

Vedecká rada Stavebnej fakulty  
Slovenskej technickej univerzity v Bratislave

**Ing. Juraj Papčo**

Autoreferát dizertačnej práce

**MONITOROVANIE DEFORMÁCIÍ ZEMSKEJ KÔRY VO  
VYSOKOHORSKOM PROSTREDÍ**

na získanie  
vedecko-akademickej hodnosti philosophiae doctor

v odbore doktorandského štúdia:  
39-31-9 Geodézia a geodetická kartografia

Bratislava 2009

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia na Katedre geodetických základov Stavebnej fakulty Slovenskej technickej univerzity v Bratislave.

**Predkladateľ:** Ing. Juraj Papčo

Katedra geodetických základov  
Stavebná fakulta, STU v Bratislave  
Radlinského 11, 813 68 Bratislava

**Školiteľ:**

Doc. Ing. Marcel Mojzeš, PhD.  
Katedra geodetických základov  
Stavebná fakulta, STU v Bratislave  
Radlinského 11, 813 68 Bratislava

**Oponenti:**

Prof. Ing. Jan Kostelecký, DrSc.  
Katedra vyšší geodézie  
Fakulta stavební, ČVUT v Praze  
Thákurova 7, 166 29 Praha 6

Prof. Ing. Otakar Švábenský, CSc.  
Ústav geodézie  
Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně  
Veveří 95, 602 00 Brno

Doc. RNDr. Miroslav Bielik, DrSc.  
Katedra aplikovanej a environmentálnej geofyziky  
Prírodovedecká fakulta, Univerzita Komenského v Bratislave  
Mlynská dolina, 842 15 Bratislava 4

Autoreferát bol rozoslaný: .....

Obhajoba dizertačnej práce sa koná ..... o ..... h  
pred komisiou pre obhajobu dizertačnej práce v odbore doktorandského štúdia vymenovanou  
predsedom spoločnej odborovej komisie .....

39-31-9 Geodézia a geodetická kartografia  
na Katedre geodetických základov SvF STU v Bratislave, Radlinského 11, 813 68 Bratislava

Predseda spoločnej odborovej komisie:  
Prof. Ing. Alojz Kopáčik, PhD.  
Katedra geodézie SvF STU  
Radlinského 11, 813 68 Bratislava

## OBSAH

<b>1 ÚVOD .....</b>	<b>1</b>
<b>2 CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE .....</b>	<b>1</b>
<b>3 TEORETICKÉ ASPEKTY SPRACOVANIA MERANÍ GPS.....</b>	<b>2</b>
<b>4 TEORETICKÉ ASPEKTY URČENIA NAPĚTÍ A DEFORMÁCIÍ .....</b>	<b>4</b>
<b>5 PRAKTICKÝ EXPERIMENT – GEODYNAMICKÁ SIEŤ TATRY .....</b>	<b>7</b>
<b>5.1 Geologická štruktúra a tektonický charakter územia Vysokých Tatier .....</b>	<b>7</b>
<b>5.2 Geodynamická sieť TATRY a jej realizácia.....</b>	<b>9</b>
<b>5.3 Meranie GPS v sieti TATRY .....</b>	<b>11</b>
<b>5.4 Spracovanie meraní GPS.....</b>	<b>11</b>
5.4.1 Spracovanie epochových meraní GPS v sieti TATRY .....	12
5.4.2 Určenie rýchlostí bodov z epochových meraní GPS v oblasti Tatier .....	14
5.4.3 Analýza časových radov z permanentných staníc v regióne Vysokých Tatier .....	16
<b>5.5 Určenie poľa deformácií a napätí v oblasti Vysokých Tatier .....</b>	<b>17</b>
<b>5.6 Zhodnotenie výsledkov s uvážením geologického charakteru územia .....</b>	<b>19</b>
<b>6 PRÍNOS PRE VEDU A PRAX .....</b>	<b>20</b>
<b>7 ZÁVER.....</b>	<b>21</b>
<b>8 SUMMARY.....</b>	<b>22</b>
<b>9 LITERATÚRA .....</b>	<b>23</b>



# 1 ÚVOD

Človeka od nepamäti zaujímal, čo sa deje s povrchom po ktorom chodil. Počas celej histórie bol svedkom, ako sa vplyvom veľkých zemetrasení, sopečnej činnosti Zem mení, ako sa vytvára nová pevnina, resp. ako sa stráca vplyvom poklesov morského dna. Už Archimedes si vzhľadom na svoj slávny výrok „dajte mi pevný bod a ja pohnem Zemou“ uvedomoval, že Zem podlieha zmenám, deformáciám, že ona samotná a aj všetko na nej je v pohybe. Človek najskôr uvedené javy zapisoval, ale ako sa rozvíjalo jeho vedecké poznanie, chcel uvedené skutočnosti merať, poznať ich príčinu a predpovedať dôsledky. Kvantifikovať uvedený pohyb dopomohol aj prudký rozvoj meracej techniky, ktorá nám postupne od 50-tich rokov minulého storočia umožňovala určiť presnú vzdialenosť medzi bodmi aj pre veľmi dlhé základnice. Stále však zostávala nezodpovedaná otázka, aké sú vnútroplatinové pohyby, ako sa vzájomne pohybujú jednotlivé časti danej litosférickej platne. Pri riešení tohto problému sa v súčasnej dobe veľmi efektívne využívajú globálne navigačné družicové systémy (GNSS). Tieto nám umožňujú určiť polohu bodov v záujmovej oblasti s vysokou presnosťou pri riešení rôznych regionálnych, ale aj lokálnych projektoch. Pri určovaní tektonických zmien sa snažíme odhaliť a popísať prejavy endogénnych, horotvorných procesov a nie prejavy lokálnych efektov, ktoré sú výsledkom pôsobenia exogénnych procesov.

Dizertačná práca je zameraná na určovanie 3D deformácií zemskej kôry s využitím výsledkov získaných pomocou technológie Global Positioning System (GPS). Celá práca je venovaná lokalite Vysokých Tatier, ktorá je už od 60-tich rokov minulého storočia predmetom výskumu jej neotektonickej aktivity (Hradílek, 1984).

Teoretická časť dizertačnej práce sumarizuje teoretické pozadie merania a spracovania meraní GPS, odhadu rýchlostí pohybu bodov a určenia deformácií a napätí pomocou numerickej metódy konečných prvkov. Experimentálna časť je zameraná na spomínanú lokalitu Vysokých Tatier, kde sa od roku 1998 vykonávajú každoročne opakované merania GPS. V úvode detailne popisuje geologické pozadie študovanej oblasti, následne popisuje špeciálnu GPS sieť a merania, ktoré boli v tejto sieti vykonané. Ďalšia časť je venovaná spracovaniu epochových a permanentných meraní GPS a ich využitiu na odhad rýchlostí pohybu bodov, ktoré slúžia na určenie miery napätia a deformácií v danom regióne. V záverečných časti sú, na základe výsledkov vykonaných analýz stanovené predpokladané rizikové zóny pre vznik zemetrasení so zvýšenou mierou napätia, resp. deformácie.

## 2 CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE

Hlavným cieľom dizertačnej práce je stanovenie a realizácia postupu na určenie deformačných zón vo vysokohorskom prostredí s využitím epochových a permanentných meraní GPS.

Čiastkové ciele a úlohy:

1. Získanie prehľadu o teoretickom pozadí spracovania meraní GPS, odhadu rýchlostí pohybu bodov z epochových a permanentných meraní a určovania deformácií.
2. Spracovanie epochových meraní GPS so zreteľom na monitorovanie časovej zmeny polohy bodov.
3. Odhad rýchlostí pohybu bodov z epochových a permanentných meraní GPS a ich vzájomné porovnanie.
4. Určenie napätí a deformácií s využitím numerickej metódy.
5. Zhodnotenie dosiahnutých výsledkov a určenie rizikových zón so zohľadnením geologického pozadia daného regiónu.

### 3 TEORETICKÉ ASPEKTY SPRACOVANIA MERANÍ GPS

Určenie polohy bodov s využitím technológie GPS je možné realizovať dvomi základnými spôsobmi. Ide o absolútne určovanie polohy bodov v geocentrickom súradnicovom systéme a o relatívne určovanie polohy. Prvý spôsob využíva na určenie pseudovzdialenosti medzi družicou a prijímačom pseudonáhodné kódy, ktoré sú namodulované na nosné vlny. Druhý spôsob využíva fázové meranie, ktoré spočíva v spracovaní nosnej vlny družicového signálu. Na rozdiel od absolútneho určovania polohy bodu, v tomto prípade sa určuje poloha bodov vzhľadom na referenčný bod, ktorého priestorová poloha je známa. Nutnou podmienkou úspešného nájdania spojnice referenčného a určovaného bodu (základnice) sú simultánne merania na oboch bodoch. Výsledkom procesu spracovania je priestorový vektor v geocentrickom súradnicovom systéme. Táto metóda má hlavný význam pre geodéziu, pretože umožňuje dosiahnuť milimetrové presnosti v určení priestorového vektora. Samotné fázové meranie je založené na určení fázového rozdielu medzi nosnou vlnou prijatou z družice a referenčnou vlnou, ktorá je generovaná v prijímači. Okrem toho je nutné určiť celočíselný počet cyklov vln, tzv. ambiguity.

Observačná rovnica, ktorá opisuje merania fázy nosnej vlny má v súlade s (Hefty, Husár, 2003) tvar:

$$\Psi_p^j(t) = f^j \frac{\rho_p^j(t)}{c} + f^j \cdot \delta^j - f_p \cdot \delta_p - (f^j - f_p) \cdot t + N_p^j + T_p^j + I_p^j + \varepsilon_p^j, \quad (3.1)$$

pričom  $\Psi_p^j(t)$  je nameraný rozdiel fáz v prijímači,  $\rho_p^j(t)$  pseudovzdialenosť medzi družicou a prijímačom,  $\delta^j$  chyba hodín na družici  $j$ ,  $\delta_p$  chyba hodín v prijímači  $P$ ,  $N_p^j$  celočíselný počet cyklov medzi družicou a prijímačom. Parametre  $T_p^j$  a  $I_p^j$  charakterizujú vplyv troposféry a ionosféry na meranie. Posledný člen  $\varepsilon_p^j$  predstavuje náhodnú chybu merania fázy. V rovnici (3.1) sú súradnice stanoviska prijímača obsiahnuté v topocentrickej vzdialenosti medzi družicou a prijímačom. Ostatné členy majú z geodetického hľadiska len pomocný charakter. Pri spracovaní je snaha ich vždy vopred eliminovať, resp. zmenšiť ich vplyv na čo najmenšiu mieru. Preto sa zvyčajne v relatívnych metódach neuplatňujú priamo merania fázy, ale skôr sa využívajú vhodné lineárne kombinácie – diferencie. Ich najväčším prínosom je úplná, resp. čiastočná eliminácia systematických vplyvov, ktoré ovplyvňujú merania všetkých družíc, resp. simultánne merania z viacerých stanovísk. Diferencie je možné tvoriť ako diferencie simultánnych pozorovaní jednej družice z viacerých stanovísk (jednoduchá diferencia), ďalej ako diferencie simultánnych pozorovaní viacerých družíc jedným prijímačom (dvojnásobná diferencia) a nakoniec ako diferencie pozorovaní v rozličných etapách (trojnásobná diferencia), (Hefty, Husár, 2003). Dvojnásobné diferencie sú vzhľadom na ich elimináciu chýb hodín družíc i prijímačov a výraznej redukcií atmosférických vplyvov základnou formou, v ktorej fázové merania vstupujú do spracovania kvôli odhadu súradníc bodov

Obidva typy meraní pseudovzdialeností k družiciam GPS sú ovplyvnené náhodnými chybami, ktoré súvisia s procesom vysielania, šírenia sa signálu družice a jeho elektronického spracovania. Vo všeobecnosti sú tieto náhodné chyby malé a ich vplyv sa dá znížiť zvýšením počtu meraní. Rozhodujúci vplyv na výsledky meraní GPS majú však systematické chyby. Ich zdrojom môžu byť v súlade s (Dach a kol., 2007) družice, šírenie sa signálu a prijímač. Podľa (Hefty, Husár, 2003) za najdôležitejšie treba považovať chybu v určení dráhy (polohy) družice, systematickú chybu hodín družice, neznalosť presnej polohy fázového centra vysielacej antény, relativistické efekty, troposférickú a ionosférickú refrakciu, efekt viaccestného šírenia sa signálu, excentricitu a variáciu polohy fázového centra prijímacej antény a systematickú chybu hodín prijímača. Na úspešnú elimináciu alebo redukciu týchto vplyvov sa využíva narábanie s presnými dráhami družíc, modelovanie systematických vplyvov nezávislými metódami, resp. na základe doplňujúcich meraní, odhad parametrov systematických vplyvov z

meraní GPS pri ich spracovaní, diferencovanie meraní pred ich spracovaním a vhodná voľba metódy a podmienok merania.

Jedným zo základných využití technológie GPS je monitorovanie zmien v priestorovej polohe bodov v závislosti od času. Cieľom je určiť posun, resp. rýchlosť pohybu, sledovaných bodov spolu s ich charakteristikami presnosti. Pri stanovovaní týchto veličín je nutné brať do úvahy aj pohyby stanoviska pod vplyvom dynamiky vrchnej časti litosféry. V súlade s (Hefty, 2004) možno konštatovať, že vzhľadom na komplexnosť geodynamických javov v súčasnosti neexistuje všeobecne akceptovaný funkčný vzťah, ktorý by umožňoval adekvátne opísať priebeh bodu v čase. Pri odhade zmeny polohy bodu treba uvážiť jednak variácie spôsobené geodynamickými javmi, jednak faktory, systematicky ovplyvňujúce výsledky meraní. Celkovo možno merania a následné analýzy priestorových geodetických sietí vzhľadom na čas rozdeliť na tri prístupy: etapový, epochový a permanentný.

