

# PERMANENTNÍ GNSS SÍTĚ A JEJICH VYUŽITÍ V GEODYNAMICKÉM MONITORINGU ČESKÉHO MASIVU

## PERMANENT GNSS NETWORKS AND THEIR USE IN GEODYNAMIC MONITORING OF THE BOHEMIAN MASSIF

Lubomil Pospíšil<sup>1</sup>, Otakar Švábenský<sup>2</sup>

### Abstrakt

Príspevek se zabývá problematikou permanentních GNSS stanic a sítí z hlediska jejich využití pro účely geodynamického výzkumu. Uvádí se obecné aspekty a charakteristiky zřízení a fungování permanentních stanic. Popisují se některé účelové geodynamické sítě vázané na významné regionální projekty. Závěrem jsou připojeny dva příklady geodynamického výzkumu s využitím permanentních GNSS sítí na území ČR. První ukázka se týká průzkumu indikací horizontálních pohybových tendencí týkajících se území Českého masivu a jeho vztahů k okolním strukturám. Druhý příklad se týká detailnějšího geologického a geodynamického výzkumu zlomových systémů Blanické brázdy.

### Abstract

The paper deals with the problematics of permanent GNSS stations and networks in terms of their use for geodynamic research. General aspects and characteristics of the establishment and operation of permanent stations are stated. Some purpose-built geodynamic networks related to important regional projects are described. Finally, attached are two examples of geodynamic research using permanent GNSS networks in the Czech Republic. The first example concerns the survey of indications of horizontal movement tendencies concerning the territory of the Bohemian Massif and its relations to the surrounding structures. The second example concerns a more detailed geological and geodynamic research of the fault systems of the Blanice Graben.

### Klíčová slova

GNSS monitoring, permanentní stanice, geodynamika, Blanická brázda

### Keywords

GNSS monitoring, permanent station, geodynamics, Blanice Graben

## 1 Úvod

V současné době se v geodynamickém výzkumu stále více prosazují metody satelitní geodézie. Rychlý rozvoj GNSS infrastruktury ve všech evropských zemích ve spojení se zdokonalováním struktury GNSS signálů a též vývoje hardwarového a softwarového vybavení GNSS přijímačů a antén poskytuje stále komplexnější způsob, jak získat nové poznatky a verifikovat tradiční přístupy při studiu geologické stavby prostřednictvím GNSS geodynamického monitoringu.

---

1 Lubomil Pospíšil, doc., RNDr., CSc., Katedra geodézie a důlního měřičství, HGF, TU Ostrava, 17 listopadu 2175/15, 708 00 Ostrava - Poruba, tel.: +420 597325490, e-mail: lubomil.pospisil@vsb.cz

2 Otakar Švábenský, prof., Ing., CSc., Ústav geodézie FAST VUT, Veveří 95, 602 00 Brno, tel.: 541147211, e-mail: svabensky.o@fce.vutbr.cz

Hlavním cílem je poznání struktury geologické stavby v zájmovém území a vyslovení hypotéz týkajících se strukturních predispozic celkové geomorfologie území. Ke studiu je třeba přistupovat prostřednictvím metod morfo-strukturní a geofyzikální analýzy. Závěrem je důležité zjištění skutečnosti porovnat s údaji o geodynamice oblasti, které vycházejí z výsledků vyhodnocení měření GNSS.

Měření dat v rámci GNSS geodynamického monitoringu představují obvykle dosti složité a logisticky náročný problém, protože je třeba organizovat opakované měřické kampaně na bodech epochových sítí. Stejně tak jsou kladeny vysoké požadavky na kvalitní vyhodnocení naměřených dat odpovídající metodikou zohledňující současný stav poznání a zkušenosti. V tomto ohledu je kladen důraz na vytvoření a udržování dlouhodobě stabilního souřadnicového rámce, nejčastěji prostřednictvím optimálního počtu kvalitních permanentních stanic.

## 2 Permanentní GNSS stanice a jejich charakteristika

Permanentní GNSS stanicí (PGS) se rozumí kontinuálně měřící soustava (přijímač a anténa) ve spojení se zařízením umožňujícím záznam a přenos dat, včetně dalšího příslušenství.

Při zřizování referenčních stanic je třeba brát v úvahu řadu následujících aspektů a okolností:

Druh a účel – součást globální a regionální geodetické infrastruktury, deformačního monitoringu stavebních objektů (přehrady, mosty, výškové budovy), geodynamického monitoringu (sesuvná území, seismicky aktivní oblasti, vulkány, zlomy), a další.

