



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV GEODÉZIE

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF GEODESY

MĚŘENÍ SVISLÝCH POSUNŮ KOSTELA V ZÁBRDOVICÍCH

VERTICAL DISPLACEMENT MEASUREMENTS AT BRNO ZÁBRDOVICE CHURCH

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

BC. LENKA BOCKOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. JOSEF WEIGEL, CSc.



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3646 Geodézie a kartografie
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3646T003 Geodézie a kartografie
Pracoviště	Ústav geodézie

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Diplomant	Bc. Lenka Bocková
Název	Měření svislých posunů kostela v Zábrdovicích
Vedoucí diplomové práce	doc. Ing. Josef Weigel, CSc.
Datum zadání diplomové práce	30. 11. 2013
Datum odevzdání diplomové práce	30. 5. 2014
V Brně dne 30. 11. 2013	

.....
doc. Ing. Josef Weigel, CSc.
Vedoucí ústavu

.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

Podklady a literatura

Technické zprávy a závěrečné práce z předcházejících měření.

Vykutil, J.: Vyšší geodézie, Kartografie Praha, 1982

Švábenský, O. a kol. Inženýrská geodézie II, studijní texty, Brno 2007.

Zásady pro vypracování

Seznamte se s dostupnými výsledky dřívějších geodetických měření v kostele Nanabevzetí Panny Marie v Brně - Zábrdovicích. Zaměřte další etapu svislých posunů sítě kontrolních bodů. Svislé posuny vyhodnoťte v návaznosti na předcházející etapy měření. Dále zaměřte svislost vybraných hran kostelních věží a porovnejte s obdobným měřením realizovaným dříve.

Předepsané přílohy

.....
doc. Ing. Josef Weigel, CSc.
Vedoucí diplomové práce

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá měřením výšek nové etapy sítě kostela v Brně Zábřdovicích. Měření metodou přesné nivelace probíhá dlouhodobě od roku 2002, za účelem zjištění svislých posunů. Zpracování obsahuje výpočet a vyrovnání výšek, porovnání se základní a předcházející etapou, interpretaci a grafické zpracování svislých posunů. Součástí práce je také zaměření a zpracování náklonů věží.

Klíčová slova

Svislé posuny, etapy, přesná nivelace, kostel Nanebevzetí Panny Marie v Zábřdovicích, náklon věží.

Abstract

The diploma thesis deals with measuring height new stage of the church network in Brno Zabrdovice. Measuring by using method of precise leveling be going on with previous stage began in 2002, in order to detect vertical displacement. Processing include calculation and adjust of the heights, compare with fundamental and previous stage, interpretation and graphical form of vertical displacement. The thesis includes measuring and processing angular deflection of church towers.

Keywords

Vertical displacement, stages, precisse leveling, church „Nanebevzeti Panny Marie“ at Zabrdovice, angular deflection of church towers.

...

Bibliografická citace VŠKP

Bc. Lenka Bocková *Měření svislých posunů kostela v Zábrdovicích*. Brno, 2013. 47 s., 30 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav geodézie. Vedoucí práce doc. Ing. Josef Weigel, CSc..

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 25. 5. 2014

.....
podpis autora
Bc. Lenka Bocková

Poděkování:

Chtěla bych na tomto místě poděkovat především vedoucímu mé diplomové práce doc. Ing. Josefu Weigelovi, Csc, který mi byl po celou dobu nápomocen. Za jeho trpělivost a ochotu, za užitečné rady a připomínky při řešení dané problematiky.

Dále bych chtěla poděkovat spolužákům Janě Darmopilové, Monice Pončíkové, Elišce Karlíkové, Lukáši Netolickému, Antonínu Staňkovi, Jakubu Zbránkovi a Jozefu Žákovi za pomoc při měřických pracích. V neposlední řadě také rodině a přátelům za podporu během studia.

V Brně dne 25. 5. 2014

.....
podpis autora
Bc. Lenka Bocková

OBSAH

1.	ÚVOD.....	9
2.	POJMY	10
3.	KOSTEL NANEBEVZETÍ PANNY MARIE	11
3.1.	Historie vzniku	11
3.2.	Geologický průzkum	12
3.3.	Síť pozorovaných bodů	14
4.	MĚŘENÍ SVISLÝCH POSUNŮ	17
4.1.1.	Metoda geometrické nivelace	17
4.1.2.	Klasická metoda přesné nivelace	18
4.1.3.	Plošná metoda přesné nivelace.....	18
4.1.4.	Zdroje chyb při nivelaci.....	19
5.	POUŽITÉ POMŮCKY	22
5.1.	Testování nivelačního přístroje	23
6.	ETAPY MĚŘENÍ.....	26
6.1.	Listopadová etapa	26
6.1.1.	Detekce chybných měření.....	27
6.2.	Zpracování měření posunů	28
6.3.	Vyrovnání	29
6.3.1.	Zprostředkující vyrovnání	29
6.3.2.	Vyrovnání v programu G-net	31
6.4.	Interpretace svislých posunů	33
6.4.1.	Číselné vyhodnocení.....	33
6.4.2.	Grafické vyhodnocení	33
6.5.	Zhodnocení svislých posunů	36
7.	MĚŘENÍ NÁKLONU KOSTELNÍCH VĚŽÍ	37
7.1.	Použitá metoda a pomůcky	37
7.2.	Zpracování výsledků náklonů věží.....	39
7.3.	Interpretace a zhodnocení náklonů věží.....	41
8.	ZÁVĚR	43
9.	POUŽITÉ ZDROJE	44
9.1.	Literatura	44
9.2.	Webové stránky, normy a návody.....	44

10.	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	45
11.	SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK	46
11.1.	Seznam obrázků.....	46
11.2.	Seznam tabulek	46
12.	SEZNAM PŘÍLOH.....	47

1. ÚVOD

Tématem této diplomové práce je měření svislých posunů na kostele v Zábrdovicích. Měření svislých posunů je účelné pro detekci změn na objektu. Tyto změny lze pozorovat v podobě trhlin ve zdivu. Trhliny jsou v kostele monitorovány již od roku 1991. Na monitoringu trhlin se podílel Ing. Petr Cikrle, Ph.D. z Ústav stavebního zkušebnictví VUT Brno. Monitorování trhlin však nedokáže postihnout chování celého objektu, proto bylo započato s monitorováním kostela geodetickými metodami. Tato práce je další etapou sledování chování kostela geodetickými metodami, které byly započaty v roce 2002. Od této doby byla síť opakovaně zaměřována pro vyhodnocování chování a změn. Cílem diplomové práce je zaměření 16. etapy svislých posunů. Předmět měření tvoří síť bodů v kostele. Měření je dle zadání provedeno metodou přesné nivelace. Z dalších prací navržených pro zaměření a zpracování je určení náklonu kostelních věží, které bylo poprvé provedeno v roce 2002 a opakuje se po více než 10 letech.

Vedoucím diplomové práce doc. Ing. Josefem Weigelem, Csc. byla poskytnuta data naměřená v předchozích etapách, které slouží k vyhodnocení od započetí až po současnost. Jako podklady sloužily diplomové práce studentů Jiřího Juřeníka a Andrey Jonášové a bakalářská práce studentů Lievena Van Hoeymissena a Soubra Dries [7, 8 a 12].

Práce je tematicky členěna do několika kapitol, které tvoří skupiny teoretické a praktické. Kapitoly s teoretickým obsahem se zabývají historií kostela, polohou kostela, měřením svislých posunů a vyrovnáním metodou nejmenších čtverců. Naopak kapitoly s praktickým obsahem popisují vyhodnocením dosavadního stavu z dostupných podkladů a zdrojů, průběh prací, dosažené výsledky a interpretaci výsledků měření.

Nedílnou součástí práce tvoří přílohy. Přílohy jsou rozděleny na tištěné a pouze elektronické. Tištěné vázané přílohy obsahují tabulku výšek jednotlivých etap, výpočty a grafická znázornění. Elektronické přílohy obsahují výpis z měření, kalibrační listy pomůcek a protokol o vyrovnání.

2. POJMY

Rozlišujeme 3 druhy speciálně volených bodů:

POZOROVANÝ BOD – bod osazený na sledovaném objektu,

VZTAŽNÝ BOD – plní funkci ve vyrovnání jako fixní.

OVĚŘOVACÍ BOD – bod stabilizovaný mimo sledovaný objekt a jeho vliv, volí se co možná nejbližší měřeného objektu a slouží pro ověření výškového připojení.

Další pojmy:

POSUN RELATIVNÍ – změna detekovaná v soustavě pozorovaných bodů.

POSUN ABSOLUTNÍ – změna vzhledem k soustavě vztažných bodů.

ČÁSTEČNÝ POSUN – rozdíl výšek v etapě nově zaměřené a předcházející.

CELKOVÝ POSUN – rozdíl výšek v etapě nově zaměřené a základní.

SEDÁNÍ, ZDVIH – svislý posun směrem dolů, nahoru.

NÁKLON – odchýlení od svislice.

POOTOČENÍ – natočení vůči ose.

ETAPOVÉ MĚŘENÍ – opakované zaměření sítě pozorovaných bodů v určitém časovém intervalu.

ZÁKLADNÍ (NULTÁ) ETAPA – počáteční (výchozí) etapa měření, vzhledem k níž jsou počítány posuny, obvykle je zaměřená s vyšší přesností [9].

3. KOSTEL NANEBEVZETÍ PANNY MARIE

Kostel se nachází na východ od centra města na rohu ulic Zábřdovická a Lazaretní v městské části Brno-Zábřdovice. Je situován několik desítek metrů od říčního koryta Svitavy. Na ulici Zábřdovické je neustálý hustý provoz s tramvajovou a automobilovou dopravou. Ke zdem kostela přiléhá klášter premonstrátu sousedící s areálem Vojenské nemocnice.



Obr. 1 Lokalita

3.1. Historie vzniku

Kostel Nanebevzetí Panny Marie byl postaven roku 1299 a je považován za významný moravský památník. Zakladatelem kostela byl Lev z Klobouk. Kostel má na tehdejší dobu zvláštní polohu na břehu Svitavy a nachází se na živé dopravní cestě mezi Židenicemi a Brnem.

Po 2 stoletích funkčnosti byl kostel shledán v havarijním stavu. Bylo nutno začít hledat finanční zdroje a řešení bylo nalezeno ve stržení samotné stavby a výstavbě nového kostela.

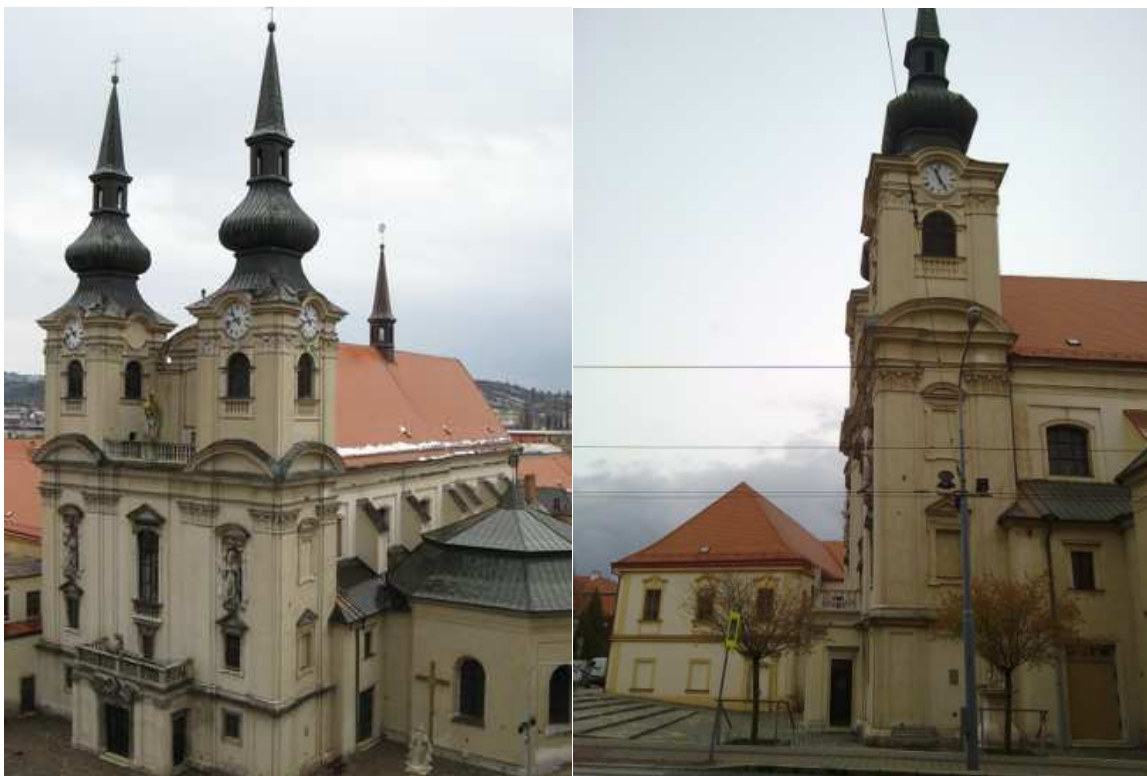
V 16. století byla započata novostavba chrámu, který byl po architektonické stránce stejný s původní stavbou v přechodném slohu románsko-gotickém. Důvody pro výstavbu byly sešlost a narušenost vlivem vlhkosti. Ze starého kostela byly zachovány pouze obvodové zdi s opěrnými gotickými pilíři.

Chrám se skládá z hlavní lodi, dvou bočních kaplí, průčelí se dvěma věžemi a vchodem. Rozčlenění kostela je znázorněno na obrázku č. 4. Výstavba kostela postupovala pozvolna, a proto byla každá věž vystavěna samostatně. Dlouhý časový rozestup mezi výstavbou jedné a druhé věže zapříčinily finanční problémy.

V 17. století bylo nutné obnovit průčelí a navíc byly na jižní věž namontovány hodiny. V 18. století, dále také po I. a II. světové válce, byly provedeny nutné opravy

související s výměnou materiálu a škodami způsobenými bombardováním (výměny cihel a střešní krytiny) [1].

Na začátku 21. století byl kostel shledán stavebním úřadem v havarijním stavu. Jelikož jsou budova kostela i fara památkově chráněny, byly nutné další velké opravy. V letech 2000 – 2002 proběhly opravy krovu a střešního pláště. Dále byl proveden geologický průzkum podloží spolu se zpracováním výsledků měření trhlin. Z důvodu rekonstrukce byl kostel v letech 2005 – 2006 uzavřen a znepřístupněn veřejnosti. V té době probíhaly vnitřní opravy. Opravy probíhají nárazově i v současnosti, aby byl udržěn dobrý stav kostela. Nyní je kostel přístupný veřejnosti a slouží svému účelu [18].