Táto dizertačná práca sa zameriava na odhad neznámych rýchlostí pohybu bodov a ich analýzu pomocou epochových a permanentných meraní GPS. Vstupom pre stanovenie rýchlostí pohybu bodov z epochových meraní GPS sú výsledky spracovania vo forme vektora geocentrických súradníc bodov  $\mathbf{x}_{t_j}^T = [X \ Y \ Z]^T$  a jeho kovariančnej matice  $\Sigma_{\mathbf{x}_{t_j}}$  pre danú strednú epochu merania  $t_j$ . Opakované merania sa uskutočnili v  $j$  epochách,  $j=1, 2, 3, \dots, m$ , pričom  $m$  je počet všetkých epochových meraní. Predpokladá sa, že pohyb bodov vzhľadom na ich umiestnenie a celkovú tektonickú situáciu v regióne je lineárny, a preto sa volí odhad, ktorého výsledkom sú karteziánske súradnice bodov  $\mathbf{y}$  v stanovenej epoche  $t_0$  a ich lineárne rýchlosti  $\mathbf{v}_y$ . Na samotný odhad sa využívajú rýchlosti referenčných bodov, ktoré boli určené v rámci medzinárodného referenčného rámca ITRF a zaradené do spracovania v rámci každej epochy. Nech sa označujú  $\mathbf{v}_{ref}$  a ich kovariančná matica  $\Sigma_{\mathbf{v}_{ref}}$ . Základný model, spájajúci výsledky epochových meraní s referenčnými rýchlosťami, má podľa (Hefty, 2004) tvar:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{v}_{ref} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{t_1} \\ \mathbf{x}_{t_2} \\ \vdots \\ \mathbf{x}_{t_m} \\ \mathbf{v}_{ref} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{D}_1 & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} \\ \mathbf{I} & \mathbf{D}_2 & \mathbf{T}_2 & \dots & \mathbf{0} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{I} & \mathbf{D}_m & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{T}_m \\ \mathbf{0} & \mathbf{E} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{y} \\ \mathbf{v}_y \\ \Theta_2 \\ \vdots \\ \Theta_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{\varepsilon}_{x_1} \\ \boldsymbol{\varepsilon}_{x_2} \\ \vdots \\ \boldsymbol{\varepsilon}_{x_m} \\ \boldsymbol{\varepsilon}_v \end{bmatrix}, \quad \Sigma = \text{var} \begin{pmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{v}_{ref} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \Sigma_{x_{t_1}} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \Sigma_{x_{t_2}} & \dots & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \dots & \Sigma_{x_{t_m}} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} & \Sigma_{\mathbf{v}_{ref}} \end{bmatrix}, \quad (3.2)$$

pričom  $\mathbf{I}$  je matica vzťahov medzi pozorovanými a odhadovanými súradnicami (koeficienty 0 alebo 1),  $\mathbf{D}_j = \text{Diag}(t_j - t_0)$  predstavuje maticu vzťahov medzi pozorovanými súradnicami a odhadovanými rýchlosťami  $\mathbf{v}$ ,  $\mathbf{E}$  charakterizuje väzby medzi referenčnými a odhadovanými rýchlosťami (koeficienty 0 alebo 1),  $\mathbf{T}_k$  tvoria koeficienty pre transformáciu  $k$ -tej kampane do referenčného rámca kampane v 1. epoche,  $k = 2, 3, \dots, m$ .  $\Theta_k = [\Delta X_k \ \Delta Y_k \ \Delta Z_k \ \omega_k \ \psi_k \ \varepsilon_k]^T$  predstavuje transformačné parametre vzťahujúce referenčný rámec  $k$ -tej kampane k referenčnému rámcu kampane v 1. epoche a vektory  $\boldsymbol{\varepsilon}_{x_j}$  a  $\boldsymbol{\varepsilon}_v$  predstavujú vektor chýb súradníc v  $j$ -tej epoche a vektor chýb referenčných rýchlostí. Na transformáciu  $k$ -tej kampane do referenčného rámca 1. kampane bola použitá 6-prvková Helmertova transformácia bez zohľadnenia zmeny mierky, pretože by mohla potlačiť veľkosť zmien a deformácií, ktoré v sieti nastali.

Na odhad neznámych parametrov, ktoré tvoria geocentrické karteziánske súradnice všetkých bodov, ich rýchlosti a príslušné parametre transformácie pre každú epochu okrem prvej, sa štandardne používa 2. lineárny model odhadu nepriameho vektorového parametra pomocou metódy najmenších štvorcov (Kubáčková, 1990). Keďže do odhadu vstupujú súradnice bodov v systéme ITRS v konkrétnej realizácii ITRF, aj výsledné odhadnuté súradnice a rýchlosti budú v tomto globálnom systéme. Rýchlosti potom predstavujú celkovú, absolútnu zmenu

polohy bodu za rok vzhľadom na geocentrický referenčný rámec. Jej dominantnou zložkou je pohyb príslušnej litosférickej platne, na ktorej sa nachádza príslušný bod. Z pohľadu neotektonickej aktivity sú však zaujímavejšie vnútroplatňové pohyby, získané z absolútnych redukciou o modelovú rýchlosť príslušného litosférického bloku.

Na rozdiel od epochových, permanentné merania po spracovaní a analýze poskytujú obsahovo bohatšie informácie. Možno z nich určiť nielen stredné polohy a rýchlosti, ale aj ďalšie faktory súvisiace s polohou, ktoré sú funkciou času (napr. sezónne variácie, dlhodobé variácie, skoky atď.). Všeobecný tvar observačnej rovnice pre lokálne súradnice  $n$ ,  $e$ ,  $v$ , ktorá zahŕňa lineárnu zmenu, sezónne variácie a  $r$  skokov možno zapísať podľa (Hefty, 2004) ako

$$n_t = n_0 + v_n \cdot (t - t_0) + b_n \sin(2\pi(t - t_0)) + c_n \cos(2\pi(t - t_0)) + d_n \sin(4\pi(t - t_0)) + e_n \cos(4\pi(t - t_0)) + \sum_{k=1}^r z_{nk} \delta(t - t_k) + \varepsilon_n$$

$$e_t = \dots$$

$$v_t = \dots \tag{3.3}$$

Jednotlivé koeficienty predstavujú:  $v_n$ ,  $v_e$ ,  $v_v$  rýchlosti bodov siete v lokálnych súradniciach,  $b_n$ ,  $b_e$ ,  $b_v$ ,  $c_n$ ,  $c_e$ ,  $c_v$  amplitúdy ročných variácií,  $d_n$ ,  $d_e$ ,  $d_v$ ,  $e_n$ ,  $e_e$ ,  $e_v$  amplitúdy polročných variácií,  $z_{nk}$  amplitúdu  $k$ -tej systematickej zmeny, pričom  $k = 1, 2, \dots, r$ , kde  $r$  je počet identifikovaných skokov, pulzov a podobne,  $t_k$  známe časové okamihy kedy nastala systematická zmena a  $\delta(t - t_k)$  funkciu opisujúcu účinok pôsobenia systematického skoku.

## 4 TEORETICKÉ ASPEKTY URČENIA NAPÄTÍ A DEFORMÁCIÍ

Jedným z hlavných cieľov predkladanej práce je určenie predpokladaných deformačných zón, kde je väčšie riziko vzniku zemetrasení. Deformáciu možno definovať ako stav charakterizovaný zmenou geometrie objektu voči geometrii pôvodnej konfigurácie. Pri deformačnom procese sú zaujímavé tri aspekty: príčina deformácie, deformačný proces a výsledný produkt deformácie. Príčinou deformácií sú sily, ktoré pôsobia na dané objekty. Z geologického pohľadu delíme sily, ktoré spôsobujú deformácie v zemskej kôre podľa (Marko, Jacko, 1999) na gravitačné sily, ktorých veľkosť je priamo úmerná hrúbke nadložia, a preto ich význam stúpa s rastúcou hĺbkou a tektonické sily, ktoré sú spôsobené vnútornou dynamikou Zeme, kam patrí pohyb hmôt a tepelný tok v spodnej kôre a plášti (konvenčné prúdenie, narastanie oceánskeho dna a pohyb litosférických dosiek).

Tieto sily vyvolávajú v objektoch napätia, ktoré majú tendenciu meniť pôvodný tvar objektu. Ak sila pôsobí na teleso v pokoji a v jej dôsledku sa nezačne hýbať, v telese sa indukuje rovnako veľká a opačne orientovaná sila. Takto vzniká v materiáli napätie, ktoré spôsobuje jeho deformáciu. Veľkosť napätia je priamo úmerná veľkosti pôsobiacej sily a nepriamo úmerná veľkosti plochy na ktorú táto sila pôsobí. Sila je vektorová veličina a indukované napätie predstavuje tenzor, ktorý možno rozložiť na zložky. Štandardne sa rozkladá na *normálovú zložku napätia* a na *šmykovú zložku napätia*. Normálovú časť napätia, spôsobuje tá časť sily, ktorá pôsobí v smere normály na plochu telesa. Normálová časť napätia sa snaží o posun v smere príslušnej súradnicovej osi. Šmyková časť napätia je definovaná ako zložka pôsobiaca paralelne s povrchom plochy, t. j. snaží sa o posun kolmo na smer príslušnej súradnicovej osi. O homogénne napätové pole ide, ak v každom mieste telesa je rovnaké napätie. V opačnom prípade ide o nehomogénne, resp. heterogénne napätové pole. Pri homogénnom poli možno definovať 3 navzájom kolmé roviny, na ktorých je strižné napätie nulové (hlavné roviny napätia) a normálové napätia, pôsobiace kolmo na tieto plochy, predstavujú hlavné osi napätia. Ak sú veľkosti hlavných osí napätia rovnaké, napätie v objekte je izotropné, t. j. rovnaké vo všetkých smeroch. Takýto stav je typický pre hydrostatický, resp. litostatický tlak.



Napätie tohto druhu nemôže spôsobiť zmenu tvaru, ale zmenu objemu. Ak je prevládajúce hlavné napätie pozitívne, dochádza k extenzii, a naopak, ak prevláda negatívne, dochádza ku kompresii.

Na určenie poľa deformácií a napätí sa čoraz častejšie využívajú numerické metódy, ktoré vychádzajú z riešenia úloh lineárnej teórie pružnosti. Hlavným cieľom je nájsť a využiť takú diferenciálnu rovnicu, ktorej riešenie pri stanovených okrajových podmienkach umožní určiť pole deformácií resp. napätí so zohľadnením komplikovanej geometrie prostredia a jeho elastic- kých (materiálových) vlastností. Uvedená problematika je detailne rozpracovaná vo viacerých prácach, pričom použitý postup odvodenia a symbolika boli prebraté z (Míka, Kufner, 1983).

Pri formulácii Lamého diferenciálnej rovnice sa vychádza z telesa  $\Omega$ , ktoré sa vplyvom de- formácie zmení na teleso  $\Omega^*$ , pričom jeho bod  $M = (x_1, x_2, x_3)$  prejde do bodu  $M^* = (x_1^*, x_2^*, x_3^*)$ . Zmenu v polohe bodu  $M$  možno vyjadriť vektorom posunutí  $\mathbf{u}(M) = (u_1, u_2, u_3)$ , pričom platí  $M^* = M + \mathbf{u}(M)$ . Nech  $V$  je ľubovoľný element vo vnútri telesa  $\Omega$ . Uvažujme o silách, ktoré naň pôsobia. Ide o objemové (vonkajšie) a povrchové sily. Bilanciu silovej rovnováhy vyjadrujú pre ľubovoľnú podoblasť  $V$  oblasti  $\Omega$  podmienky rov- nováhy v tvare

$$\int_V \mathbf{F}(M) d\Omega_M + \int_{\partial V} \mathbf{f}(P, \mathbf{n}) dS = 0, \quad (4.1)$$

kde  $\mathbf{F}(M)$  predstavuje vektor vonkajších síl a vektor  $\mathbf{f}(P, \mathbf{n})$  charakterizuje napätia, ktoré vy- jadrujú vplyv povrchových síl. Tieto sú závislé nielen od polohy bodu  $P$  ale aj od smeru von- kajšej normály  $\mathbf{n}$  ku ploche v bode  $P$ . Dá sa ukázať, že existuje taká trojica vektorov  $\boldsymbol{\tau}_1, \boldsymbol{\tau}_2, \boldsymbol{\tau}_3$  v tvare  $\boldsymbol{\tau}_1 = (\tau_{11}, \tau_{12}, \tau_{13})$ ,  $\boldsymbol{\tau}_2 = (\tau_{21}, \tau_{22}, \tau_{23})$ ,  $\boldsymbol{\tau}_3 = (\tau_{31}, \tau_{32}, \tau_{33})$ , pre ktoré platí

$$f_i(P, \mathbf{n}) = \boldsymbol{\tau}_i \mathbf{n} = \tau_{i1} n_1 + \tau_{i2} n_2 + \tau_{i3} n_3, \quad i = 1, 2, 3. \quad (4.2)$$

Po dosadení do podmienky rovnováhy platí

$$\int_V \mathbf{F}_i(M) d\Omega_M + \int_{\partial V} \text{div } \boldsymbol{\tau}_i(M) d\Omega_M = 0, \quad i = 1, 2, 3. \quad (4.3)$$

Vzhľadom na to, že oblasť  $V$  bola ľubovoľná, možno pre celé teleso  $\Omega$  sformulovať tzv. rovnice rovnováhy v tvare

$$\text{div } \boldsymbol{\tau}_i + F_i = 0, \quad \text{pre } i = 1, 2, 3. \quad (4.4)$$

Tieto rovnice predstavujú fyzikálny zákon zachovania rovnováhy. Vyššie uvedené vektory  $\boldsymbol{\tau}_1, \boldsymbol{\tau}_2, \boldsymbol{\tau}_3$  sú zložkami tenzora napätí  $\mathbf{T}$ . Jeho jednotlivé prvky sa v súlade s vyššie uvedeným rozdeľujú na normálové a šmykové zložky napätia.

Pri deformácii sa mení vzdialenosť dvoch bodov, čo možno vyjadriť pomocou pomerných zmien jednotlivých zložiek vektora posunutí, t. j. podľa jednotlivých derivácií

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_j}, \quad \text{pre } i, j = 1, 2, 3. \quad (4.5)$$

Prostredníctvom predpisu

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}(\mathbf{u}) = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (4.6)$$

možno určiť všetky zložky tenzora deformácií  $\mathbf{E}$  v ktorom sú jeho prvky symetrické, čiže  $\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ji}$ ,  $i, j = 1, 2, 3$ . Diagonálne prvky predstavujú príslušné pomerné zmeny (predĺženia, resp. skrátene vzdialenosti) v príslušných smeroch súradnicových osí  $x_i$ .

Pri riešení praktických úloh je vždy zaujímavý vzájomný vzťah medzi deformáciou a napätím. V prípade pružných deformácií tento vzťah charakterizuje *zovšeobecnený Hookov zákon*, ktorý možno zapísať ako

$$\tau_{i,j} = \sum_{k,l=1}^3 a_{ijkl} \varepsilon_{kl}, \text{ pre } i,j = 1,2,3. \quad (4.7)$$

Koeficienty  $a_{ijkl}$  sú vo všeobecnosti funkciami polohy bodu  $M$ . Pre homogénne a izotropné teleso platí, že sa dajú nájsť dve také nezávislé konštanty  $\lambda, \mu$ , ktorými je možné určiť vzájomný vzťah medzi tenzorom napätia a deformácie, a to tak, že platí

$$\tau_{ii} = \lambda(\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}) + 2\mu\varepsilon_{ii}, \quad i = 1,2,3 \quad a \quad \tau_{ij} = 2\mu\varepsilon_{ij}, \quad i,j = 1,2,3, \quad i \neq j. \quad (4.8)$$

Konštanty  $\lambda, \mu$  sú tzv. Laméove koeficienty a pre spojité teleso je ich možné vyjadriť pomocou Youngovho modulu pružnosti  $E$  a Poissonovej konštanty  $\sigma$  prostredníctvom vzťahov

$$\mu = \frac{E}{2(1+\sigma)}, \quad \lambda = \frac{2\mu\sigma}{1-2\sigma} = \frac{E\sigma}{(1+\sigma)(1-2\sigma)}. \quad (4.9)$$

Dosadenie rovnice (3.3.13) do rovnice rovnováhy a následnej úprave vedie k sústave troch partiálnych diferenciálnych rovníc druhého rádu pre tri zložky vektora posunutí, ktoré sa označujú ako Laméove rovnice a v prípade homogénneho telesa je možné ich zapísať priamo pre vektor posunutí  $\mathbf{u}$ :

$$-(\lambda + \mu) \operatorname{grad}(\operatorname{div} \mathbf{u}) - \mu \Delta \mathbf{u} = \mathbf{F} \quad (4.10)$$

Laméove rovnice predstavujú základné rovnice využívané na určovanie napätí, deformácií a vektora posunutí pomocou numerických metód.

