



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta stavební
Katedra speciální geodézie**

**Geodetický monitoring při výstavbě bezbariérového
přístupu do stanice metra Můstek**

**Geodetic monitoring of the wheelchair access to Můstek
metro station**

diplomová práce

Studijní program: Geodézie a kartografie

Studijní obor: Geodézie a kartografie

Vedoucí práce: prof. Ing. Martin Štroner, Ph.D.

Bc. David Hofman



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Hofman

Jméno: David

Osobní číslo: 410893

Zadávací katedra: Speciální geodézie

Studijní program: Geodézie a kartografie

Studijní obor: Geodézie a kartografie

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Geodetický monitoring při výstavbě bezbariérového přístupu do stanice metra Můstek

Název diplomové práce anglicky: Geodetic monitoring of the wheelchair access to Můstek metro station

Pokyny pro vypracování:

Provedení měření pro určení přesnosti nivelačního přístroje Trimble DiNi 03 při měření na krátké záměry. Rozbory přesnosti před měřením, zpracování minimálně třiceti etap praktického měření provedeného firmou Inset, s.r.o. a vyhodnocení posunů včetně statistického hodnocení.

Seznam doporučené literatury:

[1] Braun, J. - Štroner, M. - Třasák, P.: Experimentální určení přesnosti záměry při nivelaci. Geodetický a kartografický obzor. 2012, roč. 58/100, č. 10, s. 226-236. ISSN 0016-7096.

[2] Hampacher, M. - Štroner, M.: Zpracování a analýza měření v inženýrské geodézii. 2. vyd. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, ČVUT v Praze, 2015. 336 s. ISBN 978-80-01-05843-5.

Jméno vedoucího diplomové práce: prof. Ing. Martin Štroner, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 20.2.2017

Termín odevzdání diplomové práce: 21. 5. 2017

Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutně uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

202 2017

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)



Abstrakt

Diplomová práce se zabývá monitoringem poklesů plochy Václavského náměstí během výstavby bezbariérového přístupu do stanice metra Můstek. Zkoumá přesnost použitého přístroje a splnění požadovaných kritérií. Dále se zabývá zpracováním etap měření za dobu přibližně jednoho roku včetně vyrovnání měření metodou nejmenších čtverců. Výstupy jsou vypočtené poklesy, jejich prokazatelnost a grafické znázornění vývoje oblasti v čase.

Klíčová slova

geodetický monitoring stavby
zhodnocení přesnosti
etapové měření
měření poklesů
vyrovnání metodou nejmenších čtverců

Abstract

The thesis deals with the monitoring of decreases of the Wenceslas Square area during the construction of wheelchair access to the Můstek metro station. It examines the precision of the used device and meets the required criteria. It also deals with the processing of measurement stages over a period of approximately one year, including the adjustment by least squares method. Outputs are calculated decreases, their demonstrability and graphical depiction of the development of the area over time.

Keywords

geodetic monitoring during a construction
evaluation of precision
stage measurement
measurement of decreases
adjustment by least squares method



Prohlášení

Prohlašuji, že diplomovou práci na téma „Geodetický monitoring při výstavbě bezbariérového přístupu do stanice metra Můstek“ jsem vypracoval samostatně pouze za odborného vedení vedoucího práce pana prof. Ing. Martina Štronera, Ph.D., s pomocí konzultací s pracovníky společnosti INSET s. r. o. a s využitím materiálů uvedených v seznamu zdrojů.

V Praze dne.....

.....

(podpis autora)



Poděkování

Chtěl bych poděkovat panu prof. Ing. Martinu Štronerovi, Ph.D. za jeho odborné vedení mé práce a připomínky k ní. Dále pak společnosti INSET s.r.o. a jejím zaměstnancům za zadání tématu práce, poskytnutí dat, praktickou pomoc s prováděným experimentem, zapůjčení přístrojů a odborné konzultace. A v neposlední řadě bych rád poděkoval mojí rodině za podporu po celou dobu mého studia.



Obsah

Cíl práce	8
1 Zakázka	9
1.1 Informace o zakázce.....	9
1.2 Popis budovaného díla	9
1.3 Geotechnický monitoring stavby.....	10
1.4 Výšková síť	11
1.5 Popis převzatých dat.....	12
2 Použité přístroje a pomůcky a postup měření	14
2.1 Postup měření.....	14
2.2 Použitý přístroj	14
2.2.1 Technické údaje o přístroji.....	14
2.2.2 Experimentální měření pro určení přesnosti přístroje.....	14
3 Apriorní rozbor	17
3.1 Tvorba kovarianční matice.....	17
3.2 Zhodnocení dodržení přesnosti	19
4 Zpracování a vyhodnocení dat	20
4.1 Způsob zpracování dat	20
4.2 Prokazatelnost vertikálních posunů	22
5 Výsledky	24
5.1 Grafy vývoje profilů	24
5.2 Vývoj poklesové kotliny.....	29
Závěr	34
Použité zdroje.....	35



Seznam obrázků	36
Seznam grafů	36
Seznam tabulek.....	36
Seznam příloh	37



Cíl práce

Cílem diplomové práce bylo opětovné zpracování části geodetického monitoringu při realizaci zakázky Bezbariérové zpřístupnění stanice metra Můstek trasy A i B. Monitoring byl zajišťován firmou INSET s. r. o. a měření probíhalo od listopadu 2014 do února 2016. Diplomová práce se zaměřuje na monitoring vertikálních posunů plochy severozápadní části Václavského náměstí metodou geometrické nivelace ze středu. Cílem bylo posouzení dodržení požadované přesnosti na základě rozboru přesnosti před měřením a s tím související určení přesnosti použitého nivelačního přístroje při krátkých záměrách. Dalším cílem byl opětovný výpočet měřených etap místní výškové sítě s vyrovnáním metodou nejmenších čtverců a následný výpočet vertikálních posunů sledovaných bodů s posouzením jejich prokazatelnosti. Závěrečným cílem bylo vhodné zpracování zjištěných výsledků do grafů v závislosti na čase a zhotovení vrstevnicových plánů oblasti tak, aby byl zachycen vývoj poklesové kotliny.



1 Zakázka

1.1 Informace o zakázce

Zakázka Bezbariérové zpřístupnění stanice metra Můstek trasy A i B se zabývala zhotovením bezbariérového přístupu z povrchu Václavského náměstí do prostor stanic obou linek metra, které se zde kříží. Investorem stavby byl Dopravní podnik hl. m. Prahy, zhotovitelem projektové dokumentace METROPROJEKT Praha a.s. a hlavním zhotovitelem stavby Metrostav a.s. Geotechnický monitoring stavby prováděla firma INSET s. r. o.

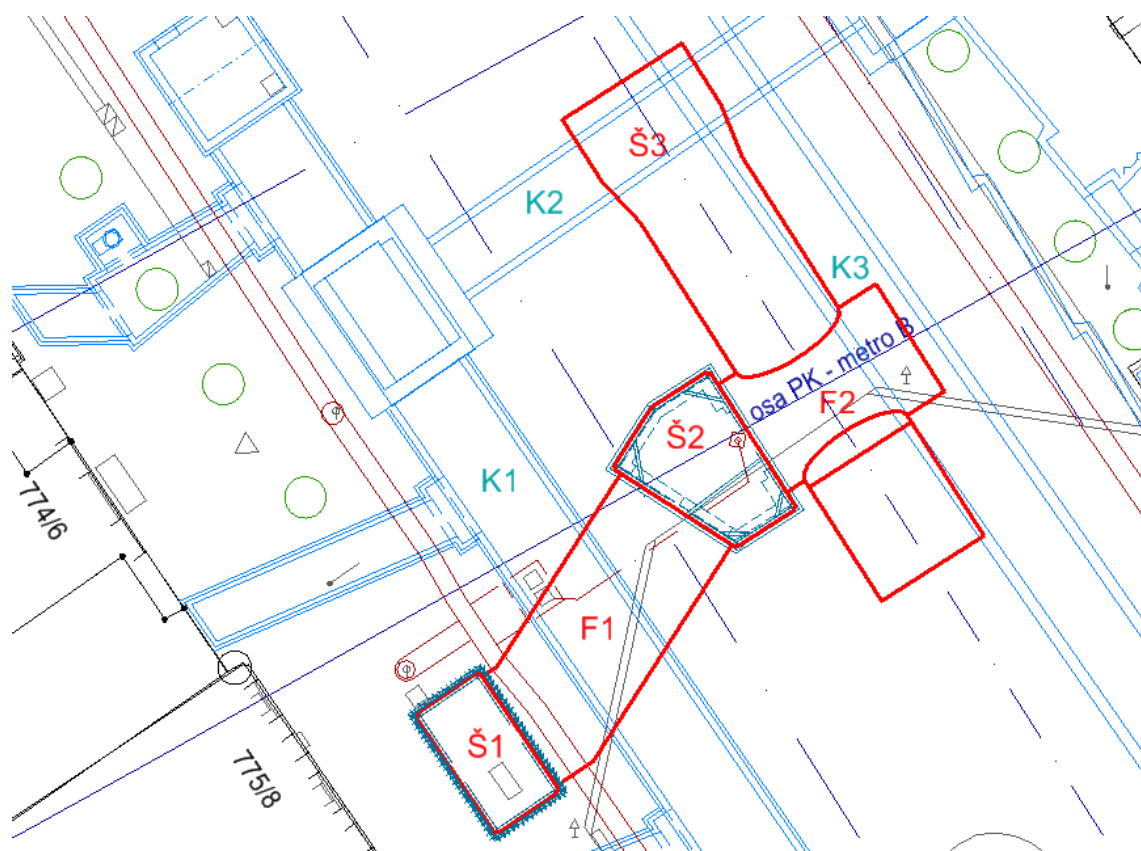
Veškeré práce od přípravné fáze až po závěrečná měření probíhaly od srpna 2014 do května 2016. Stavební činnost byla lokalizována v severozápadní části Václavského náměstí na pozemku s parcelním číslem 2306/1. [1]

1.2 Popis budovaného díla

Samotná stavba je tvořena soustavou spojených objektů – kaskádou osobních výtahů, chodbami a schodištěm. Vstup z povrchu se nachází na Václavském náměstí před budovou Adamovy lékárny s číslem popisným 775/8. Bezbariérový přístup ústí do stanic metra Můstek na trasy A i B.

Stavební práce započaly na konci října 2014 hloubením šachty Š1, která se nacházela v místě plánované výtahové šachty z povrchu před budovou Adamovy lékárny (viz Obrázek 1), a dočasné těžní šachty Š2 zhruba ve středu sledované oblasti. Šachta Š1 byla dokončena v dubnu 2015 a šachta Š2 v květnu. Koncem února byla zahájena ražba chodby F1 vedoucí ze šachty Š1 přes Š2 až ke křížení s chodbou F2. Po dokončení chodby F1 na konci dubna následovala ražba obou větví chodby F2. Jedna z těchto větví, vedoucí k budoucímu výtahu v šachtě Š3, byla vytěžena na začátku června. Druhá, která vedla k budoucímu schodišti, byla dokončena na konci července. Poslední částí těžby byla šachta Š3, která spojuje prostory stanic na trase metra A a B. Její hloubení probíhalo od začátku července do poloviny září.

Hloubení probíhalo výhradně pomocí mechanizovaného rozpojování horniny, protože trhací práce nebyly povoleny. Jako primární ostění ražených chodeb byly použity rámy typu Bretex, ocelové sítě a stříkaný beton. [1]



Obrázek 1: Schéma budované stavby včetně okolních budov, kanalizace a kolektorů (K1 – K3)

1.3 Geotechnický monitoring stavby

Vzhledem ke složitým podmínkám v oblasti hloubení a ražby hrál geotechnický monitoring významnou úlohu při realizaci stavby. V okolí se totiž nachází mnoho dalších podzemních staveb, při jejichž budování bylo vytěženo velké množství okolní horniny. Kromě obou stanic metra to jsou dvě kanalizační stoky a tři kolektory. Z období výstavby těchto děl bylo známo, že v oblasti jsou složité geologické poměry způsobené přítomností nesoudržných zvodnělých fluvialních sedimentů a tektonicky významně porušeným horninovým prostředím v oblasti Pražského zlomu. Navíc byly všechny práce prováděny za plného provozu obou dotčených linek metra a celá oblast se nachází v památkově chráněném území. [1]

Složitosti podmínek odpovídal i rozsah geotechnického monitoringu, pro který bylo navrženo sledování následujícími metodami:



- a) Pasportizace, případně stavebně technický průzkum, prohlídky během, výstavby, repasportizace pro nadzemní objekty, kolektory, kanalizaci, dotčené staniční nebo traťové tunely metra,
- b) geometrická nivelace pro sledování poklesové kotliny na komunikacích a chodnících, měření poklesů nadzemních objektů a v podzemí kolektorů,
- c) měření deformací na trhlinách na všech ovlivněných objektech,
- d) extenzometrické měření pro sledování nadloží ve sdruženém profilu nad novým schodištěm,
- e) konvergenční měření pažení šachet, primárního ostění ražených chodeb, konstrukcí kolektorů a zejména ostění stávajících tubusů metra „A“ i „B“,
- f) měření tlaků na styku nových konstrukcí se stávajícími, napětí v podpůrných konstrukcích a sekundárním ostění,
- g) měření hluku a vibrací při provádění trhacích prací (tyto nakonec nebyly povoleny),
- h) kontrolní měření bludných proudů, hodnocení agresivity podzemní vody,
- i) provádění geologického a geotechnického sledu, sledování přítoků, vyhotovení geologické dokumentace. [1]

Diplomová práce se dále zabývá pouze částí bodu b) a to konkrétně monitoringem poklesové kotliny staveniště pomocí metody geometrické nivelace.

1.4 Výšková síť

Sledovaná výšková síť se nacházela v severozápadní části Václavského náměstí, zabírala celou jeho šíři a v délce se táhla od paláce Astra s č. p. 773 zhruba 70 metrů po Peterkův dům s č. p. 777. Podrobné body tvořily téměř obdélníkovou síť s celkovým rozměrem přibližně 70 x 45 metrů. Ta byla tvořena sedmi profily s rozstupem cca 10 metrů. Každý profil pak sestával ze sedmi bodů přibližně po 6,5 metrech. Vytyčení bodů proběhlo pomocí kombinace použití metody GNSS a totální stanice. Stabilizace byla provedena měřickými hřeby v období od 19. 11. 2014 do 9. 12. 2014. Síť byla připojena na dva fixní body ležící mimo oblast očekávaných posunů.