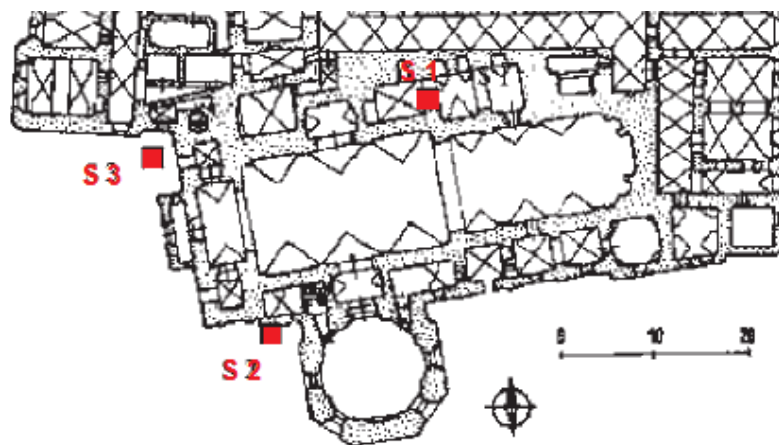


Obr. 2 Kostel Nanebevzetí Panny Marie v Brně- Zábřdovicích

3.2. Geologický průzkum

Geologie je věda o Zemi, která se zabývá jejím složením, stavbou a historickým vývojem. Složení půdy, na které byla stavba založena, se zkoumá z pohledu půdních vrstev [16]. O rozložení půdních vrstev, zatížení a fyzikálních vlastnostech zeminy informuje geologický průzkum, který je vypracován vždy při měření posunů. Zkoumané fyzikální vlastnosti a zatížení jsou obsah vody, velikost pórů, zrnitost, stlačitelnost a smrštitelnost [3].

Z geologického průzkumu v Brně v roce 2003 bylo zachyceno několik skutečností. Výzkum přispěl k objasnění příčin statických poruch. Na obrázku č. 3 jsou znázorněny sondy, které byly při výzkumu zapuštěny.



Obr. 3 Rozmístění sond v kostele

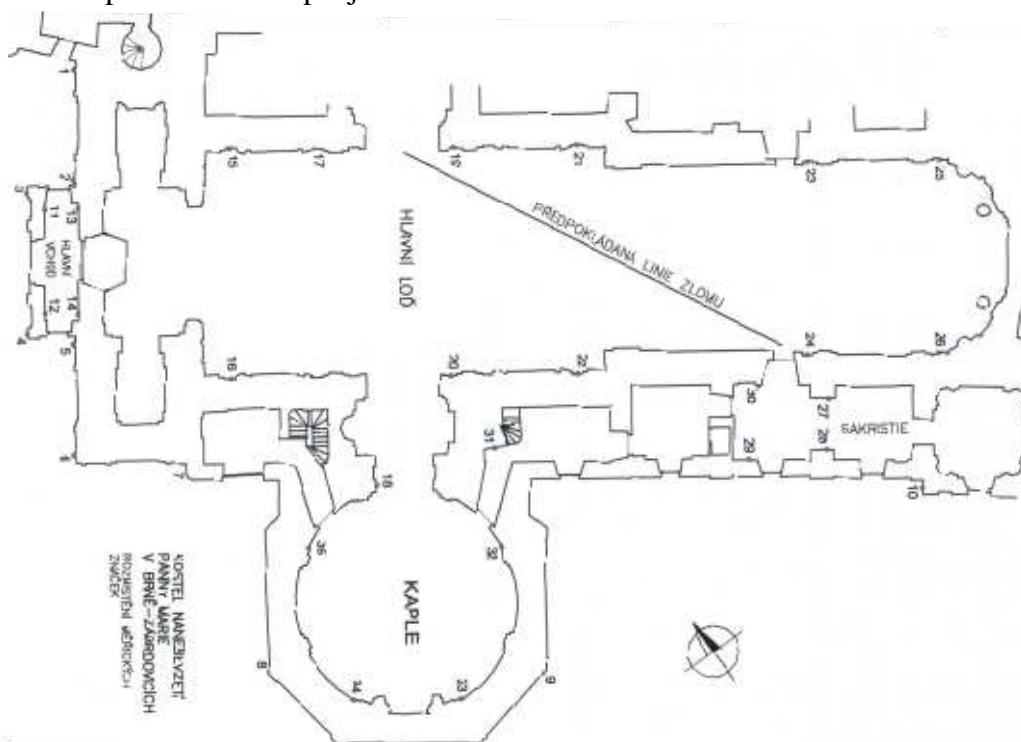
Výčet zjištěných skutečností:

- Ze sond byly zachyceny náplavy řeky Svitavy v hloubce 1,90 m pod stávající úrovní terénu.

- Průčelí kostela s věžemi je založeno v hloubce 1,20 m pod dnešní úrovní terénu. Základové zdivo věží je založeno na dřevěných a olšových pilotech, na kterých je uložen trámový rošt z dubového dřeva. Základy jsou posazeny v náplavách Svitavy.

- Na severní stěně bylo potvrzeno založení zdiva na základech původního kostela z 13. století. To znamená, že loď je založena na stabilní substrakci staršího kostela [4].

Tyto skutečnosti ukazují na nestejně podmínky při sedání budovy kostela, které deklarují rozdílné stáří založení a různou skladbu základových půd. Proto byl z výsledků geologického průzkumu učiněn závěr o mírném sklánění k západu [4]. Stejný závěr byl vyvozen i z prvních 3 etap [7]. Hlavní loď tak probíhá šikmý zlom, který byl vyvozen ze 4 počátečních etap a je naznačen v obrázku č. 4.



Obr. 4 Linie zlomu v kontextu situace pozorované sítě kostela

Z polohy kostela a jeho historie je zřejmé, že budova stojí na nestabilním podloží a byla od počátku jejího vystavění ovlivňována přilehlou řekou Svitavou. Množství vody v korytě řeky reguluje výšku hladiny spodní vody. Vše se odvíjí také od ročního období. Hladina spodní vody má totiž vliv na základovou půdu. Podmáčená základová půda poškozuje zdivo kostela převodem vody kapilárami. Tento jev způsobuje drobení zdiva, omítek a vznik trhlin. Trhliny ve zdivu nám detekují pohyby velkých mas hmot v podobě celých částí kostelní konstrukce. Obrázek č. 5 byl vyhotoven při měření v kostele a podává informaci o stále probíhajících současných pohybech objektu nebo jeho částí.

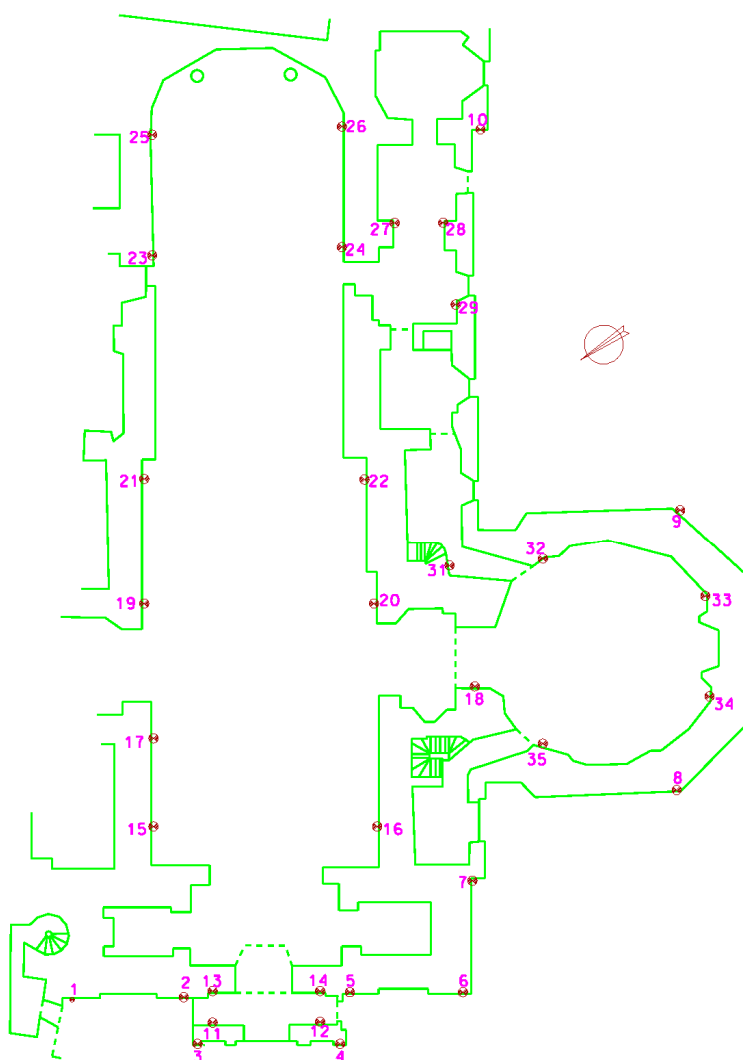


Obr. 5 Trhliny ve zdivu severní stěny

3.3. Sít' pozorovaných bodů

Měření svislých posunů probíhá na pozorovaných bodech. Pomocí změny jejich výšek lze odhalit pohyb části konstrukce [2].

V tomto případě je sít' kostela Nanebevzetí Panny Marie v Zábrdovicích tvořena 34 pozorovanými body, které jsou umístěny na vnitřní i vnější straně kostelních zdí průměrně asi půl metru nad zemí. Pozorované body byly osazeny v roce 2002 na popud stavebního úřadu, který shledal kostel v havarijním stavu. Původně bylo osazeno 35 pozorovaných bodů, ovšem bod s číslem 30 byl zničen v průběhu rekonstrukce elektrického vedení. Obrázek č. 6 obsahuje zakres rozmístění bodů v kontextu situace objektu. Obrázek 7 ukazuje stabilizaci bodů.



Obr. 6 Rozmístění měřických značek v pozorované síti

Nové pozorované body nebylo nutné osazovat, jelikož tato diplomová práce navazuje na dlouholetá měření svislých posunů a sledování probíhá na stále stejných bodech. Z [7] bylo zjištěno, že pozorované nivelační body byly osazeny podle návrhu rozmístění schváleného odborem památkové péče. Síť pozorovaných bodů vybudoval a zaměřil Ing. František Soukup, jehož výsledky se nachází v [7].

Stabilizace pozorovaných bodů byla provedena pomocí čepových značek vyrobených na Ústavu geodézie v Brně. Čepové značky mají malý rozměr, maximálně 8 cm hloubku uložení a protikorozní úpravu. Podmínkami odboru památkové péče bylo neporušení omítek, historického rázu a chodu kostela.

Při každé etapě byl jako vztahný bod sítě volen bod číslo 21, který byl ve vyrovnání následně zafixován, a pro ověření byl volen bod ČSNS JM-071-638. Tento bod s pracovním označením 638 je stabilizován 0,3 m nad zemí, čepovou značkou na cihlovém domě č. p. 57 v Zábrdovicích. Pro ověření byla zvolena obousměrná nivelace na body 6 a pomocný FIX, který byl stabilizován pro případ, kdy by nebylo možné využít bod 6. Bod 6 je důležitý pro propojení vnitřních a vnějších bodů sítě. Pomocný bod FIX byl stabilizován hřebem na kamenném schodišti před vstupem do kostela. Vedoucí upozornil na

nepředvídané rekonstrukce, kdyby mohl být klíčový bod 6 pro propojení sítě zakryt například lešením, a proto bylo nutné mít náhradní plán. Byla ověřována stálost bodu 6, FIX a 638 pomocí měřených převýšení, jejichž výpis a zhodnocení je zobrazen v tabulce č. 1. Mezní hodnota pro rozdíl měření tam a zpět v oddíle dlouhém R [km] je stanovena vztahem podle [13].

$$\Delta_1 = 3.00 \cdot \sqrt{R} \text{ [mm]}$$

Ověření bylo provedeno na podzim 2013 a na jaře 2014. Z výsledků v tabulce je patrné, že na těchto bodech nedošlo k výrazným změnám a byly vhodně připojeny.

Úsek	8. 11. 2013	28. 3. 2014	ρ_1 [mm]	R [km]	$\Delta_1=3,00\sqrt{R}$ [mm]	Podmínka $\rho_1 < \Delta_1$
	Δh [m]					
6-FIX	-0,47303	-0,47273	-0,30	0,012	0,33	SPLNĚNO
FIX-638	0,84904	0,84902	0,02	0,1	0,95	SPLNĚNO

Tab. 1 Ověření stability bodů 6 a FIX



Obr. 7 Stabilizace pozorovaných bodů

4. MĚŘENÍ SVISLÝCH POSUNŮ

„Vše ve světě je v neustálém pohybu.“

Toto tvrzení je základním kamenem pro všechny úlohy o stabilitě staveb. Stabilitu staveb lze zkoumat vodorovně (posun), svisle (sedání) a prostorově (deformace). Deformace je následkem posunů jak vodorovných tak svislých posunů a závisí na tuhosti konstrukce [5, 19].

Metody měření svislých posunů:

1. geometrická (optická) nivelace

Je nejrozšířenější metodou pro klidné podmínky, kde lze bez obav rozkmitu kompenzátoru nivelačního přístroje použít metodu geometrické nivelace ze středu. Její přesná varianta zaručí spolehlivé určení výškových změn řádu 0,2 mm a to dodržением zásad (technologie měření, vybavení a parametry pomůcek) stanovených [17].

2. hydrostatická nivelace

Používá se pro měření ve špatně přístupném prostředí, nevhodném pro přístup měřičů, pro stanovení vyšší přesnosti než poskytuje optická nivelace. Nádoby mají omezený rozsah stupnice, proto je nutné, aby nádoby byly přibližně ve stejné výšce. Výhodou je možnost měřit na několika místech objektu současně. Přesnost je deklarována 0,1 – 0,05 mm.

3. trigonometrické měření výšek

Tato metoda se používá v případě, kdy nelze použít metody optické nivelace. Příkladem může být měření výšky staveb. Při trigonometrii se měří vodorovné vzdálenosti a svislé úhly z pevných stanovisek. Určení svislého posunu získáme z rozdílu svislých úhlů mezi etapami. Přesnost trigonometrického určení při délkách do 150 m dosahuje až 0,5 mm.

4. další metody (pozemní stereofotogrametrie a jiné alternativní metody s použitím sklonoměru, kyvadla, deformometru,...)

4.1.1. *Metoda geometrické nivelace*

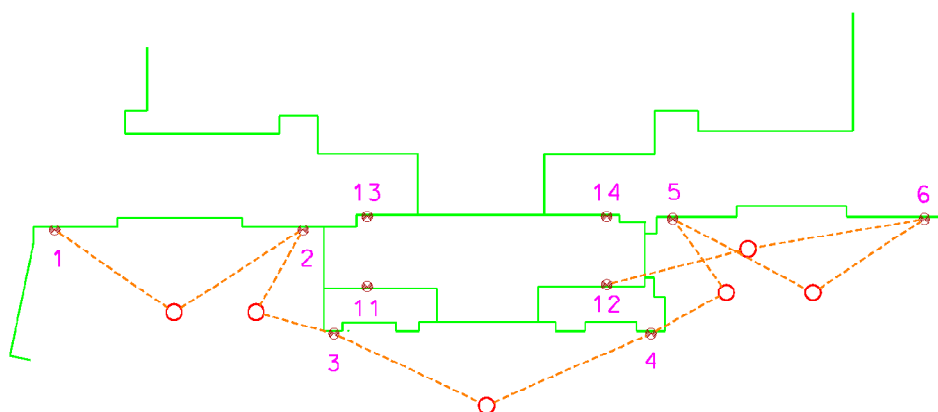
Použití této metody v historických objektech s sebou přináší řadu odlišností (špatné osvětlení a stísněné prostory). Stávající osvětlení bylo nutné doplnit svítilnou či příruční baterií pro osvětlení čárového kódu stupnice na lati nebo mikrometru přístroje. Interiér kostela zahrnoval sakrální nábytek (lavice, oltáře, obrazy,...) a výzdobu (svícny a květinové ozdoby). Metoda přesné nivelace zaručí spolehlivé určení výškových změn s přesností 0,2 mm. Při etapovém měření posunů je nutné využívat stále stejných postupů. Ze závěrečných prací bakalářů a diplomantů byly zjištěny specifikace pro použití metody pod pracovním názvem Modifikovaná metoda přesné nivelace [8].