Pri riešení úloh deformačnej analýzy sa využívajú tri základne okrajové úlohy. Pri prvej okrajovej úlohe je cieľom určiť posuny a napätia v telese zo známych objemových a povrchových síl. Ak je na hranici  $\partial\Omega$  známy vektor posunutí  $\mathbf{g} = (g_1, g_2, g_3)$ , možno vektor posunutí  $\mathbf{u}$  a napätia vo vnútri telesa riešiť pomocou druhej okrajovej úlohy. Tretia či zmiešaná okrajová úloha sa rieši v prípade, ak je cieľom určiť pole posunov a napätí v telese pri daných objemových a povrchových silách na časti povrchu a zároveň sú známe posuny na inej časti povrchu.

Na určenie deformácií, resp. napätí, sa veľmi často využívajú numerické metódy. Pri riešení praktických problémov (až na niekoľko málo výnimiek) je veľmi obtiažne nájsť analytické riešenie v uzavretom tvare. Náročnosť je spôsobená povahou okrajových podmienok ako aj geometriou výpočtového telesa. Jednou z najčastejšie používaných metód je metóda konečných prvkov (MKP), ktorá patrí do skupiny tzv. variačných metód. Jej riešenie pozostáva z piatich základných krokov (Reddy, 1993).

Pri diskretizácii sa celá oblasť riešenia rozdelí na konečný počet menších podoblastí, resp. elementov. Tie sú tvorené uzlovými bodmi, v ktorých sa hľadá hodnota riešenia. Diskretizáciu možno vykonať niekoľkými spôsobmi v závislosti od rozmeru a tvaru oblasti riešenia. Pri trojrozmerných úlohách sa využíva mnohosten. Najčastejšie ide o 8-uzlový element, resp. pri komplikovanej a nepravidelnej ploche 4-uzlový element, čiže štvorsten. Pri elemente je dôležitá i jeho veľkosť, pretože ovplyvňuje presnosť numerického riešenia.

Po diskretizácii oblasti na jednotlivé elementy  $\Omega_e$  (v každom uzle sú 3 stupne voľnosti vzhľadom na tri posunutia  $(u_1, u_2, u_3)$ ) je ďalším krokom odvodenie diferenciálnych rovníc na elemente v slabej formulácii, pri ktorej sú zoslabené požiadavky na neznáme veličiny. Vychádza sa z rovnice rovnováhy (4.4), vynásobenej váhovou funkciou  $w$ . Nasleduje integrácia na elemente a následne sa pomocou Greenovej vety prenesú partiálne derivácie na váhovou funk-

ciu  $w$ . Po vyjadrení  $\tau_{ij}$  pomocou Lamého konštant  $\mu$ ,  $\lambda$  je možné po úprave zapísať diferenciálnu rovnicu v slabšej formulácii:

$$\sum_{j=1}^3 \int_{\Omega_e} \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \frac{\partial w}{\partial x_j} + \mu \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \frac{\partial w}{\partial x_j} + \lambda \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \frac{\partial w}{\partial x_i} d\Omega = \int_{\Omega_e} F_i w d\Omega + \int_{\partial\Omega_e} w T_i dS. \quad (4.11)$$

Ďalším krokom je zostavenie systému lineárnych rovníc na jednotlivých elementoch s úsilím nájsť riešenie na elemente v tvare polynómu, resp. v tvare lineárnej kombinácie aproximačných funkcií  $\Phi_k$ ,  $k = 1 \dots n$ , pričom  $n$  je počet uzlov, v ktorých sa daná úloha rieši. Presné riešenie sa tak transformuje na približné v tvare polynomickej funkcie. Jednotlivé posunutia potom možno vyjadriť v tvare:

$$u_1 = \sum_{k=1}^n U_{1k} \phi_k, u_2 = \sum_{k=1}^n U_{2k} \phi_k, u_3 = \sum_{k=1}^n U_{3k} \phi_k, \quad (4.12)$$

pričom  $U_{1k}$ ,  $U_{2k}$ ,  $U_{3k}$  sú neznáme posunutia v  $k = 1, \dots, n$  uzlových bodoch. Uvedené aproximácie sa dosadia za váhovú funkciu do slabého riešenia. Úprava vedie k sústave rovníc pre všetky elementy, na ktoré bola diskretizovaná oblasť, a to v takom tvare, že na ľavej strane je matica tuhosti  $\mathbf{K}$  a vektor neznámych parametrov (zložky trojrozmerného posunutia v jednotlivých súradnicových osiach vo všetkých uzlových bodoch). Na pravej strane je vektor vonkajších síl  $\mathbf{F}$  a vektor medzielementových tokov  $\mathbf{Q}$ . Takto vznikne finálny tzv. globálny konečno-prvkový model. S využitím princípu spojitosti riešenia medzi elementmi a rovnováhy tokov sa v ňom spoja rovnice pre všetky elementy, pričom v uzlových bodoch, ktoré prislúchajú susedným elementom, je riešenie na hranici elementov rovnaké. Rovnováhu tokov možno chápať ako rovnakú hodnotu tokov na hraniciach susedných elementov, ale s opačným znamienkom. Pre jednoznačnosť riešenia globálneho konečno-prvkového modelu je potrebné zadať okrajové podmienky. Výhodou použitia MKP sú najmä dobré vlastnosti globálnej matice, ktorá je symetrická, a má veľa prvkov nulových, čo znižuje výpočtovú náročnosť a umožňuje využiť časovo menej náročné a efektívnejšie algoritmy na výpočet neznámych posunutí.

## 5 PRAKTICKÝ EXPERIMENT – GEODYNAMICKÁ SIEŤ TATRY

Praktický experiment bol sústredený do oblasti Vysokých Tatier. V rámci Slovenska ide o špecifickú oblasť, pozostávajúcu z dvoch relatívne odlišných celkov: zo samotného, mlado vyzdvižnutého pohoria a z viac-menej rovinných kotlín, ktoré ho obkolesujú. Práve tu sa vyskytujú najväčšie slovenské výškové rozdiely medzi týmito časťami. Taktiež tu dochádza k najväčším výkyvom v poveternostných podmienkach. Napriek týmto ťažkým podmienkam sa tu už desaťročia uskutočňuje výskum na stanovenie neotektonickej aktivity Tatier.

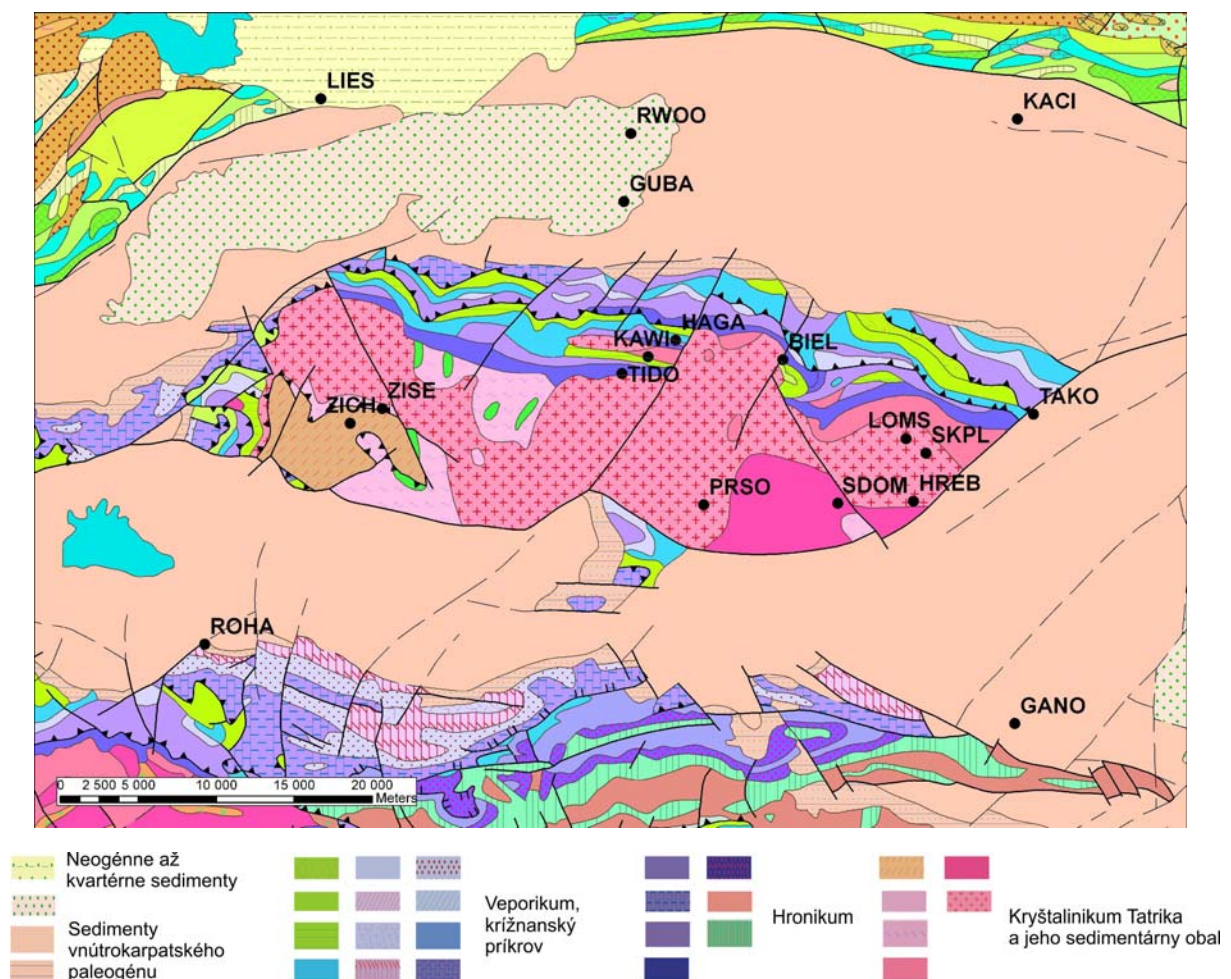
### 5.1 Geologická štruktúra a tektonický charakter územia Vysokých Tatier

Územie Vysokých Tatier patrí do povodia Dunajca a Popradu (hlavne zo severnej strany), ale aj do povodia Váhu a Oravy. Tatry sa morfológicky tvorili hlavne v neogéne až pleistocéne. V období pred 15 miliónmi rokmi došlo k ich vyzdvihnutiu. Veľhorami sa stali vďaka vertikálnemu vyzdvihnutiu, ktoré bolo asi sedemkrát menšie ako v Alpách. Tatry možno definovať ako typickú jednostrannú hrásť s vyzdvižnutou južnou časťou, ktorá je budovaná kryštalinikom. Táto hrásť je pretiahnutá v smere východ – západ a od juhu je oddelená výrazným podtatranským zlomom, ktorý ju oddeľuje od paleogénnych sedimentov Popradskej a Liptovskej kotliny. Na severe sú Tatry ohraničené Podhalskou nížinou.

Geologická stavba je výrazne asymetrická, čo dokazuje zrejme pôvodné nesymetrické nahromadenie jednotiek (príkrovov), a taktiež nerovnomerný zdvih pohoria. Všeobecne možno tvrdiť, že v južnej a centrálnej časti pohoria sa vyskytujú horniny kryštalinika – predmezozoický fundament, v severnej až západnej časti prevládajú mezozoické horniny.

Vnútrotná stavba Tatier je veľmi zložitá, typicky alpinotypná a je hlavne výsledkom pôsobenia subdukčno-kolíznej orogenézy, výrazne ovplyvňovanej horizontálnymi a hlavne šikmými posunmi na viacerých zlomoch. Podľa Andrusova (1959) zložitú stavbu Tatier tvorí sústava tektonických jednotiek (príkrovov a príkrovových šupín), ktoré je možné priradiť k trom základným tektonickým jednotkám: tatriku, fatriku, hroniku. Geologická mapa Tatier je znázornená na obr. 5.1, pričom sa vychádzalo z geologickej mapy Západných Karpát (Lexa a kol., 2000).

Z hľadiska cieľa práce je veľmi dôležité sledovať zlomy, resp. zlomové systémy. Najvýraznejšou zlomovou poruchou hrásti Vysokých a Západných Tatier je spomínaný podtatranský zlom. Tento obstaráva styk kryštalinika s členmi Liptovskej, resp. Popradskej kotliny. Prebieha v smere západ – východ, miestami západ – severozápad, ale aj západ – juhozápad (pozri Obr. 5.1). Na východ od Studenej doliny sa uplatňuje zlom smeru severovýchod – juhozápad. Pri tomto zlome sa predpokladá ohnutie priebehu hlavného zlomu. Niektorí autori túto časť považujú už za samostatný ružbaský zlom, ktorý je previazaný s podtatranským zlomom. Juh presekáva „štrbský prah“, ktorý oddeľuje Liptovskú a Popradskú kotlinu. Na západe podtatranský zlom nadväzuje na prosečiansky zlom smeru východseverovýchod – západjuhozápad. Zlom je sprevádzaný sústavou paralelných lokálnych zlomov.



Obr. 5.1 Geologická mapa širšieho regiónu Vysokých Tatier (Lexa a kol., 2000)

Z priečných zlomov vo východnej časti majú významnú úlohu zlomy smeru severozápad – juhovýchod. Možno tu rozlíšiť dva výrazné zlomy: zlom Kopského sedla a zlom doliny Bialky. Prvý zo zlomov má povahu horizontálneho posunu. Zlom doliny Bialky sa dosť značne prejavuje v zmene príkrovovej stavby a tvorí západnú hranicu tatrckého bloku Javorinskej Širokej. V strednej časti sa prejavujú hlavne zlomy smeru severovýchod – juhozápad, (zlomy Kôprovej a Tichej doliny) a zlomy smeru severozápad – juhovýchod (zlom Kamenistej doliny). V západnej časti Tatier majú hlavnú úlohu zlomy smeru sever – juh. Výraznejším z nich je Bobrovecký zlom, zlom doliny Mihulčie a Jalovecký zlom.

Podľa rôznych autorov tieto zlomy, resp. zlomové systémy, predstavujú aktivizáciu priaznivo orientovaných starších zlomových štruktúr.

Mieru neotektonickej aktivity v danej záujmovej oblasti veľmi dobre vystihuje výskyt zemetrasení v danom regióne. Jednou z najaktívnejších seizmických oblastí v rámci je aj oblasť Vysokých Tatier, poľského Podhalia, severného a stredného Spiša (Madaras a kol., 2008). Zemetrasenia sú v tomto širšom regióne Vysokých Tatier dokumentované od 13. storočia. V oblasti Zakopaného a regiónu Podhalie boli zaznamenané už v rokoch 1258, 1259, 1433 a 1528. Na slovenskej strane je možné nájsť záznamy z Kežmarku a Levoče o zemetraseniach v rokoch 1643, 1650, 1662, 1683, 1724 a 1840. Prvým zemetrasením, ktoré bolo seizmometricky zaznamenané je zemetrasenie zo 17. marca 1966 s magnitúdom 2.3 (Guterch a kol., 2005). Posledné väčšie zemetrasenie v tejto oblasti nastalo 30. novembra 2004. Epicentrum bolo neďaleko osady Skrzypne asi 15 km juhozápadne od Noweho Targu. Išlo o relatívne silné zemetrasenie (magnitúdo 4.65), ktoré bolo pocítené do vzdialenosti 100 km a zaznamenané viacerými seizmickými stanicami v Európe (Wiejacz, Debski, 2009). Po hlavnom zemetrasení došlo celkovo k 11 následným dotrasom, z ktorých najsilnejšie nastalo 2. decembra 2004 (magnitúdo 3.6). Uvedené skutočnosti sú jasným dôkazom, že región Vysokých Tatier je aktívnou a stále živou časťou Západných Karpát.

