

Šírenie seizmických vln na území Slovenska

Diplomová práca

Peter Cigánik

Univerzita Komenského v Bratislave
Fakulta matematiky, fyziky a informatiky
Katedra astronómie, fyziky Zeme a meteorológie

1160800 Fyzika
Geofyzika

Vedúci diplomovej práce: Mgr. Jozef Kristek, PhD.

Dátum odovzdania práce: 28.4.2006

BRATISLAVA 2006

ZADANIE DIPLOMOVEJ PRÁCE

Študent *Peter Cigánik*

vypracuje za účelom obhajoby v rámci záverečného konania vo vysokoškolskom magisterskom štúdiu na UK FMFI diplomovú prácu s názvom:

Šírenie seizmických vln na území Slovenska

pod vedením pracovníka *Mgr. Jozefa Kristeka, PhD.* z pracoviska *KAFZM*.

Cieľ diplomovej práce a ďalšie poznámky:

Numerickým modelovaním konfrontovať 1-D vrstevnatý model používaný pre lokalizáciu zemetrasení s pozorovanými časmi príchodu blízkych fáz seizmických vln. Na základe toho začať vývoj 3-D modelu zemskej kôry na území Slovenska.

podpis študenta podpis ved. dipl. práce

Diplomová práca je tematicky priradená k špecializácii Geofyzika.

V Bratislave dňa podpis gestora špec.:

Prehlasujem, že som diplomovú prácu vypracoval samostatne s použitím literatúry uvedenej v zozname.

V Bratislave 28.4.2006

Peter Cigánik

Pod'akovanie

Ďakujem Mgr. Jozefovi Kristekovi, PhD. za odborné vedenie a cenné rady, ktorými mi pomáhal pri vypracovávaní diplomovej práce. Ďakujem tiež Prof. RNDr. Petrovi Moczovi, DrSc., RNDr. Luděkovi Klimešovi, DrSc., Mgr. Petrovi Bulantovi, PhD., Assoc. Professor, RNDr. Miroslavovi Bielikovi, DrSc., RNDr. Viktórii Szalaiovej a RNDr. Petrovi Labákovi, PhD. za cenné rady a konzultácie.

Abstrakt

Seizmológia na Slovensku zaznamenala v posledných rokoch veľký posun vpred. Najmä v observatórnej (prístrojovej) oblasti. V súčasnosti používaný 1-D seizmický model IASPEI91 pre územie Slovenska neodzrkadľuje tektonický charakter územia, z čoho plynie väčšia chyba pri lokalizácii zemetrasení, a teda aj pri vyčleňovaní jednotlivých tektonických zón. Preto je potrebné vyvinúť 3-D model zemskej kôry pre územie Slovenska. Táto diplomová práca sa zaoberá zostavením počiatočného 3-D modelu zemskej kôry na základe syntézy geofyzikálnych a geologických dát. Zostavený model bol pomocou lúčovej metódy testovaný na výpočet časov šírenia refragovaných vln pre jedno zvolené zemetrasenie. Výsledky boli porovnané s výsledkami získanými pre model IASPEI91.

OBSAH

1 ÚVOD.....	10
2 LÚČOVÁ METÓDA	12
2.1 ZÁKLADNÝ SYSTÉM ROVNÍC V LÚČOVEJ METÓDE.....	13
2.1.1 Základné predpoklady	13
2.1.2 Vysokofrekvenčné riešenie pohybovej rovnice.....	13
2.1.3 Základný systém rovníc v lúčovej metóde	15
2.2 SEIZMICKÉ LÚČE A ČASY ŠÍRENIA	16
2.2.1 Lúče ako charakteristické krivky rovnice eikonalu.....	17
2.2.2 Lúče ako krivky kolmé na čelo vlny	19
2.2.3 Lúče ako extrémaly Fermatovho funkcionálu	19
2.2.4 Časy šírenia v lúčovej teórii a prvé časy príchodu	20
2.2.5 Výpočet časov šírenia pozdĺž lúča.....	21
2.2.6 Priamy výpočet časov šírenia	21
2.2.7 Boundary-Value ray tracing	22
2.2.8 Lúčové kódy a lúčová história.....	22
2.2.9 Metóda streľby.....	24
3 ZEMETRASNÁ AKTIVITA NA ÚZEMÍ SLOVENSKA	26
3.1 HISTORICKÉ ZEMETRASENIA NA ÚZEMÍ SLOVENSKA.....	26
3.1.1 Zemetrasenie 5.6.1443 na strednom Slovensku	27
3.1.2 Zemetrasenie 28.6.1763 pri Komárne	27
3.1.3 Zemetrasenie 15.1.1858 pri Žiline.....	27
3.1.4 Zemetrasenie 9.1.1906 pri Dobrej Vode	27
3.2 SEIZMOLÓGIA NA SLOVENSKU	28
3.2.1 História seizmometrických pozorovaní na Slovensku.....	28
3.2.2 Súčasný stav seizmometrických pozorovaní na Slovensku.....	31
4 GEOFYZIKÁLNY MODEL SLOVENSKA	33
4.1 POUŽÍVANÉ GEOFYZIKÁLNE METÓDY	34
4.1.1 Seizmická refrakčná metóda.....	35

4.1.2 Seizmická reflexná metóda.....	36
4.2 REFRAKČNÉ SEIZMICKÉ PROFILY SLOVENSKA	37
4.3 REFLEXNÉ SEIZMICKÉ PROFILY SLOVENSKA	38
4.3.1 Stručný prehľad starších profilov (2T, 3T, G).....	40
4.3.2 CELEBRATION 2000	48
5 3-D MODEL ZEMSKEJ KÔRY	54
5.1 PROGRAM MODELTRANSFORM	55
5.1.1 Stručný opis programu	55
5.1.2 Testovanie programu	59
5.2 NÁVRH 3-D MODELU ZEMSKEJ KÔRY	60
5.3 ZOSTAVENIE 3-D MODELU ZEMSKEJ KÔRY	62
5.3.1 Teoretický popis modelu prostredia	63
5.3.2 Dáta a programy určujúce model.....	64
5.3.3 Seizmický 3-D model zemskej kôry pre územie Slovenska.....	68
5.4 TESTOVANIE 3-D MODELU ZEMSKEJ KÔRY	68
5.4.1 Opis balíka CRT (SW3D9)	68
5.4.2 Popis vstupných dát.....	71
5.4.3 Zemetrasenie pri meste Zakopané 30.11.2004	72
6 ZÁVER.....	76
BIBLIOGRAFIA.....	78

Zoznam obrázkov

OBRÁZOK 1 - Mapa epicentier makroseizmicky pozorovaných zemetrasení na území SR do roku 1999 ..	29
OBRÁZOK 2 - Mapa epicentier pozorovaných zemetrasení na území Slovenska v rokoch 2001 - 2005	32
OBRÁZOK 3 - Tektonická schéma Slovenskej časti Západných Karpát	34
OBRÁZOK 4 - Porovnanie časov šírenia odrazených, lomených, priamych vln vzávislosti na vzdialenosti	35
OBRÁZOK 5 - Poloha seizmických refrakčných profilov vedených cez územie Slovenska	37
OBRÁZOK 6 - Model efektívnych rýchlostí vedených cez profil K III	38
OBRÁZOK 7 - Poloha seizmických reflexných profilov nameraných na Slovensku od roku 1971	39
OBRÁZOK 8 - Interpretácia profilu 3T	41
OBRÁZOK 9 - Interpretácia gravitačných meraní vykonaných pozdĺž gravitačného profilu 3T	42
OBRÁZOK 10 - Interpretácia 2T seizmického časového prierezu	43
OBRÁZOK 11 - Model geologickej stavby zemskej kôry pozdĺž seizmického profilu 2T/83, 84, 2AT/84 ..	44
OBRÁZOK 12 - Model geologickej stavby zemskej kôry pozdĺž seizmického profilu 2T/85	46
OBRÁZOK 13 - Mapa nameraných seizmické refrakčné profily v rámci projektu CELEBRATION 2000 ..	48
OBRÁZOK 14 - Profil CEL05 na pozadí zjednodušenej tektonickej mapy strednej Európy	50
OBRÁZOK 15 - Dvojrozmerný P-vlnový rýchlostný model pre profil CEL05	51
OBRÁZOK 16 - Dvojrozmerný P-vlnový rýchlostný model pre profil CEL04	52
OBRÁZOK 17 - Dvojrozmerný P-vlnový rýchlostný model pre profil CEL04	53
OBRÁZOK 18 - Ukážka úpravy vstupných obrázkov pre program MODELTransform	56
OBRÁZOK 19 - Grafické znázornenie algoritmu programu MODELTransform	58
OBRÁZOK 20 - Návrh 3-D modelu zemskej kôry pre územie Slovenska	61
OBRÁZOK 21 - Výsledný 3-D model zemskej kôry pre územie Slovenska (rezy)	69
OBRÁZOK 22 - 3-D P-vlnový rýchlostný model zemskej kôry pre územie Slovenska (rezy)	70

Zoznam tabuliek

TABUĽKA 1 - Zoznam staníc NSSS, na ktorých bolo zaznamenané zemetrasenie z 30.11.2004 pri Zakopanom, spolu s ich lokalizáciou a s časmi príchodov seizmických fáz	73
TABUĽKA 2 - Vypočítané časy šírenia elementárnych vln do jednotlivých seizmických staníc zarade- ných do NSSS pre nami zostavený 3-D model zemskej kôry pre územie Slovenska	73
TABUĽKA 3 - Porovnanie vypočítaných časov šírenia pre nami zostavený 3-D model so skutočnými časmi šírenia	74

Zoznam skratiek

ALCAPA	Alpsko – Karpatsko – Panónska panva
CELEBRATION 2000	Central European Lithospheric Experiment Based on Refraction
CEL01, CEL04, CEL05	Merané profily v rámci projektu CELEBRATION 2000
EMS-98	Európska makroseizmická stupnica, 1998
EP	Európska platforma
GFÚ SAV	Geofyzikálny ústav Slovenskej akadémie vied
ISC	Medzinárodné seizmologické centrum (angl. International seismic centre)
KB	Komplexný blok
MM	Malopoľský masív
MOHO	Mohorovičičova diskontinuita
MSK-64	Medvedev – Sponheuer – Kárnik stupnica ,1964
NSSS	Národná seizmická sieť staníc
PBP	Pieninské Bradlové pásmo
S, J, V, Z	Sever, Juh, Východ, Západ
SB	Jednoduchý blok
TESZ	Trans-Európska suturová zóna
TTZ	Teisseyre-Tornquistová zóna
TWT	Two - Way travel Time
VEK	Východný európsky kratón
VZK	Vnútorne Západné Karpaty
ZK	Západné Karpaty
BRA	Kód GFÚ SAV pre seizmickú stanicu Bratislava
CRVS	Kód ISC pre seizmickú stanicu Červenica
HRB	Kód ISC pre seizmickú stanicu Hurbanovo
KECS	Kód ISC pre seizmickú stanicu Kečovo
KOLS	Kód ISC pre seizmickú stanicu Kolonické sedlo
KOS	Kód GFÚ SAV pre seizmickú stanicu Košice
LIKS	Kód ISC pre seizmickú stanicu Likavka
MODS	Kód ISC pre seizmickú stanicu Modra
SPC	Kód ISC pre seizmickú stanicu Skalnaté Pleso
SRO	Kód ISC pre seizmickú stanicu Šrobárová
SRO1	Kód ISC pre seizmickú stanicu Iža
SRO2	Kód ISC pre seizmickú stanicu Moča
STHS	Kód ISC pre seizmickú stanicu Stebnická Huta
VYHS	Kód ISC pre seizmickú stanicu Vyhne
ZST	Kód ISC pre seizmickú stanicu Železná Studnička

1 ÚVOD

Ničivé prírodné katastrofy sužovali Zem aj v minulosti. V dnešnej dobe, keď investičné náklady dosahujú enormné hodnoty, takmer každá prírodná katastrofa (menšia či väčšia) spôsobuje obrovské materiálne, hospodárske a ekonomické straty, ktorých hodnota je v porovnaní so škodami spôsobenými v minulosti mnohonásobne väčšia. Okrem toho, tie miesta, ktoré ponúkajú najlepšie podmienky pre bývanie, ekonomický a hospodársky rozvoj patria často k tým najohrozenejším lokalitám. V neposlednom rade sú často prírodné katastrofy spájané aj so stratami na ľudských životoch. K takýmto prírodným katastrofám patrí aj zemetrasenie. Škody spôsobené zemetraseniami často patria k tým najrozsiahlejším. Výhodnou cestou k ich eliminácii by bola možnosť predpovedať výskyt a účinky zemetrasení. Príprava zemetrasenia trvá istú dobu a často je sprevádzané množstvom predzvestných javov, či už sú to slabšie, zdanlivo osamotené makroseizmicky pocítené zemetrasenia, mikrozemtrasenia, predtrasy alebo iné javy. Čím viac dokážeme takýchto javov vrátane hlavného zemetrasenia zaznamenať, čím presnejšie ich dokážeme lokalizovať a určiť ich charakter, tým presnejšie dokážeme vyčleniť jednotlivé aktívne ohniskové zóny a zlomy. Na základe týchto údajov dokážeme lepšie predpovedať seizmické ohrozenie pre jednotlivé lokality, čo má vplyv na množstvo nákladov venovaných na výstavbu budov (na antiseizmický dizajn), ako aj pre lepšiu pripravenosť štábov civilnej ochrany včas, lepšie a presnejšie zasiahnuť.

Na to, aby sme dokázali dobre a dostatočne presne lokalizovať zemetrasenie, potrebujeme mať k dispozícii nielen dostatok údajov, ale aj dostatočne presný seizmický model. V súčasnosti používaný model na území Slovenska (IASPEI91) patrí medzi 1-D modely (materiálové parametre sa menia len v jednom smere – vertikálnom, v ostatných smeroch sú konštantné). To znamená, že ide o vrstevnatý model (horizontálne vrstvy). Takýto model dostatočne nezodpovedá tektonickému charakteru nášho územia a nemôže postihnúť lokálne efekty v niektorej z lokalít. Z toho vyplýva aj väčšia chyba pri lokalizácii zemetrasení.

Vďaka rozšíreniu a modernizácii národnej siete seizmických staníc máme v súčasnosti k dispozícii dostatok dát na to, aby sme mohli začať vývoj 3-D modelu zemskej kôry pre územie Slovenska. Takýto model by mal v sebe zahŕňať geofyzikálny a geologický charakter zemskej kôry a v konečnom dôsledku by mal viesť k nahradeniu v súčasnosti používaného 1-D modelu zemskej kôry. Taktiež by mal umožniť presnejšiu lokalizáciu zemetrasení, napomôcť pri vyčleňovaní najohrozenejších regiónov a pomôcť pri predchádzaní a zmierňovaní vzniku veľkých škôd.

2 LÚČOVÁ METÓDA

V súčasnosti existuje množstvo numerických metód na výpočet seizmického pohybu. Tieto môžeme rozčleniť na vysokofrekvenčné metódy a nízkofrekvenčné metódy. Najdôležitejšou vysokofrekvenčnou metódou je lúčová metóda. Medzi nízkofrekvenčné metódy patria napríklad metóda konečných diferencií (FD) alebo metóda konečných prvkov (FE). Každá z týchto numerických metód má svoje výhody a nevýhody.

Lúčová metóda je veľmi efektívna metóda na riešenie problémov zaoberajúcich sa šírením vln vo zvrstvenom, izotropnom alebo anizotropnom, laterálne nehomogénnom prostredí. Konkurenčné metódy, ako sú FD a FE, ktoré sa môžu použiť na výpočet podobných typov štruktúr, sú často v prípade, ak rozmery modelu dosahujú veľkosť niekoľkých dominantných vlnových dĺžok, veľmi náročné na výpočtový čas alebo majú iné typy obmedzení.

Samotná lúčová metóda má tiež svoje výhody aj nevýhody. Hlavnou výhodou je možnosť použiť ju na výpočet nehomogénnych prostredí a jej efektívnosť pri ich riešení. Taktiež môžeme lúčovú metódu bez problémov použiť aj na modely, ktorých rozmery sú oveľa väčšie ako niekoľko vlnových dĺžok. Toto je v prípade metód FE a FD tiež možné, ale za cenu vysokých nárokov na výpočtovú pamäť. Ďalšou veľkou výhodou lúčovej metódy je, že umožňuje separovať jednotlivé fázy vo vlnovom poli a dovoľuje sledovať dráhu, pozdĺž ktorej sa šíri energia v danom prostredí. Lúčová metóda tiež predstavuje dôležitý základ pre ďalšie, oveľa sofistikovanejšie metódy, ako sú metóda paraxiálnych lúčov, Maslovova metóda alebo metóda Gaussian beam summation.

Základnou nevýhodou lúčovej metódy je, že ide len o približnú metódu. Ďalšie jej obmedzenia sa vzťahujú na prostredie, ktoré musí byť hladké, a v ktorom charakteristické rozmery nehomogenít sú oveľa väčšie než prevládajúce vlnové dĺžky uvažovaných vln. Ďalším problémom sú singulárne oblasti (oblasť kaustiky, prechodové zóny do oblasti tieňa), kde môžeme dostať skreslené alebo žiadne výsledky.

S lúčovou metódou sa v literatúre môžeme stretnúť pod viacerými názvami, ako sú geometrická seizmológia, asymptotická lúčová metóda alebo metóda lúčových radov.

Lúčová metóda, našla rôzne aplikácie v rôznych oblastiach fyziky. Najskôr bola úspešne používaná v optike a rádiofyzike, potom našla široké použitie aj v seizmológii.

V tejto kapitole sa zameriame na vysvetlenie veľmi stručných základov lúčovej metódy. Samotná teória okolo lúčovej metódy je natoľko rozsiahla, že svoju pozornosť upriamime najmä na výpočet lúčov a časov príchodu vln v dokonale elastickom, nehomogénnom, izotropnom prostredí. Pri písaní sme vychádzali z prác V. Červeného, I. Pšenčíka, L. Klimeša.

V texte budeme používať zložkový zápis vektorov a matic. Tiež budeme používať Einsteinovu sumačnú konvenciu $M_{ij}u_j = M_{i1}u_1 + M_{i2}u_2 + M_{i3}u_3$, $i = 1, 2, 3$. Parciálne derivácie $\partial u_i / \partial x_j$, $\partial^2 u_i / \partial x_j \partial x_k$, $\partial u_i / \partial t$ budeme písať ako $u_{i,j}$, $u_{i,jk}$, $u_{i,t}$.

2.1 ZÁKLADNÝ SYSTÉM ROVNÍC V LÚČOVEJ METÓDE

2.1.1 Základné predpoklady

Ako už bolo uvedené v úvode, lúčová metóda je vysokofrekvenčnou približnou metódou na riešenie elastodynamickej pohybovej rovnice. Vysokofrekvenčnosť sa symbolicky označuje $\omega \rightarrow \infty$. Aby sme mohli hovoriť o vysokých frekvenciách, tak frekvencia ω musí byť oveľa väčšia ako niektorá charakteristická veličina rozmeru frekvencie ω_j ($j = 1, 2, \dots$). Jednou z takýchto charakteristických veličín je $|\nabla v|$, kde v je fázové rýchlosť vlny.

Tak ako pojem vysokofrekvenčnosti aj krátkovlnnosť je relatívny pojem. Keďže vlnová dĺžka $\lambda = 2\pi v / \omega$, potom vysoké frekvencie znamenajú, že vlnová dĺžka λ musí byť podstatne menšia ako niektorá z charakteristických veličín rozmeru dĺžky l_j ($j = 1, 2, \dots$) v študovanom probléme, $\lambda \ll l_1, l_2, \dots$. Takýmito charakteristickými veličinami dĺžky l_j sú napríklad, polomer krivosti rozhrania R , alebo niektoré pomery určujúce nehomogenity prostredia typu $\frac{v}{|\nabla v|}$.

2.1.2 Vysokofrekvenčné riešenie pohybovej rovnice

Riešenie pohybovej rovnice

$$\tau_{ij,j} + f_i = \rho u_{i,tt}, \quad (2.1)$$

môžeme hľadať v tvare lúčového radu vo frekvenčnej alebo časovej oblasti. V prípade harmonickej vlny môžeme hľadané riešenie navrhnúť v tvare asymptotického radu

$$u_i(x_m, t, \omega) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{U_i^{(n)}(x_m)}{(-i\omega)^n} \exp[-i\omega(t - \tau(x_m))], \quad (2.2)$$

kde u_i je hľadaný vektor posunutia, $U_i^{(n)}$ je vektor amplitúdy n -tého člena lúčového radu (komplexný) a τ je eikonal alebo tiež fázová funkcia.

V prípade, ak ω je dostatočne veľké, stačí uvažovať len prvý člen radu ($n = 0$)

$$u_i(x_m, t, \omega) = U_i^{(0)}(x_m) \exp[-i\omega(t - \tau(x_m))]. \quad (2.3)$$

Takéto priblíženie sa nazýva priblíženie nultého rádu alebo lúčové priblíženie.

V prípade lúčového radu v časovej oblasti hľadané riešenie bude mať tvar

$$u_i(x_m, t) = \operatorname{Re} \left\{ \sum_{n=0}^{\infty} U_i^{(n)}(x_m) F^{(n)}(t - \tau(x_m)) \right\}, \quad (2.4)$$

kde

$$F^{(n)}(t - \tau(x_m)) = \frac{1}{\pi} \int_{\omega_0}^{\infty} \frac{S(\omega)}{(-i\omega)^n} \exp[-i\omega(t - \tau(x_m))] d\omega, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (2.5)$$

Pričom $S(\omega)$ je spektrum zdrojovej funkcie a $F^{(n)}(\theta)$ je vysokofrekvenčný analytický signál, ktorý má nasledujúcu vlastnosť

$$dF^{(n)}(\theta) / d\theta = F^{(n-1)}(\theta). \quad (2.6)$$

Pod pojmom vysokofrekvenčný signál rozumieme signál, ktorého spektrum je efektívne nulové v intervale $(0, \omega_0)$, kde ω_0 je veľké vzhľadom na veličiny rozmeru frekvencie charakterizujúce prostredie. Zo vzťahu (2.6) medzi $F^{(n)}$ a $F^{(n-1)}$ vyplýva pre vysokofrekvenčné signály, že

$$|F^{(n-1)}(\theta)| \gg |F^{(n)}(\theta)|, \quad (2.7)$$

t.j., člen vyššieho rádu lúčového radu je oveľa menší ako člen nižšieho rádu, a teda môže byť zanedbaný pri určovaní približného riešenia. Toto sa často využíva. Často sa používa priblíženie nultého rádu pozostávajúce z jediného člena.

Nezáleží na tom, v akom tvare budeme hľadať riešenia pohybovej rovnice - či v tvare vysokofrekvenčného analytického signálu alebo vysokofrekvenčnej harmonickej vlny. V oboch prípadoch dostávame identické rovnice pre vektor amplitúdy $U_i^{(n)}(x_m)$ a eikonal $\tau(x_m)$.

2.1.3 Základný systém rovníc v lúčovej metóde

Uvažujme elastodynamickú rovnicu s nulovou objemovou silou pre nehomogénne izotropné prostredie

$$(\lambda + \mu)u_{j,ij} + \mu u_{i,ij} + \lambda_{,i}u_{j,j} + \mu_{,j}(u_{i,j} + u_{j,i}) = \rho u_{i,tt}. \quad (2.8)$$

Budeme hľadať riešenie v tvare lúčového radu v časovej oblasti

$$u_i(x_m, t) = \sum_{n=0}^{\infty} U_i^{(n)}(x_m) F^{(n)}(t - \tau(x_m)).$$

Po dosadení lúčového radu do elastodynamickej rovnice a po následných úpravách sa dopracujeme k základnému systému rovníc v lúčovej metóde

$$N_i(U_m^{(n)}) - M_i(U_m^{(n-1)}) + L_i(U_m^{(n-2)}) = 0, \quad k = 0 \text{ a } U_m^{(-1)} = U_m^{(-2)} = 0, \quad (2.9)$$

kde vektorové operátory N_i , M_i a L_i sú definované nasledovne

$$\begin{aligned} N_i(U_m^{(n)}) &= (\lambda + \mu)U_j^{(n)}\tau_{,i}\tau_{,j} + \mu U_i^{(n)}\tau_{,j}\tau_{,j} - \rho U_i^{(n)}, \\ M_i(U_m^{(n)}) &= (\lambda + \mu)[U_{j,i}^{(n)}\tau_{,j} + U_{j,j}^{(n)}\tau_{,i} + U_j^{(n)}\tau_{,ij}] + \mu[2U_{i,j}^{(n)}\tau_{,j} + U_i^{(n)}\tau_{,jj}] \\ &\quad + \lambda_{,i}U_j^{(n)}\tau_{,j} + \mu_{,j}(U_i^{(n)}\tau_{,j} + U_j^{(n)}\tau_{,i}), \\ L_i(U_m^{(n)}) &= (\lambda + \mu)U_{j,ij}^{(n)} + \mu U_{i,jj}^{(n)} + \lambda_{,i}U_{j,j}^{(n)} + \mu_{,j}(U_{i,j}^{(n)} + U_{j,i}^{(n)}). \end{aligned} \quad (2.10)$$

Základný systém rovníc v lúčovej metóde (2.9) je rekurentný systém rovníc a môžeme ho použiť na určenie vektora amplitúd $U_i^{(n)}(x_m)$ a fázovej funkcie $\tau(x_m)$.

Ak za n v rovnici (2.9) dosadíme nulu, tak dostaneme prvú vektorovú rovnicu základného systému rovníc

$$N_i(U_m) = 0, \quad i = 1, 2, 3. \quad (2.11)$$

Ide o systém troch lineárnych rovníc pre tri neznáme. Existuje netriviálne riešenie systému rovníc, pokiaľ determinant systému je rovný nule (rovnice sú lineárne závislé).

