

Shrnutí výsledků opakovaných nivelačních měření na Geodetické observatoři Pecný

Doc. Ing. Jakub Kostecký, Ph.D.,
Výzkumný ústav geodetický
topografický a kartografický, v. v. i.

Abstrakt

Článek se zabývá shrnutím opakovaných nivelačních měření na Geodetické observatoři Pecný vykonaných jak vlastními silami, tak měření Zeměměřického úřadu v Praze v období 2001 až 2023. Analyzovány jsou časové řady rozdílů výšek permanentních stanic GNSS GOPE a GOP6, absolutních tíhových bodů č. 80, 80.10, 80.20 a dalších nivelačních bodů, včetně základního nivelačního bodu XII Pecný, který je používán jako výchozí. Výsledky neprokázaly žádný systematický posun sledovaných bodů. To je důležitý předpoklad pro kombinovanou analýzu časových řad souřadnic z permanentních stanic a časových řad tíhových zrychlení z absolutních tíhových bodů.

Summary of the Results of Repeated Levelling Measurements at the Geodetic Observatory Pecný

Abstract

The article deals with a summary of repeated levelling measurements at the Geodetic Observatory Pecný, carried out both by our own activities and by the Land Survey Office in Prague in the period from 2001 to 2023. Time series of height differences of permanent GNSS stations GOPE and GOP6, absolute gravity stations No. 80, 80.10, 80.20 and other levelling benchmarks, including the fundamental levelling benchmark XII Pecný, which is used as the fixed benchmark, are analysed. The results did not show any systematic shift of the monitored stations. This is an important prerequisite for the combined analysis of time series of coordinates from permanent stations and time series of gravitational accelerations from absolute gravity stations.

Keywords: repeated levelling, time series of heights, permanent station GNSS, absolute gravity station

1. Úvod

Geodetická observatoř (GO) Pecný je experimentální pracoviště výzkumného útvaru geodézie a geodynamiky Výzkumného ústavu geodetického, topografického a kartografického, v. v. i. Zaměřením výzkumného útvaru je především oblast vyšší, fyzikální a kosmické geodézie a geodetické základy.

Nedílnou součástí aktivit je zapojení do mezinárodních geodetických struktur, zejména do aktivit Mezinárodní geodetické asociace (International Association of Geodesy, IAG), jejích služeb pro Globální navigační družicové systémy (GNSS), tj. Mezinárodní služby GNSS (International GNSS Service, IGS), služby pro systém DORIS (Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite), tj. Mezinárodní služby DORIS (International DORIS Service, IDS), a v oblasti tíhového zrychlení do Mezinárodní služby pro zemské slapy a geodynamiku (International Geodynamic and Earth Tides Service, IGETS) a Mezinárodního gravimetrického byra (International Gravimetric Bureau, BGI). Všechny zmíněné služby jsou součástí Globálního geodetického observačního systému (Global Geodetic Observing System, GGOS) [1].

Na celoevropské úrovni je observatoř zapojena do aktivity Síť permanentních stanic EUREF (EUREF Permanent Network, EPN) a projektu Evropské kombinované geodetické sítě (European Combined Geodetic Network, ECGN) [2]. Na národní úrovni je to zapojení do Státní sítě permanentních stanic pro přesné určování polohy (CZEPOS) a Základní geodynamické sítě (ZGS) České republiky (ČR).

Mezi aktivity patří zajišťování služeb datových a analytických center pro shromažďování a zpracování dat a publikaci produktů a dále zajišťování získávání dat – ob-

servací. V oblasti GNSS je to provoz permanentních stanic GOPE a GOP6, které jsou součástí sledovací sítě IGS i EPN a národní sítě CZEPOS. V oblasti gravimetrie je to měření absolutními gravimetry a kontinuální sledování změn tíhového zrychlení pomocí supravodivého gravimetru.

Aktivity observatoře v oblasti geodetických základů přispívají k tvorbě a udržování Mezinárodního terestrického referenčního systému (International Terrestrial Reference System, ITRS), Evropského terestrického referenčního systému (European Terrestrial Reference System, ETRS) a Mezinárodního tíhového referenčního systému (International Terrestrial Gravitation Reference System, ITGRS). Pro tyto aktivity je důležité zajistit, že sledovací stanice GNSS nepodléhají pohybům lokálního původu, protože jsou používány jako referenční stanice se známými souřadnicemi.

V případě souběžného umístění více technik kosmické geodézie (jako je např. GNSS) na jedné stanici je pro definici ITRS/ETRS nutné určit jejich vzájemné vztahy – excentricity mezi místy měření (anténami) jednotlivých technik. Takové stanici se pak říká kolokační stanice.

Na GO Pecný není provozováno více technik kosmické geodézie. V rámci projektu ECGN a v rámci ZGS jsou kombinovány výsledky určování prostorové polohy pomocí GNSS a výsledky kontinuálního sledování tíhového zrychlení. Pro jejich regulérní porovnání je potřeba zajistit neměnnost excentricity mezi permanentními stanicemi GNSS a mezi absolutními body, na kterých je prováděno sledování tíhového zrychlení. Jelikož se tíhové zrychlení mění především ve svislém směru, je důležité určovat svislou složku excentricity – tedy rozdíly relativních výšek v čase.