Obrázek 2: Sledovaná výšková síť a budovaná stavba

1.5 Popis převzatých dat

Od firmy INSET s. r. o. byla pro zpracování diplomové práce převzata následující data:

a) Textové soubory ve formátu .txt exportované po každé měřené etapě z nivelačního přístroje. V těchto souborech byla zaznamenána data měření, čísla měřených bodů, veškerá čtení zpět, vpřed i bočně na nivelační lati a vodorovné vzdálenosti. Převzata byla měření z období od 11. 11. 2014 do 9. 2. 2016.

b) Výpis měřených dat v tabulce pro MS Excel s čísly a daty měřených bodů pro lepší orientaci v datech.



c) Obrazové soubory z programu Sahure ve formátu .png pro lepší orientaci v prostorových vztazích a pro tvorbu ilustračních výkresů.

d) Závěrečné vyhodnocení monitoringu zpracované Ing. M. Vinterem a Ing. M. Čermákem pro získání všeobecných informací o přípravě, zhotovení a monitoringu stavby.

e) Zpracovaný výkres poklesové kotliny k datu 20. 6. 2015 z programu Atlas jako vzor pro následné vyhotovení vrstevnicových plánů z více etap. Součástí byly i výkresy ve formátu .dxf zachycující okolní nadzemní i podzemní objekty.



2 Použité přístroje a pomůcky a postup měření

2.1 Postup měření

V jednotlivých etapách byly metodou geometrické nivelace ze středu určovány výšky sledovaných bodů. Pro měření byl použit digitální nivelační přístroj Trimble DiNi 0.3 a kódová lať.

V každé etapě bylo měřeno z fixního bodu s označením FPF. Jako přestavové body byly využity zvolené určované body. Nivelační pořad byl vždy uzavírán zpět na výchozí bod FPF. V některých etapách byla také měřena výška kontrolního fixního bodu K. Výška sledovaných bodů, které nebyly využity jako přestavové, byla určována bočním měřením z nivelačního pořadu. Pro lepší představu o průběhu měření je v přílohách přiloženo schéma etapy měřené 18. 5. 2015 (s. 38).

Měření jednotlivých etap bylo přizpůsobováno rozsahu stavby, požadavkům zadavatele a podmínkám na staveništi. Některé body byly zničeny a poté nahrazeny a některé byly dlouhodobě nepřístupné. Při měření byly voleny délky záměr do 30 m.

2.2 Použitý přístroj

2.2.1 Technické údaje o přístroji

Trimble DiNi je digitální nivelační přístroj. Pro měření zakázky byl použit model Trimble DiNi 0.3. Jeho přesnost je charakterizována kilometrovou směrodatnou odchylkou obousměrné nivelace $\sigma_{0km} = 0,3$ mm. Rozsah digitálního měření je 1,5 – 100 m. Nejmenší dílek zaznamenaný při čtení na lati je jedna setina milimetru. Přesnost urovnání kompenzátoru je $\pm 0,2''$. Při měření na lať s čárovým kódem je zaznamenávána i vodorovná délka s rozlišením 1 mm. Dle výrobce je při měření délky 20 m její směrodatná odchylka 20 mm. Použitý přístroj má výrobní číslo 741231. [2]

Při měření byla použita kódová hliníková dvoumetrová nivelační lať Trimble s invarovým páskem. Výrobní číslo použité latě je 58584.

2.2.2 Experimentální měření pro určení přesnosti přístroje

Vzhledem ke specifickým podmínkám měření na staveništi, kde byly jednotlivé délky kratší, než odpovídá pořadové nivelaci, jejíž přesnost popisuje σ_{0km} daná výrobcem,



bylo rozhodnuto o experimentálním zjištění směrodatné odchylky čtení na lati pro různé délky záměr. Samotný experiment byl realizován podle článku Ing. Brauna Experimentální určení přesnosti při nivelaci [3], ve kterém je porovnáno několik nivelačních přístrojů. Dle článku pro digitální nivelační přístroje platí, že přesnost měření při délce záměr do 30 m je vyšší než jakou garantuje výrobce. Proto je v rozbořech přesnosti pro podobné krátké pořady s velkým množstvím bočních záměr vhodnější použít směrodatnou odchylku zjištěnou z experimentu než kilometrovou směrodatnou odchylku.

Pro určení typických vzdáleností měření byla z předaných dat zvolena etapa, ve které byly měřeny všechny sledované body a která postupem měření odpovídá typické etapě. Tato etapa byla měřena 18. 5. 2015. Nejdelší záměra při měření měla délku 27,5 m a nejkratší 1,5 m.

Experiment byl realizován 20. 2. 2017 na chodníku v Lucemburské ulici. Zde byly rozměřeny tři základny o délkách 3 m, 29 m a 55 m, což odpovídá délkám záměr při měření etap. Na koncích těchto základen byly postaveny nivelační latě a pevně fixovány lepicí páskou ke stativům. Ve středech základen byl umístěn nivelační přístroj a opakovaně bylo měřeno převýšení mezi latěmi. Kvůli zachování nezávislosti měření byla po každém měření změněna výška přístroje pomocí stavěcích šroubů a po každém pátém měření pomocí nohou stativu. Počet opakování měření byl stanoven dle článku [3] na 51.

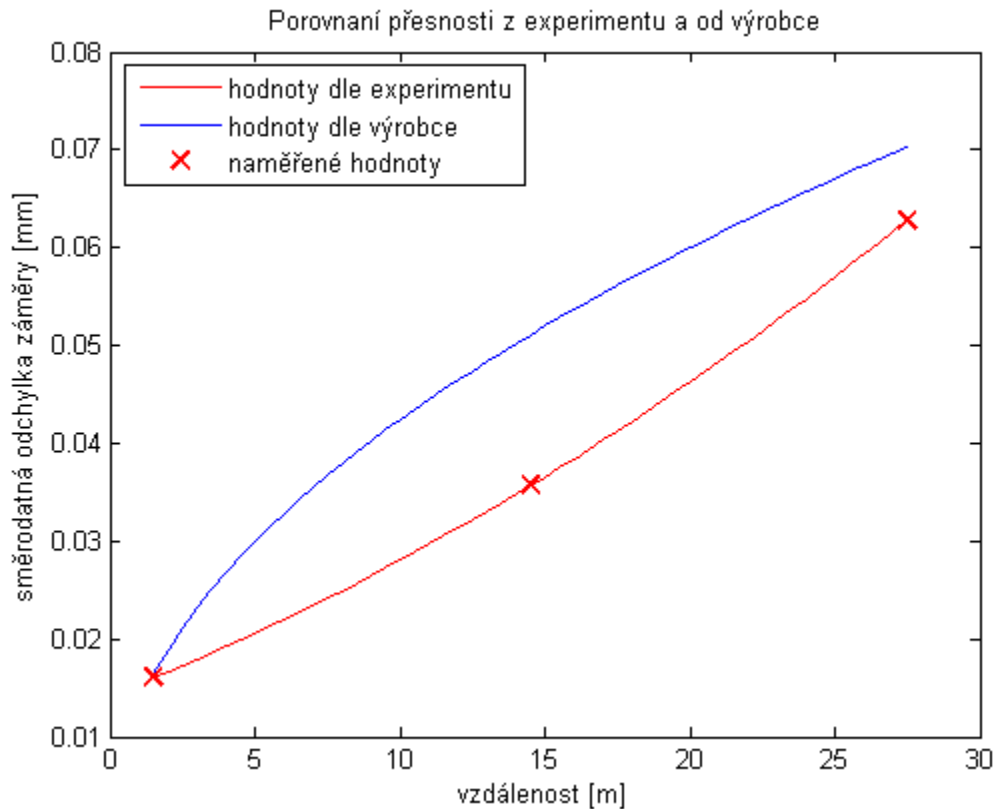
Z naměřených dat byly v programu Matlab vypočteny výběrové směrodatné odchylky záměry pro jednotlivé vzdálenosti. Poté byla provedena kontrola porovnáním trojnásobku výběrové směrodatné odchylky s největšími odlehlostmi od průměrů souborů měření. Všechny soubory toto kritérium splnily. Dále byly výběrové směrodatné odchylky převýšení přepočteny na kilometr a porovnány s kilometrovou směrodatnou odchylkou danou výrobcem (Tabulka 1). Protože nivelace byla prováděna pouze jednosměrně, je to tato hodnota:

$$\sigma_{km} = \sigma_{0km} \cdot \sqrt{2} = 0,3 \cdot \sqrt{2} \doteq 0,42 \text{ mm.} \quad (1)$$

Porovnáním hodnot z experimentu s hodnotami od výrobce bylo zjištěno, že pro záměry o délkách 14,5 m a 27,5 m jsou výsledky experimentu lepší, než jaké garantuje



výrobce. Pro záměru o délce 1,5 m jsou výsledky prakticky totožné, což je pravděpodobně způsobeno extrémně krátkou vzdáleností.



Graf 1: Porovnání výsledků experimentu s hodnotami od výrobce

Tabulka 1: Směrodatné odchylky převýšení zjištěné experimentem a přepočtené na 1 kilometr

	délky záměr [m]		
	1,5	14,5	27,5
σ [mm]	0,41	0,30	0,38

Hodnotami výběrových směrodatných odchylek byla proložena kvadratická funkce závislosti směrodatné odchylky na délce záměry. Pomocí koeficientů této funkce byly dále počítány směrodatné odchylky jednotlivých záměr ve všech etapách.



3 Apriorní rozbor

3.1 Tvorba kovarianční matice

Pro zjištění, zda zvolený přístroj a způsob měření odpovídá požadované přesnosti, byla vypočtena kovarianční matice. Na hlavní diagonále této matice jsou kvadráty směrodatných odchylek určených výšek. Kovarianční matice C se vypočte dle vztahu:

$$C = \sigma_0 \cdot (A^T \cdot P \cdot A)^{-1}, \quad (2)$$

kde C je kovarianční matice,

σ_0 je apriorní jednotková směrodatná odchylka (σ_0 byla zvolena 1),

A je matice parciálních derivací (matice plánu)

a P je matice vah.

Z měřených etap byla vybrána etapa měřená 18. 5. 2015, kdy byly měřeny všechny určované body. Podle způsobu měření v této etapě byla vytvořena matice plánu A , kde řádky reprezentují derivace jednotlivých měření dle výšek určených bodů. Matice A je tedy tvořena hodnotami 1, -1 a 0 a má rozměr $l \times r$, kde l je počet měření a r je počet určených bodů.

$$A = \begin{pmatrix} \frac{dh_1}{dH_1} & \dots & \frac{dh_1}{dH_r} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{dh_l}{dH_1} & \dots & \frac{dh_l}{dH_r} \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$h = H_j - H_i \quad (4)$$

$$\frac{dh}{dH_j} = 1 \quad (5)$$



$$\frac{dh}{dH_i} = -1 \quad (6)$$

Předmětem měření bylo 7 profilů po 7 bodech a dále bylo v etapě použito 5 bodů pro přestavy. V této konkrétní etapě bylo celkem 58 měření převýšení. Matice plánu má tedy 58 řádků a 54 sloupců.

Matice vah je diagonální a obsahuje poměry kvadrátů apriorní jednotkové směrodatné odchylky a směrodatných odchylek jednotlivých převýšení. Směrodatné odchylky záměr byly vypočteny dosazením délek záměr do kvadratické rovnice, jejíž koeficienty byly vypočteny v kapitole 2.2.2:

$$\sigma_c = k_2 \cdot d^2 + k_1 \cdot d + k_0, \quad (7)$$

kde σ_c je směrodatná odchylka čtení na lati,
 d je měřená vodorovná vzdálenost
a k_2 , k_1 a k_0 jsou koeficienty kvadratické funkce.

Z nich byly dále vypočteny směrodatné odchylky převýšení σ_h :

$$\sigma_h = \sqrt{\sigma_z^2 + \sigma_v^2}, \quad (8)$$

kde σ_z je směrodatná odchylka záměry zpět
a σ_v je směrodatná odchylka záměry vpřed.

Váha i -tého převýšení je tedy:

$$p_i = \frac{\sigma_0^2}{\sigma_{hi}^2} = \frac{1}{\sigma_{hi}^2}. \quad (9)$$



Po výpočtu kovarianční matice byly odmocněním hodnot na hlavní diagonále zjištěny velikosti směrodatných odchylek určených výšek bodů. Největší směrodatná odchylka určené výšky v této etapě byla 0,09 mm.

Pro kontrolu správnosti výsledků byla tato etapa vyrovnána v programu gama-local. Pro měření převýšení byly použity směrodatné odchylky vypočtené dle kapitoly 2.2.2. Výsledky z této kontroly jsou prakticky totožné jako výpočet v programu Matlab.

3.2 Zhodnocení dodržení přesnosti

Limitní hodnoty sedání povrchu byly stanoveny v souhrnné technické zprávě k dokumentaci pro výběr zhotovitele hodnotou sedání povrchu terénu $A = 25$ mm. Pokud zjištěný vertikální posun dosáhl úrovně 75 % hodnoty A , tedy 18,75 mm, byl vyhlášen varovný stav číslo 1 – stav přípustných změn [1]. Měření tedy muselo dosahovat takové přesnosti, aby byly prokazatelné právě posuny o velikosti 18,75 mm. Požadovaná směrodatná odchylka měření vertikálního posunu u stávající stavby se dle ČSN 73 0405 – Měření posunů stavebních objektů [4] vypočte:

$$\sigma_p = \frac{p_k}{5} = \frac{18,75}{5} = 3,75 \text{ mm.} \quad (10)$$

Z požadované směrodatné odchylky určení posunu byla dále vypočtena požadovaná směrodatná odchylka měření výšky. Protože všechny etapy byly měřeny se stejnou přesností, je tato směrodatná odchylka:

$$\sigma_{h0} = \frac{\sigma_p}{\sqrt{2}} = 2,65 \text{ mm.} \quad (11)$$

V kapitole 3.1 byla vypočtena nejvyšší směrodatná odchylka určení výšky bodu ve vzorové etapě menší než 0,1 mm. Z toho vyplývá, že zvolený přístroj i metoda měření překračuje svou přesností požadavky zadavatele pro monitoring poklesové kotliny.



4 Zpracování a vyhodnocení dat

4.1 Způsob zpracování dat

Z textových souborů exportovaných z nivelačního přístroje po každé měřené etapě byla vybrána data nutná pro určení výšek sledovaných bodů. Pro každou záměru tak bylo nutné vybrat hodnotu čtení na lati pro určení převýšení a měřenou délku pro výpočet směrodatné odchylky převýšení. Data musela být následně rozříděna tak, aby odpovídala jednotlivým převýšením mezi dvojicemi bodů (tedy čtení zpět a vpřed a odpovídající délky pro každé převýšení). Hodnoty byly dosazeny do skriptu pro program Matlab, ve kterém byly automaticky vypočteny hodnoty převýšení dle vzorce:

$$h = z - v, \quad (12)$$

kde z je čtení na lati zpět

a v je čtení na lati vpřed.

Dále byly v tomto skriptu vypočteny směrodatné odchylky převýšení pomocí koeficientů kvadratické funkce vypočtených v kapitole 3.2.2:

$$\sigma_c = k_2 \cdot d^2 + k_1 \cdot d + k_0, \quad (13)$$

kde σ_c je směrodatná odchylka čtení na lati,

d je měřená vodorovná vzdálenost

a k_2 , k_1 a k_0 jsou koeficienty kvadratické funkce.

Směrodatná odchylka měřeného převýšení σ_h se pak vypočetla:

$$\sigma_h = \sqrt{\sigma_z^2 + \sigma_v^2}, \quad (14)$$

kde σ_z je směrodatná odchylka čtení na lati zpět

a σ_v je směrodatná odchylka čtení na lati vpřed.



