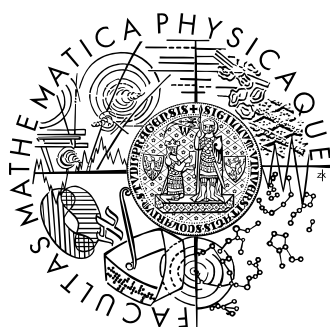


Univerzita Karlova v Praze  
Matematicko-fyzikální fakulta

# BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



Helena Munzarová

## **Automatizace měření časů seismických vln zaregistrovaných při pasivních experimentech (RETREAT, Itálie)**

Katedra geofyziky

Vedoucí bakalářské práce: RNDr. Jaroslava Plomerová, DrSc.  
Geofyzikální ústav AV ČR

Studijní program: Obecná fyzika

2009

Na tomto místě chci vyjádřit své poděkování především vedoucí mé práce RNDr. Jaroslavě Plomerové, DrSc. za pomoc, kterou mi poskytovala během celé tvorby této studie. Dále pak velmi děkuji RNDr. Luďku Vecseyovi, PhD. za rady ohledně práce se softwarem a za přípravu dat ke zpracování.

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci napsala samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů. Souhlasím se zapůjčováním práce a jejím zveřejňováním.

V Praze dne

Helena Munzarová

# Obsah

<b>1 Úvod</b>	<b>6</b>
1.1 Seismické sítě .....	6
1.2 Automatické a poloautomatické měření prvních nasazení .....	7
1.3 Odchyšky v časech šíření seismických vln .....	8
<b>2 Data a metody</b>	<b>8</b>
2.1 Pasivní seismický experiment RETREAT .....	8
2.2 Principy poloautomatického odečítání prvních nasazení .....	12
2.3 Zpracování dat .....	14
2.3.1 Širokopásmové a krátkoperiodické seismometry .....	14
2.3.2 Software XPICK .....	15
2.3.3 Software Seismic Handler (SH) .....	17
<b>3 Výsledky</b>	<b>20</b>
3.1 Srovnání poloautomatického a manuálního měření .....	20
3.2 Směrová závislost relativních residuí .....	29
<b>4 Diskuse</b>	<b>42</b>
<b>5 Závěr</b>	<b>44</b>
<b>Literatura</b>	<b>45</b>

Název práce: **Automatizace měření časů seismických vln zaregistrovaných při pasivních experimentech (RETREAT, Itálie)**

Autor: Helena Munzarová

Katedra (ústav): Katedra geofyziky

Vedoucí bakalářské práce: RNDr. Jaroslava Plomerová, DrSc., Geofyzikální ústav  
AV ČR

e-mail vedoucího: [jpl@igcas.cz](mailto:jpl@igcas.cz)

*Abstrakt:* Pasivní seismické experimenty, s dobou trvání od několika měsíců do několika let s hustou sítí stanic, jsou zdrojem velkého množství dat, která je třeba zpracovat v co nejkratší době po ukončení měření. Hledají se proto způsoby (polo)automatických zpracování seismogramů, včetně určení časů příchodu jednotlivých fází. V této práci na příkladu dat z experimentu RETREAT v Severních Apeninách, měřím nasazení vln P teleseismických jevů jak manuálně, softwarem Seismický Handler, tak i poloautomatickým způsobem, softwarem XPICK, vytvořeným na principu vzájemné korelace vlnových obrazů. Analýzu manuálního způsobu měření provádím na širokopásmových seismogramech s charakteristikou CMG-40T i na seismogramech restituovaných na standardizovanou charakteristiku WWSSN-SP simulující krátkoperiodický záznam. Srovnávám odchylky v časech šíření (residua) ze všech tří typů měření. Poloautomatický ‚picker‘ XPICK dokázal bez problému určit časy prvních nasazení vln P jen u výrazných signálů s nízkou hladinou šumu ( $\sim 15\%$  ze všech měřených jevů). Ostatní data bylo nutné ručně přeměřit, a tudíž nedošlo k úspoře času při měření prvních nasazení vln. Relativní residua vypočtená pro manuálně změřená data mají ve většině případů menší rozptyly průměrných hodnot.

*Klíčová slova:* manuální a poloautomatické měření časů prvních nasazení, odchylky v časech šíření (residua), pasivní seismický experiment

**Title: Automatic picking seismic wave onsets recorded during passive experiments (RETREAT, Italy)**

Author: Helena Munzarová

Department: Department of Geophysics

Supervisor: RNDr. Jaroslava Plomerová, DrSc., Institute of Geophysics, Academy of Sciences of the Czech Republic

Supervisor's e-mail address: [jpl@igcas.cz](mailto:jpl@igcas.cz)

*Abstract:* Dense networks of seismic stations deployed for months up to several years during passive seismic experiments provide a large amount of data, which call for processing shortly after dismounting arrays. Therefore, semi- or fully-automatic procedures are being developed for processing of seismograms, including picking of arrival times of individual phases. In the present work, I pick the arrivals of teleseismic P waves, both manually, with the use of the Seismic Handler software, and semi-automatically, using software XPICK, based on cross-correlation of waveforms. Effectiveness and reliability of individual approaches are tested on data of the RETREAT experiment in the North Apennines. Both the broad-band and short-period seismograms, with the CMG-40T and WWSSN-SP responses, are analyzed. We compare differences in travel times and their residuals calculated for the three types of measurements. The semiautomatic picker XPICK determined only about 15% of P arrival times reliably, in case of seismograms with the high signal-to-noise ratio. Remaining onsets had to be re-picked manually and thus no time needed for the processing was saved. The relative residuals calculated from the manual picking are less scattered, in most cases.

*Keywords:* manual and semi-automatic phase picking, travel time residuals, passive seismic experiments

# 1 Úvod

## 1.1 Seismické sítě

V seismologii se data získávají pomocí seismografů, což jsou přístroje, které zaznamenávají pohyb půdy na zemském povrchu v místě, kde jsou nainstalovány. Záznam pohybu půdy se nazývá seismogram a je na něm znázorněna časová závislost výchylky, rychlosti nebo zrychlení půdy, způsobenými příchodem elastických vln, jejichž vznik je spojen se zemětřesením někde na Zemi. Nejčastěji se setkáme s třísložkovými seismogramy, kde na složce Z je zachycen vertikální pohyb půdy na složce NS pohyb ve směru sever jih a na složce EW pohyb ve směru východ západ. Je proto možné si udělat představu o skutečném trojrozměrném pohybu půdy v místě seismické stanice (Lillie, 1999).

Po celém světě existují rozsáhlé sítě permanentních stanic, které slouží ke sledování aktuální seismické činnosti, lokaci zemětřesení a shromažďování dat pro studium zemského nitra. Z mnoha permanentních seismických sítí jmenujme např. GEOSCOPE (IPGP, Paris, France), GEOFON (GFZ Potsdam, Německo), IRIS (Incorporated Research Institutions for Seismology, USA), MedNet (Mediterranean Network, Itálie). Existuje také řada národních seismických sítí, včetně české národní sítě CRSN (Czech Regional Seismological Network) s centrem na Geofyzikálním ústavu (GFÚ) Akademie Věd České republiky.

Seismogramy z permanentních stanic se v první řadě zpracovávají proto, abychom monitorovali aktuální seismickou činnost. Vlny zachycené na seismogramech nesou kromě informací o ohnisku zemětřesení také údaje o prostředí, jímž během své cesty z místa vzniku až na stanici prošly. Je proto v principu možné ze seismických dat určit vnitřní strukturu Země. Jednou z metod jak studovat strukturu země je seismická tomografie (Kennett, 1998) využívající odchylky v časech šíření seismických vln od referenčního radiálního modelu Země (např. IASP91, Kennett, 1991).

Kromě rozložení rychlostí uvnitř Země je také velký zájem dozvědět se více o vrstvách blízko jejího povrchu, jako je zemská kůra, litosféra, svrchní plášť. Za tímto účelem se v regionálních studiích instalují dočasné sítě stanic, které se vždy váží ke konkrétnímu experimentu, jehož cílem je prozkoumat strukturu pod oblastí, v níž se dočasná síť stanic (‘array’) postaví. U dočasně rozmístěných stanic rozlišujeme dva typy experimentů: pasivní a aktivní. V případě pasivních experimentů, stanice čekají na příchod vln od přirozeného zemětřesení. U aktivních experimentů se registrují vlny od umělých zdrojů.

Pasivní experimenty trvají od několika měsíců do několika let a vybrané území je hustě pokryto stanicemi. Např. experiment RETREAT (viz kapitola 2.1), na jehož datech provádím výzkum, trval 3 roky. Pokrýval území přibližně 400km x 400km, na němž bylo rozmístěno okolo 50 stanic (Margheriti a kol., 2006). Cílem této práce

je ověření přesnosti měření relativních časů šíření vln P určených poloautomatickým i manuálním způsobem a ověření na části datového souboru mezinárodního experimentu RETREAT.

## 1.2 Automatické a poloautomatické měření prvních nasazení

Jeden z parametrů, který se ze seismogramů určuje, je čas prvního nasazení, nebo-li okamžiku, kdy vlna, která je generována buď při zemětřesení nebo při umělých odpalech, na stanici dorazila. Kromě prvního nasazení vlny P, se také určují časy příchodů dalších typů fází, včetně sekundárních vln S. Měření časů příchodů vln se označuje jako ‚pickování‘ (sběr dat).

Během trvání jednoho pasivního experimentu se na desítkách stanic zaznamenají stovky jednotlivých jevů, které je po skončení měření nutné zpracovat. Celkem se tedy musí projít tisíce seismogramů. Jedná se samozřejmě o časově velmi náročnou činnost. Z různých důvodů však dosud převládá manuální ‚pickování‘ nad automatickým, či alespoň poloautomatickým způsobem odečítání časů prvních nasazení. Poloautomatické odečítání času znamená, že je, na rozdíl od plně automatického, nutné programu na začátku měření zadat např. časový interval, ve kterém se bude čas příchodu vlny hledat.

Nejrozšířenějšími metodami poloautomatického odečítání prvních nasazení jsou ‚cross correlation‘ (‚vzájemná korelace‘) a ‚adaptive stacking‘ (adaptive – adaptivní, přizpůsobivý; stack – nahromadit, navrstvit). O principech těchto metod, o nichž se podrobněji zmíním v kapitole 2.2, píší např. Van Decar a Crosson (1990) resp. Rawlinson a Kennett (2004). Obě tyto metody jsou založeny na podobnosti vlnových obrazů, takže je lze využívat jen u dat z husté sítě stanic.

Zmíním i metodu určování časů příchodů vln založenou na poměru STA/LTA (Short Time Analysis, Long Time Analysis). Jedná se o automatický způsob ‚pickování‘, který je možné aplikovat také na jediný seismogram a často se používá k detekci události. Přes aktuální záznam na stanici se pohybují dvě okna, jedno úzké a druhé širší, a vyhodnocují velikost průměrné amplitudy části seismogramu, která se v daném okamžiku nachází uvnitř každého z nich. Jejich podílem se snadno identifikuje náhlý nárůst amplitudy signálu (Bormann, 2002).

Ačkoli jsou metody (polo)automatického ‚pickování‘ teoreticky detailně propracovány, ve skutečnosti se časy příchodů vln odečítají převážně manuálně. V praxi se totiž ukazuje, že manuální odečítání časů prvních nasazení mnohdy vede k přesnějším výsledkům. Záznamy z dočasně umístěných stanic jsou často zašuměné a (polo)automatický ‚picker‘ je nedokáže správně analyzovat. Navíc každá skupina seismologů v datech hledá jiné informace, takže i případný software není jednoduše aplikovatelný i na jiná měření.

### 1.3 Odchyly v časech šíření seismických vln

Jednou z veličin, které lze z času prvního nasazení vypočítat, jsou odchyly v časech šíření, tzv. absolutní residuum  $AbsRes_{ij}$ , které přísluší  $j$ -tému jevu (zemětřesení) zaznamenanému na  $i$ -té stanici. Je to rozdíl pozorovaného času šíření vlny z ohniska zemětřesení na stanici  $O_{ij}$  („observed travel time“) a teoretického času  $C_{ij}$  („calculated travel time“), vypočteného např. podle radiálního modelu IASP91 (Kennett, 1991)

$$AbsRes_{ij} = O_{ij} - C_{ij} . \quad (1)$$

Kromě absolutního residua  $AbsRes_{ij}$  se zavádí také relativní residuum  $RelRes_{ij}$ , např. vztahem

$$RelRes_{ij} = AbsRes_{ij} - \frac{1}{N_j} \sum_{i=1}^{N_j} AbsRes_{ij} , \quad (2)$$

kde  $N_j$  je počet stanic, na nichž byl zaznamenán  $j$ -tý jev. Druhý člen na pravé straně rovnice (2) je aritmetický průměr absolutních residuí přes všechny stanice (pro  $j$ -tý jev), označován jako jeden typ normalizace. Tato veličina odstraňuje v regionálních studiích vlivy pocházející z chyb v lokaci ohniska zemětřesení, určení času vzniku, struktury v ohniskové oblasti a heterogenit v plášti mezi ohniskem a studovanou oblastí.

