

Ján HEFTY, Erik FROHMANN

NOVÝ TROJROZMERNÝ SÚRADNICOVÝ SYSTÉM PRE SLOVENSKO A JEHO REALIZÁCIA POMOCOU DRUŽICOVÝCH METÓD

Hefty J., Frohmann E.: *New Three-Dimensional Reference System for Slovakia and its Realisation Using the Satellite Methods.* Kartografické listy, 2000, 8, 4 figs., 2 tabs., 12 refs.

Abstract: The new three-dimensional reference system for Slovakia is proposed. The geometrical position will be defined by Cartesian geocentric coordinates with well-established relationship to the International and European terrestrial reference frames. Two alternative frames will be realised and maintained: one for surveying practice, the other for scientific purposes. The transformation to recently used frames is discussed.

Keywords: reference systems, Global Positioning System, 3D transformation models.

Úvod

Súčasnú geodetickú základu Slovenskej republiky tvoria polohové, výškové a gravimetrické siete. Pre potreby geodézie a kartografie v civilnom sektore je záväzným súradnicovým systémom Jednotnej trigonometrickej siete katastrálnej (S-JTSK) pre údaje vzťahujúce sa k horizontálnej polohe a Baltický výškový systém po vyrovnaní (Bpv) pre nadmorské výšky. Kvalita horizontálnej polohovej siete je vo veľkej miere ovplyvnená tým, že sieť S-JTSK vychádza z meraní, ktoré sa uskutočnili v druhej polovici 19. storočia a v prvej polovici 20. storočia. V sieti neboli uskutočnené astronomické merania a merania základníc, takže rozmer a orientácia siete na Besselovom elipsoide sa odvodili nepriamo z rakúskej vojenskej triangulácie (Cimbálník a Šimek, 1998). Od roku 1931 sa uskutočňovali nové merania vrátane astronomických a určenia 6 základníc s cieľom vybudovania novej Astronomicko-geodetickej siete (AGS). V S-JTSK sa však tieto merania už neuplatnili. Využili sa pri vybudovaní Súradnicového systému 1942 (S-42), ktorý sa však v civilnej geodetickej službe nevyužíva.

Z výsledkov meraní súčasnými geodetickými technológiami, najmä elektronickými diaľkometermi a družicovým Globálnym polohovým systémom (GPS) USA vyplýva ich nesúlad so súradnicami S-JTSK. Nové, presnejšie merania potom treba prispôbovať menej presnej sieti, alebo budovať samostatné jednocelové lokálne siete. Podobné problémy sú typické nielen pre Slovensko, ale vyskytujú sa vo väčšine európskych štátov, kde existujúce rovinné polohové súradnicové systémy boli vybudované začiatkom 20. storočia.

Významný pokrok pri geodetickom určovaní polohy nastal na prelome deväťdesiatych rokov, keď sa pre civilné účely začala vo veľkej miere používať progresívna meračská technológia GPS. Vývoj napredoval veľmi rýchlo vo všetkých oblastiach určovania polohy a súčasný stav je taký, že z globálneho hľadiska sú všetky kontinenty pokryté celosvetovou permanentnou sieťou GPS, ktorá zabezpečuje okamžitú polohu so sub-centimetrovou presnosťou. Je zrejmé, že tento vývoj sa prejavil aj v novom prístupe k budovaniu, zhusťovaniu a udržiavaniu kontinentálnych a štátnych geodetických polohových referen-

Doc. Ing. Ján HEFTY, PhD., Katedra geodetických základov, Stavebná fakulta STU, Radlinského 11, 813 68 Bratislava. E-mail: hefty@cvt.stuba.sk

Ing. Erik FROHMANN, PhD., PrOGPS, Na Pántoch 9-11, 831 06 Bratislava.

čných sietí. V mnohých európskych krajinách sa začali budovať nové, presnejšie geodetické základy a pôvodné horizontálne siete sa nahrádzajú novými trojrozmernými priestorovými sieťami. Cieľom tohto článku je opísať vývoj trojrozmernej polohovej siete ako súčasť nových geodetických základov Slovenska, diskutovať o vhodnom type súradníc pre štátny referenčný systém a definovať vzťahy medzi klasickými a modernými systémami.

Východiská pri definícii polohového súradnicového systému pre nové geodetické základy Slovenska