Po úpravách a zadefinovaní

$$\alpha(x_m) = \sqrt{\frac{\lambda(x_m) + 2\mu(x_m)}{\rho(x_m)}} \quad \text{a} \quad \beta(x_m) = \sqrt{\frac{\mu(x_m)}{\rho(x_m)}}, \quad (2.12)$$

kde $\alpha(x_m)$ a $\beta(x_m)$ sú rýchlosti šírenia P- a S-vln, sa dopracujeme k podmienkam riešiteľnosti pre netriviálne riešenie systému rovníc.

Podmienky riešiteľnosti sú definované ako

$$\tau_{,i}\tau_{,i} = \frac{1}{c^2}, \quad (2.13)$$

kde za c dosádzame rýchlosť šírenia P-vlny (potom $c = \alpha$) alebo rýchlosť šírenia S-vlny ($c = \beta$) v heterogénnom izotropnom prostredí. Rovnice (2.13) voláme rovnice eikonalu alebo tiež rovnice vlnového frontu.

Rovnice eikonalu poukazujú na veľmi dôležitý výsledok. V prípade vysokofrekvenčného šírenia vlny v heterogénnom izotropnom prostredí, možno pohybovú rovnicu približne rozdeliť na dve rovnice, pre vysokofrekvenčnú P-vlnu a vysokofrekvenčnú S-vlnu. V prípade priblíženia nultého rádu je P-vlna polarizovaná v smere normály na čelo vlny a S-vlna v rovine kolmej na normálu čela vlny. Ako je uvedené, ide len o približné rozdelenie, nie analytické (presné), ako v prípade šírenia vlny v homogénnom prostredí, kde možno pohybovú rovnicu striktné rozdeliť na rovnice pre P- a S-vlny, ktoré sú na sebe nezávislé. A teda čím väčšia frekvencia (ω_0), tým viac sú P- a S-vlny na sebe nezávislé.

Rovnice eikonalu sú rovnice, z ktorých môžeme určiť priestorové rozdelenie fázovej funkcie $\tau = \tau(x_m)$.

2.2 SEIZMICKÉ LÚČE A ČASY ŠÍRENIA

Časy šírenia a lúče sú dva najdôležitejšie pojmy pri šírení vysokofrekvenčných seizmických objemových vln v hladkých, zvrstvených alebo blokových štruktúrach. Tieto dve veličiny sú navzájom úzko spojené. Existuje množstvo metód na ich výpočet. Voľba správnej metódy závisí na množstve faktorov, ako sú:

- a) Rozmer uvažovaného modelu (1-D, 2-D, 3-D).

- b) Reprezentácia modelu (napr. hladký model s hladkými rozhraniami, sieťový model, bunkový model).
- c) Rozmiestnenie zdroj – prijímač a množstvo požadovaných výpočtov.
- d) Požadovaná presnosť výpočtov.
- e) Požadovaná efektívnosť výpočtov.
- f) Typ počítaných časov šírenia (len prvé časy, neskôr prichádzajúce, ...).
- g) Požadovaný rozsah výpočtov (len časy šírenia, lúče a časy šírenia, ...).

My budeme pri hľadaní lúčov a časov šírenia vychádzať z rovníc eikonálu pre P- a S-vlny a obmedzíme sa iba na izotropné prostredie.

Je viacero spôsobov, ako zaviesť pojem lúča. Či už zdefinujeme lúče ako charakteristické krivky rovnice eikonálu, krivky kolmé na čelo vlny, krivky pozdĺž ktorých sa šíri energia vln alebo ako extrémaly Fermatovho funkcionálu, vždy dostávame rovnaké rovnice.

2.2.1 Lúče ako charakteristické krivky rovnice eikonálu

Majme rovnicu eikonálu pre izotropné prostredie

$$c^2 p_i p_i = 1. \quad (2.14)$$

c je fázová rýchlosť uvažovanej vlny a

$$p_i = \tau_{,i} \quad (2.15)$$

sú zložky vektoru pomalosti. Rovnice eikonálu sú nelineárne parciálne diferenciálne rovnice prvého rádu. Ako také ich môžeme riešiť metódou charakteristík. Charakteristiky sú priestorové krivky, pozdĺž ktorých určujeme riešenie parciálnej diferenciálnej rovnice. Samotné charakteristiky sú určené systémom obyčajných diferenciálnych rovníc. Rovnice charakteristických kriviek pre rovnicu (2.14) sú

$$\frac{dx_i}{d\tau} = c^2 p_i, \quad \frac{dp_i}{d\tau} = -c^{-1} c_{,i}. \quad (2.16)$$

Dostávame systém šiestich obyčajných diferenciálnych rovníc, ktorý nazývame ray tracing system alebo tiež systém lúčových rovníc. Charakteristické krivky rovnice eikonalu nazývame lúče.

Ak použijeme ako parameter oblúkovú dĺžku s namiesto času šírenia τ (teda $ds = cd\tau$), dostaneme lúčový systém rovníc v tvare

$$\frac{dx_i}{ds} = cp_i, \quad \frac{dp_i}{ds} = -c^{-2}c_{,i}, \quad \frac{d\tau}{ds} = c^{-1}. \quad (2.17)$$

Tu, na rozdiel od predchádzajúceho systému lúčových rovníc, v ktorých τ je nezávislou premennou integrovania, musíme τ získať integrovaním pozdĺž lúča.

Ray tracing systém môžeme v jednoduchých prípadoch rozloženia rýchlostí v prostredí riešiť analyticky (napríklad ak $c^{-n}(x_i)$, $n = \pm 1, \pm 2, \dots$). Oveľa častejšie sa však pristupuje k numerickému riešeniu. Existuje množstvo numerických metód na riešenie ray tracing systému, medzi ktoré patria napríklad metóda Runge-Kutta alebo metóda Hamming predictor-corrector.

Aby sme mohli riešiť vyššie uvedené systémy lúčových rovníc, musíme mať stanovené počiatočné podmienky pre x_i a p_i . Pre ray tracing systém s nezávislou premennou τ majú počiatočné podmienky tvar

$$x_i(\tau_0) = x_{0i}, \quad p_i(\tau_0) = p_{0i}. \quad (2.18)$$

Vyššie popísané procedúry, pri ktorých sme lúče určovali pomocou jedného bodu a smeru lúča v tomto bode, voláme initial-value ray tracing. Okrem tohto spôsobu určovania lúčov sa často používa takzvaný dvojbodový ray tracing, kde sú lúče určené pomocou dvoch bodov, cez ktoré lúč prechádza (napríklad zdroj a prijímač, viac v podkapitolách 2.2.7 – 2.2.9).

Pri hľadaní lúča určeného dvoma bodmi existujú dva základné prístupy, ako riešiť tento problém. Prvá metóda je metóda bending, vychádza z počiatočného odhadu krivky, ktorá spája obidva body. Tento počiatočný odhad krivky sa postupne porušuje v jednotlivých iteračných krokoch tak, aby splňal rovnice ray tracingu. Procedúra môže zlyhať v prípade, keď uvažovanými bodmi prechádza viac ako jeden lúč. Druhá procedúra je metóda strelby (podkapitola 2.2.9). Táto využíva initial-value ray tracing

na výpočet lúčov z počiatočného bodu do blízkeho okolia druhého bodu. Potom sa vzdialenosť konca lúča od druhého bodu použije na modifikovanie počiatočného smeru ďalšej strely, takže ďalší lúč sa viac priblíži k druhému bodu.

2.2.2 Lúče ako krivky kolmé na čelo vlny

Nech $\tau(x_m) = \text{const}$. Vektor pomalosti $p_i = \tau_{,i}$ je kolmý na fázový front $\tau(x_m)$. Preto krivka, ktorá je v každom bode kolmá na fázový front, musí mať vektor pomalosti ako dotyčnicový vektor. Takéto krivky potom reprezentujú lúč. Keďže táto definícia lúča je nezávislá na voľbe súradníc, v ktorých je lúč určený, je výhodné ju použiť na určenie rovníc ray tracingu v krivočiarych súradniciach.

2.2.3 Lúče ako extrémaly Fermatovho funkcionálu

Nech rýchlosť $c(x_m)$ a jej prvé derivácie sú spojitými funkciami priestorových súradníc. Zvoľme dva pevné (inak ľubovoľné) body A a B . Potom integrál

$$I = \int_A^B dt = \int_A^B \frac{ds}{c} \quad (2.19)$$

je Fermatov funkcionál, ktorý sa dá prepísať do všeobecného tvaru

$$I = \int_A^B F(x_i, \dot{x}_i) du, \quad (2.20)$$

kde $x_i = x_i(u)$, $\dot{x}_i = \frac{dx_i}{du}$ a u je ľubovoľný parameter pozdĺž krivky.

Na základe Fermatovho princípu budeme hľadať extrémalu spájajúcu body A a B . Extrémálna krivka musí spĺňať nasledujúcu podmienku variačného počtu:

$$\delta I = \delta \int_A^B F(x_i, \dot{x}_i) du = 0. \quad (2.21)$$

Takúto krivku dostaneme ako riešenie systému Eulerových rovníc.

Eulerova rovnica 2. rádu pre $F = F(u, x_i(u), \dot{x}_i(u))$ má tvar

$$\frac{d}{du} \left(\frac{\partial F}{\partial \dot{x}_i} \right) - \frac{\partial F}{\partial x_i} = 0. \quad (2.22)$$

Riešením rovnice (2.22), kde $F(x_i, \dot{x}_i) = c^{-1} \frac{ds}{du}$ a $u = s$, dostaneme

$$\frac{d}{ds} \left(c^{-1} \frac{dx_i}{ds} \right) + c^{-2} c_{,i} = 0. \quad (2.23)$$

(2.23) je obyčajná diferenciálna rovnica druhého rádu. Môžeme ju prepísať na systém dvoch obyčajných diferenciálnych rovníc prvého rádu, ak výraz v zátvorke označíme ako p_i . Potom dostaneme

$$\frac{dx_i}{ds} = cp_i, \quad \frac{dp_i}{ds} = -c^{-2} c_{,i}, \quad (2.24)$$

kde môžeme vidieť, že daný systém rovníc je zhodný so systémom lúčových rovníc, ktorý sme získali v predchádzajúcich kapitolách. Tu môžeme vidieť, že lúče sú naozaj extrémaly Fermatovho funkcionálu.

2.2.4 Časy šírenia v lúčovej teórii a prvé časy príchodu

Čo sa týka časov šírenia, tak rozlišujeme medzi dvoma základnými definíciami.

- a. **Časy šírenia lúčovej teórie.** Časy šírenia lúčovej teórie budeme chápať ako časy šírenia jednotlivých elementárnych vln (priame vlny, odrazené, viacnásobne odrazené, konvertované) počítané pozdĺž lúčov týchto vln. Teda pre rozdielne elementárne vlny dostaneme rôzne časy šírenia lúčovej teórie. Preto ich často voláme aj elementárne časy šírenia (skrátene len časy šírenia). Elementárne časy šírenia nemajú presné vyjadrenie, ale iba približné, keďže sú plne založené na lúčovej predstave.
- b. **Prvé časy príchodu.** Prvé časy príchodu zodpovedajú presnému riešeniu elastodynamickej rovnice. Sú to prvé časy príchodu úplného vlnového poľa do prijímača, nie jednotlivých elementárnych vln, tzv. časy nasadenia. Prvé časy príchodu sú len funkciou polohy a nie typu vlny, ktorá bola ako prvá zaznamenaná pomocou prijímača.

Za určitých okolností môžu elementárne časy šírenia zodpovedať prvým časom príchodu. To je však možné iba vo veľmi jednoduchých modeloch. V modeloch so štruktúrnymi rozhraniami majú obidva výrazy odlišný význam.

2.2.5 Výpočet časov šírenia pozdĺž lúča

Na výpočet časov šírenia pozdĺž lúča môžeme použiť niekoľko rôznych spôsobov. Jednou z možností je priamo použiť čas šírenia τ ako parameter u pozdĺž lúča v systéme lúčových rovníc. To vedie k systému rovníc (2.16).

Ak namiesto parametra τ použijeme pozdĺž lúča iný parameter u (napríklad oblúkovú dĺžku s), tak musíme do systému rovníc pre lúč pridať ešte jednu obyčajnú diferenciálnu rovnicu prvého rádu pre čas šírenia τ . Tak dostávame systém siedmich diferenciálnych rovníc (2.17). Rovnicu pre čas šírenia môžeme riešiť buď spolu s rovnicami pre lúč, alebo samostatne po tom, ako bola vypočítaná trajektória lúča. Výpočet času šírenia spolu s lúčom má niekoľko výhod. Jednou z nich je možnosť ľahšie kontrolovať presnosť výpočtu času šírenia.

2.2.6 Priamy výpočet časov šírenia

Časy šírenia sú veľmi dôležité výsledky ray tracingu, často dôležitejšie, než samotné lúče. Preto nie je veľkým prekvapením, že bolo vyvinutých množstvo metód na priamy výpočet časov šírenia, bez použitia ray tracingu. Väčšinou ide o numerické metódy, keďže analyticky je možné riešiť len veľmi jednoduché modely.

Presnosť výpočtu prvých časov príchodu v sieťových modeloch závisí na sieťovom kroku h . Medzi tieto metódy môžeme zaradiť napr. Network shortest-path ray tracing. Za touto metódou stojí rozsiahla matematika a fyzika a my sa o nej zmienime len stručne.

Network shortest-path ray tracing je numerická metóda na výpočet prvých časov príchodu založená na teórii grafov. Majme dva body, zdroj S a prijímač R . Na základe Fermatovho princípu o minimálnom čase, prvý čas príchodu zodpovedá minimálnemu času cez všetky možné dráhy spájajúce body S a R .

Model je tvorený diskretnou sieťou bodov, v ktorých sú určené rýchlosti. Spôsob ako nájsť minimálny čas šírenia medzi bodmi S a R a jemu zodpovedajúcu trajektóriu na diskretnej sieti bodov je založený na teórii grafov. Trajektória zodpovedajúca minimálnemu času sa nazýva najkratšia dráha (angl. shortest path). Pod pojmom graf, rozumíme matematický objekt, zložený zo sieťových bodov (angl. grid points,

vrcholy), ktoré sú navzájom pospájané (hrany). Jednotlivým hranám v grafe sa pridelia váhy. Potom namiesto grafov rozprávame o sieti (angl. network). Váhy sú volené tak, aby zodpovedali časom šírenia medzi dvoma prepojenými bodmi. Potom najkratšia trasa v sieti môže byť interpretovaná ako priblíženie sa k seizmickému lúču vďaka Fermatovmu princípu. Tiež hovoríme o sieťových lúčoch (angl. network rays). Viac o network ray tracing môžete nájsť v prácach Moser (1991, 1992), Nolet a Moser (1993), Klimeš a Kvasnička (1994) a ďalší.

2.2.7 Boundary-Value ray tracing

Boundary-value ray tracing zohráva v seizmológii a v seizmickom prieskume oveľa dôležitejšiu úlohu ako initial-value ray tracing. Na druhej strane, je zložitejší a náročnejší na výpočtový čas. Existuje množstvo metód založených na boundary-value ray tracingu, nás však budú zaujímať len tie, ktoré potrebujeme na výpočet časov šírenia lúčovej teórie.

Na rozdiel od initial-value ray tracingu, kde lúč je určený počiatočným bodom a nejakou počiatočnou podmienkou, ktorá určuje počiatočný smer šírenia lúča, tak v prípade boundary-value ray tracingu je lúč určený buď pomocou dvoch bodov, ktorými sú napr. vysielateľ a prijímač, tzv. dvojbodový ray tracing, alebo pomocou initial surface-fixed point ray tracing. V tomto prípade je počiatočné pole časov šírenia T^0 určené pozdĺž počiatočnej plochy Σ^0 a my hľadáme lúč (lúče) prechádzajúci cez zafixovaný bod R . Ako v prípade dvojbodového ray tracingu, tak aj v prípade initial surface-fixed point ray tracing ide o nejednoznačnú metódu. Môže existovať viacero lúčov, ktoré majú svoj počiatok v rôznych bodoch na ploche Σ^0 , ale končia v tom istom bode R . Špeciálnym prípadom initial surface-fixed point ray tracing sú exploding reflector-fixed point ray tracing a wavefront-fixed point ray tracing“. V týchto prípadoch hľadáme lúče, ktoré sú kolmé na počiatočnú plochu Σ^0 a prechádzajú cez fixovaný bod R .

2.2.8 Lúčové kódy a lúčová história

Uvažujme 3-D laterálne meniaci sa model rozdelený so štruktúrnymi rozhraniami na vrstvy a bloky, v ktorých sú hladko rozdelené materiálové parametre. Predpokla-

dajme, že sú všetky vrstvy (bloky) a tiež rozhrania medzi vrstvami (blokmi) náležite očíslované.

Ak teraz chceme vypočítať lúč Ω v takomto modeli s počiatočným bodom umiestneným v S (vysielač), potom pred začiatkom ray tracingu potrebujeme vedieť, či ide o S- alebo P-element vlny. Potom takýto výpočet je jednoznačný, avšak len do okamihu, pokiaľ lúč Ω nepreťne štruktúrne rozhranie. Potom sa musíme rozhodnúť, aký typ vlny budeme ďalej uvažovať (odrazená, lomená, P alebo S). Podobné rozhodnutie musí byť urobené pri každom ďalšom dopade vlny na rozhranie. V prípade výpočtového algoritmu musí byť patričné rozhodnutie o výbere dráhy lúča pri dopade na jednotlivé štruktúrne rozhrania známe už pred samotným výpočtom, a teda slúži ako vstupné dáta. Táto informácia je známa ako lúčový kód (angl. ray code). Existuje množstvo spôsobov, ako zostrojiť lúčové kódy. Závisí to na type modelu a spôsobe výpočtu. (Čevený *et al.* 1988).

Ak budeme uvažovať lúč s počiatkom v bode S a s určitým lúčovým kódom, potom budeme vlnu šíriacu sa pozdĺž tohto uvažovaného lúča, popísanú pomocou lúčového kódu nazývať elementárnou vlnou. Potom môžeme tiež hovoriť o lúčových kódoch elementárnych vln. Existuje množstvo kódov elementárnych vln, či už numerické, alfanumerické a iné. Viac nájdete v práci (Červený *et al.* 1977, p.88).

Lúče, ktoré končia na nami zvolenej referenčnej ploche Σ^R , pozdĺž ktorej sú rozmiestnené prijímače, budeme nazývať úspešné lúče. Či ide o úspešný alebo neúspešný lúč, je užitočné mu priradiť tzv. funkciu histórie (angl. history function). Funkcia histórie obsahuje čísla rozhraní, cez ktoré prešiel lúč, čísla vrstiev (blokov), v ktorých sa nachádzajú jednotlivé elementy lúčov, typy vln pozdĺž jednotlivých elementov (P alebo S), stretnutie s kaustikou, polohy koncových bodov a dôvod prerušenia šírenia lúča.

Hlavný rozdiel medzi lúčovým kódom a lúčovou históriou je ten, že lúčový kód je prvotná informácia, ktorá je známa pred začiatkom samotného výpočtu, zatiaľ čo lúčová história je známa, až po prebehnutí samotného výpočtu.

2.2.9 Metóda strel'by

Metóda strel'by (angl. shooting method) je iteratívna procedúra, ktorá používa initial-value ray tracing na riešenie boundary-value ray tracing problému.

Stručne tu popíšeme hlavný princíp metódy strel'by pre prípad všeobecne zvrstveného a blokového 3-D modelu, ktorý navrhol Bulant (1996). Algoritmus je nezávislý na type a tvare zdroja (bodový, lineárny zakrivený, plošný zdroj). V tomto prípade budeme používať výraz dvojbodový ray tracing, na rozdiel od boundary-value ray tracingu, pretože zdroj je všeobecný a nie je obmedzený na bodový zdroj. V našom prípade budeme uvažovať bodový zdroj S , umiestnený ľubovoľne v modeli a systém prijímačov R_i , $i = 1, 2, \dots, n$ rozložených pozdĺž referenčnej plochy Σ^R , umiestnenej vo vnútri alebo na povrchu modelu. Snažíme sa nájsť lúče zodpovedajúce zvolenej elementárnej vlne, ktoré sú generované zdrojom S , a ktoré majú správny lúčový kód. Lúče vyžiarené zo zdroja sú parametrizované pomocou lúčových parametrov γ_A . Daná 2-D sada všetkých lúčových parametrov (γ_1, γ_2) tvorí oblasť lúčových parametrov. Veľkosť oblasti lúčových parametrov sa volí tak, aby pokrývala lúčové parametre všetkých dvojbodových lúčov, spájajúcich zdroj s prijímačom. Keďže tieto lúče nepoznáme, tak volíme oblasť lúčových parametrov väčšiu. Potom nie všetky lúčové parametre reprezentujú lúče, ktoré dopadajú na nami zvolenú referenčnú plochu Σ^R , tzv. úspešné lúče. Niektoré lúče môžu končiť na rozhraniach vo vnútri modelu alebo na jeho vonkajších hraniciach. Navyše, tzv. úspešné lúče, môžu mať rozdielnú lúčovú históriu. Základný problém dvojbodového ray tracingu spočíva v presnom rozdelení nehomogénnej 2-D oblasti lúčových parametrov na homogénne podoblasti, obsahujúce lúčové parametre lúčov s rovnakou históriou a v určení oddeľujúcich pásov medzi homogénnymi podoblastami. Rozdelenie oblasti lúčových parametrov na regióny s rovnakou lúčovou históriou sa vykoná pomocou triangulácie (Bulant, 1996).

Potom na určenie lúča alebo lúčov, ktoré prechádzajú cez prijímač R_i , potrebujeme zistiť trojuholník lúčových parametrov, do ktorého daný lúč spadá. Teda, ak poznáme homogénny trojuholník lúčových parametrov, ktoré odpovedajú užitočným lúčom a do oblasti, ktorú vytyčujú na referenčnej ploche spadá aj prijímač R_i , potom môžeme určiť odpovedajúci dvojbodový lúč z S do R_i pomocou interpolačných metód.

Samotný rozklad oblasti lúčových parametrov na homogénne podoblasti je najdôležitejším krokom v tejto procedúre. Samotné interpolačné metódy a/alebo paraxiálna lúčová aproximačná metóda môžu byť použité iba v homogénnych podoblastiach. Viac o metóde streľby nájdete v prácach Bulant (1996, 1999), Bulant a Klimeš (1999).

3 ZEMETRASNÁ AKTIVITA NA ÚZEMÍ SLOVENSKA

Názor väčšiny laikov, že na Slovensku prakticky neexistujú dostatočne silné zemetrasenia na to, aby spôsobili vážne ohrozenie ľudských životov a materiálnych hodnôt, je spôsobený najmä tým, že v posledných desaťročiach nedošlo na našom území k vzniku dostatočne silných zemetrasení. To však neznamená, že k takýmto zemetraseniam nedochádzalo v minulosti. Územie Slovenska patrí medzi územia s bohatou zemetrasnou históriou. V minulosti na ňom došlo k vzniku niekoľkých silných zemetrasení, ktoré mali za následok straty na ľudských životoch, ako aj rozsiahle materiálne škody. Na základe historických údajov, môžeme územie Slovenska zaradiť medzi oblasti so strednou úrovňou zemetrasnej aktivity. Zemetrasná aktivita na našom území je zdokumentovaná v katalógu zemetrasení Labák a Brouček (1996), ktorý obsahuje údaje o viac ako 650-tich makroseizmicky pozorovaných zemetraseniach na našom území za posledných 500 rokov. Keďže sa tektonický vývoj územia Slovenska nezastavil a za posledných 100 rokov na ňom nedošlo k vzniku silnejších zemetrasení, je pravdepodobné, že k podobne silným, ak nie k silnejším zemetraseniam ako v minulosti, môže dôjsť na našom území v budúcnosti. Škody nimi spôsobené môžu byť v dôsledku hustejšieho osídlenia a zastavania oveľa väčšie. Preto je nutné sa aj na Slovensku venovať problematike seizmického ohrozenia vybraných lokalít ako aj celého územia.

Údaje o zemetraseniach tvoria vstupnú databázu pre výpočet seizmického ohrozenia. Za týmto účelom je nutné venovať zvýšenú pozornosť vyčleneniu jednotlivých ohniskových zón na území Slovenska, ako aj spresneniu lokalizácie registrovaných zemetrasení. To však nie je možné bez dostatočného množstva seizmických údajov, t.j. údajov z prístrojových pozorovaní zemetrasení, ako aj bez dostatočne presného modelu zemskej kôry nášho územia.

3.1 HISTORICKÉ ZEMETRASENIA NA ÚZEMÍ SLOVENSKA

Na základe seizmologických a geologických pozorovaní boli vyčlenené tieto ohniskové zóny: Pernek – Modra, Dobrá Voda, Trenčín – Žilina, Komárno, stredné

Slovensko, Spiš a Slánske vrchy. Vo všetkých ohniskových zónach sa vyskytli zemetrasenia s epicentrálnou intenzitou väčšou alebo rovnou 7° EMS-98¹. Medzi najsilnejšie dokumentované zemetrasenia s epicentrom na území Slovenska patria:

3.1.1 Zemetrasenie 5.6.1443 na strednom Slovensku

Zemetrasenie postihlo jedno z najrozvinutejších a ekonomicky najdôležitejších území vtedajšieho Uhorska, Banskú Štiavnicu. Zemetrasenie úplne zničilo mesto a bane v jeho okolí, ťažko poškodilo Kremnicu. Následky zemetrasenia boli pozorované aj v Ľubietovej a Prievidzi. Zemetrasenie, okrem materiálnych škôd, spôsobilo aj zranenia a smrť ľudí. Bolo pocítené aj vo Viedni (Rakúsko), Krakove (Poľsko) a v Brne (Česko). Epicentrálna intenzita zemetrasenia bola väčšia ako 8° EMS-98.

3.1.2 Zemetrasenie 28.6.1763 pri Komárne

Len v samotnom Komárne úplne zničilo 7 kostolov a 279 domov. Zahynulo 63 ľudí a 102 bolo ranených. Spôsobilo paniku v Komárne a okolitých obciach. V pôde sa vyskytli trhliny. Rozloha otrasenej oblasti bola väčšia ako územie dnešného Slovenska. Zemetrasenie bolo pocítené v Belehrade (Srbsko), Temešvári (Rumunsko) a Lipsku (Nemecko). Epicentrálna intenzita zemetrasenia bola 8–9° MSK-64². Zdokumentovaný je tiež veľký počet dotrasov.