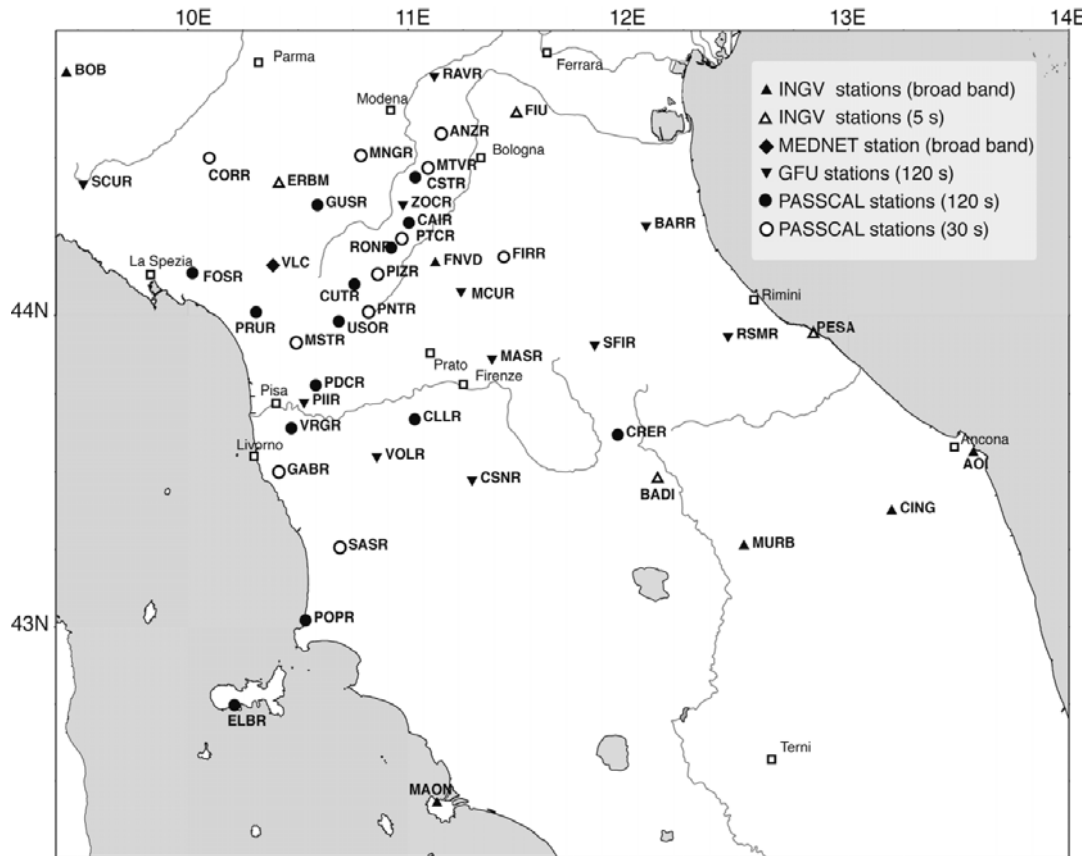
## 2 Data a metody

### 2.1 Pasivní seismický experiment RETREAT

Mezinárodní pasivní seismický experiment RETREAT (REtreating-TREnch, Extension, and Accretion Tectonics) probíhal v severních Apeninách v letech 2003 až 2006. Na jeho realizaci se podílely Universita v Yale (USA), INGV (Itálie), Geofyzikální ústav AV ČR a další instituce, za finanční podpory severoamerické nadace National Science Foundation (NSF), italského Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) a České Grantové Agentury (GAAV). Hlavním cílem tohoto experimentu je ucelené studium struktury a vývoje zemské kůry a pláště



pod severními Apeninami (např. tloušťka kůry a litosféry, umístění a tvar Adriatického ‚slabu‘, laterální a vertikální rozložení seismické anizotropie v litosféře a astenosféře; Plomerová a kol., 2006; Margheriti a kol., 2006).



**Obr. 1** Mapa stanic experimentu RETREAT (Margheriti a kol., 2006).

V říjnu 2003 bylo v severní Itálii rozmístěno 10 širokopásmových (BB) stanic Geofyzikálního Ústavu (GFÚ) Akademie Věd České republiky (BARR, CSNR, MCUR (později přesunuta - MASR), PIIR, RAVR, RSMR, SCUR, SFIR, VOLR a ZOCR). Všechny stanice byly vybaveny širokopásmovým seismometrem STS-2. Společně s krátkoperiodickými (PESA, FIU, BADI, ERBM) a širokopásmovými (AOI, BOB, CING, FNVD, MAON a MURB) stanicemi italské národní sítě tvořily stanice GFÚ základní staniční síť celého experimentu RETREAT (viz obr. 1). V říjnu 2004 se postavilo dalších 25 stanic (ANZR, CAIR, CLLR, CORR, CRER, CSTR, CUTR, ELBR, FIRR, FOSR, GABR, GUSR, MNGR, MSTR, MTRV, PDCR, PIZR, PNTR, POPR, PRUR, PTCR, RONR, SASR, USOR a VRGR), zapůjčených IRIS PASSCAL Instrument Centre. Tyto stanice byly vybaveny buď seismometrem STS-2 nebo CMG-40T a byly hustě rozmístěny podél profilu přibližně kolmého na oblouk Severních Apenin. Do experimentu RETREAT byla ještě zahrnuta stanice VLC (seismometr STS-2) sítě MedNet, což je síť širokopásmových stanic v oblasti Středozemí. Seznam stanic experimentu RETREAT, jejichž data jsem měřila, je uveden v tabulce 1.

**Tabulka 1** Seznam stanic, jejichž data jsou použita ve studii - s pořadovým číslem a zeměpisnou lokací

	Kód stanice	Zeměpis. šířka	Zeměpis. délka	Počet měřených vln P <sup>1</sup>		
				SH CMG-40T	SH WWSSN-SP	XPICK
1	ANZR	44.5760	11.1500	9	6	12
2	BARR	44.2828	12.0797	13	6	30
3	BOB	44.7679	9.4478	43	45	52
4	CAIR	44.2940	11.0030	10	11	11
5	CING	43.3756	13.1954	46	44	53
6	CLLR	43.6680	11.0300	12	13	15
7	CRER	43.6190	11.9520	19	20	21
8	CSNR	43.4731	11.2902	53	50	55
9	CSTR	44.4380	11.0320	19	20	22
10	CUTR	44.1000	10.7560	18	19	20
11	ELBR	42.7470	10.2110	18	17	20
12	FIRR	44.1890	11.4340	17	17	18
13	FNVD	44.1678	11.1229	35	33	38
14	FOSR	44.1350	10.0200	14	13	18
15	GABR	43.5000	10.4130	8	8	10
16	MAON	42.4283	11.1309	46	42	53
17	MASR	43.8611	11.3808	42	40	43
18	MNGR	44.5070	10.7850	14	14	17
19	MSTR	43.9130	10.4920	16	14	18
20	MTVR	44.4680	11.0910	14	14	15
21	MURB	43.2630	12.5246	42	43	52
22	PDCR	43.7810	10.5800	17	17	18
23	PIIR	43.7219	10.5250	43	41	47
24	PIZR	44.1310	10.8620	22	22	23
25	PNTR	44.0110	10.8200	17	19	19
26	POPR	43.0220	10.5340	13	13	14
27	PRUR	44.0100	10.3090	16	15	17
28	PTCR	44.2440	10.9710	21	24	24
29	RAVR	44.7559	11.1188	35	29	54
30	RONR	44.2150	10.9230	20	21	19
31	RSMR	43.9303	12.4497	46	45	52
32	SACS	42.8491	11.9097	2	1	2
33	SASR	43.2570	10.6900	4	4	5
34	SCUR	44.4156	9.5361	51	48	55
35	SFIR	43.9048	11.8469	54	53	56
36	USOR	43.9810	10.6850	13	14	15

<sup>1</sup> Způsoby měření prvních nasazení (SH: CMG-40T, SH: WWSSN-SP, XPICK: CMG-40T) jsou popsány v kapitole 2.3.

Kód stanice	Zeměpis. šířka	Zeměpis. délka	Počet měřených vln P			
			SH CMG-40T	SH WWSSN-SP	XPICK	
37	VLC	44.1594	10.3864	53	46	55
38	VOLR	43.5478	10.8572	38	36	48
39	VRGR	43.6400	10.4700	5	5	7
40	ZOCR	44.3508	10.9765	47	50	52

**Tabulka 2** Seznam zemětřesení (rok 2004)

Měsíc a den	Čas [hhmmss.ss]	Hloubka [km]	Zem. šířka	Zem. délka	Počet měření		
					SH 40T	SH SP	XPICK
JAN24	13145.70	10	52.120	-30.180	10	11	15
JAN26	10277.65	36	51.130	178.080	13	13	15
JAN30	175144.80	30	44.730	150.060	11	13	15
FEB14	103022.20	11	34.770	73.220	14	13	15
FEB17	74627.26	40	43.140	145.820	11	11	15
FEB22	64627.04	42	-1.560	100.490	8	13	15
FEB25	8566.50	19	54.620	162.810	12	12	15
FEB25	182223.70	35	13.990	-92.140	0	0	15
JUN27	125150.40	10	-40.920	43.310	10	11	16
JUN28	94947.00	20	54.800	-134.250	15	14	15
JUN29	7130.90	9	10.740	-87.040	13	12	15
JUL 1	92044.14	10	54.130	-35.260	12	0	15
JUL11	23844.18	13	30.690	83.670	15	13	15
JUL15	12652.40	18	49.690	-126.860	12	5	16
JUL17	61018.07	46	34.750	140.220	10	12	15
JUL19	8149.46	23	49.620	-126.970	14	0	15
JUL21	1129.78	30	40.970	143.080	13	14	15
JUL22	94514.90	20	26.490	128.890	13	11	15
JUL29	1446.91	22	12.450	95.000	15	14	15
JUL29	13233.28	24	12.440	95.000	12	13	16
AUG24	10534.47	10	32.540	92.190	13	14	15
AUG30	122321.60	11	49.540	157.280	13	14	15
SEP 5	1077.82	14	33.070	136.620	15	15	15
SEP 5	145718.60	10	33.180	137.070	13	14	15
SEP 6	232935.10	10	33.210	137.230	15	13	15
SEP 8	145825.80	21	33.140	137.200	13	12	14
SEP 9	163321.70	25	17.760	-81.550	10	11	15
SEP17	112548.20	15	15.810	95.880	14	13	15
SEP18	7748.43	10	23.110	-67.610	12	12	15
SEP19	20264.10	25	52.210	174.030	15	15	15
OCT 7	214620.30	34	37.120	54.480	13	14	16
OCT 9	212653.70	35	11.420	-86.670	15	7	15
OCT23	856.86	16	37.230	138.780	14	14	15
OCT23	9312.53	10	37.320	138.820	15	15	0

Měsíc a den	Čas [hhmmss.ss]	Hloubka [km]	Zem. šířka	Zem. délka	Počet měření		
					SH 40T	SH SP	XPICK
OCT23	91157.42	18	37.240	138.610	15	14	15
OCT23	9344.99	10	37.320	138.810	0	15	15
OCT24	21457.06	11	37.310	138.700	22	22	22
OCT26	21133.44	10	31.020	81.150	23	23	23
OCT27	14050.26	14	37.280	138.880	26	25	26
OCT31	6258.97	18	35.370	74.410	19	27	29
NOV 2	10212.82	10	49.280	-128.770	26	21	28
NOV 8	21558.84	10	37.400	138.860	31	28	33
NOV 8	15551.15	29	24.100	122.540	32	31	33
NOV11	10247.33	32	42.140	144.340	30	32	34
NOV15	9656.56	15	4.700	-77.510	33	33	33
NOV16	115728.10	48	53.060	160.130	33	32	33
NOV17	205822.30	20	39.190	71.860	33	33	34
NOV20	8722.08	16	9.600	-84.170	35	28	35
NOV20	22145.66	40	13.380	-90.060	26	25	27
NOV21	11417.76	14	15.680	-61.710	32	34	35
NOV28	183214.10	39	43.010	145.120	36	36	36
DEC 6	141511.90	35	42.900	145.230	33	33	33
DEC14	55610.04	10	44.120	141.790	30	31	34
DEC14	232013.40	10	18.960	-81.410	34	34	34
DEC21	153428.10	37	42.960	145.410	29	30	28
DEC26	5853.45	30	3.300	95.980	27	20	34
DEC26	9201.61	16	8.880	92.380	0	0	25

## 2.2 Principy poloautomatického odečítání prvních nasazení

V kapitole 1.2 jsem se zmínila o dvou základních metodách, vhodných k poloautomatickému odečítání prvních nasazení ze seismogramů pořízených během dočasných experimentů. Jsou to ‚cross correlation‘ (‚vzájemná korelace‘) a ‚adaptive stacking‘ (adaptive – adaptivní, přizpůsobivý; stack – nahromadit, navrstvit).

První zmíněná metoda je založena na vztahu pro korelaci dvou periodických signálů  $f(t)$  a  $g(t)$  (Brokešová, 2008)

$$(f * g)(t) = \frac{1}{T} \int_a^b \overline{f(\tau)} g(t + \tau) d\tau, \quad (3)$$

kde  $T = b - a$  je perioda signálů a  $\overline{f(t)}$  značí komplexní sdružení.

Na seismogramech jsou zaznamenány složitější signály. Interval  $(a, b)$  u metody vzájemné korelace představuje úsek na jednom vybraném seismogramu, uvnitř něhož se nachází čas příchodu vlny P. Tento čas i okraje  $a, b$  zvoleného úseku se vyznačí manuálně (odtud pojem poloautomatický ‚picker‘). Postupně se provede korelace vyznačeného úseku na vybraném seismogramu s ostatními seismogramy a hledá se hodnota proměnné  $t$ , pro kterou vyjde nejvyšší korelace. Program nyní na všech seismogramech našel sektory, které nejlépe odpovídají zadanému úseku, a doplnil do nich hodnoty časů příchodů vln P.

Druhá metoda se nazývá ‚Adaptive stacking‘ (Rawlinson a Kennett, 2004; Amaru a kol., 2008). Jedná se o iterační metodu, v níž se také srovnávají vlnové obrazy z jednotlivých stanic. Nejdříve se vypočítá lineární ‚stack‘  $V_1(t)$  ze všech signálů, čímž se minimalizuje šum a nevybírání se a priori nejlepší stanice. Lineární ‚stack‘ je předepsán vztahem

$$V_1(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_i(t - t_i^e), \quad (4)$$

kde  $N$  je počet stanic a  $u_i(t - t_i^e)$  představuje průběh signálu na  $i$ -té stanici v čase  $t - t_i^e$ , kde  $t_i^e$  je časová korekce vypočtená pro  $i$ -tou stanici z konkrétního teoretického modelu. Transformací argumentu funkce  $u_i(t)$ ,  $i = 1, \dots, N$ , z  $t$  na  $t - t_i^e$  se na všech stanicích odstraní časové rozdíly způsobené různou epicentrální vzdáleností jednotlivých stanic od ohniska zemětřesení (time shift, move-out). Vlnové obrazy, a tudíž i časy prvního nasazení, budou po transformaci lépe zarovnány pod sebou.