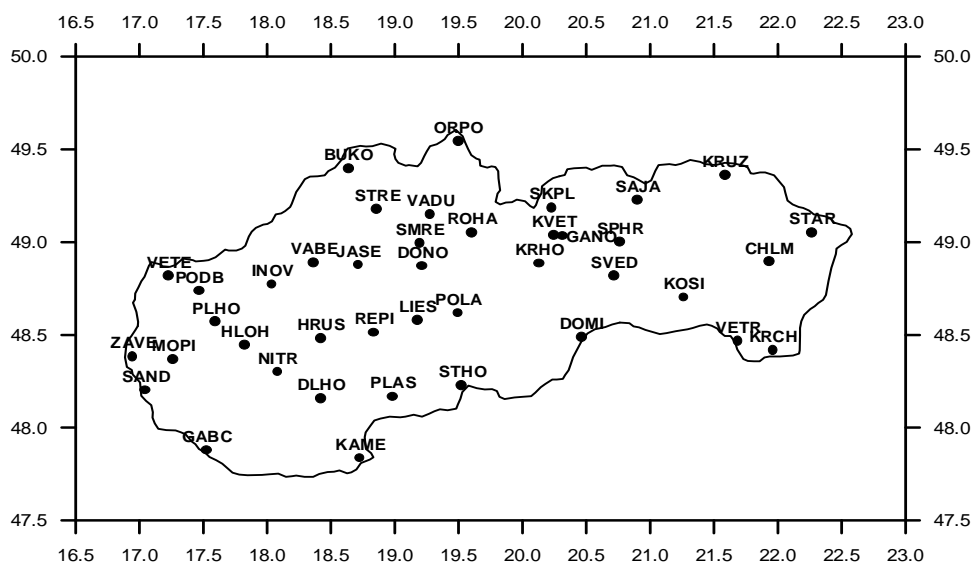
Vývoj metód kozmickej geodézie umožnil od roku 1983 budovať celosvetový referenčný súradnicový systém, ktorý presnosťou absolútnych súradníc (v prvej fáze ≈ 10 cm, v súčasnosti ≈ 1 cm) vyhovuje globálnym aj lokálnym potrebám geodézie. Od roku 1988 sa v rámci medzinárodnej spolupráce realizuje Medzinárodný terestrický referenčný systém (International Terrestrial Reference System – ITRS). Skladá sa zo súboru konštánt a algoritmov (McCarthy 1996) a súboru súradníc staníc a ich zmien v čase, ktoré prakticky definujú systém. Súradnice a rýchlosti referenčných bodov tvoria tzv. Medzinárodný referenčný rámec (International Terrestrial Reference Frame – ITRF), ktorý sa pravidelne obnovuje a spresňuje. Poslednou v súčasnosti publikovanou verziou je ITRF97 (Boucher a kol. 1999). Na definícii ITRF sa podieľajú merania metódami kozmickej a družicovej geodézie akými sú Interferometria z veľmi dlhých základníc (Very Long Baseline Interferometry – VLBI), Laserová lokácia družíc (Satellite Laser Ranging – SLR), systém DORIS (Doppler Orbit Determination and Radiopositioning Integrated on Satellite – Dopplerovské určovanie dráh a polohy systémom integrovaným na družici) a GPS. Existencia ITRS so súradnicami so sub-centimetrovou presnosťou veľmi výrazne ovplyvňuje vznik nových regionálnych a národných referenčných systémov tým, že poskytuje vhodný referenčný základ na ich tvorbu a udržiavanie.

Priame využitie ITRS na geodetické, zememeračské a mapovacie práce však nie je vhodné. Súradnice v ITRS sa menia v dôsledku pohybu litosférických platní, pre územie strednej Európy je ročný horizontálny pohyb asi 25 mm smerom na severovýchod. Preto sa pre Európsky kontinent navrhol špecifický systém – Európsky terestrický referenčný systém (European Terrestrial Reference System – ETRS), ktorý uvedené pohyby značne kompenzuje. Je odvodený z ITRS a presnosťou súradníc mu plne odpovedá. Pohyby bodov v ETRS sú však o jeden rád menšie ako v ITRS. Referenčná epocha pre ETRS je 1989.0, preto sa systém označuje aj ako ETRS89. Konkrétne realizácia súradníc je odvodená z príslušného aktuálneho ITRF, takže v súčasnosti poslednou verziou Európskeho referenčného rámca je ETRF97.

Rozširovanie ETRS, pôvodne definovaného len v niektorých krajinách západnej Európy, prebiehalo spočiatku len epochovými observačnými kampaňami GPS. V roku 1991 bolo do ETRS začlenených prvých 5 bodov na území ČSFR, z toho 3 na Slovensku. V súčasnosti sa ETRS udržiava a rozširuje najmä pomocou európskej siete permanentných staníc GPS – EUREF (European Reference Frame). Na Slovensku je v tejto sieti zatiaľ len jediná stanica Modra-Piesok (MOPI), prevádzkovaná Katedrou geodetických základov Štavebnej fakulty Slovenskej technickej univerzity (SvF STU) v Bratislave, ktorá pracuje od roku 1996.

V 90. rokoch sa začali prejavovať snahy nahradiť S-JTSK novým systémom. Prvým projektom v tejto oblasti, ešte v rámci ČSFR, bola kampaň CS-NULRAD-92 určenia geocentrických súradníc 19 bodov AGS pomocou GPS. Po rozdelení ČSFR sa na Slovensku v roku 1993 prišlo k novej koncepcii integrovaných geodetických základov. Základom je nová sieť SLOVGERENET (SLOVak Geodynamic Reference NETwork) (Priam 1997). V súčasnosti pozostáva z viac ako 40 bodov, ktoré sú špeciálne stabilizované, tak aby bolo zabezpečené ich spojenie s podložími so sub-milimetrovou presnosťou. Prvé meranie SLOVGERENET technológiou GPS sa uskutočnilo v roku 1993, opakované kampane boli v rokoch 1995, 1998 a 1999. Okrem toho boli k SLOVGERENET pripo-

jené vybrané body AGS (1996) a 1. rádu S-JTSK (1997). Tri body SLOVGERENET, ktoré sú od roku 1994 súčasťou Stredoeurópskeho geodynamického projektu (Central Europe Regional Geodynamics Project – CERGOP), sa pravidelne monitorujú v rámci Stredoeurópske geodynamické siete GPS. Sieť bodov SLOVGERENET meraných v rokoch 1993 a 1995 je na obr. 1. Slovensko v súčasnosti disponuje viac ako 150 bodmi určenými metódou GPS, ktoré boli zamerané technológiou vyhovujúcou z hľadiska dĺžky observácií a možnosti pripojenia k ETRS, alebo SLOVGERENET. Problémom je však stabilizácia, ktorá vyhovuje prísnyim požiadavkám na presnosť len pri bodoch SLOVGERENET a bodoch niektorých lokálnych sietí.