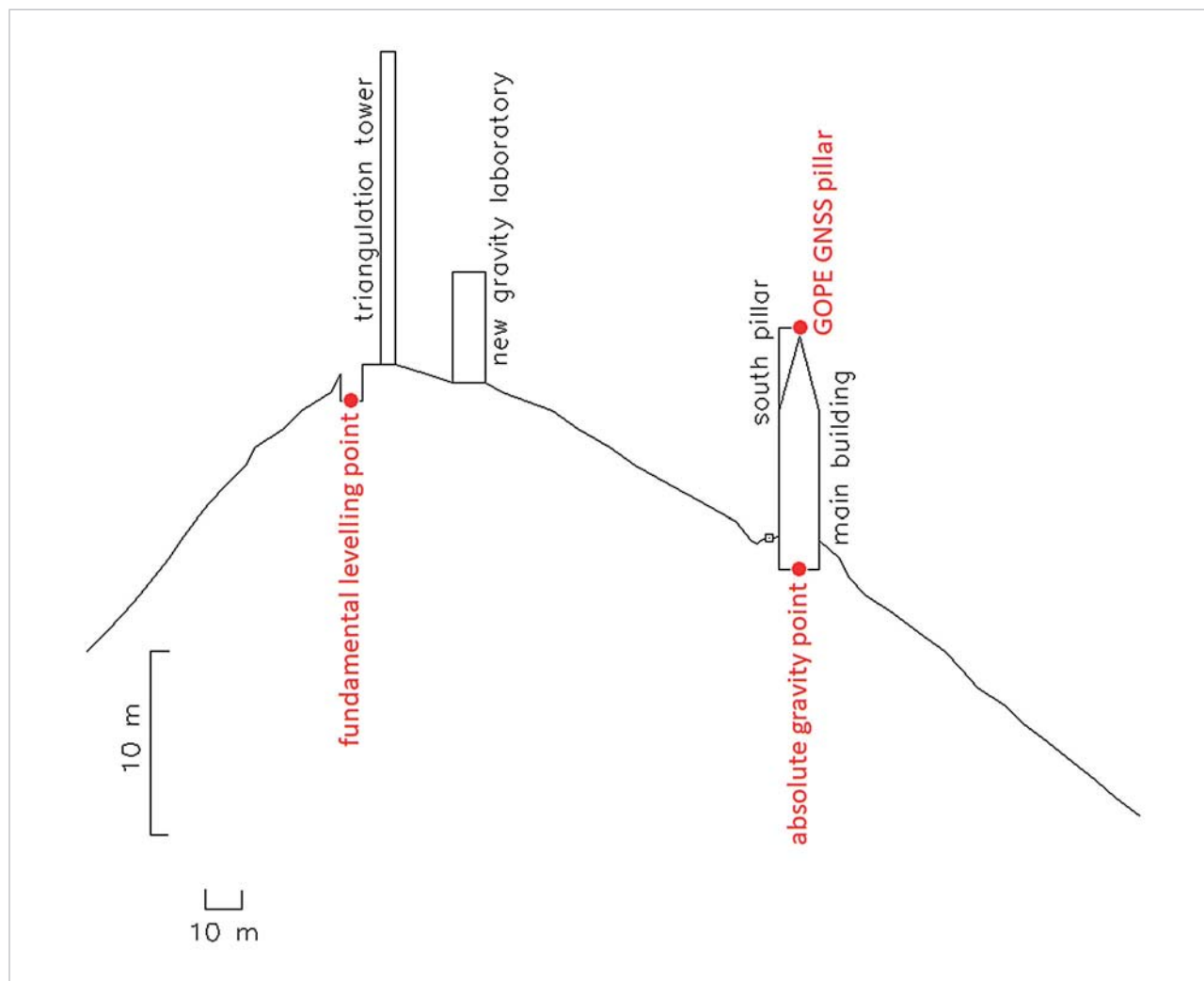
2. Data a metody

Z důvodu zjištění svislé složky excentricity mezi permanentními stanicemi GNSS a absolutními tíhovými body jsou pravidelně určovány jejich výšky pomocí nivelace. Výchozím bodem je jeden ze zajišťovacích bodů základního nivelačního bodu XII Pecný, konkrétně bod č. 9. Samotná hlavní značka základního bodu je běžně nepřístupná (použít ji může pouze Zeměměřický úřad). Výškové poměry jsou patrné v **obr. 1**, který byl převzat z článku [3]. Permanentní stanice je o cca 4 m výš než základní nivelační bod, absolutní tíhové body jsou o 9 m níž a absolutní body v nové gravimetrické laboratoři jsou o necelé 2 m výš.

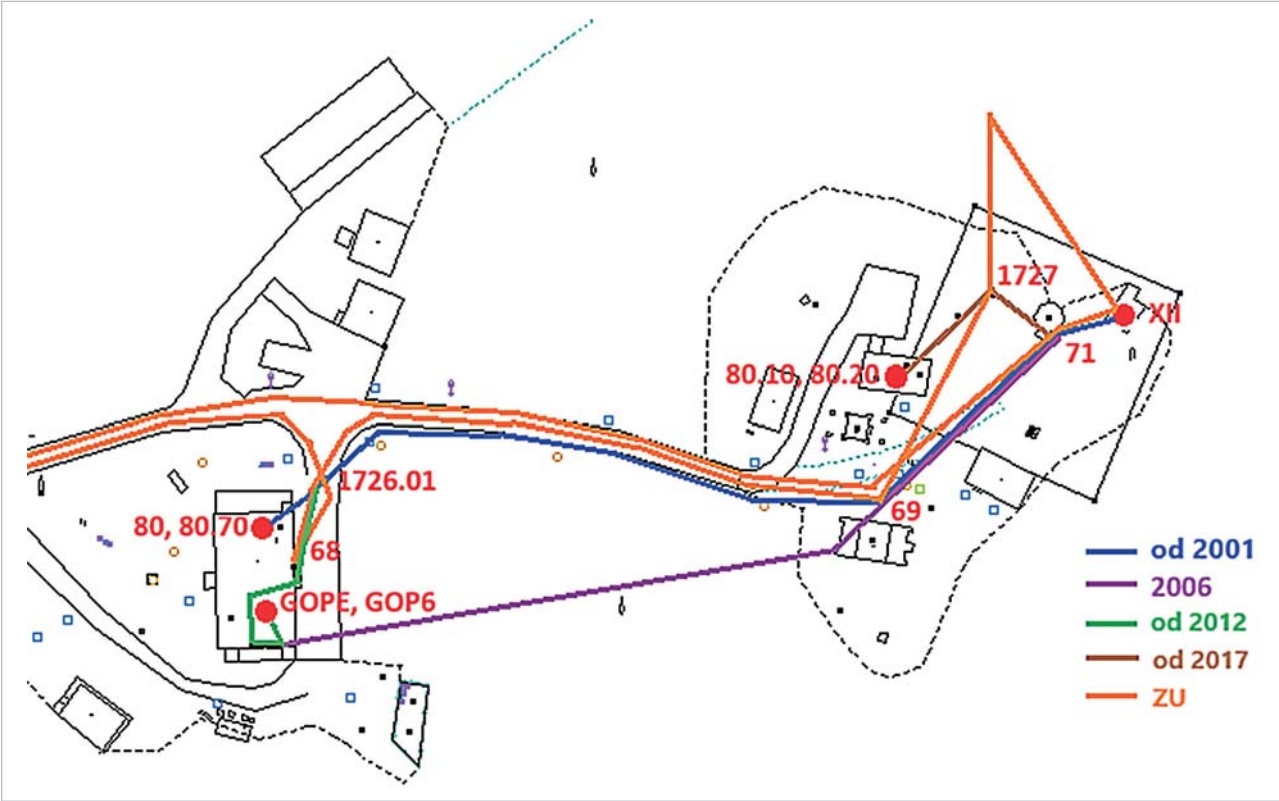
Metodou měření je přesná nivelace, tj. geometrická nivelace ze středu. Oproti běžným předpisům pro přesnou nivelaci byla při měření používána jedna lať – v některých oddílech 3 m dlouhá, v jiných 1,8 m dlouhá. Stativ pro nivelační přístroj měl proměnlivou délku noh. Délky záměr byly rozměřovány, ale v některých případech nebylo možné zachovat stejnou délku záměry vzad a vpřed. Z toho důvodu byla před měřením určována oprava z nevdorovnosti záměrné přímkou a výsledky byly opravovány početně. Hlavním důvodem je měření ve stísněných prostorách budov, které neumožňuje vždy zachovat stej-

nou délku záměry vpřed a vzad, a také optimální výšku nivelačního přístroje na stativu při měření na schodišti. Oprava z délky laťového metru byla určována při kalibraci. V některých epochách byla délka laťového metru jedné z laťů určena zprostředkovaně z délky laťového metru druhé z laťů, a to z výsledků měření největšího převýšení oběma laťemi.