Lineární ‚stack‘  $V_1(t)$  představuje odhad ‚typického‘ vlnového obrazu uvnitř celé sítě. Nyní se ‚stack‘  $V_1(t)$  postupně porovná se všemi seismogramy  $u_i(t)$ ,  $i = 1, \dots, N$ , a ve smyslu  $L_p$  normy, kde  $p$  se u této metody zpravidla volí 3, se odhadne časový posun  $\tau_i$ , pro nějž je  $L_p$  norma minimální. Podle vztahu (4) se spočítá nový lineární ‚stack‘, kde se za signál  $u_i(t - t_i^e)$  dosadí  $u_i(t - t_i^e - \tau_i)$ . Po korekci  $t_i^e + \tau_i$  jsou vlnové obrazy pod sebou ještě lépe zarovnány. Nový ‚stack‘  $V_1(t)$  proto bude mnohem přesněji reprezentovat odhad typického vlnového obrazu než předchozí.

Tento proces se několikrát zopakuje. Na konci, kdy se již časové korekce ani lineární ‚stack‘ nemění, jsou vlnové obrazy pod sebou velmi přesně zarovnány. Lineární ‚stack‘ je odhad typického vlnového obrazu uvnitř sítě, takže by měl být téměř bez šumu. Předpokládá se totiž, že přichodzí signál se promítne na všech stanicích a že naopak šum je na stanicích náhodný, takže při výpočtu funkce  $V_1(t)$  šum oproti hledanému signálu zeslábné (vysoké SNR – Signal to Noise Ratio).

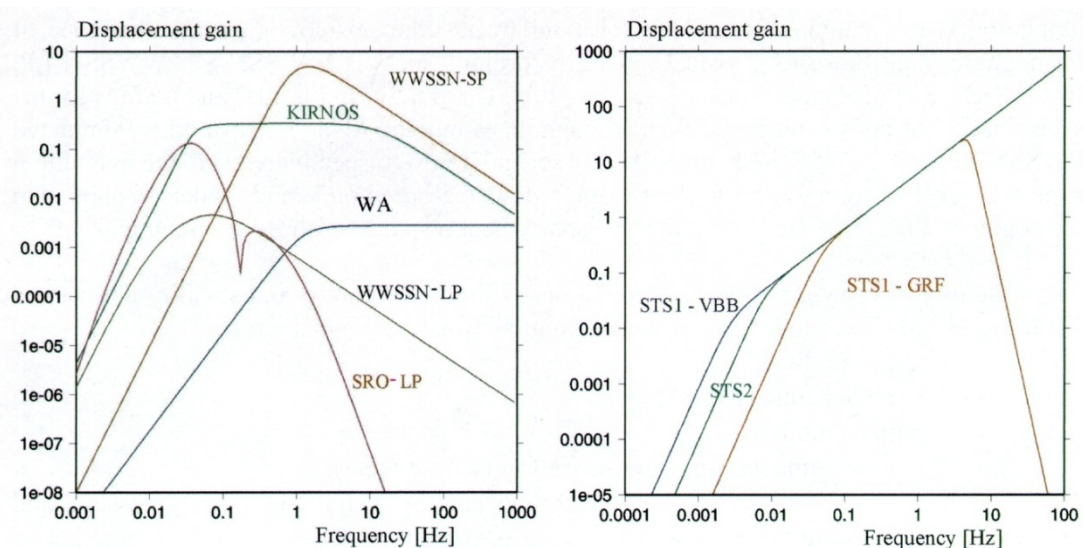
Lineární ‚stack‘ je proto vhodný pro odečtení času prvního nasazení. Čas příchodu vlny P na  $i$ -tou stanici pak spočítáme odečtením výsledné časové korekce  $t_i^c + \tau_i$  od času prvního nasazení měřeného na lineárním ‚stacku‘.

## 2.3 Zpracování dat

K dispozici jsem měla část dat z experimentu RETREAT, pro která bylo třeba určit čas prvního nasazení vlny P. Kromě manuálního měření s použitím softwaru Seismic Handler (SH), o němž je více informací v kapitole 2.3.3, jsem časy prvního nasazení měřila také pomocí poloautomatického programu XPICK (viz kapitola 2.3.2) vyvinutého právě pro data z experimentu RETREAT.

### 2.3.1 Širokopásmové a krátkoperiodické seismometry

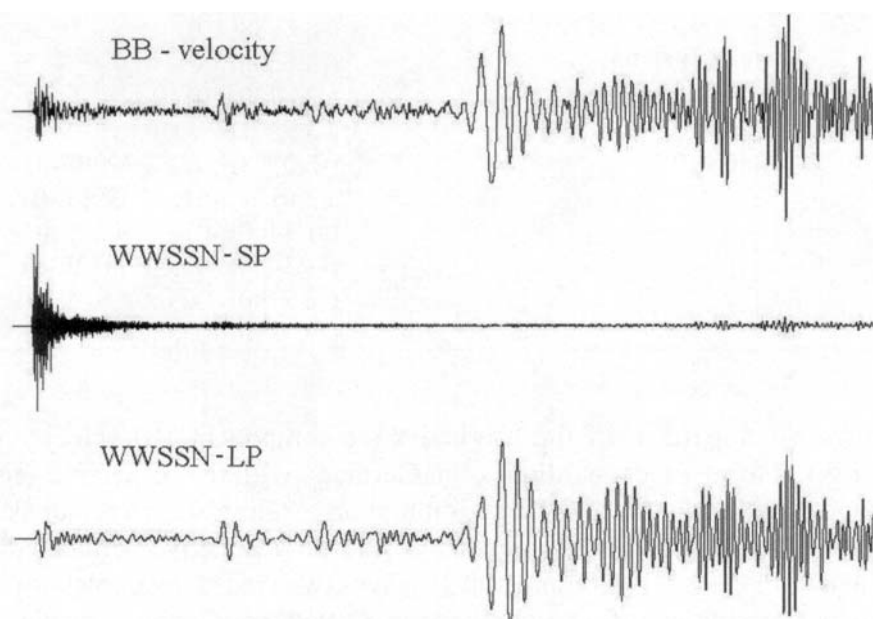
Přístrojové vybavení na stanicích v experimentu RETREAT nebylo jednotné. Každý typ seismografu má svou charakteristickou přenosovou funkci (obr. 2), která popisuje, jak je vstupní signál daným přístrojem zkreslován. Jistý interval frekvencí bývá zaznamenán věrně a zbylé frekvence jsou potlačeny. Aby data ze všech stanic bylo možné srovnávat, je po skončení experimentu nutné provést restituci (simulaci) dat na přenosovou charakteristiku vybraného seismometru. V našem případě byl zvolen Guralp CMG-40T. Jedná se o širokopásmový seismometr (BB – Broad Band) nezkrslující vlnový obraz v poměrně širokém oboru frekvencí (1s-30s), takže na záznamu je možné současně měřit časy příchodů vln P i S.



**Obr. 2** Na obrázku vlevo jsou přenosové charakteristiky některých klasických seismometrů a napravo jsou charakteristiky pro širokopásmové seismometry. Často se data ze širokopásmových seismometrů upravují právě pomocí přenosových charakteristik klasických seismometrů, zobrazených vlevo (Bormann, 2002).

V programech XPICK a SH jsem určila časy prvních nasazení vlny P z dat restituovaných na přenosovou charakteristiku seismografu Guralp CMG-40T. Při zpracování dat pro seismickou tomografii se často pracuje s krátkoperodickými signály a proto jsme posléze provedli restituci na přenosovou funkci klasického seismometru WWSSN-SP (World Wide Standard Station Network – Short Period, obr. 2).

Pro názornější představu o vlivu různých přístrojových charakteristik přikládám seismogramy (obr. 3) z různých typů seismometrů. Seismometry s charakteristikou WWSSN-SP propouští vysoké frekvence a WWSSN-LP (Long Period) naopak nízké frekvence.



**Obr. 3** Na horním obrázku je znázorněn záznam ze širokopásmového seismometru. Na prostředním je ten samý záznam po restituci na WWSSN-SP a na spodním po restituci na WWSSN-LP (Bormann, 2002).

### 2.3.2 Software XPICK

Autory programu XPICK jsou F.P. Lucente a D. Piccinini z INGV v Říme. Program dosud nebyl publikován a GFÚ byl poskytnut v rámci spolupráce na experimentu RETREAT. Program XPICK je napsán v MATLABu a je určen k poloautomatickému odečítání časů příchodů tří fází: P, S a SKS na seismogramech. XPICK je vhodný pro zpracovávání seismogramů z dočasných sítí, kde jsou stanice hustě rozmístěny (viz kapitola 1.2). Za způsob porovnávání vlnových obrazů autoři zvolili metodu ‚cross correlation‘, o níž se zmiňuji v kapitole 2.2.

Po spuštění prostředí MATLAB zadáme v komunikačním okně typ vlny, u níž chceme odečítat čas příchodu, například příkazem ‚xpick p‘ zadáváme vlnu P. Pro vlny S a SKS jsou ekvivalentní příkazy ‚xpick s‘, resp. ‚xpick sks‘. Zobrazí se dialogové okno s nabídkou datových souborů na discích. Vybereme jev dle

připraveného seznamu zemětřesení. V našem případě jsou data uložena na externím disku F: Lacie. Časy příchodů vln P se měří na vertikálních složkách Z třísložkových seismogramů. Příčné vlny (shear waves) S nebo SKS se měří na složkách rotovaných do souřadného systému paprsku a to tak, že vlna S, která bývá polarizovaná jako vlna SH na složce T a vlna SKS, polarizovaná jako vlna SV na složce Q. Rotaci provádí XPICK automaticky podle zadání fáze a nelze je měnit.

Otevře se hlavní okno a v něm se zobrazí seismogramy z jednotlivých stanic s vyznačenými teoretickými časy příchodů všech tří fází, vypočtenými podle radiálního sférického rychlostního modelu Země IASP91 (Kennett, 1991). Jednotlivé teoretické časy jsou barevně odlišeny (P – červená, S – zelená, SKS – fialová). V komunikačním okně jsou nabídnuty možnosti, které můžeme dále provést. Seismogramy lze přiblížit (zoom) a následně přefiltrovat (filtering / enough) nebo také ukončit měření (quit), pokud jsou záznamy například silně zašuměné a nelze tudíž měřit časy příchodu vln. Každý příkaz se vykoná zadáním příslušného písmene.

Po přefiltrování záznamů (parametry filtrace byly zadány s ohledem na odstranění šumu) je třeba vybrat seismogram s nejvyšším poměrem signálu k šumu a nejjasnějším prvním nasazením vlny. Vybraný seismogram z dané stanice se následně zobrazí zvětšený mezi dvěma záznamy ze sousedních stanic (dle abecedního seznamu stanic).

Program byl vytvořen tak, aby se na každém seismogramu odečítalo přímo první nasazení vlny. Na vybraném seismogramu proto určíme čas, ve kterém se domníváme, že vlna přišla. Dále je třeba vyznačit konec intervalu v délce přibližně jedné periody. Vybrané okno se automaticky rozšíří o několik vteřin na obě strany. Počet přidávaných vteřin, určili autoři programu empiricky a závisí na měřené fázi. Jsou to 3 s pro vlnu P a 10 s pro vlny S a SKS. Následně se spočítají korelace (viz kapitola 2.2) vyznačeného intervalu vybraného seismogramu se všemi ostatními seismogramy. Poté se na všech seismogramech objeví časy příchodu vlny P určené korelací vlnových obrazů s vybraným seismogramem. Podle hodnot korelací se jednotlivým měřením přiřadí váhy od 0 do 4. Nula je nejlepší hodnocení a hodnota váhy 4 znamená vyřazení dané stanice.

Kromě obrázku s vyznačenými časy prvních nasazení vznikne i druhý, na němž jsou jednotlivé seismogramy zarovnané podle časů příchodu. Pro přehlednost je to velmi užitečný obrázek, z kterého je okamžitě vidět, pokud se automaticky určený čas některé stanice více odchyluje. Velkou nevýhodou však je, že data na něm nejsou přefiltrována tak jako na prvním obrázku. U kvalitních jevů je patrné, že „picker“ zohledňoval především výrazná maxima či minima, protože ta bývají na obrázku seřazena co nejpřesněji pod sebou.

Dále máme možnost celý poloautomatický proces znovu zopakovat (repick) nebo výsledky prohlásit za uspokojivé (good) a nebo se pustit do ručního „přepickování“ (manual picking). Manuálně je možné změnit měření na libovolném seismogramu. Nejprve se přemístí čas příchodu fáze a poté je nutné



v komunikačním okně přiřadit měření manuálně i váhu (opět 0-4). Dále se program zeptá, jestli chceme upravit další seismogram, nebo manuální měření ukončit.

Program také nabízí možnost odstranit několik seismogramů najednou (exclude picks), pokud je považujeme za nesprávné. Celé měření ukončíme volbou příkazu ‚save picks‘.

### 2.3.3 Software Seismic Handler (SH)

Seismic Handler (SH) je program určený k analýze časového průběhu signálu z kontinuálních dat a je standardně užívaným programem při zpracování seismických záznamů. Jeho autorem je K. Stammler (Stammler, 1993) ze Seismologické observatoře Gräfenberg (SZGRF) v Německu. SH se stal standardním softwarem pro každodenní zpracování seismogramů i v Geofyzikálním Ústavě (GFÚ) Akademie věd České republiky. Veškerou dokumentaci k SH lze najít na webové stránce <http://www.seismic-handler.org/portal/wiki/ShmDocIndex>.

SH umí načítat data uložená ve třech různých formátech: GSE, AH a ‚Q-files‘. Poslední zmíněný formát byl vytvořen speciálně pro SH. Máme-li data k dispozici v jiném formátu, je nutné provést jejich konverzi pomocí nějakého jiného programu. Na GFÚ jsou data ukládána ve formátu miniSEED na počítači Bohema. Před zpracováním se proto konvertují do některého z výše vyjmenovaných formátů, což je v našem případě ‚Q-files‘. Ke každému tříšložkovému seismogramu vybraného jevu přísluší dva samostatné soubory s příponami \*.QHD a \*.QBN. První z nich je hlavičkový soubor, v němž je uveden např. název stanice, popis příslušné složky, délka záznamu a vzorkovací frekvence. Druhý soubor obsahuje binárně zapsaná data.