Obr. 1 Body SLOVGERENET merané v rokoch 1993 a 1995

Súbežne s budovaním geometrickej súčasti nových geodetických základov Slovenska pomocou GPS prebiehajú na Slovensku práce súvisiace s ďalšími zložkami integrovanej geodetickej siete – určovanie nadmorských výšok SLOVGERENET, určovanie priebehu kvázigeoidu a jeho spresňovanie, astronomické a gravimetrické merania (Priam 1997).

Návrh koncepcie a realizácie nového súradnicového systému

Pri budovaní polohovej zložky nových geodetických základov vystupuje niekoľko závažných skutočností, ktoré významne menia doterajšie chápanie referenčných polohových sietí:

- Geodetická sieť určená metódami kozmickej geodézie je trojrozmerná, pričom presnosť polohy bodov je prakticky rovnocenná vo všetkých troch súradnicových zložkách. Referenčné body na povrchu Zeme tvoria priestorový útvar – polyéder, ich poloha je výlučne geometrickeho charakteru a nie je ovplyvnená tiažovým poľom Zeme. Poloha bodov sa udáva v geocentrickom súradnicovom systéme, elipsoidické súradnice vzťahnuté k medzinárodnému elipsoidu sú odvodené z karteziánskych súradníc. Geometrická časť integrovaných geodetických základov je doplnená ďalšími atribútmi, akými sú nadmorská výška, výška kvázigeoidu, tiažové zrýchlenie, zvislicové odchýlky, gradienty tiažového zrýchlenia – veličiny, ktoré súvisia s miestnym tiažovým poľom.
- Systém budovania regionálnych (štátnych) polohových súradnicových systémov vychádza z Medzinárodného terestrického referenčného rámca ITRF. Technológiou, kto-

rá zabezpečuje s potrebnou presnosťou geocentricitu ITRF je SLR. Orientácia v priestore a rozmer ITRF sú odvodené najmä z VLBI. Metóda GPS slúži na zhustenie siete bodov určených SLR a VLBI. Na určovanie súradníc referenčných bodov pre regionálne a štátne súradnicové systémy sa využíva sieť permanentných staníc GPS, ktoré sú umiestnené v blízkosti staníc vybavených VLBI alebo SLR.

- Dostatočne hustá sieť permanentných staníc GPS v jednotlivých štátoch umožní v budúcnosti efektívne určovať nové referenčné body priamo v záujmových oblastiach bez nutnosti pripojenia na iné body ako permanentné stanice. Nadviazanie na permanentné stanice bude aj rozhodujúcou metódou zhusťovania štátneho referenčného rámca.
- Neodlučiteľnou vlastnosťou geodetickej siete bodov definovanej geocentrickými súradnicami je jej kinematický charakter. Vysoká presnosť súradníc určených družicovými metódami vyžaduje, aby pre každý polohový údaj bola uvedená aj epocha, ku ktorej sa meranie vzťahuje. Globálne a regionálne geodynamické javy spôsobujú, že geocentrické súradnice referenčných bodov sú funkciami času.

Meranie a spracovanie regionálnych sietí GPS, na ktoré sa obvykle využíva vedecký softvér, napr. softvér GPS Univerzity v Berne (Rothacher a Mervart 1996), vyúsťuje do riešenia siete, ktorá je vzťahnutá k referenčnému rámcu ITRF platnému v epoche merania. Z hľadiska geometrického tvaru siete a relatívnych vzťahov v sieti súradnice zodpovedajú aktuálnemu rozloženiu bodov. Meraniami v rozličných epochách a spracovaním v rôznych verziách ITRF sa však dostávame k heterogénnym absolútnym geocentrickým súradniciam, ktoré nemožno bezprostredne vzájomne kombinovať. Následnou etapou spracovania je transformácia individuálnych riešení do jednotného referenčného systému.

Pri voľbe vhodného polohového referenčného systému pre konkrétny štát, podobne ako pri definícii ITRS, treba sa venovať teoretickej koncepcii (definícia, štandardy, typ súradníc ap.) a praktickej realizácii (sieť referenčných bodov – referenčný rámec). V súčasnosti je zrejme, že referenčný systém bude s ohľadom na realizáciu pomocou družicových techník vychádzať z trojrozmerných priestorových súradníc. Okrem toho je spôsob definície štátneho referenčného systému determinovaný požiadavkami na zohľadnenie časovej variability súradníc. Základnými alternatívami sú:

- Statický systém, ktorý neuvažuje zmeny súradníc v čase. Príkladom je S-JTSK. Pri väzbe na celosvetové systémy odvodené z družicových meraní rozdiely v súradniciach statického systému dosiahnu desiatky cm za niekoľko rokov.
- Dynamický systém vzťahnutý k medzinárodnému systému, napr. k ITRS. Systém tvoria súradnice a modely pohybu referenčných bodov vzťahnuté k určitej epoche. Takýto systém najlepšie vystihuje aktuálnu geometriu a priestorovú polohu referenčných bodov a je nevyhnutný pri spracovaní meraní metódami družicovej geodézie. Súradnice sa však v čase menia, pre body v Európe sú to zmeny do 30 mm/rok, čo zrejme nemôže vyhovovať geodetickej praxi.
- Semi-dynamický systém vychádza z dynamického systému. V ňom sa však kompenzujú pohyby spoločné celej záujmovej oblasti. Uvažujú sa iba diferenciálne pohyby bodov, ktoré sú obvykle až o 1 rád menšie ako globálne pohyby. Príkladom je ETRS.