Umístění stanice – volný terén, stavební objekt. Náročné je zejména zřizování stanic v terénních podmínkách, kde je třeba zajistit nepřetržité autonomní napájení aparatur a také ochranu před poškozením či zcizením.

Druh stabilizace a umístění antény – pilíř, stožár, tyč, konzola.

Mód záznamu a distribuce měřených dat – nepřetržitý nebo časově omezený (na observační kampaň, na plánované období určitého monitoringu atp.).

Struktura poskytovaných dat (konstelace, počet frekvencí, signály – kód, fáze, kanál, Doppler, síla signálu). Zatímco v počátcích rozvoje družicové měřící technologie se zaznamenávaly pro každý GPS satelit pouze hodnoty kódu a fáze na dvou frekvencích, v současné době je možné registrovat mnohem více dat, což klade zvýšené nároky na kapacitu záznamových a přenosových prostředků a zařízení. Ukázka současné struktury záznamu dat na stanici EPN TUBO je na Obr. 1 (část hlavičky RINEX datového souboru).

G	16	C1C	L1C	D1C	S1C	C2S	L2S	D2S	S2S	C2W	L2W	D2W	S2W	C5Q	SYS	/	#	/	OBS	TYPES
		L5Q	D5Q	S5Q											SYS	/	#	/	OBS	TYPES
R	16	C1C	L1C	D1C	S1C	C2P	L2P	D2P	S2P	C2C	L2C	D2C	S2C	C3Q	SYS	/	#	/	OBS	TYPES
		L3Q	D3Q	S3Q											SYS	/	#	/	OBS	TYPES
S	4	C1C	L1C	D1C	S1C										SYS	/	#	/	OBS	TYPES
E	16	C1C	L1C	D1C	S1C	C5Q	L5Q	D5Q	S5Q	C7Q	L7Q	D7Q	S7Q	C8Q	SYS	/	#	/	OBS	TYPES
		L8Q	D8Q	S8Q											SYS	/	#	/	OBS	TYPES
J	12	C1C	L1C	D1C	S1C	C2S	L2S	D2S	S2S	C5Q	L5Q	D5Q	S5Q		SYS	/	#	/	OBS	TYPES
C	12	C2I	L2I	D2I	S2I	C6I	L6I	D6I	S6I	C7I	L7I	D7I	S7I		SYS	/	#	/	OBS	TYPES

Obr. 1 Ukázka struktury současného záznamu dat na stanici TUBO.

Přístupnost dat – data některých stanic jsou bezplatně veřejně přístupná, data jiných stanic jsou zpoplatněna, a existuje též řada stanic, jejichž data jsou neveřejná a lze k nim získat přístup pouze na základě povolení příslušného správce.

Příkladem konzistentní detailní formulace těchto aspektů jsou například zásady a požadavky na zařazování nových PGS do EPN, definované v [3].

Monitoring datových výstupů – pro spolehlivost analýz charakteru změn v poloze bodů je důležité mít apriorní informace o fungování a stabilitě permanentních stanic při plánování a zejména v průběhu měřických kampaní vzhledem k tomu, že na PGS závisí dlouhodobá stabilita vytvořeného souřadnicového rámce. Protože znalost těchto skutečností je využívána i v jiných GNSS aplikacích, je funkce PGS v řadě sítí systematicky monitorována a vyhodnocována s co nejmenším zpožděním. Zejména se sledují nejen náhlé skoky v hodnotách souřadnic, ale i jejich eventuální trendy a periodické oscilace. Také dochází občas k dočasnému zhoršení kvality dat nebo k úplným výpadkům stanic (např. důsledkem hardwarových poruch, přerušením napájení, vlivem RF rušení příjmu signálu. Menší či větší nespojitosti v souřadnicových časových řadách bývají též způsobeny výměnou součástí hardware a upgradem firmware přijímačů. Například Nezávislý monitoring VÚGTK zpracovává průběžná data většiny aktivních permanentních GNSS sítí na území ČR a jeho výstupy jsou k dispozici na webu [8].