## 5.2 Geodynamická sieť TATRY a jej realizácia

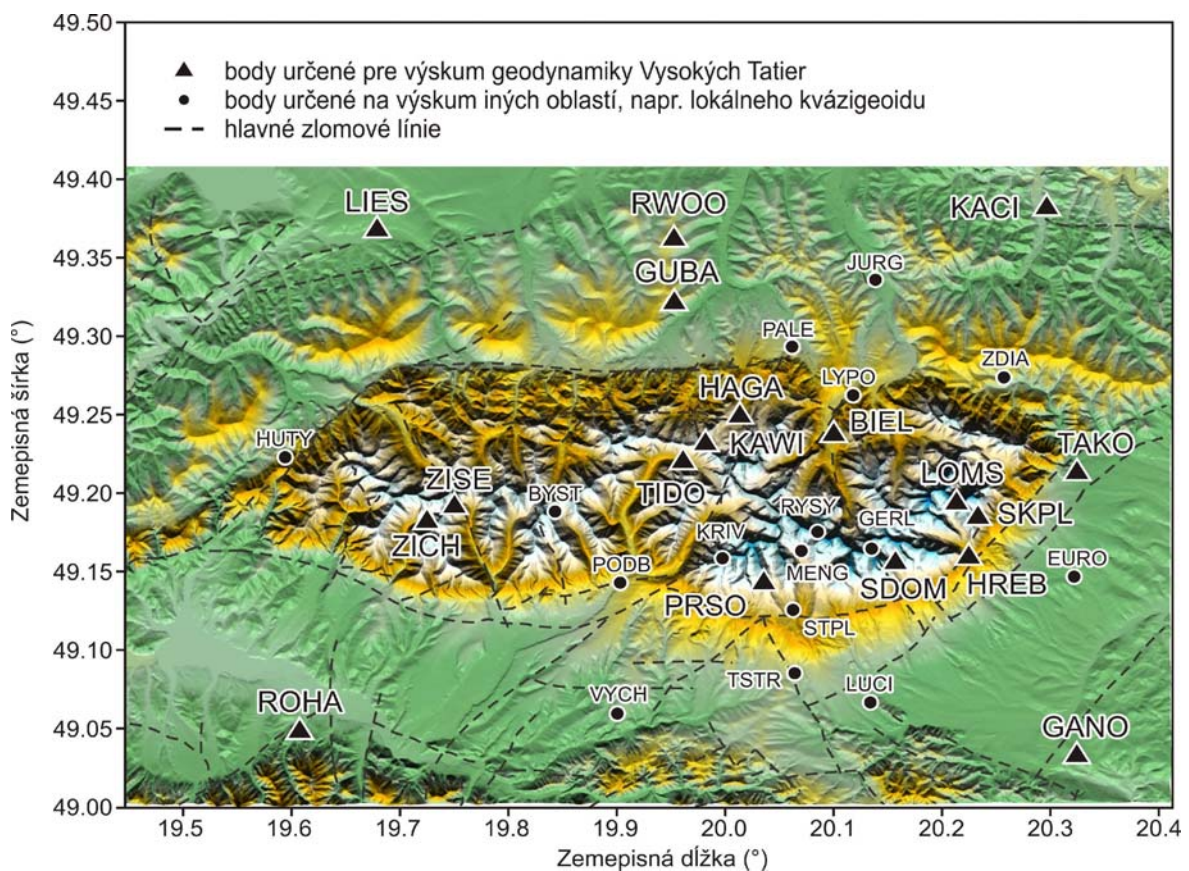
Špeciálna sieť bodov GPS určená na monitorovanie širšieho územia Vysokých Tatier vznikla postupne od roku 1997 v spojitosti s riešením medzinárodného projektu CERGOP (Czarnecki, Mojzeš, 2000), (Fejes, 2002). Na celkovom vybudovaní siete sa podieľala Katedra geodetických základov Stavebnej fakulty Slovenskej technickej univerzity v Bratislave, Geodetický a kartografický ústav v Bratislave a Katedra vyššej geodézie a geodetickej astronómie Varšavskej polytechniky vo Varšave. Celkovo sieť obsahuje okolo 30 bodov. Globálne ich možno rozdeliť na dve hlavné skupiny. Prvá skupina obsahuje body ktoré sú primárne určené na monitorovanie tektonických pohybov územia. Druhá skupina bodov je určená na doplňujúce monitorovanie, resp. štúdium iných parametrov napr. lokálneho kvázigeoidu, troposféry. Výsledky a následné analýzy dizertačnej práce sa týkajú iba bodov z prvej skupiny.

Sieť obsahuje 18 bodov (pozri Obr. 5.2), pričom 5 bodov sa nachádza v poľskej časti a zvyšných 13 bodov v slovenskej časti Vysokých Tatier. Delí sa na dve základné časti: vonkajšiu a vnútornú. Vonkajšia obsahuje 5, resp. 6, bodov, pričom všetky body sa nachádzajú mimo hlavného záujmového územia. Konkrétne ide o tieto body: GANO (Gánovce), ROHA (Roháčka pri Liptovskom Mikuláši), LIES (Liesek), KACI (Kacwin). Do tohto súboru ešte patrí bod RWOO (Rolów Wierch), resp. po jeho vylúčení náhradný bod GUBA (Gubalowka). Vnútornú sieť možno rozdeliť taktiež na dve skupiny bodov. Prvá obsahuje tzv. vrcholové body. Tie sú umiestnené vo vrcholovej časti pohoria. Sem patria body ZISE (Žiarske sedlo), KAWI (Kasprowy Wierch), PRSO (Predné Solisko) a bod LOMS (Lomnický štít). Druhá množina obsahuje body, ktoré sú umiestnené v tzv. údolnej časti, resp. na úpäti svahov. Sem patria body: ZICH (Žiarska chata), HAGA (Hala Gasienicowa), TIDO (Tichá dolina), BIEL (Bielovodská dolina), SDOM (Sliezsky dom), HREB (Hrebienok), SKPL (Skalnaté pleso)

a TAKO (Tatranská kotlina). Z kombinácie blízkych bodov medzi vrcholovou a údolnou časťou je možné vytvoriť dvojice, ktoré môžu slúžiť na detailnejšie štúdium lokálnych, resp. svahových pohybov. Takéto dvojice je možné vytvoriť v oblasti Žiarskej doliny z bodov ZISE a ZICH, v oblasti Skalnatej doliny z bodov LOMS a SKPL, a v oblasti Kasprového vrchu z bodov KAWI a HAGA, resp. TIDO.

Do siete Tatry boli zaradené aj body, ktoré sa priamo nenachádzajú v širšom okolí Vysokých Tatier, ale sú potrebné kvôli korektnému pripojeniu bodov siete Tatry do medzinárodného terestrického referenčného rámca ITRF. Pri ich výbere sa bral ohľad na viaceré faktory, na základe ktorých boli vybrané body JOZE, BOR1, GOPE, GRAZ a PENC. Tieto sú zaradené do siete permanentných staníc IGS a EPN, ich časový rad je relatívne stabilný a pokrýva celý časový úsek merania vo Vysokých Tatrách.

Na stabilizáciu bodov v sieti TATRY boli využité dva základné spôsoby. Prvým je použitie špeciálneho mosadzného modulu, pevne spojeného s rastlou skalou, resp. s betónovým pilierom, pričom na centráciu antény GPS slúžila centračná tyč, druhým je použitie klasickej centračnej podložky v kombinácii s centračnou guľičkou, vkladanou do kovového otvoru v pilieri, resp. skale. Z celej množiny bodov je pomocou centračného modulu stabilizovaných 16 bodov siete. Konkrétne, do rastlej skaly sú to body ROHA, ZICH, ZISE, HAGA, TIDO, PRSO, BIEL, HREB, SDOM, SKPL, TAKO, KACI a GUBA. Dva body (LIES, GANO) sú stabilizované do prízemného betónového piliera a bod LOMS je umiestnený na betónovom pilieri vysokom 2 m. Pri tomto type stabilizácie sa dosahovala opakovaná centrácia s presnosťou lepšou ako 0,5 mm. Na bodoch KAWI a RWOO bola použitá kombinácia klasickej centračnej podložky s centračnou guľičkou. Bod KAWI je stabilizovaný do rastlej skaly a bod RWOO je stabilizovaný 1,5 metra vysokým pilierom. Pri tomto type stabilizácie dosahuje centrácia presnosť 0,8 mm.



Obr. 5.2 Sieť bodov GPS v lokalite Vysokých Tatier

### 5.3 Meranie GPS v sieti TATRY

Meranie v monitorovacej sieti TATRY sa uskutočňuje od roku 1998 v pravidelnom ročnom intervale. Ako najvhodnejší čas pre meranie bolo vybrané jesenné obdobie začiatkom septembra, pretože sa predpokladala väčšia stabilita počasia. Sumárne uvedenie, ktoré body boli zamerané v danej epoche sa nachádza v tabuľke 5.1. Meranie na veľa bodoch bolo veľmi náročné a vo veľa prípadoch veľmi ovplyvnené nepriaznivým počasím. Na meranie sa využívali v prevažnej miere dvojfrekvenčné aparatúry od firmy Trimble (Trimble 4000SSE, 4000SSI, 4700 a 5700).

Tabuľka 5.1 Uskutočnené meračské kampane v sieti TATRY

Bod	Označenie bodu	31.8 - 3.9 1998	22.9 - 25.9 1999	9.10 - 13.10 2000	7.9 - 10.9 2001	5.9 - 9.9 2002	16.6 - 21.6 2003	4.9 - 7.9 2003	5.9 - 10.9 2004	5.9 - 9.9 2005	4.9 - 8.9 2006	3.9 - 7.9 2007	1.9 - 5.9 2008
Bielovodská dolina	BIEL					x		x	x	x	x	x	x
Gánovce	GANO	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Gánovce permanentná stanica	GANP								x	x	x	x	x
Gubalowka	GUBA				x	x		x	x	x	x	x	x
Hala Gasienicowa	HAGA			x	x	x		x	x	x	x	x	x
Hrebienok	HREB			x	x	x		x	x	x	x	x	x
Kacwin	KACI	x	x		x	x	x	x	x	x		x	x
Kasprowy wierch	KAWI	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x	x
Liesek	LIES	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x
Lomnický štít	LOMS	x	x		x	x		x	x	x	x	x	x
Predné Solisko	PRSO					x		x	x	x	x	x	x
Roháčka	ROHA	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Rolowy wierch	RWOO	x	x	x	x	x	x	x	x				
Sliezsky dom	SDOM			x	x	x		x	x	x	x	x	x
Skalnaté pleso	SKPL	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Tatranská kotlina	TAKO				x	x		x	x	x	x	x	x
Tichá dolina	TIDO				x	x		x	x	x	x	x	x
Žiarska chata	ZICH			x	x	x	x		x	x	x	x	x
Žiarske sedlo	ZISE			x	x	x	x		x	x	x	x	x

### 5.4 Spracovanie meraní GPS

Pri použití meraní GPS na detekciu tektonických zmien v určitom regióne v závislosti od času je nutné zvoliť špecifický spôsob ich spracovania. Očakávané prejavy tektonických zmien sú totiž rádovo na úrovni niekoľko mm až cm za rok, teda sú porovnateľné s maximálne dosiahnuteľnou presnosťou samotnej technológie GPS. Je preto nevyhnutné zabezpečiť spracovanie, ktoré zabezpečí maximálnu spoľahlivosť a presnosť v určení polohy bodu, a taktiež dokáže spoľahlivo eliminovať systematické vplyvy, ktoré by mohli nepriaznivo ovplyvniť výsledky, resp. ich kombináciu.

### 5.4.1 Spracovanie epochových meraní GPS v sieti TATRY

Konkrétne nastavenia v jednotlivých krokoch vychádzali zo stratégie, ktorá je používaná pri spracovaní epochových kampaní GPS uskutočnených v sieti staníc CEGRN (Stangl, 2007). Samozrejme, že pri spracovaní boli vzhľadom na menšiu veľkosť siete niektoré nastavenia modifikované tak, aby vyhovovali stanovenému cieľu.

Samotné spracovanie bolo najskôr vykonané v Bernskom softvéri vo verzii 4.2 pre všetky v tej dobe prístupné merania a vstupné dáta (parametre orientácie Zeme, presné dráhy družíc). Pri tomto spracovaní však nebola pri všetkých kampaniach dodržaná rovnaká stratégia, resp. parametre spracovania. Bol použitý rôzny referenčný rámec pre vstupné parametre orientácie Zeme a presné dráhy družíc, nebol použitý rovnaký referenčný bod pre všetky kampane, jeho súradnice pre jednotlivé epochy neboli exaktne odvádzané z referenčného rámca a boli použité rôzne parametre fázových centier antén. Po zverejnení nového Medzinárodného terestrického referenčného rámca ITRF2005 (Altamimi a kol., 2007) a vydání novej verzie Bernského softvéru (v. 5, apríl 2004), autor kompletne prespracoval (reprocessing) všetky pôvodné dáta a novo získané doplnené dáta z ďalších bodov. Pri spracovaní bola taktiež zvolená jednotná stratégia, vychádzajúca zo stratégie používanej v spracovateľských centrách permanentných sietí EPN, resp. CEGRN (Stangl, 2007). Detailnú schému použitej stratégie možno zapísať vo forme tabuľky 5.2. Stratégia použitá v oboch prípadoch bola veľmi podobná. Rozdiely sa hlavne týkali vstupných údajov a parametrov, resp. niektorých krokov v spracovaní.

Pri spracovaní meraní GPS v sieti TATRY boli použité merané dáta z rôznych zdrojov. Spracovanie bolo najskôr vykonané vo verzii 4.2 s dátami, ktoré boli v tej dobe získané, pričom bolo hlavne zamerané na množinu bodov, ktorá sa vyhodnocovala a analyzovala v súvislosti s riešením projektu CERGOP, resp. CERGOP2-Environment. Šlo o tieto body: ROHA, LIES, GANO, LOMS, SKPL, ZISE, ZICH, KACI, KAWI, HAGA, GUBA a RWO. Táto množina však bola pre potreby analýzy napätí veľmi riedka, a preto bolo nutné sieť doplniť o všetky dostupné merané body v priestore Vysokých Tatier. Merania na týchto bodoch spravoval Geodetický a Kartografický ústav, ktorý ich v roku 2008 poskytol. Takto pribudli merania na bodoch PRSO, TIDO, HREB, SDOM, TAKO a BIEL. Merania z týchto bodov už neboli spätne spracované vo verzii 4.2, ale po opätovnej kontrole, ako celá množina nanovo vo verzii 5.0. Do spracovania boli taktiež zaradené merania z vybraných permanentných staníc BOR1, GOPE, GRAZ, JOZE a PENC sietí IGS a EPN.