Medzinárodná geodetická asociácia odporúča ETRS89 ako spoločný jednotný súradnicový systém pre celú Európu. Je preto výhodné zvoliť geocentrický semi-dynamický systém ETRS ako východiskovú koncepciu aj pre Slovensko. Referenčný súradnicový systém Slovenska bude v princípe vychádzať z ITRS a jeho aktuálnych realizácií ITRF s tým, že priebežne uskutočňované merania sa budú transformovať do ETRS. Transformačné parametre sa publikujú súčasne s každou novou verziou ITRF. Súradnice východiskových referenčných bodov (polohová zložka referenčného rámca) vychádzajú z výsledkov SLOVGERENET získaných v rokoch 1993-1999, ako aj z iných medzinárodných a celoštátnych projektov. Pohyby referenčných bodov sú odvodené z opakovaných meraní na podmnožine bodov SLOVGERENET. Po novom opakovanom meraní sa súradnice aj rýchlosti budú aktualizovať. Pre väčšinu aplikácií v geodézii a kartografii sa môžu používať „stredné“ súradnice, ich rozdiel oproti skutočným môže dosiahnuť maxi-

málne niekoľko mm/rok. Diferenciálne pohyby treba uvažovať pri špeciálnych geodetických prácach

Referenčná epocha slovenského referenčného systému bude odlišná od referenčnej epochy ETRS, ktorá je 1989.0. Dôvodom je, že na Slovensku sa merania v SLOVGERENET uskutočnili až od roku 1993 a pokračujú do súčasnosti. Z hľadiska vnútornej štruktúry siete a minimálnych disperzií súradníc referenčných bodov je treba, aby základná epocha bola v rámci časového intervalu meraní použitých na definíciu siete. Na transformáciu do ETRS89 možno využiť európske permanentné stanice GPS, ktorých rýchlosti sú spoľahlivo určené z dlhodobých meraní pomocou GPS a niektorou z techník VLBI alebo SLR. Merania na týchto bodoch sú obvykle začlenené v spoločnom spracovaní SLOVGERENET. Počet európskych staníc vyhovujúcich na tieto účely je do 10 (Hefty a Frohmann 1998a, Hefty 1999).

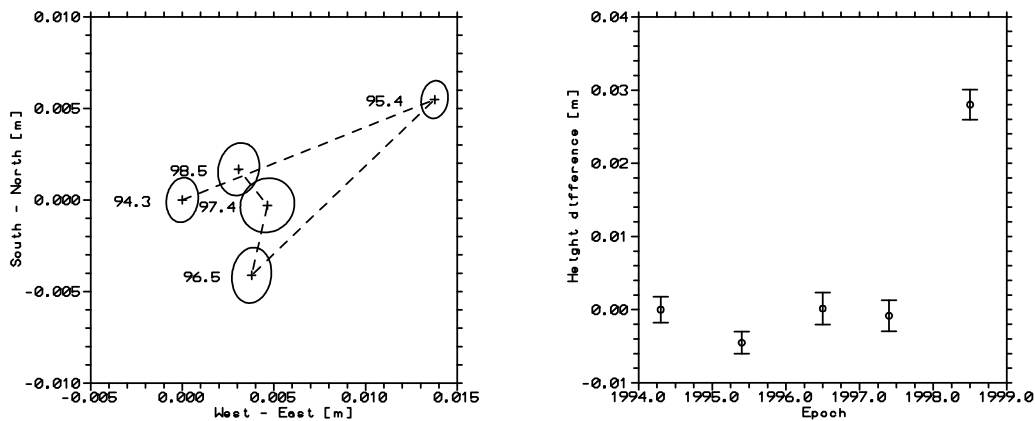
Predstavu o veľkosti zmien súradníc bodov SLOVGERENET poskytuje obr. 2, ktorý znázorňuje polohové zmeny troch bodov určené v projekte CERGOP. Znázornené sú relatívne horizontálne polohy a výšky v systéme ETRS vzťahnuté k epoche 1994.3 a ich stredné elipsy chýb, resp. stredné chyby. Uvedené grafy predstavujú výsledky, v ktorých sú zahrnuté aj niektoré systematické vplyvy, ktoré sa metódou spracovania nepodarilo úplne eliminovať, napr. korekcie polohy fázových centier antén GPS, atmosférické vplyvy, ochranný kryt na anténe MOPI. Napriek tomu je zrejme, že horizontálne pohyby v ETRS nepresahujú 10 mm/rok.