### 3 Permanentní GNSS síť pro geodynamiku

Permanentní stanice a síť využívané pro účely bezpečnostního či výzkumného GNSS geodynamického monitoringu mívají regionální nebo lokální rozsah. Jednotlivé stanice se využívají buďto přímo jako monitorovací, anebo pouze k vytvoření a udržování co nejstabilnějšího souřadnicového rámce v požadovaném časovém rozsahu monitoringu. Zatímco zásadním požadavkem pro monitorovací stanice je přímé propojení instalace GNSS antény s horninovým podkladem, pro účely vytvoření referenčního rámce monitoringu se používají i stanice s anténami na stavebních objektech. Např. [1] uvádí, že většina ASG-EUPOS stanic umístěných na budovách může být použita i pro vědecké účely. Tyto závěry byly podloženy výsledky analýzy tříleté periody časových řad souřadnic všech bodů této permanentní sítě. V následujícím textu jsou stručně popsány některé regionální a lokální geodynamické GNSS sítě.

GEONET (GPS Earth Observation Network) je rozsáhlá permanentní GNSS síť, jejíž hlavní účel je kontinuální monitorování deformací zemské kůry na území Japonska. Současně také zajišťuje a udržuje japonský geodetický referenční systém. Tato síť budovaná od roku 1993 zahrnuje více než 1300 stanic v průměrné vzájemné vzdálenosti ~20 km, stabilizovaných 5 m vysokými ocelovými pilíři. Přenos měřených dat se uskutečňuje v reálném čase s následným vyhodnocením a vstupem do bezpečnostního seismického systému [2].

SCIGN (Southern California Integrated GPS Network) je permanentní GNSS síť zřízená pro účely průběžného sledování změn způsobovaných interakcemi zlomů a postseismickými deformacemi v oblasti východokaliifornské střížné zóny. Je aktivní od roku 2001 a tvoří ji více než 250 stanic rozmístěných v Jižní a Baja Kalifornii. Hlavní přínosy této geodynamické sítě jsou: hustší regionální pokrytí pro lepší odhadování seismického rizika v oblasti Los Angeles, identifikace aktivních slepých zlomů a měření variací regionálního napěťového pole spolu s reakcemi zlomů na tyto variace [4].

Významný regionální evropský geodynamický projekt představuje CEGRN (Central European GNSS Research Network), který je pokračováním původní středoevropské iniciativy CERGOP (Central European Research on Geodynamics Project) 11 zemí. Je zaměřen na monitorování recentních deformací povrchu zemské kůry ve středoevropském regionu. Současný rozsah tohoto projektu zpracovává data z více než 1200 permanentních a epochových stanic, pokrývajících území od Litvy po Severní Makedonii v severojižním směru, a od Švýcarska po

Ukrajinu v západovýchodním směru. Přiřazení do ETRF2000 je zajišťováno prostřednictvím 234 stanic EPN. Do řešení projektu je v současnosti zapojeno 33 zemí. [5]

VESOG je síť permanentních GNSS stanic sloužící pro vědeckovýzkumné a výukové účely. Zahrnuje 11 stanic na území ČR, které jsou umístěny na akademických, výzkumných a vojenských institucích. Operační centrum sítě VESOG se nachází na Geodetické observatoři Pecný. Součástí této sítě je také stanice TUBO umístěná na budově VUT FAST Brno. Mezi využití pro výzkumné účely patří i příspěvek pro tvorbu mapy tektoniky Evropy ze zpracování dlouhodobých časových řad souřadnic

GEONAS (GEOdynamic Network of the Academy of Sciences) je síť permanentních GNSS stanic budovaná pro účely geodynamického monitoringu na území ČR. Operační centrum této sítě se nachází v ÚSMH AV ČR, v.v.i. Její fungování započalo v roce 2001 instalací prvních dvou stanic (SNEC, BISK). V současné době zahrnuje 18 stanic, z nichž tři (BISK, POUS, VACO) jsou začleněny do sítě EPN. Je navržena tak, aby pokrývala různé geologické struktury a mohla tak významně přispívat k rozšíření referenčního rámce pro geodynamický monitoring Českého masivu.