Ako referenčný bod pre riešenie vo verzii 4.2 boli použité 2 body. Pre obdobie 1998 až 2003 to bol bod ROHA, pre obdobie 2004 až 2008 permanentná stanica GANP, pričom ich súradnice boli odvádzané z rôznych zdrojov (Klobušiak a kol., 2002, EPN, 2009). Pri reprocesingu vo verzii 5.0 sa ako referenčný používal len bod JOZE, ktorého súradnice pre každú epochu sa určovali pomocou oficiálnych súradníc a rýchlostí z referenčného rámca ITRF2005 (epocha 2000.0).

Každá uskutočnená kampaň GPS bola spracovaná samostatne, pričom merania boli rozdelené na príslušné denné úseky a tie spracované individuálne pre každú zvolenú základnicu. Tento základný postup bol identický pri spracovaní v oboch verziách Bernského softvéru.

Jednotlivé denné riešenia sa následne kombinovali do výsledného riešenia pre celú kampaň. V Bernskom softvéri v. 4.2 bolo použité jednoduché vážené priemerovanie pomocou podprogramu COMPAR, ktorý pracuje len so súbormi súradníc, resp. ich kovariančnými maticami. Vo verzii 5.0 bol na kombináciu použitý nástroj ADDNEQ2, využívajúci súbory normálnych rovníc. Výsledným produktom kombinácie pre jednu kampaň GPS boli súradnice bodov a ich plná kovariančná matica.



Tabuľka 5.2 Stratégia spracovania meraní GPS v Bernskom softvéri verzia 4.2 a 5.0

	Bernese Software v. 4.2	Bernese Software v. 5.0
<b>Vstupné údaje</b>		
Merania	RINEX 0 – 24 h UT	RINEX 0 – 24 h UT
Interval merania	30 s	30 s
Presné dráhy družíc a parametre orientácie Zeme	služba IGS v systéme ITRF96 (1998), ITRF97 (1999 – 2001), ITRF2000 (2002 – 2006), ITRF2005 (2007 – 2008)	služba IGS v systéme ITRF2000 (1998 – 2006) reprocessing, ITRF2005 (2007 – 2008)
Referenčný bod	ROHA (1998 – 2003) GANP (2004 – 2008)	JOZE (1998 – 2008)
Súradnice referenčného bodu v danej epoche	ITRF2000 - rôzny zdroj	ITRF2005 - oficiálne publikované
Fázové centrá antén prijímačov GPS a antén družíc GPS	Relatívne PHAS_CEG.I01, SATELLIT.I01	Absolútne PHAS_CEG.I05, SATELLIT.I05
<b>Spracovanie</b>		
Výškový filter	10°	5°
Geometria základníc	lúčovitá - STAR	lúčovitá – STAR
Redukcia vplyvu troposféry	odhad každé 2h	odhad každé 2h
suchá zložka – apriórny model	Saastamoinen	Dry Niell
vlhká zložka – mapovacia funkcia	1/cos z	Wet Niell
Riešenie ambiguit	QIF	QIF
Riešenie pre každú základnicu	L1&L2	L1&L2
<b>Odhad súradníc a kovariančnej matice</b>		
Samostatné riešenie pre intervaly 0 – 24 h UT	Eliminácia ambiguit, Riešenie na frekvencii L3, Riešenie ako voľna sieť s apriórnou presnosťou 0,0001 m v polohe referenčného bodu	
Výsledné riešenie pre kampan	kombinácia denných riešení vo forme CRD/COV pomocou programu COMPAR	kombinácia denných riešení vo forme normálnych rovníc pomocou programu ADDNEQ2

Kvalita výsledného riešenia sa posudzovala na základe vnútornej presnosti a opakovateľnosti, ktorá nám v podstate predstavuje vonkajšiu presnosť. Vnútorná presnosť všetkých spracovaných kampaní bola veľmi vysoká: pohybovala sa v rozmedzí 1,9 až 3,3 mm pri spracovaní vo verzii 4.2; 1,8 až 2,4 mm vo verzii 5.0 (pozri tabuľku 5.3). Vysoká presnosť však nezodpovedala skutočnej realite, ale skôr odrážala vnútornú konzistentnosť riešenia v rámci jedného dňa a veľkého počtu nadbytočných meraní. Obraz o reálnej presnosti poskytuje opakovateľnosť, získaná z porovnania riešení z jednotlivých dní v rámci jednej kampane. Tu sa rozdiely v určených súradniciach medzi jednotlivými dňami pohybovali v rozmedzí niekoľko milimetrov až centimetrov. Najväčším zdrojom týchto nesúládov bolo nepriaznivé počasie, resp. kratšie alebo neúplné observácie. Zo vzájomného porovnania dosiahnutých vnútorných a vonkajších presností v oboch verziách sa ukázalo, že spracovanie vo verzii 5.0 je lepšie a spoľahlivejšie, keďže kvalita riešení medzi rokmi sa veľmi nemení.

Tabuľka 5.3 Vnútoraná a vonkajšia presnosť pri spracovaní v Bernskom softvéri verzia 4.2, 5.0

GPS kampaň	Bernsky softvér verzia 4.2			Bernsky softvér verzia 5.0		
	Počet bodov	vnútorná presnosť (mm)	vonkajšia presnosť (mm)	Počet bodov	vnútorná presnosť (mm)	vonkajšia presnosť (mm)
1998	13	0.0024	0.0255	13	0.0018	0.0093
1999	13	0.0028	0.0228	13	0.0019	0.0091
2000	13	0.0031	0.0419	14	0.0018	0.0162
2001	16	0.0033	0.0283	21	0.0021	0.0160
2002	16	0.0032	0.0308	23	0.0019	0.0109
2003 (leto)	14	0.0032	0.0303	14	0.0019	0.0148
2003 (jeseň)	15	0.0033	0.0313	21	0.0018	0.0131
2004	17	0.0020	0.0124	24	0.0020	0.0161
2005	16	0.0019	0.0103	23	0.0019	0.0107
2006	14	0.0022	0.0156	21	0.0024	0.0191
2007	16	0.0024	0.0217	23	0.0022	0.0146
2008	16	0.0023	0.0191	23	0.0021	0.0120

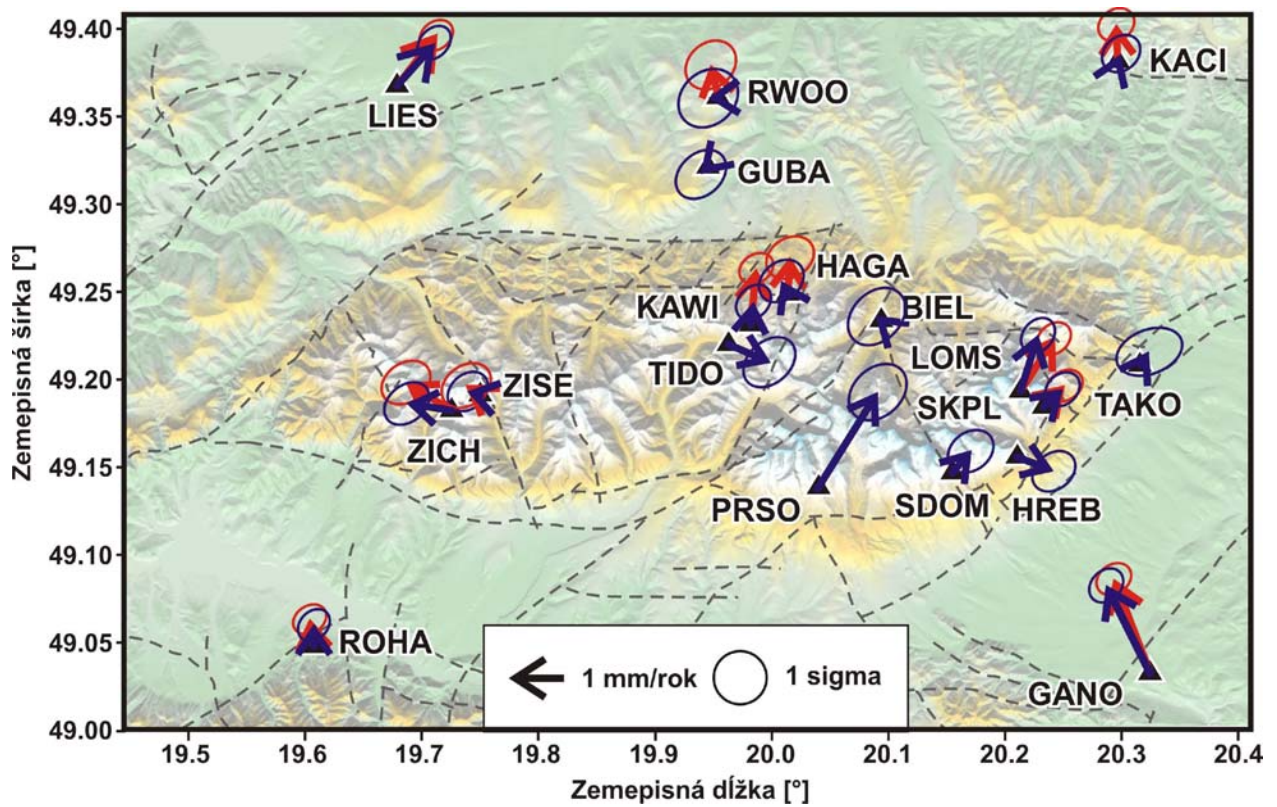
#### 5.4.2 Určenie rýchlostí bodov z epochových meraní GPS v oblasti Tatier

Výpočet neznámych rýchlostí bodov a ich charakteristík bol vykonaný v prostredí Matlab (verzia 2007b) pomocou programového balíka COMB\_NET (Hefty, 2009), ktorý je určený na kombináciu meraní s uvážením časového faktora. Príprava a prevod nameraných údajov pozostávali z dvoch krokov. V prvom sa do čitateľnej formy pre program previedli vstupné merania vo formáte CRD, COV pre všetky vybrané body a epochy merania. V druhom boli z celkového sinexu pre príslušnú realizáciu ITRF vyselektované potrebné informácie pre zvolené referenčné body. Po načítaní a úprave potrebných vstupných súborov sa nastavili potrebné parametre výpočtu:

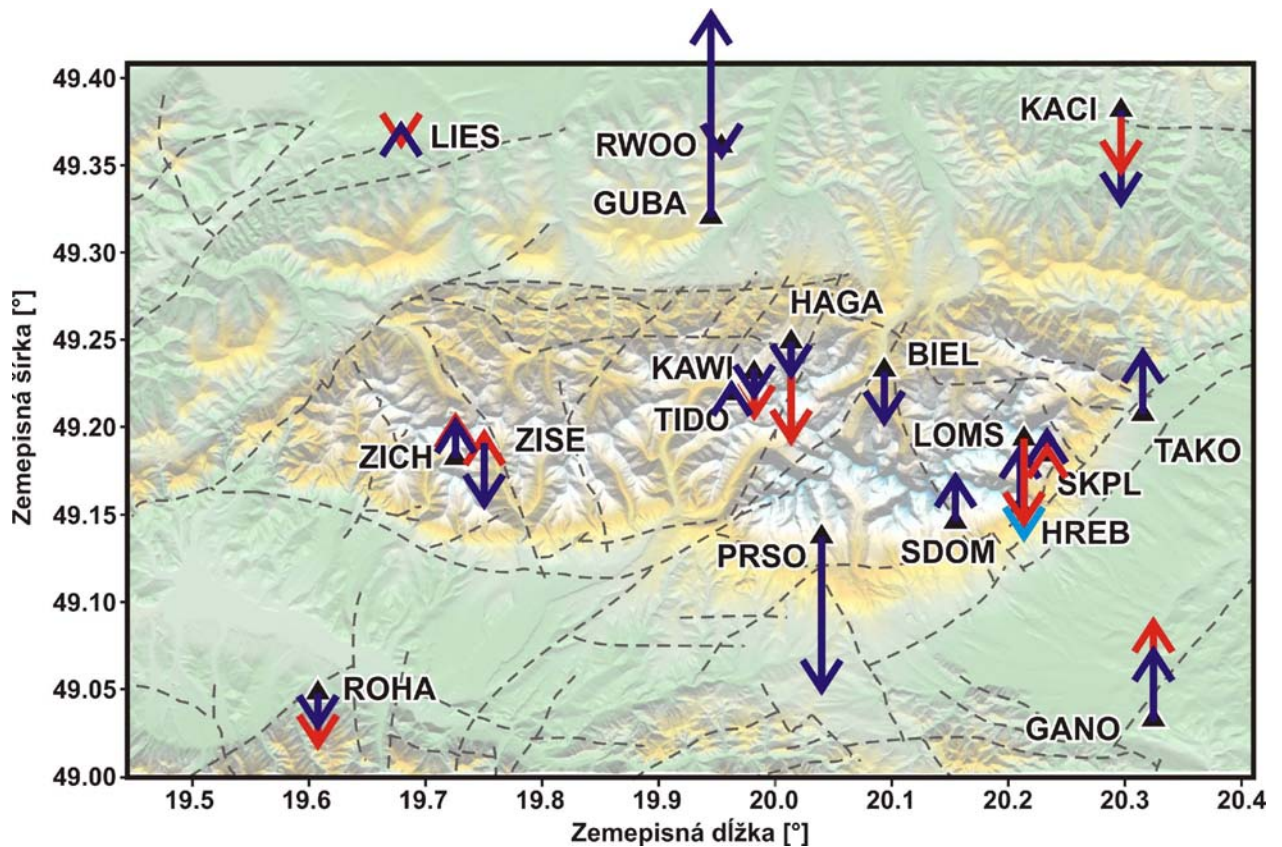
- referenčná epocha pre vypočítané rýchlosti  $t_0$  – epocha 2000.0;
- počet transformačných parametrov – 6 (3 translácie a 3 rotácie);
- redukcia o modelové rýchlosti – áno, model APKIM2000;
- kritérium pre vylúčenie vybočujúcich meraní – 0,020 m.

Výsledkom odhadu boli výsledné súradnice, globálne a reziduálne rýchlosti a ich stredné chyby, transformačné parametre medzi príslušnou epochou a prvou epochou i rezídua v polohe medzi strednou polohou a polohou v príslušnej epoche merania spolu s charakteristikami presnosti. Výpočet bol aplikovaný na výsledky spracovania GPS meraní v oboch verziách Bernského softvéru (4.2 a 5.0). Výsledky sú znázornené na obr. 5.3 a 5.4.