Vyrovnaní nivelačních pořadů a výpočet výšek bodů v jednotlivých etapách a jejich směrodatných odchylek proběhl v programu gama-local, jehož autorem je Prof. Ing. Aleš Čepek, CSc [5]. Tento program je určen k vyrovnávání geodetických sítí metodou nejmenších čtverců s využitím vyrovnání zprostředkujících veličin [6].

Při vyrovnání pomocí zprostředkujících veličin se vytváří ze vstupních dat vektor měřených veličin L . V tomto případě je vektor tvořen měřenými převýšeními:

$$L = (h_{1,2}, h_{2,3}, \dots, h_{n-1,n}). \quad (15)$$

Dále je z měřených převýšení vypočten vektor přibližných výšek bodů $X_0(H_1, H_2, \dots, H_n)$ a s jeho pomocí jsou vyjádřena měřená převýšení:

$$L_0 = (H_2 - H_1, H_3 - H_2, \dots, H_n - H_{n-1}). \quad (16)$$

A následně jsou vypočteny opravy převýšení:

$$l = L - L_0. \quad (17)$$

Poté je vytvořena matice parciálních derivací A funkcí dle parametrů. V případě nivelačního měření jsou funkcemi měřená převýšení a parametry (zprostředkujícími veličinami) přibližné výšky bodů. Matice A je tedy tvořena hodnotami 1, -1 a 0.

$$A = \begin{pmatrix} \frac{dh_1}{dH_1} & \dots & \frac{dh_1}{dH_r} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{dh_l}{dH_1} & \dots & \frac{dh_l}{dH_r} \end{pmatrix} \quad (18)$$

Dalším krokem je vytvoření diagonální váhové matice. V tomto případě, kdy jsou známy směrodatné odchylky jednotlivých převýšení, obsahuje hlavní diagonála váhové matice P poměr kvadrátů apriorních jednotkových směrodatných odchylek ke kvadrátům směrodatných odchylek převýšení. Váha jednoho převýšení má tedy tvar:



$$p_i = \frac{\sigma_0^2}{\sigma_{hi}^2}. \quad (19)$$

Následně se výpočtem normálních rovnic zjistí velikosti oprav výšek:

$$dx = -(A^T \cdot P \cdot A)^{-1} \cdot (A^T \cdot P \cdot l). \quad (20)$$

Součtem oprav dx s přibližnými výškami z vektoru X_0 se vypočtou vyrovnané výšky bodů. Na závěr se vypočte kovarianční matice výškové sítě:

$$C = \sigma_0 \cdot (A^T \cdot P \cdot A)^{-1}. \quad (21)$$

Vstupem do programu gama-local byly xml soubory obsahující měřená převýšení, jejich směrodatné odchylky a čísla bodů, mezi kterými bylo měřeno. Výstupem byly vyrovnané výšky bodů a kovarianční matice. Odmocněním hlavní diagonály kovarianční matice C byly následně vypočteny směrodatné odchylky výšek bodů.

Získané hodnoty byly ukládány do tabulky v programu MS Excel. Zde musela být u několika bodů provedena změna výšek o konstantní rozdíly, protože po etapě měřené 15. 12. 2014 byly tyto body zničeny nebo zneprístupněny a nahrazeny novými body v jejich blízkosti. Proto byly v této etapě změřeny nové i staré body a byly zjištěny rozdíly mezi jejich výškami. Kvůli návaznosti na předchozí měření byly pak v dalších etapách výšky těchto bodů opravovány o zjištěný rozdíl. Konkrétně se jednalo o body 302, 304, 305, 402, 404, 405 a 505.

Dále byl proveden pro každou etapu výpočet vertikálních posunů proti nulté etapě konkrétního bodu. Instalace bodů byla provedena ve více etapách, proto mají různé body odlišné nulté etapy.

4.2 Prokazatelnost vertikálních posunů

Pro každý bod v každé etapě byl vypočten prokazatelný vertikální posun dle následujícího postupu. Vertikální posun v n -té etapě proti nulté etapě byl vypočten dle vzorce:



$$p_n = H_n - H_0, \quad (22)$$

kde H_n je výška v n-té etapě a H_0 je výška v nulté etapě.

Derivací tohoto vztahu dle jednotlivých proměnných a nahrazením diferenciálů skutečnými chybami měřených výšek byl získán vzorec pro skutečnou chybu posunu:

$$\varepsilon_{p_n} = \varepsilon_{H_n} - \varepsilon_{H_0}. \quad (23)$$

Po přechodu na směrodatné odchylky vznikl vzorec pro směrodatnou odchylku vertikálního posunu:

$$\sigma_{p_n} = \sqrt{\sigma_{H_n}^2 + \sigma_{H_0}^2}. \quad (24)$$

Posun v n-té etapě proti nulté etapě byl prokazatelný, pokud platilo:

$$|p_n| > u_p \cdot \sigma_{p_n}, \quad (25)$$

kde u_p je koeficient spolehlivosti. Ve výpočtech byl použit koeficient 2, což pro jednorozměrnou veličinu znamená 95% spolehlivost.



5 Výsledky

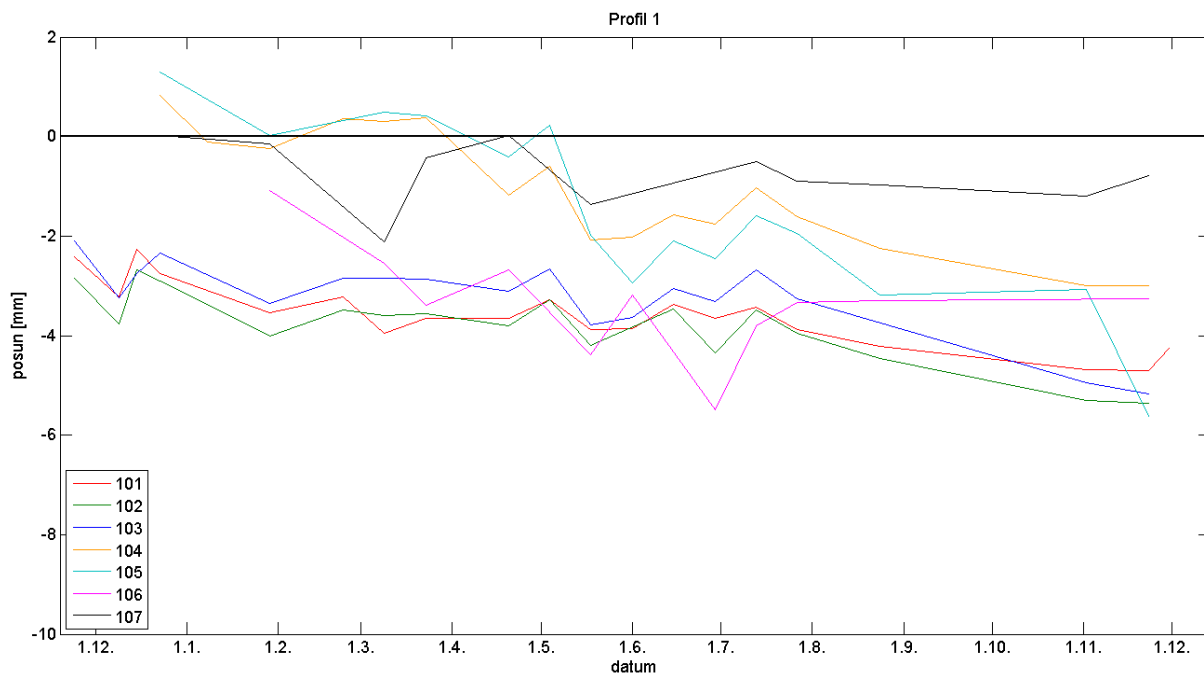
Kvůli přesnosti použitého přístroje a metody měření, která je relativně vysoká oproti velikosti reálných posunů, byla velká část posunů prokázána s pravděpodobností 95 %. Vzhledem k rozsáhlosti vypočtených dat jsou podrobné výsledky vypočtených vertikálních posunů a jejich prokazatelnosti uvedeny v digitálních přílohách. Pro představu je uvedena tabulka zachycující výsledky z kompletní etapy měření 18. 5. 2015.

Tabulka 2: Hodnoty posunů (p) v etapě měření 18. 5. 2015 vůči nulté etapě a velikosti absolutních hodnot prokazatelných posunů v této etapě (P_k)

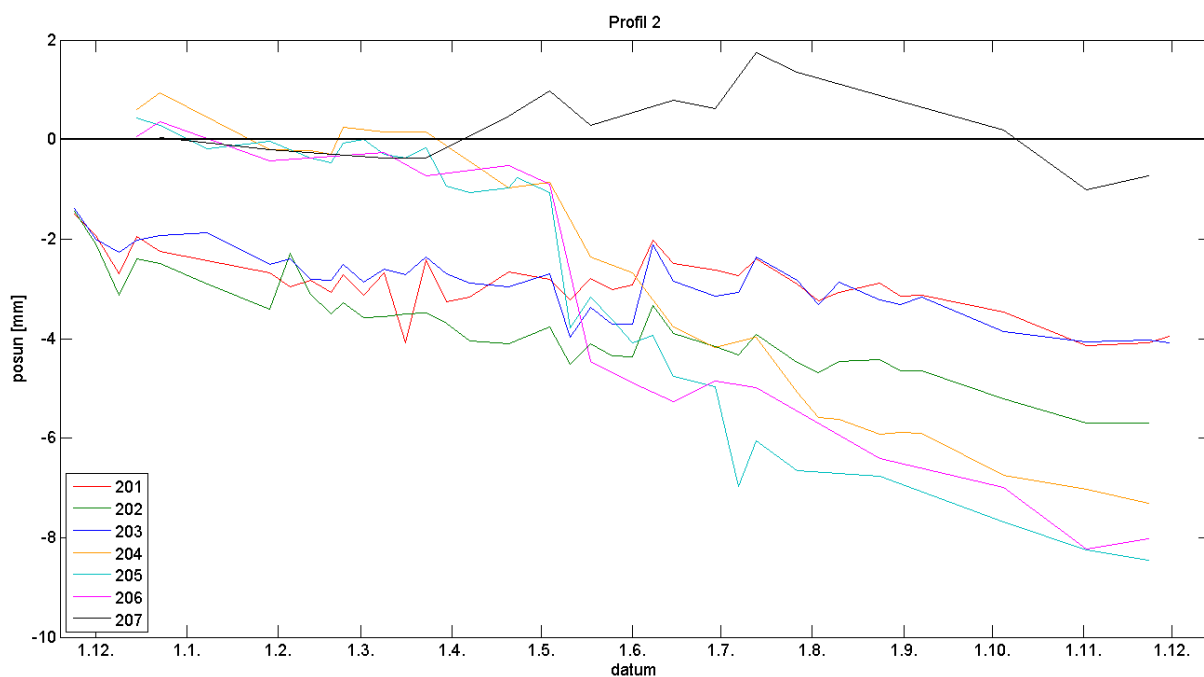
ČB	p [mm]	P_k [mm]	ČB	p [mm]	P_k [mm]	ČB	p [mm]	P_k [mm]
101	-3,87	0,16	304	-8,80	0,21	506	-0,91	0,16
102	-4,20	0,16	305	-9,22	0,17	507	-2,04	0,16
103	-3,78	0,17	306	-3,85	0,22	601	-2,06	0,19
104	-2,07	0,17	307	-0,98	0,22	602	-2,25	0,19
105	-1,98	0,22	401	-4,15	0,20	603	-2,81	0,19
106	-4,39	0,22	402	-7,04	0,21	604	-2,15	0,19
107	-1,36	0,23	403	-3,94	0,21	605	-0,55	0,19
201	-2,79	0,16	404	-9,35	0,19	606	0,03	0,14
202	-4,11	0,16	405	-17,47	0,20	607	-0,26	0,16
203	-3,37	0,18	406	-7,81	0,20	701	-1,19	0,21
204	-2,36	0,15	407	-1,30	0,23	702	-1,19	0,20
205	-3,16	0,19	501	-3,18	0,19	703	-1,43	0,20
206	-4,45	0,21	502	-3,48	0,19	704	-1,22	0,16
207	0,28	0,22	503	-3,25	0,19	705	-0,23	0,20
301	-4,95	0,19	504	-3,82	0,19	706	-1,17	0,23
302	-22,39	0,20	505	-5,76	0,19	707	-0,14	0,17
303	-3,13	0,23						

5.1 Grafy vývoje profilů

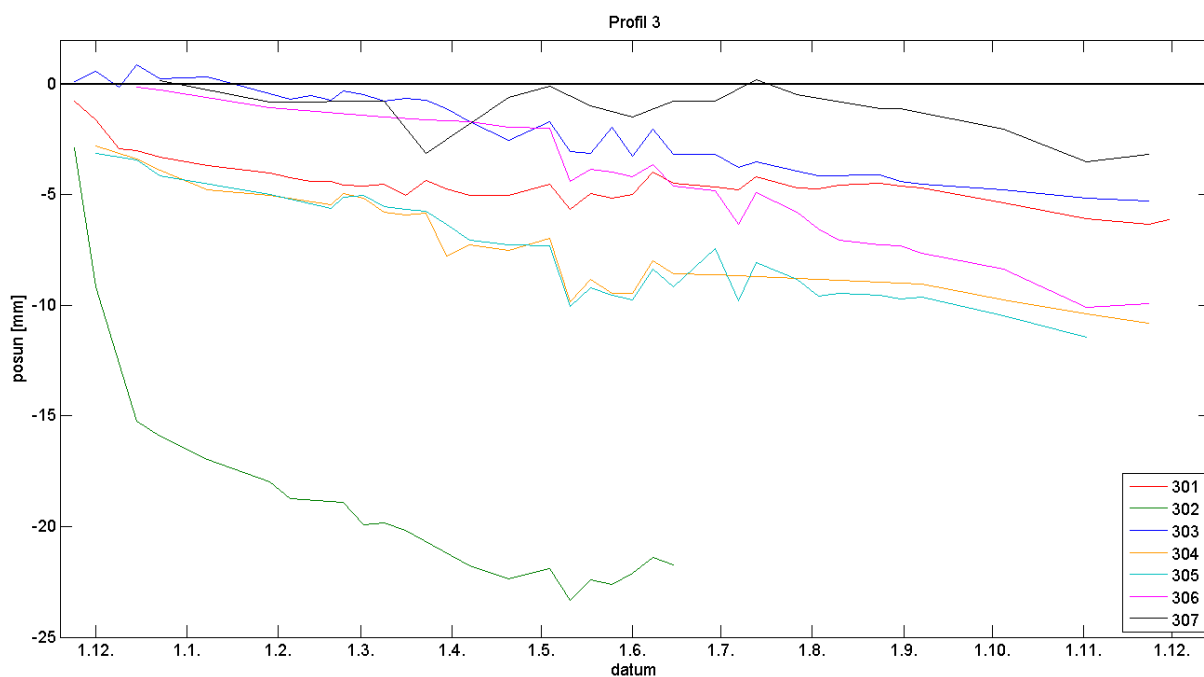
V následujících grafech je zobrazen vývoj vertikálních posunů bodů na sedmi profilech. Kvůli přehlednosti nebyla v grafech zobrazena prokazatelnost posunů bodů. Ta je zachycena v grafech zobrazujících vývoj jednotlivých bodů, které jsou přiloženy v digitálních přílohách. Vzhledem k výrazně vyšším hodnotám posunů u profilů 3 a 4 mají grafy pro tyto profily odlišné měřítko v ose posunů než ostatní grafy.