Všechna data (dvojice souborů \*.QHD a \*.QBN), která jsem zpracovávala, byla uložena na počítači Bohema ve složce DATA/RETREAT/Q\_FILE\_P/2004. K počítači Bohema se připojíme přes UNIXové prostředí. SH spustíme z konzole postupným zadáním příkazů ST a SHM. Otevřou se tři nová okna. Největší z nich, hlavní okno, je určeno k zobrazení seismogramů z jednotlivých stanic pro zvolený jev. Je na něm také stavová řádka, kterou se ovládá celý SH. Nad hlavním oknem se objeví menší podlouhlé okno, které slouží k prohlížení vybrané části některého z načtených seismogramů. Třetí okno se nachází zcela vlevo. Je to informativní okno, v němž se vypisují údaje o zpracovávaném jevu (Slowness, Azimuth, Latitude, Longitude, Distance, Depth, Date, Time). V tomto okně se také zadává označení měřené fáze a váha, kterou se danému označení času příchodu rozhodneme přiřadit podle přesnosti měření.

Před zahájením práce se seismogramy je vhodné mít k dispozici seznam jevů, které jsou v datech zaznamenány. Seznam obsahuje čas vzniku zemětřesení, lokaci ohniska (zeměpisnou šířku, délku a hloubku), magnitudo, epicentrální vzdálenost a ‚back‘ azimut, což je úhel mezi severním geografickým pólem a epicentrem zemětřesení při pohledu za stanice. Seznam všech jevů a informace o nich slouží k celkovému přehledu o kvalitě dat (magnitudo a místo zemětřesení) a rovněž

usnadňuje orientaci, protože v názvech souborů s příponami \*.QHD a \*.QBN vystupuje čas vzniku zemětřesení .

Pokud jsme si již vybrali jev, který chceme zpracovat, otevřeme jej v hlavním okně přes stavovou řádku kliknutím na **File** → **Read Q**. Objeví se standardní dialogové okno, v němž ve složce DATA/RETREAT/Q\_FILE\_P/2004 najdeme vybraný jev. V hlavním okně se načtou všechny seismogramy, které jsou pro daný jev k dispozici (tabulka 2 v kapitole 2.1).

Měřila jsem pouze vlnu P. Soubory s daty proto byly již připraveny tak, aby se načetla pouze složka Z. Pokud by se měla zpracovávat jiná fáze a data by tudíž nebyla předpřipravena, je vhodné provést rotaci ze souřadného systému ZNE do LQT a zobrazit si pouze složku, na které je signál nejzřetelnější. U vlny S to zpravidla bývá složka T a u fáze SKS složka Q (viz kapitola 2.3.2).

Dále je nutné do informativního okna načíst údaje o hypocentru (zeměpisná poloha, hloubka...). Kliknutím na **Save** → **Recover Evt File** se opět zobrazí dialogové okno s uloženými soubory. Ve složce DATA/RETREAT/Q\_FILE\_P/2004 vybereme .QBN soubor se stejným názvem, jako má načtený jev.

Zatím se do informativního okna nenačetla hodnota epicentrální vzdálenosti ani ‚back‘ azimut. Při spuštění SH je nutné zadat stanici, vzhledem ke které se mají epicentrální vzdálenost a ‚back‘ azimut počítat. Na stavové řádce v hlavním okně otevřeme nabídku **Specials** → **Reference Station**, kde je při každém spuštění SH nutné zadat některou stanici. Je vhodné, aby se vybraná stanice nacházela spíše někde uprostřed pokryté oblasti než na jejím okraji. V našem případě jsme za tímto účelem vybrali stanici SFIR (viz obr. 1 v kapitole 2.1). V tomto okamžiku je možné načíst epicentrální vzdálenost a backazimuth pomocí **Locate** → **External Loc**. Data jsou již připravena ke zpracování. Ještě je možné velikost seismogramů zobrazených v hlavním okně upravit v nabídce **Specials** → **Setup** .

Je-li signál oproti šumu silný, lze téměř bez problémů rozeznat i na malých seismogramech v hlavním okně okamžik příchodu vlny P. Vždy je však lepší nechat SH spočítat teoretické časy prvního nasazení zaškrtnutím vybraných fází v **Locate** → **Theo (Tables)**. Na každém seismogramu se objeví zelené označení teoretického času příchodu s názvem příslušné fáze. K výpočtu teoretického času prvního nasazení se používá radiální model rychlostního rozložení uvnitř Země IASP91 (Kennett, 1991).

Dalším užitečným usnadněním zpracovávání seismogramů v SH je možnost setřídít je podle epicentrální vzdálenosti. Seismogramy se seřadí od stanice, která je nejvíce vzdálená od hypocentra zemětřesení, k té nejbližší kliknutím na **Trace List** → **Sort Dist** .

Před samotným měřením času příchodu vlny je nutné zvětšit si okolí teoretického času příchodu. Pravým tlačítkem myši si vyznačíme šířku oblasti na kterémkoli seismogramu. Takto vyznačená část seismogramu se zobrazí v horním podlouhlém okně. Chceme-li přiblížit okolí času příchodu vlny P i v hlavním okně,

stiskneme písmeno ,s' na klávesnici počítače. Původně označená část se roztáhne na šířku hlavního okna. Takto si můžeme seismogramy v hlavním okně libovolně zvětšit. Čas příchodu vlny je nutné určovat v horním podlouhlém okně, v němž jsou amplitudy dostatečně velké. Vzhledem k tomu, že periody vln P se pohybují okolo 1s, je doporučeno, aby oblast zobrazená v horním okně byla široká 10s. Šířka záznamu v hlavním okně by měla být taková, aby byl zřetelný vlnový obraz.

Aby se čas nasazení vlny určil co nejpřesněji, měříme místo skutečného prvního nasazení korelované první extrémy, které se nacházejí co nejbližší skutečnému času prvního nasazení. Vybraný extrém musí být patrný na všech záznamech. Tvar seismogramu závisí na epicentrální vzdálenosti, takže je nezbytné udělat si přehled o tom, jak se křivka vyvíjí na jednotlivých stanicích. Což však vzhledem k tomu, že v hlavním okně jsou seismogramy z jednotlivých stanic dostatečně zvětšené a navíc seřazené podle epicentrální vzdálenosti, není problém.

V horním okně si postupně na všech stanicích detailně prohlédneme okolí času prvního nasazení. Pokud na některé stanici není vybraný extrém na první pohled patrný, můžeme záznam porovnat s tvarem křivky na jiné stanici. Kliknutím na seismogram prostředním tlačítkem myši je totiž možné přenášet vyznačenou část na jiné seismogramy. Pokud si přesto nejsme jisti, kde se zvolený extrém nachází, je lepší stanici vynechat, aby se do měření zbytečně nevnášely chyby. Stále nás však zajímá skutečný čas příchodu vlny. Proto se na konci měření vyznačí tzv. ,absolutní pick', což je skutečný čas prvního nasazení, označený na stanici, na které je v porovnání s ostatními stanicemi nejzřetelnější. Označenému místu absolutního času příchodu vlny jsem přiřazovala název ,P\_abs'. Ostatní měření se na všech seismogramech jmenují shodně pouze ,P' podle dané fáze.

Kvalitu záznamu na každém seismogramu ohodnotíme číselnou hodnotou (váha), která se může pohybovat od 1 do 10. Hodnota 1 se přiřazuje nejpřesnějšímu měření, tj. s přesností jednoho vzorku digitálního záznamu, v našem případě 0.05s. Podle mého názoru není možné využít celou škálu tak, aby hodnocení bylo jednotné. Měření, jejichž přesnost by byla horší než 0.2s (váha 3) jsem vyloučila. Váha i pojmenování ,picku' se v SH zadávají do informativního okna.

Po dokončení měření je výstupem tzv. ,evt-file', který se vytvoří, klikneme-li v hlavním okně na **Work** → **Final Parameters**. ,Evt-file' je textový soubor, v němž jsou uloženy hodnoty všech změřených časů s příslušným označením. Název souboru se generuje automaticky podle pojmenování původního jevu (datum vzniku). Soubory se ukládají do složky home/bohema/evtout, v níž jsem do názvů doplňovala i časy vzniku zemětřesení. Podle toho, jestli byl daný záznam před měřením přefiltrován nebo ne, jsem výstupní soubor přesunula do složky home/bohema/evtout/P\_RETREAT\_WWSSN resp. P\_RETREAT\_CMG\_40T .

Pokud se v průběhu měření ukáže, že záznam není dostatečně kvalitní, a chceme jeho zpracování ukončit, aniž by se vytvořil výstupní soubor, klikneme na **Work** → **Cancel Parameters** .

## 3 Výsledky

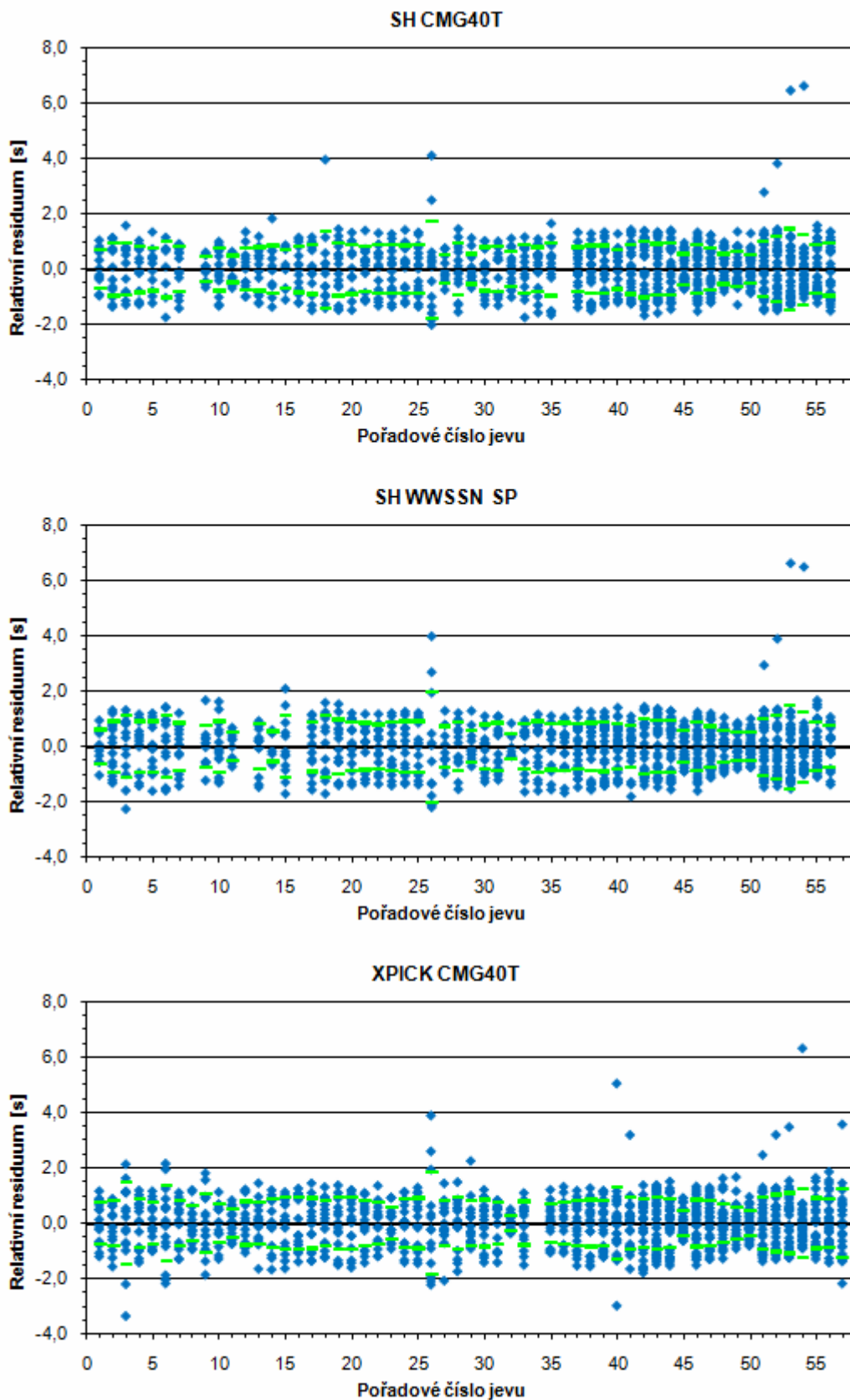
### 3.1 Srovnání poloautomatického a manuálního měření

V této kapitole prezentuji a srovnávám tři druhy měření časů příchodu vln P na datovém souboru 57 zemětřesení (tabulka 2 v kapitole 2.1) na 40 stanicích (tabulka 1 v kapitole 2.1). Jevy, které jsem měřila, nebyly vybrány speciálně pro tuto práci. Jelikož je experiment RETREAT mezinárodní (kapitola 2.1), data byla ke zpracování rozdělena mezi jednotlivé skupiny. Dostala jsem přidělen seznam asi 100 zemětřesení, která jsem měla za úkol změřit. Z přiděleného seznamu se mi podařilo alespoň jedním ze tří způsobů ‚pickování‘ určit čas prvního nasazení právě u 57 jevů (tabulka 2). V kapitole 2.1 jsem také uvedla, že v experimentu bylo postaveno okolo 50 stanic. V tabulce 1 je však uvedeno pouze 40 stanic. Jsou to jen ty, z nichž jsem během zpracovávání dat změřila alespoň jeden seismogram. Některé stanice se nacházely v blízkosti měst (RSMR, San Marino) a nebo v průmyslovém šumem zatížené oblasti Pádské nížiny (BARR, RAVR) a tudíž ne vždy bylo možné měřit s dostatečnou přesností. Navíc data, která jsem zpracovávala, představují pouze 1/5 dat zaznamenaných během celé doby trvání experimentu (tabulka 2), takže ne všechny stanice byly v danou dobu v provozu.