Pri porovnaní výsledných vektorov horizontálnych pohybov medzi riešeniami vo verzii 4.2 a 5.0 je vidieť dobrú zhodu na bodoch na území Slovenska a väčší nesúlad na bodoch v Poľsku. Výsledkom riešenia vo verzii 4.2 sú prakticky dvojnásobné hodnoty rýchlostí oproti výsledkom z verzie 5.0. Je to pravdepodobne spôsobené väčším rozptylom výsledkov meraní vo verzii 4.2 medzi jednotlivými rokmi na spomínaných bodoch. Pri vertikálnych pohyboch je pri vzájomnom porovnaní situácia diferentná. Na niektorých bodoch nastala zhoda v smere rýchlosti, ale naopak došlo k nesúladu medzi veľkosťami, napr. bod HAGA. Celkovo výsledky vertikálnych rýchlostí z verzie 4.2 poukazujú na poklesávajúcu tendenciu, pričom pri výsledkoch z verzie 5.0 je charakter vyrovnaný. Uvedené rozdiely sú podobne ako pri horizontálnych rýchlostiach dôsledkom väčšieho rozptylu výsledkov medzi jednotlivými rokmi, čo je najpravdepodobnejšie spôsobené horšími možnosťami eliminácie systematických vplyvov pri spracovaní meraní vo verzii 4.2.



Obr. 5.3 Odhadnuté horizontálne rýchlosti spolu s charakteristikami presnosti, červené šípky – verzia 4.2, modré šípky – verzia 5.0



Obr. 5.4 Odhadnuté vertikálne rýchlosti, červené šípky – verzia 4.2, modré šípky – verzia 5.0

Uvedený fakt sa ešte viac prejaví pri detailnej analýze rezíduí v polohe a vo výške medzi riešeniami pre jednotlivé roky. Z ich charakteru je zrejماً relativne lepšia vnútorná konzistentnosť pre riešenia vo verzii 5.0. Či už ide o polohovú alebo výškovú zložku, ukazuje sa riešenie vo verzii 5.0 ako kompaktnjšie a presnejšie. Vo výsledkoch na bodoch sa objavuje menej výkyvov a veľkého rozptylu, zmeny polohy bodu sú plynulejšie. Tieto rušivé efekty sú pravdepodobne dôsledkom neúplného modelovania, resp. odstránenia systematických efektov, ako sú najmä troposféra, multipath, použitie rôznych typov antén a prijímačov.

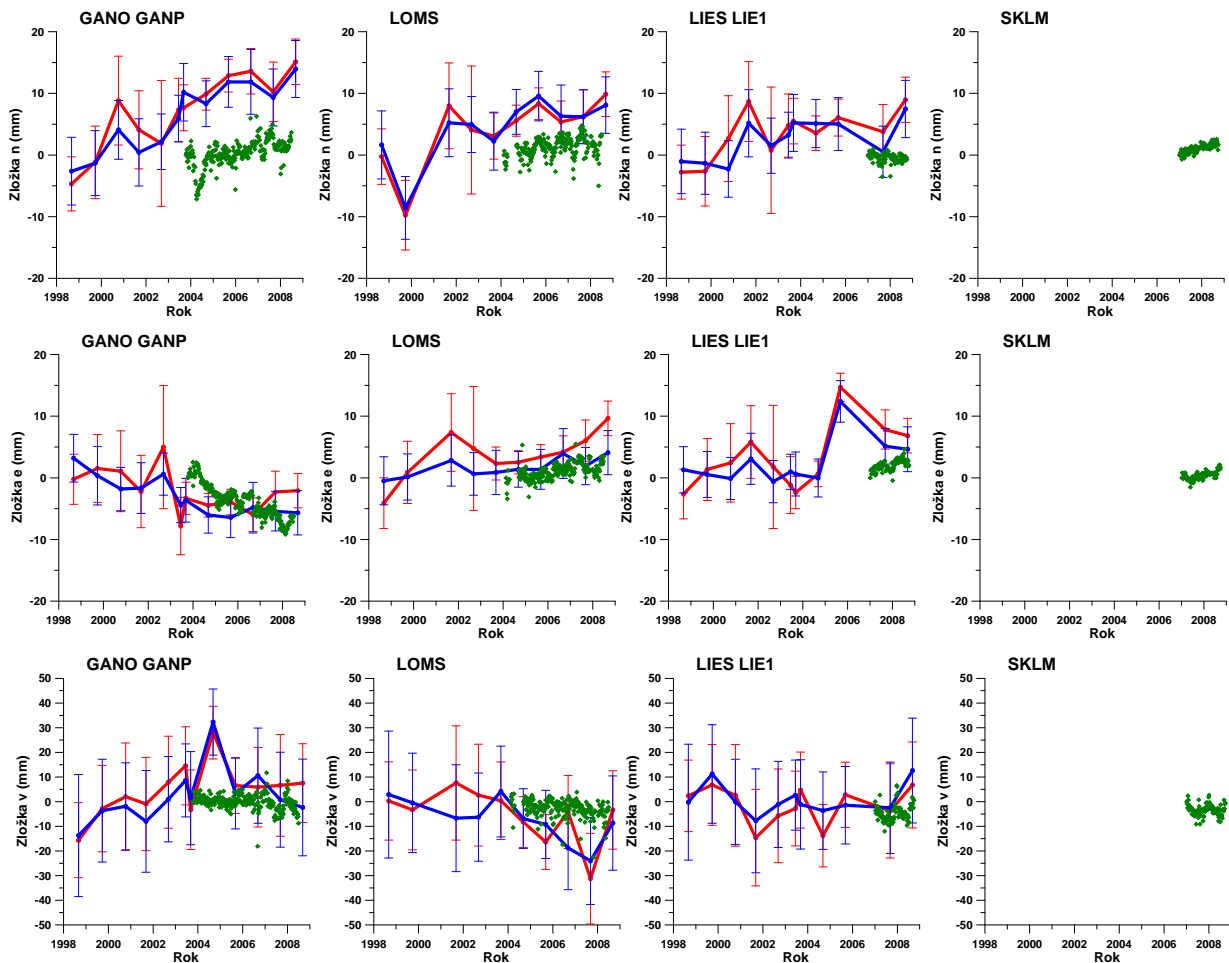
### 5.4.3 Analýza časových radov z permanentných staníc v regióne Vysokých Tatier

V oblasti Vysokých Tatier sa v súčasnej dobe nachádzajú 4 permanentné stanice GNSS. Najdlhšie v regióne vykonáva merania stanica GANP, ktorá je v činnosti od leta 2003, pričom do siete EPN bola zaradená v novembri 2003 a do siete permanentných staníc IGS v novembri 2006. Ďalším bodom, kde sa vykonávajú permanentné observácie, je bod LOMS. Kontinuálne merania tu prebiehajú od jesene roku 2004. V roku 2006 boli zriadené v rámci siete SKPOS v oblasti body LIE1 a SKLM (Ferianc, Šalátová, 2007; Droščák, 2008). Okrem týchto bodov boli do výpočtov a následných analýz zahrnuté aj ďalšie permanentné stanice zo strednej Európy. Celkové spracovanie bolo uskutočnené pre obdobie 1999.5 až 2008.5 v rámci reprocessingu pôvodných meraní v LAC sieti EPN a CEGRN na Katedre geodetických základov STU v Bratislave (Hefty a kol., 2009). Pre spracovanie bola zvolená jednotná stratégia, vychádzajúca z odporúčanej stratégie pre spracovanie meraní GNSS v sieti EPN, resp. v sieti CEGRN (Stangl, 2007).

Primárnymi boli výsledky na permanentných staniciach vo Vysokých Tatrách (pozri tabuľku 5.4, obr. 5.5), resp. na referenčných bodoch, použitých pri spracovaní epochových kampaní. Z priebehu časových radov jednoznačne vidieť veľkú stabilitu v riešení. Vzájomné rozdiely medzi jednotlivými epochami sú len minimálne, na úrovni niekoľko mm, na rozdiel od epochových, pri ktorých sa pohybujú na úrovni rádovo 1 cm v polohe a niekoľko centimetrov vo výške. Pri porovnaní epochových a permanentných observácií na referenčných bodoch sa ukazujú negatívne vlastnosti epochového prístupu. Pri postupnom časovom vývoji je vidieť, že pri viacerých rokoch sa objavili skoky, ktoré sú najpravdepodobnejšie spôsobené zhoršeným počasím. Na rozdiel od epochových je pri permanentných meraniach možné tieto eventuálne skoky odhaliť a opraviť. Pri porovnaní bodov v Tatrách sa rozdiely ešte zväčšia.

Tabuľka 5.4 Porovnanie reziduálnych rýchlostí získaných z permanentných a epochových meraní vyjadrené v mm/rok

Bod	Permanentne merania						Epochove merania					
	$v_n$	$\sigma_{vn}$	$v_e$	$\sigma_{ve}$	$v_v$	$\sigma_{vv}$	$v_n$	$\sigma_{vn}$	$v_e$	$\sigma_{ve}$	$v_v$	$\sigma_{vv}$
<b>BOR1</b>	0.74	0.02	0.12	0.02	-0.26	0.04	0.85	0.13	-0.03	0.13	0.51	0.33
<b>GOPE</b>	1.08	0.02	-0.4	0.02	1.60	0.05	0.13	0.14	0.87	0.13	2.47	0.47
<b>GRAZ</b>	1.17	0.02	0.33	0.02	0.81	0.03	1.35	0.12	0.93	0.13	0.22	0.36
<b>JOZE</b>	0.9	0.03	0.28	0.02	0.55	0.07	0.85	0.37	-0.22	0.29	0.35	2.44
<b>PENC</b>	0.77	0.02	0.61	0.01	-0.41	0.04	1.10	0.19	0.77	0.16	-0.97	0.83
<b>GANP</b>	1.04	0.08	-1.76	0.05	-0.62	0.12	1.71	0.36	-0.86	0.28	1.39	2.18
<b>LOMS</b>	0.43	0.07	0.59	0.06	-0.88	0.20	1.14	0.36	0.36	0.28	-1.83	2.18
<b>LIE1</b>	-0.28	0.16	1.17	0.13	2.30	0.62	0.77	0.35	0.69	0.26	0.15	2.06
<b>SKLM</b>	1.03	0.09	0.83	0.09	0.34	0.42						



Obr. 5.5 Porovnanie detailného priebehu permanentných a epochových meraní v zložke  $n$ ,  $e$ ,  $v$  pre permanentné body v Tatrách, (červená – epochové BSW 4.2, modrá – epochové BSW 5.0, zelená – permanentné BSW 5.0)

## 5.5 Určenie poľa deformácií a napätí v oblasti Vysokých Tatier

Na posudzovanie a stanovovanie deformačných a rizikových zón často len bodové informácie nestačia. Jedným z hlavných cieľov bolo na základe rýchlostí bodov určených z meraní GPS stanoviť mieru napätia, resp. deformácie, vo Vysokých Tatrách. Rizikové zóny možno definovať ako zóny alebo oblasti, v ktorých dochádza k zvýšenej deformácii, čo následne vedie k zvýšeniu napätia a následne k väčšej možnosti vzniku zemetrasení v príslušnom regióne. Z viacerých možných prístupov bol zvolený postup, využívajúci metódu konečných prvkov, ktorý nám umožňuje zohľadniť zložitú topografiu Vysokých Tatier a tiež fyzikálne vlastnosti hornín, z ktorých sú tvorené. Veličinami, ktoré vstupovali do výpočtov, boli posunutia, predstavujúce rýchlosti pohybu určené z epochových meraní GPS.

Praktické výpočty prebiehali v programe ANSYS verzia 8. (ANSYS, 2009). Celkový postup pozostával zo štyroch základných krokov:

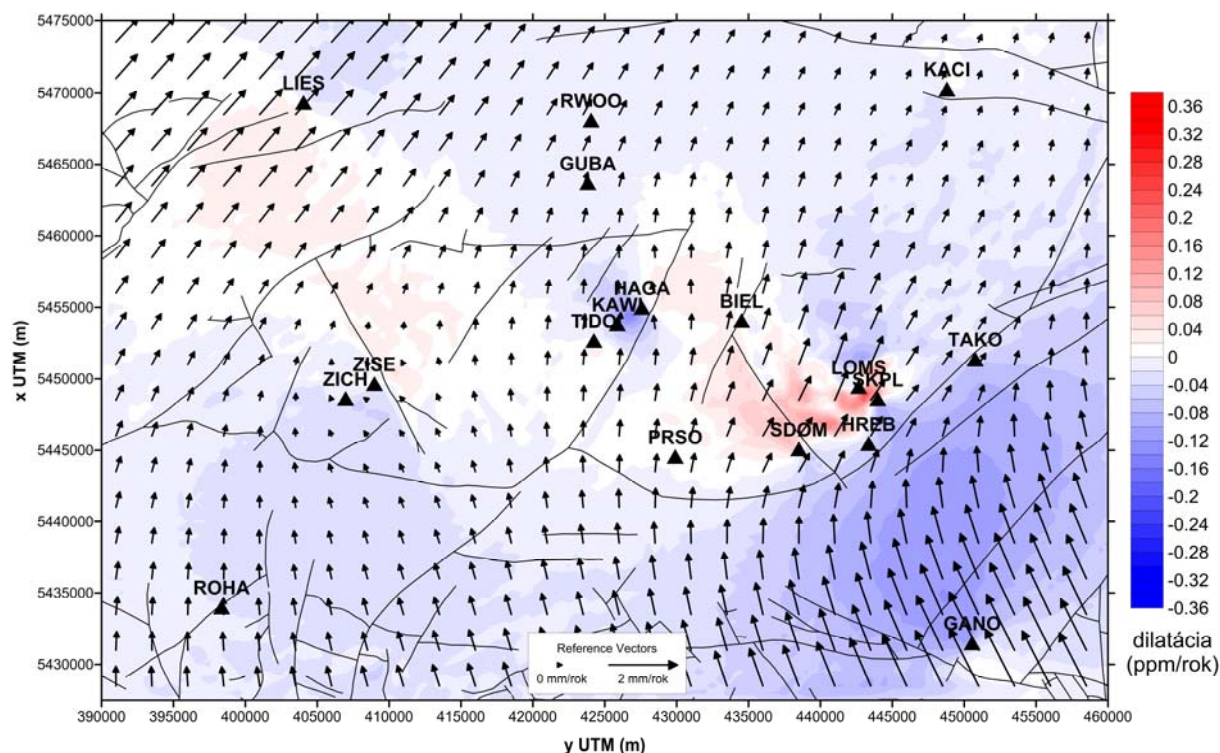
1. vytvorenie celkovej oblasti, resp. objemu, v ktorej sa úloha riešila;
2. stanovenie typu úlohy a diskretizácia oblasti na elementy;
3. zadanie okrajových podmienok;
4. výsledné riešenie úlohy.

Celkovú záujmovú oblasť tvorilo širšie okolie Vysokých Tatier. Hornú hranicu oblasti tvoril terén, aproximovaný pomocou digitálneho modelu reliéfu SRTM3 verzia 3. (SRTM, 2009).

Dolnú hranicu tvorila rovina, ktorá bola umiestnená do hĺbky  $-35$  km, čo je predpokladaná hĺbka Mohorovičičovej plochy diskontinuity v oblasti Tatier (Lankreijer a kol., 1999). Boky vymedzenej oblasti tvorili roviny. Celkovo mala oblasť približne rozmery  $70 \times 47 \times 36$  km.