První epocha měření byla provedena v roce 2001 – jednalo se o testovací epochu, kdy bylo určeno převýšení mezi základním nivelačním bodem a zajišťovacím bodem absolutního tíhového bodu. V dalších epochách 2002 a 2004 bylo již určeno převýšení mezi základním nivelačním bodem a absolutním tíhovým bodem 80 Pecný. Postup pro nivelační připojení permanentní stanice GNSS GOPE byl definován až v roce 2006 a to pomocí velmi dlouhé záměry z vrcholové plošiny Pecného na nivelační značku na jižním pilíři hlavní budovy. V epoše v roce 2012 bylo nivelační připojení permanentních stanic na střeše hlavní budovy modifikováno – byla vytvořena možnost vést nivelaci po schodišti a průduchy, tj. vnitřní částí hlavní budovy. Tato trasa byla používána ve všech následujících epochách. V epoše v roce 2017 byly poprvé zaměřeny také absolutní tíhové body 80.10, 80.20 a 80.30 v nové gravimetrické laboratoři. Poslední epocha byla realizována v roce 2023. Trasy měření v jednotlivých epochách jsou vyznačeny na **obr. 2**.



Obr. 1 Výškové poměry na GO Pecný, [3]



Obr. 2 Vedení nivelačních pořadů v jednotlivých epochách, včetně vedení nivelačního pořadu Jac – označené jako ZU



Obr. 3 Nivelační měření absolutního tíhového bodu v hlavní budově observatoře v roce 2023

V epochách 2001 až 2017 byl používán nivelační přístroj Zeiss Ni007 a invarové latě s rovnoměrným dělením a číslováním (optický způsob odečítání). Měření provedl autor článku a bylo prvně shrnuto v [3]. V epoše 2023 byl použit nivelační přístroj Leica DNA03 a invarové latě s kódovým dělením (digitální způsob odečítání) a měření provedl Bc. Jakub Marek v rámci své diplomové práce [4], [obr. 3](#).

Měření je volný nivelační pořad. Jediné charakteristiky přesnosti, které lze z měření vypočítat, jsou střední kilometrové chyby obousměrné nivelace z rozdílů měření tam a zpět. Jejich přehled pro jednotlivé epochy je [tab. 1](#). Protože délky pořadů jsou krátké, jsou celkové délky pořadů v jednotlivých epochách též uvedeny v [tab. 1](#).

Z [tab. 1](#) je patrné, že výsledky poslední epochy jsou horší než v předchozích epochách. To může být dáno jednak po-

Tab. 1 Charakteristiky přesnosti měření v jednotlivých epochách

Epocha	Střední kilometrová chyba obousměrné nivelace [mm]	Délka pořadu [km]
2001	0,34	0,134
2002	0,16	0,144
2004	0,31	0,148
2006	0,35	0,336
2012	0,65	0,296
2017	0,36	0,466
2023	2,02	0,426

užitím jiné měřicí techniky, ale mnohem pravděpodobnější příčinou je menší zkušenost měřiče.

2.1 Opakovaná zaměření nivelačního pořadu Zeměměřickým úřadem

Dalším zdrojem pro posouzení svislých pohybů v areálu GO Pecný jsou opakované nivelace 1. odbočného pořadu nivelačního pořadu II. řádu Jac Nespeky-Oleška, který vede přes areál observatoře a připojuje do nivelační sítě základní nivelační bod XII Pecný.

V období od roku 2001 do roku 2023 byl tento pořad zaměřen Zeměměřickým úřadem (ZÚ) celkem pětkrát, a to v letech 2004, 2008, 2011, 2016 a 2020. Pořad neurčuje výšky permanentních stanic GNSS ani absolutních bodů. Porovnat můžeme výšky nivelačních bodů, které jsou používány i při opakovaných nivelacích v rámci observatoře. Prakticky to jsou pouze nivelační body č. 69 a 71 po celé období a v posledních letech i body 68.1 (identický s tíhovým bodem 1726.01) a 69.1 (identický s tíhovým bodem 1727). Většina měření ZÚ přitom využívá přímo hlavní značku základního nivelačního bodu XII Pecný, nikoliv jeho zajišťovací bod č. 9.

3. Sestavení časových řad výšek z jednotlivých epoch

Veškerá měření byla jednotně zpracována: byly zavedeny opravy z laťového metru, opravy ze sklonu záměrné přímkou a tíhové opravy. Poslední jmenované opravy měly velmi malou velikost, ale byly zahrnuty, protože jednotlivé epochy nebyly realizovány vždy stejným způsobem (ve stejné trase). V některých případech byl zaměřen uzavřený pořad – např. mezi body na střeše hlavní budovy nebo mezi dalšími zajišťovacími body základního nivelačního bodu XII Pecný. V těchto případech bylo provedeno vyrovnání uzavřeného nivelačního pořadu.

Výška zajišťovacího bodu č. 9 základního nivelačního bodu XII Pecný byla považována za výchozí. Z výsledků byly sestaveny časové řady rozdílů výšek pro jednotlivé identické body v jednotlivých epochách, které jsou dále hodnoceny. Jako referenční byla stanovena epocha 2017 tj. rozdíl výšek jsou vypočteny tak, že od výšek v epoše 2017 jsou odečítány výšky v ostatních epochách. Z určených středních kilometrových chyb byly odhadnuty střední chyby výšek. Na obr. 5 až 10 jsou vykresleny 2-násobky středních chyb ve formě chybových úseček.