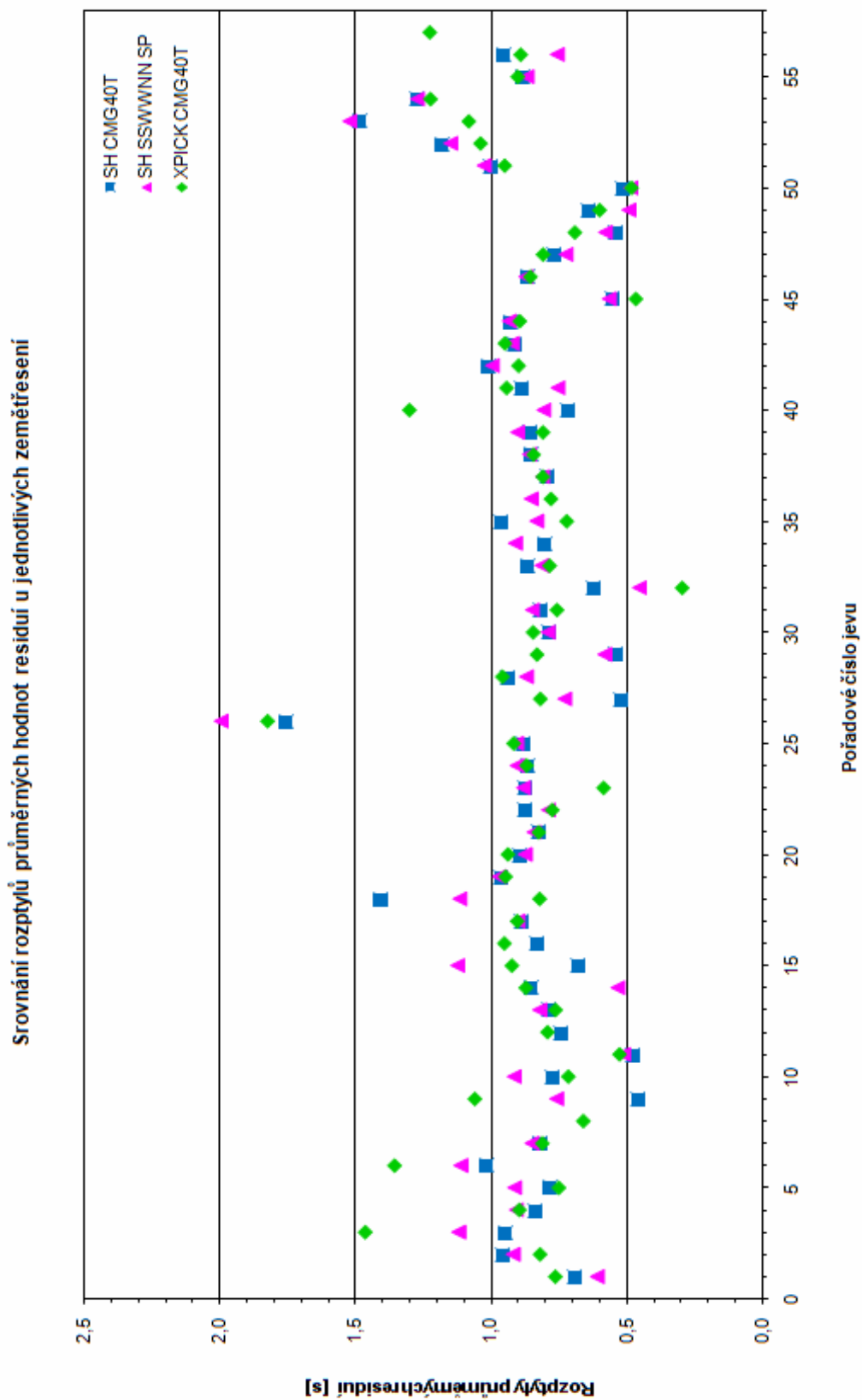
Na obr. 4 jsou vynesena relativní residua, spočtená podle vztahu (2), a jejich rozptyl, vypočítaný vždy pro jedno zemětřesení. Rozptyly relativních residuí  $s_j$  u  $j$ -tého jevu jsem počítala podle vztahu

$$s_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_j} \text{RelRes}_{ij}^2}{N_j - 1}}, \quad (5)$$

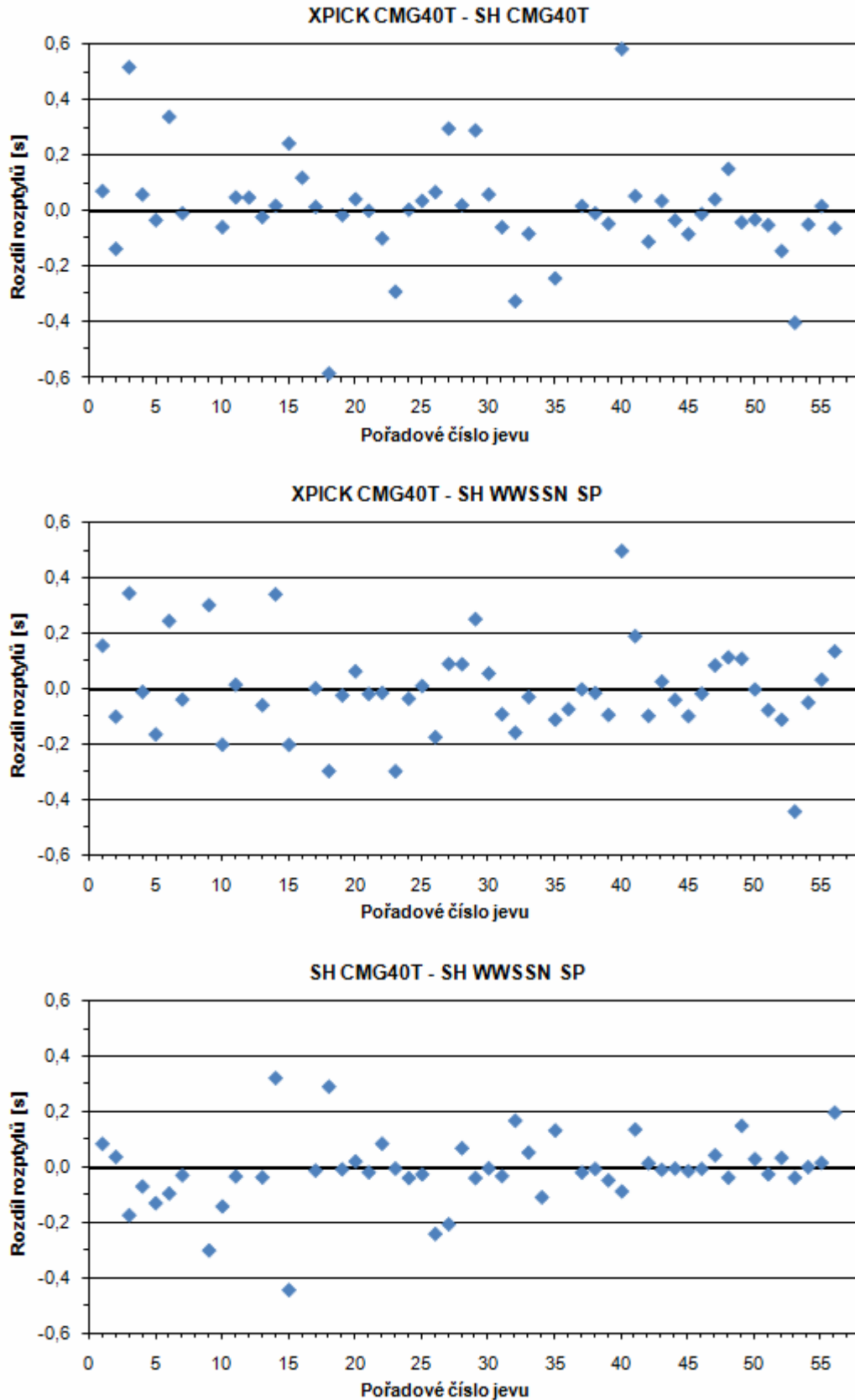
kde  $N_j$  je počet stanic, na nichž byl  $j$ -tý jev zaznamenán. Výraz (5) je modifikací vztahu pro výpočet výběrové směrodatné odchylky aritmetického průměru (English, 1999/2000), kde se navíc dělí odmocninou z celkového počtu stanic  $N_j$ . Průměrná hodnota všech relativních residuí jednoho jevu je z definice (2) rovna nule.



**Obr. 4** Relativní residua a jejich rozptyl pro každé zemětřesení. Rozptyly jsou vypočteny dle vztahu (5). Na horizontální ose jsou pořadová čísla jevů, viz tabulka 1 v kapitole 2.1.



**Obr. 5** Rozptyly průměrných hodnot relativních residuí pro každé zemětřesení (viz obr. 4). Pro srovnání jsou v grafu vyneseny hodnoty rozptylů ze všech tří datových souborů najednou.



**Obr. 6** Rozdíly rozptylů residuů změřených různými způsoby pro každý jev. Z názvu každého grafu je patrné, ze kterých dvou datových souborů jsou zobrazené hodnoty rozdílu vypočteny. Pořadí jednotlivých členů je v názvu zachováno.

V průměru se residua ze všech tří typů měření chovají stejně (obr. 4). Anomální hodnoty (velká residua např. u jevů č. 26, 40, 41, 51-54) ukazují, že pokud se projevují u všech způsobů měření stejně (jev 26, 51-54), pak je lze vysvětlit chybou na záznamu (např. špatný čas). Naopak, pokud se objeví pouze u jednoho typu měření, pak je lze přisoudit právě danému způsobu měření (SH CMG-40T: 14, 18; XPICK: 3, 40, 41, 57). Rozptyly (obr. 5) a především jejich rozdíly (obr. 6) naznačují, že manuální měření jsou přesnější (obr. 6, dolní část). Větší rozptyl u prvních 10 jevů u všech metod může odrážet i počáteční nezkušenost interpretátora.

Dále sledují hodnoty průměrných relativních residuí a jejich rozptyl na jednotlivých stanicích (obr. 7-10). Zde již průměrné hodnoty nejsou rovny nule jako průměrné hodnoty residuí pro každé zemětřesení, viz vztah (5). Průměrnou hodnotu relativního residua  $RelRes_i$  na  $i$ -té stanici vypočteme podle vztahu

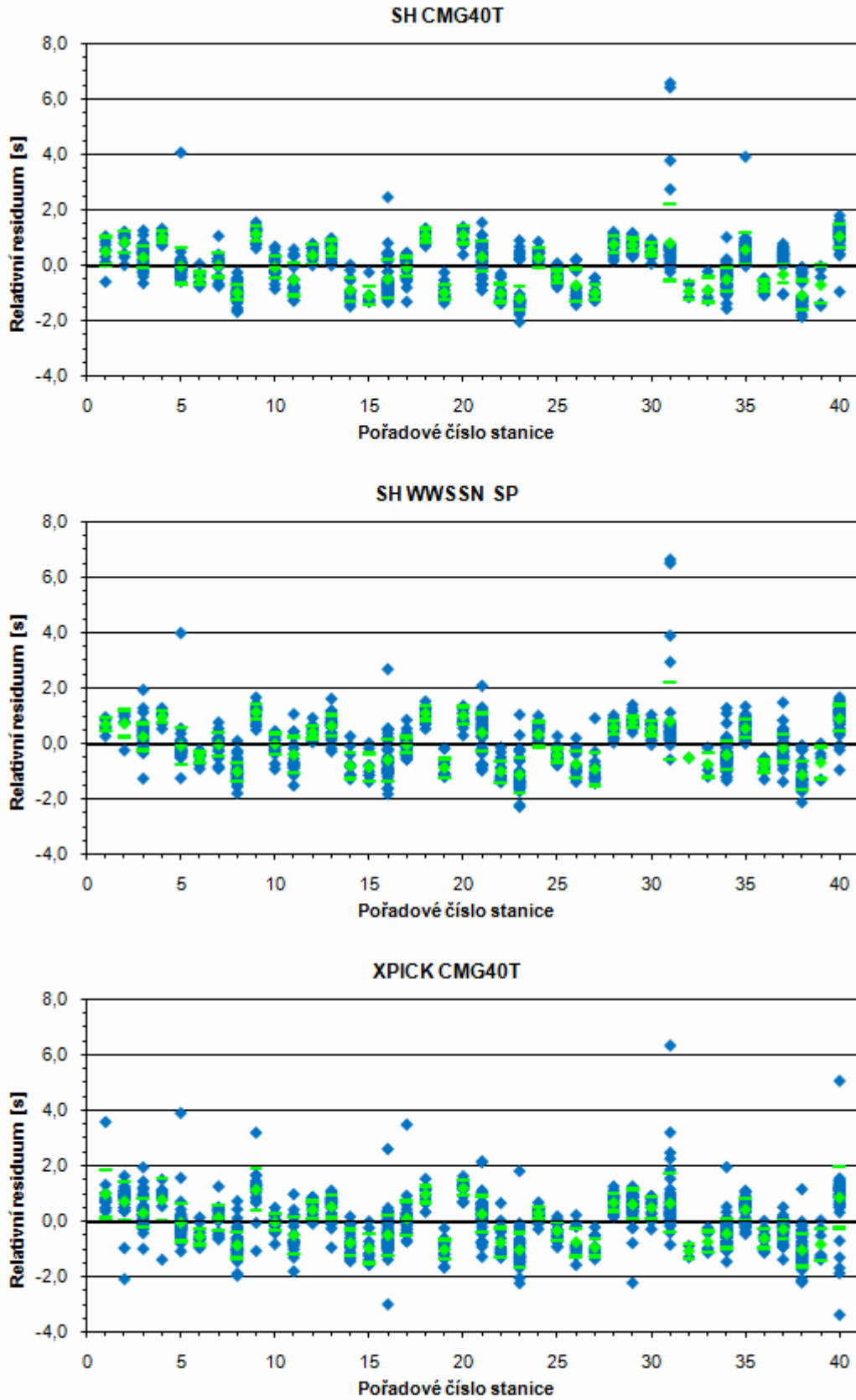
$$RelRes_i = \frac{\sum_{j=1}^{N_i} RelRes_{ij}}{N_i}, \quad (6)$$

kde  $N_i$  je počet jevů zaznamenaných na  $i$ -té stanici. Rozptyl  $s_i$  pak spočteme podle vztahu