3.1.3 Zemetrasenie 15.1.1858 pri Žiline

Pri tomto zemetrasení došlo v Žiline k poškodeniu väčšiny domov, pričom mnohé boli neobývateľné. Účinky zemetrasenia boli zdokumentované vo viac ako 700 obciach na území Slovenska, Českej republiky, Poľska, Rakúska a Maďarska. Zemetrasenie dosiahlo epicentrálnu intenzitu 7–8° EMS-98.

3.1.4 Zemetrasenie 9.1.1906 pri Dobrej Vode

Zemetrasenie pri Dobrej Vode je najsilnejším zemetrasením s epicentrom na území Slovenska v 20. storočí, a zároveň prvé, pre ktoré sú k dispozícii aj seizmometrické pozorovania. Zemetrasenie spôsobilo vážne škody v Dobrej Vode. Veľkosť

¹ EMS-98 – Európska makroseizmická stupnica 1998

² MSK-64 – Medvedev – Sponheuer – Kárnik stupnica 1964

makroseizmicky otrasenej oblasti bola 30 000 km² a zasahovala na územie Rakúska, Maďarska a Českej Republiky. Epicentrálna intenzita zemetrasenia bola 8–9° MSK-64. V epicentrálnej oblasti sa v pôde objavili trhliny.

Tieto údaje dokumentujú, že zemetrasná história Slovenska je bohatá a nie je vylúčené, že podobne silné a ničivé zemetrasenia sa môžu vyskytnúť aj v budúcnosti.

3.2 SEIZMOLÓGIA NA SLOVENSKU

Každé zo silnejších zemetrasení v minulosti na našom území stimulovalo záujem o výskum zemetrasnej aktivity. Ľudí zaujímalo, čo spôsobilo a stojí za týmito prírodnými javmi. Bola to jednak zvedavosť, ale tiež snaha vyvarovať sa budúcim škodám a stratám. Za týmto účelom sa začali vykonávať seizmometrické pozorovania, ktoré sú spojené s budovaním seizmických staníc.

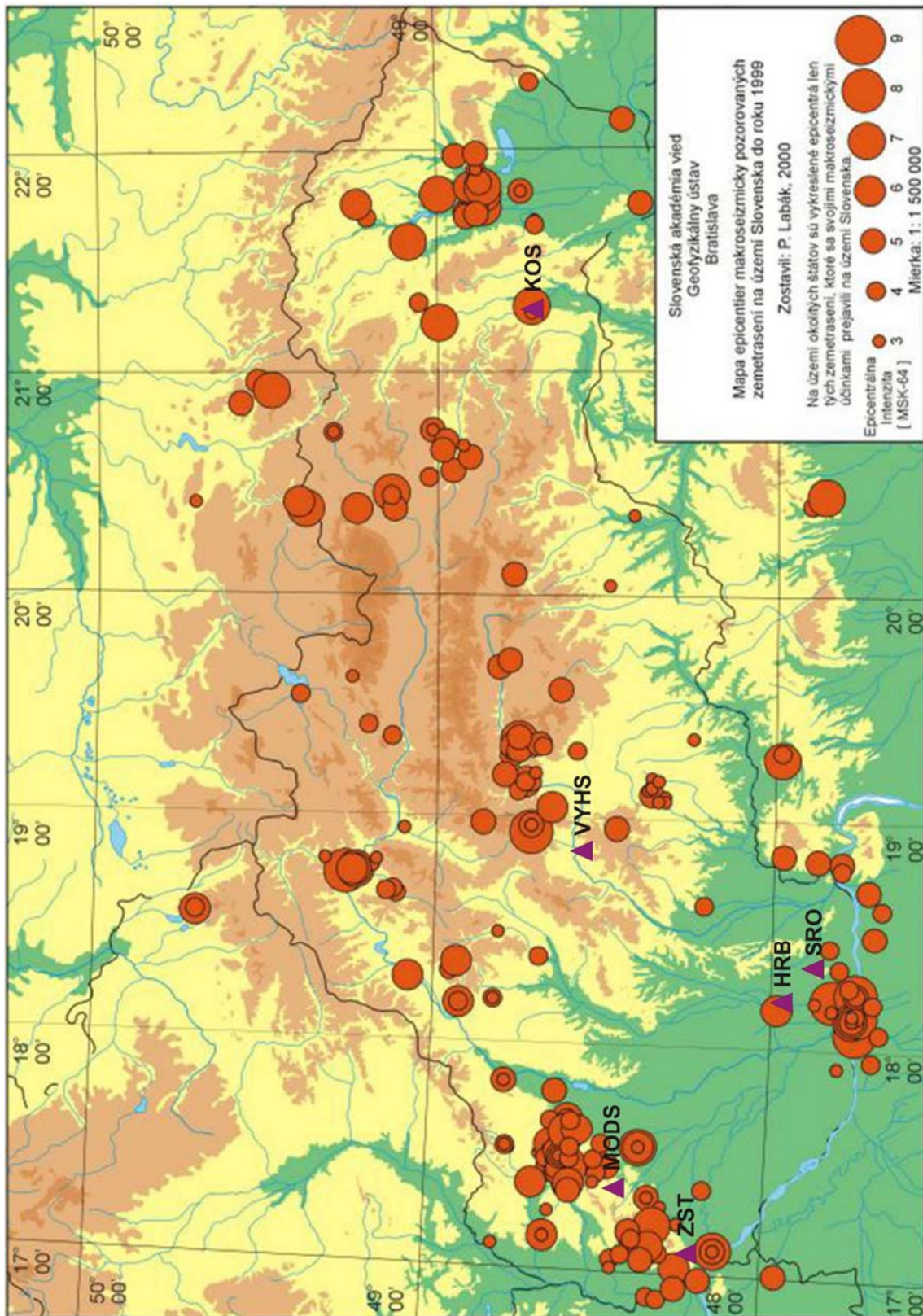
3.2.1 História seizmometrických pozorovaní na Slovensku

História seizmometrických pozorovaní v jednotlivých krajinách je úzko spätá s históriou seizmických staníc. Najstaršou seizmickou stanicou na území Slovenska a jednou z najstarších v súčasnosti prevádzkovaných staníc v Európe je seizmická stanica Hurbanovo (HRB)³. Tá je v prevádzke, s výnimkou dvoch prerušení počas 1. a 2. svetovej vojny, od 1.1.1902. Za svoju históriu vystriedala niekoľko typov seizmometrov. V súčasnosti je vybavená historickými seizmometrami Mainka, ktoré sú v prevádzke s malými úpravami už od rokov 1909–1912.

Druhou najstaršou seizmickou stanicou na Slovensku bola seizmická stanica Skalnaté Pleso (SPC) vo Vysokých Tatrách. Tá začala svoju prevádzku v roku 1943. Monitorovanie bolo ukončené 13.1.1998.

Ďalšou seizmickou stanicou na území Slovenska bola seizmická stanica Bratislava (BRA), ktorá bola umiestnená v budove Slovenského hydrometeorologického ústavu v Bratislave. Tá bola v prevádzke od 1.5.1956. V roku 1977 bola uzavretá v dôsledku vybudovania novej seizmickej stanice na území Bratislavy v lokalite Železná Studnička.

³ HRB - kód Medzinárodného seizmologického centra (ISC) pre seizmickú stanicu Hurbanovo



Obrázok 1 – Mapa epicentier makroseizmicky pozorovaných zemetrasení na území Slovenska do roku 1999 a umiestnenia staníc Národnej siete seizmických staníc v roku 2000 (Labák, 2000).

Seizmická stanica Bratislava – Železná Studnička (ZST) začala svoju prevádzku v apríli 1976. Je umiestnená v bývalom kameňolome v Malých Karpatoch. Stanica bola v roku 1997 vybavená novými citlivejšími krátkoperiodickými seizmometrami a navyše boli inštalované tri širokopásmové seizmometre Kirnos SKD.

V roku 1964 bola založená seizmická stanica Šrobárová (SRO). Táto stanica je vybavená trojzložkovým krátkoperiodickým seizmometrom. V roku 1997 bola uvedená do prevádzky digitálna aparátúra.

5.7.1992 bola uvedená do prevádzky seizmická stanica Modra (MODS). Stanica je vybavená trojzložkovým krátkoperiodickým seizmometrom LE-3D. V rokoch 1996 až 1999 bolo pozorovanie prerušené. Od mája 2000 stanica posiela údaje do spracovateľského centra v GFÚ SAV cez internet.

Ďalšie seizmické stanice boli vybudované v Košiciach (KOS), 1.1.1990 a vo Vyhniciach (VYHS), v prevádzke od 1.7.1990.

V roku 2000 pozostávala Národná sieť seizmických staníc, ktorú prevádzkoval GFÚ SAV zo 6 staníc, a to ZST, SRO, HRB, MODS, VYHS a KOS (Obrázok 1). Okrem seizmickej stanice HRB, boli všetky vybavené trojzložkovými krátkoperiodickými seizmometrami a digitálnou aparátúrou. Seizmická stanica ZST bola ako jediná vybavená trojzložkovou širokopásmovou aparátúrou. Tento počet, usporiadanie a vybavenie seizmických staníc nebol dostačujúci na to, aby splňal alebo naplno realizoval základné ciele kladené na monitorovanie a analyzovanie seizmických javov pomocou Národnej siete seizmických staníc:

- Monitorovanie, analýza a lokalizácia zemetrasení s epicentrom na území Slovenska a zemetrasení s makroseizmickými účinkami na území Slovenska.
- Monitorovanie a interpretácia teleseizmických javov na seizmických staniach, ktoré sú registrované v ISC.
- Monitorovanie, analýza a lokalizácia priemyselných explózií.

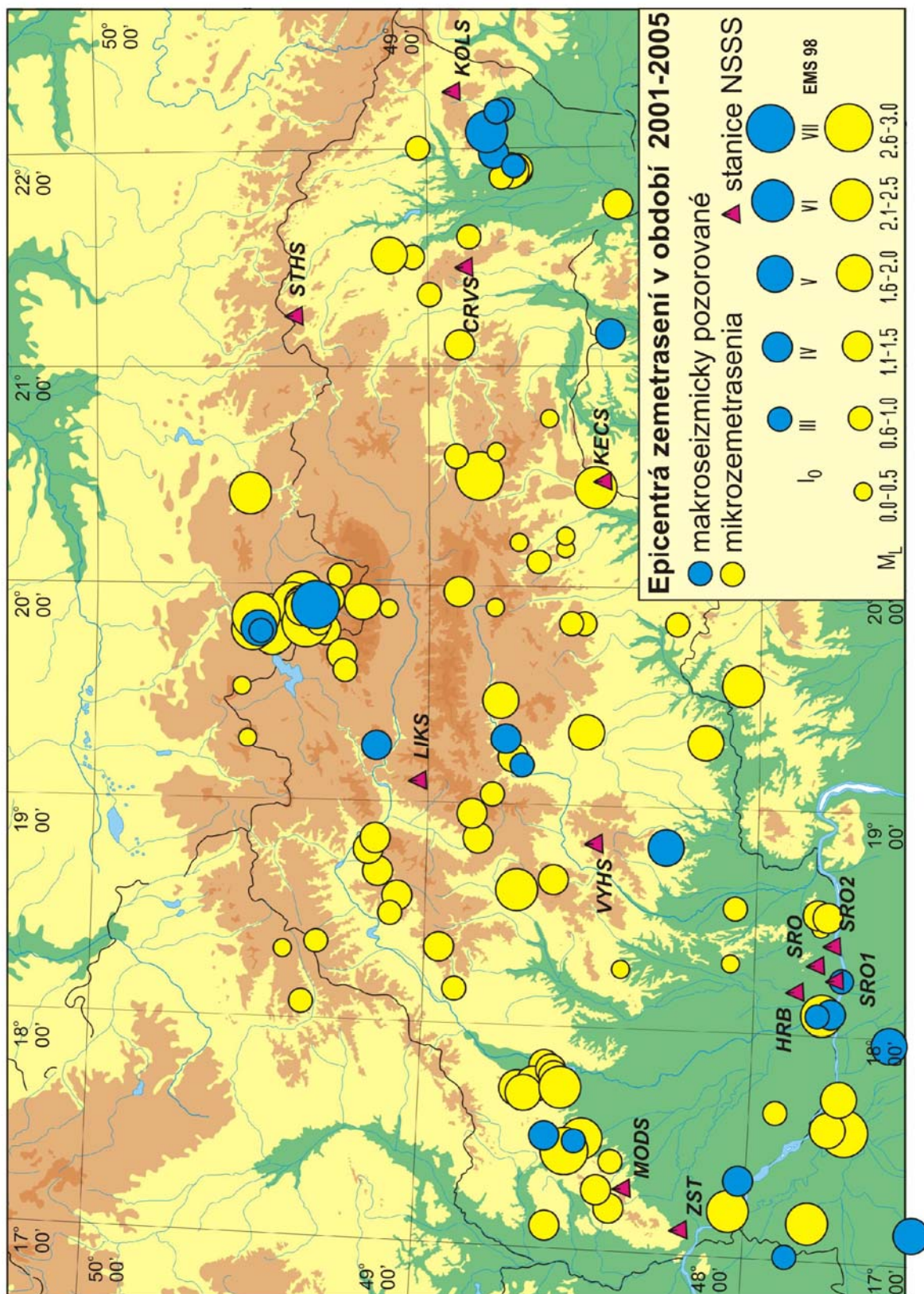
Hlavným nedostatkom Národnej siete seizmických staníc (NSSS) bola problematická dostupnosť nameraných údajov na väčšine staníc (okrem ZST a MODS), t.j. na

všetkých ostatných stanicach boli údaje zbierané s oneskorením niekoľkých dní až dvoch týždňov (tzv. off-line stanice). V dôsledku toho nebolo možné vykonať včasnú lokalizáciu zemetrasení na území celého Slovenska, a to bez ohľadu na veľkosť zemetrasenia. Druhým zásadným nedostatkom NSSS bol fakt, že vôbec nepokrývala oblasť severného a východného Slovenska (Obrázok 1). V dôsledku toho bola lokalizácia zemetrasení v týchto oblastiach možná len v prípade, ak boli k dispozícii údaje zo seizmických staníc v okolitých štátoch. V takejto konfigurácii NSSS neumožňovala ani priestorovo vyčleniť aktívne ohniskové oblasti.

3.2.2 Súčasný stav seizmometrických pozorovaní na Slovensku

Pre zlepšenie plnenia základných cieľov kladených na NSSS sa pristúpilo v rokoch 2001–2004 k jej modernizácii a rozšíreniu o ďalšie seizmické stanice. V rámci toho bolo vybudovaných 7 nových seizmických staníc (CRVS, KECS, KOLS, LIKS, SRO1, SRO2 a STHS) a ďalšie štyri už existujúce seizmické stanice MODS, SRO, VYHS a ZST boli modernizované (Obrázok 2). Bolo vybudované real-time spojenie medzi Bratislavou a každou zo seizmických staníc, všetky seizmické stanice boli zaregistrované do ISC vo Veľkej Británii.

Počas rokov 2001–2005 bolo zaznamenaných 26 makroseizmicky pocítených zemetrasení a 98 mikrozemetrasení s epicentrom na území Slovenska a v okolitých regiónoch (Labák *et al.* In press). Najväčšie z nich boli zemetrasenie na Východnom Slovensku – Vihorlat (20.2.2003 s lokálnym magnitúdom $M_L = 3.7$) a zemetrasenie v Poľsku – Zakopané (30.11.2004 s $M_L = 4.4$). Seizmicky najaktívnejšou bola oblasť v Slovensko – Poľskom pohraničí.



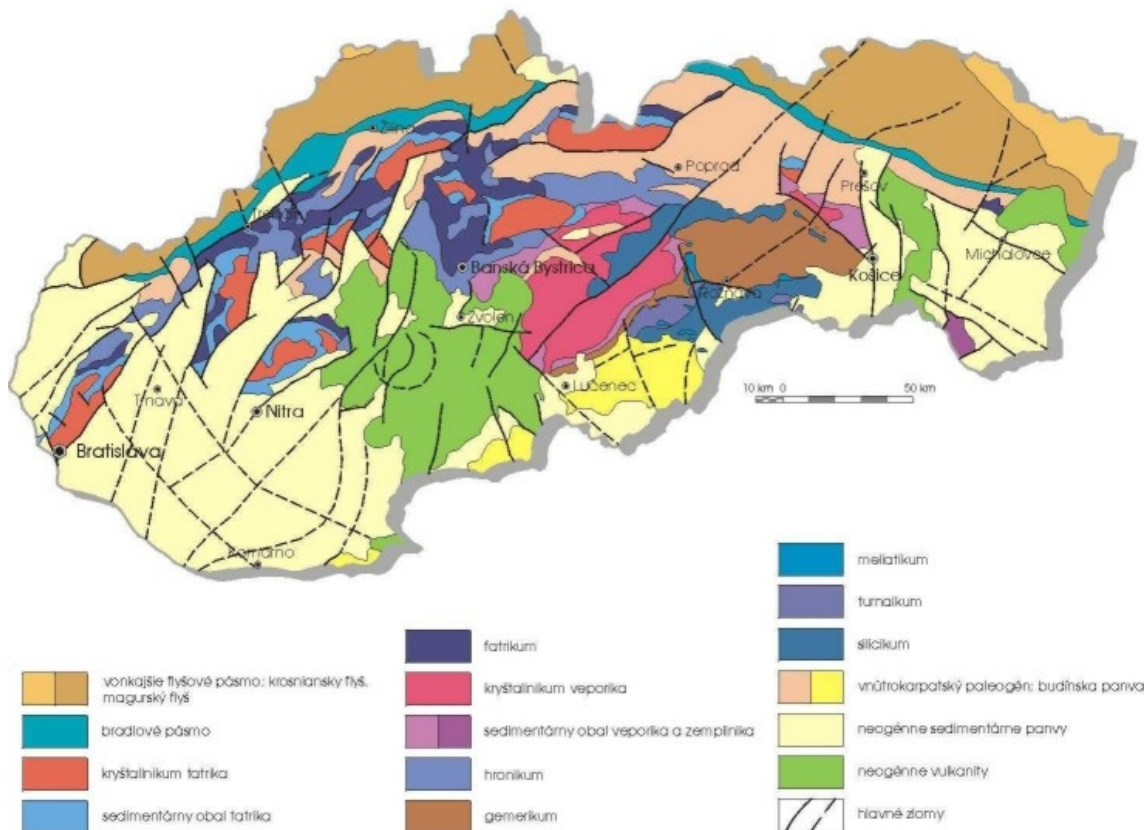
Obrázok 2 - Mapa epicentier mikrozemetrasení a makroseizmicky pozorovaných zemetrasení na území Slovenska v rokoch 2001 – 2005 a polohy seizmických staníc zaradených do NSSS v roku 2005.

4 GEOFYZIKÁLNY MODEL SLOVENSKA

Územie Slovenska je súčasťou jednej z hlavných geologických jednotiek Európy – alpíd. Tie sú zastúpené na území Slovenska karpatskou sústavou, prevažne Západnými Karpatmi, ktoré zasahujú aj do ostatných krajín v strednej Európe (Česko, Poľsko a Maďarsko). Západné Karpaty sú charakterizované pomerne vysokým priemerným prevýšením, ktoré dosahuje hodnotu približne 1200 m n.m. Západný karpatský oblúk spolu s ostatnými okolitými tektonickými jednotkami (Český masív, európska platforma, panónska panva, Východné Alpy a Východné Karpaty) sa podieľa na tektonickom a geologickom vývoji v našej lokalite. Tieto tektonické jednotky nám zároveň poskytujú dobrú možnosť na štúdium kontinentálnej kolízie a prebiehajúcej tektoniky. Základnou črtou Západných Karpát je z tektonického hľadiska ich príkrovová štruktúra (Fusán *et al.* 1987; Biely *et al.* 1996) a z hľadiska horninového zloženia prevaha sedimentov (Obrázok 3).

Západné Karpaty (ZK) sa delia na dve časti, a to vonkajšie ZK (externidy) a vnútorné ZK (internidy). Vonkajšie ZK sú budované vonkajším karpatským flyšovým pásmom v čele ktorého sa rozprestiera karpatská čelná predhlbeň (Andrusov, 1958; Kováč *et al.* 1998). Vonkajšie a Vnútorné ZK sú navzájom oddelené Pieninským Bradlovým pásmom, ktoré patrí medzi jednu z najkomplikovanejších tektonických jednotiek v ZK. Táto zóna prešla veľmi komplikovaným geologickým vývojom. V súčasnosti je dôsledkom týchto procesov šírka bradlového pásma len niekoľko kilometrov (maximálne 20 km) pri svojej dĺžke okolo 600 km. Bradlové pásmo sa tiahne od východného okraja Viedenskej panvy, stredným Považím na Oravu, cez poľské Pieniny na východné Slovensko, Ukrajinu až do Rumunska.

Cieľom tejto kapitoly je poskytnúť základné informácie o tektonickej a geologickej stavbe územia Slovenska a tiež poukázať na jednotlivé seizmicky výrazné rozhrania a štruktúry, ktoré je potrebné pri tvorbe 3-D modelu zemskej kôry na území Slovenska brať do úvahy s ohľadom na seizmologické účely.



Obrázok 3 - Tektonická schéma Slovenskej časti Západných Karpát (Bezáka *et al.* 2004).

4.1 POUŽÍVANÉ GEOFYZIKÁLNE METÓDY

Geofyzikálne metódy nám dokazujú, že sú efektívnymi nástrojmi pre štúdium a rekonštrukciu geodynamického vývoja ZK. Žiadna z geofyzikálnych alebo geologických metód neposkytuje ucelený pohľad, informáciu o geologickom vývoji, usporiadaní a materiálových parametroch v Zemi. Existuje množstvo geofyzikálnych metód, z ktorých každá je schopná poskytnúť množstvo rôznych geofyzikálnych údajov. Základnou úlohou nie je dosiahnuť interpretáciu v rámci aplikácie tej ktorej geofyzikálnej metódy, ale skĺbiť viaceré interpretácií z viacerých geofyzikálnych metód do jednej ucelenej predstavy - vykonať geofyzikálne syntézy.

Medzi základné geofyzikálne metódy zaraďujeme refrakčné a reflexné seizmické metódy, seizmologické metódy, gravimetrické metódy, magnetometrické metódy,

magnetotelurické sondovanie, elektrické sondovanie a geotermálne metódy. Každá z týchto metód nám poskytuje údaje, ktorých fyzikálna podstata je rôzna. Naším cieľom je zostaviť 3-D seizmický model zemskej kôry na území Slovenska. Preto potrebujeme v modeli vyčleniť výrazné seizmické rozhrania, na ktorých dochádza k odrazu alebo lomu seizmických vln. Taktiež potrebujeme poznať rýchlosti šírenia vln v jednotlivých vrstvách alebo blokoch.

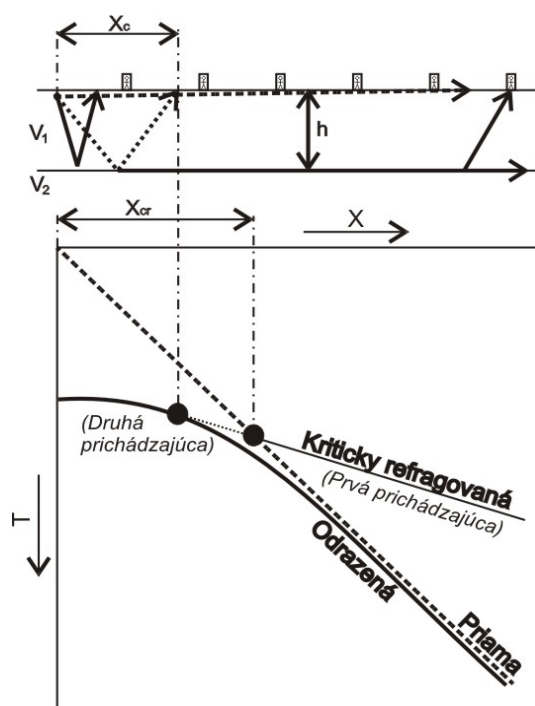
Geofyzikálne údaje, o ktoré sa zaujímate, boli získané najmä pomocou seizmických reflexných a refrakčných metód na jednotlivých profiloch prechádzajúcich cez naše územie.

V tejto časti popíšeme základné princípy seizmickej refrakčnej a reflexnej metódy, ako tieto metódy pracujú a aké údaje nám poskytujú.

4.1.1 Seizmická refrakčná metóda

Ohyb seizmických vln nám poskytuje určité obmedzenia na zloženie a štruktúru určitých častí Zeme. K refrakcii vln dochádza z dôvodu zmeny seizmickej rýchlosti v prostredí, v ktorom sa šíria. Táto zmena je charakterizovaná zmenou objemového modulu, tuhosti a hustoty materiálu. Spôsob refrakcie nám umožňuje získať určité údaje o týchto materiálových parametroch.

Seizmická refrakčná metóda je veľmi užitočná, ak dochádza k náhlemu nárastu rýchlosti v prostredí s hĺbkou. V takom prípade kriticky lomená P-vlna môže za určitých okolností prichádzať do prijímača (geofónu) skôr ako priama P-vlna. Dochádza k tomu v prípade, ak vzdialenosť zdroja od prijímača je dostatočne veľká (Obrázok 4). Potom uhol lomu (a teda aj zdanlivá rýchlosť) môže byť dostatočne presne určený. V prípade, ak by vzdialenosť medzi zdrojom a prijímačom nebola dostatočne veľká, lomená P-vlna by prichádzala do



Obrázok 4 – Porovnanie časov šírenia refragovaných, odrazených a priamych vln v závislosti na vzdialenosti zdroja a prijímača. (Lillie, 1999).

prijímača za priamou P-vlnou a samotný jav (lom) by mohol byť maskovaný interferencie od priamej, odrazenej alebo ďalšej lomenej vlny. Čo sa týka samotného poľa prijímačov, základnou požiadavkou je, aby veľkosť (dĺžka) tohto poľa bola aspoň dvojnásobok minimálnej vzdialenosti X_{cr} , na ktorej lomené P-vlny prichádzajú pred priamymi P-vlnami.