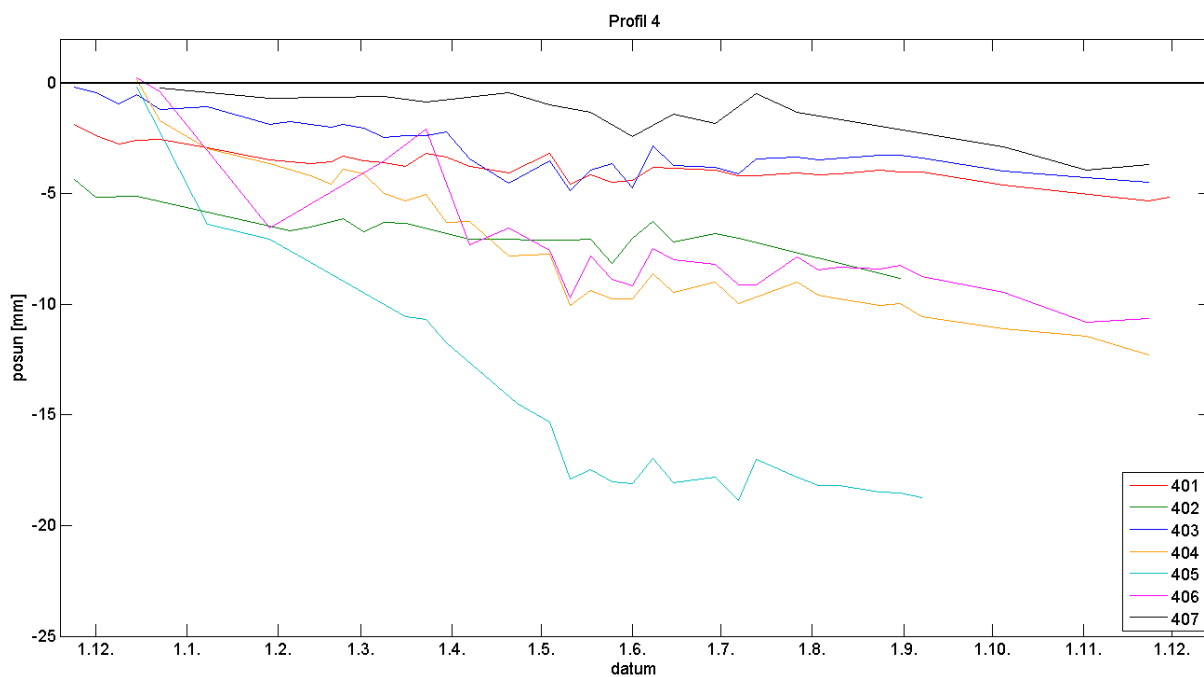
Graf 2: Vývoj posunů na profilu číslo 1



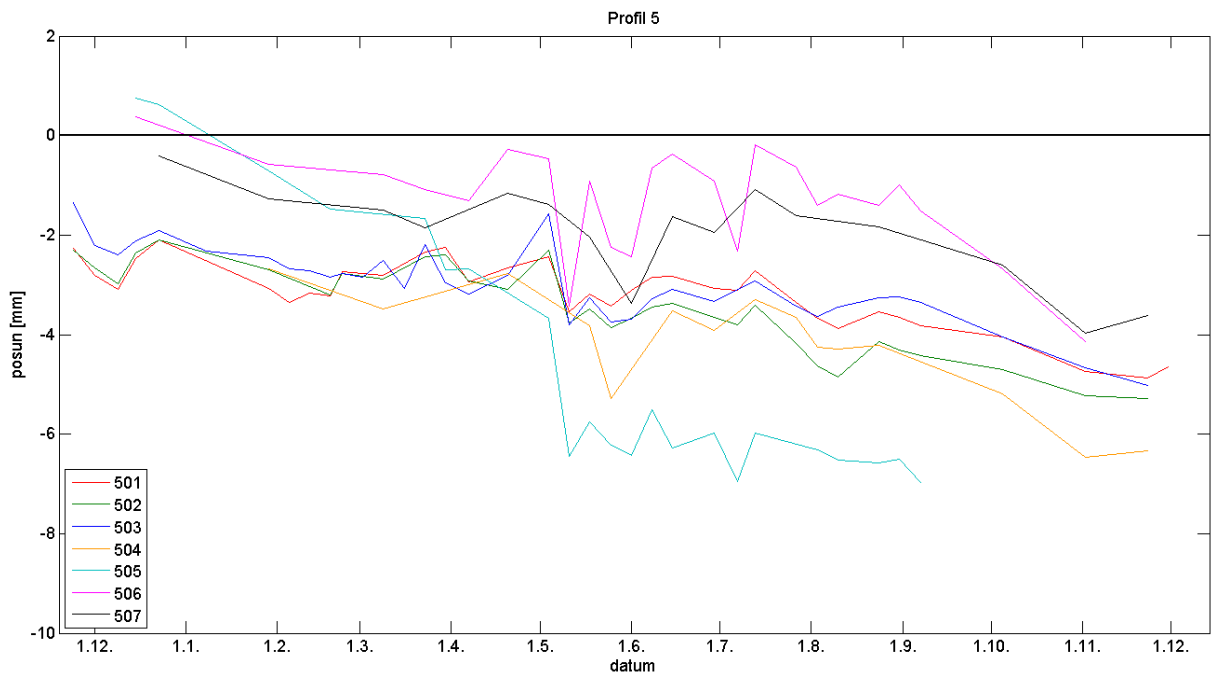
Graf 3: Vývoj posunů na profilu číslo 2



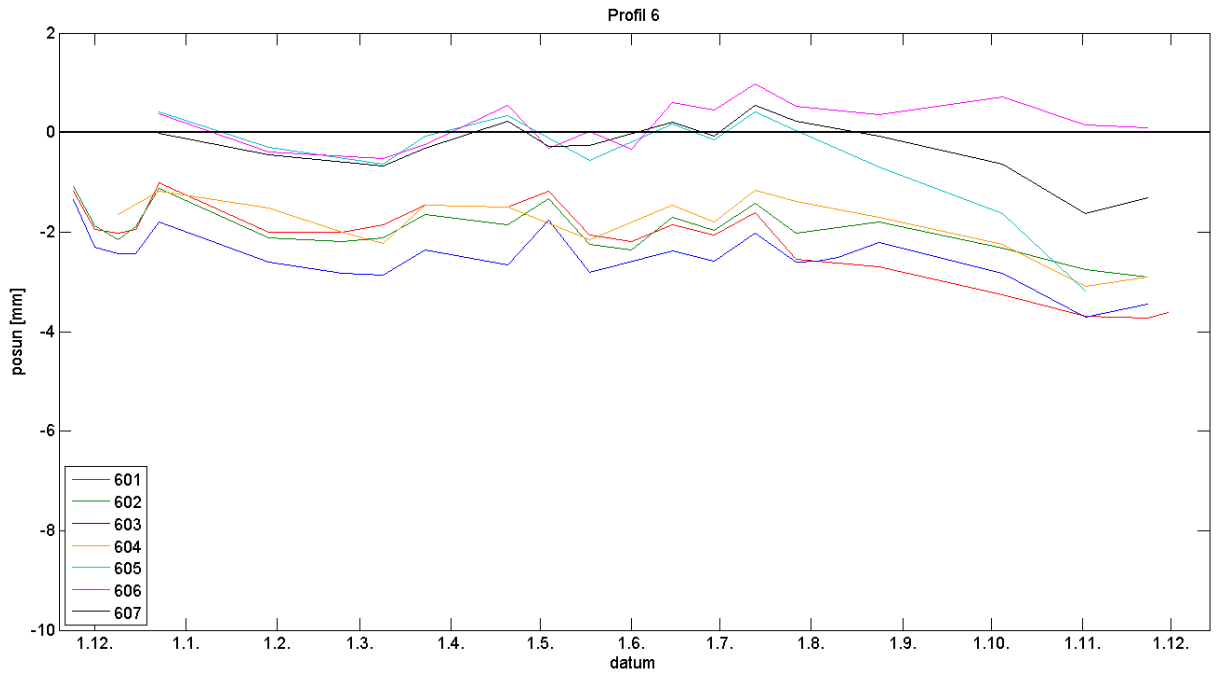
Graf 4: Vývoj posunů na profilu číslo 3



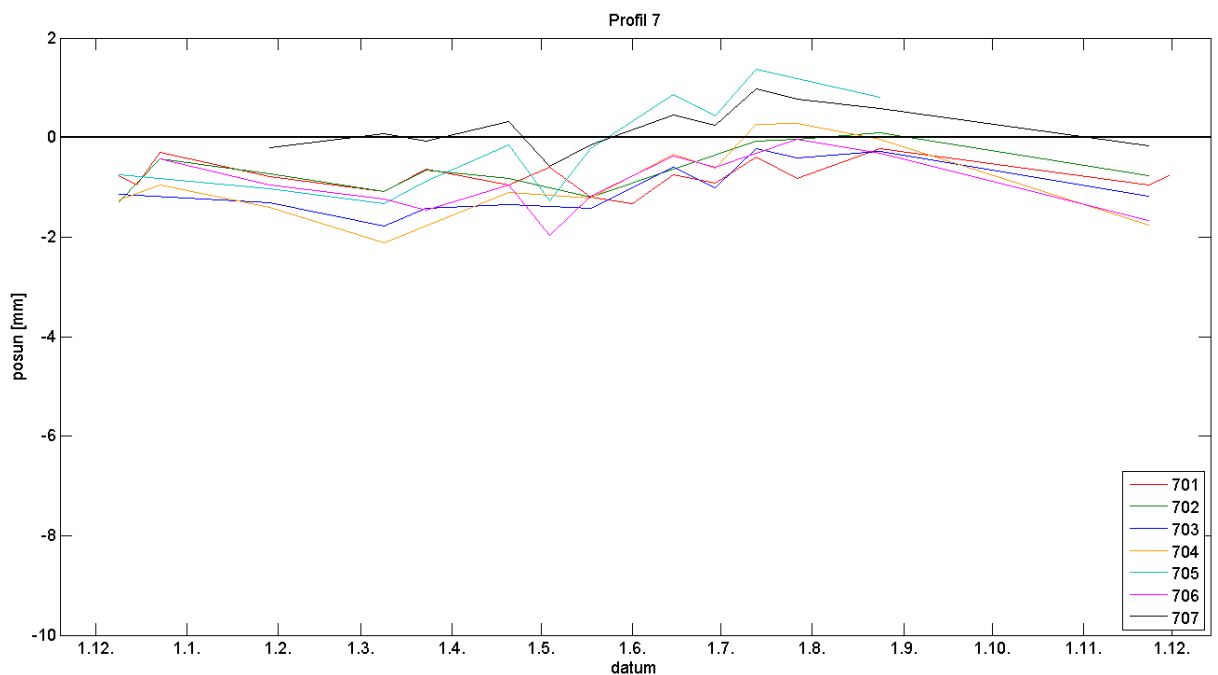
Graf 5: Vývoj posunů na profilu číslo 4



Graf 6: Vývoj posunů na profilu číslo 5



Graf 7: Vývoj posunů na profilu číslo 6



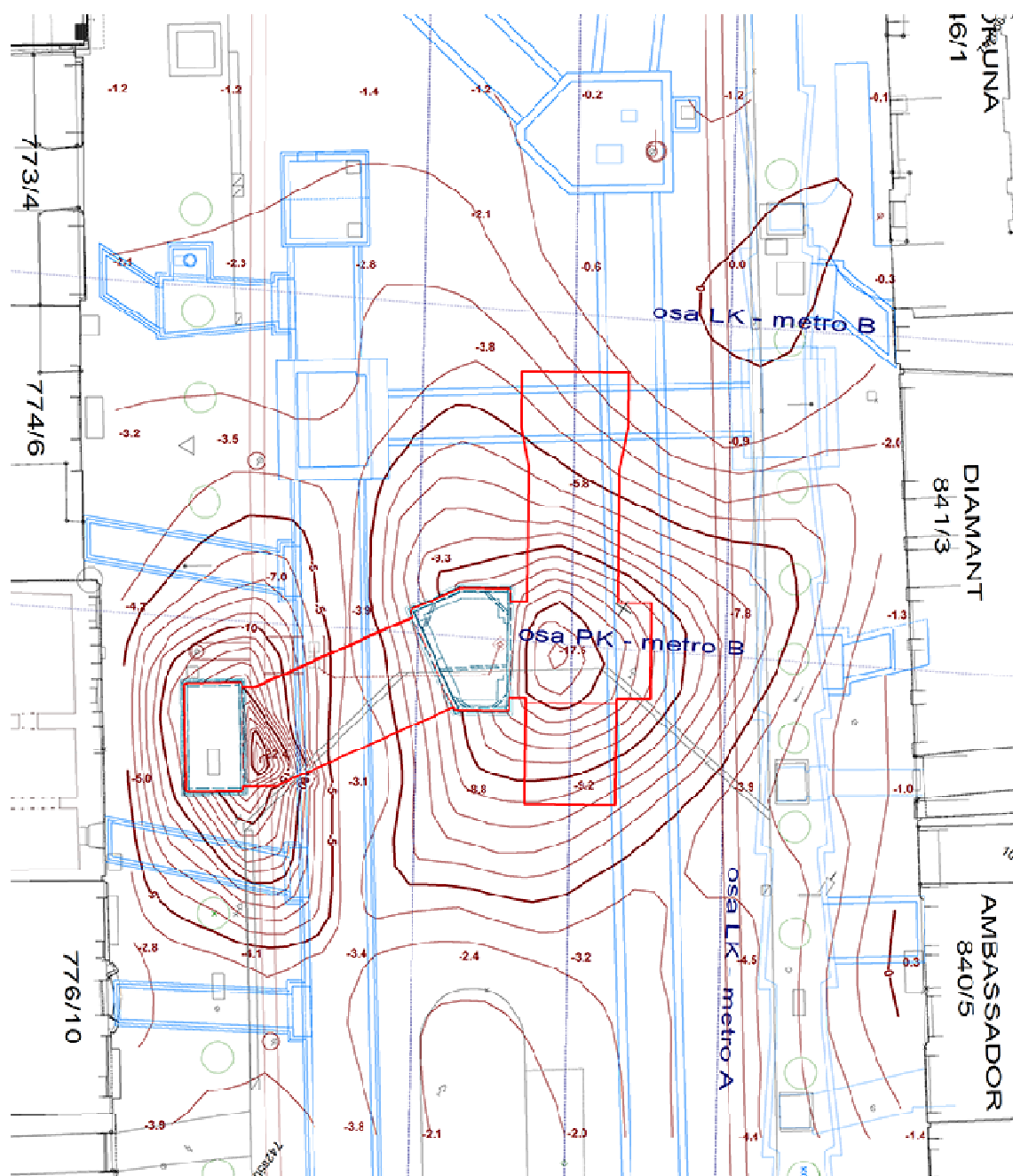
Graf 8: Vývoj posunů na profilu číslo 7

Z grafů je zřejmé, že k největším poklesům docházelo ve středu sledované sítě bodů, tedy v oblasti, ve které se nejvíce soustředila pracovní činnost. Dalším faktorem mohlo být i to, že se zde nacházelo velké množství zařízení staveniště, které oblast zatěžovalo. Naopak u bodů v krajních profilech došlo k mnohem menším posunům, což ukazuje, že vliv podzemního díla na plochu náměstí byl na okraji sledované oblasti mnohem menší. K absolutně největším poklesům došlo u bodů číslo 302 a 405, které se oba nacházely v těsné blízkosti hloubených šachet a oba byly během výstavby zničeny. Největší posun byl zaznamenán u bodu 302. Zde byl 11. 5. 2015 zjištěn pokles proti nulté etapě 23,33 mm. U bodu 405 byl největší pokles zjištěn 7. 7. 2015. Při měření v tento den dosáhla velikost poklesu hodnoty 18,88 mm proti nulté etapě.