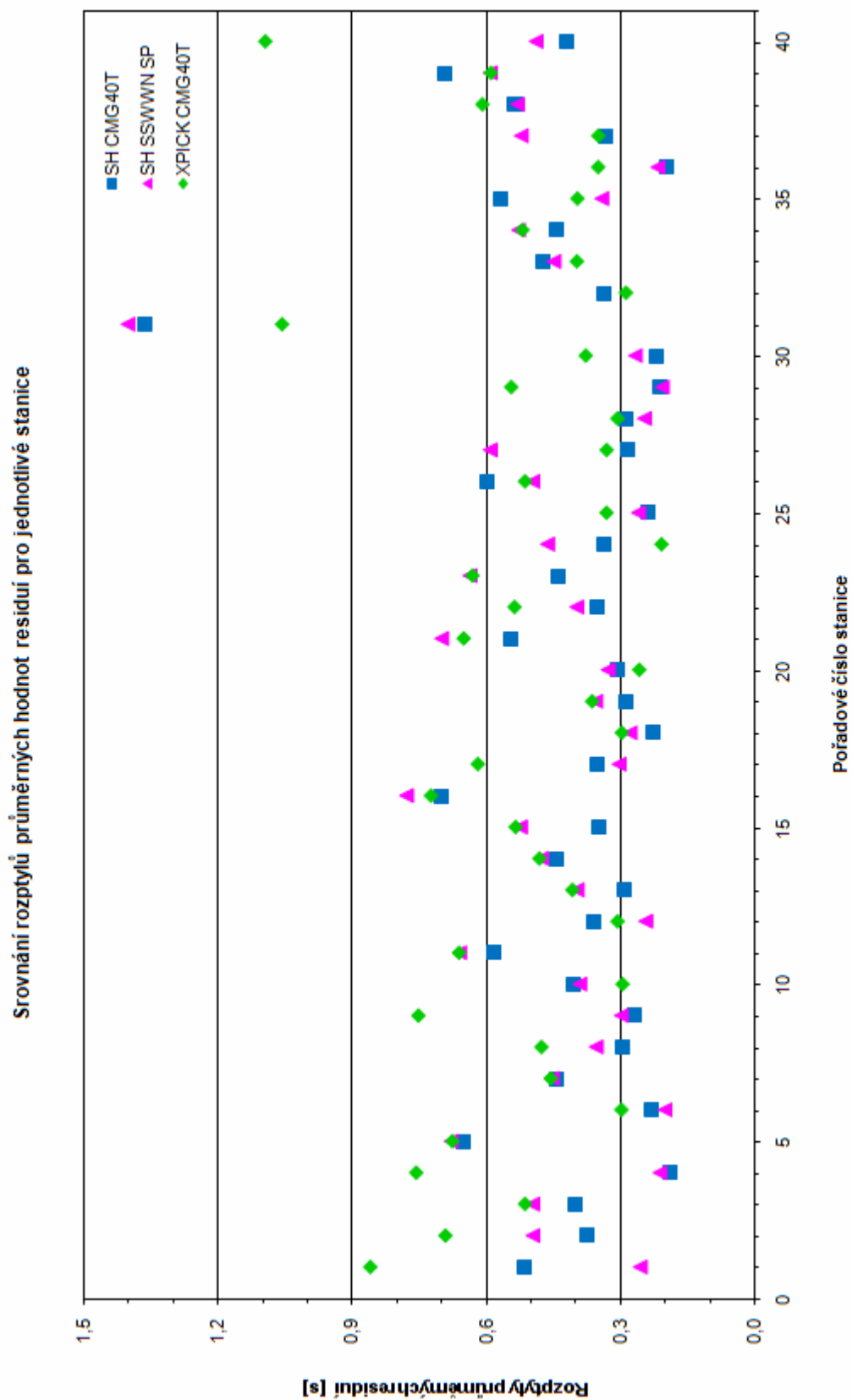
$$s_i = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{N_i} (RelRes_i - RelRes_{ij})^2}{N_i - 1}}. \quad (7)$$

Nenulové průměrné hodnoty relativních residuí na jednotlivých stanicích odrážejí strukturu pod stanicemi. Nejmenší rozptyly měřených hodnot jsou pro SH CMG-40T (obr. 7, nahoře). Variace rozdílů rozptylů (obr. 9) vyhodnocuje automatický „picker“ XPICK jako nejméně spolehlivý. Na spodním grafu jsou rozdíly rozptylů průměrných hodnot residuí, měřených SH CMG-40T a SH WWSSN-SP, viditelně přimknutější k nulové hodnotě ve srovnání s ostatními dvěma grafy. Podobně obr. 10 s rozdílem průměrných hodnot relativních residuí ukazuje, že tyto hodnoty jsou převážně v intervalu  $(-0.2; 0.2)s$ , pokud srovnáváme XPICK s SH (horní a prostřední graf), zatímco rozdíl těchto hodnot, pokud jsou měřeny SH na záznamech CMG-40T nebo simulujících WWSSN-SP (spodní graf), jsou až na výjimky v intervalu  $(-0.1; 0.1)s$ , což je v souladu s přesností výsledků ve strukturních studiích litosféry (Plomerová a kol., 2006).

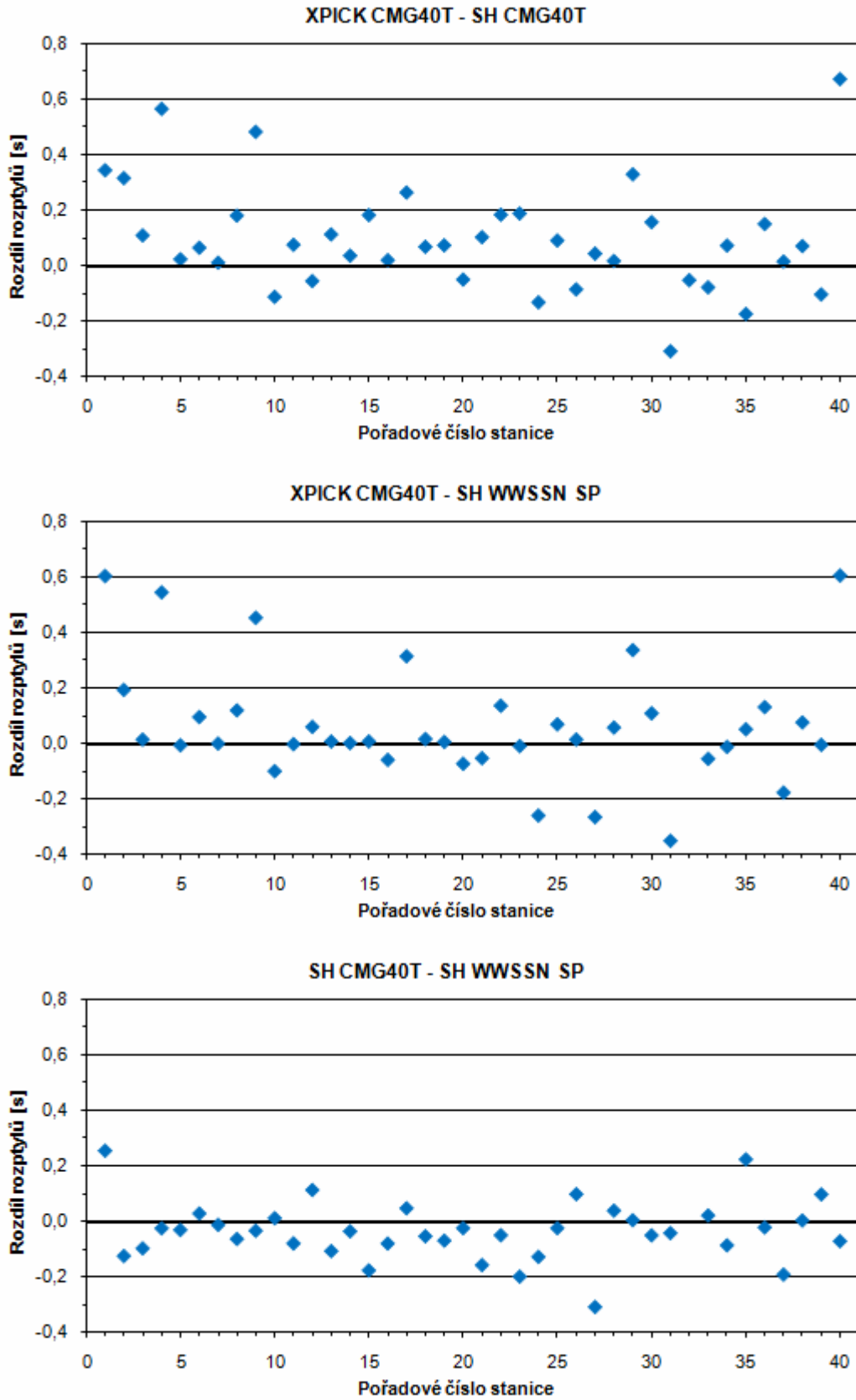




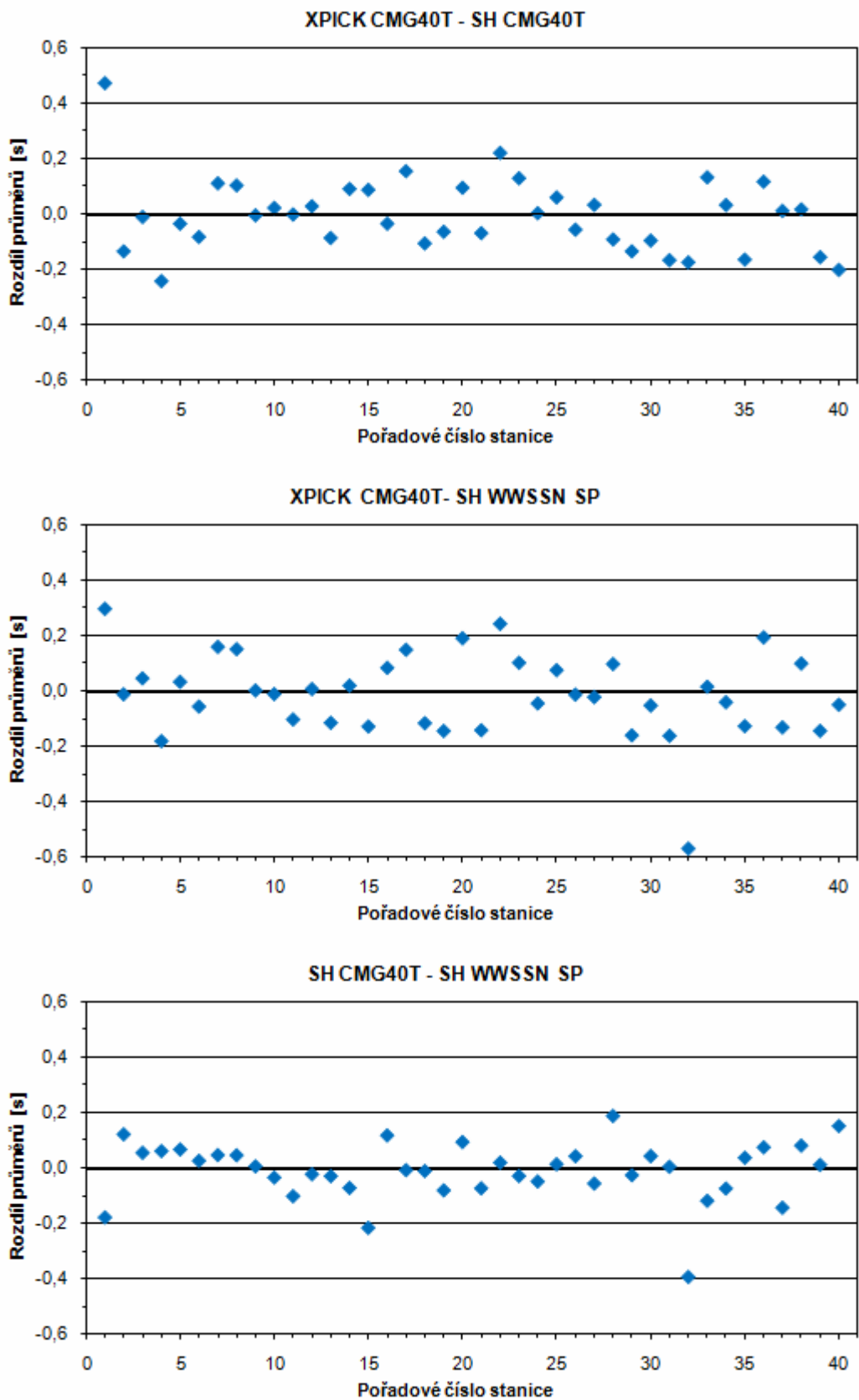
**Obr. 7** Relativní residua a jejich průměrné hodnoty s rozptylem na stanicích podle vztahu (6), resp. (7). Na vodorovné ose jsou pořadová čísla stanic, viz tabulka 1 v kapitole 2.1.