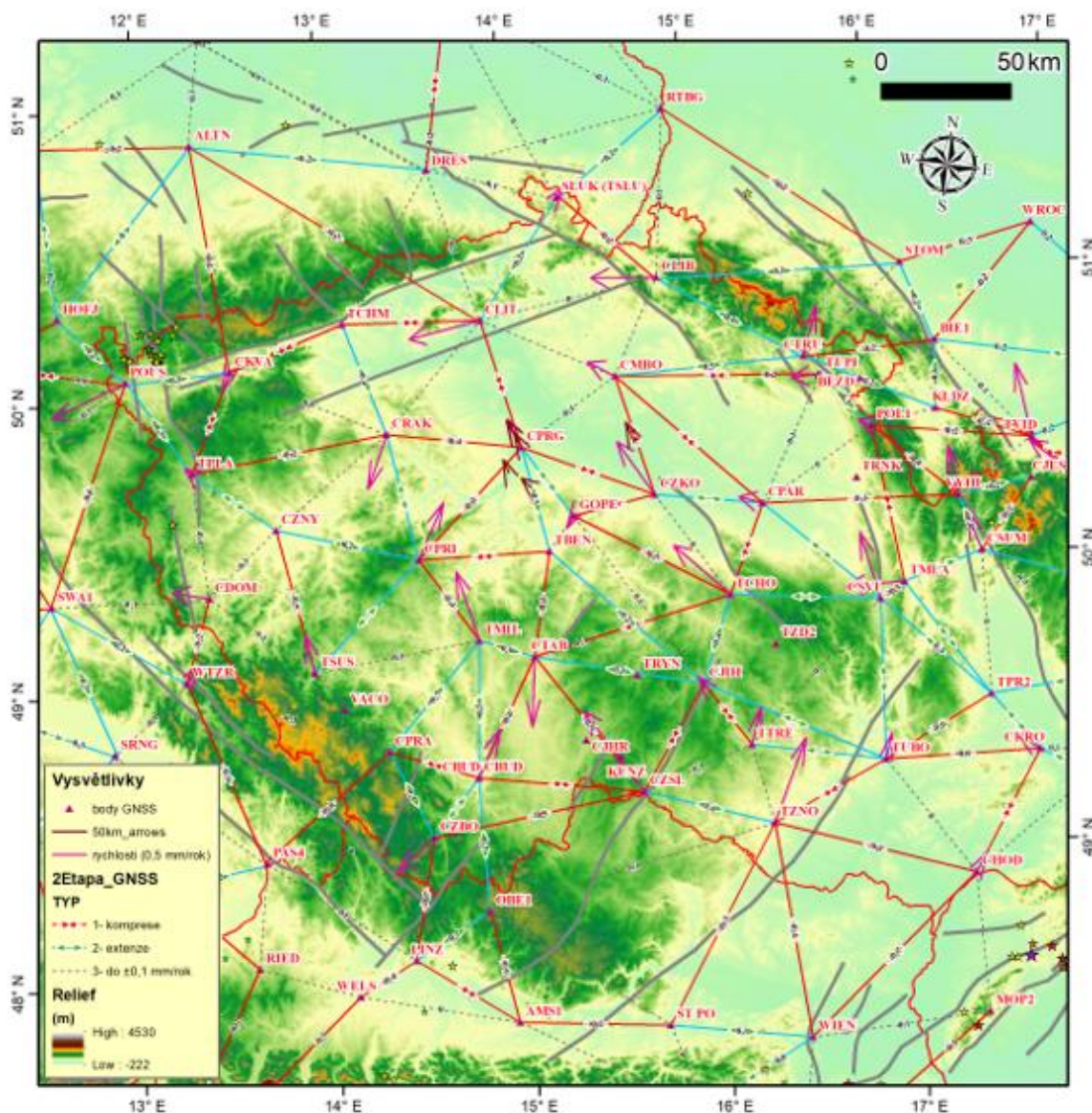
#### **4 Uplatnění GNSS monitoringu v geodynamickém výzkumu ČR**

Realizace geodynamického GNSS monitoringu je závislá na více okolnostech – účel, rozsah území, časový úsek sledování, počet použitých permanentních stanic a volba jejich konfigurace, druh a přesnost výstupů. Výsledky měření na bodech permanentních sítí přináší pro geodynamické studie jednu z nejcennějších prvotních informací Další předností je, že v kombinaci s výsledky VPN, geofyziky a údajů DPZ, lze řešit i další důležité informace týkající se strukturně-tektonických poměrů ve zkoumaném území. Možnosti uplatnění permanentních GNSS sítí pro účely geodynamického výzkumu některých oblastí a lokalit ČR jsou ilustrovány na dvou příkladech.