Seizmická refrakčná metóda je založená na meraní časov šírenia seizmických vln lomených na rozhraní vrstiev s rôznymi rýchlosťami. Časy šírenia sú zaznamenané poľom prijímačov, ktoré sú rozmiestnené v pravidelných vzdialenostiach. Dĺžka tohto poľa presahuje dvojnásobok X_{cr} . Zaznamenané časy príchodu sú analyzované a určia sa časy prvého príchodu pre jednotlivé zdroje. Na základe toho sú zhotovené grafy závislosti času šírenia na vzdialenosti a vypočítané rýchlosti pre jednotlivé vrstvy (bloky). Stručný popis seizmickej refrakčnej metódy, ktorý tu uvádzame, ako aj mnohé ďalšie podrobnosti o tejto metóde môžete nájsť napr. v Lillie (1999).

4.1.2 Seizmická reflexná metóda

Seizmická reflexná metóda bolo vyvinutá v 20-tych a 30-tych rokoch minulého storočia, ako nástroj pre hľadanie ropy a plynu v sedimentárnych bazénoch. Postupným vývojom sa táto metóda dostala na popredné miesto v seizmickom prieskume kôry a vrchnej časti plášťa.

Seizmická reflexná a refrakčná metóda sa navzájom líšia v ich geometrickom usporiadaní a taktiež v type problémov, ktoré riešia. Pri refrakčnej metóde bola základná požiadavka, aby dĺžka poľa geofónov bola väčšia, ako minimálna vzdialenosť X_{cr} , takže dĺžka poľa musí byť 5 až 10-krát väčšia, než max. hĺbka, z ktorej lomy chceme zahrnúť. V prípade veľkých vzdialeností, priame a lomené vlny často interferujú s odrazenými vlnami, preto najlepším prípadom je, ak odrazené vlny prichádzajú skoro kolmo na povrch. V takom prípade sa dĺžka (rozšírenie) poľa uvažuje približne rovná hĺbke najhlbšieho odrazu, ktorý nás zaujíma.

Reflexná a refrakčná metóda sa navzájom dopĺňajú. Refrakčná metóda dáva hrubý odhad rýchlostí v kôre a hrúbok, reflexná metóda zase ukazuje jemné detaily štruktúr. Refrakčná metóda potrebuje ku kritickému lomu vlny (kde uhol lomenej vlny nám poskytne informácie potrebné na odhad rýchlosti hrubého intervalu kôry) prudký nárast

rýchlosti, pokiaľ v prípade refrakčnej metódy k odrazu vlny dochádza pri zmenách v impedancii (seizmickej rýchlosti a hustote).

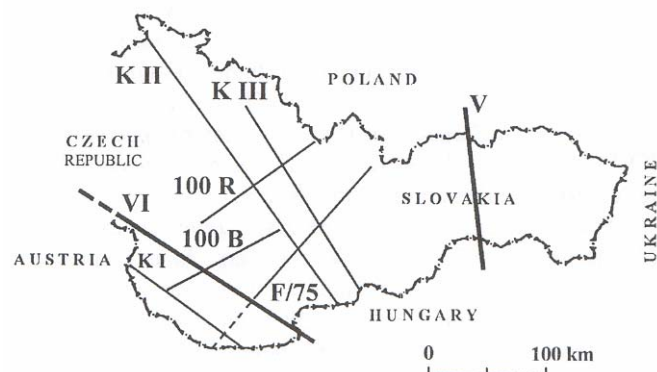
Seizmická reflexná metóda patrí medzi jednu z najpresnejších a najviac používaných metód na seizmické sondovanie zeme. Jej základný princíp spočíva v meraní a v analýze časov šírenia (Two-Way travel Time, TWT) seizmických vln, šíriacich sa od povrchu a odrazených späť na povrch. Samotné meranie a analýza dát je komplikovaný proces, detailnejšie sa touto metódou zaoberá Lillie (1999).

Seizmická reflexná a refrakčná metóda sú zložité metódy, ako na realizáciu, tak aj na spracovanie nameraných údajov. Informácie, ktoré sme uviedli o týchto dvoch metódach sú veľmi stručné a cieľom bolo hlavne priblížiť myšlienku týchto dvoch metód. Detailne sú popísané napr. v Lillie (1999), kde je možné nájsť aj ďalšie citácie na literatúru, zaoberajúcu sa problematikou seizmických meraní.

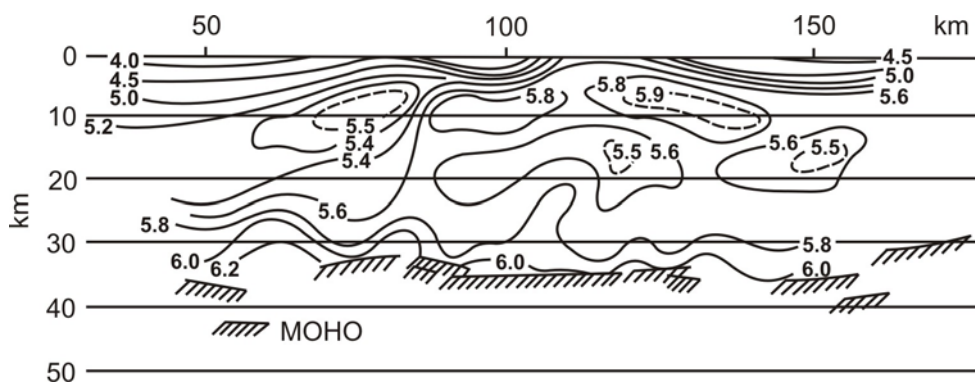
4.2 REFRAKČNÉ SEIZMICKÉ PROFILY SLOVENSKA

Prvé seizmické merania (Beránek, 1971; Beránek *et al.* 1972, 1979; Beránek a Zátapek, 1981; Mayerová *et al.* 1994) zamerané na štúdium zemskej kôry ZK (do roku 1972) boli vykonané pozdĺž dvoch medzinárodných profilov označených rímskymi číslami V a VI a následne na to boli v rokoch 1975 až 1980 vykonané merania pozdĺž regionálnych profilov označených K I, K II, K III, 100R, 100B a F/75. Poloha týchto profilov je vyznačená na obrázku

5. Merania pozdĺž týchto profilov nám poskytli základné informácie o štruktúre kôry a o rýchlostiach šírenia seizmických vln v jednotlivých tektonických jednotkách. Vrchná časť kôry ZK, až do hĺbky približne 10 km, sa vyznačuje zvýšeným vertikálnym nárastom rýchlosti (Obrázok 6).



Obrázok 5 - Polohy seizmických refrakčných profilov vedených cez územie Slovenska. Tenké čiary reprezentujú národné profily, hrubé čiary medzinárodné profily (Bucha a Blížkovský, 1994).



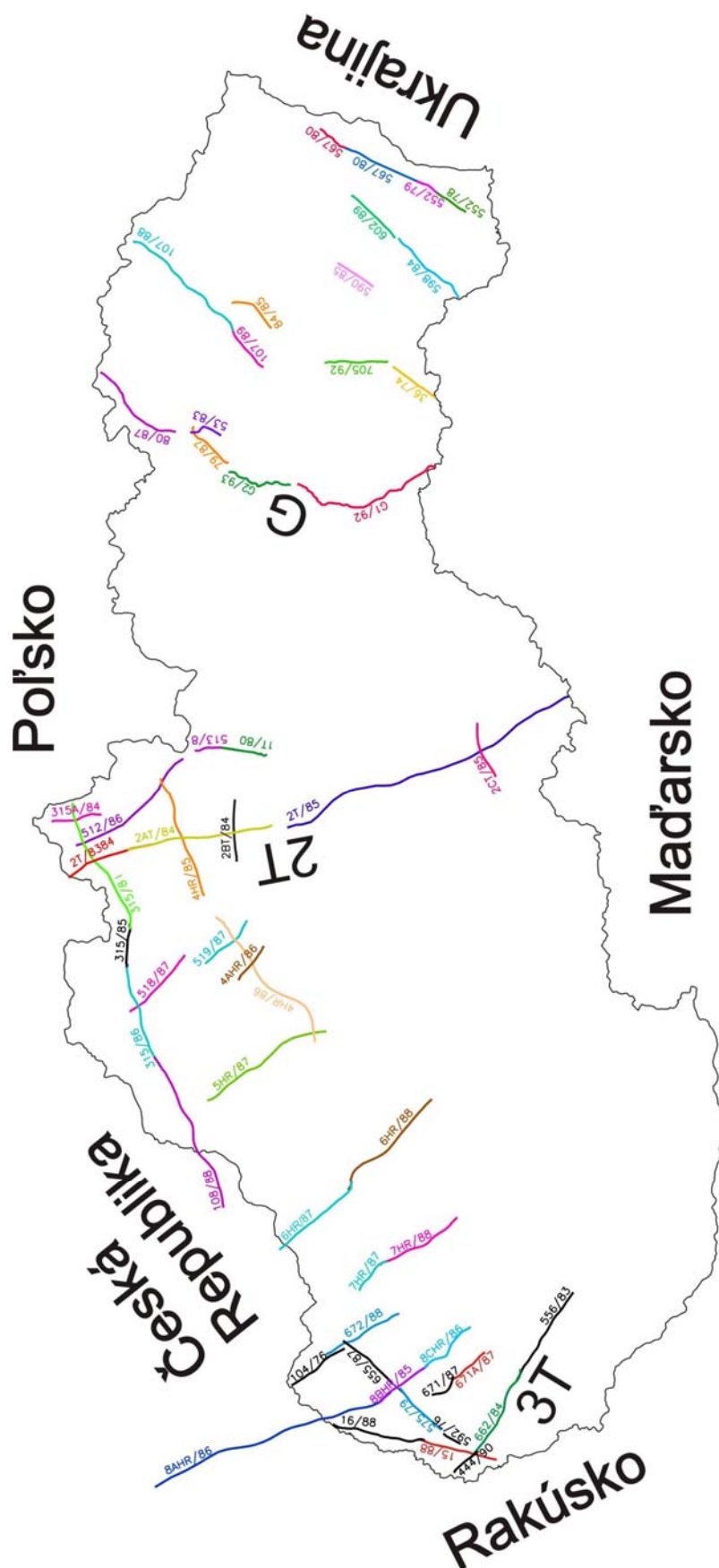
Obrázok 6 - Model efektívnych rýchlostí cez profil K III (Bucha a Blížkovský, 1994). Rýchlosti sú uvádzané v km.s^{-1} .

Pod touto zónou je viditeľný kanál znížených rýchlostí. Pod kanálom znížených rýchlostí je opäť zóna zvýšeného nárastu rýchlostí. Táto zóna je pravdepodobne spojená s prechodovou vrstvou v spodnej časti zemskej kôry (bazaltická vrstva) (Mayerova *et al.* 1994). Na základe nameraných údajov môžeme predpokladať, že MOHO netvorí ostré rozhranie, ale prechodová zóna hrubú aj niekoľko kilometrov (Obrázok 6).

4.3 REFLEXNÉ SEZMICKÉ PROFILY SLOVENSKA

Slovensko patrí ku krajinám s najhustejšou sieťou hlbinných reflexných seizmických profilov. Na ploche Slovenskej republiky (49030 km^2) bolo od roku 1971 realizovaných viac ako 1250 km profilov (Obrázok 7). Samotná dĺžka reflexných profilov sa pohybuje od niekoľko desiatok kilometrov pri krátkych profiloch, po 100–200 km dlhé transekty. Väčšina profilov je situovaná v oblasti karpatského horského pásma a v okolí kontaktu ZK s Českým masívom. Ciele meraní pozdĺž jednotlivých profilov boli rôzne. Niektoré profily boli zamerané na mapovanie stavby kôry, iné boli zvolené za účelom vyhľadávania ložísk ropy a plynu. Výskum hlbínnej stavby zemskej kôry pomocou tradičnej petrolejárskej prospekčnej metódy priniesol revolučné výsledky v poznávaní a charakterizovaní rôznych typov kôry, spodnej časti kôry a prechodovej oblasti medzi spodnou kôrou a vrchným plášťom.

Na opis a interpretáciu všetkých profilov tu nemáme priestor. V tejto časti kapitoly stručne opíšeme najdôležitejšie profily nachádzajúcich sa na Slovensku, pričom sa zameriame na stručnú charakteristiku profilu a interpretáciu získaných výsledkov.



Obrázok 7 - Poloha hlbinných seizmických reflexných profilov nameraných na Slovensku od roku 1971 (Vozár a Šantavý, 1999).

Pri písaní sme vychádzali z prác Vozár a Šantavý (2000), Blížkovský *et al.* (1986), Bucha a Blížkovský (1994), Zátopek (1981), Bielik (1999), Bielik a Šefara (2002), Bielik *et al.* (2004).

4.3.1 Stručný prehľad starších profilov (2T, 3T, G)

Transekt 3T

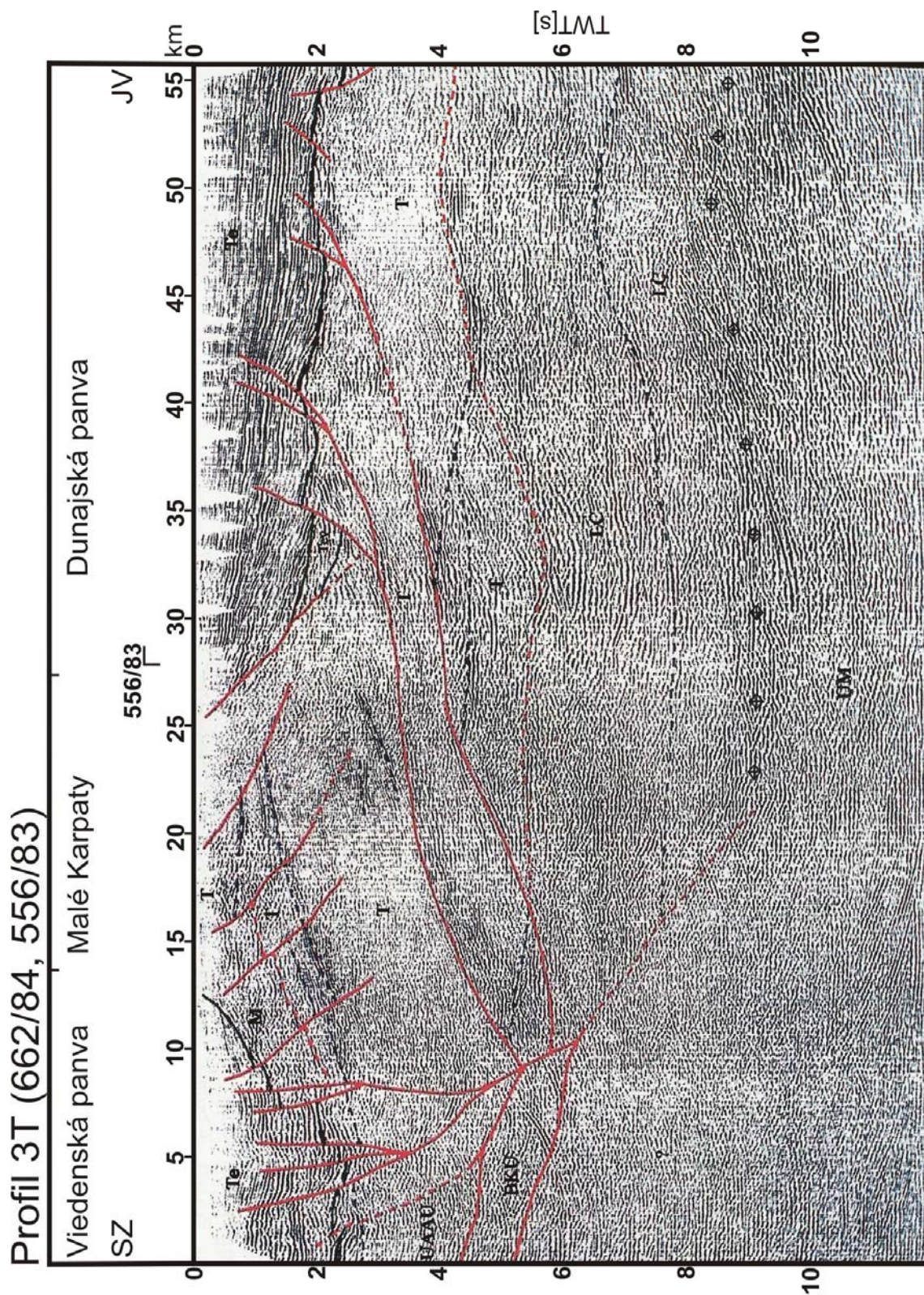
Seizmické reflexné merania vykonané pozdĺž transektu 3T mali prispieť k pochopeniu štruktúralne-tektonickej polohy Malých Karpát v jej širšom kontexte a taktiež poskytnúť informácie o spodnej časti kôry a MOHO diskontinuite.

Transekt 3T (Obrázok 8) pozostáva z dvoch čiastočných profilov 556/83 a 662/84 o celkovej dĺžke 58 km. Je orientovaný v SZ – JV smere a prechádza z viedenskej panvy cez južnú časť Malých Karpát do dunajskej panvy. Časový rez transektu 3T môže byť rozdelený na tri seizmicky rozdielne časti (Vozár a Šantavý, 2000): viedenská panva, Malé Karpaty a dunajská panva.

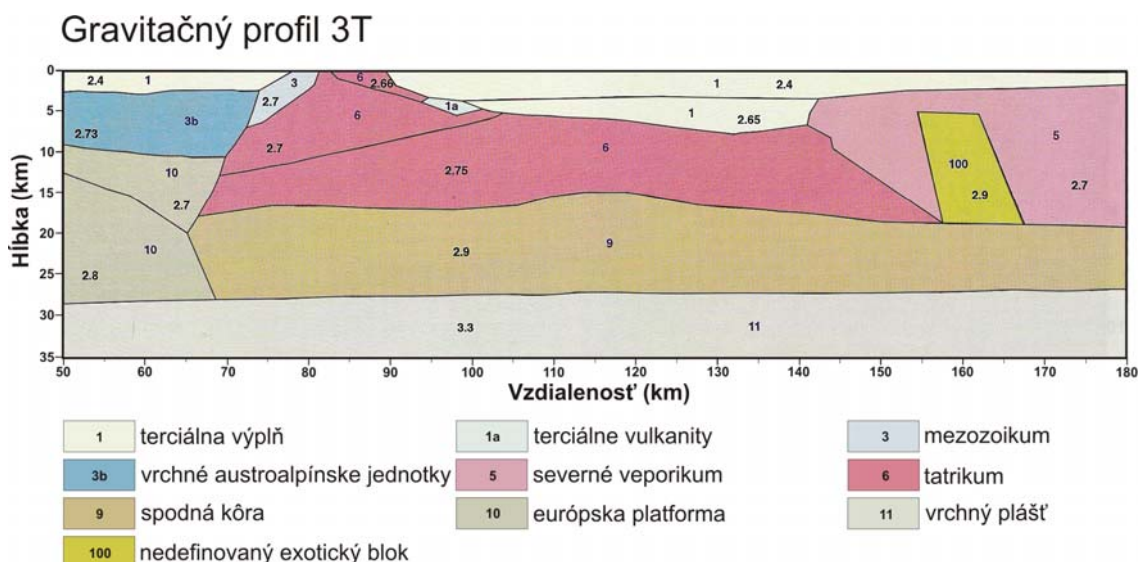
Viedenská panva sa nachádza v SZ časti transektu 3T (profil 662/84) a na profile zaberá dĺžku 13 km. Na tejto dĺžke sa nachádza skupina významných reflexov, ktoré majú pôvod v podloží viedenskej panvy, ktoré je značne rozrušené. Seizmické vlny v hĺbke pod 8 km sú značne porušené. Je to spôsobené veľkými energetickými stratami v podloží viedenskej panvy, ktoré sa prejavujú absenciou reflexov vo vlnovom poli. Viedenská panva predstavuje tektonicky veľmi komplikovanú oblasť so sedimentmi, ktoré spôsobujú silný útlm seizmickej energie.

Medzi 18. km a 22. km v 0.6–0.8 s TWT sa nachádza skupina horizontálnych reflexov. Tieto majú SZ sklon, čo pravdepodobne zodpovedá násunu bratislavského masívu na mezozoické sekvencie. Zo strany dunajskej panvy je obmedzenie Malých Karpát na zlome, ktorý nie je jednoznačne interpretovaný. Pod Malými Karpatmi na úrovni 4–5 s je dostatočne výrazný reflex medzi rozdielnymi prostrediami vrchnej a spodnej kôry. MOHO - diskontinuita nie je v tejto časti profilu jasná.

V dunajskej panve, na profile 556/83 v sedimentárnej výplni dunajskej panvy vidieť z horizontálnych reflexov dobre štruktúrovanú stavbu. Významná je reflektivita



Obrázok 8 - Interpretácia profilu 3T (migrovaný s koherenciou, Vozár, Šantavý, Szalaiová a Pottfaj, 1996) prechádzajúceho z viedenskej panvy, cez Malé Karpaty do dunajskej panvy (Rakús, 1998). T – tatrikum, Te – terciálna výplň, Tev – terciálne vulkanity, M – mezozoické jednotky, UAAU – vrchné austroalpínske jednotky, BKU – jednotky Bielych Karpát, LC – spodná kôra, UM – vrchný plášť, ◆ - MOHO diskontinuita.



Obrázok 9 - Interpretácia gravitačných meraní (Szalaiová, Šantavý a Vozár, 1998) vykonaných pozdĺž gravitačného profilu 3T (Rakús, 1998).

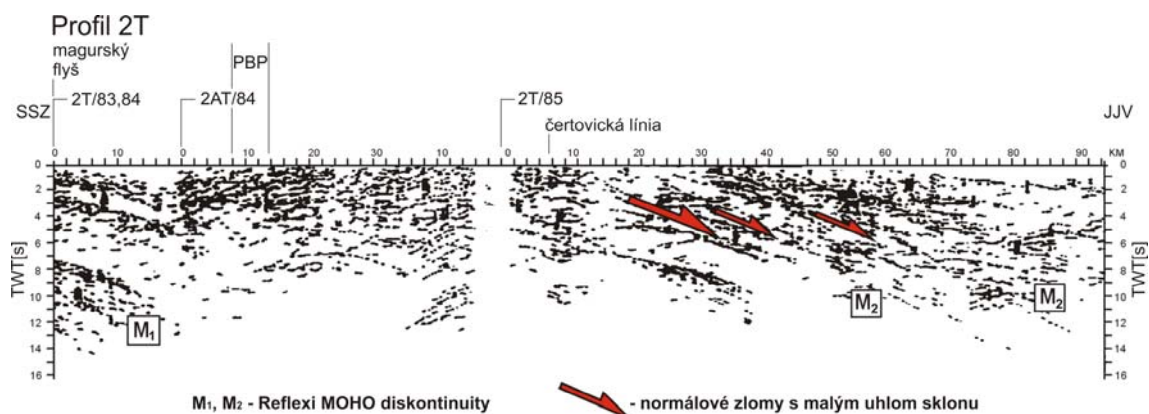
spodnej kôry. V SV časti profilu je dobre pozorovateľná MOHO – diskontinuita v približne 9.5 s TWT.

Pre porovnanie, gravimetrická interpretácia transektu 3T je viditeľná na obrázku 9. Predstava vychádza z predpokladu vykľutia spodnej kôry v procese tvorby terciérnej panvy. MOHO – diskontinuita je v hĺbke asi 30 km, smerom na JV má mierne vzostupnú tendenciu v intervale do hĺbky 28 km (panónska panva).

Transekt 2T

Cieľom seizmických reflexných meraní bolo naviazať sa na profil vedený cez poľské teritórium a potom pokračovať pozdĺž línie Pilsko – Chabenec – Gemerský Jablonec. Dĺžka meraného transektu je 170 km a je zložený z viacerých profilov (2T/83,84, 2AT/84, 2BT/84, 2T/85, 2CT/85) (Obrázok 10). Snahou bolo zistiť hrúbku flyšového príkrovu (Tomek *et al.* 1989) a bližšie špecifikovať kolíziu medzi európskou platformou a ALCAPA blokom. Taktiež výskumné aktivity pozdĺž meranej línie 2T mali poskytnúť základné informácie o ložiskách ropy a zemného plynu.