**Obr. 8** Rozptyly průměrných hodnot relativních residuí (viz obr. 7). Průměry se vztahují k jednotlivým stanicím.



**Obr. 9** Rozdíly rozptylů průměrných hodnot relativních residuí pro každou stanici (viz obr. 7 a 8).

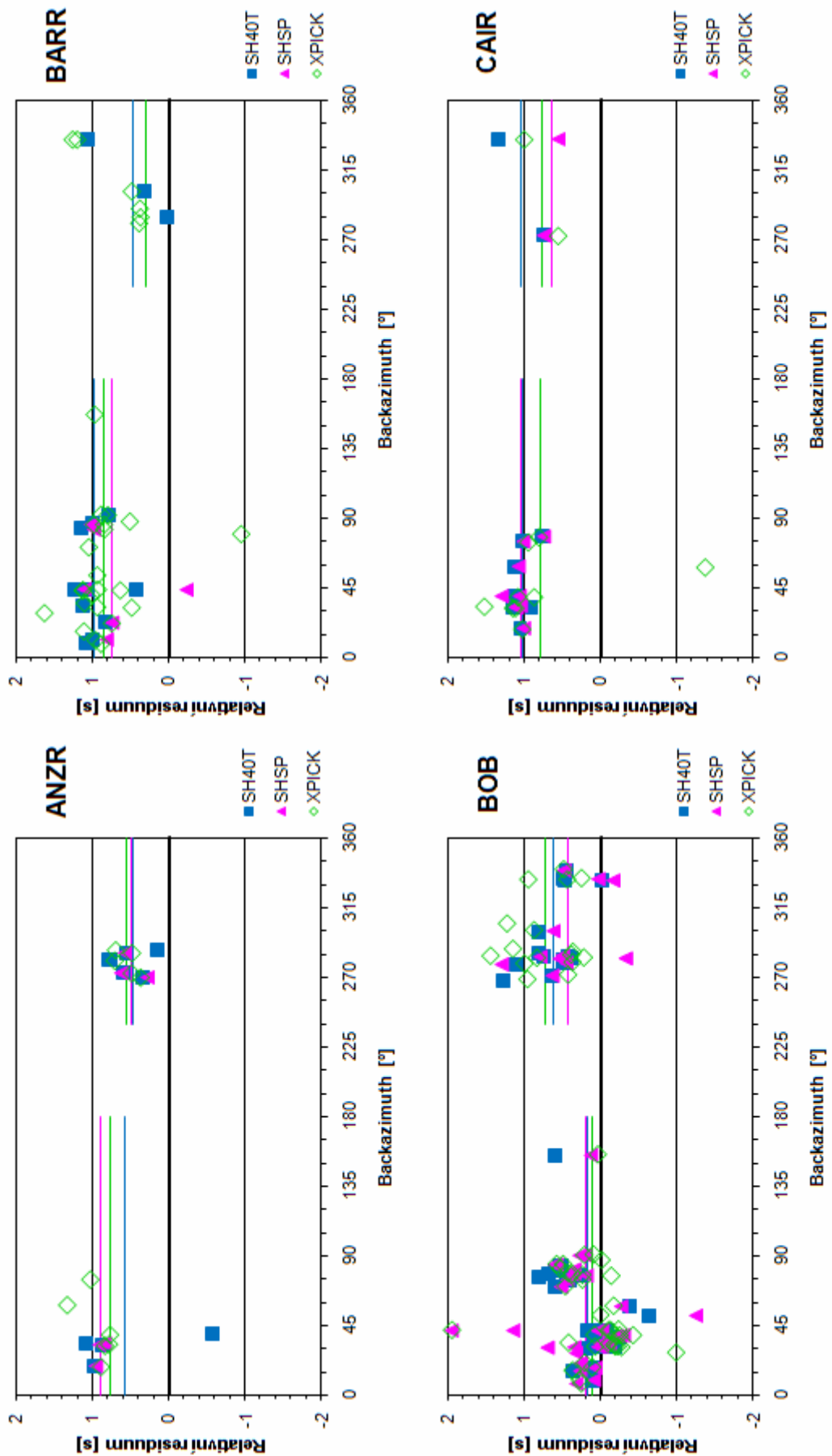


**Obr. 10** Rozdíly průměrných hodnot relativních residuí na každé stanici. Rozdíly (viz obr. 7) jsou opět vypočteny pro všechny tři kombinace datových souborů a měření.

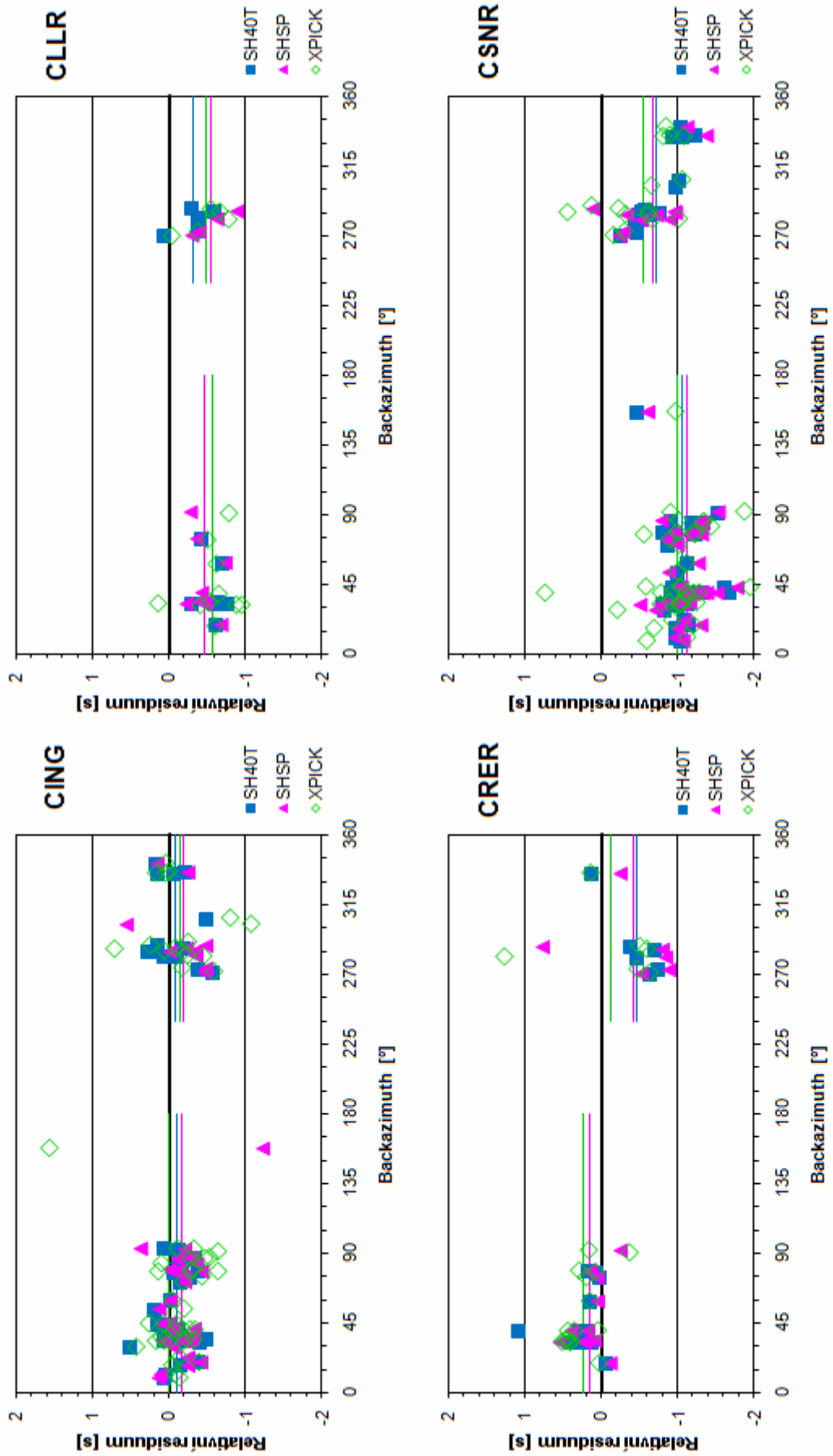
## 3.2 Směrová závislost relativních residuí

Větší rozptyl na jednotlivých stanicích (obr. 7), nemusí odrážet jen nepřesnosti měření, ale i efekty struktur pod stanicemi, pokud zde existuje výrazná směrová závislost. Větší rozptyl je např. u stanic č. 8 (CSNR), 21 (MURB), 23 (PIIR). Proto sleduji i vliv způsobu měření na tuto závislost. Na obr. 11-20 jsou vynesena residua v závislosti na ‚back‘ azimutu pro každou stanicí. Podle typu závislosti lze rozlišit 3 skupiny stanic. První skupina má relativně vůči svému celkovému průměru residua v azimutech  $0^{\circ}$ - $120^{\circ}$ , tedy zemětřesení přibližně z ‚východu‘, větší než v azimutech  $260^{\circ}$ - $360^{\circ}$ , zemětřesení ze ‚západu‘, pro druhou skupinu je to obráceně a třetí skupina nemá výraznou azimutální závislost, nebo nemá dostatek dat, aby tato závislost mohla být zjištěna.

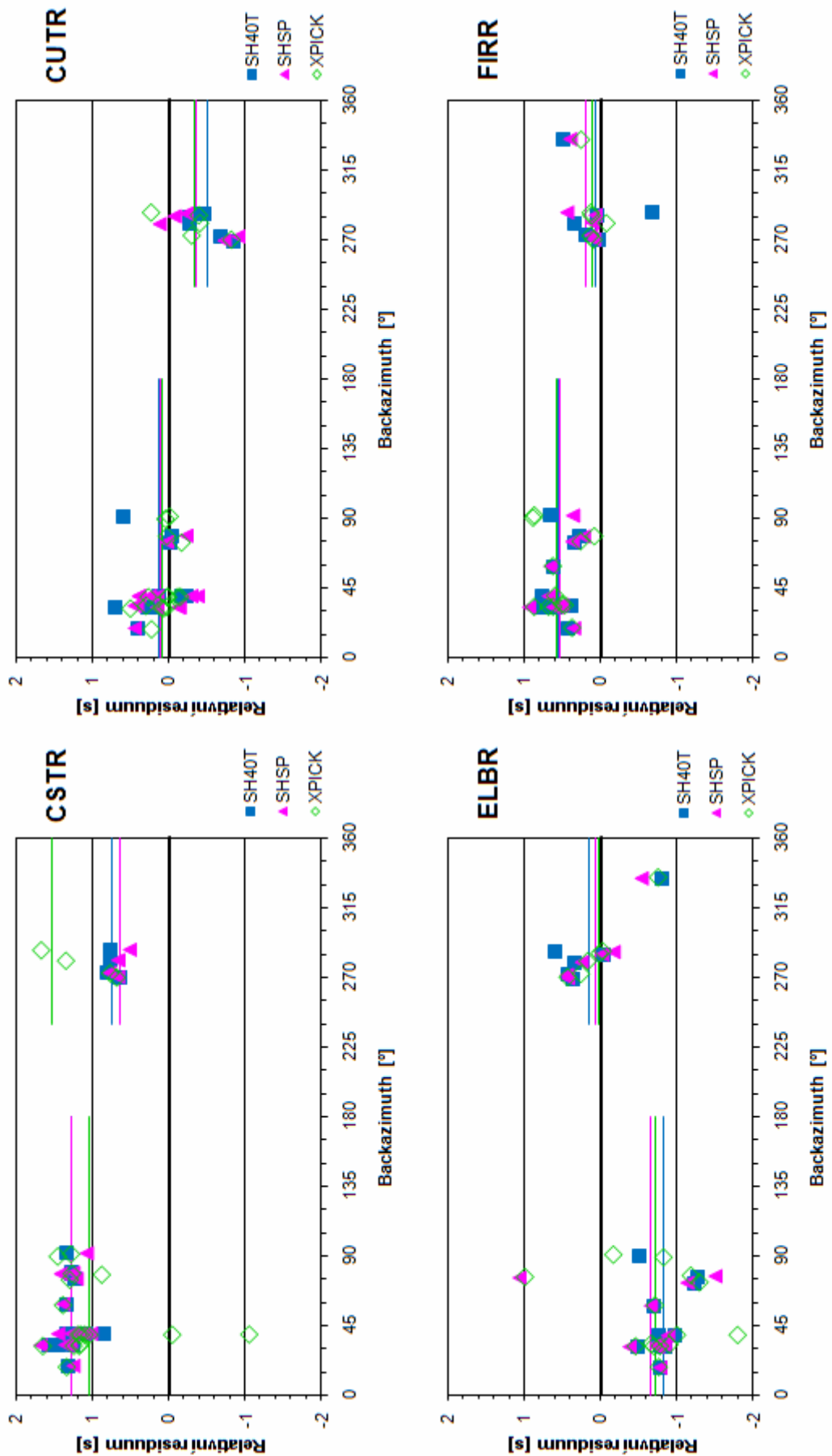
Výše zmíněná vlastnost relativních residuí, tj. výrazná závislost na azimutu tak, že se vzájemně liší relativní rychlosti vln šířících se přibližně z východu a ze západu, není nahodilá. Stanice s podobným rozdílem tvoří jasná uskupení (obr. 21-23). Stanice, pro jejichž rozdíly residuí z východu a ze západu  $\Delta R = RelRes_E - RelRes_W$  platí  $\Delta R \geq 0.1s$ , se nacházejí v Adriatické desce a jsou označeny červeně. Stanice, pro jejichž rozdíl residuí platí  $\Delta R \leq -0.1s$ , jsou umístěny na Tyrrenske straně poloostrova, západně od hřebenu Severních Apenin (žluté). Stanice, jejichž rozdíl residuí je v intervalu  $(-0.1; 0.1)s$ , jsou považovány za stanice bez výrazné směrové závislosti (bílé). Charakteristické uskupení stanic a hranice mezi nimi je nezávislá na způsobu měření a je v souladu s výsledky směrové závislosti relativních residuí počítaných z bulletinových dat permanentních stanic v oblasti, obr. 22 dole (Plomerová a kol., 2006). Částečně se v závislosti může uplatňovat vliv subdukující Adriatické desky, projevující se jako vysokorychlostní heterogenita, avšak je i odrazem anizotropie ve svrchním plášti, jejíž existence a laterální variabilita byla prokázána při analýze štěpení příčných vln (obr. 23; Plomerová a kol., 2006; Salimbeni a kol., 2007).