Z praktického hľadiska navrhujeme používať súčasne dva súbory súradníc v semi-dynamickom systéme:

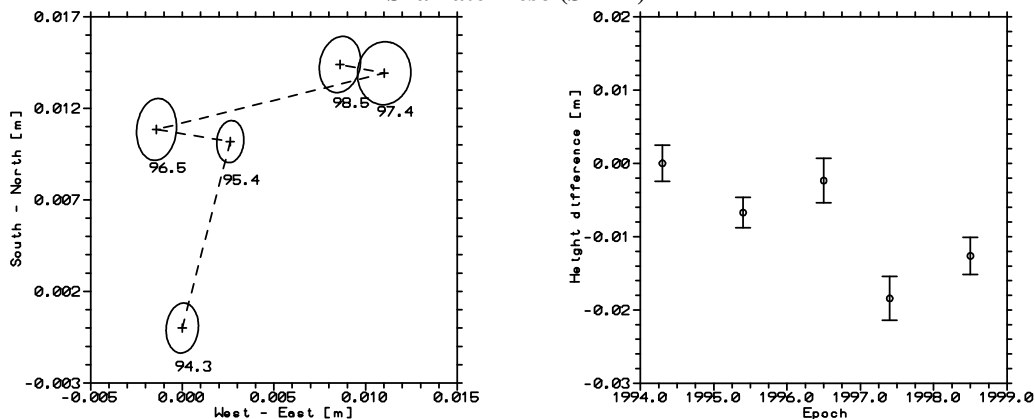
- Súbor „stredných“ súradníc – stabilný systém, bez zmien v čase. Tieto súradnice nebudú ovplyvnené prípadnými horizontálnymi a vertikálnymi zmenami v polohe bodov. Ich rozdiel oproti skutočným súradniciam v ETRS môže dosiahnuť niekoľko mm/rok. Treba však zdôrazniť, že z regionálneho pohľadu sú relatívne pohyby bodov menšie, a tak sa v relatívnych meraniach na niekoľkokilometrové vzdialenosti zmeny súradníc neprejavajú, alebo prejavajú v rozsahu, ktorý je pre praktické aplikácie zanedbateľný. Takýto systém je vhodný pre väčšinu prác v geodézii, mapovaní, katastri, kartografii, GIS ap. Predpokladá sa, že všetky geodetické body základného podrobného bodového poľa budú mať tieto „stredné“ súradnice.
- Súbor bodov so súradnicami vzťahnutými k referenčnej epoche a súborom rýchlostí, ktorým sa definuje kinematika referenčného rámca. Rýchlosti vyjadrujú iba diferenciálne pohyby bodov v rámci Eurázijskej tektonickej platne. Súradnice a rýchlosti sa po získaní informácií z nových meraní priebežne aktualizujú. V prípade dostatočne dlhých sérií meraní v odôvodnených prípadoch bude možné uvažovať aj iné ako lineárne zmeny polohy, napr. sezónne. Kinematické súradnice bude mať iba vybraná podmnožina geodetických bodov so špeciálnou stabilizáciou a pravidelne opakovanými meraniami metódou GPS. V súčasnosti referenčný rámec takto definovaného systému tvoria body SLOVGERENET a niekoľko ďalších bodov v rámci špeciálnych projektov vybudovaných na výskum geodynamiky. Systém je vhodný na vedecké a výskumné účely a špeciálne aplikácie pri výstavbe a monitorovaní významných stavieb (veľké vodné diela, atómové elektrárne ap.)

S voľbou referenčného systému súvisí aj typ používaných súradníc. Základom sú karteziánske geocentrické súradnice X, Y, Z , ktoré možno jednoznačne transformovať na súradnice elipsoidické B, L, H (na elipsoide GRS 80). Dôvodom priority geocentrických súradníc je perspektíva stále rozsiahlejšieho využívania GPS v geodézii a kartografii. Pre aplikácie v projekcii, inžinierskej geodézii, mapovaní a katastri bude treba definovať nové kartografické zobrazenie, ktoré umožní použitie rovinných súradníc (Vaľko 1998). Spolu s rovinnými súradnicami sa bude udávať aj informácia o elipsoidickej výške, aby bol možný jednoznačný prevod medzi kartografickými a geocentrickými súradnicami.

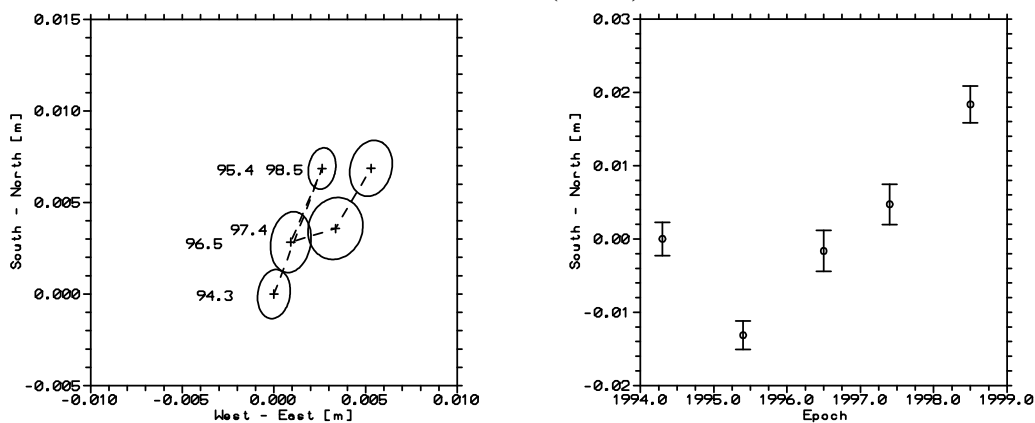
Modra-Piesok (MOPI)



Skalnaté Pleso (SKPL)



Strážna hora (STHO)