Zpracování nivelačních pořadů zaměřených a poskytnutých ZÚ bylo provedeno obdobně, ale bez zavádění opravy z laťového metru a opravy ze sklonu záměrné přímkou (první je v datech již zavedena a druhá je irelevantní). Výchozím bodem byla obvykle výška nivelačního bodu č. 71, protože jak bylo zmíněno výše, nivelační pořady obvykle nezaměřovaly zajišťovací body základního nivelačního bodu XII Pecný, ale přímo samotný základní nivelační bod. Bod č. 71 je nejbližší základnímu nivelačnímu bodu. Výchozí výška bodu č. 71 i její střední chyba byla určena průměrem ze všech epoch měření připojených na zajišťovací bod č. 9.

3.1 Ověření výšky připojovacího bodu

Ze souboru dat rozšířeného o některá měření ZÚ, která zahrnuje i zajišťovací body základního nivelačního bodu,

je možné provést posouzení stability výchozího bodu – zajišťovacího bodu č. 9 základního nivelačního bodu XII Pecný. Na obr. 4 jsou zobrazeny rozdíly výšek pro zajišťovací body č. 9 až 12 (vnější značky základního nivelačního bodu).

Z obrázku je patrné, že největší odchylky vykazuje měření v epoše 2001, ostatní výsledky jsou do 0,15 mm, což je v rámci přesnosti metody měření. Výchozí bod je možno považovat za stabilní a vhodný pro připojení dalších epoch opakovaných nivelací.

3.2 Vývoj výšek nivelačních bodů pořadu Jac

Na obr. 5 jsou časové řady všech rozdílů výšek pro body nivelačního pořadu č. 69 a 71.

Je patrné, že rozdíly výšek jsou velmi malé. Přesto je patrný skok ve výškách mezi epochami 2011 a 2012 a pak pozvolný návrat k průměru předchozích let. Obdobné časové řady rozdílů pro tíhové body č. 1726.01 a 1727 jsou na obr. 6.

Tíhové body č. 1726.01 a 1727 nebyly zaměřeny v každé epoše. Na obr. 6 jsou nulové hodnoty a nulové chybové úsečky v případech, když v dané epoše nebyl bod měřen. Je možno konstatovat, že rozptýl výšek u bodu č. 1726.01 je vyšší než dvojnásobek střední chyby vypočtené z rozdílů měření tam a zpět. Rozptýl rozdílů výšek bodu č. 1727 odpovídá odhadnuté přesnosti měření.

3.3 Absolutní tíhové body

Časové řady rozdílů výšek absolutních tíhových bodů v hlavní budově jsou na obr. 7. V epoše 2001 byl zaměřen pouze pomocný bod 80.81, což je excentrický pilíř. V epoše 2002 nebyl ještě zaměřován excentrický absolutní bod 80.70, který je stabilizován na pilíři absolutního tíhového bodu. V epoše 2012 nebyl absolutní bod 80 zaměřen, protože na bodě byl dlouhodobě instalován absolutní gravimetr.

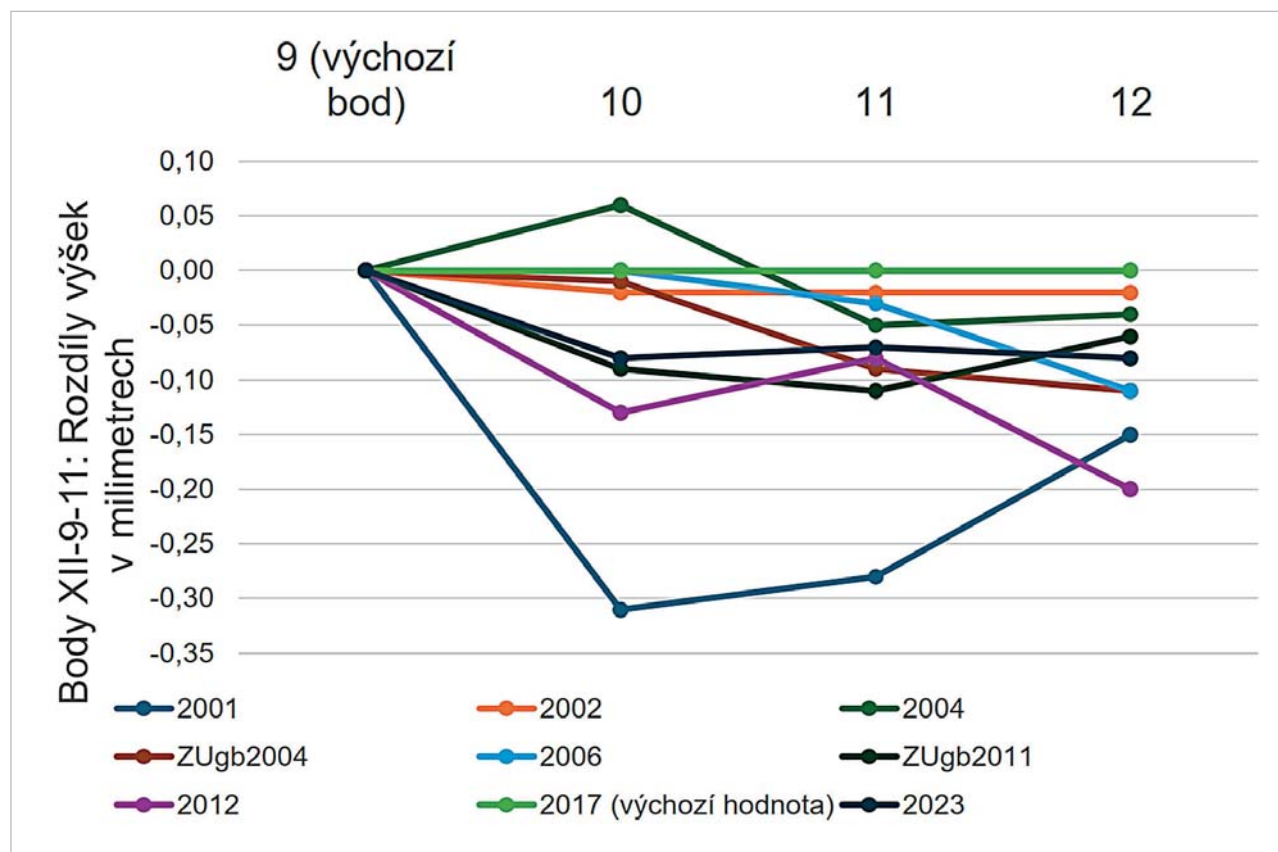
Z časové řady lze konstatovat, že případné pohyby bodů 80 a 80.70 jsou shodné. Při uvážení chybových úseček, tj. 2-násobku středních chyb, nebyla žádná změna výšky detekována.

Absolutní tíhové body v nové gravimetrické laboratoři byly zřízeny při výstavbě laboratoře v letech 2013–2014. Při opakovaných nivelacích byly zaměřeny jen v epochách 2017 a 2023.