Tato metoda je charakterizována následovně:

- Pozorované body jsou osazeny průměrně 0,5 m nad zemí, nejméně 0,3 m nad zemí. Proto nebyla dodržena podmínka minimálního čtení na lati.
- Lat' byla použita délky 2 m, celistvá. Nízké stropy zákristie, výzdoba a nábytek interiéru nedovolují použití 3 m latě.
- Z důvodu členitosti interiéru bylo nutné zalomení sestavy v postavení přístroje.
- Záměry nebyly v sestavách rozměřovány. Délky záměr z elektronického přístroje byly zaznamenány.
- Z výsledků dřívějších etap měření byly zjištěny dva možné přístupy k Modifikované metodě přesné nivelace pod svými pracovními názvy klasická a plošná [8].

4.1.2. Klasická metoda přesné nivelace

Jedná se o reprezentaci pořadové přesné nivelace s řadou specifikací. Tyto specifikace byly popsány výše v kapitole 4.1. Klasického přístupu bylo použito v několika dřívějších etapách a ten zahrnoval šikovní plánování sestav z důvodu viditelnosti ve velmi členitém interiéru kostela. Sestavy byly vytvořeny mezi pozorovanými body. Při špatné viditelnosti bylo nutné použít přestavové podložky. Na obrázku č. 8 je znázorněn příklad měření touto metodou [8].



Obr. 8 Ukázka postupu modifikované klasické metody přesné nivelace

4.1.3. Plošná metoda přesné nivelace

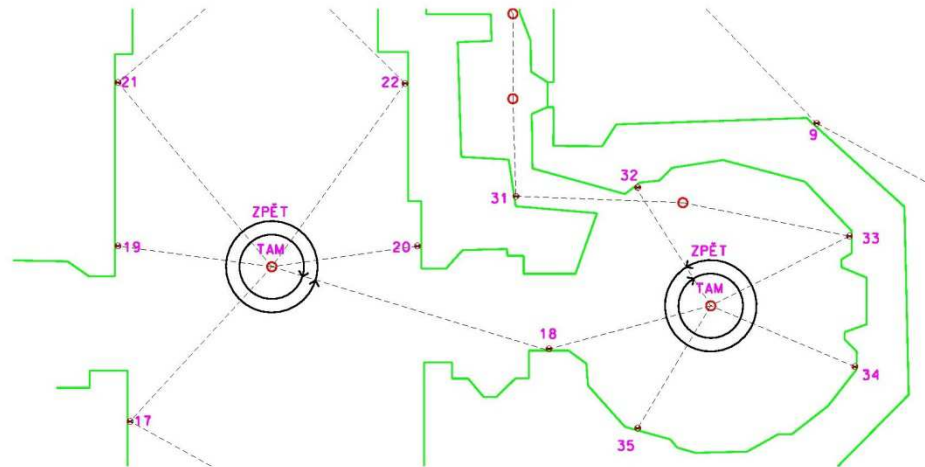
Při měření v historických objektech je potřeba dbát na dodržování dalších podmínek a tento přístup byl zvolen jako nejvhodnější. Modifikovaná plošná přesná nivelace byla využita již v předešlých etapách a osvědčila se jak pro menší časovou náročnost, tak pro přesnost dosažených výsledků. V zadání diplomové práce je zaměření další etapy sledování kostela Nanebevzetí Panny Marie v Zábrdovicích. Vedoucím byl doporučen tento přístup a z dřívějších etap bylo nutné nastudovat postup pro měření. Jako zdroj byla využita [8].

Tento postup bych doplnila a seřadila do několika důležitých podmínek:

- při jednom postavení přístroje jsou v sestavě zaměřeny minimálně 4 pozorované niveláčnické body, bez ohledu na zalomení sestavy v přístroji, či na délku záměr,

- první bod v sestavě je zároveň posledním,
- záměry na jednotlivé body postupují ve směru hodinových ručiček (tam) a proti směru hodinových ručiček (zpět),
- změnou horizontu přístroje začíná měření zpět na stejném počátečním pozorovaném bodě,
- každé postavení přístroje musí být navázáno prostřednictvím jednoho pozorovaného bodu na předcházející a pomocí jednoho na následující.

Pro lepší chápání postupu měření je zde uveden obrázek č. 9.



Obr. 9 Ukázka postupu měření při použití plošné metody

Pomocí plošné metody přesné nivelace byla zaměřena celá 16. etapa měření kostela v Zábrdovicích. Měření bylo provedeno dne 28. 3. 2014. Pro měření bylo využito všech 34 pozorovaných bodů.

4.1.4. Zdroje chyb při nivelaci

Do každého měření vstupují chyby, které se dělí na přístrojové, měřické a chyby z prostředí. Chyby mohou mít charakter systematický nebo náhodný. Tyto chyby v měřených veličinách působí zpravidla společně a v součtu tvoří chybu úplnou. Vhodně zvoleným postupem s kontrolami se vyloučí pouze hrubé chyby a omyly, které jsou zvláštní skupinou. Zdroje chyb budou v následujícím textu uvedeny dohromady. Bude pojednáno o vzniku těchto chyb, čím je lze vyloučit, jakým způsobem zavést korekci a jakým způsobem ovlivňují měření.

Chyba v zacílení na rysku latě.

Pro měření bylo využito elektronického nivelačního přístroje, který čtení na lati snímá pomocí čárového kódu. Tato chyba proto neměla vliv na měření. U měření s použitím automatického čtení je potřeba akorát zacílit na čárový kód a procesor pomocí snímaného čárového kódu dohledá v paměti hodnotu pro daný čárový kód.

Chyba z nesvislé polohy latě a nekolmosti patky latě k její ose.

Lať se urovnává do svislé polohy pomocí krabicové libely, kterou se doporučuje nechat pravidelně rektifikovat. Předpokladem pro zamezení působení tohoto vlivu bylo použití latě s rektifikovanou libelou a spolehlivá spolupráce figuranta. Figurant využíval k stabilnímu držení svislé polohy latě zdí a okolního nábytku. Lať byla na pozorované body stavěna bez ochranné krytky. Kontrola rovinnosti patky nivelační latě byla provedena, protože modifikovaná plošná metoda přesné nivelace předpokládá použití co nejpřesnějších pomůcek. Kontrola patky latě byla provedena ve spolupráci se spolužákem Antonínem Staňkem, který využíval stejných pomůcek pro zaměření své diplomové práce. Zkouška patky latě je umístěna za kalibrační list této latě jako příloha č. 16.

Chyba z nesprávné délky laťového metru.

Délka laťového metru se mění vlivem působení vnějšího prostředí, především teplotou a vlhkostí, ale také změnou napínací síly invarového pásku. Pro měření přesných prací je potřeba znát délku laťového metru, proto bylo nutné použitou lať komparovat nebo použít kalibrovanou lať. Použitá lať GPCL 2 výrobní číslo 38 997 byla kalibrována naposledy v roce 2007. Hodnoty pro zavádění oprav nebyly nutné, jelikož se nejednalo o strmý terén a hodnoty oprav by dosahovaly zanedbatelných hodnot.

Chyba v urovnání nivelační libely.

Nivelační libela se dá urovnat jen s určitou přesností charakterizovanou úhlovou hodnotou. Tato chyba má pouze náhodný charakter a nevyloučí se při různě dlouhých záměrech v sestavě. Spolupůsobí společně s kompenzátozem a bylo nutné ji uvažovat při různě dlouhých záměrech v sestavě. Sluneční záření, proudění vzduchu a teplota mají různé vlivy na přístroj a reakci jejich částí. Přístroj byl před měřením temperován a při měření vně kostela bylo stíněno před přímým osluněním.

Chyba v urovnání záměry kompenzátozem a vliv nestejně dlouhých záměr vzad a vpřed.

Kompenzátor urovná záměrnou přímkou jen s omezenou přesností. Vznikne tak tzv. šikmý horizont, který charakterizuje nesprávnou funkci kompenzátozu. Tento vliv není eliminován při různě dlouhých záměrech. Šikmý horizont způsobují tyto příčiny:

- špatná rektifikace kruhové libely a její nepřesné urovnání.
- nepřesná justáž kompenzátozu, která je přesná jen pro určitou vzdálenost. Zaostřením se tato vzdálenost mění.
- nerovnoběžnost roviny kývání kompenzátozu a záměrné roviny.

O sklonu horizontu přístroje a vlivu na různě dlouhé záměry pojednává kapitola 4.1. Předpokladem pro přesnou nivelaci bylo nutné velmi pečlivě urovnávat nivelační libelu. Zbytkové chyby u kompenzátozových nivelačních přístrojů pak dosahují menších hodnot.

Chyby ze zakřivení Země a z refrakce.

Mají různou hodnotu pro záměry a z výsledků se neeliminují. Vliv zakřivení Země a refrakce je zanedbatelný, jelikož síť pozorovaných bodů byla na malém území a záměry byly krátké. Nestabilní spodní vrstvy nebudou měření příliš ovlivňovat, jelikož převýšení mezi pozorovanými body bylo malé. Na chybu z refrakce bylo potřeba dávat pozor při vchodech a východech do budovy kostela. Kde dochází k velkým teplotním rozdílům a proudění vzduchu do objektu. Bylo zvoleno vhodné uspořádání měření a záměry byly zkráceny. K měřeným veličinám nebyly zavedeny teplotní korekce, které by dosahovaly pouze malých hodnot a to v důsledku malých převýšení.

Změny výšek nivelačních značek.

Tento vliv bylo snahou na pozorované síti bodů odhalit, pomocí etapového měření. Dvojí měření bylo snahou měřit hned po sobě, aby nedocházelo k dlouhým časovým rozestupům a procházením po kachličkách v okolí bodu k jeho pohybu. To stejné platilo pro změny výšky postavení přístroje. Tento vliv byl kontrolován pomocí uzávěru v bloku a rozdílu dvojího zaměření tam a zpět. Díky měření se spolehlivým kompenzátorem přístroje byly tyto vlivy minimální. Zmíněné kontroly jsou obsahem přílohy 12.

5. POUŽITÉ POMŮCKY

Plošná metoda ve své modifikované úpravě přesné nivelace si vyžádala určitá specifika pro postup a také použité pomůcky. Při etapovém měření bylo snahou použití stejných pomůcek jako v minulosti, kdy byl používán nivelační přístroj Zeiss Ni 005 A a latě s invarovým páskem délky 1,75 m. Zkouška a následná kalibrace přístroje prokázaly velké nedostatky pro použití. Hodnota korekce z nevdorovnosti záměrné přímký a střední chyba jedné sestavy byly pro kalibraci přístroje určeny v rámci předmětu Metrologie. Kalibrační list je součástí přílohy č. 18 a výsledkem kalibrace je konstatování nevhodnosti použití pro přesné práce. Obsahem kapitoly 6.1 je neúspěšná listopadová etapa.

Pro měření byl použit digitální nivelační přístroj Leica DNA 03, který byl také opatřen kalibračním listem. Ten byl vyhotoven spolužákem Antonínem Staňkem a je vložen jako součást příloh (Příloha č. 15). Výsledky kalibrace byly stanoveny měřením v laboratorních podmínkách a měřená převýšení jsou obsahem přiloženého záznamu z měření. Metodiku kalibrace není nutné popisovat, jelikož je ve stručnosti popsána přímo v kalibračním listu.



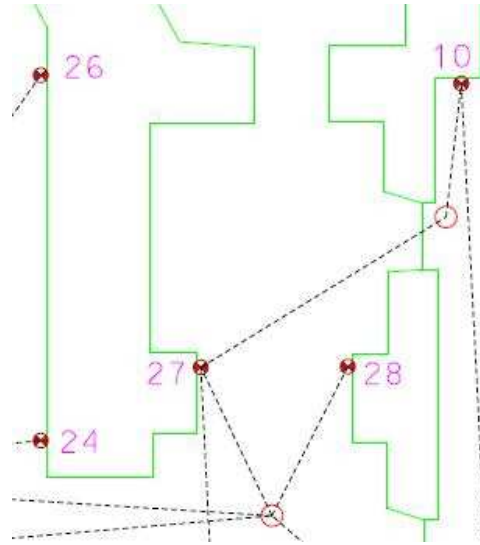
Obr. 10 Nivelační přístroj Leica DNA 03

DNA 03 (v. č. 339511)

Jedná se o elektronický nivelační přístroj se střední kilometrovou chybou $m_o = 0,3 \text{ mm/km}$. Tento přístroj je řazen do skupiny přístrojů pro velmi přesné práce. Přístroj má 24 násobné zvětšení dalekohledu [20]. Střední chyba urovnání do záměrné roviny $0,113^{\text{cc}}$ určená v laboratorních podmínkách (příloha č. 15) splňuje požadavek nejvýše $0,2^{\text{cc}}$ pro střední chybu urovnání do záměrné roviny stanovený [17]. Kvůli specifickým požadavkům metody byl v terénu při měření 16. etapy sítě kostela vyhotoven záznam z měření. Výpis z měření se nachází v elektronické části přílohy č. 12. Na obrázku č. 11 je ukázka jak bylo nutné latě přisvětlit při záměře z těla kostela na bod 18, který je v zákrytu za mříží. Přístroj byl před přímým slunečním osvětlením stíněn při měření vně kostela. Přístroj bylo také nutné stínit při postavení ve dveřích pro propojení vnitřních pozorovaných bodů s vnějšími, např. postavení mezi body 27 a 10, které byly zobrazeny na obrázku 12.



Obr. 11 Osvětlení latě v kostele



Obr. 12 Ukázka postavení přístroje mezi vnitřním a vnějším bodem

Lať s čárovým kódem na invarovém pásku (v. č. 38 997)

Pro měření byla použita lať GPCL 2 s kalibračním listem v příloze č. 16. V historických objektech je nutné použití co nejpřesnějších pomůcek, i když hodnotu délky laťového metru nebylo nutné znát, protože nebyly zaváděny opravy. Lať je celistvá o délce 2 m, opatřená krabicovou libelou. Patka latě je opracována s vysokou přesností do roviny, jak deklaruje výrobce a její kontrola v příloze 16.

