring displacement vs. depth in lateral pile load tests with Shape Accelerometer Arrays. In: *Proc. of 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. Alexandria, Egypt, **3**, s. 5-9. DOI: 10.3233/978-1-60750-031-5-2016

RST Instruments, 2019 [online]. [cit. 24.10.2019]. Dostupné z: <http://www.rstinstruments.com>

Rybář, J., 1983. *Zpráva o podrobném inženýrskogeologickém výzkumu sesuvů u Třeбенic na železniční trati Čížkovice – Obrnice*. Praha: Ústav geologie a geotechniky ČSAV.

Rybář, J., 2007. Vliv klimatu na vývoj různých typů svahových pohybů. *Zprávy o geologických výzkumech v roce 2006*. Praha: Česká geologická služba, s. 90-92. ISBN 978-80-7075-689-0.

Schenk, V., Schenková, Z., Cajthamlová, M. a Fučík, Z., 2010. GEONAS - Geodynamic network of permanent GNSS stations within the Czech Republic. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*. **7**(1), s. 99-111.

SignalQuest, 2019. [online]. [cit. 24.10.2019]. Dostupné z: <http://www.signalquest.com>

Smith, M., 2015. Performance of a ShapeAccelArray (SAA) for settlement monitoring of a large rockfill dam. [online]. *Geotechnical News*. s. 17-21. [cit. 24.10.2019]. Dostupné z: <http://www.geotechnicalnews.com/pdf/GeoTechNews/2015/GIN%203302.pdf>

Štroner M., 2012. *PrecisPlanner 3D*. [online]. [cit. 24.10.2019]. Dostupné z: http://k154.fsv.cvut.cz/~stroner/PPlanner/Navod_PPPlanner_v3.1.pdf

Třasák P., 2015. *EasyNET*. [online]. [cit. 24.10.2019]. Dostupné z: http://adjustsolutions.cz/wp-content/uploads/download/easynetanalyser_doc_cz.pdf

Třasák P., 2019. *Easy Transform*. [online]. [cit. 24.10.2019]. Dostupné z: <http://adjustsolutions.cz/easytransform/>

Urban, R., Štroner, M.; Balek, J., 2016. Test of the Precision and Accuracy of the ShapeAccelArray Sensor. *Geoinformatics FCE*. **15**(2), s. 43-58. ISSN 1802-2669.

Urban, R., Štroner, M., Balek, J., 2017. Realization of geodetic network for monitoring of landslide area near Třebenice. In: *17th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM 2017 Geodesy and Mine Surveying*. Sofia: STEF92 Technology Ltd., s. 531-538. ISBN 978-619-7408-02-7.

Vondráková, A., Vávra, A., Voženílek, V., 2013. Climatic regions of the Czech Republic, *Journal of Maps*. **9**(3), s. 425-430. DOI: 10.1080/17445647.2013.800827

Voráček, F., 1991. *Hodnocení stabilitních poměrů v okolí Třebenic*. Praha. Diplomová práce. Univerzita Karlova Praha. Fakulta přírodovědecká.

Liu, X., Su, S., Ma, J., Yang, W., 2019. Deformation Activity Analysis of a Ground Fissure Based on Instantaneous Total Energy. *Sensors*. **19**(11). DOI: 10.3390/s19112607

Uhlemann, S., Smith, A., Chambers, J., 2016. Assessment of ground-based monitoring techniques applied to landslide investigations. *Geomorphology*. **253**, s. 438–451. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.10.027>

Zuzánek, B., Vaněček, M., 1982. *Závěrečná zpráva inženýrsko-geologického průzkumu: Úsek železniční tratě Čížkovice–Obrnice km 6,6 –7,1 porušený půdním sesuvem*. Dubí u Teplic: Geindustria, n. p. Praha.