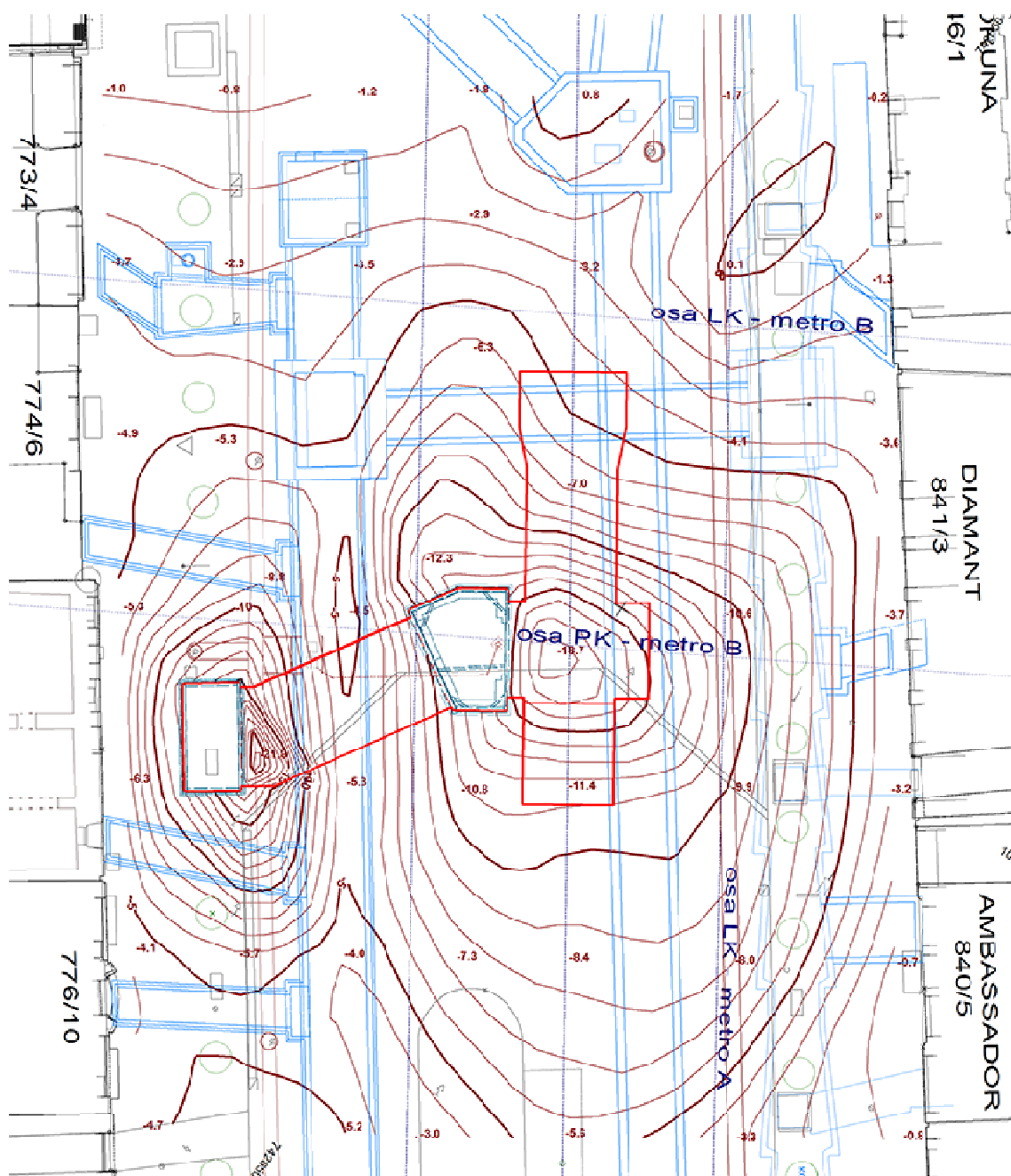


5.2 Vývoj poklesové kotliny

Jako další výstup byly zpracovány vrstevnicové plány poklesů zkoumané oblasti. Pro tyto plány byly zvoleny etapy, v nichž byly měřeny všechny nebo alespoň podstatná většina sledovaných bodů. Celkem bylo zpracováno dvanáct plánů, mezi nimiž je většinou interval zhruba jeden měsíc. Posuny neměřených bodů byly převzaty z nejbližší předchozí etapy, ve které byly tyto body měřeny. Podkladová data s polohopisem a všechny náležitosti výkresu byly převzaty ze vzorového výkresu od firmy INSET s. r. o. Jednotkami vertikálních posunů ve vrstevnicových plánech jsou milimetry. Samotné vrstevnicové plány ve formátu A3 a měřítku 1:250 jsou součástí digitálních příloh diplomové práce. Dále jsou pro ilustraci přiloženy obrázky ze tří etap ve vhodném měřítku. Zde byla vybrána první zhruba kompletní etapa vypočtených posunů, dále etapa přibližně ze středu sledovaného období, kdy se začalo s ražením z prostoru křížení obou podzemních chodeb, a závěrečná etapa měření. Kompletní soubor obrázků ze všech vyhotovených etap je součástí tištěných příloh (s. 39 – 50).



Obrázek 4: Poklesová kotlina k 18. 5. 2015



Obrázek 5: Poklesová kotlina k 23. 11. 2015



Z obrázků je patrné, že vývoj poklesové kotliny odpovídal postupu stavby. Už na začátku monitoringu byl nejvýraznější pokles zjištěn u bodu 302, který se nacházel v těsné blízkosti šachty dnešního bezbariérového výtahu hloubené od konce října 2014. Tato šachta byla v projektové dokumentaci označena Š1 (viz Obrázek 1) a při pohledu od Národního muzea se nacházela na levé straně Václavského náměstí před budovou Adamovy lékárny. Celá tato strana náměstí vykazovala již od počátku poklesy, jejichž velikost se plynule zmenšovala s rostoucí vzdáleností od šachty. Poklesy zaznamenané v okolí dočasné těžní šachty ve středu náměstí, označené Š2, byly zpočátku menší a projevíly se především v oblasti od této šachty směrem k muzeu. Na straně směrem od muzea se pravděpodobně uplatnil vliv kolektoru K2, jehož osa je kolmá na osu náměstí, který tuto oblast podpíral a tak zde po celou dobu stavby docházelo k menším poklesům než na opačné straně šachty. Vliv ražby chodby F1, spojující obě šachty, byl zčásti odstíněn kolektorem K1, jehož osa kříží osu chodby. Nejspíš proto nebyly poklesy nad touto chodbou po dobu trvání stavby tolik výrazné jako v nejbližším okolí, ale i přesto dosahovaly na konci dubna, kdy byla tato chodba dokončena, velikostí kolem 5 mm.

S postupující ražbou chodby F1 byly stále výraznější poklesy v okolí šachty Š2. Toto se ještě urychlilo po započetí ražby chodby F2 oběma stryňa konci dubna. Přímo nad křížením těchto chodeb se nacházel bod 405, který po začátku ražby druhé chodby klesl za půl měsíce přibližně o 5 mm. V této oblasti lze pozorovat, že poklesy se dále projevily především nad oběma raženými větvemi chodby F2. Tento vývoj zpomaleně pokračoval i po ukončení ražby na konci července a projevoval se hlavně směrem k Národnímu muzeu. Na druhé straně byl pravděpodobně částečně omezen již zmíněným kolektorem K2.

U šachty Š1 se poklesy po prudkém růstu po začátku monitoringu rozšiřovaly již mírněji a především v prostoru mezi kolektorem K1 a sousedními budovami. K největšímu poklesu docházelo na bodě 302 v blízkosti šachty. Ten byl zhruba v polovině června zničen a v plánech k dalším etapám je kvůli zachování charakteru oblasti ponechán pokles z poslední měřené etapy.

Pro celou poklesovou kotlinu platí, že prudce reagovala na vývoj hloubení šachet a ražbu chodeb a po jejich skončení se poklesy postupně zpomalovaly a rozšiřovaly do větší oblasti.



Závěr

V diplomové práci byla opětovně zpracována část geotechnického monitoringu zakázky Bezbariérové zpřístupnění stanice metra Můstek trasy A i B. Předmětem zájmu byl monitoring poklesů plochy Václavského náměstí v okolí budovaného díla prováděný metodou geometrické nivelace ze středu. Měření realizovala firma INSET s. r. o., od které byla převzata naměřená data.

Pro ověření dodržení požadované přesnosti byl proveden rozbor přesnosti před měřením kompletní měřené sítě bodů. Za tímto účelem byla experimentálně zjištěna směrodatná odchylka čtení na lati použitého přístroje pro krátké záměry. Z rozboru přesnosti vyplývá, že použitý přístroj a metoda měření svojí přesností překračovaly požadavky uvedené v projektu.

Dále bylo zpracováno 40 etap měření nivelační sítě. Měření byla vyrovnána metodou nejmenších čtverců a přesnost jednotlivých měřených převýšení byla určena pomocí koeficientů získaných při experimentálním zjištění přesnosti přístroje. Z naměřených výšek v jednotlivých etapách byly vypočteny vertikální posuny sledovaných bodů vůči první měřené etapě a jejich směrodatné odchylky. Ve většině případů byly zjištěné posuny prokazatelné s pravděpodobností 95 %.

Byly vyhotoveny grafy zachycující vývoj vertikálních posunů na jednotlivých profilech a vrstevnicové plány zachycující vývoj oblasti ve dvanácti etapách. Součástí digitálních příloh jsou tabulky s podrobnými výsledky výpočtů, grafy zobrazující vývoj posunů pro jednotlivé body včetně jejich prokazatelnosti a vrstevnicové plány poklesové kotliny v měřítku 1:250 a formátu A3.



Použité zdroje

- [1] VINTER, Martin a Martin ČERMÁK. *Bezbariérové zpřístupnění stanice metra Můstek A/B - komplexní hydro a geomonitoring, pasportizace, stavebně technický průzkum: Závěrečné vyhodnocení monitoringu*. 2016.
- [2] *Trimble DiNi Digital Level* [online]. 2013 [cit. 2017-03-15]. Dostupné z: http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-240688/022543-327C_DiNi2007_DS_0713_LR.pdf
- [3] Braun, J. – Štroner, M. – Třasák, P.: Experimentální určení přesnosti záměry při nivelaci. *Geodetický a kartografický obzor*. 2012, roč. 58/100, č. 10, s. 226-236. ISSN 0016-7096.
- [4] ČSN 73 0405: *Měření posunů stavebních objektů*. Český normalizační institut, 1997.
- [5] *GNU Gama* [online]. [cit. 2017-04-25]. Dostupné z: <https://www.gnu.org/software/gama/>
- [6] Hampacher, M. – Štroner, M.: *Zpracování a analýza měření v inženýrské geodézii*. 2. vyd. Praha: Česká technika – nakladatelství ČVUT, ČVUT v Praze, 2015. 336 s. ISBN 978-80-01-05843-5.



Seznam obrázků

Obrázek 1: Schéma budované stavby včetně okolních budov, kanalizace a kolektorů (K1 – K3).....	10
Obrázek 2: Sledovaná výšková síť a budovaná stavba.....	12
Obrázek 3: Poklesová kotlina k 23. 12. 2014.....	30
Obrázek 4: Poklesová kotlina k 18. 5. 2015.....	31
Obrázek 5: Poklesová kotlina k 23. 11. 2015.....	32

Seznam grafů

Graf 1: Porovnání výsledků experimentu s hodnotami od výrobce	16
Graf 2: Vývoj posunů na profilu číslo 1.....	25
Graf 3: Vývoj posunů na profilu číslo 2.....	25
Graf 4: Vývoj posunů na profilu číslo 3.....	26
Graf 5: Vývoj posunů na profilu číslo 4.....	26
Graf 6: Vývoj posunů na profilu číslo 5.....	27
Graf 7: Vývoj posunů na profilu číslo 6.....	27
Graf 8: Vývoj posunů na profilu číslo 7.....	28

Seznam tabulek

Tabulka 1: Směrodatné odchylky převýšení zjištěné experimentem a přepočtené na 1 kilometr	16
Tabulka 2: Hodnoty posunů (p) v etapě měřené 18. 5. 2015 vůči nulté etapě a velikosti absolutních hodnot prokazatelných posunů v této etapě (P_k).....	24



Seznam příloh

Tištěné přílohy

- Schéma průběhu měření kompletní etapy z 18. 5. 2015
- Obrázky vývoje poklesové kotliny ve dvanácti etapách

Digitální přílohy

- Výsledky výpočtů v tabulkách *tabulky.xlsx*
- Grafy posunů bodů *grafy_jednotlive_body.pdf*
- Grafy posunů profilů *grafy_profilu.pdf*
- Vrstevnicové plány 12 etap *e141223.pdf, ..., e151123.pdf*