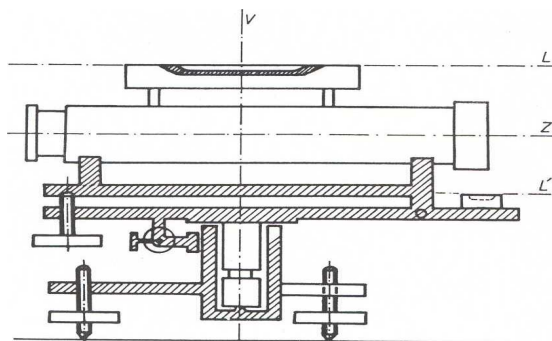
Z dalších pomůcek byl použit stativ s vysouvacími nohama, kvůli stavění na kachličkách v kostele. Dále byla využita nivelační podložka pro 3 přestavové body v kostele. Nivelační podložka byla kladena na vhodný povrch a zajištěna proti skluzu. Teploměr CONRAD GTD 1100 sloužil pro zjištění rozdílu teplot mezi venkovním prostředím a mikroklimatem uvnitř kostela viz tabulka 2.

Teplota [°C]		Čas
Venkovní	13	9:15 - 10:30
Vnitřní	11,9	10:55 - 13:30

Tab. 2 Záznam teploty a času při měření

5.1. Testování nivelačního přístroje

Před měřením bylo kontrolováno, zda je nivelační přístroj použitelný k danému účelu měření. To znamená, že musí být splněny tyto osové podmínky.



Obr. 13 Osové podmínky nivelačního přístroje

1. Osa pomocné krabicové libely L' má být kolmá k vertikální ose (ose alhidády)

$$L' \perp V,$$

Splnění podmínky u kompenzátorových nivelačních přístrojů lze jednoduše zjistit poklepaním na dalekohled po urovnání krabicové libely. Při poklepaní se pozoruje záměrný obrazec. Ten pokud nereaguje, není splněna tato osová podmínka. Kompenzátor přesáhl interval kompenzace a je shledán za nefunkční. V tomto případě je nutné rektifikovat krabicovou libelu.

2. Vodorovné vlákno nitkového kříže H má být kolmé k vertikální ose (ose alhidády) $H \perp V$.

Pokud by tato podmínka nebyla splněna, byl by záměrný obrazec natočen. Nesplnění této podmínky se vyskytuje pouze zřídka. Kontrolovat ji lze při dobře urovnaném přístroji zaměřením levého okraje horizontální rysky záměrného obrazce na zřetelně vyznačený bod. Následně se jemnou ustanovkou posunuje k pravému okraji horizontální rysky [6].

3. Osa nivelační libely L má být rovnoběžná se záměrnou přímkou Z $L \parallel Z$.

Kontroluje se, zda vodorovná přímka prochází přesně středem záměrného obrazce. Zkouška splnění této podmínky byla provedena před a po měření, jelikož nestejně dlouhými záměry nebyl vyloučen její vliv. U každého nivelačního přístroje výrobce udává nejistotu ve správné funkci kompenzátoru. Bylo nutné předpokládat, že při měření rovina kompenzátoru není vodorovná. K měřeným převýšením byla zavedená korekce ze sklonu horizontu, která byla vypočtena ze zkoušek před a po měření. Měření metodou modifikované plošné nivelace předpokládá zavedení této korekce, jelikož povoluje různě dlouhé záměry v sestavě.

Aktuální hodnota sklonu se určuje při postavení přístroje ve středu sestavy a mimo střed sestavy. Sestava je tvořena dvěma dobře výškově zajištěnými body (např. nivelační podložka nebo nivelační značka) a lať se přesouvá mezi body. Středové postavení přístroje se rozměří pásmem na dvě poloviny a zaznamená se délka záměr. Po horizontaci přístroje se přečtou čtení vpřed a vzad na obou stupnicích lať, protože je přístroj uprostřed, jsou obě čtení pochybena o stejnou hodnotu. Z toho plyne, že při stejně dlouhých záměrech vzad a vpřed byl vyloučen vliv nesplnění podmínky $L \parallel Z$.

Přístroj se postaví mimo střed sestavy do takové vzdálenosti za přední lať, kterou dalekohled ještě zaostří. S horizontovaným přístrojem se čte postupně na bližší a vzdálenější lať. Z obou postavení se vypočtou převýšení a jejich rozdíl určí velikost rozdílů převýšení Δ . Dále se určuje úhel sklonu záměrné přímky a měrná oprava. Ty definují vztahy níže.

Délka sestavy :

$$d = s_A + s_B$$

Rozdíl v převýšení Δ :

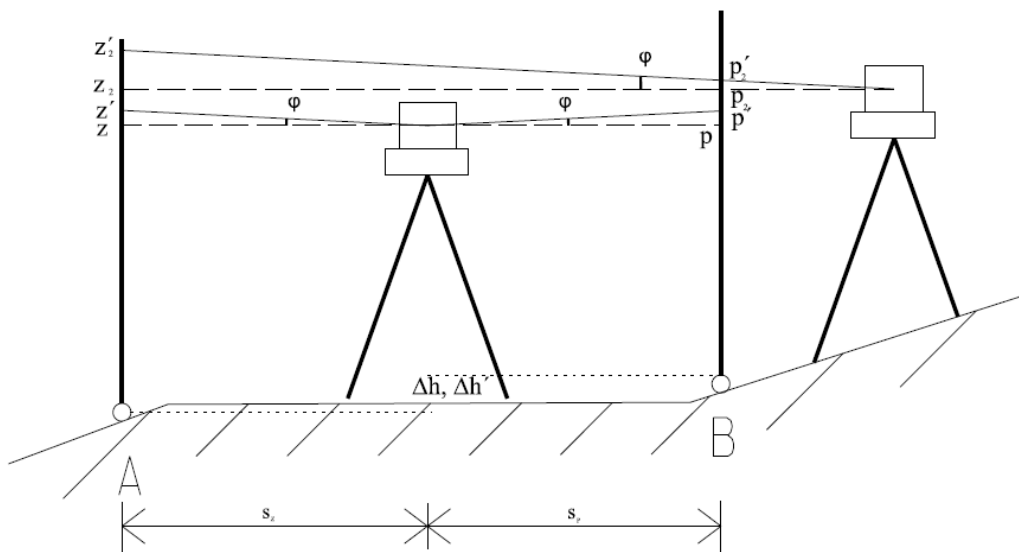
$$\Delta = \Delta h' - \Delta h$$

Úhel sklonu záměrné přímky φ :

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\Delta}{d} \Rightarrow \varphi = \tan^{-1} \left(\frac{\Delta}{d} \right)$$

Měrná oprava o_φ :

$$o_\varphi = -\frac{\Delta}{d}$$



Obr. 14 Zkouška nivelačního přístroje

Celková měrná oprava, kterou použijeme pro výpočet opravy měřených převýšení v celé etapě, se bude skládat z aritmetického průměru opravy zkoušky nivelačního přístroje před a po měření. Oprava převýšení se vypočte jako násobek celkové měrné opravy a rozdílu délek záměr v sestavě. Tato oprava se následně přičte k měřenému převýšení [10, 13].

Celková měrná oprava O_φ :

$$O_\varphi = \frac{o_{\varphi 1} + o_{\varphi 2}}{2}$$

Oprava převýšení o celkovou měrnou opravou $O_{\Delta h}$:

$$O_{\Delta h} = O_\varphi \cdot (s_Z - s_P)$$

Opravená převýšení Δh_o :

$$\Delta h_o = \Delta h + O_{\Delta h}$$

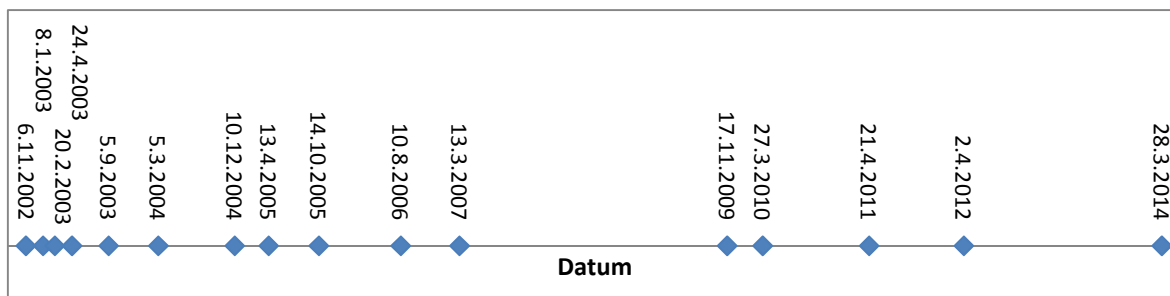
Výpis zkoušky nivelačního přístroje je umístěn v tabulce č. 3. Zkouška byla provedena před a po měření dne 28. 3. 2014.

	Δh [m]	$\Delta h'$ [m]	Δ [mm]	d [m]	φ [°]	o_φ [mm/m]	O_φ [mm/m]
PŘED MĚŘENÍM	0,01143	0,01155	-0,12	21,5	-3,4	0,0053	0,0019
PO MĚŘENÍ	0,37277	0,37272	0,05	31	1,0	-0,0016	

Tab. 3 Zkouška nivelačního přístroje Leica DNA 03

6. ETAPY MĚŘENÍ

Etapové měření je v podstatě měření na síti pozorovaných bodů, které se opakuje ve zvolených časových intervalech. Tento druh měření sleduje chování pozorovaných bodů z časového hlediska a má dát najevo další průběh pohybu sledovaných bodů. Takovéto měření je započato vždy nultou (základní) etapou, vzhledem k níž se posuny počítají. Nultou etapu je nutno zaměřit s vyšší přesností a s větším počtem nadbytečných veličin. Intervaly mezi etapami se volí tak, aby plynule zachytily průběh změn. V případě zjištění kritických posunů by měl být přivolán statik, aby byly včas navrženy opatření.



Obr. 15 Časový sled mezi jednotlivými etapami

Na obrázku č. 15 je znázorněno, kdy jednotlivé etapy probíhaly a jaké byly intervaly mezi etapami. Dále pak bylo nutné seznámení se stávajícími výsledky těchto etap. Data jsou seřazena do přehledné tabulky a nachází se v příloze č. 1. Úkolem bylo nové zaměření sítě v kostele, které bylo provedeno dne 28. 3. 2014. Měření bylo provedeno modifikovanou přesnou plošnou nivelací, o které pojednává kapitola 4.1.3 a pomocí přístrojového vybavení Leica DNA 03 a latě GPCL2 viz kapitola 5.

Kostel spolupůsobí jako celek, a proto je nutné vždy posuny hodnotit v souvislostech s ostatními částmi. Výsledky nulté až 6. etapy ukazují, že docházelo k sedání čela kostela s vchodem a věžemi. Průběh linie zlomu byl vyznačen a je znázorněn na obrázku č. 4. Došlo k sedání o 3-4 mm na skupině bodů čela a věží kostela, nejvíce však sednutí o 5 mm u bočního vchodu do kostela. Mezi 6. a 7. etapou jsou patrné změny v deformacích, od kterých docházelo pouze k mírným svislým pohybům. Skupina bodů v boční kapli měla návaznost na dění v západní části kostela, avšak ne tak radikální průběh sedání. Oltář v hlavní lodi ani sakristii po celou dobu pozorování nevykazovaly znatelné svislé pohyby. Jižní stěna hlavní lodi vykazuje charakter sedání v návaznosti na jižní věž, která sedá víc než severní. Kolem 10. etapy proběhla další změna pohybu. U věží se proces posunů obrátil na zdvih, ovšem vše probíhá v pozvolném tempu. Z tabulky výsledků jednotlivých etap (Příloha č. 1) již nejsou patrné další radikální změny.

6.1. Listopadová etapa

Dne 12. listopadu 2013 proběhlo zaměření sítě pozorovaných bodů kostela v Zábrdovicích. Bylo využito přístroje NI 005 A a nivelační latě délky 1,75 m. Před měřením sítě proběhla zkouška nivelačního přístroje. Měřená čtení byla zaznamenávána do zápisníku spolu s teplotou a časem. Po ukončení měření byla opět provedena zkouška. Měření ze zápisníku byly převedeny do tabulek v Excelu (verze Microsoft Office Excel 2007) pro další zpracování a výpočty. Při měření byla kontrolována konstanta latě. Další

kontrolou je uzávěr měřených převýšení vytvořený propojením vnitřního a vnějšího měření kostela. Hodnota uzávěru se vyšplhala až na 3,6 mm, což stanovilo první signál problému, ale byla předpokládána hrubá chyba při záznamu nebo přepisu do počítače. Druhý signál problému byl spatřen po vypočtení zkoušek nivelačního přístroje. Měrná oprava se zdála příliš velká v porovnání, s jakými hodnotami měrných oprav jsem se setkávala u přesné nivelace dřív. Tabulka č. 4 obsahuje výpis sklonu záměrné přímkky a měrné opravy u zkoušek nivelačního přístroje před a po měření. K vypočteným převýšením bylo snahou zavedení měrné opravy. Délky záměr byly zjištěny odpichem z mapy. Znovu byl vypočten uzávěr měření, ten však stále zůstal na vysoké hodnotě 1,5 mm. Snahou bylo hledat různé varianty řešení, a proto bylo přistoupeno k detekci chybných měření. Předpokladem bylo vyloučení hrubých chyb z měření již dříve a to např. kontrolou konstant latí a přepisů.

Zkouška přístroje	φ [°]	o_{φ} [mm/m]	Poznámka
PŘED MĚŘENÍM	-59,7	0,261	
PO MĚŘENÍ	-103	0,275	
		0,268	Průměr ze dne 12. 11. 2013

Tab. 4 Výpis ze zápisníku zkoušek nivelačního přístroje

6.1.1. Detekce chybných měření

Vyrovnaním metodou MNČ bylo snahou odhalení chyb v podzimním měření přístrojem Ni 005 A, který u zkoušky vykazoval značný odklon záměrné vodorovné přímkky. Detekce chybných měření a systematických vlivů byla provedena pomocí vyrovnaní a měla prokázat, na kterém stanovisku došlo v průběhu měření k chybným čtením, v důsledku neurovnání latě nebo k výkyvům noh stativu při pohybu po kachličkách, v jejichž spárách byly nohy stativu. Pohyb kolem stativu s přístrojem by však měl vyrovnávat kompenzátor. Do vyrovnaní vstupovala jednotlivá čtení, a tím byly určovány relativní veličiny (tzn. postavení přístroje a výšky bodů). Každý bod byl určen minimálně ze 4 hodnot čtení (tzn. I. a II. stupnice latě vždy tam a zpět). Počáteční bod v bloku byl určen díky uzávěru vždy z 8 hodnot. Měřených veličin vstupovalo do vyrovnaní 252. Další odstavec vysvětluje fungování aparátu vyrovnaní pro detekci chyb. Vyrovnaní zprostředkujících veličin metodou MNČ je detailně popsáno v kapitole 6.3.