Prvním příkladem je úvodní průzkum eventuální tektonické aktivity v rozsáhlejší oblasti zahrnující území Čech a blízkého okolí. V rámci tohoto průzkumu byla využita data vybraných bodů permanentních GNSS sítí EPN, VESOG, CZEPOS, TopNET a VRS-NOW, pokud možno pravidelně rozložených v rozsahu zkoumaného území. Na základě analýzy víceletých souřadnicových časových řad těchto stanic zpracovaných v BSW52 [10] s využitím podpurných produktů reprocessingu (CODE REPRO 2015) byly získány informace týkající se především indikací regionálních horizontálních pohybových tendencí týkajících se území Českého masivu a jeho vztahů k okolním strukturám. Na základě těchto dat lze odhadovat přímo nejen relativní rychlosti změn vektorů, ale i druh pohybu (extenzní, kontrakční – Obr. 2). Pro vytvoření referenčního rámce byly použity 2 stanice sítě IGS (WTZR, GOPE a 7 stanic sítě EPN kategorie A (TUBO, CLIB, CTAB, POUS, CPAR, CRAK, LINZ)

V druhém příkladu je ukázka detailnějšího zpracování oblasti podél Blanické brázdy (BB), která představuje jednu z komplikovanějších zón z hlediska geologické stavby a tektoniky.

Permokarbon z Blanické brázdy tvoří diskontinuální, až 12 km široký pás usazenin, probíhající ve směru SSV-JJZ z Českého Brodu do Českých Budějovic. Na severu kolem Českého Brodu, Kouřimi a Kostelce nad Černými Lesy (severní část brázdy) a na jihu mezi Českými Budějovicemi a Lhoticemi (jižní část) mají tyto výskyty největší rozlohu. Střední část zahrnuje několik menších výskytů v okolí Vlašimi a Tábora. Podle fosilní flóry je spodní přítomná vrstva v brázdě považována z hlediska stáří za stephan C, zatímco ložiska, která následují výše, jsou přiřazena k autunu. Přechod sedimentů vrchního karbonu do spodního permu je spojitý.