Vzhľadom na plánované určenie deformácií, resp. napätí, v oblasti bol zvolený štruktúrally stacionárny priestorový typ úlohy, ktorý vychádza z riešenia Laméových diferenciálnych rovníc. Pri diskretizácii oblasti sa využil priestorový lineárny 8-uzlový, resp. 4-uzlový element typu SOLID45. Ako materiál pre elementy bol na základe (Lankreijer a kol., 1999) zvolený suchý granit vo vrchnej časti zemskej kôry (Youngov modul pružnosti  $E = 50$  GPa, Poissonovo číslo  $\nu = 0.25$ ). Pre veľkosť elementu bola nastavená hodnota 2500 m. Celkovo bolo vytvorených 1 521 271 elementov pomocou 268 181 uzlov. Z hľadiska okrajových podmienok bola pre vrchnú hranicu použitá Dirichletova okrajová podmienka vo forme známych posunutí, ktoré vznikli interpoláciou odhadnutých hodnôt rýchlostí pohybu bodov v Tatrách z epochových meraní GPS spracovaných Bernským softvérom v. 5.0. Na interpoláciu v každej zložke bola použitá lineárna interpolácia v kombinácii s Delaunayovou trianguláciou implementovanou v programe Surfer verzia 8.0 (Surfer, 2002) (pozri obr. 5.6). Pre spodnú hranicu, aproximujúcu Mohorovičičovu plochu diskontinuity, bola zadaná Dirichletova okrajová podmienka v tvare nulových posunutí, čo zabezpečilo uchytenie celého modelu. Na bočné steny oblasti bola aplikovaná nulová Neumanova okrajová podmienka.

Po zadaní okrajových podmienok nasledoval samotný výpočet. Výsledkom boli zložky vektora posunutí, tenzora deformácií a napätí vo všetkých uzlových bodoch. Primárne šlo o vypočítané hodnoty pomerných deformácií a celkového napätia na povrchu oblasti. Pri niektorých bodoch je pre charakter a veľkosť rýchlostí ich pohybov veľký predpoklad, že sú skôr prejavom exogénnych ako endogénnych procesov. Preto sa uskutočnili dve varianty výpočtu, so všetkými bodmi a len s vybratou množinou bodov, pri ktorých sa nepredpokladalo pôsobenie exogénnych vplyvov, hlavne vo forme svahových pohybov. Z celkovej množiny boli vylúčené body ZICH, TIDO, PRSO, GUBA, RWOO a HREB.



Obr. 5.6 Interpolované horizontálne rýchlosti pohybov v oblasti Tatier v kombinácii s celkovou dilatáciou v horizontálnom smere – vybratá skupina bodov

## 5.6 Zhodnotenie výsledkov s uvážením geologického charakteru územia

Pri celkovom pohľade na vypočítané rýchlosti na jednotlivých bodoch možno konštatovať, že územie Vysokých Tatier a priľahlých regiónov sa nespráva rovnako. Vo všeobecnosti na základe dosiahnutých výsledkov je nutné konštatovať, že vertikálne rýchlosti na všetkých bodoch sú štatisticky nevýznamné, pretože veľkostne sa nachádzajú v oblasti stredných chýb. Pri stanovovaní príčiny pohybu treba teda postupovať veľmi opatrne.

Na základe rýchlostí pohybu bodov a výsledkov určenia deformácií a napätí (Obr. 5.6) môžeme Tatry rozdeliť na 4 základné skupiny. V prvej lokalite (oblasť Žiarskej doliny) dochádza vzhľadom na ostatné územie k anomálnemu pohybu západným smerom, ktorý je najpravdepodobnejšie výsledkom pôsobenia svahových pohybov. V ďalšom regióne (oblasť Kasproweho wierchu) sa ukazuje kompresia hlavne v smere sever – juh, ktorá je v súlade s celkovou severnou až severovýchodnou orientáciou pohybu severnej časti oblúka Vnútorých Karpát. Body tejto časti môžu byť najpravdepodobnejšie ovplyvnené činnosťou jedného z hlavných priečných zlomov, ktorý oddeľuje Západné Tatry od Vysokých, resp. Východných Tatier. Body v centrálnej oblasti Vysokých Tatier majú očakávanú severovýchodnú orientáciu, pričom sa tu prejavuje výraznejšia extenzia v smere východ – západ. Táto oblasť Sliezskeho domu až Lomnického štítu sa nachádza v tesnej blízkosti Podtatranského zlomu, ktorý je hlavným tektonickým činiteľom v oblasti Vysokých Tatier.

Z vonkajších oblastí ide najmä o zvýšenú severo – južnú kompresiu v podhorí Tatier smerom ku Gánovciam, ktorá je výsledkom výrazného pohybu bodu GANO. Z geologického hľadiska ju treba chápať ako samostatnú a v dôsledku aktivity Vikartovského zlomu ako veľmi živú oblasť. Podobne ako Gánovce, treba vyčleniť aj oblasť Lieseku, v ktorej sa ukazuje mierna aktivita. Tá môže byť skôr spôsobená blízkym bradlovým pásmom. Ostatné body vonkajšej oblasti vykazujú len minimálny pohyb. Z nich sa ako najstabilnejší ukazuje bod ROHA, geologicky patriaci do Nízkych Tatier, ktoré sú v príslušnom širšom regióne najstabilnejšou časťou. Poľské body KACI, RWOO a GUBA nie sú výrazne aktívne v horizontálnom smere, ich rýchlosti sa pohybujú rádovo na úrovni menšej ako 0,3 mm/rok, čo vzhľadom na dosiahnutú presnosť prakticky predstavuje nulový pohyb. Pri vertikálnych pohyboch je najzaujímavejším bod GUBA, ktorý výrazne stúpa na úrovni 3,7 mm za rok. Príčina tohto pohybu je veľmi otázná, keďže pozadie bodu nie je detailne známe.

Body TIDO, PRSO, BIEL a HREB vykazujú anomálne správanie voči očakávanej tendencii. Príčinou môžu byť jednak svahové pohyby alebo lokálne efekty, ktoré sú skôr prejavom exogénnych vplyvov (napr. namrznutie a následné postupné uvoľňovanie).

Z celkového pohľadu možno vzhľadom na určené deformácie a napätia charakterizovať v regióne tri výraznejšie rizikové zóny. Prvou je oblasť Gánoviec, ktoré majú vzhľadom na oblasť Tatier osobitný charakter horizontálneho a vertikálneho pohybu. Ako boli vyššie konštatované, ich príčinu možno hľadať v aktivite Vikartovského zlomu, ktorého činnosť je jednoznačne preukázateľná. Druhou zónou je oblasť centrálnej časti Východných Tatier. Napätia a deformácie v tejto zóne môžu byť tak odrazom aktivity Podtatranského zlomu, ako aj len prejavom lokálnych efektov. Treťou zónou je oblasť Kasproweho Wierchu, kde dochádza ku kompresii. Pre potvrdenie alebo vyvrátenie predkladaných tvrdení by boli potrebné ďalšie merania, resp. použitie geofyzikálnych a geologických postupov na určenie miery aktivity v daných rizikových zónach.

## 6 PRÍNOS PRE VEDU A PRAX

Hlavným cieľom práce bolo vo výslednej fáze stanoviť zóny zvýšeného napätia a deformácie vo vysokohorskom prostredí. V rámci praktického experimentu sa tieto parametre určovali v oblasti Vysokých Tatier.

S ohľadom na čiastkové ciele možno charakterizovať výsledky dizertačnej práce a jej prínosy pre vedu a prax nasledovne:

1. V teoretickej časti práce bolo na pozadí doposiaľ publikovaných prác sumárne uvedené teoretické pozadie jednotlivých čiastkových krokov v chronologickom poradí od merania a spracovania meraní GPS, cez určenie rýchlostí pohybov bodov z epochových a permanentných meraní až po určenie deformácií a napätí pomocou numerickej metódy konečných prvkov.
2. Pri spracovaní epochových meraní GPS bola v súlade s odporúčaniami konzorcia CEGRN použitá, overená a pre naše potreby modifikovaná stratégia pre spracovanie meraní GPS s účelom monitorovania časových zmien polohy bodov v danom regióne. Za praktický prínos možno považovať špecifikovanie hlavných problémov, ktoré ovplyvňujú korektný a spoľahlivý výsledok. Súčasťou práce je aj opis ich eliminovania, resp. zníženia ich vplyvu na minimum.
3. Novým je aj porovnanie riešení medzi dvomi verziami Bernského softvéru (verzia 4.2 a 5.0), pričom z výsledkov sa ukazuje lepšia kompaktnosť a homogénosť vo verzii 5.0
4. Pri odhade neznámych rýchlostí bodov bol použitý efektívny spôsob, ktorý využíval referenčné rýchlosti určené na permanentných staniách. Týmto spôsobom bol korektné zabezpečený jednak odhad neznámych rýchlostí bodov a taktiež napojenie celej siete na svetový systém ITRS v konkrétnej realizácii ITRF. Na rozdiel od spôsobu, ktorý sa najviac používa v praxi (fixné napojenie siete na vzťažné body), nám tento prístup umožňuje sledovať zmeny na všetkých bodoch, či už vzťažných alebo pozorovaných. Obohatením pre prax je tiež porovnanie epochových a permanentných meraní s poukázaním na výhody a nevýhody oboch metód.
5. Pri určovaní napätí a deformácií bol prvý krát aplikovaný postup, ktorý na stanovenie napätia v oblasti využil metódu konečných prvkov, pri ktorej bola ako hranica oblasti použitá detailná reálna topografia. Ako okrajové podmienky boli použité reálne hodnoty rýchlostí pohybu bodov na tejto ploche, ktoré boli interpolované do pravidelnej siete. Výpočet bol vykonaný v programe ANSYS, ktorý sa napriek svojim obmedzeniam ukázal ako vhodný nástroj na komplexné modelovanie poľa napätí a deformácií.
6. Za prínos pre vedu a prax je možné považovať aj stanovenie rizikových zón so zvýšeným predpokladom vzniku zemetrasení v oblasti Vysokých Tatier. Tieto regióny boli vybraté na základe charakteru odhadnutých rýchlostí pohybu bodov a určených oblastí so zvýšenou mierou napätia a deformácie. Výber bol vykonaný s uvažovaním geologického podložia, resp. celkového tektonického charakteru oblasti.



## 7 ZÁVER

Predložená dizertačná práca poukazuje na možnosti určovania deformácií zemskej kôry vo vysokohorskom prostredí na základe odhadnutých vektorov rýchlostí pohybov bodov z epochových a permanentných meraní GPS. Na určenie deformácií bol použitý inovatívny spôsob, založený na numerickej metóde konečných prvkov. Výhodou použitia tejto metódy je, že určované napätia a deformácie sú modelované v celej vymedzenej 3D oblasti, pričom hornú hranicu môže tvoriť reálna topografia. Ďalšou výhodou je zohľadnenie mechanických vlastností materiálov, ktoré možno charakterizovať Laméovými konštantami. Tieto výhody zohrávajú významnú rolu pri modelovaní napätí najmä v komplikovanom prostredí, ktorým sú napr. vysoké pohoria.

Pri riešení práce sme dospeli k viacerým záverom. Spracovanie epochových meraní GPS bolo uskutočnené v prostredí univerzitného spracovateľského softvéru Bernese verzia 4.2 a vo verzii 5.0, v ktorej bola použitá jednotná stratégia pre spracovanie všetkých GPS meraní. Z porovnania vnútornej a vonkajšej presnosti je možné konštatovať, že spracovanie vo verzii 5.0 je presnejšie, homogénnejšie, v porovnaní s predchádzajúcou verziou sa v riešení vyskytuje menej skokov a vybočujúcich meraní. Zo spracovaných údajov boli pomocou referenčných rýchlostí použitých permanentných staníc IGS následne odhadnuté vektory rýchlostí pohybu bodov v lokalite Tatier. Z celkového pohľadu je zachovaná predpokladaná severovýchodná orientácia pohybu, avšak vyskytujú sa body, ktorých pohybová tendencia je iná, lebo sú pravdepodobne ovplyvnené lokálnymi faktormi, resp. svahovými pohybmi. Tieto sa najviac prejavili na bodoch PRSO a GUBA. Vo vertikálnom smere je situácia veľmi rôznorodá a nedá sa jednoznačne stanoviť prevládajúca tendencia. Na viacerých blízkych bodoch nastal zaujímavý fenomén, kedy údolne body rastú a vrcholové body klesajú. Je veľmi problematické posúdiť príčiny tohto javu, keďže všetky vertikálne rýchlosti sa nachádzajú v oblasti stredných chýb. Pri porovnaní epochových a permanentných meraní sa v plnej miere ukázala menšia stabilita epochových meraní, konkrétne vo forme skokov, pulzov a väčšej neistoty. Pomocou metódy konečných prvkov boli na základe interpolovaných rýchlostí určené zóny s predpokladanou zvýšenou deformačnou aktivitou. Využitie metódy konečných prvkov pomocou programu ANSYS sa ukázalo ako veľmi efektívne. V práci predložený postup je len prvou aproximáciou, v ktorej sa niektoré aspekty zanedbávali. Nevýhodou zostáva nemožnosť určiť mieru presnosti určených deformácií a napätí. Problémom taktiež zostáva relatívne riedka sieť bodov, z ktorých bola vykonaná interpolácia.

Na základe všetkých výsledkov boli vyčlenené tri regióny, kde predpokladáme zvýšenú mieru napätia a deformácie. Ide o lokalitu Gánoviec, oblasť medzi Sliezkym domom a Lomnickým štítom a región Kasproweho Wierchu. Použitý postup je veľmi prínosný, lebo nám umožňuje do budúca doň zapojiť ďalšie doplnujúce informácie z geológie a geofyziky a tým pádom vytvoriť komplexný model na určenie deformácií v danom regióne.

Navrhnutý postup spracovania a určenia zón napätí a deformácií by bolo vhodné overiť aj experimentmi v iných lokalitách, resp. ich porovnať s výsledkami geofyzikálnych a geologických meraní. Ako najvhodnejšie sa javí meranie absolútnej hodnoty tiažového zrýchlenia, ktoré v súčasnosti predstavuje jedinú zodpovednú alternatívu pre určenie rýchlosti pohybu vo vertikálnom smere. Ďalšou možnosťou na verifikáciu a zahustenie informácií o rýchlostiach pohybu bodov je použitie technológií založených na permanentných odrážačoch pre interferometrické radarové merania. Predložené výsledky sú základom pre ďalšie rozpracovanie problematiky modelovania poľa deformácií vo vysokohorskom prostredí.

## 8 SUMMARY

Changes of the Earth and their monitoring are one of the most important objectives for geosciences. While in the past we were satisfied with measuring and describing of the changing world, now we want to understand inner processes of the Earth. One of the most important goals is to monitor and predict geo hazards, like earthquakes, volcano eruptions... Global navigations satellite systems (GNSS) are very efficient tools for determinations of velocity of lithospheric plates, especially for inner plate motions.

The presented PhD thesis focuses on monitoring of deformations of the Earth's crust in high mountains. In the first chapter theoretical background of processing of epoch and permanent GNSS observations in order to estimate inner plate velocities of the measured points are described. To model strain and stress field, numerical methods are used.