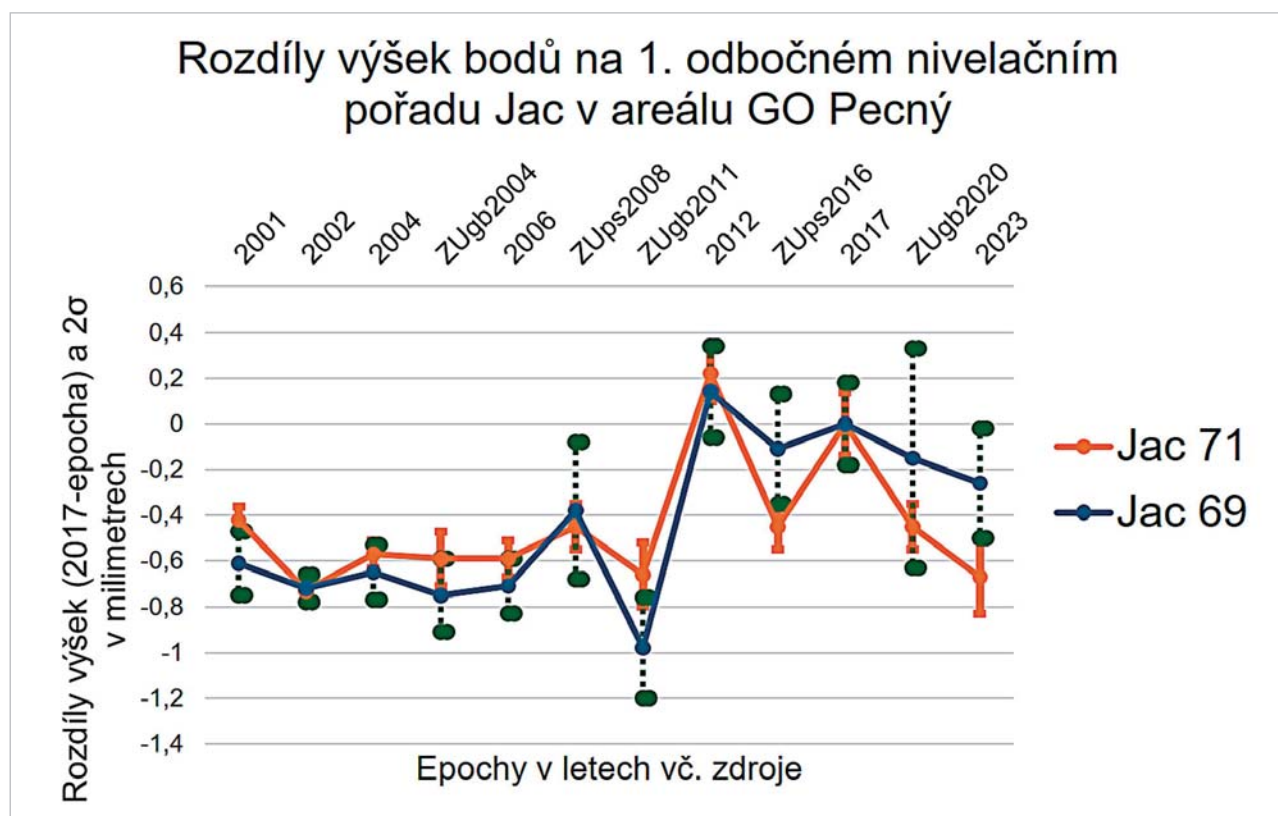
Na obr. 8 jsou rozdílů výšek absolutních tíhových bodů v nové gravimetrické laboratoři mezi epochami 2017 a 2023 (přesněji rozdílů výšky v roce 2023 mínus výšky v roce 2017). Při porovnání rozdílů s chybovými úsečkami, tj. 2-násobkem střední chyby, můžeme konstatovat, že k žádné změně výšky bodů v nové gravimetrické laboratoři nedochází. Laboratoř je umístěna na vrcholu Pecného a její lokální pohyb je méně pravděpodobný než pohyb hlavní budovy.

3.4 Permanentní stanice GNSS

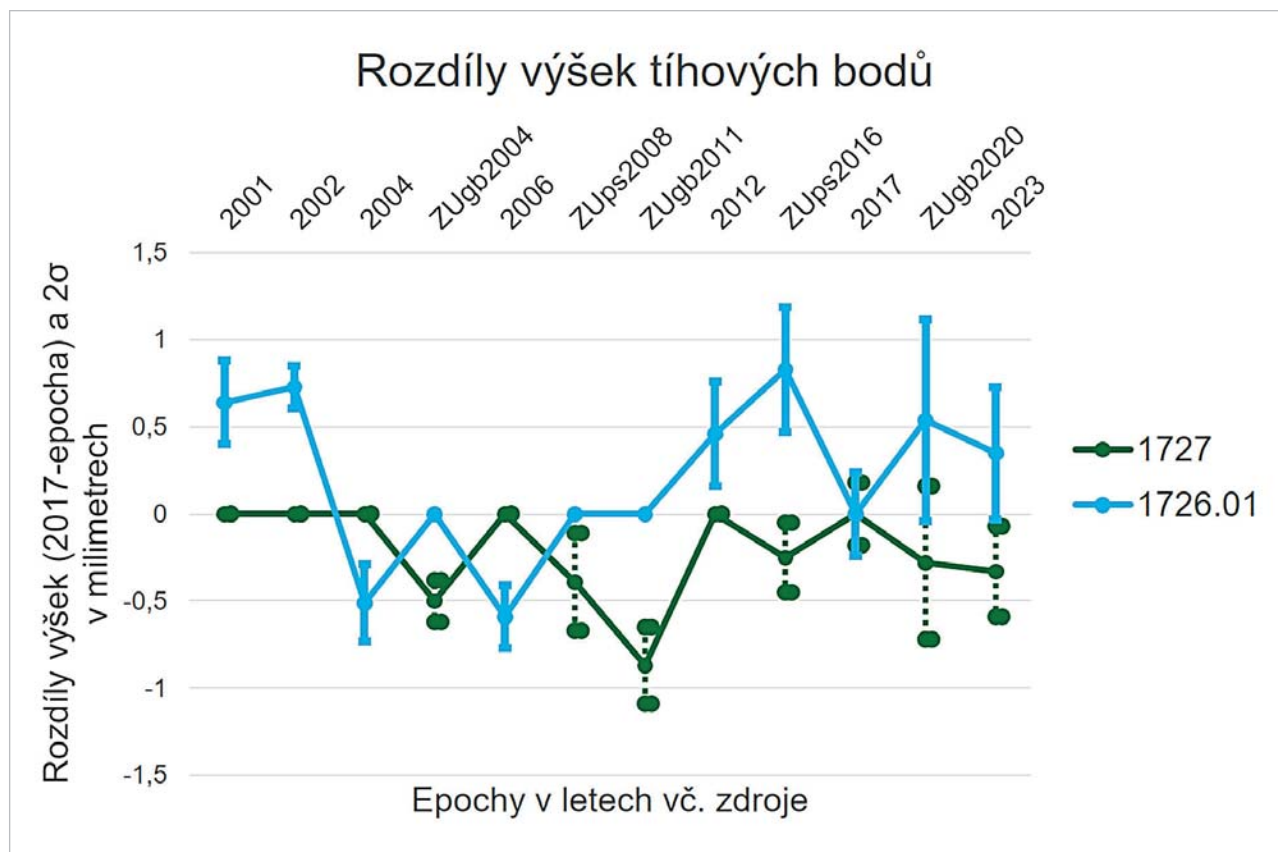
Od epochy 2006 je prováděno nivelační měření i permanentních stanic GNSS na střeše hlavní budovy. V místě je 5 nucených centrací pro antény GNSS, ale do mezinárodních služeb jsou odesílána data ze stanic GOPE a GOP6. Časové řady rozdílů výšek vůči referenční epoše jsou na obr. 9.