Vyhledávání chybných měření lze provádět na základě výpočtu poklesu aposteriorní jednotkové směrodatné odchylky m_{APOST} . Podezřelá měření se vyznačují neočekávaně vysokými opravami při vyrovnaní a jejich aposteriorní jednotková směrodatná odchylka překračuje hodnotu 1. Tyto měření jsou v protokolu označeny vykřičníkem nebo hvězdičkou. Vyloučením nejodlehlejšího měření dojde k nejvyššímu poklesu m_{APOST} .

Ve snaze vyhledat chyby v měřených datech byla odlehlá hodnota ze vstupních hodnot vyrovnaní vynechána nebo byla zhoršena její přesnost. Pak bylo ze zbylých měření provedeno nové vyrovnaní a určena nová m_{APOST} . Tento vylučovací postup byl opakován, dokud nebyla m_{APOST} v požadovaném intervalu, tj. menší nebo rovna 1. Tato metoda je při menším počtu odlehlých měření (oproti počtu nadbytečných veličin) poměrně spolehlivá [14], což není případ podzimního měření, kdy vyrovnaní poskytlo velké množství odlehlých měření. V důsledku toho došlo ke ztrátě provázanosti sítě a bylo přistoupeno k novému měření.

Na jaře byla zaměřena síť pozorovaných bodů přístrojem DNA 03. Listopadové a březnové měření bylo porovnáno kvůli dalšímu hledání využití podzimního měření.

Srovnání měření ukázala, že na některých místech by byly nutné až nereálné opravy. Opravy ve vyrovnání, opravy z nevyrovnanosti záměrné přímkou dosahovaly hodnot v řádech desetin milimetru, a když také posuny zjištěné v kostele dosahovaly těchto hodnot, není takové měření dostatečně průkazné. Proto v podzimním měření předpokládám velký počet systematických chyb a vyvozují závěr o špatné funkci kompenzátoru. Listopadového měření proto není možné využít.

Pro přístroj Ni 005 A byl vyhotoven kalibrační list, který prokázal nevhodnost jeho použití pro přesné práce. Kalibrační list byl vyhotoven v rámci předmětu metrologie. Tento kalibrační list je součástí příloh (Příloha č. 17) spolu se záznamem z měření v laboratorních podmínkách.

6.2. Zpracování měření posunů

Pro zpracování byl využit výpočetní program Excel 2007. V programu byl proveden výpočet převýšení tam a zpět. V první fázi bylo nutné převýšení opravit o korekce. Největší vliv na převýšení mají nestejně dlouhé záměry a přeastřování dalekohledu v měřených sestavách. Proto byla zavedena korekce ze sklonu horizontu přístroje. Pro opravu měřených převýšení byly korekce stanoveny zkouškou nivelačního přístroje před a po měření. V kalibračním listu (příloha č. 15) je stanovena hodnota měrné opravy ze sklonu horizontu přístroje v laboratorních podmínkách na 0,0010 mm/m. Této měrné opravy nebylo využito, protože ta není v tak velké míře schopna vystihnout podmínky v terénu. Zavedená hodnota měrné opravy byla 0,0019 mm/m z tabulky č. 3. Jiné opravy např. oprava o délku laťového metru nebo teplotní korekce nebyly zaváděny kvůli téměř žádnému vlivu způsobeného malými převýšeními mezi pozorovanými body. Teplotní korekce a korekce z délky laťového metru mají smysl při měření v terénu dlouhých a strmých oddílů [13]. Ve druhé fázi se ověřuje, zda rozdíly převýšení tam a zpět vyhovují kritériím daným vyhláškou [6,10]. Mezní hodnota rozdílu převýšení byla vyčíslena pro průměrnou délku sestavy 20 m (v příloze č. 12). Mezní hodnota rozdílu je vypočtena podle [17]:

$$\Delta_1 = 3,00 \cdot \sqrt{R} [km]$$

Rozdíly převýšení mezi měřeními tam a zpět nepřekračují mezní hodnotu rozdílu převýšení. Dále se také ověřuje, zda mezní hodnota uzávěru není překročena [9]. V tabulce 5 jsou vypočteny hodnoty uzávěru a porovnány s jejich mezní hodnotou. Mezní hodnota uzávěru byla vypočtena jako:

$$\delta_U = t \cdot m_{h1sest} \cdot \sqrt{(n)}.$$

Mezní hodnotu uzávěru je možné vypočíst také z délky pořadu. Byly vytvořeny 2 okruhy. Velký okruh propojuje vnitřní a vnější pozorované body. Malý okruh je vytvořen pouze uvnitř.

V další fázi vstupují převýšení do vyrovnání, které je uvedeno níže.

VELKÝ OKRUH

n	Z - NA	Převýšení [m]	Délka [m]
1	6-P1	-0,33887	14,5
2	P1-17	1,02077	15,59
3	17-21	0,11527	18,61
4	21-P2	-0,78189	13,8
5	P2-27	0,11065	9,55
6	27-10	0,11566	7,26
7	10-9	-0,00747	26,75
8	9-8	-0,06280	38,42
9	8-6	-0,17117	26,9
	UZAVER [mm]	0,16	171,4
	MEZNI [mm]	0,60	

MALÝ OKRUH

n	Z - NA	Převýšení [m]	Délka [m]
1	18-22	0,27881	23,33
2	22-23	0,39739	16,79
3	23-27	-1,07004	17,16
4	27-P3	-0,21291	11,34
5	P3-31	0,14168	7,4
6	31-33	0,33911	13,52
7	33-18	0,12595	12,39
	UZAVER [mm]	-0,01	101,93
	MEZNI [mm]	0,53	

Tab. 5 Tabulka porovnání vypočteného uzávěru s mezní hodnotou uzávěru

6.3. Vyrovnání

Pozorované body tvoří geodetickou síť. Tato síť byla zaměřena geometrickou nivelací ve své modifikované variantě přesné plošné nivelace. V zaměřené síti bodů byl měřen nadbytečný počet měřených veličin, a to z důvodu kontroly měření a zvýšení přesnosti výsledků měření. Proto je nutné najít jednoznačné řešení. Takovéto řešení dává zpracování většího počtu veličin a zajišťuje vyrovnání. V tomto případě se použije MNČ. Řešení MNČ je dáno splněním podmínky $\Sigma p v^2 = \min$ [15].

Cílem vyrovnání je určit vyrovnané hodnoty neznámých veličin, kterými v našem případě byly výšky pozorovaných bodů v síti. Vyrovnání nám dále udává nejistoty měřených a vyrovnaných hodnot [6]. Výsledkem vyrovnání sítě je seznam výšek všech pozorovaných bodů.

Známe 3 základní druhy vyrovnání podle MNČ. Pro vyrovnání sítě bylo nejvhodnější použít vyrovnání zprostředkujících měření. O vyrovnání zprostředkujících měření je pojednáno v následující podkapitole.

Vyrovnání 16. etapy sítě bylo provedeno v programu G-net určeném pro vyrovnávání sítí, proto v následující kapitole je nastíněn princip vyrovnání, který program využívá.

6.3.1. Zprostředkující vyrovnání

Měřené veličiny (převýšení) jsou označovány jakou zprostředkující veličiny. Měřená převýšení jsou vždy zatížena měřickými chybami a nejistoty z měření se pak přenášejí do výsledných výšek [15].

Zprostředkující vyrovnání lze definovat do několika kroků, které nastiňují princip vyrovnání v geodetických programech.

1. Sestavení zprostředkujících funkcí, které definují matematické vztahy mezi nivelovanými převýšeními l_i a určenými výškami pozorovaných bodů x_n .

$$l'_i = f_i(x_1, x_2, \dots, x_n) = l_i + v_i$$

2. Původní rovnice oprav. $v_i = f_i(x_1, \dots, x_n) - l_i = l'_i - l_i$

3. Měřené převýšení jsou vždy určena s nějakou přesností, které jsou vyjádřena pomocí základní střední chyby \overline{m}_i nebo její váhou p_i . Při nivelaci většinou volíme váhy s délkou záměr.

$$p_i = \frac{1}{\overline{m}_i}$$

4. Linearizace a odhad přibližných hodnot neznámých veličin x_j^o .

$$v_n = f_n(x_1, \dots, x_k) - l_n = f_n(x_1^o + \delta x_1, \dots, x_k^o + \delta x_k) - l_n$$

Každá hledaná veličina x byla rozdělena na přibližnou hodnotu x^o (známou hodnotu) a její doplněk δx (neznámá malá hodnota).

5. Taylorův rozvoj. Přibližnou hodnotu určíme dostatečně blízko neznámým hodnotám. Přírůstky budou dostatečně malé a rovnice z bodu 4 rozvineme pomocí Taylorovy řady.

$$v_i = f_i(x_1^o, \dots, x_k^o) + \left(\frac{\delta f_i}{\delta x_1}\right)_{x_o} \delta x_1 + \dots + \left(\frac{\delta f_i}{\delta x_k}\right)_{x_o} \delta x_k - l_i$$

6. Substitute parciálních derivací, které počítají přibližné hodnoty x_o .

$$a_i = \left(\frac{\delta f_i}{\delta x_1}\right)_{x_o}, \dots, k_i = \left(\frac{\delta f_i}{\delta x_k}\right)_{x_o}, l'_i = l_i^o - l_i$$

7. Přetvořené rovnice oprav.

$$v_i = a_i \delta x_1 + \dots + k_i \delta x_k + l'_i.$$

8. Maticový tvar rovnic oprav

$$A = \begin{pmatrix} a_1 & \dots & k_1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_n & \dots & k_n \end{pmatrix}, l = \begin{pmatrix} l_1 \\ \vdots \\ l_n \end{pmatrix}, x = \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_k \end{pmatrix}, x^o = \begin{pmatrix} x_1^o \\ \vdots \\ x_k^o \end{pmatrix}, \delta x = \begin{pmatrix} \delta x_1 \\ \vdots \\ \delta x_k \end{pmatrix}, v = \begin{pmatrix} v_1 \\ \vdots \\ v_n \end{pmatrix},$$

$$l^o = \begin{pmatrix} l_1^o \\ \vdots \\ l_n^o \end{pmatrix}, l' = \begin{pmatrix} l'_1 \\ \vdots \\ l'_n \end{pmatrix}, P = \begin{pmatrix} p_1 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & p_n \end{pmatrix}.$$

A ...matice plánu tvoří prvky substitute parciálních derivací,

l^o ...vektor přibližných hodnot měřených veličin,

l' ...vektor absolutních členů.

9. Přetvořená rovnice oprav v maticovém zápise.

$$v = A\delta x + l'$$

10. Systém normálních rovnic. $A^T P A \delta x + A^T P l' = 0$,

Substituce... $N = A^T P A$, $y = A^T P l'$,

$$N\delta x + y = 0$$

11. Inverzní matice N^{-1} k matici koeficientů normálních rovnic N .

12. Přírustky neznámých hodnot se vypočtou jako:

$$\delta x = -N^{-1}y = -(A^T P A)^{-1} A^T P l'.$$

13. Neznámé hodnoty x . $x = x^o + \delta x$

14. Opravy a kontroly. $v = A\delta x + l'$

$$\sum pav = 0 \quad \sum pbv = 0 \quad \dots \quad \sum pkv = 0$$

Zjednodušené varianty ... $\sum pv = 0 \quad \sum v = 0$

15. Vyrovnané hodnoty měřených veličin. $\bar{l} = l + v$

16. Charakteristiky přesnosti [15].

Aposteriorní jednotková střední chyba... $m_{APOST} = \sqrt{\frac{\sum pv^2}{n-k}} = \sqrt{\frac{v^T P v}{n-k}}$

Matice váhových koeficientů kofaktorů... $P = Q^{-1}$

Kovarianční matice měřených veličin S_i ... $S_i = m_{APOST}^2 Q = m_{APOST}^2 P^{-1}$

$$S_i = \begin{pmatrix} s_{i1}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & s_{in}^2 \end{pmatrix}$$

6.3.2. Vyrovnání v programu G-net

G-NET je speciální program pro vyrovnání geodetických sítí metodou MNČ. Je možné ho využít na polohové, výškové i prostorové sítě. Software byl vyvinut Ing. Svatoplukem Sedláčkem. Využitá verze G-NET Komplet Verze 02.09 pracuje v prostředí Windows a pro uživatele je velice jednoduchá pro orientaci.

Před samotným vyrovnáním byl ve vlastnostech nastaven počet desetinných míst vstupních a tím i výstupních hodnot. Do softwaru byly importovány data pomocí textového souboru. Textový soubor obsahoval měřená převýšení z bodu na bod a přesnost měřeného převýšení. Volba apriorní střední chyby měřených převýšení byla odvozena pomocí

použitých pomůcek. Byl použit nivelačního přístroje Leica DNA 03 a k němu odpovídající kódová lať. Na těchto latích snímá přístroj čtení na 0,01 mm. Ze zákona hromadění středních chyb dostaneme střední chybu převýšení v jedné sestavě.

$$\Delta h = z - p$$

$$m_{\Delta h}^2 = m_z^2 + m_p^2$$

$$m_z = m_p = 0,02 \text{ mm}$$

$$m_{\Delta h} = \sqrt{0,02^2 + 0,02^2} = 0,03 \text{ mm} \sim 0,1 \text{ mm}$$

Byla použita optimální hodnota 0,1 mm, kterou by měla přesná nivelace zaručit. Přesnost vyrovnání udává aposteriorní střední chyba, která je ukazatelem přesnosti vyrovnaných veličin. Při každé etapě měření předpokládáme stejné použití metody a měření za obdobných podmínek.

Dalším krokem bylo výškové zafixování bodu. Z předchozích etap byl jako fixní volen bod č. 21 s relativní výškou 2,0000 m. Zvolením funkce odvození výšek byly v softwaru vypočteny všechny zbývající body. Následně došlo k samotnému procesu vyrovnání, jehož výsledkem je protokol o vyrovnání.

Protokol o vyrovnání z programu G-NET je členěn do 3 částí a je umístěn do přílohy č. 13. V první části udává informace o rozboru vyrovnání výškové sítě. V této části byla nejdůležitější hodnota jednotkové střední chyby aposteriorní, která udává přesnost měřených veličin dané etapy v kontextu celé sítě. Tato hodnota byla porovnána:

$m_{APOST} < 1$ Reálná přesnost měření je lepší než zadaná apriorní střední chyba.

$m_{APOST} > 1$ Reálná přesnost měření je horší než zadaná apriorní střední chyba.

$m_{APOST} = 1$

Usuzujeme na dodržení přesnosti měření a dobrou volbu apriorní chyby.

Výpis z protokolu o vyrovnání:

	Počet měřených veličin	Počet nadbytečných veličin $r = n - k$	Aposteriovní střední chyba m_{APOST} [mm]	
Etapa E16	54	17	0,471	< 1

Tab. 6 Výpis z protokolu o vyrovnání

Závěr: Reálná přesnost je lepší než zadaná apriorní střední chyba. Do vyrovnání vstupovaly všechny měřené převýšení předem opravené z nevdorovnosti záměrné přímký.

Druhá část protokolu informuje o vyrovnání převýšení a třetí vyčísluje vyrovnané výšky bodů s jejich středními chybami. Hodnoty třetí části dále pokračují do procesu výpočtu svislých posunů.