In the practical experiment, in the area of the Tatra Mountains, have been established special geodynamics network TATRY for monitoring of tectonics movements. The network consists of 18 points. Epochs GNSS measurements have been performed annually since 1998 with durations approximately 96 hours. Processing was made in two variants, in the Bernese software version 4.2 (BSW 4.2) and 5.0 (BSW 5.0) with different settings. Processing in version 5.0 was made in according to the EPN and CEGRN recommendations in new ITRF2005 system. Final inner plate velocities of the points were estimated in the special program COMB\_NET, which was designed for combinations of networks with considering a time factor. The results of both versions (4.2, 5.0) are very similar on a majority of the points. A detail analyses of residual show better reliability and repeatability for the result from BSW 5.0. Horizontal velocities vary up to 2 mm/year, but majority of the points are below 1 mm/year. Their directions of the movements are in a good agreement with expected directions from the geology approaches (north-east direction). Vertical velocities of the points are very unstable and still problematic, because all values are in the interval of accuracy and their character are variable. In the region of the Tatra Mountains there are two permanent GNSS stations (GANP and LOMS). It is evident from comparison between times series of epoch and permanent measurements that better consistency and repeatability are in case of the permanent observations. They are without gaps, jumps and strong oscillations like in the epoch measurements.

Stress and strain fields were computed using the finite element method in ANSYS software. Here we used real topography (SRTM3) as upper boundary and surface of Moho discontinuity (in depth 35 km) as bottom boundary. Material properties were set up for dry granite and input displacements were gained from regular interpolation (500 x 500 m) of the 3D surface velocities. The obtained strain and stress fields depend strongly on the source velocity filed. Two variants were computed, (i) with all points and (ii) without point of problematic behavior (i.e. ZICH, TIDO, PRSO, GUBA, RWOO and HREB). Finally, there were determined 3 risk zones with bigger possibilities occurring earthquakes, i.e. surroundings of Ganovce, central part of the High Tatras and region of Kasprovy wierch. The presented procedure is promising, because it is able to combine informations from geology, geophysics and geodesy in one model. For the future investigation is necessary to verify computed velocities obtained from GPS measurements with other geodetic and geophysics techniques (absolute gravity measurements, InSAR technology ...).

## Zoznam publikovaných prác z danej problematiky

**Czarnecki, K., Mojzeš, M., Papčo, J., Walo, J., (2003):** First results of GPS measurement campaigns in Tatra Mountains. Reports on Geodesy No.1 (64), WUT, Warsaw, pp. 41-46.

**Mojzeš, M., Papčo, J., (2004):** The analysis of GPS measurements in Tatra mountain. Acta Geodynamica et Geomaterialia. Vol. 1, No. 3 (135), pp. 115-124.

**Mojzeš, M., Papčo, J., Czarnecki, K., Walo, J., (2004):** Evaluation of six years GPS epoch campaign measurements in the Tatra Mountains. Reports on Geodesy No.2 (69), pp.189-196.

**Papčo, J., (2004):** First results of GPS measurements campaign in Tatra Mountains. In: Juniorstav 2004, VUT Brno, pp.377.

**Pospíšil, L., Dvořák, P., Hotovcová, J., Mojzeš, M., Papčo, J., (2006):** The geo-analyses of the horizontal movement tendencies in the Eastern Slovakia. Contributions to Geophysics and Geodesy, Vol. 36, special issue, pp. 17-30

**Mojzeš M., Papčo J., (2008):** Monitorovanie pohybov Vysokých Tatier geodetickými metódami. In: 70 rokov SvF STU : Medzinárodná vedecká konferencia. STU Bratislava, SvF, s. 140-148.

## 9 LITERATÚRA

**Altamimi, Z., Collilieux, X., Legrand, J., Garayt, B., Boucher, C., (2007):** ITRF2005: New release of the International Terrestrial Reference Frame based on time series of station positions and Earth Orientation Parameters, Journal of Geophysical Research, vol. 112.

**Andrusov, D., (1959):** Prehľad stratigrafie a tektoniky druhohorného pásma masívu Vysokých Tatier na území Slovenska, Bratislava, Geol. Sborn. Slov. Akad. Vied 10, 1, s. 97-132

**Arabadžijski, D., Vanko, J., Vizikovskij, T., Vyskočil, P., Ioo, I., Mesčerskij, N., Micheile, M., Mladenovskij, M., Steinberg, I., (1986):** Mapa súčasných vertikálnych pohybov zemskej kôry na území Bulharska, Maďarska, NDR, Poľska, Rumunska, Európskej časti ZSSR a Československa, Moskva, Kartografia GUGK.

**ANSYS, (2009):** www stránka: [www.ansys.com](http://www.ansys.com).

**Beutler, G., Brockman, E., Dach, R., Fridez, P., Gurtner, W., Hugentobler, U., Johnson, J., Mervart, L., Rothacher, M., Schaer, S., Springer, T., Weber, R. (2000):** Bernese GPS Software version 4.2 Bern, Astronomical Institute university of Berne.

**Brdička, M., Samek, L., Sopko, B., (2000):** Mechanika kontinua, Academia, Praha.

**Czarnecki, K., Mojzeš, M.,(2000):** Geodynamics of Tatra Mountains – present status and development of the project. In. Report on geodesy. No. 7. Warszawa, 2000, pp. 123 – 124.

**Dach, R., Hugentobler, U., Fridez, P., Meindl, M., (2007):** Bernese GPS Software version 5.0, Astronomical Institute, University of Berne.

**Droščák, B., (2008):** Stanice SKPOS z pohľadu časových radov, 70 rokov SvF STU (Geodézia a Kartografia), Bratislava, 4. – 5. december 2008.

**EPN, (2009):** EUREF permanent network, www stránka: [www.epncb.oma.be](http://www.epncb.oma.be).

- Fejes, I., (2002):** Consortium for Central European GPS Geodynamic Reference Network (CEGRN): Concept, Objectives and Organization, In. Reports on Geodesy No.1(61) (Proceedings of the EGS G10 Symposium „Geodetic and Geodynamic programs of the CEI (Central European Initiative)“ Nice, France 21. – 26. april 2002), Warszawa, pp. 15 – 21
- Ferianc, D., Šalátová, E., (2007):** SKPOS – Slovenská Priestorová Observačná služba GNSS, Geodetické siete a priestorové informácie, Podbanské, 29. – 31. október 2007
- Guterch, B., Lewandowska-Marciniak, H., Niewiadomski, J., (2005):** Earthquakes recorded in Poland along the Pieniny Klippen Belt, Western Carpathians, Acta Geophysica Polonica, Vol. 53, No. 1., pp. 27-45
- Hefty, J., Husár, L., (2003):** Družicová geodézia, Globálny polohový systém, Bratislava, Slovenská Technická Univerzita.
- Hefty, J., (2004):** Globálny polohový systém v štvorrozmernej geodézii, Bratislava, Slovenská Technická Univerzita.
- Hefty, J., (2009):** Programový balík COMB\_NET, personal communications
- Hefty, J., Igondová, M., Droščák, B., (2009):** Homogenization of long-term GPS monitoring series at permanent stations in Central Europe and Balkan Peninsula, Contributions to Geophysics and Geodesy, Vol. 39/1.
- Hradílek, L., (1984):** Vysokohorská geodézie, Trigonometrická nivelace a trojrozmerná terestrická triangulace, Praha, Academia.
- IGS, (2009):** International GNSS Service, www stránka: <http://igsceb.jpl.nasa.gov/>
- Klobušiak, M., Leitmannová, K., Priam, Š., Ferianc, D., (2002):** Slovak kinematic reference frame – SKRF 2001, its computation and connection to the EUREF, Presented at EUREF Symposium, June 4.-8., 2002, Ponta Delgada, Azores, Portugal.
- Kubáčková, L., (1990):** Metódy spracovania experimentálnych údajov, Bratislava, VEDA.
- Lankreijer, A., Bielik, M., Cloetingh, S., Majcin, D., (1999):** Rheology predictions across the western Carpathians, Bohemian massif, and the Pannonian basin: Implications for tectonic scenarios, Tectonics, vol. 18, No. 6, pp. 1139-1153.
- Lexa, J., Bezák, V., Elečko, M., Mello, J., Polák, M., Potfaj, M., Vozár, J., (2000):** Geologická mapa Západných Karpát a príľahlých území, Štátny geologický ústav Dionýza Štúra, Bratislava
- Madaras, J., Pažák, P., Kristeková, M., Fojtíková, L., Labák, P., Cipciar, A., (2008):** Zemetrase-  
nia na Slovensku, Enviromagazín, 5/2008, s. 4 - 7
- Marko, F., Jacko, S., (1999):** Štruktúrna geológia I (Všeobecná a systematická), Košice, Harlequin, Košice.
- Reddy, J. N., (1993):** An introduction to the finite element method. McGraw-Hill, Singapore
- SRTM, (2009):** The Shuttle Radar Topography Mission – SRTM, www stránka :  
<http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>
- Stangl, G., (2007):** Guidelines for CEGRN Reprocessing version 1.3, available www page:  
<http://cergops2.iwf.oeaw.ac.at>

**Surfer, (2009):** Surfer, Users Guide, Golden Software, Inc. Colorado., [www.goldensoftware.com](http://www.goldensoftware.com)

**Wiejacz, P., Debski, W., (2009):** Podhale, Poland, Earthquake of November 30, 2004, Acta Geophysica, vol. 57, no. 2, pp. 346-366

## **Zoznam publikovaných prác**

**Czarnecki, K., Mojzeš, M., Papčo, J., Walo, J., (2003):** First results of GPS measurement campaigns in Tatra Mountains. Reports on Geodesy No.1 (64), WUT, Warsaw, pp. 41-46.

**Mojzeš, M., Čunderlík, R., Gerháťová, E., Janák, J., Papčo, J., (2003):** Test of the accuracy of the digital elevation model in the area of Slovakia. The 5th Slovak Geophysical Conference Abstracts. Contributions to Geophysics and Geodesy. Vol. 33, Special issue, pp. 79.

**Gerháťová, E., Mojzeš, M., Janák, J., Papčo, J., (2003):** A closer look at the second term of Molodenskij's series. The 5th Slovak Geophysical Conference Abstracts. Contributions to Geophysics and Geodesy. Vol. 33, Special issue, pp. 83.

**Mojzeš, M., HEFTY, J., Papčo, J., Gerháťová, E., (2003):** Realizácia a spracovanie merania na dĺžkovej základnici Hlohovec. Zpracování měření GPS, Sborník referátů, Brno, s. 88-96.

**Mojzeš, M., Husár, L., Janák, J., Papčo, J., (2003):** Porovnanie astronomických a gravimetrických zvislicových odchýlok vo Vysokých Tatrách. Zborník referátov z odbornej konferencie s medzinárodnou účasťou "Význam kozmických metód pre súčasnú geodéziu", SvF STU, Bratislava, s. 63-72.

**Mojzeš, M., Papčo, J., (2004):** The analysis of GPS measurements in Tatra mountain. Acta Geodynamica et Geomaterialia. Vol. 1, No. 3 (135), pp. 115-124.

**Mojzeš, M., Husár, L., Janák, J., Papčo, J., Czarnecki, K., Barlik, M., Bogusz, J., Walo J. (2004):** Testing of gravimetric quasigeoid by astronomical measurements. Reports on Geodesy No.2 (69), pp.157-166.

**Mojzeš, M., Papčo, J., Czarnecki, K., Walo J., (2004):** Evaluation of six years GPS epoch campaign measurements in the Tatra Mountains. Reports on Geodesy No.2 (69), pp.189-196.

**Papčo, J., (2004):** First results of GPS measurements campaign in Tatra Mountains. In: Juniorstav 2004, VUT Brno, s.377.

**Mojzeš, M., Janák, J., Papčo, J., (2005):** Gravimetrický model kvázigeoidu na území Slovenska. Acta Montanistica Slovaca 10, č. 2, s. 162-167.

**Mojzeš, M., Husár, L., Janák, J., Papčo, J., Czarnecki, K., Bogusz, J. Walo, J., (2005):** Testing of gravimetric quasigeoid by astronomic measurements in Tatra Mountains. In: Proceedings of the 2<sup>nd</sup> Workshop Model of a "centimetre" geoid for Poland with use of geodetic, gravimetric, astronomic, satellite and geological data. 16-17 November 2005, Warsaw, Poland. (CD)

**Mojzeš, M., Husár, L., Janák, J., Papčo, J., Czarnecki, K., Bogusz, J., Walo, J., (2005):** Testing of gravimetric quasigeoid by astronomic-geodetic method in the Tatra Mountain – preliminary results. Reports on Geodesy, 75, 4, pp. 185-190.

**Mojzeš, M., Janák, J., Papčo, J., (2006):** Improvement of the gravimetric model of quasigeoid in Slovakia. Newton's Bulletin, 3. ISSN 1810-8555. (elektronická verzia: [http://bgi.cnes.fr:8110/bgi\\_iges.html](http://bgi.cnes.fr:8110/bgi_iges.html))

**Pospíšil, L., Dvořák, P., Hotovcová, J., Mojzeš, M., Papčo, J., (2006):** The geo-analyses of the horizontal movement tendencies in the Eastern Slovakia. Contributions to Geophysics and Geodesy, Vol. 36, special issue, pp. 17-30

**Szalaiová, V., Zahorec, P., Panáček, A., Alfolfyová, A., Pašteka, R., Katona, M., Mojzeš, M., Papčo, J., Čunderlík, R., Husár, L., Janák, J., Mikušová, Z., (2006):** Gravity and geodetic integrated measurements in Tatra Mountains. Contributions to Geophysics and Geodesy, Vol. 36, special issue, pp. 53-60.

**Mojzeš, M., Hefty, J., Gerháťová, E., Kováč, M., Papčo, J., Šrámka, M., (2006):** Lokálne geodetické siete využívané na monitorovanie stability územia. In: Progresívne technológie v inžinierskej geodézii. Zborník prednášok z odborného seminára. Zošit 22. STU, Bratislava, s. 43-52.

**Mojzeš, M., Čunderlík, R., Janák, J., Papčo, J., Šprlák, M., Vaľko, M., (2006):** Porovnanie gravimetrických modelov kvázigeoidu na území Slovenska. In: GPS + GLONASS + Galileo: nové obzory geodézie. STU Bratislava, s. 59-68, ISBN: 80-227-2519-6.

**Mojzeš, M., Janák, J., Papčo, J., Šprlák, M., Vaľko, M., (2007):** Determination of the Quasigeoid Using the Neumann Boundary Value Problem. In: Proceedings of the 1<sup>st</sup> International Symposium of the International Gravity Field Service "Gravity Field of the Earth". General Command of Mapping, Istanbul, Turkey, pp. 7-12

**Mojzeš, M., Husár, L., Papčo, J., (2007):** Integrovaný prístup k určeniu kvázigeoidu vo Vysokých Tatrách. In.: Aplikace družicových měření v geodézii. VUT Brno, s. 92-100.

**Vaľko M., Mojzeš M., Janák J., Papčo J., (2008):** Comparison of two different solutions to Molodensky's  $G_1$  term. *Studia Geophysica et Geodaetica*, **52**, 1, pp. 71-86.

**Hefty J., Gerháťová E., Papčo J., (2008):** Recent Kinematics in the Area of the Mochovce Nuclear Power Plant Inferred from the GPS Epoch Observations. In: INGENEO 2008 : 4th International conference on engineering surveying. STU Bratislava, SvF.

**Mojzeš M., Papčo J., (2008):** Monitorovanie pohybov Vysokých Tatier geodetickými metódami. In: 70 rokov SvF STU : Medzinárodná vedecká konferencia. STU Bratislava, SvF, s. 140-148.