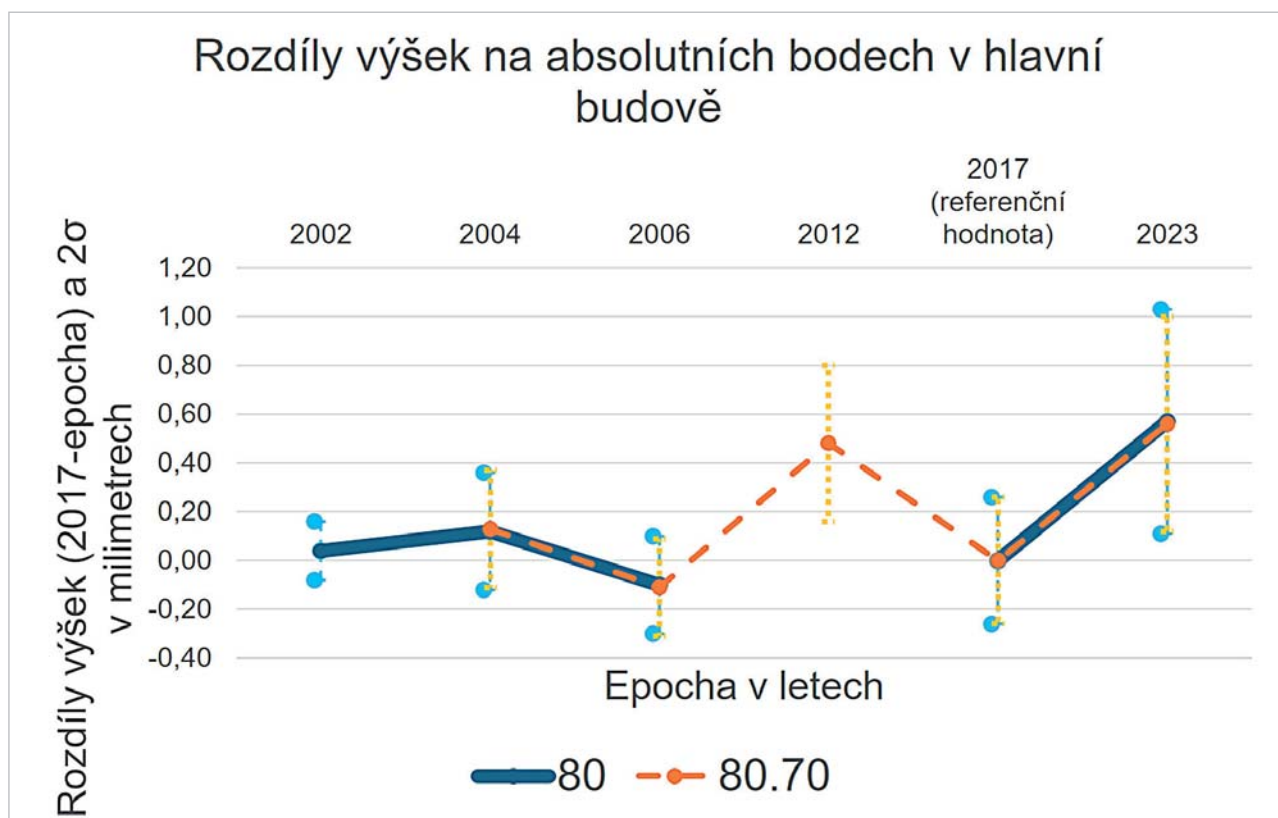
Obr. 4 Rozdíly výšek zajišťovacích bodů č. 9 až 12 v jednotlivých epochách