6.4. Interpretace svislých posunů

Vyhodnocení a prezentace výsledků měření posunů se děje číselně a graficky. Vztažný systém a přípojovací bod byl definován včetně způsobu stabilizace, časového sledu jednotlivých etap měření a dosažených dosavadních výsledků. Číselné vyhodnocení je uvedeno ve formě přehledných tabulek. Posun je vypočten jako rozdíl nové etapy a předcházející. Při malých vypočtených hodnotách posunů je někdy problematické určit, zda posun nastal, či jsou hodnoty posunů pouze produktem měřických chyb. Proto se často uplatňuje statistické testování pomocí intervalů spolehlivosti podle následujících vztahů uvedených níže, kde p_i byl naměřený posun a m_{pi} jeho úplná střední chyba.

Výsledkem vyrovnání měřených veličin jsou vyrovnané výšky pozorovaných bodů v etapě H_i^j s jejich charakteristikami přesnosti m_{Hi} . Hledanými hodnotami jsou svislé posuny.

$$p_i = H_i^j - H_i^{j-1}$$

Svislé posuny byly interpretovány na základě úplné střední chyby posunu a její mezní hodnoty.

$$m_{pi}^2 = (m_{Hi}^j)^2 + (m_{Hi}^{j-1})^2 \Rightarrow m_{pi} = \sqrt{(m_{Hi}^j)^2 + (m_{Hi}^{j-1})^2}$$
$$\delta_{pi} = m_{pi} \cdot t$$

t... interval spolehlivosti pro jednorozměrné veličiny byl zvolen $t=2$. Podle statistického testování rozlišujeme 3 kriteria

$p_i < m_{pi}$... posun nenastal,

$m_{pi} < p_i < \delta_{pi}$... posun mohl nastat, ale nebyl prokázán,

$\delta_{pi} < p_i$... posun nastal (s pravděpodobností 95%).

6.4.1. Číselné vyhodnocení

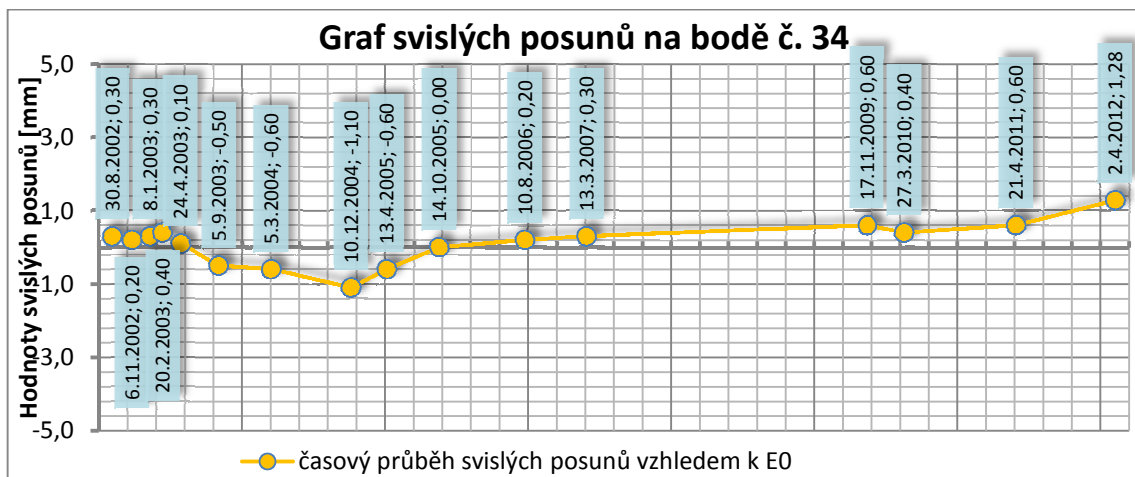
K vyhodnocení svislých posunů byly zvoleny dvě varianty porovnání nové etapy E16 vzhledem k předcházející etapě E15 (částečný posun) a vzhledem k základní etapě E0 (celkový posun). Interpretované svislé posuny jsou seřazeny do přehledné tabulky, kde se v jednotlivých sloupcích nacházejí číslo bodu, posun, střední chyba, mezní chyba, průkaznost posunu a význam znaménka. Pro jednodušší orientaci jsou 3 kriteria statistického testování barevně rozlišena. Tabulka svislých posunů je umístěna do přílohy č. 2.

6.4.2. Grafické vyhodnocení

Podkladem pro grafickou prezentaci vývoje svislých posunů v čase byly tabulky výšek bodů sítě ve všech etapách (Příloha č. 1) a tabulka svislých posunů (Příloha č. 2). Grafické vyhodnocení napomáhá v představě vzniklých změn. Graficky lze prezentovat výsledky nejrůznějšími způsoby. Byly zvoleny dvě celoplošné interpretace, zobrazení posunů v řezech a interpretace na jednotlivých bodech.

Grafy svislých posunů jednotlivých pozorovaných bodů v čase

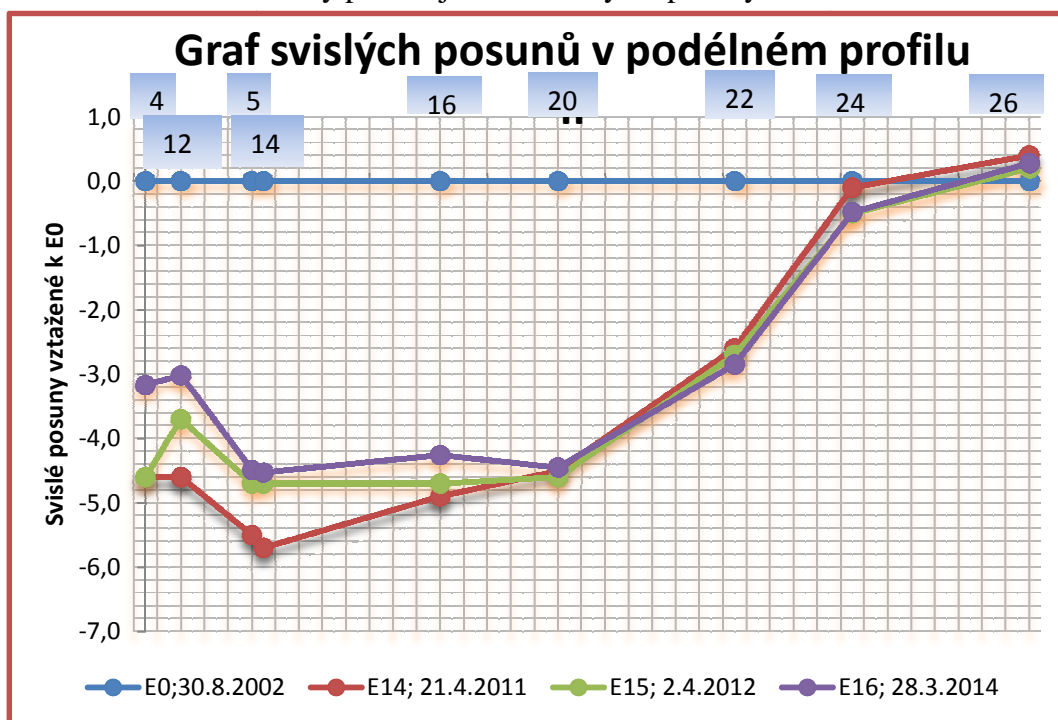
Grafy byly vyhotoveny v prostředí programu Excel. Pro každý bod byl vyhotoven samostatný graf, který zachycuje vývoj svislých posunů v čase. Na ose x byl zachycen časový průběh a na ose y byly vyneseny hodnoty svislých posunů vzhledem k základní etapě E0. Obrázek č. 16 je ukázkou grafu na pozorovaném bodě. Celkové posuny grafu dávají informaci o mírných pohybech na bodě. Všechny grafy svislých posunů jsou obsahem přílohy č. 3.



Obr. 16 Ukázka grafu svislých posunů na bodě č. 34

Grafy svislých posunů v profilech

Tyto grafy mohou být přehledné pouze při vhodném množství zobrazovaných etap, proto pro zobrazení použijeme pouze základní etapu a etapy 14, 15 a 16. V kostele byly vytvořeny 4 podélné a 6 příčných profilů. Tyto grafy vznikly také v programu Excel a v ose x zachycují staničení, v ose y svislé posuny. V horní části jsou nadepsány čísla pozorovaných bodů profilu. Každý znázorněný posun etap vůči etapě základní je zde zobrazen jinou datovou řadou. Obrázek č. 17 tvoří názornou ukázkou grafu podélného profilu na severní stěně. Grafy profilů jsou umístěny do přílohy č. 4.



Obr. 17 Graf severní stěny hlavní lodě kostela

Na obrázku č. 17 je zřetelné, jak samostatně působí hlavní loď kostela a vchod. Hlavní vchod na západní části kostela se zvedá spolu s věžemi. Na obrázku č. 18 je znázorněna trhlina v omítce samostatného působení vchodu a hlavní lodi spolu s věžemi. Východní část hlavní lodi, která se dříve zdvihala, nyní mírně klesá. Zdvih nastal také v kapli na jižní stěně.



Obr. 18 Trhlina mezi hlavním vchodem a lodí kostela

Barevná hypsometrie

V programu Atlas verze 4.70.4 byl vytvořen model pomocí relativních souřadnic bodů a svislých posunů. Barevná hypsometrie poskytuje informaci o plošném chování objektu. Půdorys je podklad, nad kterým byla znázorněna barevná hypsometrie s plynulým přechodem barev doplněna o izočáry posunů. Z extrémních hodnot posunů byly stanoveny barevně rozlišené intervaly, jejichž legenda byla vložena také do výkresu. Byl vytvořen výkres měřené etapy E16 vůči základní a předchozí etapě. Výkresy jsou obsahem přílohy č. 5.

Axonometrie objektu

V programu Microstation V8i byl vytvořen 3D model chování konstrukce. V přílohách č. 6 je názorně zobrazeno chování svislých posunů E16 vůči E15 a E0 na platformě půdorysu. Obě plošné grafické znázornění dávají lepší představu o chování objektu jako celku oproti grafům na jednotlivých bodech nebo profilech.

6.5. Zhodnocení svislých posunů

Měřená 16. etapa monitorování sítě kostela Nanebevzetí Panny Marie v Brně - Zábrdovicích byla provedena po 2 letech. Bylo snahou navázat na etapy předcházející a určit stávající a další vývoj vertikálních pohybů objektu. Největší vliv na sedání objektu má dle mého názoru hladina spodní vody, dále také různé založení objektu západní a východní části nebo prokázané části zdiva a základů původního kostela z 13. století. Zlom v hlavní lodi kostela byl znovu prokázán. O všech bodech sítě kostela můžeme říct, že se po dobu několika let chovají stabilně. I když na některých těchto bodech byl prokázán posun a objevují se na omítkách nové trhliny, nejedná se o extrémy, které by si vynutily zásah statika a následné opravy.

U většiny bodů byly prokázány částečné posuny, ty dosahují hodnot okolo 0,68 mm. V jednom případě došlo k posunu o 1,43 mm na bodě č. 4, který se nachází u hlavního vchodu do kostela. Body v okolí vchodu prokázaly také vyšší hodnoty posunu. Hlavní vchod do kostela má pravděpodobně novou fasádu, což bylo při prvním pohledu patrné (obrázek č. 21). Za zmínku stojí skupina bodů jižní stěny kaple. Na bodech s č. 33, 34 dochází ke zdvihu, ovšem body 8, 9 osazené z venku kaple na přiléhajících stěnách se prakticky nepohybují. Z toho plyne, že pohyb jižní stěny kaple neovlivňuje v prokazatelné míře přilehlé zdi a může být způsoben například blízko projíždějícími tramvaji. V některých případech se zdá, že body oscilují a střídá se mírný pokles a zdvih. Tento jev byl nejvíce patrný například u bodu č. 29 a 35. Zjednodušenou představu o pohybech bodů dává grafické vyhodnocení.

Na základě pohybů části konstrukce kostela doporučuji pro jeho historický význam nadále pokračovat ve sledování sítě pozorovaných bodů. V budoucnu není potřeba časté měření, postačí etapy po 2 až 3 letech. Pro další etapy měření také doporučuji použití elektronického nivelačního přístroje, který poskytl kvalitní výsledky z měřené etapy a nekomplikoval měření zdlouhavým čtením na klasických latích. Mohlo by se zdát, že kostel pro elektronické měření neposkytuje dostatečné osvětlení. Bylo velkým překvapením, že osvětlit lať s čárovým kódem bylo nutné pouze v několika případech.

7. MĚŘENÍ NÁKLONU KOSTELNÍCH VĚŽÍ

Průčelí s věžemi a hlavní lodí kostela spolupůsobí jako celek. Geodetické zaměření jak svislých posunů, tak náklonů věží bylo provedeno pro zjištění příčin trhlin, které se objevují na klenbě hlavní lodi. Trhliny byly již v minulosti přisuzovány sedáním těžkých kostelních věží. Kostelní věže při sedáním nadzvedávají spolupůsobící konstrukci hlavního vchodu. Deformace kostela byly určeny měřením svislých posunů a náklonů věží [7].

Na základě předchozího zaměření v roce 2002 byla odvozena metoda pro zaměření náklonů věží kostela v Zábřdovicích. Předchozí zaměření bylo provedeno hlavně na popud poruch vyskytujících se v hlavním vchodu. Nynější zaměření po více než deseti letech by mělo dát informaci o tom, co se s věžemi děje.

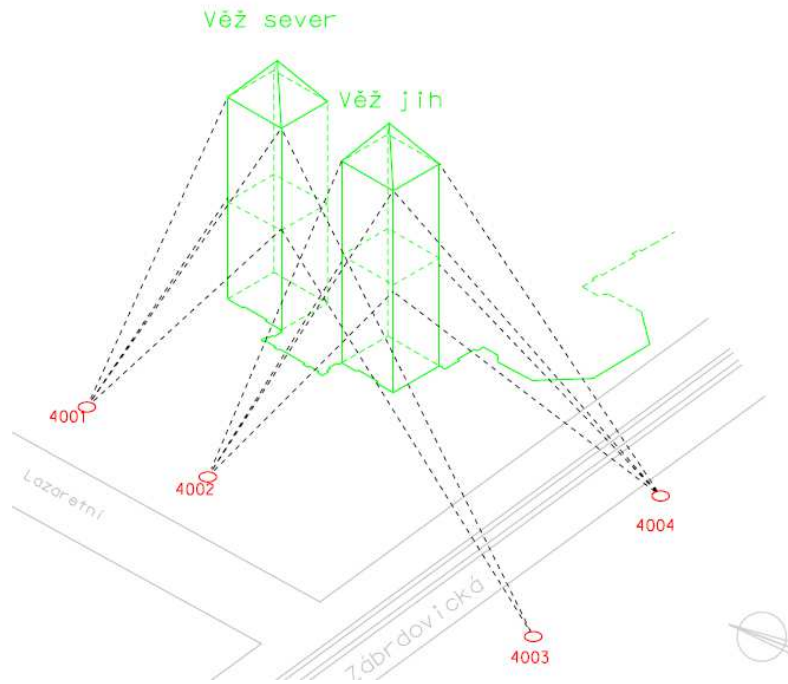
7.1. Použitá metoda a pomůcky



Obr. 19 Hrany na věžích kostela z čelního pohledu

Obr. 20, 21 Hrany z bočního pohledu

Pro úlohu určování náklonu věží bylo použito totální stanice s kompenzátorem Topcon GPT3003N vyr. č. 313633 pro eliminaci odklonu osy alhidády od svislice. Náklon byl měřen zhlédnutím hran kostelních věží ze dvou navzájem kolmých směrů. Na věžích kostela nejsou stabilizovány měřické značky. Kostelní věže nemají souvislé hrany probíhající celou výškou, proto byly na věži zvoleny vždy 4 nejdelší hrany pro jedno stanovisko (pohled). Obrázek 19, 20 a 21 ukazují měřené hrany na kostelních věžích. Body byly voleny konstantně tak, aby hrana byla vystižena co možná nejvíce body. Značný vliv na výsledné měřené hodnoty mají nerovnosti na omítce. Tato metoda neudává velikost odklonu, dává nám pouze informace o směru náklonu a přibližné hodnotě. Je ovšem nutné zajistit co nejpřesnější měření, aby tato informace nebyla zkreslena vlivy přístrojových chyb, chyb měření, či vlastních chyb měřiče. Byla zvolena 4 stanoviska pro nejlepší vystižení měřených hran, jejich rozmístění je znázorněno na obrázku 22.