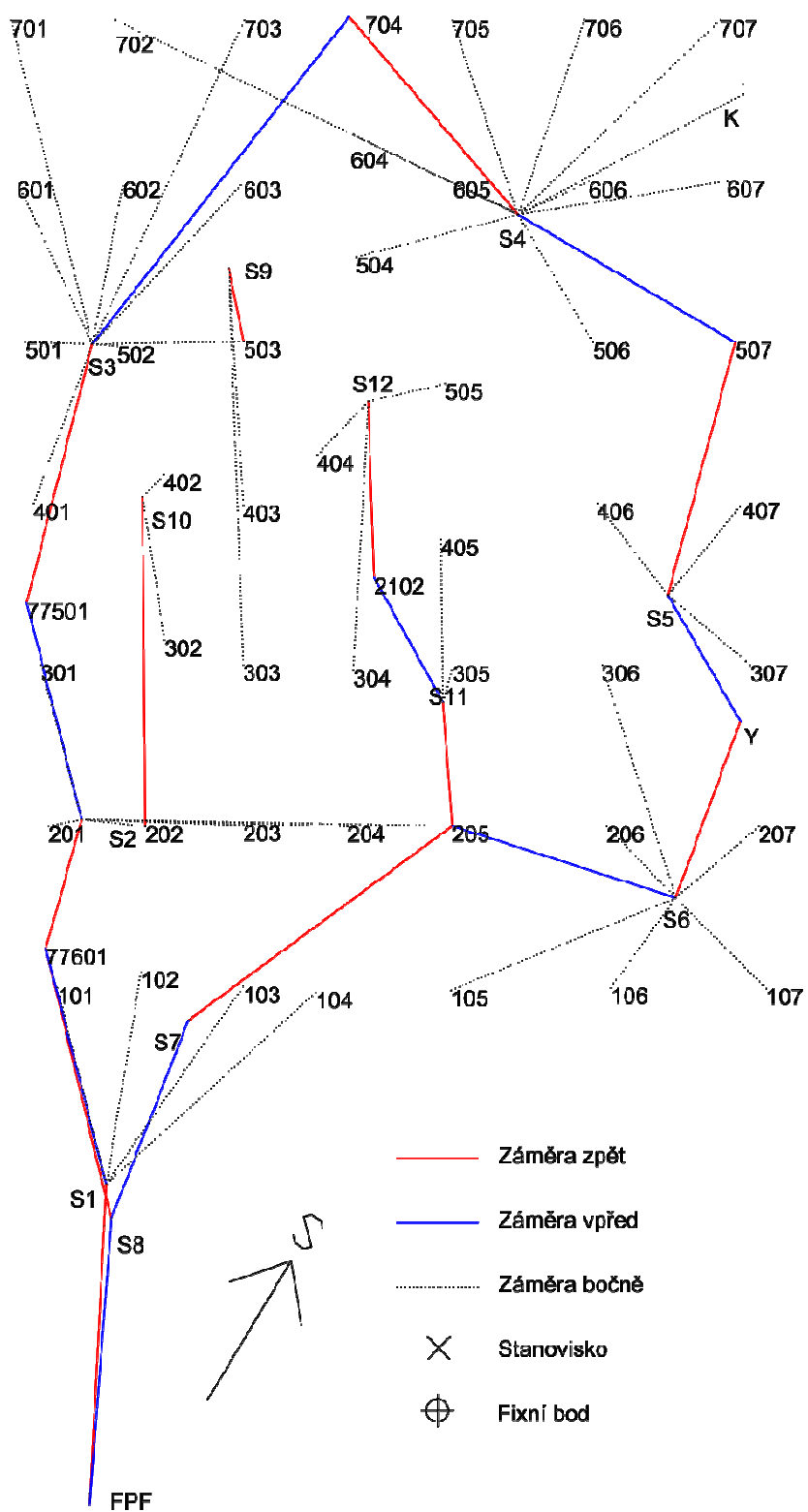
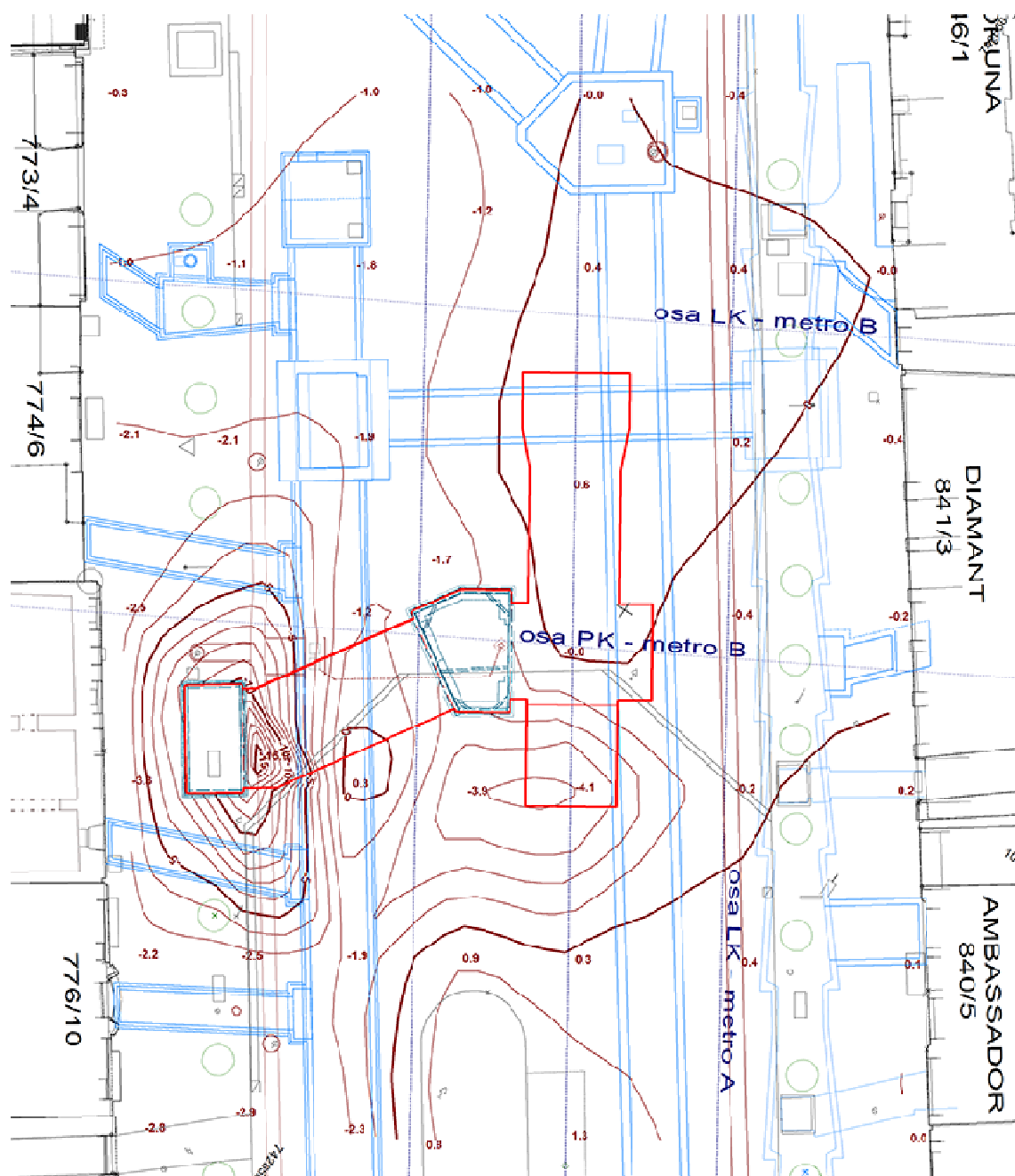
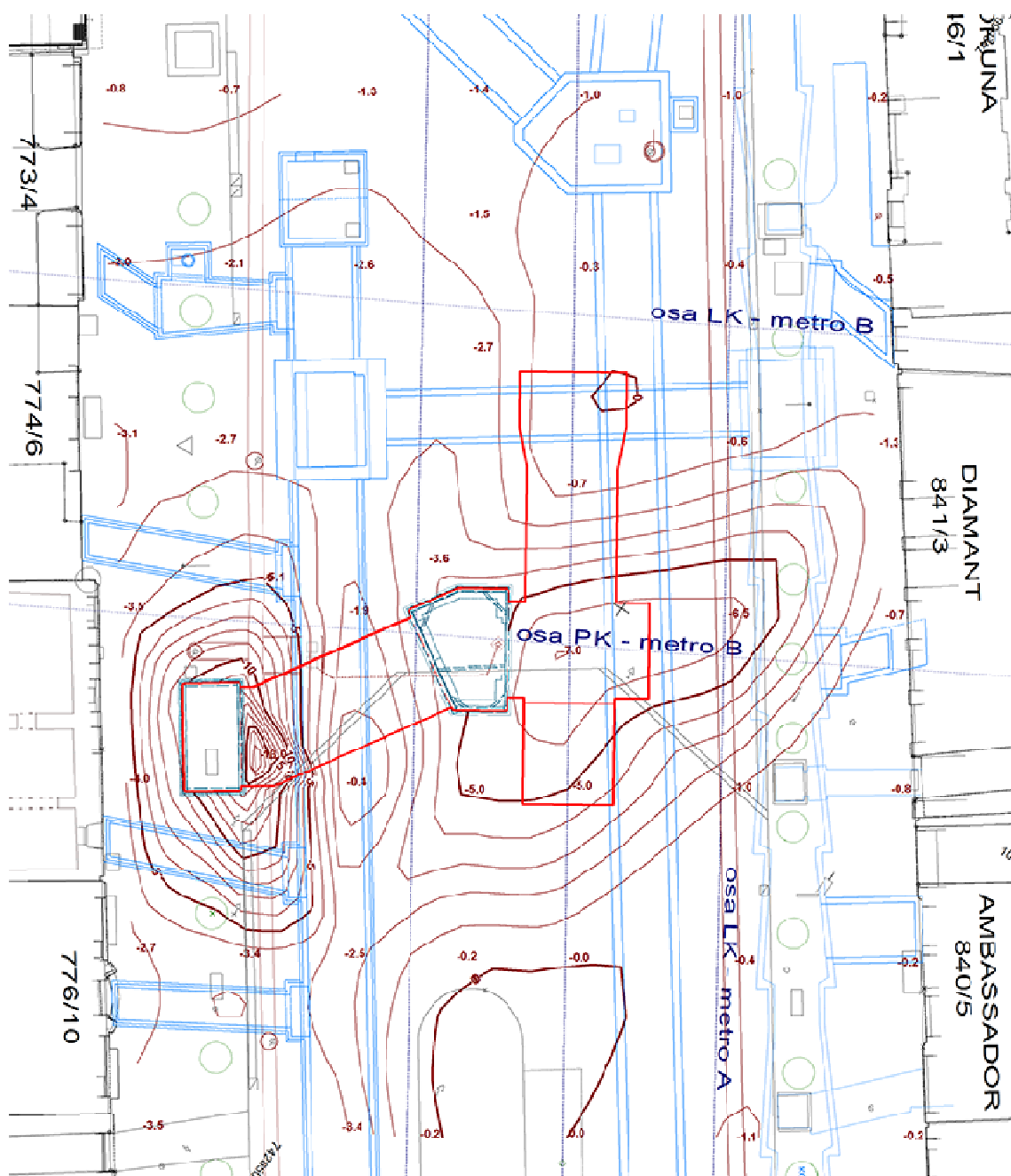


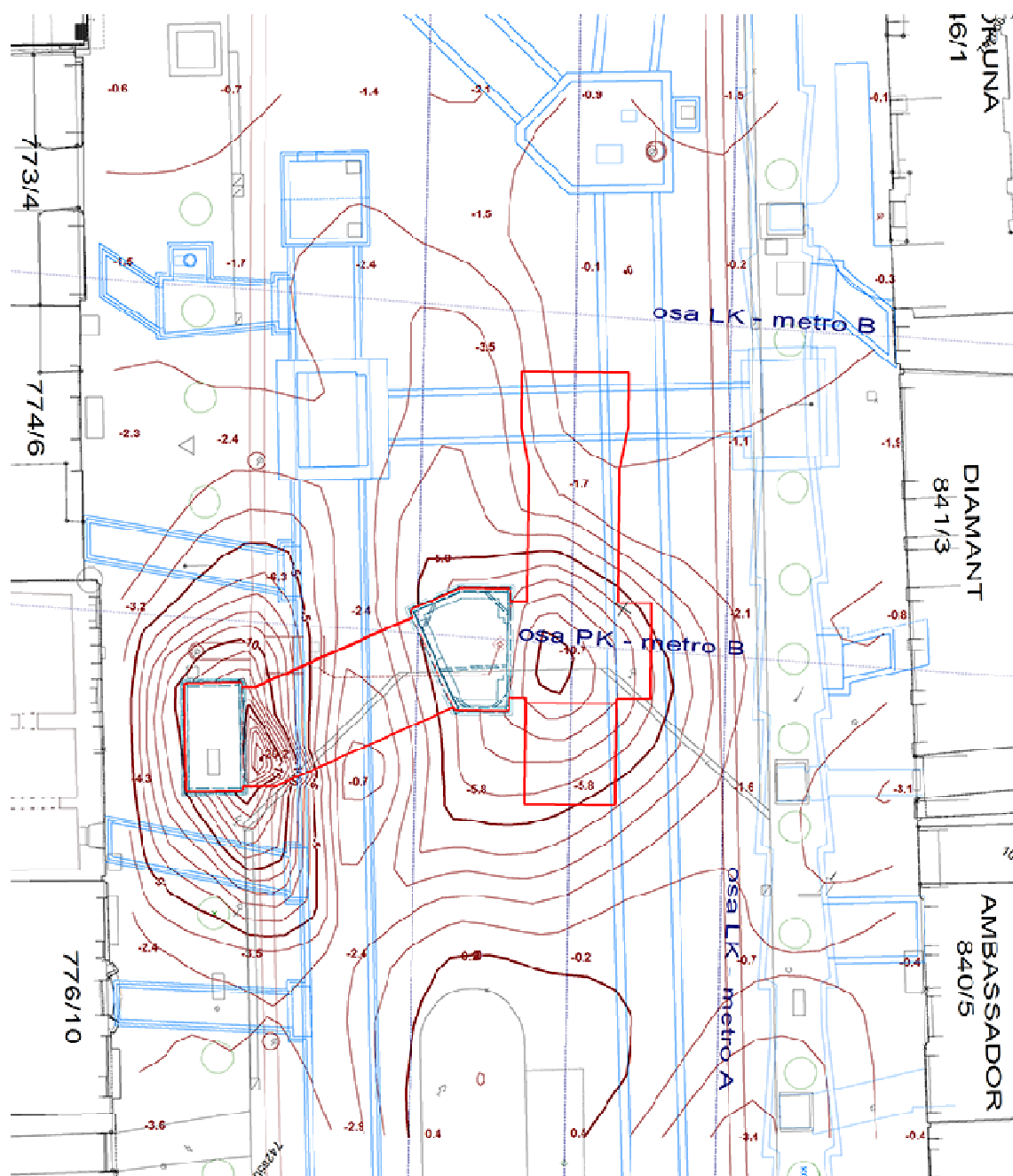
Schéma průběhu měření kompletní etapy z 18. 5. 2015