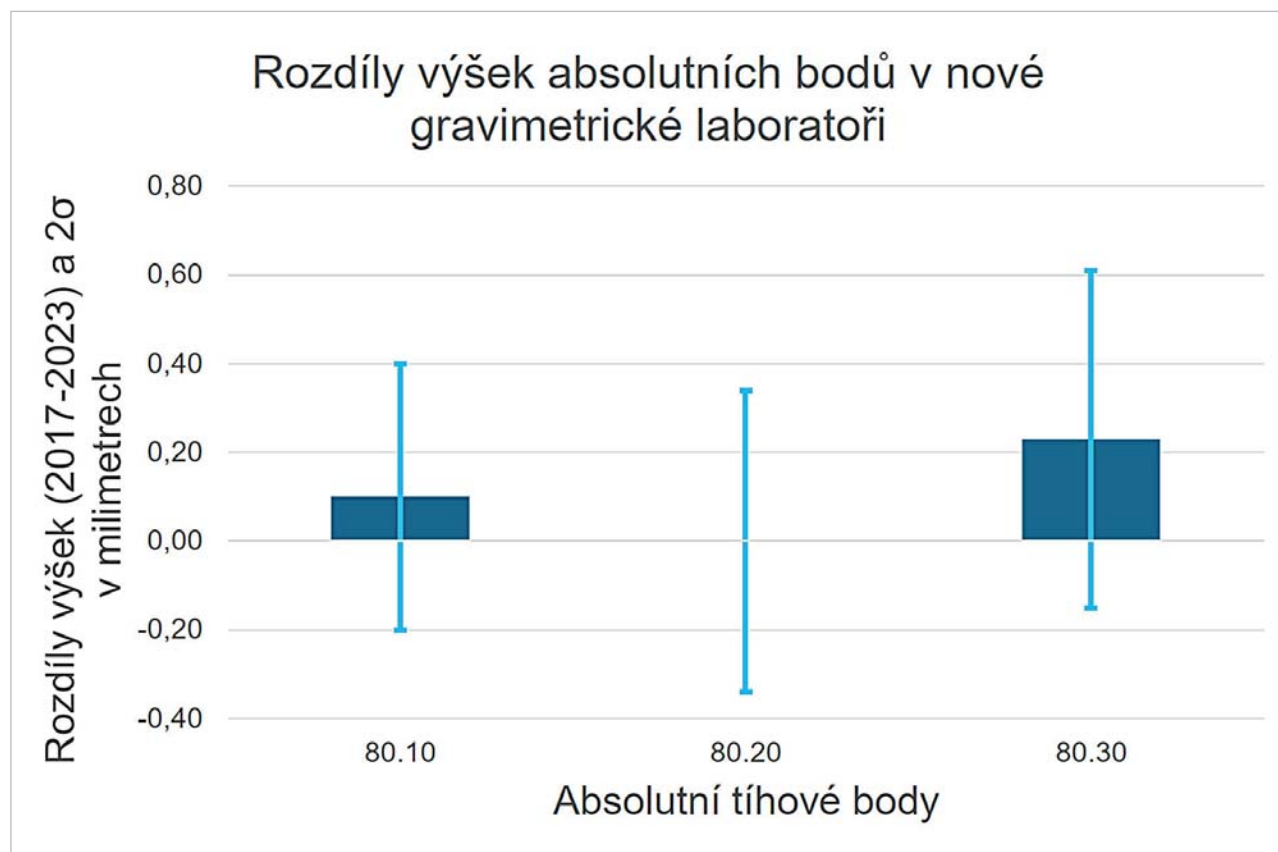
Obr. 5 Časové řady rozdílů výšek nivelačních bodů č. 69 a 71; pro měření ZÚ je bod č. 71 výchozím



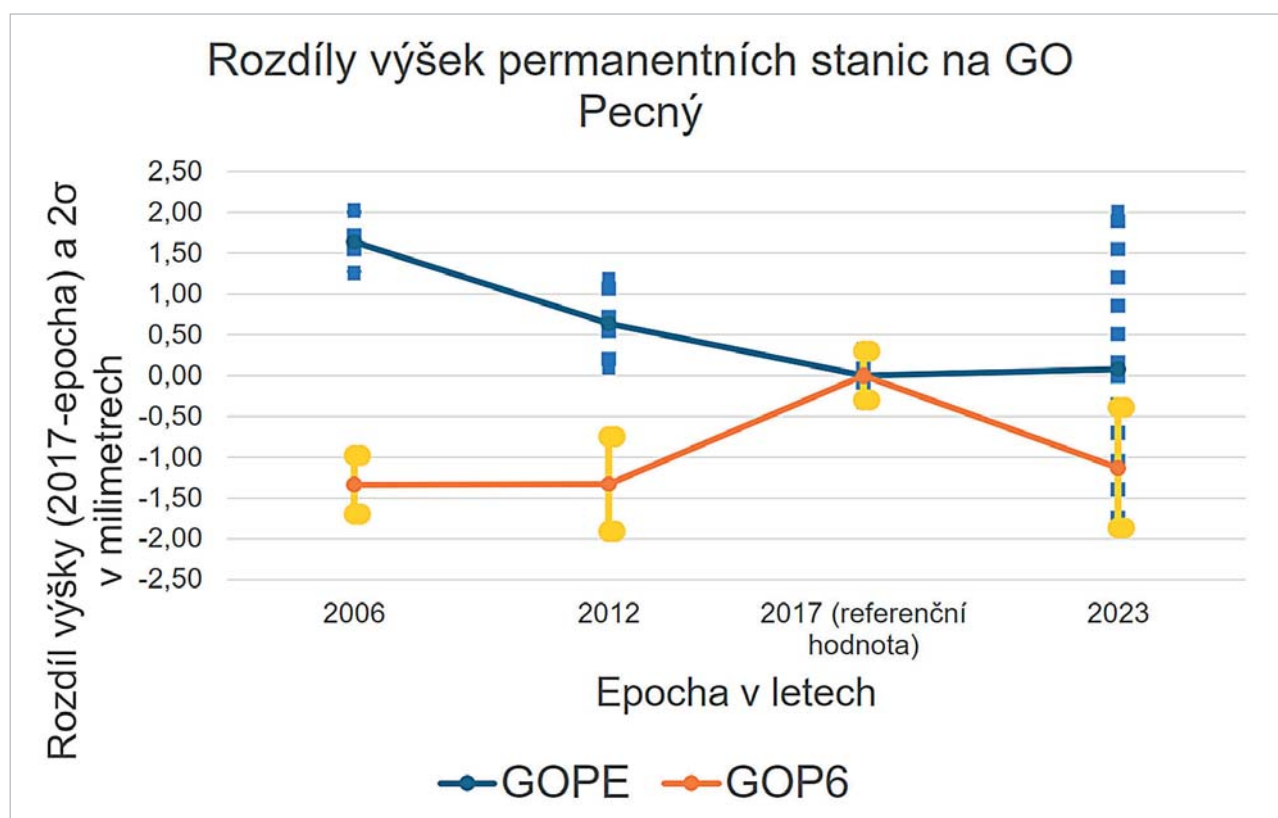
Obr. 6 Časové řady rozdílů výšek tíhových bodů č. 1726.01 a 1727; nulové hodnoty značí, že v dané epoše nebyl bod zaměřen (vyjma epochy 2017, ke které jsou výsledky vztaženy)