Obr. 22 Situace měření náklonů hran kostelních věží

Měřené hodnoty jsou ovlivňovány nesvislostí osy alhidády, proto byl při měření zajištěn její vliv. Kompenzátor v totální stanici má eliminovat odklon osy alhidády od svislice, ale před měřením nebyla zjišťována jeho funkčnost. Oprava strmých záměr je určena měřením zenitových úhlů:

$$\Delta\alpha = \frac{1}{2}(z_1 - z_2) \cdot \cot z$$

z ... zenitový úhel strmé záměry,

z_1 ... zenitový úhel v rovině horizontu přístroje natočený o 90° od strmé záměry,

z_2 ... zenitový úhel v rovině horizontu přístroje natočený o -90° od strmé záměry.

Hodnoty oprav nejstrmější záměry na jednotlivých stanoviscích jsou seřazeny v tabulce 7. Dále je rozбором přesnosti zjištěno, od jaké hodnoty zenitového úhlu je potřeba zavádět korekce z nesvislosti osy alhidády k měřeným horizontálním směrům. Rozbor přesnosti byl vypočten pro nejméně příznivý případ, kdy rovina vychýlení bude kolmá k svislé záměrné rovině.

STAN	z_{\max} [°]	$\Delta\alpha$ [cc]
4001	47,8622	2,3
4002	51,0612	2,9
4003	70,76	0,8
4004	60,567	1,8

Tab. 7 Největší zavedené korekce směru z vlivu nesvislosti osy alhidády

$$m_z = m_\omega = 14^{cc}$$

3003N,

...Střední chyba vertikálního úhlu pro přístroj Topcon

$$m_r = \frac{m_\omega}{\sqrt{2}} = 10^{cc}$$

...střední chyba směru pro Topcon 3003N a

$$m_{UI} = 1^{cc}$$

zobrazovaných hodnot totální stanice.

...střední chyba ustálení čtecího indexu. Byla zvolena podle

$m = \sqrt{m_{\omega}^2 + m_{\beta}^2} = 10^{cc}$...Střední chyba zenitových úhlů při upnuté vertikální ustanovce,

$m_R = m \cdot \sqrt{2} = 14^{cc}$...střední chyba rozdílu dvou zenitových úhlů,

$(z_1 - z_2)_{max} = m_R \cdot t = 42^{cc}$...maximální hodnota rozdílu dvou zenitových úhlů (součinitel konfidence $t=3$). Korekce se nezavádí, když je její hodnota rovna polovině nejmenšího dílku stupnice tzn. $\Delta\alpha=0,5^{cc}$.

$$\cot z = \frac{2 \cdot \Delta\alpha}{z_1 - z_2}$$

$$z = 98,5^g (101,5^g)$$

Vliv této přístrojové systematické chyby příliš neovlivnil měřené směry, ale uvažováním zajistil kvalitní měřená data a také udal informaci o dostatečné přesnosti použité totální stanice. Korekce narůstala lineárně až na maximální hodnotu, pro kterou byla zaměřena. Vodorovné směry byly opraveny přičtením korekce.

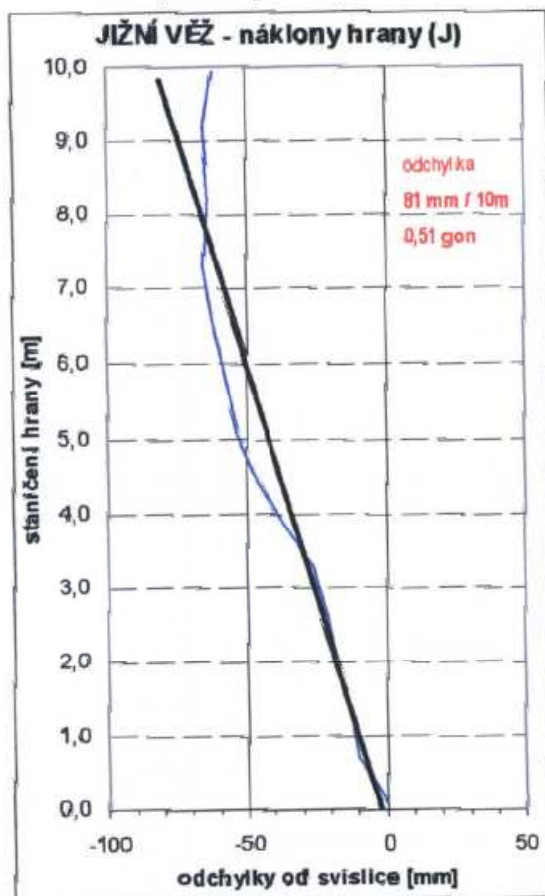
Body byly na hranách voleny tak, aby i po vyloučení odlehlého měření, byly vystiženy alespoň 4 body. Pro měření délek byl v totální stanici nastaven bezhranový mód. Na každém bodě byly registrovány úhly vodorovné, svislé a šikmé délky. Svislé úhly byly registrovány pro určení staničení bodu na hraně. Vodorovné úhly i šikmé délky nám dávají informaci o odklonu hrany od svislice, ale každá v jiném na sebe kolmém směru. Pomocí vodorovných úhlů je hrana vystižena v příčném směru na měřenou hranu. Šikmé délky vystihují hranu ve směru podélném. Pro interpretaci hran jsou použity příčné odchylky, o kterých je pojednáno v následující kapitole.

7.2. Zpracování výsledků náklonů věží

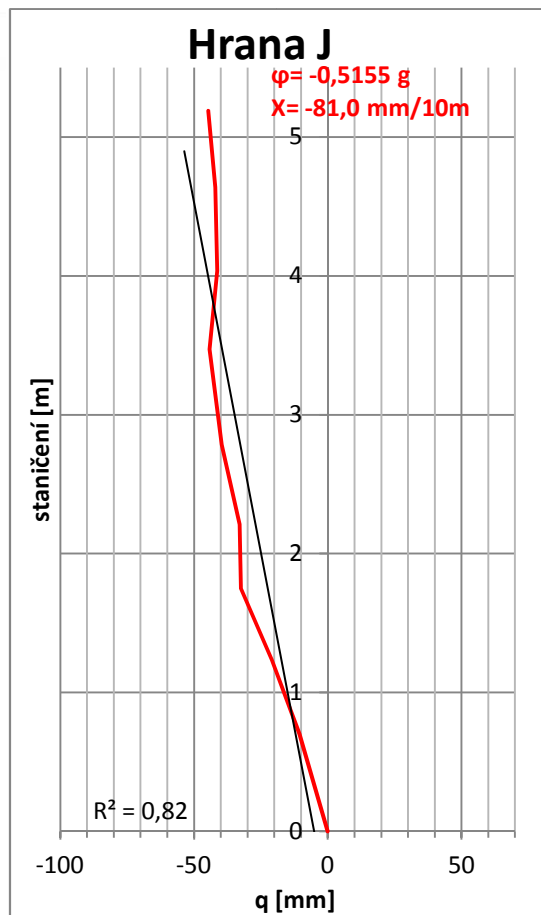
Pro interpretaci odklonu jednotlivých hran od svislice byl zvolen výpočet příčné odchylky. Příčná odchylka q je dána vzorcem:

$$q = s \cdot \frac{\Delta\omega^g}{\rho^g}.$$

Pro pohled přední i boční i pro každou hranu zvlášť byl sestaven graf. Grafy hran jsou znázorněny v příloze 7 této práce. Výsledkem grafu je lomená křivka, která vystihuje hranu věže. Tvar křivky byl ovlivněn nerovnostmi omítky a křivky se ve většině případů podobaly křivkám určeným v roce 2002. Na obrázcích č. 23,24 je uveden příklad podobnosti tvaru.



Obr. 23 Lomená křivka hrany „J“ jižní věže zaměřená v roce 2002



Obr. 24 Lomená křivka hrany „J“ jižní věže zaměřená v roce 2013

Každá křivka představující hranu kostelní věže je proložena lineární spojnicí trendu. Spojnice trendu nejlépe vystihuje náklon věže. V grafu jsou vyčísleny úhlové hodnoty odklonu [g], příčné odchytky [mm/10m] a spolehlivost spojnice trendu R^2 , která dává informaci o přizpůsobení se přímkou výchozím datům. Spojnice trendu byla určena nejpřesněji, když hodnota R^2 je rovna nebo se blíží 1. Interval rozptylu spolehlivosti ve všech grafech je od 0,73 do 0,99. Z toho plyne, výchozí data měla dobré přizpůsobení spojnice trendu. Spolehlivost je bezrozměrnou veličinou a v grafech byla uvedena bez jednotky. Spojnice trendu popisuje rovnice:

$$y = A + Bx$$

A...je posun přímky - určuje průsečík přímky s osou y (osa staničení).

B...směrnice přímky - je podíl y (úsek staničení) ku x (úsek posunu).

φ...sklon - je úhel, který svírá přímka k ose y.

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{\Delta x}{\Delta y} = \tan^{-1} \frac{\Delta q}{\Delta s}$$

x... příčná odchytky v mm/10m.

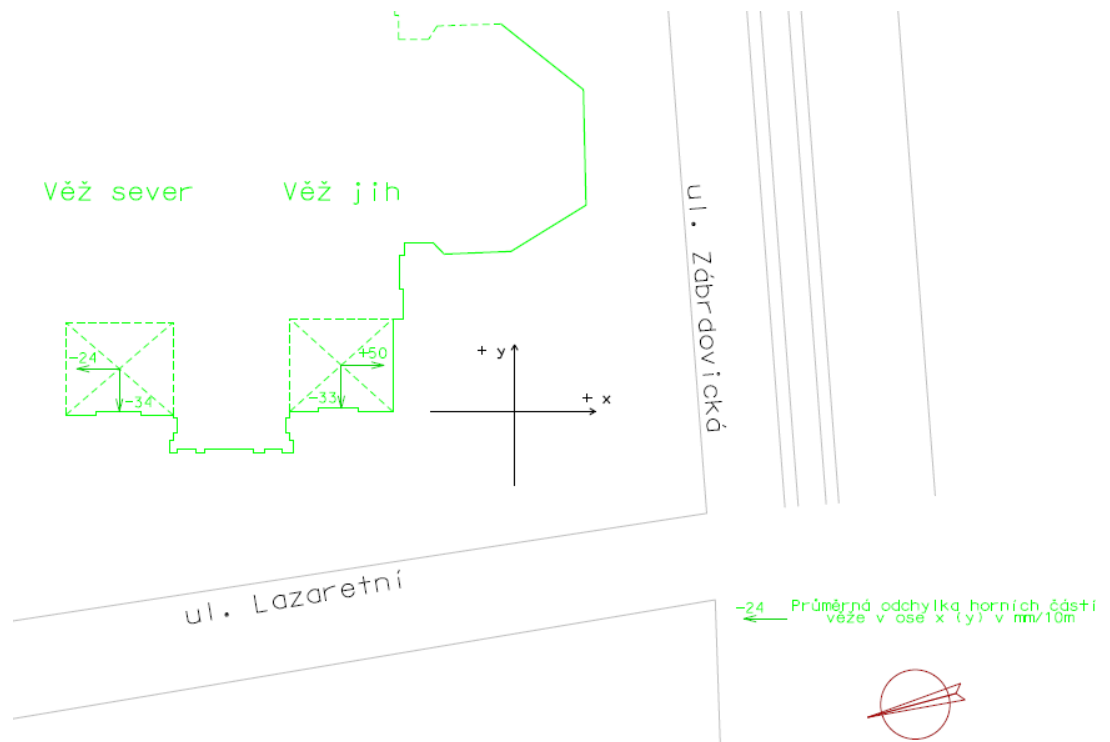
$$x = \frac{\varphi}{\rho^g} \cdot 10m$$

Porovnání základní etapy náklonů věží měřených při diplomové práci [7] a současné etapy bylo provedeno právě na příčných odchylkách. Pro jednoznačnou interpretaci byly vyrovnáním zjištěny střední chyby parametrů lineární spojnice trendu. Střední chyba parametru B je stěžejní pro odvození střední a mezní chyby náklonu. Bylo použito vyrovnání MNČ. Pro maticové výpočty byl použit software Mathcad verze 15.0. Výstupní protokol z tohoto programu je uveden v příloze č. 8, který obsahuje vypočtené hodnoty sklonu φ [°], příčnou odchylku [mm/10m], střední a mezní chyby sklonu. Tato sadu hodnot obsahuje každá křivka. Střední a mezní chyby sklonu byly použity pro průkaznost a udává informaci, zda proces naklánění věží od roku 2002 pokračoval nebo ne. Následující kapitola obsahuje srovnání zjištěných náklonů vůči sobě a posouzení posunů náklonu základní a současné etapy (tzn. 1. etapy).