Obr. 2 Relatívne polohy a výšky bodov SLOVGERENET monitorovaných v projekte CERGOP v období 1994.3 - 1998.5. Znáznornené sú aj stredné elipsy chýb polohy a stredné chyby výšky z jednotlivých kampaní

Vzťah medzi klasickými súradnicovými systémami a systémom definovaným pomocou družicových metód

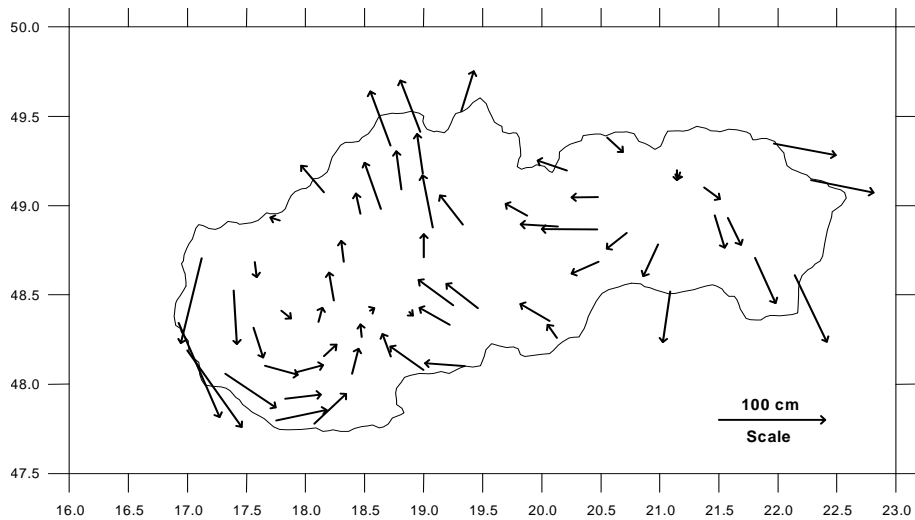
V období prechodu od súčasných záväzných súradnicových systémov k novému trojrozmernému systému bude treba používať paralelne obidva systémy a definovať transformačné vzťahy medzi oboma systémami. Metódy transformácie medzi dvoma sústavami trojrozmerných karteziánskych súradníc, alebo medzi sústavami elipsoidických súradníc B, L sú známe, napr. metódy Helmertovej lineárnej konformnej transformácie medzi dvoma homogénnymi súbormi súradníc (Leick 1995), ale vzhľadom na lokálne deformácie klasických referenčných rámcov, ktoré sú spojené s meračskými metódami a technológiami použitými pri ich vzniku, sú takéto lineárne transformácie vhodné len pre obmedzený rozsah územia. Pri S-JTSK polohovú presnosť 10-15 cm na identických bodoch možno dosiahnuť na územiach s rozmermi do 20-30 km.

Pri trojrozmerných priestorových transformáciách (najvhodnejších pre systémy určené družicovými metódami) vstupujú do výpočtov karteziánske súradnice X, Y, Z identických bodov. Pri transformácii rovinných súradníc v S-JTSK na priestorové súradnice treba poznať aj nadmorské výšky a výšky kvázigeoidu nad Besselovým elipsoidom.

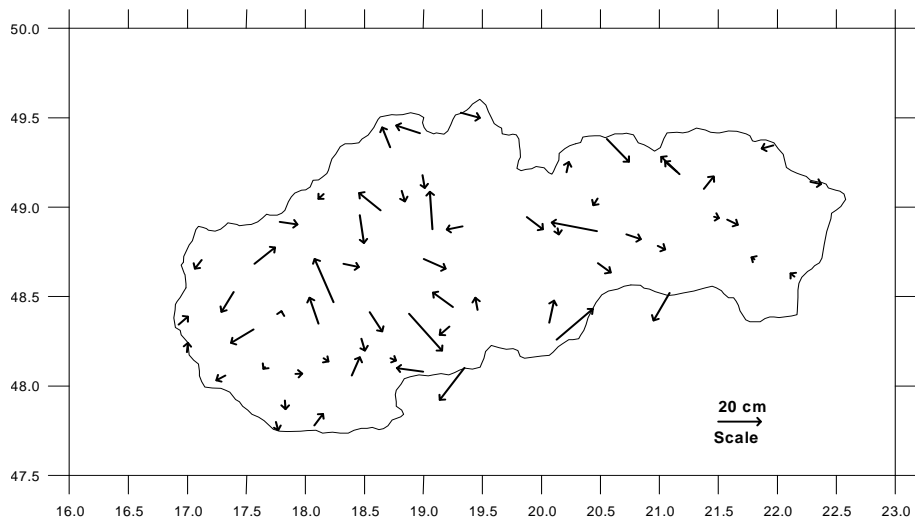
Pre rozsiahlejšie oblasti, prípadne pre územie celého Slovenska treba použiť komplexnejšie transformačné modely, ktoré umožňujú vystihnúť aj nelineárne vzťahy medzi súradnicami transformovaných referenčných rámcov. Matematické postupy, všeobecne nazývané ako polynomicke transformácie, definované pre priestorové súradnice (Hefty a Frohmann 1998b, 2000) znamenajú rozšírenie lineárnych modelov o kvadratickú, kubickú a bi-kvadratickú formu, resp. o použitie Legendreových polynómov. Softvér vyvinutý pre rozličné typy lineárnych i polynomických transformácií je opísaný v (Frohmann a Hefty 1999). Zvýšením počtu parametrov transformácie sa získa lepšia zhoda súradnicových rámcov na identických bodoch, najmä však kvalitnejšie nové súradnice neidentických bodov. Počet parametrov transformácie n_p je obmedzený počtom identických bodov n_i . Ako vyplýva z analýz (Hefty a Frohmann 2000), optimálnym je typ transformácie, pre ktorý platí $n_p \approx n_i \div 1,5 n_i$.