Profil 2T/83, 84 sa začína vo flyšovom pásme na poľsko-slovenskej hranici nad Mútnym pod Pilskom (Slovenské Beskydy) a končí sa pred bradlovým pásmom južne od Babína. Profil prechádza všetkými časťami magurskej jednotky (račianska, bystrická



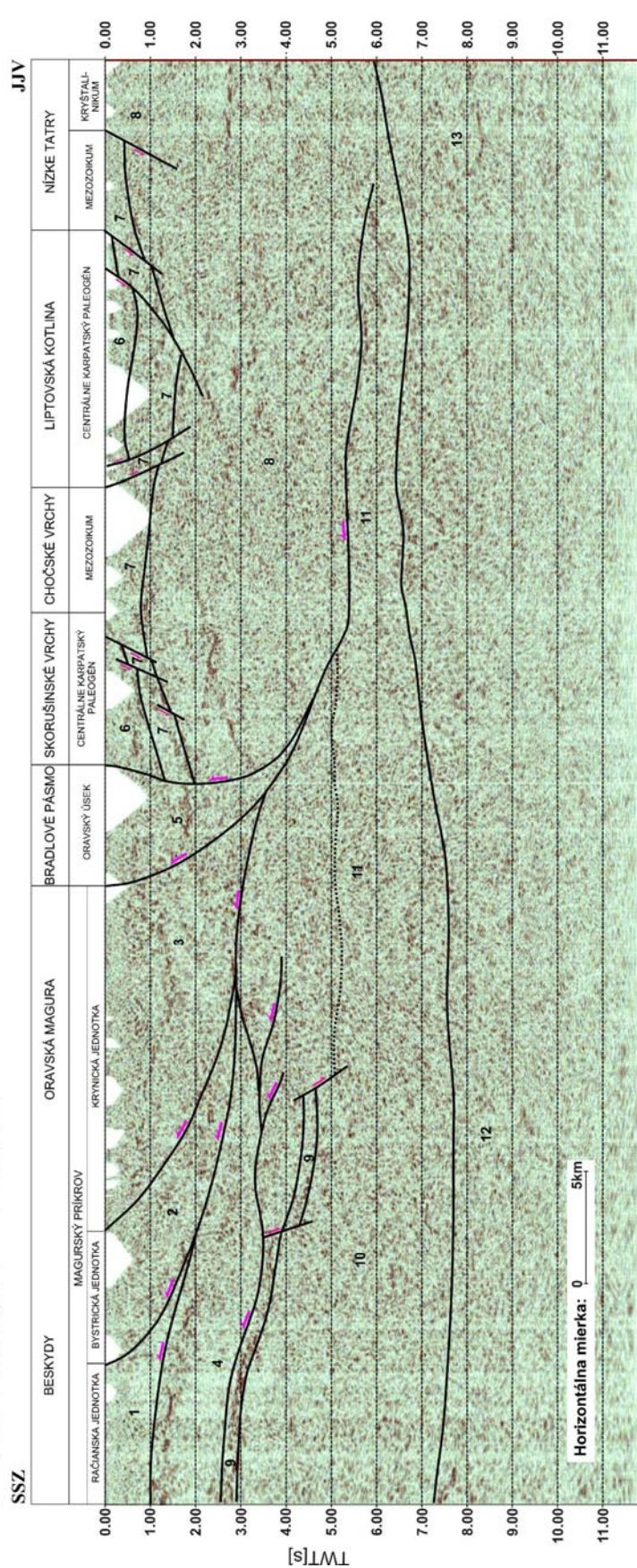
Obrázok 10 - Interpretácia 2T seizmického časového prierezu (Tomek *et al.* 1989) vedeného od vonkajšieho karpatského flyšového pásma po rimavskú panvu. PBP – Pieninské Bradlové pásmo.

a oravsko-magurská). Európska platforma sa začína na časovej úrovni 2.8 s na začiatku profilu a ohýba sa pod miernym sklonom generálne na juh pod flyšové jednotky ZK až po lineament bradlového pásma. Platforma je členená na viac etáží (hlavne interval 8–10 TWT[s]) s výraznými subhorizontálnymi až mierne na juh upadajúcimi reflexmi. Najspodnejšia etáž pravdepodobne zodpovedá spodnej kôre platformy. Vrchné ohraničenie platformy lemuje zóna výrazných paralelných reflexov, v rámci ktorých interpretujeme obal zložený prevažne z dobre štrukturovaných sedimentov vrchného paleozoika a mezozoika. Nad nimi sú sekvencie alpínskej molasy a vyššie až k povrchu možno sledovať zväzky paralelných, na juh uklonených reflexov, ktoré odrážajú stavbu krosnianskeho a magurského flyšu.

Profil 2AT/84 (Obrázok 11) nadväzuje na predchádzajúci profil južne od Babína a pokračuje cez bradlové pásmo, Chočské vrchy a Liptovskú kotlinu do severnej časti Ďumbierskych Tatier. Vo vrchnej časti obrazu dominujú výrazné odrazy uklonené na sever. Jeden z nich vychádza na povrch na 32 km transektu 2T a pravdepodobne patrí k spätnému prešmyku bradlového pásma na vnútrokarpatský paleogén. Ďalší paralelný reflex už ale nemusí zodpovedať tomuto tektonickému fenoménu. Pod Liptovskou kotlinou a Ďumbierskymi Tatrami sú reflexy už subhorizontálne a sú uklonené na východ. Najhlbšie subhorizontálne odrazy sú evidentné na časovej registrácii okolo 7–8 s. MOHO-diskontinuita nie je na obraze profilu dostatočne preukázaná. Dominantným problémom na tomto profile je štruktúrne postavenie bradlového pásma, ktoré tvorí akúsi bariéru medzi vonkajšími a vnútornými ZK.

Profil 2T/83,84 + 2AT/84

SSZ



- | | |
|--|---|
| 1 magurský príkrov - račianska jednotka | 9 sedimentárny pokryv európskej platformy |
| 2 magurský príkrov - bystrická jednotka | 10 kryštálikum európskej platformy |
| 3 magurský príkrov - krynická jednotka | 11 substrát flyšových príkrovov |
| 4 vonkajšie príkrovy flyšového pásma - nečlenené | 12 spodná kôra európskej platformy |
| 5 bradlové pásmo | 13 spodná kôra centrálnych Západných Karpát |
| 6 centrálny karpatský paleogén | |
| 7 nečlenené mezozoické jednotky centrálnych Západných Karpát | |
| 8 kryštálikum tatrika | |

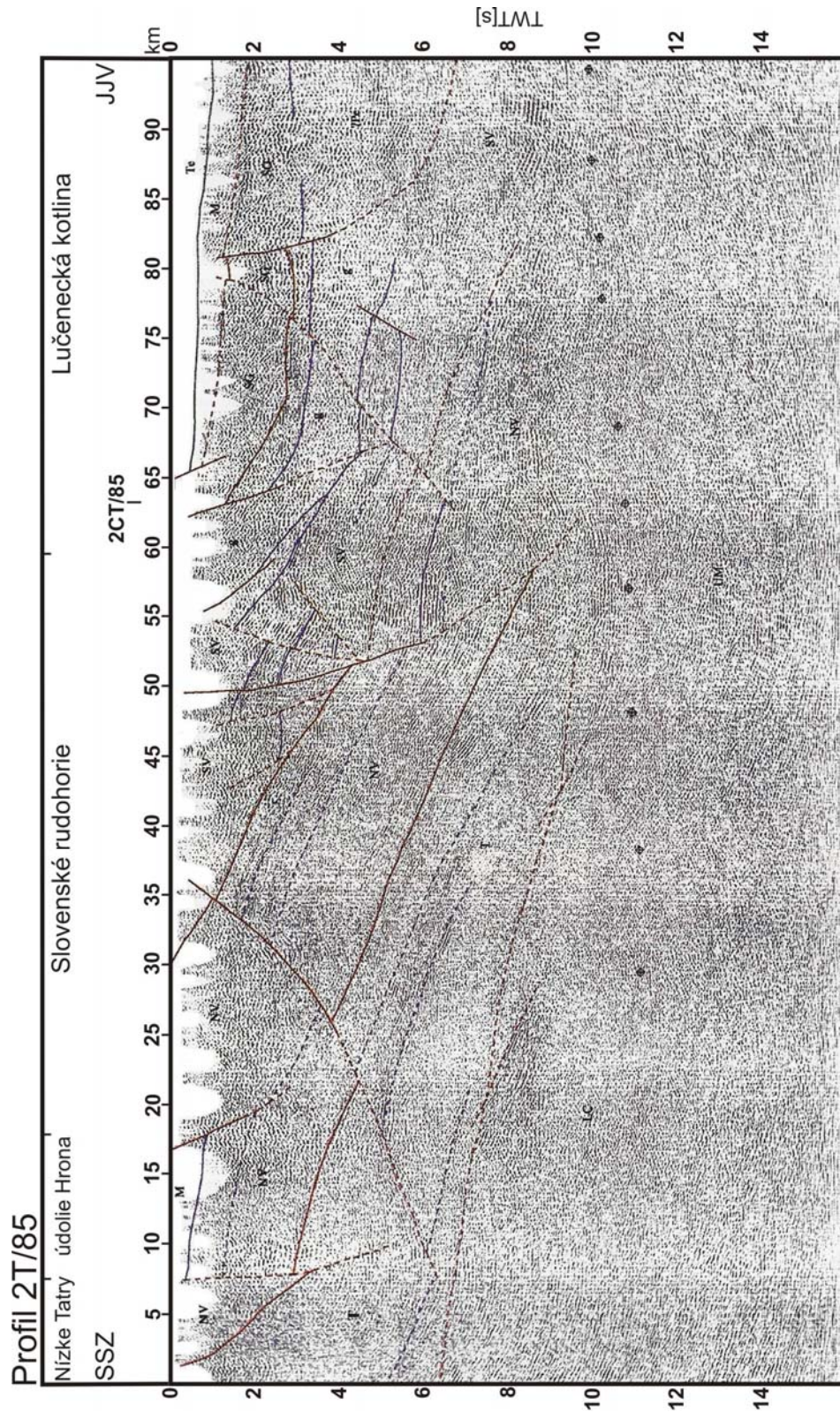
Obrázok 11 - Model štruktúro geologickej stavby zemskej kôry pozdĺž seizmického profilu 2T/83, 84, 2AT/84 (migrovaný) zhotovený na základe seizmických meraní (Pereszlányi a Pereszlányiová, 2004).

Najpravdepodobnejšia je predstava autorov Tomek et al. (1987, 1989), o takmer kolmom priebehu štruktúry bradlového pásma až do hĺbky 6–7 km. Lineament bradlového pásma interpretujeme ako hlbinný transformný zlom na styku jednotiek vonkajších a vnútorných ZK a predstavuje zároveň aj južné obmedzenie európskej platformy.

Profil 2BT/84 pretína profil 2AT/84 v Liptovskej kotline a prechádza paleogénom tejto kotliny v smere V–Z medzi obcami Ludrová a Demänová. Mocnosť paleogénu stúpa smerom na V až na 1.1 s, čo môže zodpovedať hĺbke asi 1.6–1.8 km.

Profil 2T/85 (Obrázok 12) začína v oblasti tektonického styku tatrika a severného veporika pod Chabencom v Ďumbierskych Tatrách a pokračuje v jednotkách severného a južného veporika. V južnej časti profil dosahuje násun gemerika na južné veporikum (lubenícko-margeciánska línia) a končí sa v neogéne Lučenskej kotliny a Cerovej vrchoviny. Na migrovanom reze sa všetky pôvodne subhorizontálne reflexy ohýbajú do mohutnej celokôrovej jazvy, ktorá ovplyvňuje štruktúru tu zastihnutých karpatských jednotiek vrátane tatrika a severného veporika. Vyšším jednotkám vrátane južného veporika dominujú subhorizontálne celokôrové reflexy. Čiastočne pohorelský zlom, ale najmä muránsky zlom, sa výrazne prejavuje prerušením reflexov všetkých skupín minimálne vo vrchnej kôre. MOHO - diskontinuita je na časovej registrácii medzi 10–10.5 s a mierne stúpa od 55-teho km smerom na juh. Subhorizontálna reflektivita južného okraja profilu je veľmi výrazná.

Profil 2CT/85 prechádza západnou časťou Lučenskej kotliny medzi Vidinou a Sušanmi. Mocnosť neogénnych sedimentov dosahuje v strednej časti profilu približne 700 m. Reflexy vo vrchnej i spodnej kôre sú monotónne, útržkovité a subhorizontálne. Odrazy z hranice kôra/plášť sú viditeľné na časovej úrovni 9.9–10.3 s. To zodpovedá hĺbke okolo 30–32 km.



Obrázok 12 - Model štruktúrne geologickej stavby zemskej kôry pozdĺž seizmického profilu 2T/85 (migrovaný s koherenciou, Vozár, Šantavý a Szalaiová, 1996) zhotovený na základe seizmických reflexných meraní (Rakús, 1998). T – Tatrikum, Te – Terciálna výplň, M – Mezozoické jednotky, NV – severné veporikum, SV – južné veporikum, g – južné veporikum-alpínske granitoidy, SG – južné gemerikum, Pe – megajednotka Pelső, LC – spodná kôra, UM – vrchný plášť, ◆ - MOHO diskontinuita.

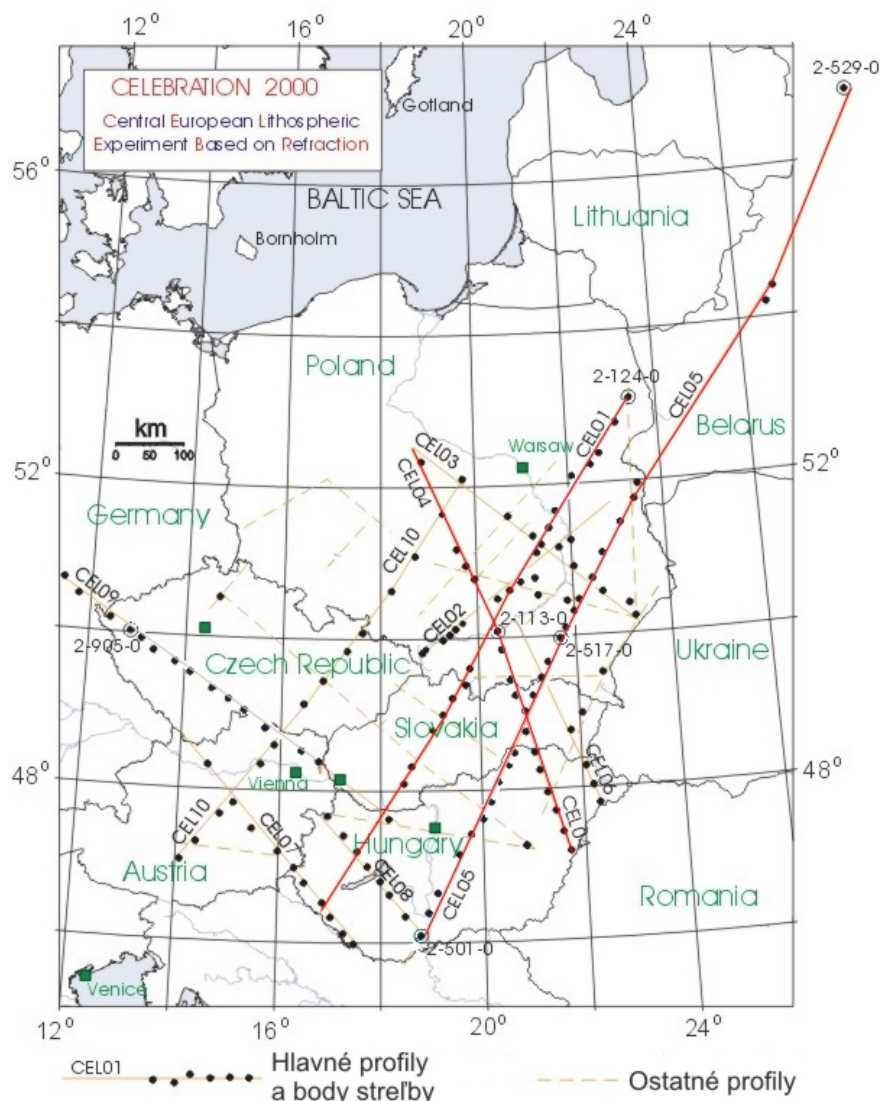
Transekt G

Transekt G (Vozár a Šantavý, 2000) je zložený z viacerých hlbinných profilov rozdielnej časovej registrácie. Profily G1a/92, G1b/92 sú z roku 1992 s časovou registráciou do 20 s, G2 z 1993 do 30 s a profily 79/87 a 80/87 sú obidva do 12 s. Transekt je vedený smerom od juhu na sever, od maďarských hraníc pri Turni nad Bodvou, východnou časťou Slovenského krasu a Slovenského Rudohoria (G1), Sľubicou a Braniskom až po jeho severný okraj pri obci Lačnov (G2). Transekt pokračuje na SSV profilmi 79/87 a 80/87 cez Bachureň do pohoria Čergov a severnej časti Ondavskej vrchoviny až k hranici s Poľskom (Obrázok 7). Záznamy reflexov transektu G predstavujú tri rozdielne obrázky.

Južná časť je ovplyvnená zlomom Darnó, ktorý možno lokalizovať na základe porúch v poli reflexov na úseku 0 až 7 km a zložitou šupinovito-príkrovovou stavbou pri južnom okraji gemerika.

Pre strednú časť sú charakteristické výrazné polia reflexov generálne uklonené na juh (Vozár *et al.* 1996) ako odraz severovergentnej stavby a vyklenutia gemerika, veporika i tatrika. MOHO-diskontinuita je v južnej a strednej časti transektu v časovom intervale 9–10 TWT[s], čo zodpovedá hĺbke 28–32 km. Smerom na sever hĺbka MOHO-diskontinuity narastá.

Severná časť profilu predstavuje stavbu magurského flyšu, ktorý sa v seizmickom obraze prejavuje formou paralelných reflexov mierne uklonených na juh a jeho styk s vnútrokarpatskými jednotkami v oblasti bradlového pásma. Bradlové pásmo nie je v profile zobrazené z dôvodu prerušenia medzi profilmi 79/87 a 80/87. Avšak na základe charakteru a priebehu reflexov v magurskej jednotke a v tatriku je možné interpretovať bradlové pásmo ako silne porušenú tektonickú zónu s takmer kolmým priebehom až do hĺbky 5–8 km. MOHO-diskontinuita je tu interpretovaná na časovej úrovni 11 TWT[s], čo dokazuje nárast hĺbky MOHO-diskontinuity v južno-severnom smere.



Obrázok 13 - Na mape sú znázornené merané seizmické refrakčné profily a body streľby v rámci projektu CELEBRATION 2000. Červenou farbou sú vyznačené profily, ktorých interpretácia je v texte.

4.3.2 CELEBRATION 2000

CELEBRATION 2000 (Central European Lithospheric Experiment Based on Refraction) bol veľký medzinárodný seizmický projekt zameraný na strednú Európu. Hlavnými cieľmi projektu bolo presnejšie popísať hlbinnú stavbu zemskej kôry, zostrojiť 3-D model litosféry, presnejšie určiť hĺbku MOHO na študovanej lokalite a vyvinúť geodynamický model pre tektonický vývoj na danej lokalite. Celková dĺžka meraných profilov, z ktorých prevažnú časť tvorili refrakčné profily, bola okolo 9000 km (Obrázok 13). Vzdialenosť seizmických snímačov bola 2.8 resp. 5.6 km.

Celkový počet použitých snímačov bol 1230 a ako zdroje seizmických vln bolo použitých 147 priemyselných explózií o hmotnosti 15 ton – 90 kg . Výsledky, ktoré boli získané z projektu CELEBRATION 2000 patria medzi najpresnejšie a najdetailnejšie z tých, ktoré máme v rámci nášho regiónu k dispozícii.

Z tých profilov, ktoré prechádzajú cez územie Slovenska, sú význačné najmä CEL01, CEL04, CEL05. Profily CEL01 a CEL05 sú takmer rovnobežné a oba profily začínajú na juhu Maďarska, prechádzajú cez Slovensko, Poľsko, kde profil CEL01 končí a CEL05 pokračuje ďalej cez Bielorusko a končí v Rusku. Profil CEL05 je najdlhším nameraným profilom v rámci projektu CELEBRATION 2000. Jeho celková dĺžka je 1420 km. Profil CEL04 tiež začína v Maďarsku, prechádza cez Slovensko a končí v Poľsku.

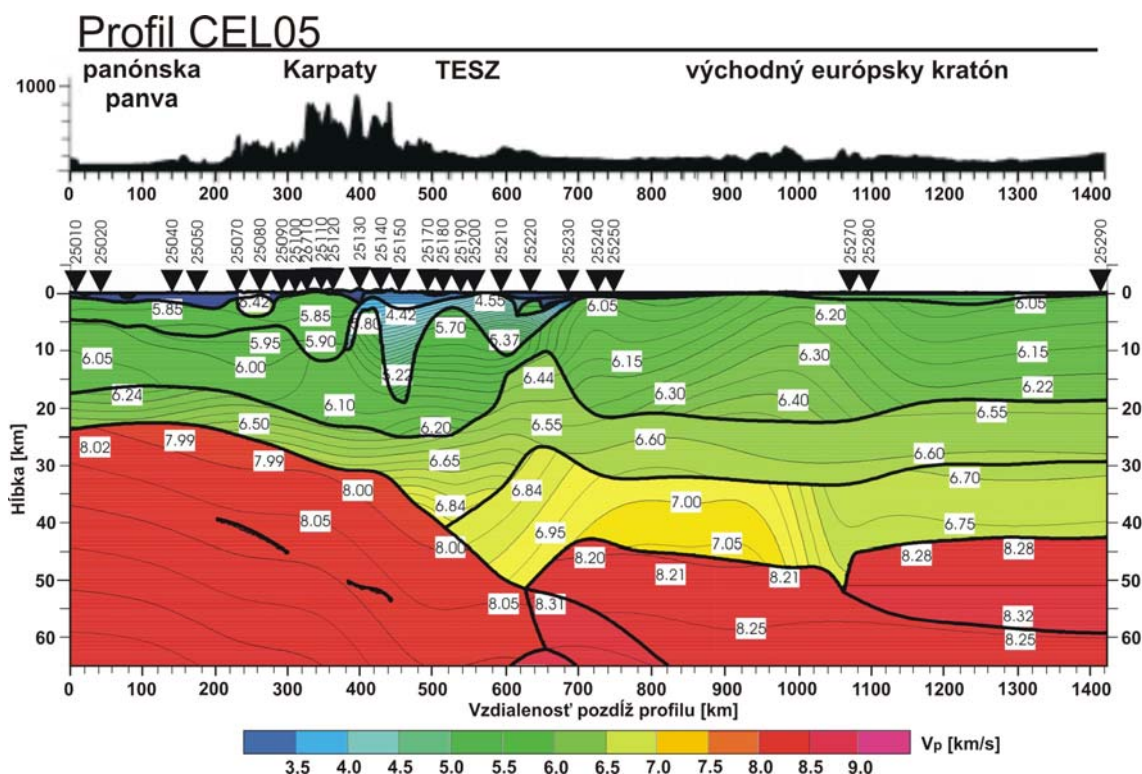
Profil CEL05

Juhozápadná časť profilu (0 – 200 km) leží v panónskej panve. Ďalej profil prechádza cez tektonicky komplikovanú oblasť, ktorá zahŕňa ZK, západokarpatskú čelnú predhlbeň (angl. foredeep) (200 – 500 km) a Trans-Európsku suturovú oblasť (TESZ) (500 – 700 km), ktorá v sebe zahŕňa Malopoľský masív (MM), Lublinský žľab (Lublin Trough) a Teisseyre-Tornquist zónu (TTZ). Severovýchodná časť profilu (700 – 1420 km) prechádza cez východný európsky kratón (VEK) (Obrázok 14).

My sa budeme zaujímať o časť profilu, ktorá prechádza cez územie Slovenska, t.j. oblasť medzi 200-tým až 500-tým km (Grad et al. 2006). Na tomto intervale bola vzdialenosť medzi meracími seizmickými stanicami 2.8 km. Zinterpretované namerané údaje sú na obrázku 15. Oblasť medzi panónskou panvou a VEK (200 – 500 km) je najkomplikovanejšou oblasťou celého profilu. Ako môžeme vidieť, hrúbka sedimentov s rýchlosťou P-vln $v_p < 5.50 \text{ km.s}^{-1}$ dosahuje miestami v tomto regióne až 20 km. V Pieninskom Bradlovom pásme (PBP) môžeme pozorovať nízko-rýchlostnú dosku sedimentárnych hornín, skláňajúcu sa v južnom smere pod uhlom 35 – 40° do hĺbky 10 km. Na sever od PBP môžeme pozorovať štruktúrny masív, ktorý je oddelený od MM 20 km hlbokou západokarpatskou čelnou predhlbňou. V južnej časti profilu, v intervale 240 – 280 km, bolo namerané plytké vysokorýchlostné teleso ($v_p \sim 6.40 \text{ km.s}^{-1}$).



Obrázok 14 – Umiestnenie CELEBRATION 2000 profilu CEL05 na pozadí zjednodušenej tektonickej mapy strednej Európy. MM – Malopoľski masív, LT – Lublinský žľab, TESZ – Trans-Európska suturova zóna, EEC – východný európsky kratón.



Obrázok 15 - Dvojmerný P-vlnový rýchlostný model pre CELEBRATION 2000 profil CEL05 (Grad *et al.* 2006) získaný pomocou ray tracing modelovania použitím balíka SEIS83 [Červený a Pšenčík, 1983]. Hrubé plné čiary predstavujú rozhrania vrstiev a tenké čiary sú kontúry izorýchlostí v $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$. Očíslované trojuholníky predstavujú body streľby.

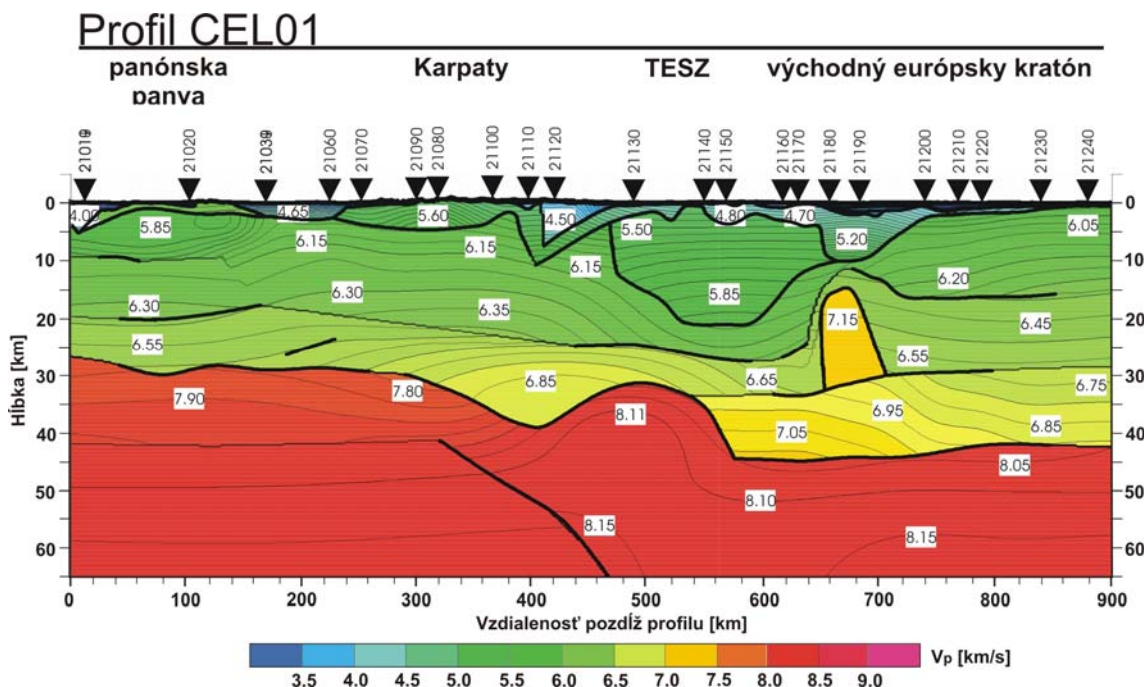
Pod vrchnou sedimentárnou vrstvou a vrstvou s rýchlosťami $\sim 5.80 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$, môžeme pozorovať dve takmer homogénne kôrové vrstvy (s veľmi malým rýchlostným nárastom, $5.90 - 6.20$ a $6.50 - 6.80 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$). Smerom na sever, pod TESZ a VEK má zemská kôra tri vrstvy. Hĺbka MOHO sa pohybuje od $24 - 25 \text{ km}$ v panónskom bazéne až po 50 km na 630-tom km . Rýchlosť vo vrchnej časti plášťa je $7.95 - 8.00 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$.