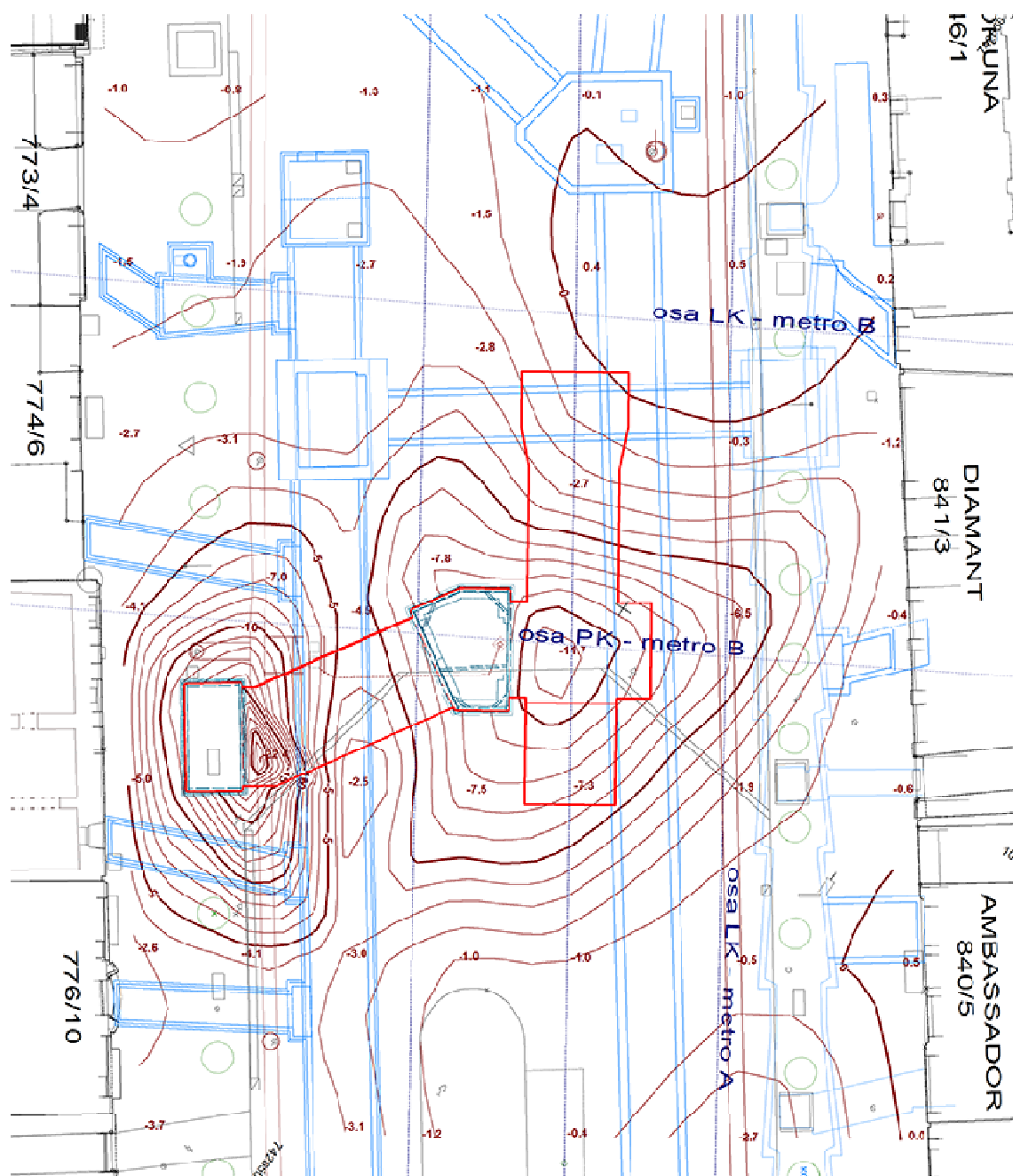
Poklesová kotlina k 23. 12. 2014



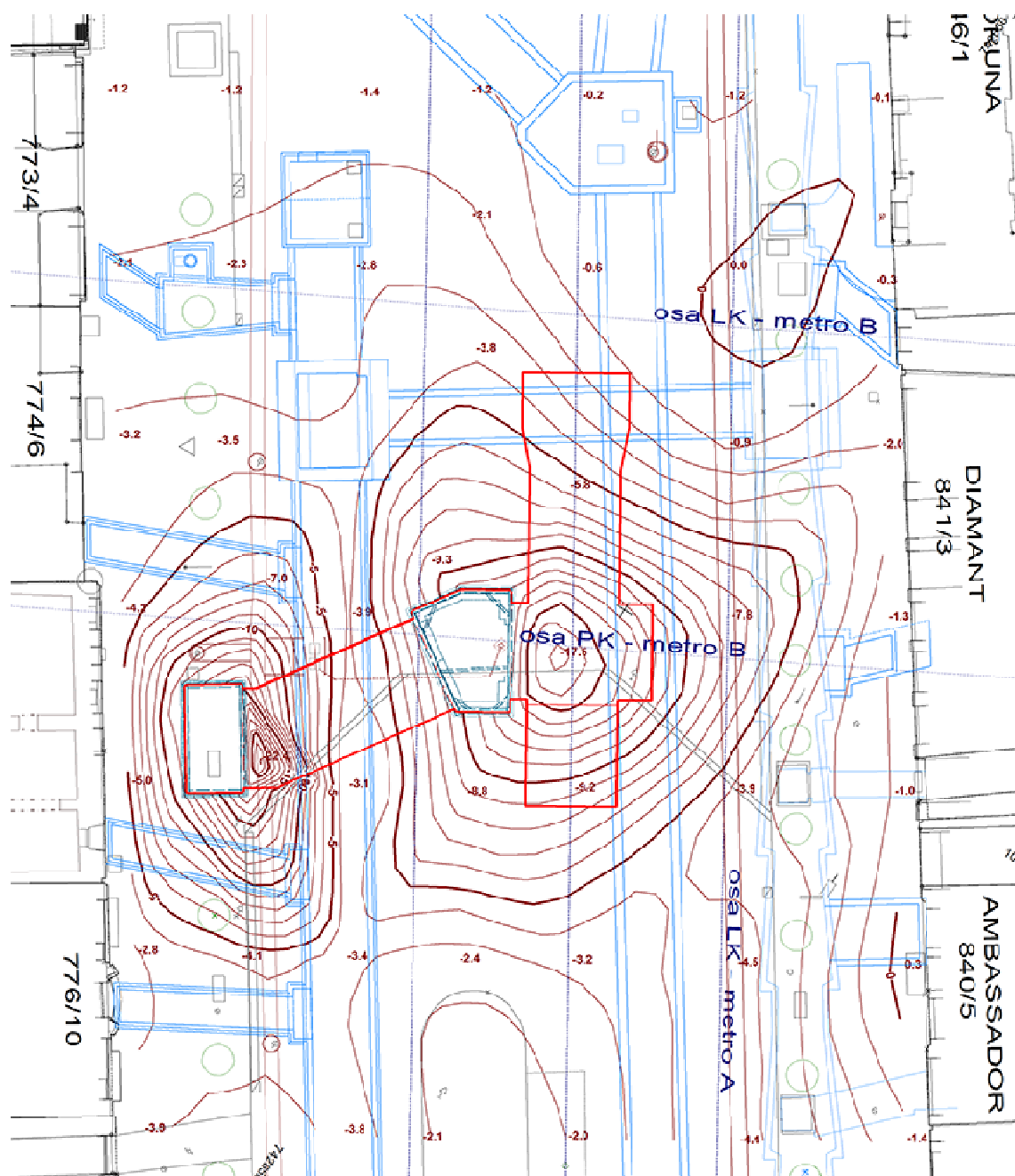
Poklesová kotlina k 29. 1. 2015



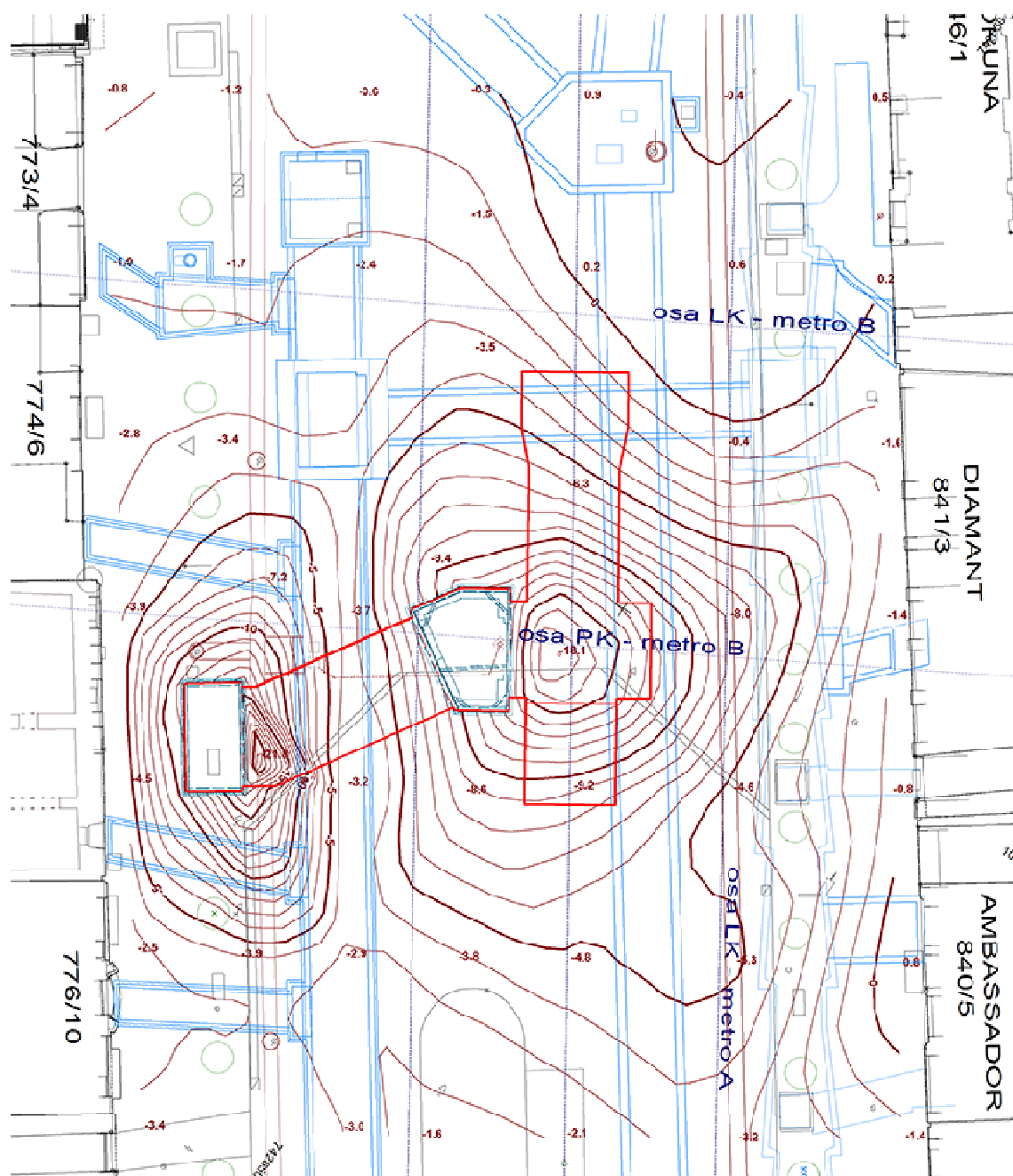
Poklesová kotlina k 23. 3. 2015



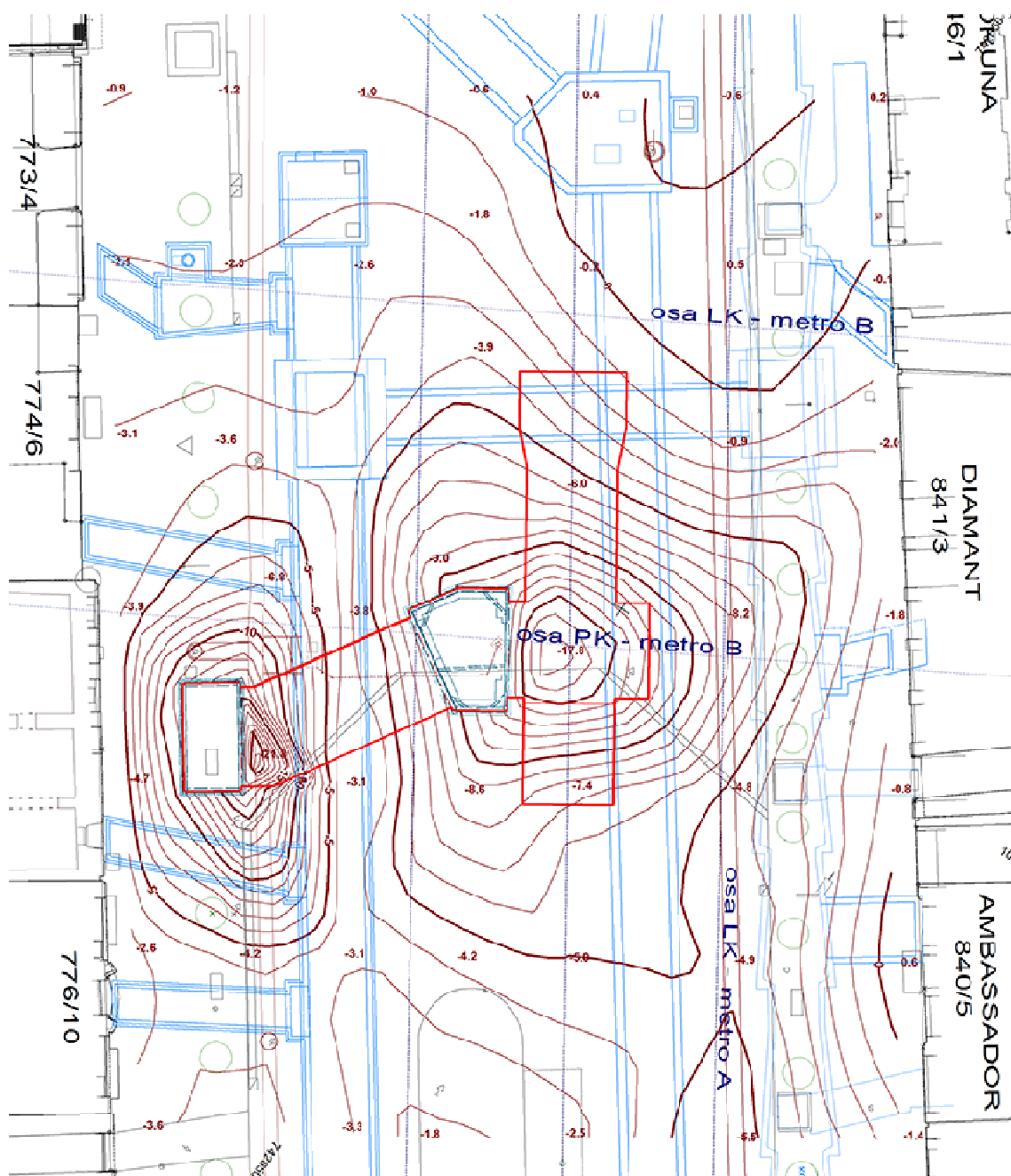
Poklesová kotlina k 20. 4. 2015



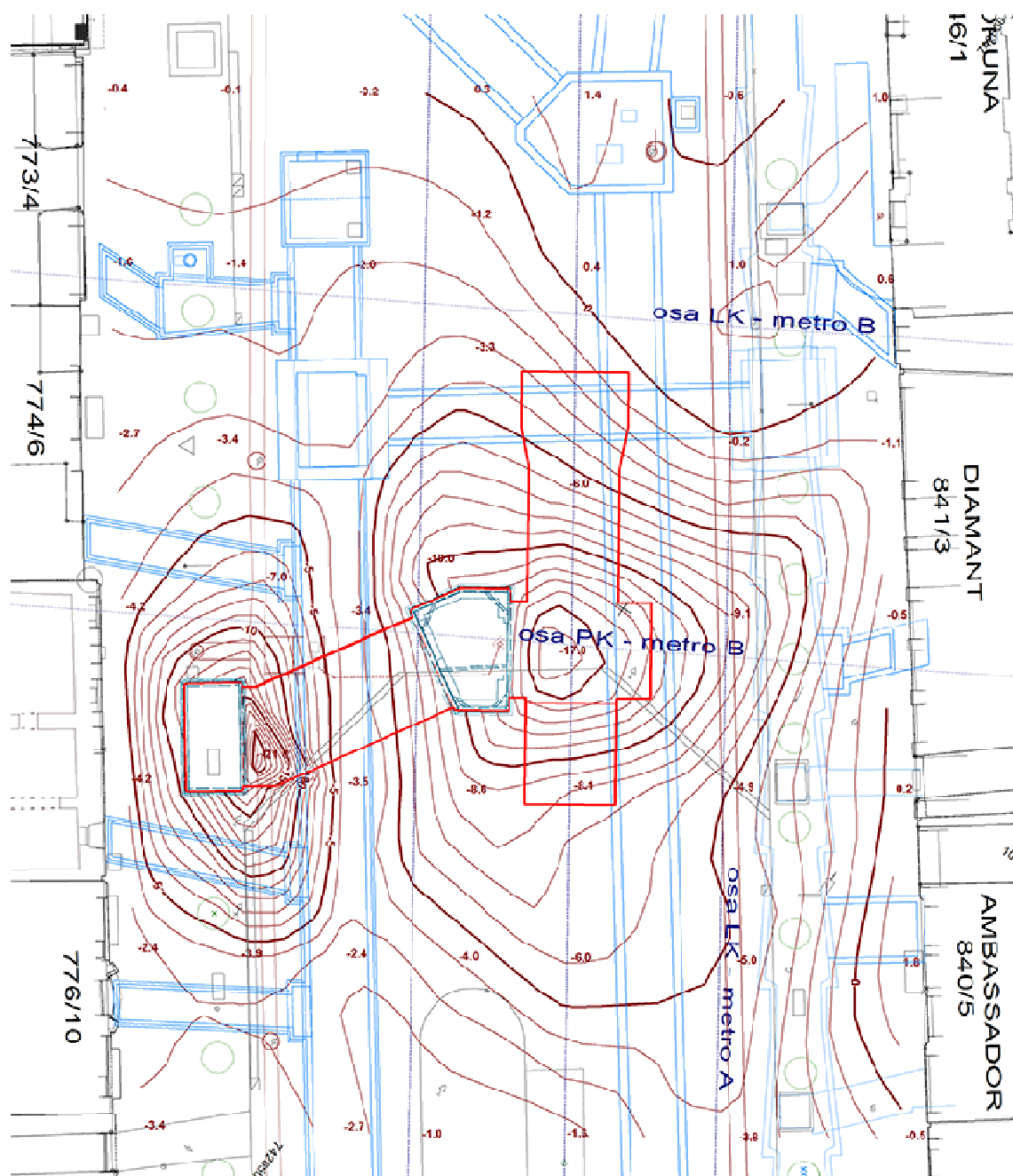