Možnosti transformácií medzi S-JTSK a ETRS ilustrujeme na príklade jednotného transformačného kľúča získaného na základe 60 identických bodov. Ide o vybrané body AGS a ŠTS 1. rádu, ktoré majú súradnice v ETRS89 určené pomocou GPS (Hefty, 1999). Horizontálne rezíduá na identických bodoch získané 7-parametrovou podobnostnou transformáciou znázorňuje obr. 3. Vyplýva z neho ich jednoznačne systematický charakter v dôsledku regionálnych deformácií S-JTSK. Štandardné odchýlky v horizontálnej polohe σ_n a σ_e , ako aj vo výške σ_v dosahujú hodnoty do 0,30 m (tab.1). Maximálne hodnoty horizontálnych rezíduí na identických bodoch sú do 1 m. Je zrejmé, že na geodetické účely lineárny model s jedným súborom parametrov nie je vhodný pre celé Slovensko.

Výsledky transformácie medzi S-JTSK a ETRS89 pomocou polynomickeho modelu s kubickou formou sú na obr. 4, ktorý znázorňuje horizontálne rezíduá na identických bodoch. Štandardné odchýlky (tab. 2) svedčia (spolu s obr. 4) o významnom poklese horizontálnych rezíduí na identických bodoch v porovnaní s lineárnym modelom podobnostnej transformácie. Maximálne hodnoty sú 0.25 m, rezíduá už nemajú zjavne systematický charakter. Z toho vyplýva, že 60-parametrová kubická transformácia je vhodnou aproximáciou systematických chýb S-JTSK na úrovni 20-30 cm. Vernejšie aproximácie bude možné získať až po uskutočnení nových meraní na identických bodoch S-JTSK a rozšírení ich počtu na 150-200. Dôležité tiež bude zabezpečiť rovnomerné rozloženie identických bodov. Transformácia výškovej zložky S-JTSK je menej úspešná, nakoľko nadmorské výšky väčšiny identických bodov boli určené trigonometrickou metódou s podstatne nižšou presnosťou, než s akou sú určené horizontálne súradnice S-JTSK.



Obr. 3 Horizontálne rezíduá lineárnej konformnej 7-parametrovej transformácie S-JTSK do ETRS89



Obr. 4 Horizontálne rezíduá polynomickej 60-parametrovej transformácie s kubickou formou pre prevod S-JTSK do ETRS89

Tab. 1 Štandardné odchýlky rezíduí 7-parametrovej lineárnej podobnostnej transformácie systému JTSK do ETRS89 v polohe (zložky n a e) a vo výške (zložka v)

σ_0 (m)	σ_n (m)	σ_e (m)	σ_v (m)
0,290	0,305	0,248	0,296

Tab. 2 Štandardné odchýlky 60-parametrovej polynomickej transformácie s kubickou formou na prevod S-JTSK do ETRS89

σ_0 (m)	σ_n (m)	σ_e (m)	σ_v (m)
0,187	0,074	0,070	0,244

Záver

Zavedenie nového geodetického referenčného systému na Slovensku je významná zmena, ktorú bude treba uskutočniť v blízkej budúcnosti. Cieľom článku bolo naznačiť trendy vývoja v tejto oblasti. Z možných variantov ako najvýhodnejšie riešenie sa ukazuje semi-dynamický systém kompatibilný s ETRS89. Referenčný rámec bude mať presne definované transformačné vzťahy s aktuálnymi verziami globálneho ITRF a kontinentálneho ETRF. Základnou technológiou budovania, udržiavania a zhŕňovania nového referenčného rámca Slovenska je GPS. Definícia polohy vychádza z geocentrických karteziánskych priestorových súradníc, ktoré budú k dispozícii v dvoch variantoch:

- „Stredné“, v čase nemenné súradnice, ktoré budú mať všetky geodetické body v novom systéme. Ich absolútna polohová presnosť vzhľadom na geodynamické javy bude niekoľko centimetrov, relatívna presnosť bude zodpovedať možnostiam technológie GPS. Tieto body budú vyhovovať všetkým nárokom v oblasti inžinierskej geodézie, mapovania, katastra, GIS, kartografie ap.
- Súbor súradníc a rýchlostí vybranej podmnožiny bodov vzťahnutý k určitej epoche. Presnosť polohovej informácie bude milimetrová. Základom referenčného rámca sú body SLOVGERENET, na ktorých sa uskutočňujú opakované merania pomocou GPS. Referenčný rámec sa bude priebežne aktualizovať na základe nových informácií získaných z meraní GPS. Systém bude určený na vedeckovýskumné využitie, monitorovanie polohových zmien a špeciálne projekty vyžadujúce najvyššiu presnosť.

Základnou formou súradníc budú karteziánske súradnice. Okrem toho budú k dispozícii aj elipsoidické súradnice a geodetické výšky a po zavedení vhodného kartografického zobrazenia aj rovinné súradnice. Navrhovaný polohový referenčný systém spolu s informáciami o nadmorskej výške, výške kvázigeoidu, gravitačnom zrýchlení a zvislicových odchýlkach referenčných bodov bude tvoriť integrované geodetické základy Slovenska.