7.3. Interpretace a zhodnocení náklonů věží

Posouzení, zda posun nastal, bylo provedeno formou přehledné tabulky, kde je stanoven posun, směr náklonu a průkaznost. Tato tabulka je umístěna v příloze č. 9. Prokázán náklon v obou na sebe kolmých směrech místního souřadnicového systému je pouze u hrany D severní věže. Je prokázáno, že náklon se oproti měření z roku 2002 zmenšil. K prokázání nárůstu sklonu došlo na jižní věži na hraně F v ose x (náklon z čelního pohledu), na hraně G v ose y (náklon bočního pohledu). Jelikož posuny náklonu jsou prokázány jen v několika případech, můžeme usuzovat, že u věží nedochází k pohybům. Pokud se neprokázalo naklánění alespoň u dvou rovnoběžných hran na jedné věži, má takovéto posouzení malou vypovídací schopnost a můžeme s jistotou říct, že se věže od měření v roce 2002 nenaklání. Když konstrukce spolupůsobí jako celek a dojde k sedání spodní části kostela, měla by se konstrukce nad tímto místem pohybovat např. se naklonit. Nedojde k náklonu pouze jedné hrany nýbrž celé věže. Takovýto náklon se ovšem nepodařilo prokázat. Zkreslení výsledků může mít za příčiny křivost omítky na věžích nebo ovlivnění různými podmínkami při měření. Sluneční osvětlení věží z různých stran způsobuje různé chování materiálu. Podmínky při měření v roce 2013 byly příznivé a sluneční paprsky nedopadaly na věže. V roce 2002 nejsou známy podmínky při měření. Zajímavé by bylo celodenní pozorování věží, při kterém by bylo zjištěno chování věží při osvětlení z různých stran.

Z výsledků měření náklonů vyplývají následující poznatky. Věže se od sebe odklání přibližně o 7 cm/10m. Odklon byl stanoven pro horní část věží a byl vypočten průměrováním hodnot příčných odchylek sklonu. V příčném směru byly tyto hodnoty pro horní části obou věží asi 3 cm/10m směrem k řece. Hodnoty a směry odklonu pro horní části věží jsou znázorněny na obrázku č. 25, kde jsou také osy místního souřadnicového systému. Podstatnější náklony v ose y (tzn. v příčném směru) byly stanoveny v dolních částech věží, kde jsou tyto věže propojeny s lodí kostela. Severní věž se naklání o 8 cm/10m směrem k řece a jižní věž o 11 cm/10 m směrem k řece. Vysoké hodnoty náklonu v dolní, delší části věže mohou být způsobeny nesvislými omítkami hran nebo zlomem věží. Horní, kratší část nepodléhá náklonům tolik jako spodní část věží, které jsou připojeny k chrámové lodi. Kapitola 2.1 Historie vzniku mluví o samostatné výstavbě věží s dlouhým časovým rozestupem, to může mít za příčinu odklon věží od sebe, ovšem nevysvětluje zalomení v polovině. Příloha č. 10 znázorňuje hodnoty odklonu hran věží z čelního a bočního pohledu. Graficky ukazuje zlom věží a odklon věží od sebe.



Obr. 25 Náklon v mm/10m pro jednotlivé osy místního souřadnicového systému.

Pro lepší představu byla vytvořena vizualizace svislých posunů společně s náklony věží. Hrany na věžích, které nebyly měřeny, byly vyneseny pomocí průměrných hodnot. Průměrný náklon byl vypočten vždy pro danou úroveň věže. Tato vizualizace se stala obsahem přílohy č. 11. Z grafického výstupu je zřejmé provázání sedání části jižní věže spolu s náklonem. Na druhé straně u severní věže byly měřeny náklony pouze čela a neznáme svislé posuny na severní vnější straně zdi, proto nemá vypovídací hodnotu určovat směr největší deformace spolupůsobení věže a základů.

8. ZÁVĚR

Sledování kostela v Zábrdovicích bylo započato v důsledku špatného technického stavu. V průběhu let docházelo k opravám, statickému zajištění a také k měření pro zachycení chování objektu. Cílem této práce bylo zaměřit a určit výšky kostelní sítě 16. etapy dlouhodobého sledování, dále také zjistit náklon věží. Měření prokázala jisté změny, v souvislosti s měřením svislých posunů od roku 2012 a náklonů věží od roku 2002. Zjištěné hodnoty svislých posunů nejsou kritické, a proto je doporučen, za předpokladu současného vývoje, interval měření za 2 až 3 roky. Pokud bude docházet k nějakým významným změnám, které by mohly narušit pozvolné pohyby kostela, je nutné interval zkrátit.

Svislé posuny mezi etapami 15 a 16 se pohybují v řádu desetin milimetrů, u některých vertikální pohyby stagnují. Z toho plyne, že výšky mají tendenci se ustálit. Pouze na bodě č. 4 a jeho návazném okolí byl shledán okamžitý posun z důvodu pravděpodobných oprav. Tendenci se ustálit nebo také oscilovat kolem určité hodnoty má v okolí linie zlomu v hlavní lodi většina bodů. Závěry o chování bodů jsou vyvozeny z grafických výstupů např. grafů etapového měření pro jednotlivé body, nebo grafů podélných a příčných profilů. Komplexní informaci o celkovém chování objektu dávají výstupy v podobě barevné hypsometrie se zákresem vrstevnic nebo plošná axonometrie.

Výsledky měření potvrdily náklony věží a prokázaly, že od roku 2002 nedocházelo ke zvětšení sklonu. V blízké budoucnosti není potřeba věže sledovat. Další měření doporučuji až v momentě větších změn při sledování svislých posunů nebo za dalších 10 let. Náklony věží byly znázorněny graficky a to pomocí grafů jednotlivých hran nebo profilů věží. Zajímavou ukázkou poskytuje vizualizace náklonů věží společně s vertikálními posuny, která znázorňuje stav z roku 2002 (starý stav) a 2014 (nový stav).

Ze všech výsledků jak posunů jednotlivých bodů sítě, tak náklonů věží lze říct, že deformace kostela nejsou kritické. Prokázané posuny v řádech desetin milimetru, neohrožují statiku objektu. V návaznosti na použité pomůcky bych doporučila pokračovat v etapových měřeních pomocí elektronického nivelačního přístroje.

9. POUŽITÉ ZDROJE

9.1. Literatura

- [1] Vlastivědný věstník Moravský – příloha 1. Kostel Nanebevzetí Panny Marie, Rudolf Hurt, 55. str.
- [2] POKORA M. a kolektiv: *Geodézie pro stavební fakulty*. 1. vydání: Praha, Geodetický a kartografický podnik, 1984. 432 s.
- [3] KRUMPHANZL V., MICHALČÁK O.: *Inženýrská geodézie II*, Praha, 1975, 719 s.
- [4] ARCHAIA BRNO O.P.S., Předběžné výsledky záchranných archeologických výzkumů v Brně v roce 2003, Přehled výzkumů 45 a 46, 57 s. a 59 s.
- [5] PROCHÁZKA J.: *Stabilita historických objektů*, Praha, 2011, 229 s.
- [6] NEVOŠÁD Z., VITÁSEK J.: *Geodézie III*, Brno, 2000, 140 s.
- [7] JUŘENÍK J.: Měření svislých posunů katedrály sv. Petra a Pavla a kostela Nanebevzetí Panny Marie, Brno, 2003, 53s.
- [8] JONÁŠOVÁ A.: Měření svislých posunů kostela v Brně Zábřovicích, Brno, 2010, 53s.
- [9] ŠVÁBENSKÝ O., VITULA A., BUREŠ J.: *Inženýrská geodézie I*, Modul 02, Brno, 2006, 105
- [10] BUREŠ J., KRATOCHVÍL R., MACHOTKA R., POSPÍŠIL L., ŠVÁBENSKÝ O., WEIGEL J.: *Výuka v terénu*, Modul 01, Brno, 2007, 137
- [11] BOCKOVÁ L.: *Ověření výšek vybraných bodů nivelační sítě*, Brno, 2011, 37s.
- [12] VAN HOEYMISSEN L.; DRIES S.: *Measurement of the vertical shift of the church*, Brno, 2011, 37s.
- [13] VYKUTIL J.: *Vyšší geodézie*, Praha, 1982, 545 s.
- [14] HAMPACHER M., ŠTONER M.: *Zpracování a analýzy měření v inženýrské geodézii*, Praha, 2011, 313 s.
- [15] WEIGEL J.: *Teorie chyb a vyrovnávací počet*, M02, Brno, 2004, 59 s.

9.2. Webové stránky, normy a návody

- [16] <http://cs.wikipedia.org/wiki/Geologie>
- [17] *Metodický návod pro práce v základním výškovém bodovém poli*, Praha, 2003, 28s.
- [18] <http://www.zabrdovice.cz/kostel-s.php>
- [19] ČSN 73 0405: *Měření posunů stavebních objektů*
- [20] http://www.leica-geosystems.com/en/Leica-DNA03-Leica-DNA10_5287.htm

10. SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Použité zkratky:

MNČ... metoda nejmenších čtverců,
ČSNS... Česká státní nivelační síť,
KL... kalibrační list,
ČSN... česká technická norma,
E... etapa.

Použité symboly:

Δ ... mezní hodnota rozdílu měření tam a zpět [mm] nebo rozdíl převýšení měřených ze středu sestavy a mimo střed,
R... délka oddílu [km], d , s_A , s_B ... délka sestavy, záměr [m],
 ρ ... rozdíl měřených převýšení [mm],
 Δh (l_i)... měřená převýšení [m],
 $\Delta h'$... měřená převýšení mimo střed sestavy [m],
 φ ... úhel sklonu záměrné přímkou nebo úhel odklonu od svislice [$^{\circ}$],
 o_{φ} ... měrná oprava [mm/m],
 $O_{\Delta h}$... oprava převýšení o celkovou měrnou opravu [mm],
 Δh_o ... opravené měřené převýšení [m],
 δ_U ... mezní hodnota uzávěru [mm],
 t ... součinitel konfidence,
 m_{h1sest} ... střední chyba jedné sestavy [mm],
 n ... počet oddílů,
 p ... váha měřené veličiny nebo posun na bodu mezi etapami,
 v ... oprava [mm],
 x (H)... výšky pozorovaných bodů [m],
 l'_i ... opravená převýšení [m],
 \bar{m} ... základní střední chyba [mm],
 x^o, l^o ... přibližné hodnoty neznámých veličin, měřených veličin [m],
 δx ... doplněk [m]
A... matice plánu nebo parametr spojnice trendu,
N... matice koeficientu normálních rovnic,
 S_i ... kovarianční matice,
 \bar{l} ... vyrovnané převýšení [m],
 z, p ... záměry vzad a vpřed nebo zenitový úhel strmé záměry,
 $m_{\Delta h}$... střední chyba převýšení [mm],
 m_{APOST} ... aposteriorní střední jednotková chyba,
 m_p (δ_p)... střední (mezní) chyba posunu [mm],
 m_H ... střední chyba výšky pozorovaného bodu [mm],
 $\Delta\alpha$... korekce směru z vlivu nesvislosti osy alhidády [$^{\circ}$],
 m_z ... střední chyba vertikálního úhlu [$^{\circ}$],
 m_r ... střední chyba směru [$^{\circ}$],
 m_{UI} ... střední chyba ustálení čtecího indexu [$^{\circ}$],
 m_R ... střední chyba rozdílu dvou zenitových úhlů [$^{\circ}$],
 q ... příčný posun [mm],
 $\Delta\omega$... rozdíl směrů [$^{\circ}$],
 x ... příčná odchylka [mm/10m].

11. SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

11.1. Seznam obrázků

Obr. 1 Lokalita.....	11
Obr. 2 Kostel Nanebevzetí Panny Marie v Brně- Zábřdovicích.....	12
Obr. 3 Rozmístění sond v kostele	13
Obr. 4 Linie zlomu v kontextu situace pozorované sítě kostela.....	13
Obr. 5 Trhlina ve zdivu severní stěny.....	14
Obr. 6 Rozmístění měřických značek v pozorované síti	15
Obr. 7 Stabilizace pozorovaných bodů	16
Obr. 8 Ukázka postupu modifikované klasické metody přesné nivelace	18
Obr. 9 Ukázka postupu měření při použití plošné metody	19
Obr. 10 Niveláčn� přístroj Leica DNA 03.....	22
Obr. 11 Osvětlení latě v kostele.....	23
Obr. 12 Ukázka postavení přístroje mezi vnitřním a vnějšn�m bodem	23
Obr. 13 Osov� podmínky niveláčn�ho přístroje.....	23
Obr. 14 Zkouška niveláčn�ho přístroje	25
Obr. 15 Časov� sled mezi jednotlivými etapami	26
Obr. 16 Ukázka grafu svislých posunů na bodě č. 34.....	34
Obr. 17 Graf severní stěny hlavn� lodě kostela.....	34
Obr. 18 Trhlina mezi hlavním vchodem a lod� kostela.....	35
Obr. 19 Hrany na věžích kostela z čelního pohledu	37
Obr. 20 Hrany z bočního pohledu.....	37
Obr. 21 Hrany z bočního pohledu.....	37
Obr. 22 Situace měření náklonů hran kostelních věží	38
Obr. 23 Lomen� křivka hrany „J“ jišn� věže zaměřen� v roce 2002	40
Obr. 24 Lomen� křivka hrany „J“ jišn� věže zaměřen� v roce 2013	40
Obr. 25 Náklon v mm/10m pro jednotliv� osy místního souřadnicového systému.....	42

11.2. Seznam tabulek

Tab. 1 Ověření stability bodů 6 a FIX	16
Tab. 2 Záznam teploty a času při měření.....	23
Tab. 3 Zkouška niveláčn�ho přístroje Leica DNA 03.....	25
Tab. 4 Výpis ze zápisníku zkoušek niveláčn�ho přístroje.....	27
Tab. 5 Tabulka porovnání vypočteného uzávěru s mezní hodnotou uzávěru.....	29
Tab. 6 Výpis z protokolu o vyrovnání	32
Tab. 7 Nejvějšn� zaveden� korekce směru z vlivu nesvislosti osy alhidády	38

12. SEZNAM PŘÍLOH

Příl. 1 Tabulka výšek jednotlivých bodů a etap.	(1 x A4)
Příl. 2 Vyhodnocení svislých posunů 16 etap v rámci základní a předcházející etapě (E16-E0, E16-E15).	(2 x A4)
Příl. 3 Grafy svislých posunů na bodech sítě ve všech etapách.	(6 x A4)
Příl. 4 Grafy svislých posunů na podélných a příčných profilech v etapě základní, 14, 15 a 16.	(4 x A4)
Příl. 5 Barevná hypsometrie svislých posunů 16 etap v rámci základní a předcházející etapě.	(1 x A3)
Příl. 6 Grafické zobrazení svislých posunů pomocí axonometrie.	(2 x A3)
Příl. 7 Grafy hran náklonu kostelních věží.	(5 x A4)
Příl. 8 Charakteristiky přesnosti náklonů kostelních věží (zkrácená verze).	(5 x A4)
Příl. 9 Tabulka interpretace posunů a směru náklonu.	(1 x A4)
Příl. 10 Profily odklonu věží.	(2 x A4)
Příl. 11 Vizualizace svislých posunů společně s náklony věží.	(1 x A3)
Pouze elektronické přílohy:	
Příl. 12 Záznam z měření.	(6 x A4)
Příl. 13 Protokol o výškovém vyrovnání sítě.	(3 x A4)
Příl. 14 Charakteristiky přesnosti náklonů kostelních věží (plná verze).	(16 x A4)
Příl. 15 Kalibrační list DNA 03 v. č. 339511.	(5 x A4)
Příl. 16 Kalibrační list latě č. 38997 (délky 2m) a zkouška patky latě.	(3 x A4)
Příl. 17 Kalibrační list Zeiss Ni 005 A v. č. 950083.	(7 x A4)