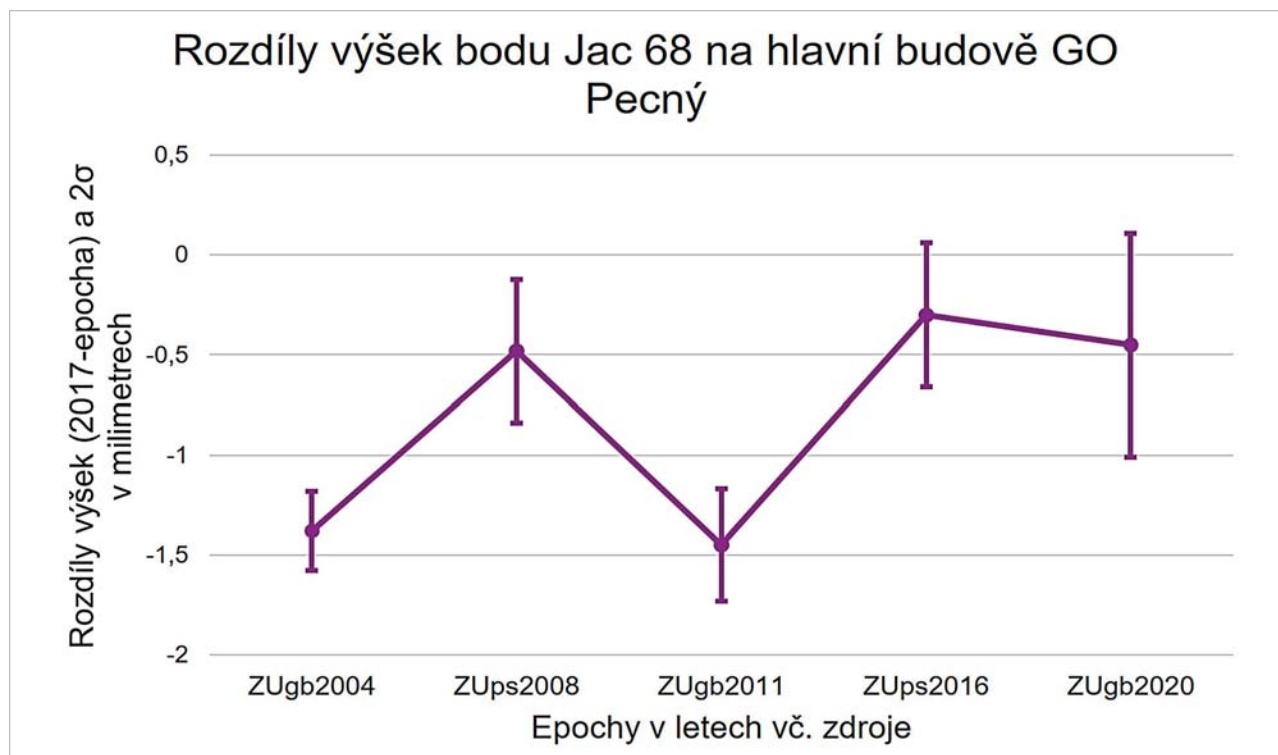
Obr. 7 Časové řady rozdílů výšek na absolutním tíhovém bodě 80 Pecný a excentrickém bodě 80.70 v hlavní budově



Obr. 8 Rozdíly výšek mezi epochami 2017 a 2023 na absolutních bodech v nové gravimetrické laboratoři



Obr. 9 Časové řady rozdílů výšek na permanentních stanicích GNSS GOPE a GOP6



Obr. 10 Časová řada rozdílů výšek nivelačního bodu č. 68

Před interpretací rozdílů je třeba poznamenat, že při určování výšek permanentních stanic GNSS nivelací se nivelační lať staví na konkrétní část antény a výška se pak přepočte na referenční bod stanice podle známých rozměrů antény. Současně může dojít k pružné deformaci antény. Chybové úsečky tuto skutečnost nemohou zohlednit. V časové řadě permanentní stanice GOPE je systematicky posunutá epocha 2006. Ostatní epochy jsou v mezích daných chybovými úsečkami, tj. 2-násobku střední chyby výšky. V časové řadě permanentní stanice GOP6 je odlehlá referenční epocha 2017. Ostatní epochy oscilují kolem hodnoty -1,3 mm. Nelze tedy prokázat, že by docházelo k systematickému posunu permanentních stanic ve svislém směru.

Nivelační bod č. 68 může posloužit jako pomocný indikátor svislého pohybu hlavní budovy observatoře, protože je stabilizován do její východní nosné stěny. Je tedy umístěn na budově, kde na střeše jsou permanentní stanice GNSS a ve sklepě absolutní tíhový bod (ale na pilíři odděleném od budovy). Při opakovaných nivelacích na observatoři není měřen, protože kvůli zateplení na něj nelze postavit lať bez rozšíření patky (tzv. magnetu). Měří ho proto pouze ZÚ. Na obr. 10 je časová řada rozdílů výšek bodu č. 68.

V časové řadě rozdílů není patrný žádný skok kolem roku 2012. Pohyb tohoto bodu je sice větší než dvojnásobek střední chyby, ale působí spíše náhodně. Pohyb hlavní budovy ve svislém směru neindikuje.

tivní pohyb. To umožňuje interpretace časových řad souřadnic permanentních stanic GOPE a GOP6 spolu s časovými řadami tíhových zrychlení na absolutních tíhových bodech 80 Pecný i na bodech 80.10 a 80.20 v nové gravimetrické laboratoři. Jejich kombinovaná interpretace je důležitá jak pro evropský projekt Evropské kombinované referenční sítě ECGN, tak pro národní Základní geodynamickou síť ZGS. Současně lze konstatovat, že poloha permanentních stanic GOPE a GOP6 je ve svislém směru stabilní a případné detekované pohyby nejsou lokálního původu. Zároveň se ukázalo, že používaný postup je vhodný pro sledování relativních výšek i do budoucna.

LITERATURA:

- [1] GLOBAL GEODETIC OBSERVING SYSTEM. [online]. [3. 2. 2025]. Dostupné na: <https://ggos.org>.
- [2] IHDE, J.-BAKER, T.-BRUYNINX, C.-FRANCIS, O.-AMALVICT, M.-KENYERES, A.-MAKINEN, J.-SHIPMAN, S.-ŠIMEK, J.-WILMES, H.: Development of a European Combined Geodetic Network (ECGN). *Journal of Geodynamics*, 40, 4-5, 2005, pp. 450-460.
- [3] KOSTECKÝ, J.-KOSTECKÁ, M.: Monitoring of local vertical movements at geodetic station by repeated levelling In: 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference, SGEM, JUL 2-8, 2018, Albena, Bulgaria, 18 (2.2) 2018, pp. 883-890, DOI: 10.5593/sgem2018/2.2/S09.112.
- [4] MAREK, J.: Opakované nivelační měření na Geodetické observatoři Pecný, Diplomová práce, VŠB-TU Ostrava, Hornicko-geologická fakulta, katedra geodézie a důlního měřictví, Ostrava, 2024.

Do redakce došlo: 5. 5. 2025

Lektoroval:

**Ing. František Beneš, CSc.,
Praha**

4. Závěr

Opakovaná nivelační měření na GO Pecný slouží k posouzení neměnnosti relativních výšek mezi permanentními stanicemi GNSS a absolutními tíhovými body. Z měření provedených v letech 2002 až 2023 nebyl prokázán rela-