Poklesová kotlina k 18. 5. 2015



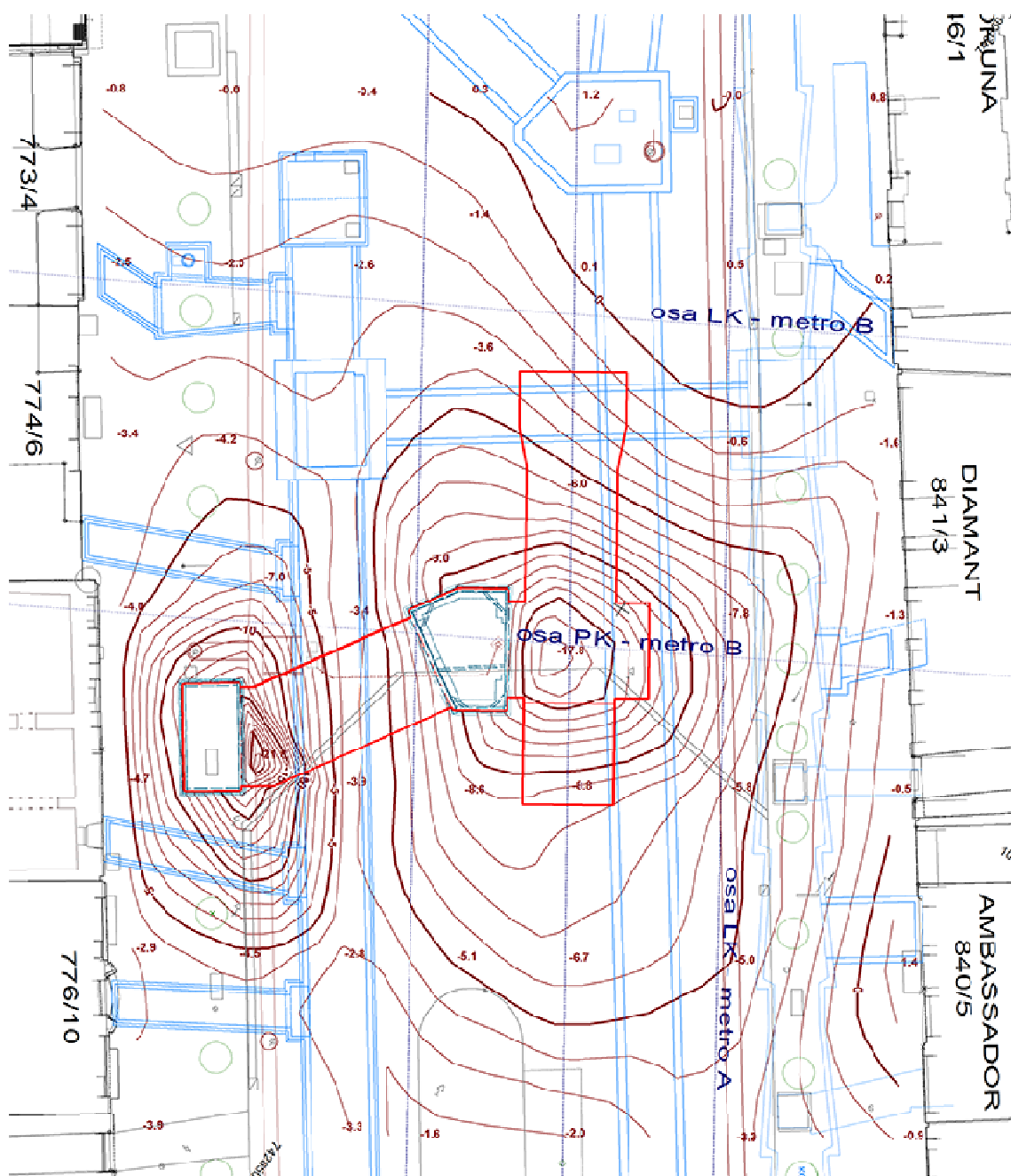
Poklesová kotlina k 15. 6. 2015



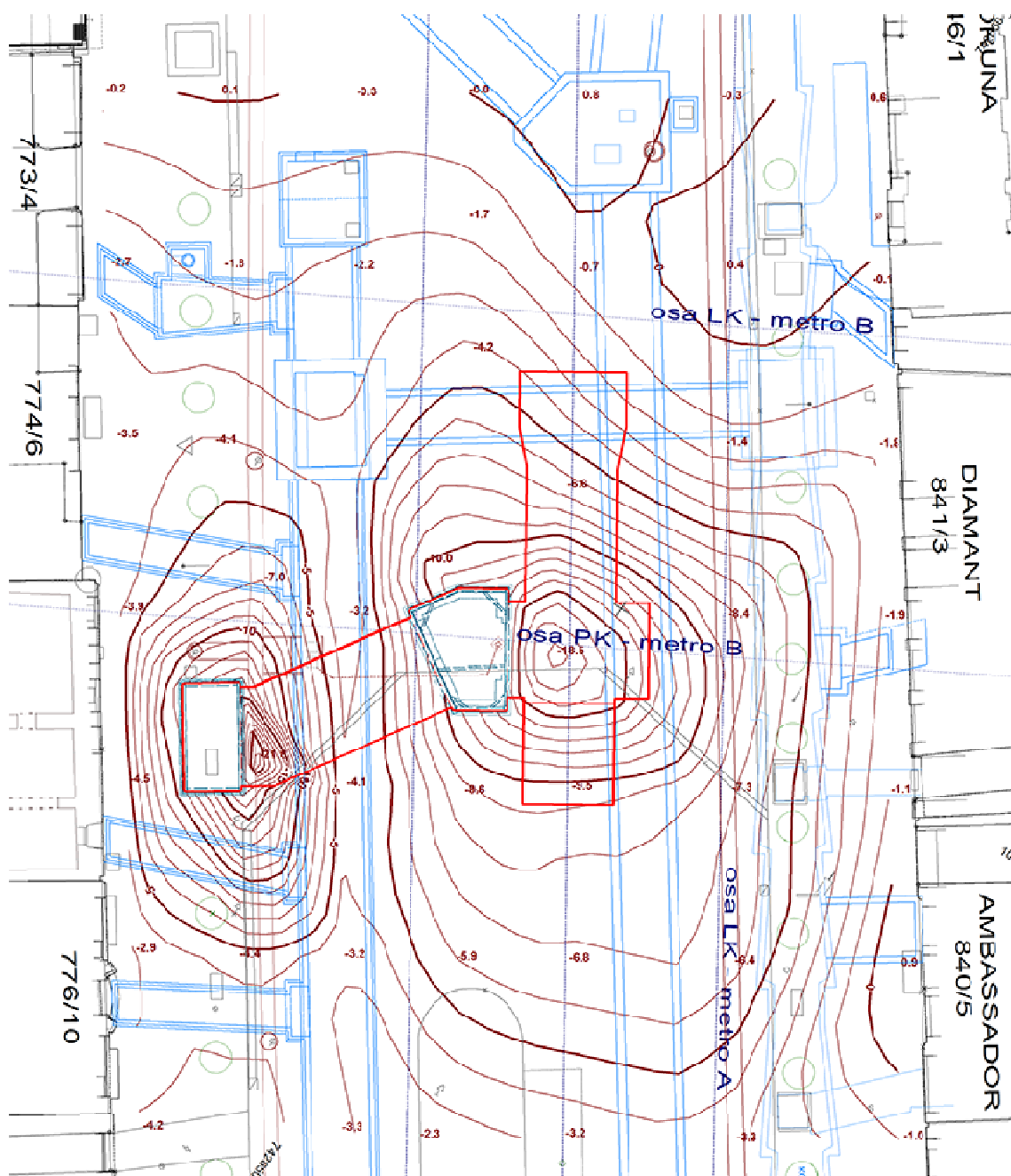
Poklesová kotlina k 29. 6. 2015



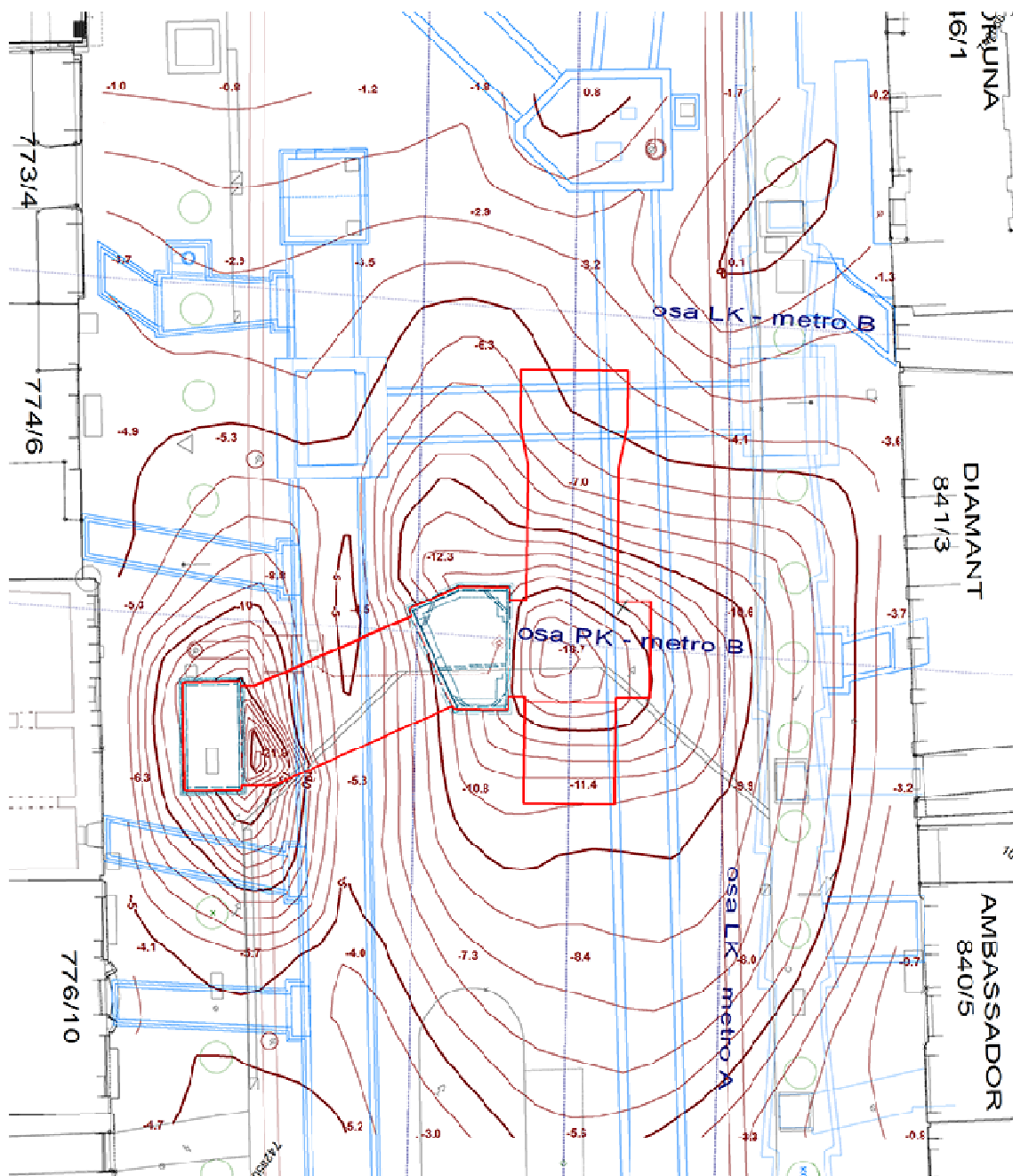
Poklesová kotlina k 13. 7. 2015



Poklesová kotlina k 27. 7. 2015



Poklesová kotlina k 24. 8. 2015



Poklesová kotlina k 23. 11. 2015