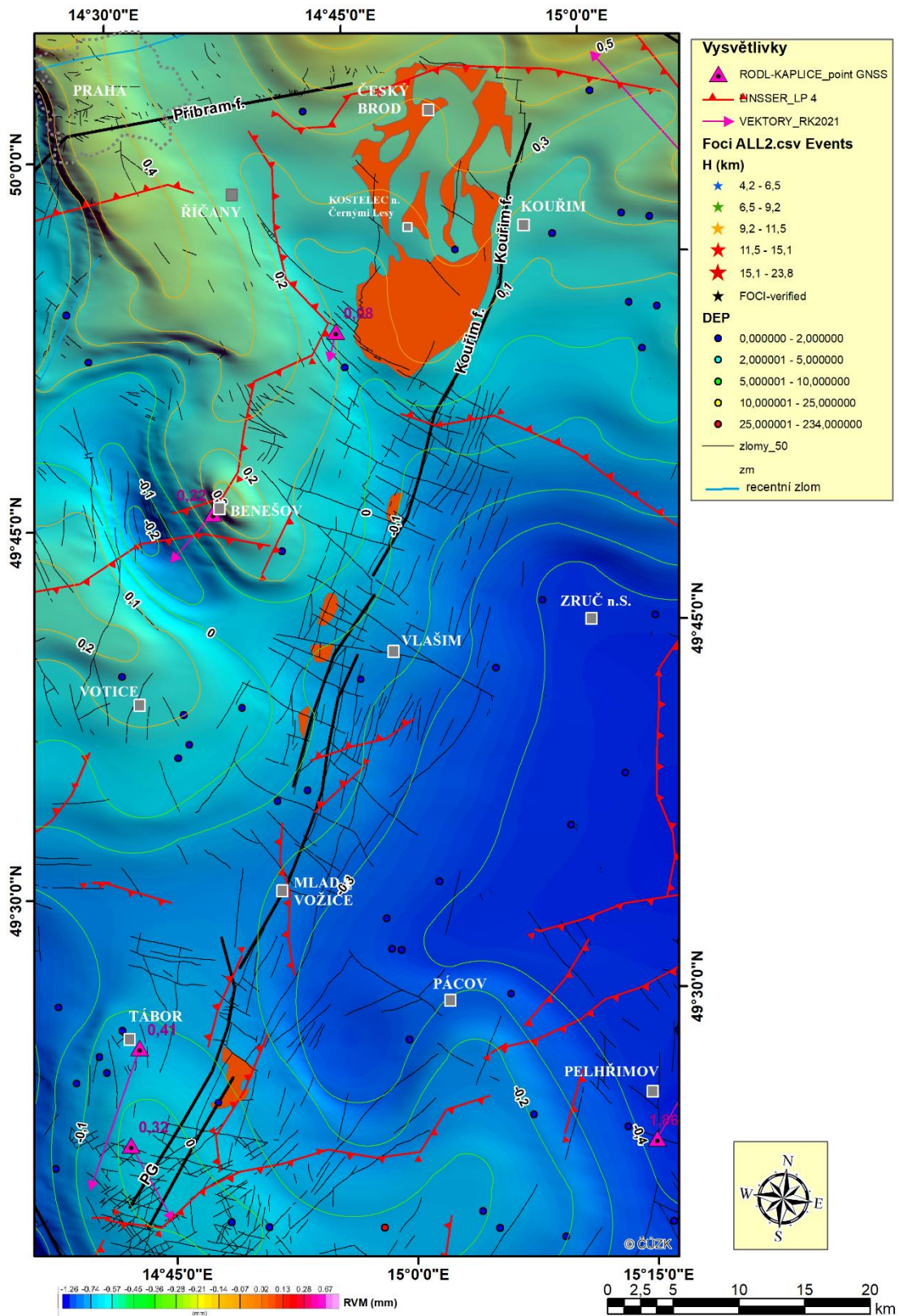


*Obr. 2 Přehledná mapa pro území Českého masivu s využitím výsledků zpracování dat vybraných permanentních stanic GNSS doplněná o vektory horizontálních rychlostí a z nich odvozené kompresní a extenzní vzájemné pohybové tendence mezi jednotlivými body.*

K poruchám Blanické brázdy patří i Drahotěšický zlom a paralelní Lhotický zlom, stejně jako východní okrajový zlom Lhotické pánve [7]. Celý systém je považován za součást Rodl-Kaplice-Blanice tektonického systému, jehož délka přesahuje 200km a je aktivní od paleozoika [6], [7]. Zlomy Blanické brázdy jsou popsány jako Západní (okrajové) poruchy (BF) a Východní (okrajové) zlomy (BF). Předpokládá se, že tyto poruchy jsou svislé a poklesového charakteru, jako zlom Drahotěšice. Pokles se předpokládá strmý na východ (západní poruchy) nebo na západ (východní zlomy).

Pro získání předběžných informací o charakteru recentních horizontálních pohybů ve větším rozsahu jihočeského regionu byla na základě dostupných dat vykonána podobně jako v předchozím příkladu regresní analýza souřadnicových časových řad hustší sítě aktivních permanentních stanic nacházejících se v zájmové oblasti BB a jejím okolí. Referenční rámec

byl v tomto případě vytvořen pomocí 7 permanentních stanic (WTZR, GOPE, LINZ, CLIB, CTAB, POUS, TUBO), ...



Obr. 3 Ukázka využití vektorů rychlostí z GNSS měření při studiu pohybových tendencí pro konkrétní tektonickou zónu z oblasti Blanicke brázdy. Výsledky doplňují geofyzikální hustotní rozhraní pro  $h=4$  km (Linsserovy indikace) a mapa vertikálních rychlostí (Vyskočil, 1996).

Ukázka na Obr. 3 poskytuje vhodná kritéria pro posouzení kinematiky a vertikálních pohybových tendencí v severním úseku zlomového systému. V kombinaci s mapou vertikálních pohybových tendencí [9] je patrné zvedání bloku na západ od BB. Na východě převládají až po Mladou Vožici poklesové tendence. Linsserovy indikace (hustotní rozhraní) pro hloubku 4 km ukazují, že v severní části, přímo v BB, se tektonické rozhraní nachází v homogenním prostředí převážně granitoidního charakteru. Výrazný kontakt mezi granitoidy a metamorfity tvoří až po Tábor.

Zajímavější jsou indikace směrů vektorů rychlostí, které mají opačné směry podle blanického zlomu. Západní blok se pohybuje k jihu (0,2 až 0,4 mm/rok) zatímco východní blok se pohybuje k severu (0,5 až 1 mm/rok). Tento překvapivý výsledek bude třeba nadále sledovat a zpřesňovat, především vzdálenost některých bodů na východě je více jak 10 km. Z této studie vyplynula řada dalších poznatků dotýkajících se kinematiky dalších okolních tektonických systémů (příbramský, pražský, systémy jihočeských pánví atd.), kterým se bude třeba v budoucnu podrobněji věnovat.