Profil CEL01

Ako sme už spomínali, profil CEL01 je skoro rovnobežný s profilom CEL05 (Obrázok 14). Prechádza cez rovnaké hlavné tektonické jednotky ako profil CEL05, len približne o 100 km viac na západ. Je dlhý asi 900 km .

V porovnaní s nameranými hodnotami z profilu CEL05, maximálna hrúbka sedimentov v tomto regióne je $\sim 10 \text{ km}$, pričom aj rýchlosti P-vln v sedimentoch sú tu o niečo nižšie $v_p < 4.65 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$. PBP má do hĺbky 10 km takmer kolmý priebeh. Opäť je tu možné pozorovať dve takmer homogénne kôrové vrstvy s malými hodnotami nárastu rýchlostí. Hĺbka MOHO narastá v južno-severnom smere, pričom nadobúda

hodnoty od 26–28 km na juhu SR do 40 km na severe SR. Rýchlosť vo vrchnej časti plášťa nadobúda hodnoty 7.80–7.90 km.s⁻¹ (Obrázok 16).



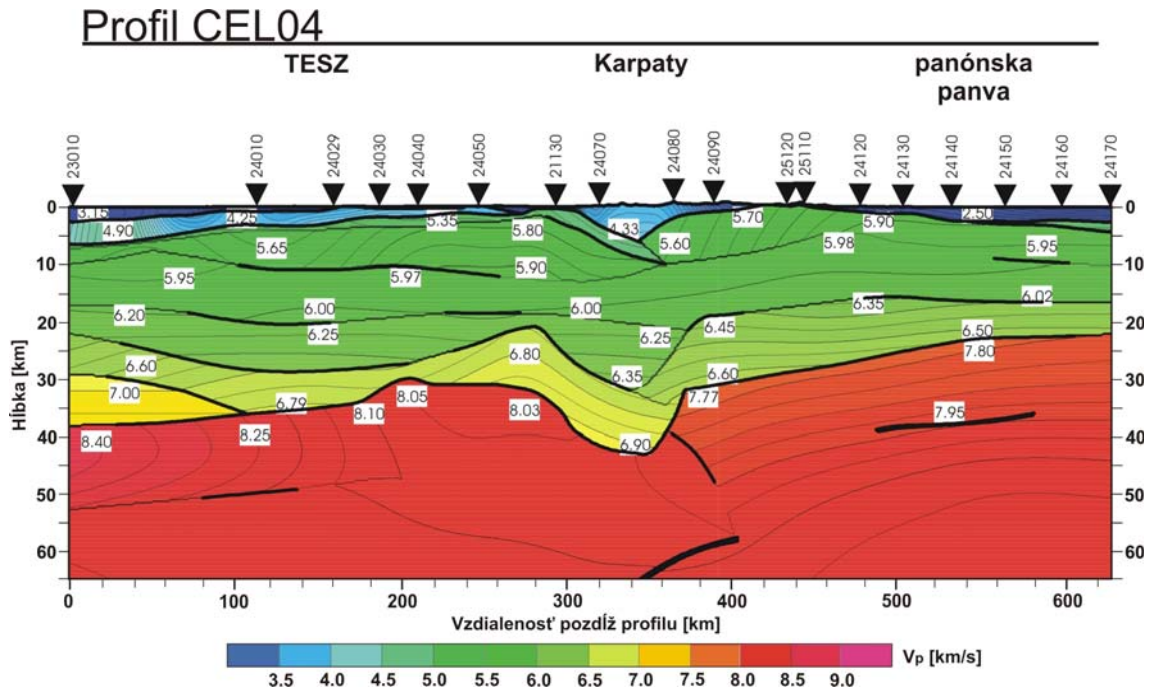
Obrázok 16 - Dvojmerný P-vlnový rýchlostný model pre CELEBRATION 2000 profil CEL04 získaný pomocou ray tracing modelovania použitím balíka SEIS83 [Červený a Pšenčík, 1983]. Hrubé plné čiary predstavujú rozhrania vrstiev a tenké čiary sú kontúry izorýchlostí v km.s⁻¹. Očíslované trojuholníky predstavujú body streľby. (nepublikované, poskytnuté M.Bielikom)

Profil CEL04

Profil CEL04 je 830 km dlhý a prechádza cez tri európske štáty : Poľsko, Slovensko a Maďarsko. Začína v TESZ, prechádza cez MM, ZK a panónsku panvu. Profil prechádza cez východné Slovensko zo SZ na JV (300–460 km) (Obrázok 13).

Profil CEL04 potvrdzuje tektonický vývoj, ktorý sme opísali v predchádzajúcich dvoch profiloch. V SZ časti profilu je možné identifikovať tri skonsolidované vrstvy kôry s rýchlosťami P-vln 5.60–5.90 km.s⁻¹ (vrchná kôra), 6.00–6.25 km.s⁻¹ (vrchná časť spodnej kôry) a 6.60–6.90 km.s⁻¹ (spodná časť spodnej kôry) (Obrázok 17). Vo vnútorných Západných Karpatoch sú opäť identifikované dve kôrové vrstvy. Hĺbka MOHO diskontinuity na profile CEL04 vedúcom cez územie Slovenska narastá smerom na SZ. Na JV v panónskej panve nadobúda hodnoty 25–30 km (s rýchlosťami

vo vrchnej časti litosféry $v_p \approx 7.90 \text{ km.s}^{-1}$), v Karpatoch je hĺbka MOHO $\sim 40 \text{ km}$ ($v_p \approx 8.10 \text{ km.s}^{-1}$).



Obrázok 17 - Dvozmerný P-vlnový rýchlostný model pre CELEBRATION 2000 profil CEL04 získaný pomocou ray tracing modelovania použitím balíka SEIS83 [Červený a Pšenčík, 1983]. Hrubé plné čiary predstavujú rozhrania vrstiev a tenké čiary sú kontúry izorýchlostí v km.s^{-1} . Očíslované trojuholníky predstavujú body strel'by. (nepublikované, poskytnuté M.Bielikom)

5 3-D MODEL ZEMSKÉJ KÔRY

Navrhnutie a zostavenie 3-D modelu zemskej kôry nie je jednoduchá vec. Aby sme mohli systematicky začať tvoriť takýto model, potrebujeme mať aspoň základné znalosti o stavbe a tektonickom vývoji zemskej kôry na záujmovej lokalite, ako aj o niektorých geofyzikálnych parametroch, ako napr. rýchlosti šírenia seizmických vln, hustote, impedancii. Čím viac máme takýchto informácií, tým presnejší a dokonalejší model dokážeme zostaviť. Dôležitým kritériom pre zostavenie modelu okrem presnosti je, pre aké účely je tvorený a pomocou akej metódy, či už numerickej alebo analytickej s ním budeme pracovať. Tieto všetky informácie je potrebné brať do úvahy pri tvorbe modelu.

V našom prípade sme zostavovali 3-D model zemskej kôry pre územie Slovenska, ktorý bol potom aplikovaný pri výpočte časov šírenia seizmických vln pomocou lúčovej teórie. Informácie, ktoré sme mali k dispozícii pre návrh takéhoto modelu sú uvedené v predchádzajúcich troch kapitolách. V druhej kapitole sa zaoberáme lúčovou metódou a obmedzeniami, ktoré na model kladie, v tretej kapitole vyčleňujeme zdrojové oblasti zemetrasení a poukazujeme na význačné lokality v rámci navrhovaného modelu a v štvrtej kapitole podávame základné informácie o tektonickej stavbe nášho územia a o význačných seizmických (rýchlostných a impedančných) rozhraniach v rámci Slovenska.

V tejto kapitole navrhujeme a zostavíme 3-D modelu zemskej kôry pre územie Slovenska (skrátene 3-D model). K tomuto účelu sme vytvorili program MODELtransform a následne sme použili programový balík MODEL vytvorený konzorciom SW3D. Zostavený model sme podrobili testovaniu na výpočet časov šírenia seizmických vln pomocou balíka programov CRT (Complex ray tracing, SW3D) pre nami zvolené zemetrasenia. Vypočítané výsledky sme porovnali s nameranými.

5.1 PROGRAM MODELTransform

Hlavnou úlohou programu je na základe 2-D obrázku terénu dopočítať (navrhnuť) jeho tretí rozmer.

5.1.1 Stručný opis programu

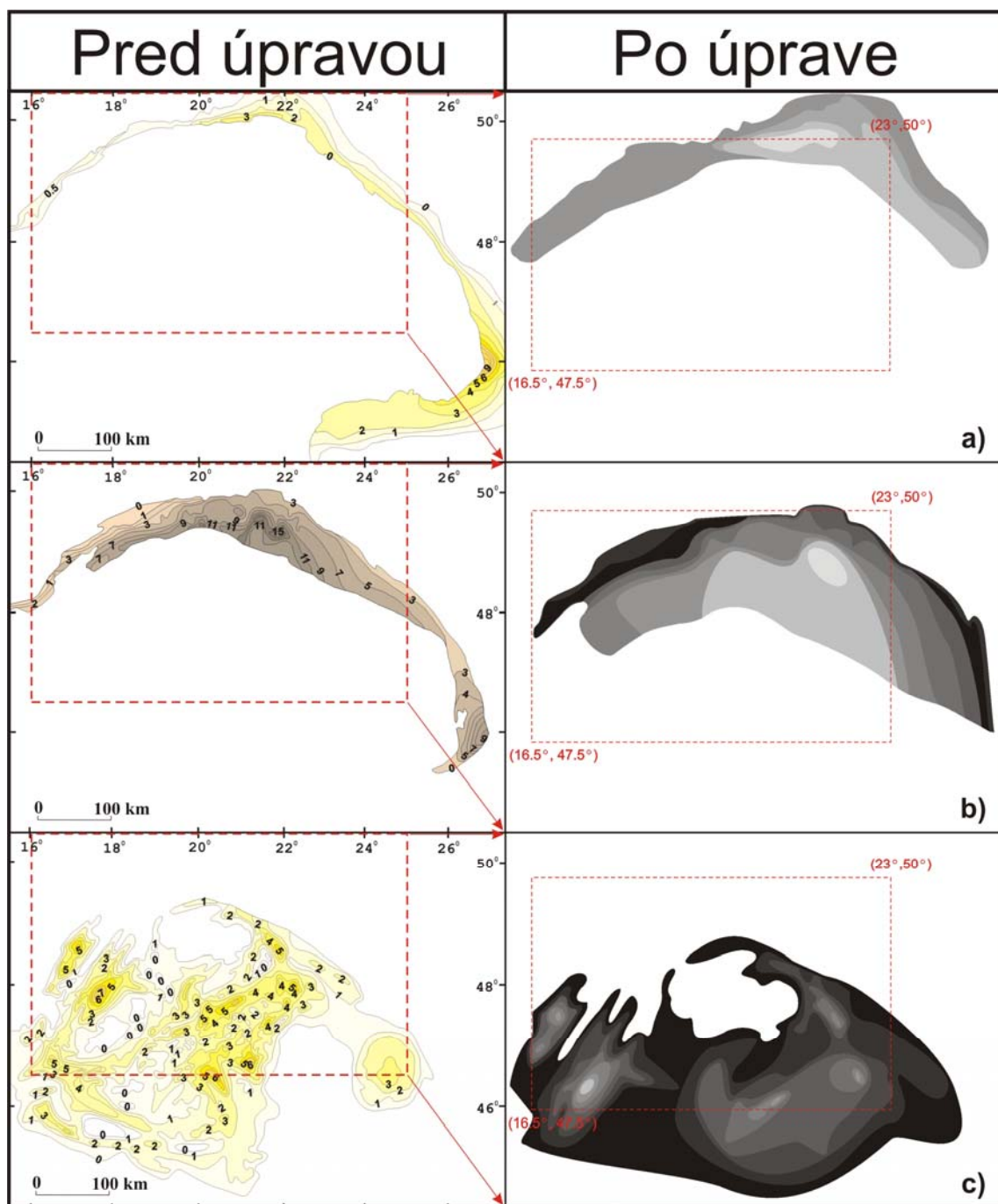
Základný problém pri zostavovaní 3-D modelu je nedostatok vstupných dát. Relevantný model sa dá vytvoriť na základe sady obrázkov jednotlivých tektonických štruktúr s hrubo vyznačenou topografiou (Obrázok 18). Tieto obrázky je potrebné vhodne upraviť odfiltrovaním a vyhladením kontúr (napríklad programom CorelDraw11). Program MODELTransform v pravidelných krokoch „prejde“ cez takto upravený obrázok, nájde v ňom význačné body a tieto body interpoluje kubickým splajnom alebo B-splajnom. Výstupom programu je matica, ktorej prvky sú hrúbky počítanej tektonickej jednotky v určených miestach zemského povrchu.

Činnosť programu a jeho vstupy

Program MODELTransform používa dve rôzne metódy na počítanie hodnôt hĺbky v jednotlivých sieťových bodoch, a to kubické spajny alebo B-splajny.

Vstupné dáta programu sú uložené v troch súboroch. Súbor *model.bmp* (v štandardnom formáte Windows bitmap file format) obsahuje vhodne upravenú vstupnú obrazovú predlohu pre program (Obrázok 18). Druhý súbor *fskala.dat* obsahuje RGB zložky farieb pre jednotlivé hĺbkové hladiny vyznačené na obrazovej predlohe (Obrázok 18). Tretí súbor *levely.dat* obsahuje údaje o hĺbke jednotlivých hladín.

Podrobnejší opis vstupných súborov spolu s príkladmi vstupov sa nachádza na priloženom CD v adresári MODEL\MODELTransform\Priklady.



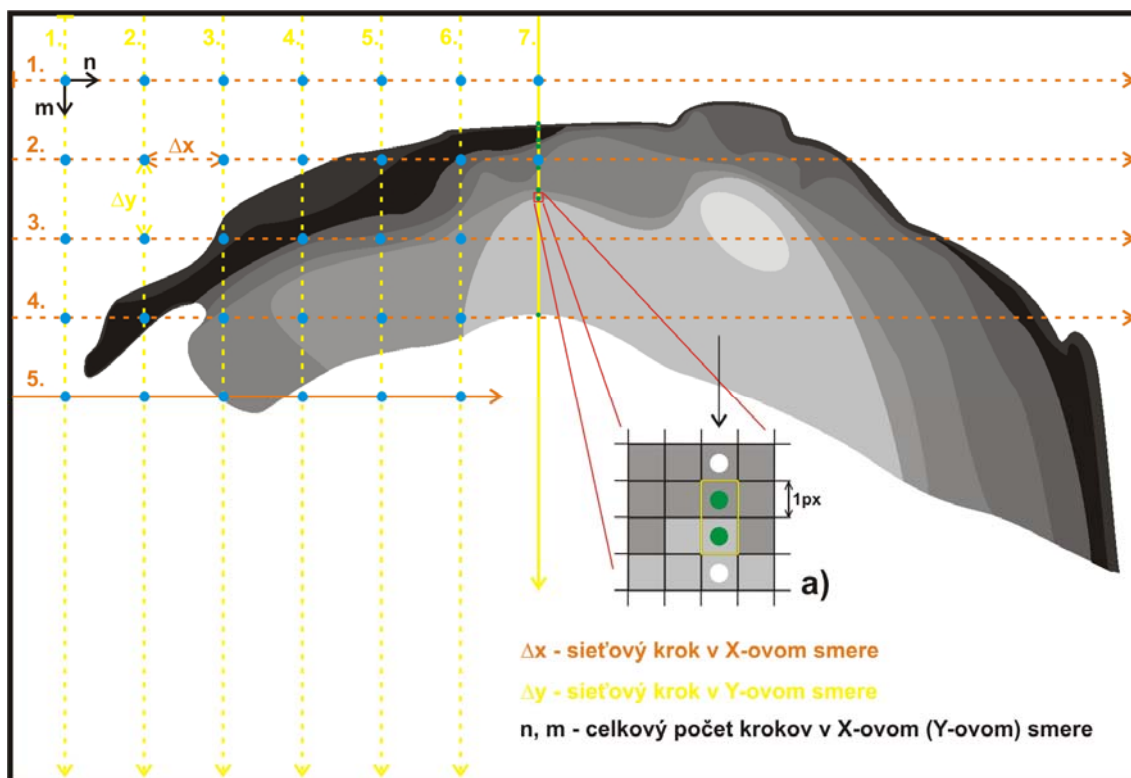
Obrázok 18 - Ukážka úpravy vstupných obrázkov pre program MODELTransform. Na ľavej strane sú počiatočné obrázky, ktoré boli k dispozícii. Ich modifikáciou vznikli vstupné obrázky pre program MODELTransform (pravá strana). Červený rámik v obrázkoch pred úpravou reprezentuje rozmer vstupného obrázku pre program MODELTransform. Červený rámik v obrázkoch po úprave predstavuje rozmery vytvoreného 3-D modelu zemskej kôry. Rôzne odtiene šedej farby v jednotlivých vstupných obrázkoch predstavujú rôzne úrovne hĺbky. a) – karpatská čelná predhľbeň, b) – karpatské flyšové pásmo, c) – neogénne sedimenty Vnútorných Západných Karpát.

Procedúra Cubic Spline

Pôvodným zámerom bolo použiť bikubické splajny na dopočítanie hrúbky tektonickej štruktúry v bodoch na vopred zadefinovanej pravouhlej sieti. Táto metóda však potrebuje vstupné hodnoty hĺbky na pravidelnej pravouhlej sieti. Tieto údaje ale nepoznáme, keďže máme zadefinované len určité intervaly hĺbok, v ktorých sa s najväčšou pravdepodobnosťou nachádzajú dané body. K dispozícii je len nepravidelná sieť bodov. Preto sme pristúpili k určitému kompromisu a na dopočítanie hodnôt v jednotlivých bodoch požadovanej pravouhlej siete sme použili aritmetický priemer hodnôt vypočítaných pomocou kubických splajnov v X -ovom a Y -ovom smere.

Program prechádza po pixloch cez obrázok v smere X (v Y) (Obrázok 19) a hľadá rozhrania, kde dochádza k zmene farby (rozhranie medzi dvomi intervalmi hĺbok). Vyhodnotí dané rozhranie a zapamätá si hĺbky v daných bodoch (známa hĺbka). Takto prejde po jednom profile a zapamätá si polohu a hĺbky v jednotlivých bodoch, v ktorých došlo k zmene farby. Cez tieto body potom preloží krivku pomocou kubických splajnov a na základe hodnôt funkcie splajn dopočíta hodnoty hĺbky v jednotlivých požadovaných bodoch. Tieto dopočítané hodnoty sa uložia do matice *mriezkaX* (*mriezkaY*). *MriezkaX* a *mriezkaY* majú rovnaký rozmer $(n \times m)$, kde n je počet prvkov v X -ovom smere a m je počet prvkov v Y -ovom smere. Potom sa v modeli výpočet presunie o krok Δx (resp. Δy) a pokračuje na ďalšom profile. Tým spôsobom prejdeme cez celý model. Po naplnení matíc *mriezkaX* a *mriezkaY* sa vykoná jednoduchý aritmetický priemer a to tak, že prvky na pozícii (x_k, y_l) , $k = 0, 1, 2, \dots, n$; $l = 0, 1, 2, \dots, m$ v *mriezkeX* a *mriezkeY* sa sčítajú a podedia dvoma. Výsledkom je hĺbka tektonickej štruktúry v bodoch definovaných na požadovanej pravouhlej sieti (Obrázok 19).

Keďže výsledná krivka je hladká a musí prechádzať cez všetky vstupné body, môžu sa niekedy vyskytnúť problémy s jej priebehom (napr. prudký nárast funkčnej hodnoty, nežiaduce striedanie lokálneho maxima a minima, ...). Je to nevýhoda tejto metódy. Čiastočne môžeme tieto efekty potlačiť vhodnou úpravou vstupného obrázku.



Obrázok 19 - Grafické znázornenie algoritmu programu MODELTransform. Program prechádza cez obrázok najprv v smere X (oranžové čiary), potom v smere Y (žlté čiary), pričom hľadá rozhrania (porovnáva dva za sebou idúce body - pozri detail *a*). Nájdené rozhrania (zelené body) interpoluje krivkou (cubic spline, B-spline). Nakoniec dopočíta výsledné hodnoty hĺbky danej tektonickej jednotky v jednotlivých sieťových bodoch (modré body).

Procedúra B-Spline

Táto procedúra odstraňuje nedostatky predchádzajúcej metódy, aj keď tiež má svoje nevýhody a limity. Tou hlavnou je problematická voľba tzv. atraktorov (de Boorové body) - ich počtu a priestorovej konfigurácia - ktoré sa používajú pri prekladaní hľadanej plochy. V tomto prípade ide o 3-D metódu, nie 2-D, ako v prípade kubických splajnov. To znamená, že už nepočítame samostatne v smere *X* a v smere *Y* a vypočítané hodnoty priemerujeme, ale výslednú hodnotu v danom bode dopočítavame priamo.

V samotnej procedúre si na začiatku nastavíme hustotu bodov vstupnej mriežky, to znamená, zadefinujeme si veľkosť mriežkového kroku v smere *X* a *Y* (Obrázok 19). Následne procedúra prechádza vstupným obrázkom a v daných bodoch vstupnej mriežky určí hĺbku tektonickej jednotky. Tieto údaje sú vstupnými parametrami pre polohu atraktorov - váhovacích bodov, cez ktoré (na rozdiel od kubických splajnov)

neprechádza krivka, ale modelujú jej tvar a priebeh. Ďalším dôležitým parametrom je tzv. deliaci faktor (*DivFactor*) alebo stupeň krivky, ktorý nám určuje výslednú hustotu mriežkových bodov, v ktorých dopočítame hľadané hodnoty hĺbky tektonickej štruktúry. Z dôvodu vysokých nárokov na pamäť sa neodporúča zadávať *DivFactor* väčší ako 5. Pre názornosť, ak je rozmer vstupnej mriežky 6×6 a $DivFactor = 0$, potom hustota bodov výstupnej siete je 6×6 . Ak $DivFactor = 1$ potom hustota bodov výstupnej siete je 11×11 , ak $DivFactor = 2$, hustota bodov výstupnej siete je 21×21 , atď. Teda, vždy pri zvýšení *DivFactoru* o 1, sa medzi dva susedné body vloží 1 nový. Výsledné hodnoty hrúbky počítanej tektonickej jednotky teda nedostaneme v ľubovoľných bodoch na zemskom povrchu, ale len v uzlových bodoch výstupnej siete.

V prípade tohto algoritmu, pre dosiahnutie užitočných výsledkov je nutné vhodné zvoliť hustotu vstupnej siete a *DivFactor*. Pri ich nesprávnej voľbe môže dôjsť k značnému zdeformovaniu – skresleniu výstupného modelu.

Pripomeňme, že existuje množstvo metód, pomocou ktorých by sme mohli dopočítať požadované hodnoty. Naším cieľom je priblížiť sa čo najviac skutočnému stavu napriek neistotám údajov, ktoré sú najväčším zdrojom chýb. Chyby pri zostavovaní modelu je možné odstrániť pomocou dokonalejších metód. Preto je nutné mať čo najpresnejšie merania, aby výsledná chyba modelu bola čo najmenšia.

5.1.2 Testovanie programu

Opísaným programom MODELTransform sme získali údaje pre zostavenie 3-D modelu zemskej kôry. Program sme aplikovali na nami pripravené náčrty pre jednotky Západných Karpát. Tieto náčrty (Obrázok 18) v sebe zahŕňajú súčasnú geofyzikálnu predstavu o vývoji daných tektonických jednotiek. Modelovanými štruktúrami boli vonkajšie karpatské flyšové pásmo, neogénne sedimenty Vnútorých Západných Karpát, neogénne sedimenty karpatskej čelnej predhlbne a pri malej úprave programu aj Pieninské Bradlové pásmo. Pre namodelovanie týchto štruktúr sme použili procedúru cubic spline. Pre zmenšenie chyby pri modelovaní sme hranice modelovanej oblasti zvolili vo väčších vzdialenostiach (rozmer obrázku), ako boli skutočné rozmery

žiadaného modelu (rozmer modelu). Tým sme nežiaduce okrajové efekty presunuli mimo požadovaného modelu. Výsledné dáta pre náš model sme dostali následným orezaním vypočítaných dát (Obrázok 18). Rozmery vstupného obrázku boli $16^{\circ} - 25^{\circ}$ východnej zemepisnej dĺžky a $46^{\circ}30' - 50^{\circ}30'$ severnej zemepisnej šírky. Rozmery modelu sme si zvolili $16^{\circ}30' - 23^{\circ}$ v. z. d. a $47^{\circ}30' - 50^{\circ}$ s. z. š. Cez obrázok sme sa pohybovali s krokom $5'$ v oboch smeroch (X, Y). Pri výpočte sme volali funkcie *Analyze* a *I**. Funkcia *Analyze* označí body, ktoré nespádajú do správneho intervalu hĺbok a funkcia *I** tieto body v dátovom súbore nahradí za *I**. Výsledné dáta program zapisuje do výstupného súboru *matica.dat* a grafické výstupy do súborov *modelX.jpg*, *modelY.jpg*, *modelA.jpg*. Výsledky programu MODELTransform pre jednotlivé tektonické jednotky sú uvedené na priloženom CD v adresári MODEL\MODELTransform\“názov tektonickej jednotky“.