*PodĎakovanie: Článok vznikol pri riešení grantovej úlohy VEGA 1/5060/98.
Autori oceňujú finančnú podporu udelenú tomuto projektu.*

Literatúra

- BOUCHER, C., ALTAMIMI, Z., SILLARD, P. (1999). The 1997 International Terrestrial Reference Frame (ITRF97). *IERS Technical Note 27*. Paris, Observatoire de Paris.
- CIMBÁLNÍK, M., ŠIMEK, J.(1998). Geodetické polohové systémy na území České republiky, ve světe a v Evropě. In: Kolektív aut.: *Geodetické referenční systémy v České republice*. Praha, VÚGTK.
- FROHMANN, E., HEFTY, J. (1999). Concept of New National Geodetic Reference System in Slovakia. *Slovak Journal of Civil Engineering*, VI, No. 4, 1-7.
- HEFTY, J. (1999). Určenie súradníc bodov SLOVGERENET, vybraných bodov ŠAGS a ŠTS 1. rádu a ich kovariančnej matice v referenčnom systéme ETRS89 pri rešpektovaní štatistických charakteristík pripájacích sietí. *Záverečná správa riešenia projektu Integrovaná geodetická sieť*, etapa 4d. Bratislava, STU.
- HEFTY, J., FROHMANN, E. (1998a). Definícia a realizácia referenčného rámca ETRS-89 na Slovensku – problémy a východiská. In: *Zborník vedeckých prác „60 výročie Stavebnej fakulty STU v Bratislave“*, Sekcia Geodézia a kartografia. Bratislava, STU, 1-25 – 1-30.
- HEFTY, J., FROHMANN, E. (1998b). Nelineárne trojrozmerné transformácie a ich využitie na prevod súradníc medzi S-JTSK a ETRS 89. *Geodetický a kartografický obzor*, 44, 6, 121-126.

- HEFTY, J., FROHMANN, E. (2000). Polynomial Models for 3-D Transformation of Non-homogeneous Regional Networks into ETRS. *Proceedings of the Symposium EUREF'99*. Prague 1999 (v tlači).
- LEICK, A. (1995). *GPS Satellite Surveying*. New York, J. Willey & Sons.
- MCCARTHY, D.: IERS Conventions (1996). *IERS Technical Note 21*. Paris, Observatoire de Paris.
- PRIAM, Š. (1997). Budovanie nových integrovaných geodetických základov Slovenska. *Geodetický a kartografický obzor*, 43, 2, 32-36.
- ROTHACHER, M., MERVART, L. (1996). *BERNESE GPS Software* Version 4.0. Bern, Astronomical Institute, University of Bern.
- VALKO, J. (1998). Survey of acceptable cartographic projections. *Slovak Journal of Civil Engineering*, VI, No. 1-2, 6-12.

S u m m a r y

New three-dimensional reference system for Slovakia and its realisation using the satellite methods

The paper deals with the proposal for geometric part of the new integrated three-dimensional reference system in Slovakia as a replacement of recently used separate National Horizontal Network S-JTSK and National Height Network Bpv.

The geometric three-dimensional network will be defined on the basis of space and satellite observation techniques. The national reference system is derived from the International Terrestrial Reference System (ITRS) using satellite observations of the U.S. Global Positioning System (GPS). The Slovak National Geodynamic Reference Network (SLOVGERENET) shown in Fig. 1 defines the reference frame. This network is regularly observed by GPS to enable determination of both coordinates and velocities of the reference points.

The satellite precise geodetic observations that are referred to a global terrestrial frame reflect the kinematics of the reference points. Three alternatives of reference system according to the treatment of the time dependency of network coordinates are discussed: Static, dynamic and semi-dynamic system. It is shown that for the national system in Slovakia the best choice is the semi-dynamic system consistent with the European Terrestrial Reference System (ETRS). Fig 2 shows an example of coordinate changes in ETRS. We propose to use two sets of coordinates: mean positions for application in surveying, cadastre and cartography without velocity information and a set of selected regularly monitored points with determined both position and velocity for high precision application and scientific purposes.

The relationship between the classical S-JTSK, Bpv on the one side and the new satellite reference frame on the other side is mathematically defined by polynomial transformations proposed by the authors of this paper. Figs 3 and 4 show the comparison of horizontal residuals obtained from linear and polynomial models.

Fig. 1 Points of SLOVGERENET observed in 1993 and 1995

Fig. 2 Relative positions and highs of SLOVGERENET sites monitored within the CERGOP project from 1994.3 to 1998.5. The standard ellipses for horizontal positions and standard deviations of height determination are shown too.

Fig. 3 Horizontal residuals from linear conform 7-parameter transformation from S-JTSK to ETRS89.

Fig. 4 Horizontal residuals from polynomial 60-parameter transformation model with cubic form applied to the transformation of S-JTSK into ETRS89

Tab. 1 RMS residuals from 7-parameter linear conform transformation of S-JTSK into ETRS89 in position (n and e components) and in height (v component).

Tab. 2 RMS residuals from 60-parameter polynomial transformation of S-JTSK into ETRS89.

Lektoroval:

**Prof. Ing. Ján Melicher, PhD.,
Katedra geodetických základov,
Stavebná fakulta STU, Bratislava**