## Závěr

Zpracování nově získaných dat z permanentních i epochových GNSS sítí a jejich propojení s dřívějšími výstupy určitě přinese mnohé nové překvapivé výsledky, které mohou být následně použity pro účely geodynamického výzkumu možné recentní tektonické aktivity na celém území ČR. Základním předpokladem konzistence těchto výsledků je využití dat permanentních stanic pro vytvoření homogenního a stabilního souřadnicového rámce.

Komplexnější studie dynamiky litosféry Českého masívu musí být založeny na kombinaci geodetických, geologických a geofyzikálních dat a geofyzikálních výsledků, které umožní snadnější interpretaci recentních geodynamických procesů. Pro snadnější a rychlejší aktualizace databází pozorovaných jevů je potřebné realizovat přímá GNSS měření na vybraných místech podél zmíněných zlomů v síti s vyšší hustotou bodů, která budou doplněna měřeními geofyzikálních profilů a exogenní analýzou na základě leteckých snímků.

## Literatura

- [1] J. Bogusz, M. Figurski, K. Krosczyński, K. Szafranek: 2011, *Investigation of Environmental Influences to the Precise GNSS Solutions. Acta Geodyn. Geomater., Vol. 8, No. 1(161), 5–15.*
- [2] B. Miyahara, T. Furuya, T. Kodama, T. Yahagi, M. Murakami, T. Imakiire: 2014, *The New Application of GEONET for Multi-GNSS Observation and Height Determination with New Japanese Geoid Model. In: Proceedings of FIG Congress 2014, (7310), Kuala Lumpur, Malaysia.*
- [3] C. Bruyninx, EPN Central Bureau: 2021, *Guidelines for EPN Stations & Operational Centres. Dostupné z: [http://epncb.oma.be/\\_documentation/guidelines/guidelines\\_station\\_operational\\_centre.pdf](http://epncb.oma.be/_documentation/guidelines/guidelines_station_operational_centre.pdf)*
- [4] K.W. Hudnut, Y. Bock, J.E. Galetzka, F.H. Webb, W.H. Young: 2002, *The Southern California Integrated GPS Network (SCIGN). In: Seismotectonics in Convergent Plate Boundary, Eds. Y. Fujinawa and A. Yoshida, Terrapub, Tokyo, 167–189.*
- [5] J. Zurutuza, A. Caporali, M. Bertocco, M. Ishchenko, O. Khoda, H. Steffen, M. Figurski, E. Parseliunas, S. Berk, G. Nykiel: 2019, *The Central European GNSS Research Network (CEGRN) dataset. Data in Brief, Vol. 27. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.dib.2019.104762>.*

- [6] I. Prachař: 2012, *Lokalita JE Temelín. Komplexní charakteristika lokality z hlediska splnění geologických a seismologických požadavků na lokalitu jaderného zařízení. Nepublikovaný manuskript, Praha.*
- [7] P. Špaček, I. Prachař, J. Valenta, P. Štěpančíková, J. Švancara, J. Piskač, J. Pazdírková, R. Hanzlová, J. Havíř, J. Málek: 2010, *Paleoseismologické vyhodnocení průzkumu zlomových struktur v okolí JE Temelín. Závěrečná zpráva o řešení veřejné zakázky ve výzkumu a vývoji. MS, Ústav fyziky Země MU Brno, Energoprůzkum Praha spol. s r.o., Ústav struktury a mechaniky hornin AV ČR, v.v.i. Praha.*
- [8] *Monitoring permanentních stanic GNSS. Dostupné z: <https://oko.pecny.cz/monitor/>.*
- [9] P. Vyskočil: 1996. *Recent crustal movements, their properties and results of studies in the territory of Czech Republic, in: Seismicity, neotectonics, and recent dynamics with special regard to the territory of the Czech Republic. Research Institute of Geodesy, Topography and Cartography, Zdiaby, 42, No. 15, 77–120.*
- [10] R. Dach, S. Lutz, P. Fridez, P. Walser (Eds.): 2015, *Bernese GNSS Software Version 5.2. User Manual, Astronomical Institute, University of Bern, Bern Open Publishing.*

*Nerecenzováno*