5.2 NÁVRH 3-D MODELU ZEMSKEJ KÔRY

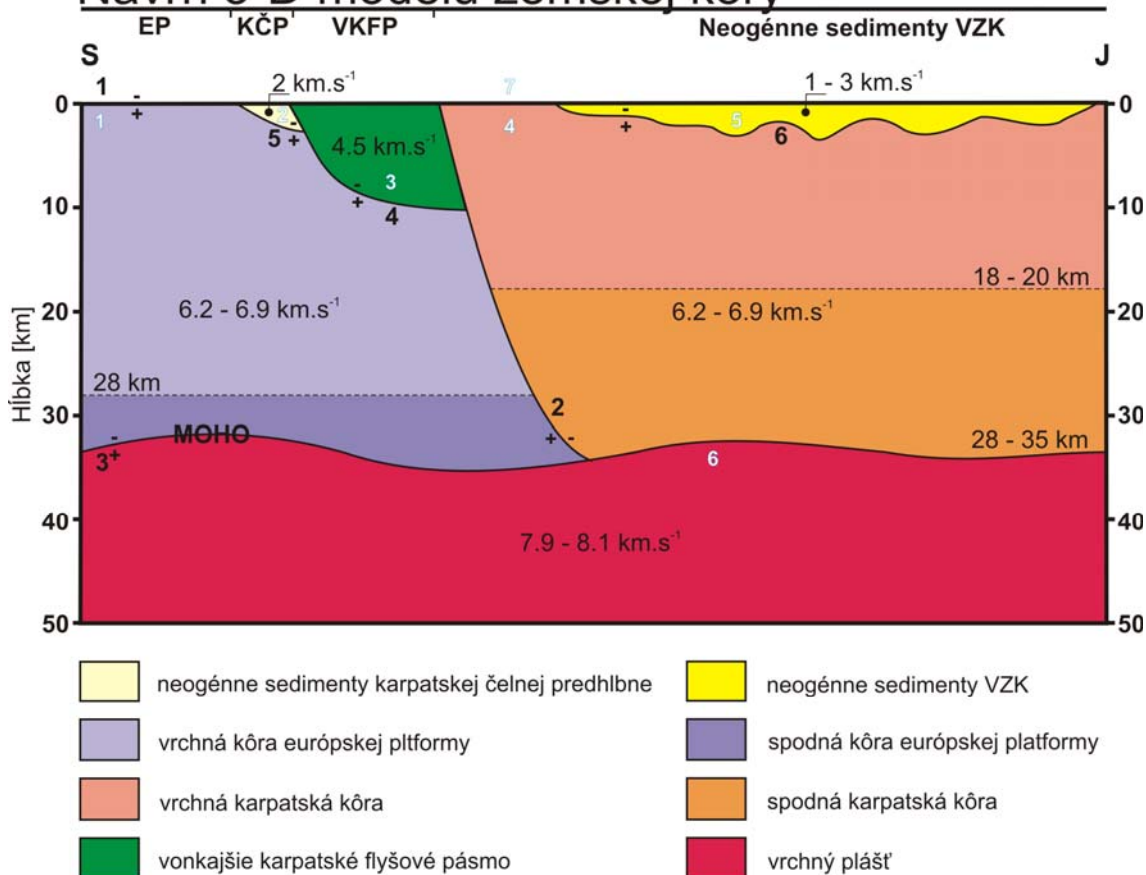
Na začiatku tvorby modelu vždy existuje určitá predstava o tom, ako by mal výsledný model vyzerat'. V našom prípade sme pri navrhovaní modelu vzali do úvahy všetky dostupné údaje a informácie o geologicko-geofyzikálnej stavbe zemskej kôry na území Slovenska a taktiež základné obmedzenia výpočtovej metódy, ktorá bude na daný model aplikovaná. Na základe týchto údajov sme zostrojili predbežný náčrt, nami navrhovaného modelu (Obrázok 20).

Podmienky zo strany výpočtovej metódy na model boli nasledovné:

- a) Prostredie musí byť hladké.
- b) Charakteristické rozmery nehomogenít musia byť oveľa väčšie ako prevládajúce vlnové dĺžky uvažovaných vln.
- c) Nesmie obsahovať singulárne oblasti.

To znamená, že pri navrhovaní modelu sme sa obmedzili na hladké, nie príliš detailné rozhrania medzi jednotlivými tektonickými štruktúrami (blokmi), sledujúc ich priebeh. Zachádzanie do prílišných detailov by spôsobilo skreslenie alebo ukončenie šírenia väčšiny lúčov dopadajúcich na dané rozhranie.

Návrh 3-D modelu zemskej kôry



Obrázok 20 - Návrh 3-D modelu zemskej kôry pre územie Slovenska. EP – európska platforma, KČP – karpatská čelná predhlbeň, VKFP – vonkajšie karpatské flyšové pásmo, VZK – Vnútorne Západné Karpaty; čierne tučné číslice 1,2, ..., 6 – označenie hladkých plôch v modeli, modro-biele tučné číslice 1, 2, ..., 7 – označenie jednoduchých blokov v modeli; +,- – označenie kladnej a zápornej časti modelu pre danú plochu. Rýchlosti v modeli sú uvádzané pre P-vlny.

Čo sa týka fyzikálnych parametrov jednotlivých blokov, tie majú buď konštantný alebo gradientný priebeh.

Z hľadiska geologicko-geofyzikálnych obmedzení na model sme brali do úvahy len výrazné seizmické rozhrania. Tieto rozhrania nám vytyčujú niekoľko hlavných tektonických štruktúr, čím dostávame blokový model. Medzi hlavné tektonické štruktúry vystupujúce v našom modeli patria:

- Neogénne sedimenty karpatskej čelnej predhlbne, ktoré tvoria akýsi pozostatok po násune ALCAPA na európsku platformu. Ide o plytkú kôrovú štruktúru s hrúbkou maximálne 3 km a s nízkymi rýchlosťami šírenia P-vln ($\sim 2 - 3 \text{ km.s}^{-1}$).

- b) Vonkajší karpatský flyš. Miestami dosahuje hrúbku až 17 km . Vyznačuje sa zvrstvenou štruktúrou, čo sa prejavuje zmenou rýchlosti šírenia P-vĺn s hĺbkou ($\sim 4.5 - 5.2 \text{ km.s}^{-1}$).
- c) Neogénne sedimenty Vnútroňých Západných Karpát (VZK) sú plytké kôrové usadeniny, často neskonsolidované s nízkou rýchlosťou šírenia P-vĺn ($\sim 1 - 3 \text{ km.s}^{-1}$). Ich priemerná hĺbka sa pohybuje medzi 1–7 km .
- d) Európska platforma (EP) je tvorená kôrovou oblasťou na sever od Pieninského Bradlového pásma (PBP) a zospodu je ohraničená MOHO. Delíme ju na vrchnú a spodnú kôru EP. Vrchná kôra zasahuje do hĺbky 28 km, spodná kôra ide od 28 km po MOHO . Z dôvodu slabého seizmického kontrastu medzi týmito dvoma vrstvami kôry budeme miesto nich v našom modeli uvažovať iba jednu kôrovú vrstvu s lineárnym nárastom rýchlostí P-vĺn ($6.2 - 6.9 \text{ km.s}^{-1}$).
- e) Vnútroňá karpatská kôra je ohraničená na severe PBP. Nachádza sa pod vrchnou vrstvou sedimentov Vnútroňých Západných Karpát. Zospodu je ohraničená MOHO. Z tektonického hľadiska je opäť delená na dve časti, na vrchnú (do 18–20 km) a spodnú karpatskú kôru (od 18–20 km po MOHO). Z dôvodu veľmi blízkych rýchlostí šírenia P-vĺn (slabé seizmické rozhranie), budeme uvažovať karpatskú kôru s jednou vrstvou a s lineárnym nárastom rýchlostí šírenia P-vĺn s hĺbkou ($6.2 - 6.9 \text{ km.s}^{-1}$).

Vrchná časť litosféry. Rozhranie medzi spodnou časťou kôry a vrchnou litosférou (MOHO) je v našom prípade ostré, neuvažovali sme prechodovú zónu (viď kapitola 3). V prípade rýchlosti šírenia P-vĺn vo vrchnej časti litosféry sme uvažovali v našom modeli lineárny nárast rýchlostí s hĺbkou ($7.9 - 8.1 \text{ km.s}^{-1}$).

5.3 ZOSTAVENIE 3-D MODELU ZEMSKÉJ KÔRY

Na základe predstáv o našom modeli (Obrázok 20), opísaných v časti 5.2, sme pristúpili k jeho zhotoveniu. Pre zostavenie 3-D modelu zemskej kôry sme použili programový balík MODEL, ktorý je súčasťou SW3D softvéru. Takto zostavený 3-D model sme použili na výpočet časov šírenia seizmických vĺn pomocou programu CRT

(„Complex Ray Tracing“), ktorý je taktiež súčasťou SW3D softvéru. Vstupné dáta pre programový balík MODEL sme získali pomocou programu MODELTransform, ktorý bol vytvorený pre tieto účely.

V tejto časti 5. kapitoly si popíšeme, ako zostaviť výpočtový model, aké dáta potrebujeme na jeho zostavenie a stručne popíšeme programy, ktoré sme potrebovali k jeho zostaveniu.

5.3.1 Teoretický popis modelu prostredia

Model M je definovaný vo vnútri objemu,

$$M : x_{\min}^i \leq x^i \leq x_{\max}^i \quad (i = 1, 2, 3), \quad (4.1)$$

pomocou funkcií určujúcich rozloženie parametrov prostredia. Súradnicové plochy $x^i = x_{\min}^i$ a $x^i = x_{\max}^i$ tvoria hranice modelu. Medzi parametre prostredia patria napríklad rýchlosti šírenia P- a S-vln, v_P, v_S , hustota ρ , faktory tlmenia Q_P^{-1} a Q_S^{-1} alebo mocniny týchto veličín. Parametre prostredia musia byť hladkými funkciami vo vnútri modelu, kde pod pojmom hladká funkcia rozumieme, že parametre a ich prvé parciálne derivácie musia byť spojité a druhé parciálne derivácie musia byť po častiach spojité. Ich hladkosť môže byť porušená na konečnom počte rozhraní.

Každé rozhranie v modeli môže byť tvorené konečným počtom hladkých plôch $\Sigma : f(x^i) = 0$ s nasledujúcimi vlastnosťami: funkcie $f(x^i)$ sú definované a sú hladké v celom objeme M . Plochy sa môžu navzájom pretínať. Taktiež môžu prechádzať cez celý model a pretínať hranice modelu alebo môžu vytvárať uzavreté plochy vo vnútri modelu. Každá plocha rozdeľuje model na dve časti, kladnú časť, kde $f(x^i) > 0$, a zápornú časť, kde $f(x^i) < 0$.

Model je možné zostaviť z dvoch typov blokov ohraničených hladkými plochami Σ . Sú to jednoduché bloky (angl. simple blocks, SB), ktoré sú akýmisi „stavebnými tehliami“ nášho modelu a nemajú fyzikálny význam, a komplexné bloky (angl. complex blocks, KB), ktoré pozostávajú z jednoduchých blokov a predstavujú fyzikálne jednotky modelu. Tiež rozlišujeme medzi materiálovými blokmi (hustota je nenulová a kladná) a voľnými blokmi (angl. free-space blocks) (hustota je identicky rovná nule).

Jednoduchý blok je definovaný pomocou dvoch konečných skupín F^+ a F^- plôch $f(x^i) = 0$. Bod $x^i \in SB$, vtedy a len vtedy, ak

$$\begin{aligned} f(x^i) &> 0 \text{ pre všetky } f \in F^+ \\ f(x^i) &< 0 \text{ pre všetky } f \in F^-. \end{aligned} \tag{4.2}$$

SB je tvorený prienikom kladných častí modelu zodpovedajúcich plochám z F^+ a záporných častí modelu zodpovedajúcich F^- . Hranice niektorých SB môžu byť tvorené aj hranicami modelu.

Delenie modelu na SB nie je jednoznačné. Nemusia tvoriť disjunktný systém, teda určitý bod modelu sa môže nachádzať v niekoľkých SB. Každý SB má svoje číslo, odporúča sa číslovať bloky vzostupne od 1, pričom číslujeme len materiálové bloky, voľné bloky nečíslujeme. Z viacerých SB môžeme zložiť „fyzikálny“ blok – komplexný blok.

Komplexný blok je tvorený zjednotením niekoľkých SB (môže to byť aj jeden SB). Definujeme ho ako tabuľku s číslami SB. KB, na rozdiel od SB, musia tvoriť disjunktný systém. KB opäť označujeme prirodzenými číslami 1, 2, ... Viac je možné nájsť v práci Červený *et al.* (1988).

5.3.2 Dáta a programy určujúce model

Na určenie 3-D seizmického modelu zemskej kôry sme použili program *model.for*, ktorý je súčasťou programového balíka MODEL. Aby sme mohli úplne definovať model, potrebujeme definovať nasledujúce dáta a parametre prostredia (sk-mod.dat):

- a) Voľba súradnicového systému: súradný systém, v ktorom budeme pracovať (parameter KOORS). V našom prípade sme namiesto v kartézskych súradniciach zadávali polohu v geografických sférických súradniciach udávaných v stupňoch (zemepisná dĺžka, zemepisná šírka), hĺbka v kilometroch. Má to niekoľko výhod. Po prvé, je jednoduchšie a prirodzenejšie pracovať vo sférických súradniciach. Po druhé, vyhli sme sa tak chybe vo výpočte časov šírenia, ktorá by vznikla v dôsledku zakrivenia Zeme (~ 8 km v prípade nášho modelu). Po tretie, ak by sme chceli pracovať v kartézskych súradniciach, museli by sme do nich pretransformo-

vať všetky dáta (to znamená všetky tektonické jednotky nachádzajúce sa v modeli a aj rýchlosti pre jednotlivé tektonické jednotky). Toto nie je triviálne a vyžiadalo by si to viac času.

- b) Parametre NEXPV a NEXPQ. Tieto nám určujú exponenty mocnín pre rýchlosť a útlmový faktor (odporúčené je položiť ich rovné 1).
- c) Parameter IVERT. Určuje orientáciu vertikálnej osi. My sme si za vertikálnu os zvolili z -ovú súradnicu orientovanú v smere od stredu Zeme.
- d) Nulová hladina pre z . Položili sme $z = 0$ vo vzdialenosti 6371 km od stredu Zeme.
- e) Ďalšími parametrami sú rozmery modelu $x_{\min}^1, x_{\max}^1, x_{\min}^2, x_{\max}^2, x_{\min}^3, x_{\max}^3$. Keďže pracujeme v geografických sférických súradniciach, uvádzali sme rozmer modelu v stupňoch zemepisnej dĺžky a šírky a v z smere v km (16.5° v. z. d., 23° v. z. d., 47.5° s. z. š., 50° s. z. š., -50 km, 3 km).
- f) Parameter NSRFC, ktorý nám udáva počet hladkých plôch Σ v modeli. Pri pohľade na obrázok 20 môžeme vidieť, že v našom prípade ich je 6. 1 je voľný povrch, 2 - Pieninské Bradlové pásmo, 3 - Mohorovičičova diskontinuita, 4 - rozhranie medzi vonkajším karpatským flyšovým pásmom a európskou platformou (EP), 5 - rozhranie medzi sedimentmi karpatskej čelnej predhlbne a EP a 6 - rozhranie medzi neogénnymi sedimentmi VZK a vrchnou karpatskou kôrou.
- g) Ďalej potrebujeme definovať SB. V našom prípade sme zaviedli 7 SB (Obrázok 20).
- h) Parameter NCB nám definuje počet materiálových KB v modeli. Tie sú označované postupne pomocou kladných celých čísel od 1. Voľné bloky nie sú označené. My sme zaviedli 6 KB.
- i) Definovanie hladkých plôch vystupujúcich v modeli (rozhrania). Na určenie, interpolovanie alebo aproximovanie hladkých plôch v pravouhlejší sieti v modeli slúži podprogram *srfc.for*, ktorý je súčasťou programového balíka MODEL. Pri definovaní hladkých plôch postupujeme nasledovne:

- a. Zvolíme názov plochy, o ktorú ide (napríklad „SURFACE 1“).
 - b. Zdefinujeme tvar funkcie, ktorá bude popisovať plochu $f(x^i) = 0$. V našom prípade volíme $f(x^1, x^2, x^3) = w(x^1, x^2) - x^3$.
 - c. Určíme počet sieťových bodov, cez ktoré budeme interpolovať. V našom prípade sme si zvolili sieť bodov s rozmerom 14×6 pre všetky plochy, okrem voľného povrchu (plocha 1). Voľný povrch tvorí referenčnú plochu a požadujeme, aby na nej seizmické vlny (lúče) končili. To znamená, nebudú nás zaujímať vlny viacnásobne odrazené od voľného povrchu. Preto požadujeme, aby voľný povrch bol čo najdetailnejšie popísaný. Preto sme pre voľný povrch zvolili hustejšiu sieť 79×31 , čo predstavuje veľkosť sieťového kroku v smere zemepisnej dĺžky a zemepisnej šírky 5'.
 - d. Keď už je známy počet sieťových bodov, cez ktoré budeme interpolovať, môžeme ich priamo definovať. Zadávanie, o ktoré body ide, robíme pomocou vektorového zápisu, kde do jedného odseku zadáme súradnice sieťových bodov v smere zemepisnej dĺžky a do druhého odseku v smere zemepisnej šírky.
 - e. V nami zadaných sieťových bodoch zadáme hodnoty funkcie $w(x^1(i), x^2(j))$, $i = 1, \dots, NX(x^1)$, $j = 1, \dots, NX(x^2)$. Na získanie týchto hodnôt sme použili program MODELTransform. V našom prípade hodnoty funkcie, ktoré sú uložené v súbore *sk-mod.dat*, nie sú priamo výstupom z programu MODELTransform, ale boli získané pomocou inverzie, opísanej v history súbore *sk-inv.h*.
- j) Po určení hladkých plôch vystupujúcich v modeli, potrebujeme definovať aj parametre prostredia. Na to slúži podprogram *Parm.for*. Rozloženie parametrov prostredia v každom KB môže byť definované buď jednoduchým analytickým výrazom, buď interpoláciou, alebo aproximáciou hodnôt zadaných v diskretných bodoch. Zadávaný parameter prostredia môžu byť jedna z veličín uvedených v „Teoretickom popise modelu“.

V našom prípade sme za parameter prostredia zvolili rýchlosť P-vln. Definícia parametrov KB je podobná definícii hladkých plôch.

- a. Zadáme názov KB, v ktorom budeme definovať parametre prostredia (napríklad „COMPLEX BLOCK' 1“).
- b. Určíme materiálový parameter, ktorý bude popisovať funkcie a akej mocniny má byť tento parameter. My sme si za materiálový parameter zvolili rýchlosť P-vln v_p , a mocninu sme si položili rovnú 1.
- c. Definujeme funkciu, ktorá bude popisovať materiálový parameter. V našom prípade sme v_p volili $v_p = konst.$ alebo $v_p = w(x^3)$ (lineárny priebeh).
- d. Zvolíme počet sieťových bodov pre interpoláciu. V prípade $v_p = konst.$ nezadáme nič, pre $v_p = w(x^3)$ sme zadali počet bodov rovný 2.
- e. Stanovíme sieťové súradnice zodpovedajúce daným bodom. V prípade $v_p = konst.$ nezadáme nič, pre $v_p = w(x^3)$ sme zadali polohy bodov v z-ovom smere (pozri *sk-mod.dat*).
- f. Nakoniec určíme hodnoty funkcie w v sieťových bodoch. Pre $v_p = konst.$ sme volili konštantnú hodnotu pre celý KB.

Tieto údaje sú vstupnými parametrami pre jednoznačný opis 3-D modelu. Výsledný súbor *sk-mod.dat*, ktorý obsahuje reprezentáciu 3-D modelu zemskej kôry pre územie Slovenska, sme dostali spojením súborov *sk-mod.out*, ktorý bol výsledkom inverzie a *sk-top.dat*, ktorý obsahuje údaje o ploche 1. Získané súbory sú na priloženom CD v adresári MODEL\MODELSW3D\ModelSK. Viac o tvorbe 3-D modelu a o vstupných dátach pre model je možné nájsť v Červený *et al.* (1988), v popise programov *model.for*, *srfc.for*, *parm.for* a na internetovej stránke „<http://sw3d.mff.cuni.cz/software/>“.

5.3.3 Seizmický 3-D model zemskej kôry pre územie Slovenska

Na základe uvedených údajov o modeli sme si zostavili výsledný 3-D model zemskej kôry pre územie Slovenska. Na obrázku 21 je zobrazený výsledný model pre územie Slovenska v rezoch, kde jednotlivé tektonické jednotky sú farebne odlišené. Takto zostavený model spĺňa podmienky, ktoré sme naň kládli (podkapitola 5.2).

Obrázok 22 zobrazuje rýchlostné rezy vedené cez model v J-S smere. Na obrázku môžeme pozorovať priebeh rýchlostí v jednotlivých tektonických jednotkách. V prípade sedimentov a vonkajšieho karpatského flyšového pásma môžeme vidieť konštantný priebeh rýchlostí (v súlade so zadanými parametrami prostredia). Rýchlosť ostatných tektonických jednotiek s hĺbkou narastá lineárne.

5.4 TESTOVANIE 3-D MODELU ZEMSKEJ KÔRY

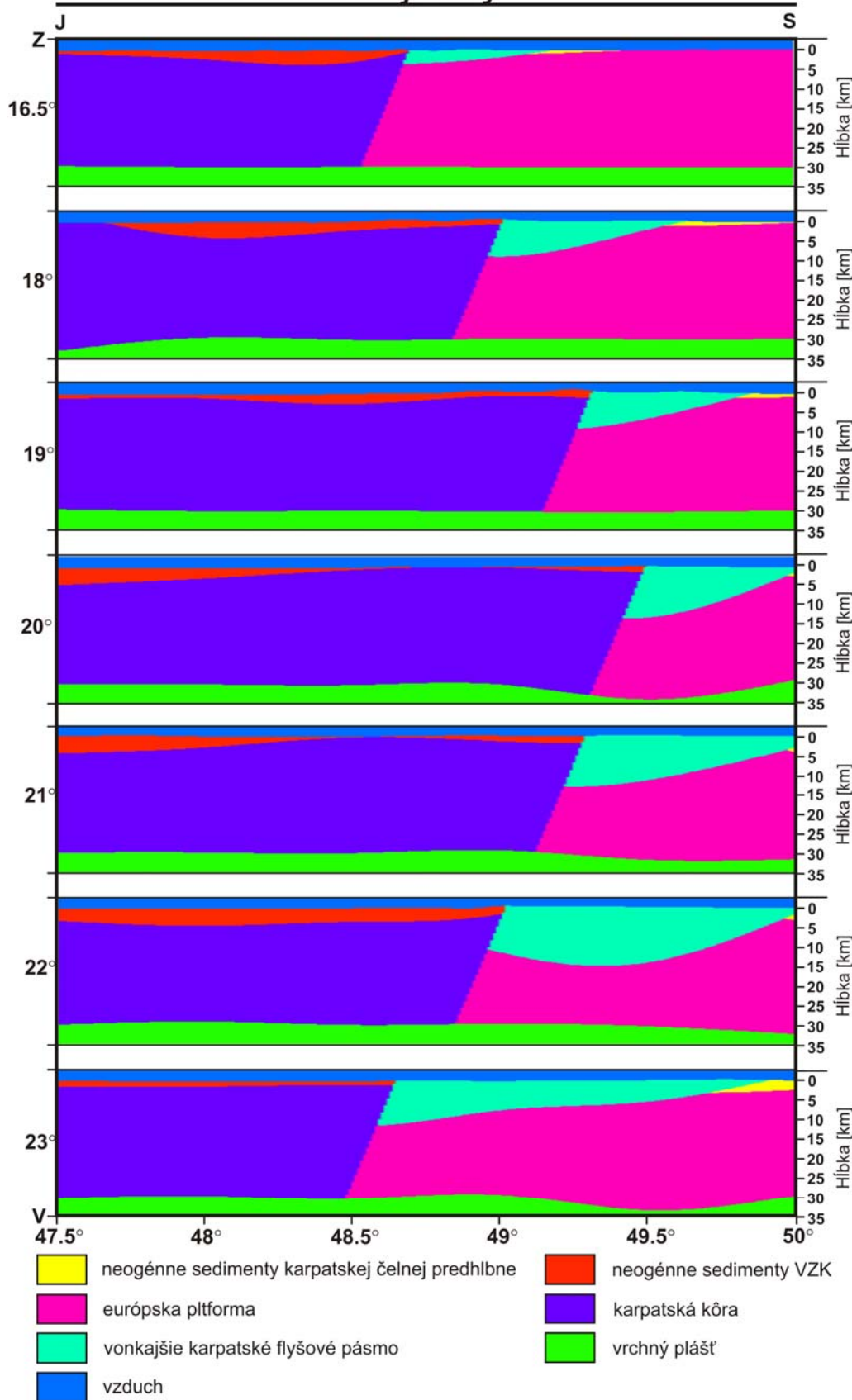
V tejto podkapitole sa budeme venovať overeniu nami zostaveného modelu. Jedným z kritérií ako overiť správnosť modelu, je pre vopred zvolené seizmické javy nechať v našom modeli vypočítať časy šírenia seizmických vln a tie potom porovnať s časmi šírenia vypočítanými 1-D modelom zemskej kôry používaným v súčasnosti v GFÚ SAV (IASPEI91).

V tejto podkapitole si stručne opíšeme balík CRT, ktorý slúži na výpočet kompletného ray tracingu, opíšeme vstupné dáta potrebné pre výpočet, vykonáme výpočtový test pre náš model a na záver zhodnotíme vypočítané výsledky.

5.4.1 Opis balíka CRT (SW3D9)

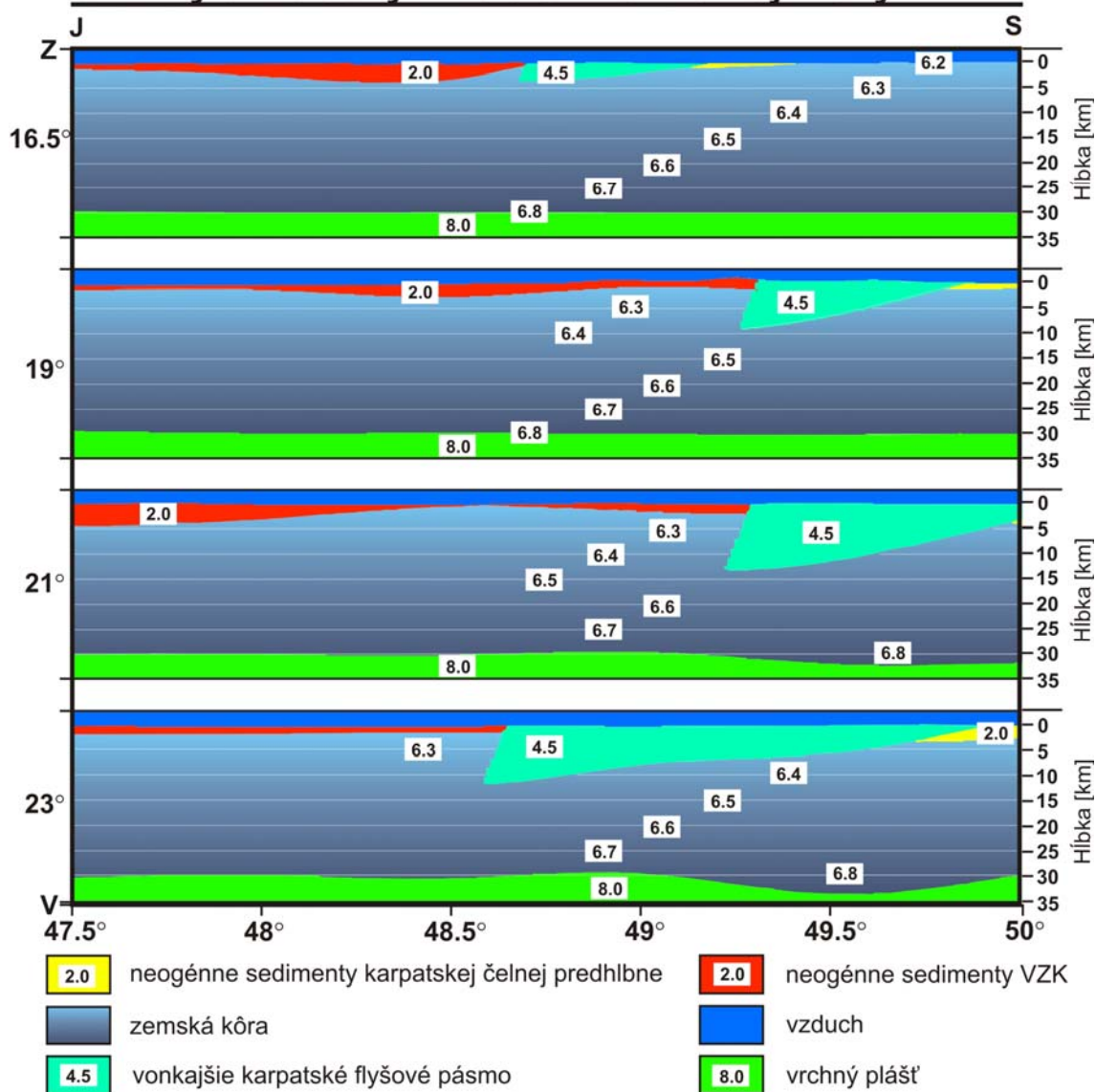
Tento balík obsahuje niekoľko kľúčových podprogramov na výpočet kompletného ray tracingu. Hlavným programom v rámci balíka CRT je program *crt.for*. Tento program číta vstupné dáta a následne kontroluje kompletný ray tracing určených elementárnych vln. V našom prípade nás budú zaujímať len časy šírenia elementárnych vln. Hlavná filozofia výpočtového algoritmu je stručne popísaná v podkapitole 2.2.7–2.2.9, detailnejší popis sa nachádza v Červený *et al.* (1988, 2005), Červený (2001), Bulant (1996, 1999), Bulant a Klimeš (1999).

3-D model zemskej kôry



Obrázok 21 - Výsledný 3-D model zemskej kôry pre územie Slovenska znázornený v rezoch, vedených v J-S smere. Namodelované pomocou programového balíka MODEL softvéru SW3D9.

3-D rýchlostný model zemskej kôry



Obrázok 22 - 3-D P-vlnový rýchlostný model zemskej kôry pre územie Slovenska znázornený v rezoch vedených v J-S smere, namodelovaný pomocou programového balíka MODEL softvéru SW3D9. Európska platforma a karpatská kôra majú rovnaký lineárny priebeh rýchlostí, preto sme ich znázornili rovnakou farbou. Biele tenké čiary predstavujú kontúry izorýchlostí. Rýchlosti sú uvádzané v $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$.

Detailný opis programového balíka CRT nájdete aj na internetovej adrese „<http://sw3d.mff.cuni.cz/software/index.htm>“ a v komentároch jednotlivých podprogramov.

5.4.2 Popis vstupných dát

Aby sme mohli vykonať výpočet časov šírenia pomocou programového balíka CRT, potrebujeme špecifikovať nasledujúce vstupné údaje:

- a) Definícia modelu *sk-mod.dat* (viď podkapitolu 5.3.2).
- b) Definícia zdroja seizmických vln. Formát zápisu je jednoduchý, pozostáva z identifikačného kódu zdroja a polohy zdroja. V prípade zemetrasenia pri meste Zakopané z 30.11.2004, 17:18:36.89 UTC sme zadali zdroj ako „ZAK' 19.854 48.456 -5 /“. Tieto údaje sme uložili do súboru *sk-src.dat*.
- c) Súbor obsahujúci informácie o prijímačoch. Formát zápisu je podobný ako v prípade zdroja. Obsahuje identifikačné kódy prijímačov a polohy prijímačov – súbor *sk-rec.dat*. Popis v súbore *rpar.for*.
- d) Súbor obsahujúci informácie o počiatkových lúčových parametroch pre dvojbodový ray tracing – *sk-rpa.dat*. Podrobnejšie informácie o tomto vstupnom súbore nájdete v zdrojovom kóde podprogramu *rpar.for*.
- e) Numerické parametre pre ray tracing, Tie sú v našom prípade definované v súbore *sk-crt.dat*. Popis vstupných dát nájdete v komentároch podprogramu *ray.for*.
- f) V ďalšom vstupnom súbore *codep.dat* sme si zadefinovali kód elementárnych vln, ktoré nás zaujímajú. V našom prípade budeme sledovať (počítať) refragované vlny (popis v súbore *code.for*).
- g) Názvy výstupných súborov, do ktorých sa budú ukladať vypočítané veličiny. Tie sú definované v súbore *writ.dat* (detaily v zdrojovom kóde podprogramu *writ.for*).

V uvedených súboroch sú uvedené vstupné dáta, ktoré potrebujeme k výpočtu. Samotný výpočet prebehne spustením history súboru *sk-crt.h*. Po jeho prebehnutí dosta-

neme ako výsledok refragované lúče, ktoré zasiahli prijímače. Výsledok je uložený v súbore *sk-rec.tmp*. Na začiatku je uvedený identifikačný kód prijímača, potom súradnice X_1, X_2, X_3 bodu lúča a nakoniec je uvedený čas príchodu refragovanej P-vlny do prijímača. Vypočítané lúče je možné zobrazit' pomocou programu GOCAD alebo VRML.

5.4.3 Zemetrasenie pri meste Zakopané 30.11.2004

Zemetrasenie z 30.11.2004, 17:18:36.89 UTC v slovensko-poľskej pohraničnej oblasti pri meste Zakopané (Poľsko) patrí k jedným z najsilnejších zaznamenaných zemetrasení pomocou NSSS v posledných rokoch (lokálne magnitúdo 4.5). Nie náhodou sme si vybrali práve toto zemetrasenie pre test nášho modelu. Hlavným kritériom pri výbere vhodného testovacieho javu bolo, aby bol zaznamenaný čo najväčším počtom seizmických staníc zaradených do NSSS. Toto kritérium bolo vďaka veľkosti zvoleného javu splnené. Zemetrasenie pri Zakopanom patrí k plytkým kôrovým zemetraseniam (hĺbka hypocentra ~ 5 km), čo je pre oblasť Západných Karpát typická hĺbka. Keďže daný jav bol dosť silný, bol aj pomerne dobre lokalizovaný. Lokalizácia zemetrasenia bola 49.456° severnej zemepisnej šírky a 19.854° východnej zemepisnej dĺžky. V Tabuľke 1. je uvedený zoznam staníc zaradených do NSSS, na ktorých bolo zemetrasenie pozorované, typ fázy, čas príchodu danej fázy a vypočítané rezíduá pre danú fázu. Taktiež je uvedená zemepisná poloha stanice spolu s nadmorskou výškou.

Vstupné údaje pre výpočet časov šírenia jednotlivých elementárnych vln v nami zostavenom 3-D modeli zemskej kôry pre zemetrasenie pri Zakopanom sú zadané v jednotlivých vstupných súboroch popísaných v predchádzajúcej podkapitole a na príložnom CD sa nachádzajú v adresári MODEL\MODELSW3D\ModelSK. Samotný výpočet spustíme pomocou history súboru *sk-crt.h*. Výsledné lúče, ktoré dosiahli prijímač alebo sa dostali do nami stanovenej odchýlky pre zasiahnutie prijímača sú uvedené v Tabuľke 2.

ISC kód	Meno stanice	Zemepisná šírka [°N]	Zemepisná dĺžka [°E]	Nadmorská výška [m]	Fáza	Čas príchodu	O-C
LIKS	Likavka	49.0500	19.1059	341.0	Pg	17:18:46.3	-2.239
VYHS	Vyhne	48.4939	18.8360	480.0	Pg	17:18:57.9	0.335
CRVS	Červenica	48.9022	21.4614	476.0	Pg	17:18:57.7	-1.083
KOLS	Kolonické sedlo	48.9333	22.2731	460.0	Pn	17:19:00.5	-0.602
					Pg	17:19:00.7	1.611
SMOL	Smolenice	48.5139	17.4287	400.0	Pn	17:19:09.0	-0.295
					Pg	17:19:09.9	-0.439
SRO	Šrobárová	47.8133	18.3133	150.0	Pn	17:19:09.5	-0.426
					Pg	17:19:12.9	1.702
ZST	Železná Studnička	48.1961	17.1025	250.0	Pn	17:19:13.7	-0.564

Tabuľka 1 - Zoznam staníc (NSSS), na ktorých bolo zaznamenané zemetrasenie z 30.11.2004 pri Zakopanom, spolu s ich lokalizáciou a s časmi príchodov seizmických fáz.

Porovnanie časov šírenia elementárnych vln na jednotlivé seizmické stanice vypočítaných pre náš 3-D model zemskej kôry s časmi šírenia vypočítanými pre 1-D model IASPEI91 môžeme vidieť v Tabuľke 3.

ISC kód	Zemepisná šírka [°N]	Zemepisná dĺžka [°E]	Nadmorská výška [m]	Fáza	Čas šírenia [s]
ZST	48.1961	17.1025	250.0	Pn	37.42
				Pg	40.43
CRVS	48.9022	21.4614	476.0	Pg	22.59
				Pn	23.54
LIKS	49.0500	19.1059	341.0	Pg	11.87
KOLS	48.9333	22.2731	460.0	Pg	30.98
SRO	47.8133	18.3133	150.0	Pg	34.78
				Pg	35.40
SMOL	48.5139	17.4287	400.0	Pn	31.76
				Pg	33.63
VYHS	48.4939	18.8360	480.0	Pg	21.94
				Pg	22.68

Tabuľka 2 - Vypočítané časy šírenia elementárnych vln do jednotlivých seizmických staníc zaradených do NSSS pre nami zostavený 3-D model zemskej kôry pre územie Slovenska.

Ako môžeme vidieť z porovnania v tabuľke 3., nami vypočítané časy šírenia sú blízke časom šírenia vypočítaným pre 1-D model IASPEI91. Najväčšia odchýlka je v prípade stanice KOLS, až 7 s. Táto odchýlka je značná, pretože pri porovnaní

vypočítaných výsledkov pre model IASPEI91 s reálnymi dátami je typická odchýlka pre stanicu KOLS rovná 1.611 s. Neprimerane veľká odchýlka mohla byť spôsobená :

- chybou vo výpočte pomocou lúčovej metódy (málo pravdepodobné, pri malej zmene polohy stanice vychádzali časy šírenia podobné), nedokonalosťou nami zostaveného modelu (prítomnosť nejakej rýchlostnej anomálie v danom smere), chybou v odčítaní skutočného času príchodu pre dané fázy pre seizmickú stanicu KOLS (málo pravdepodobné). Výsledky, ktoré sme dostali potvrdzujú, že model ktorý sme zostavili predstavuje dobré priblíženie k reálnej situácii v zemskej kôre pod našim územím.

ISC kód	3-D model		Reálne prostredie (RP)		RP - 3-D model	RP - 1-D model
	Fáza	Časi šírenia [s]	Fáza	Časy šírenia [s]	O - C [s]	O - C [s]
ZST	Pn	37.42	Pn	36.81	-0.61	-0.564
	Pg	40.43				
CRVS	Pg	22.59	Pg	20.81	-1.78	-1.083
	Pn	23.54				
LIKS	Pg	11.87	Pg	9.41	-2.46	-2.239
KOLS	Pg	30.98	Pg	23.81	-7.17	1.611
			Pn	23.79		-0.602
SRO	Pg	34.78	Pn	32.61		-0.426
	Pg	35.40	Pg	36.01	0.61	1.702
SMOL	Pn	31.76	Pn	32.11	0.35	-0.295
	Pg	33.63	Pg	33.01	-0.62	-0.439
VYHS	Pg	21.94	Pg	21.01	-0.93	0.335
	Pg	22.68				

Tabuľka 3 - Porovnanie vypočítaných časov šírenia pre nami zostavený 3-D model so skutočnými časmi šírenia.

Ďalším krokom verifikácie modelu by malo byť komplexné testovanie pre čo najväčší počet seizmických javov s vyhodnotením odchýlok časov šírenia v jednotlivých seizmických staniách. Na základe toho je možné pristúpiť k ďalšiemu upravovaniu samotného modelu. To zahŕňa, spresňovanie lokalizácie a priebehu jednotlivých tektonických jednotiek, upravenie rýchlosti šírenia seizmických vln v jednotlivých tektonických jednotkách, poprípade doplnenie nových štruktúr do nášho modelu. Dôležitým krokom pri tvorbe modelov je tiež vyvinutie spoľahlivého algoritmu na lokalizáciu zemetrasení na základe inverzie časových dát. Procesy spresňovania modelu a zdokonaľovania lokalizácií sú prepojené a ovplyvňujú sa, bez ich interakcie by obe

úlohy nebolo možné efektívne riešiť. Údaje, ktoré sme používali na výpočet časov šírenia sú teda zaťažené určitou chybou, pretože poloha a čas vzniku zemetrasenia nie sú primárne údaje, ktoré dokážeme namerať, ale údaje ktoré počítame na základe inverzie nameraných časov príchodu pre model IASPEI91. Táto zaujímavá problematika bude v blízkej budúcnosti ďalej riešená na oddelení seizmológie GFÚ.

6 ZÁVER

Cieľom diplomovej práce bolo začať vývoj 3-D modelu zemskej kôry na území Slovenska. Tohto cieľa sme sa držali v priebehu celej diplomovej práce. Prvé tri kapitoly sme venovali k objasneniu teórie, ktorú sme využili pri tvorbe nášho modelu. V poslednej kapitole sme na základe geologicko-geofyzikálnej predstavy navrhli 3-D model zemskej kôry. Ten pozostával z hlavných tektonických jednotiek Západných Karpát, ktorými sú Pieninské Bradlové pásmo, vonkajší karpatský flyš, karpatská čelná predhlbeň, európska platforma, neogénne sedimenty Vnútorných Západných Karpát a karpatská kôra. Voľný povrch sme uvažovali čo najdetailnejší.

Pre zostavovanie a otestovanie nami navrhnutého 3-D modelu zemskej kôry sme použili software SW3D verzia 9, ktorý vyvíja skupina okolo Prof. V. Červeného v Prahe. Na zhotovenie modelu sme použili programový balík MODEL, ktorý je opísaný v kapitole 5.3. Pri zostavovaní modelu sme sa snažili dodržať obmedzenia, ktoré kladie na model výpočtová metóda. Tieto obmedzenia sú popísané v kapitole 5.2. Ako vstupné dáta popisujúce jednotlivé tektonické jednotky v našom modeli sme použili údaje dopočítané pomocou programu MODELTransform, ktorý sme si pre tento účel naprogramovali. Rýchlosti šírenia P-vln sme získali z meraní pozdĺž seizmických refrakčných profilov vykonaných v rámci projektu CELEBRATION 2000.

Pre nami zostavený model sme pomocou programového balíka CRT popísaného v kapitole 5.4 vypočítali časy šírenia pre zemetrasenie pri meste Zakopané z 30.11.2004. Na výpočet sme použili metódu streľby popísanú v druhej kapitole. Porovnaním nami vypočítaných časov šírenia pre 3-D model Slovenska s časmi šírenia vypočítanými pre 1-D model zemskej kôry (IASPEI91) v súčasnosti používaným na Slovensku sme zistili, že sú podobné a veľmi sa od seba nelíšia. Ukázali sme, že zostavenie 3-D modelu zemskej kôry je aj pre také tektonicky komplikované územie ako je Slovensko možné. Vyžaduje si to ale spresnenie lokalizácie jednotlivých tektonických jednotiek a detailnejšiu znalosť o tektonickej stavbe a materiálových parametroch zemskej kôry na našom území. V budúcnosti môže takto zostavený model značnou mierou prispieť k zlepšeniu lokalizácie jednotlivých seizmických javov, k lepšiemu vyčleneniu seizmotektonických oblastí, prispieť k zlepšeniu výpočtu seizmického

ohrozenia pre jednotlivé lokality územia Slovenska, čím môže značnou mierou napomôcť pri znižovaní následkov v prípade silnejšieho zemetrasenia. Preto je nevyhnutné sa touto problematikou zaoberať aj v budúcnosti.

Bibliografia

- Andrusov, D. (1958). Geológia československých Karpát 1. Bratislava: Vyd. Slov. Akad. Vied.
- Beránek, B. (1971). Study of the velocity conditions in the Earth's crust in the regions of the Bohemian Massif and The Carpathian system along international profiles VI and VII. *Studia geoph. et geod.* **15**, 316–330.
- Beránek, B., Dudek, A., Fejfar, M., Hrdlička, A., Suk, M., Zounková, M. and Weiss, J. (1972). The crustal structure of Central and South-Eeastern Europe based on the results of explosion seismology. *Geop. Trans.*, spec. ed. Budapest, 87–98.
- Beránek, B., a Zátopek, A. (1981). Preliminary results of geophysical synthesis in Czechoslovakia and central Europe based on explosion seismology until 1990. In *Geophysical syntheses in Czechoslovakia*, ed. A. Zátopek, pp. 243–270. Bratislava: Veda.
- Beránek, B., a Zounková, M. (1979). Principal results of deep seismic soundings. In *Geodynamic Investigations in Czechoslovakia*. Bratislava: Veda.
- Bezák, V., Broska, I., Ivanička, J., Reichwalder, P., Vozár, J., Polák, M., Harrila, M., Mello, J., Biely, A., Plašienka, D., Kaličiak, M., Žec, B., Vass, D., Elečko, M., Janočko, J., Pereszlényi, M., Marko, F., Maglay, Pristaš, J. (2004). Tektonická mapa Slovenskej Republiky. Bratislava: MŽP SR a ŠGU DŠ.
- Bielik, M. (1999). Geophysical features of the Slovak Western Carpathians: a review. *Geological Quarterly* **43**, No. 03, 251–262.
- Bielik, M., a Šefara, J. (2002). Deep structure of the Western Carpathians. *Kristalnikum* **28**, 7–62. Brno: Moravské zemské múzeum.
- Bielik, M., Šefara, J., Kováč, M., Bezák, V., a Plašienka, D. (2004). The Western Carpathians - interaction of Hercynian and Alpine processes. *Tectonophysics* **393**, No. 1-4, 63–86.
- Biely, A., Bezák, V., Elečko, M., Kaličiak, M., Konečný, V., Lexa, J., Mello, J., Nemčok, j., Potfaj, M., Rakús, M., Vass, D., Vozár, J., Vozárová, A. (1996). Geological map of Slovak Republic 1:500 000. *Geol. Survey SR*. Bratislava: Dionýz Štúr Publ.
- Blížkovský, M., Fusán, O., Ibrmajer, J., Plančár, J., a Suk, M. (1986). Geophysical phenomena of the deep structure in Czechoslovakia. *J. Geodyn.* **5**, 165–178.
- Bucha, V., a Blížkovský, M. (1994). Crustal structure of the Bohemian Massif and the West Carpathians, pp. 177–188. Springer Verlag - Academia press.
- Bulant, P. (1996). Two-point ray tracing in 3-D. *PAGEOPH* **148**, 421–47.
- Bulant, P. (1999). Two-point ray-tracing and controlled initial-value ray-tracing in 3-D heterogeneous block structures. *J. Seismic Exploration* **8**, 57–75.
- Bulant, P., a Klimeš, L. (1999). Interpolation of ray theory traveltimes within ray cells. *Geophys. J. Int.* **139**, 273–82.
- Červený, V. (2001). Seismic ray theory. Cambridge University press.

- Červený, V., Klimeš, L., a Pšenčík, I. (2005). Seismic ray method: Recent developments. In *Seismic waves in complex 3-D structures. Report* **15**, 57–172.
- Červený, V., Klimeš, L., a Pšenčík, I. (1988). Complete seismic-ray tracing in three-dimensional structures. In *Seismological algorithms*, ed. D. J. Doornbos, pp. 89–168. New York: Academic Press.
- Červený, V., Molotkov, I. A., a Pšenčík, I. (1977). *Ray method in seismology*. Praha: Universita Karlova.
- Fusán, O., Biely, A., Ibrmajer, J., Plančár, J. a Rozložník, L. (1987). Podložie terciéru vnútorných Západných Karpát. Bratislava: GÚDŠ.
- Grad, M., Guterch, A., Keller, G. R., Janik, T., Hegedús, E., Vozár, J., Ślaczka, A., Tiira, T., a Yliniemi, J. (2006). Lithospheric structure beneath trans-Carpathian transect from Precambrian platform to Pannonian basin: CELEBRATION 2000 seismic profile CEL05. *J. Geophys. Res.* **111**, B03301.
- Klimeš, L., a Kvasnička, M. (1994). 3-D network ray tracing. *Geophys. J. Int.* **116**, 726–38.
- Kováč, M., Nagymarosy, A., Oszczytko, N., Slaczka, A., Csontos, L., Marunteanu, M., Matenco, L., Márton, M. (1998). Palinspastic reconstruction of the Carpathian-Pannonian region during the Miocene. In *Geodynamic development of the Western Carpathians*, ed. M. Rákus, pp. 189–218. Bratislava: GS SR.
- Labák, P. (2000). Mapa epicentier makroseizmicky pozorovaných zemetrasení na území Slovenska do roku 1999. <http://www.seismology.sk/Maps/maps.html>.
- Labák, P., a Brouček, I. (1996). Catalogue of macroseismically observed earthquakes on the territory of Slovakia. (Version 1996). Manuscript. Bratislava: Geophys. Instit. Slov. Acad. Sci.
- Labák, P., Cipciar, A., a Kristeková, M. (in press). Monitoring of earthquakes on the territory of Slovak Republic by the National Network of the Seismic Stations in the period 2001–2005. *Slovak Geological Magazine*.
- Lillie, J. R. (1999). *Whole Earth Geophysics*. New Jersey: Prentice Hall.
- Mayerová, M., Novotný, M., a Fejfar, M. (1994). Deep seismic sounding in Czechoslovakia. In *Crustal structure of the Bohemian Massif and the West Carpathians*, eds. V. Bucha, a M. Bližkovský, pp. 13–20. Academia Press - Springer Verlag.
- Moser, T. J. (1991). Shortest path calculation of seismic rays. *Geophysics* **56**, 59–67.
- Moser, T. J. (1992). The shortest path method for seismic ray tracing in complicated media. PhD. Thesis, Inst. of Geophysics, Utrecht University.
- Nolet, G., a Moser, T. J. (1993). Teleseismic delay times in a 3-D Earth and new look at the S discrepancy. *Geophys. J. Int.* **114**, 185–95.
- Pereszlányi, M., a Pereszlányiová, A. (2004). Model geologickej stavby pozdĺž seizmického profilu 2T/83,84+2AT/84 (migrovaná verzia). Bratislava: MŽP SR.
- Rákus, M. (1998). *Geodynamic development of the Western Carpathians*. Bratislava: GS SR.

- Tomek, Č., Ibrmajer, I., Koráb, T., Biely, A., Dvořáková, L., Lexa, J., a Zbořil, A. (1989). Crustal structures of the West Carpathians on deep seismic line 2T. *Miner. Slovaca* **21**, 3-26.
- Vozár, J., Šantavý, J. (2000). Atlas hlbinných reflexných seizmických profilov Západných Karpát a ich interpretácia. Bratislava: MŽP SR.
- Vozár, J., Tomek, Č., Vozárová, A., Mello, J., a Ivanička, J. (1996). Seismic section G-1. *Geol. Práce* **101**, 32–34.
- Zátopek, A. (1979). On geodynamic aspects of geophysical synthesis in Central Europe. In *Geodynamics investigations in Czechoslovakia*, ed. J. Vaněk, pp. 91–104. Bratislava: Veda.