Obr. 11 Závislost residuí na ‚back‘ azimutu na stanicích ANZR, BARR, BOB a CAIR

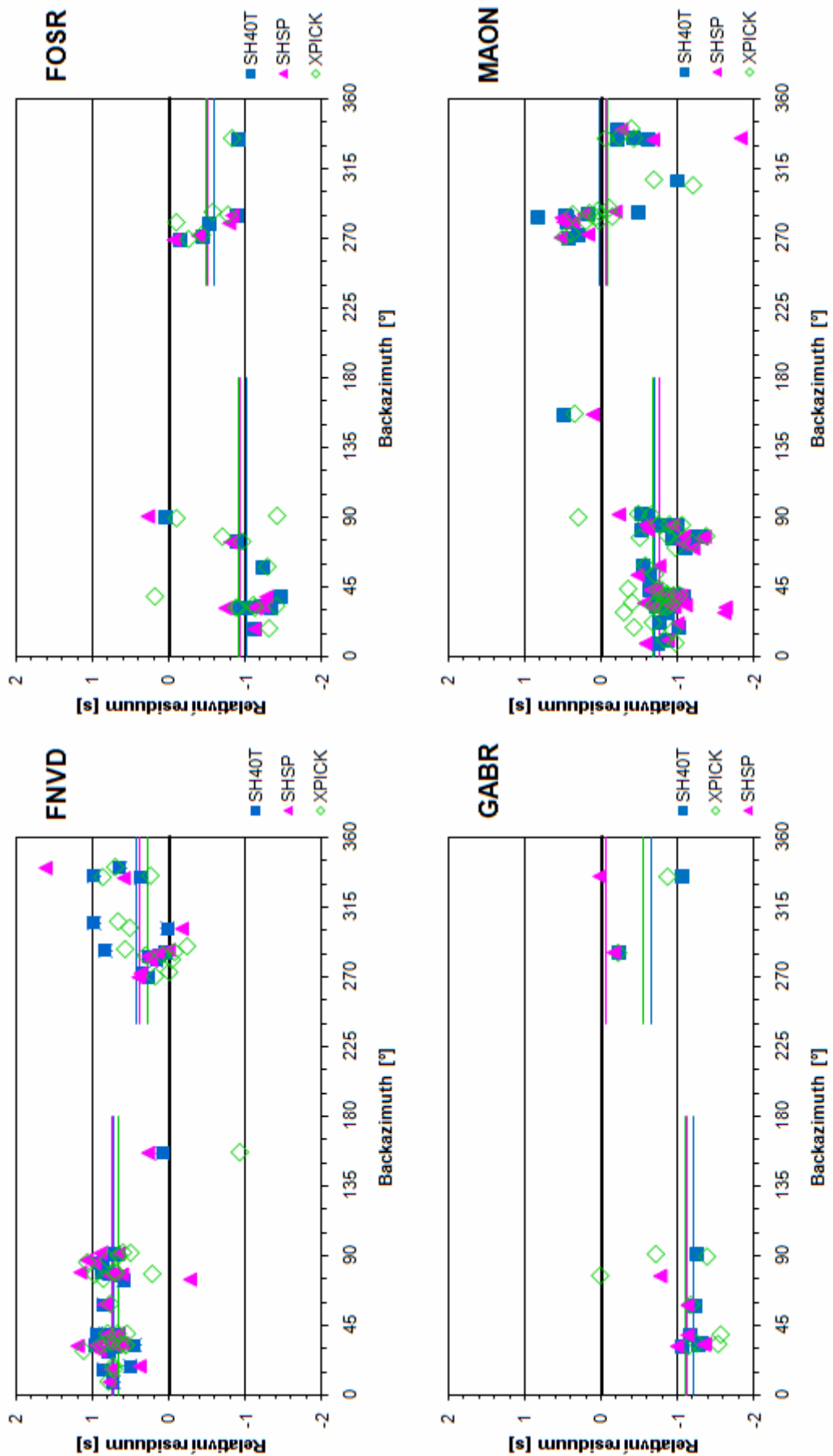


Obr. 12 Závislost residuí na 'back' azimutu na stanicích CING, CLLR, CRER, CSNR

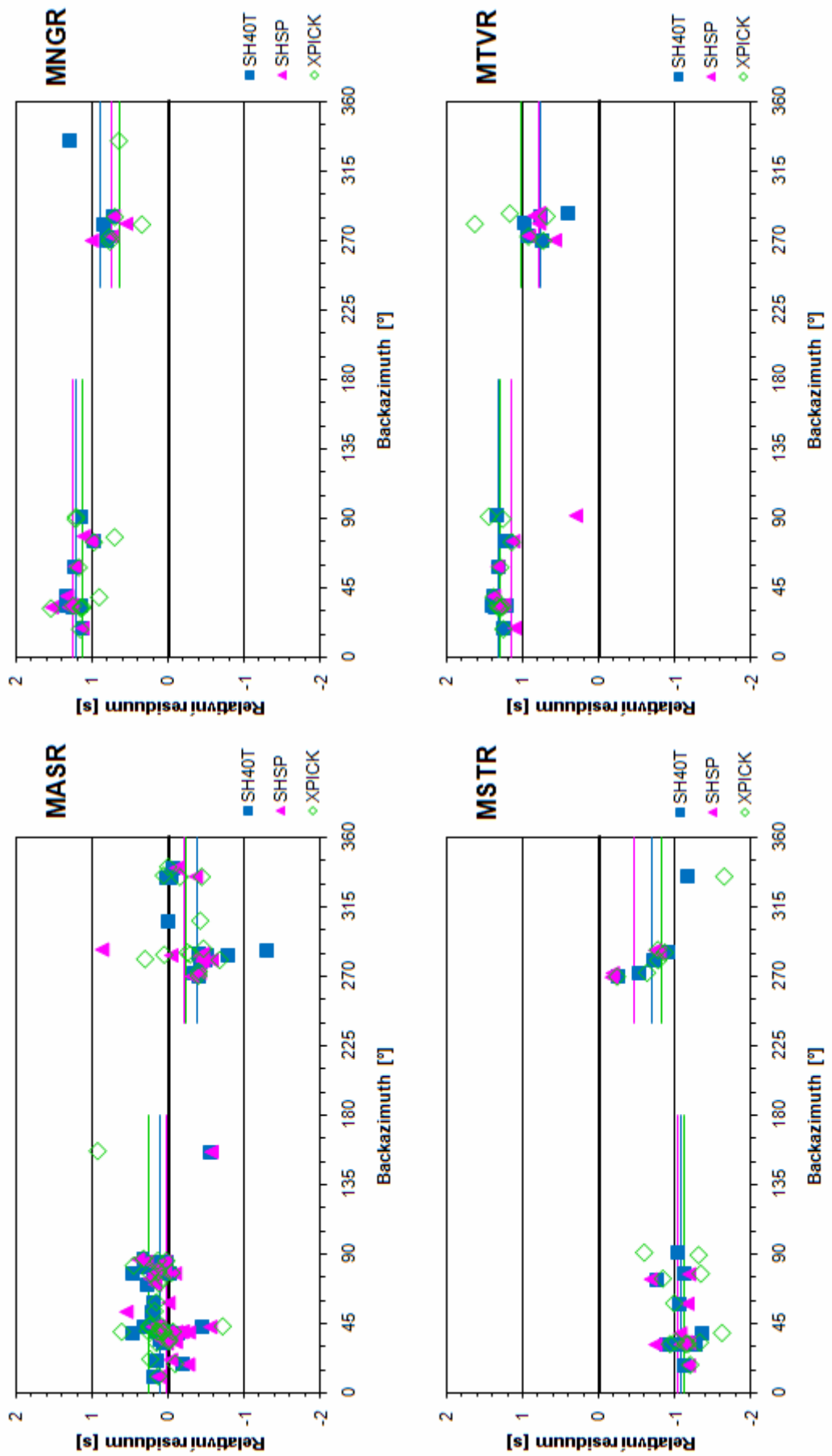


Obr. 13 Závislost residuí na 'back' azimutu na stanicích CSTR, CUTR, ELBR, FIRR

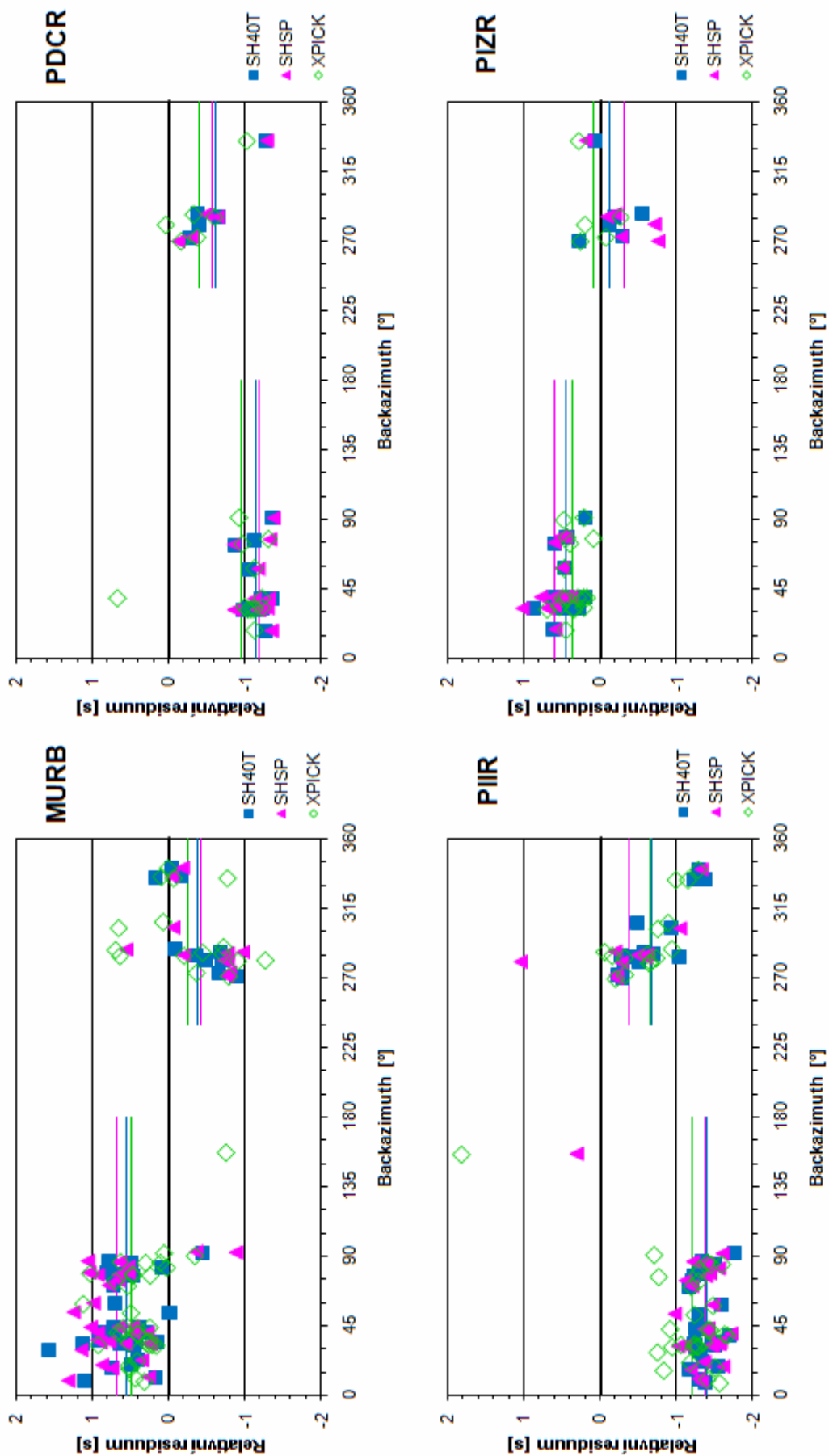




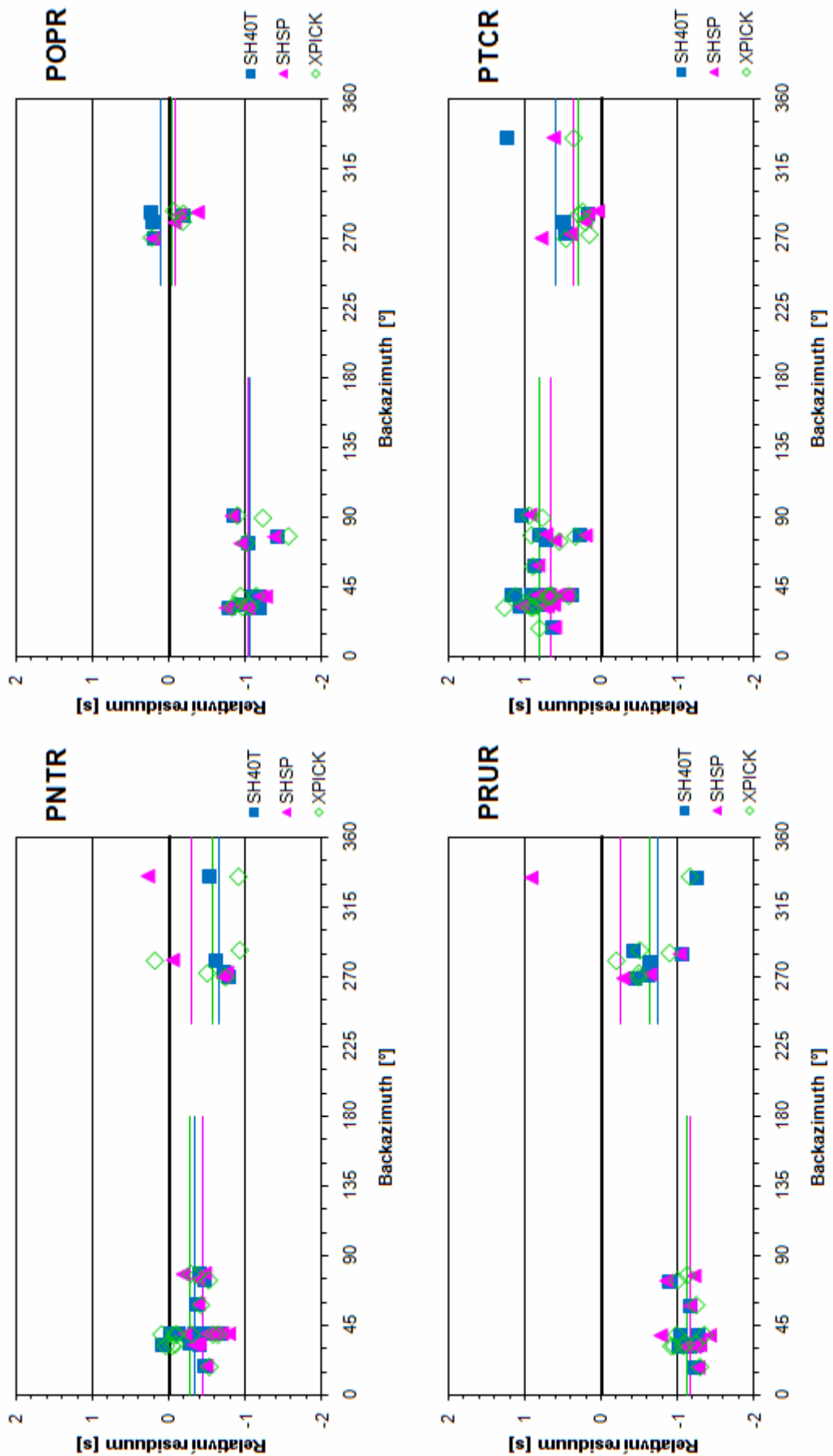
Obr. 14 Závislost residuí na ‚back‘ azimutu na stanicích FNVD, FOSR, GABR, MAON



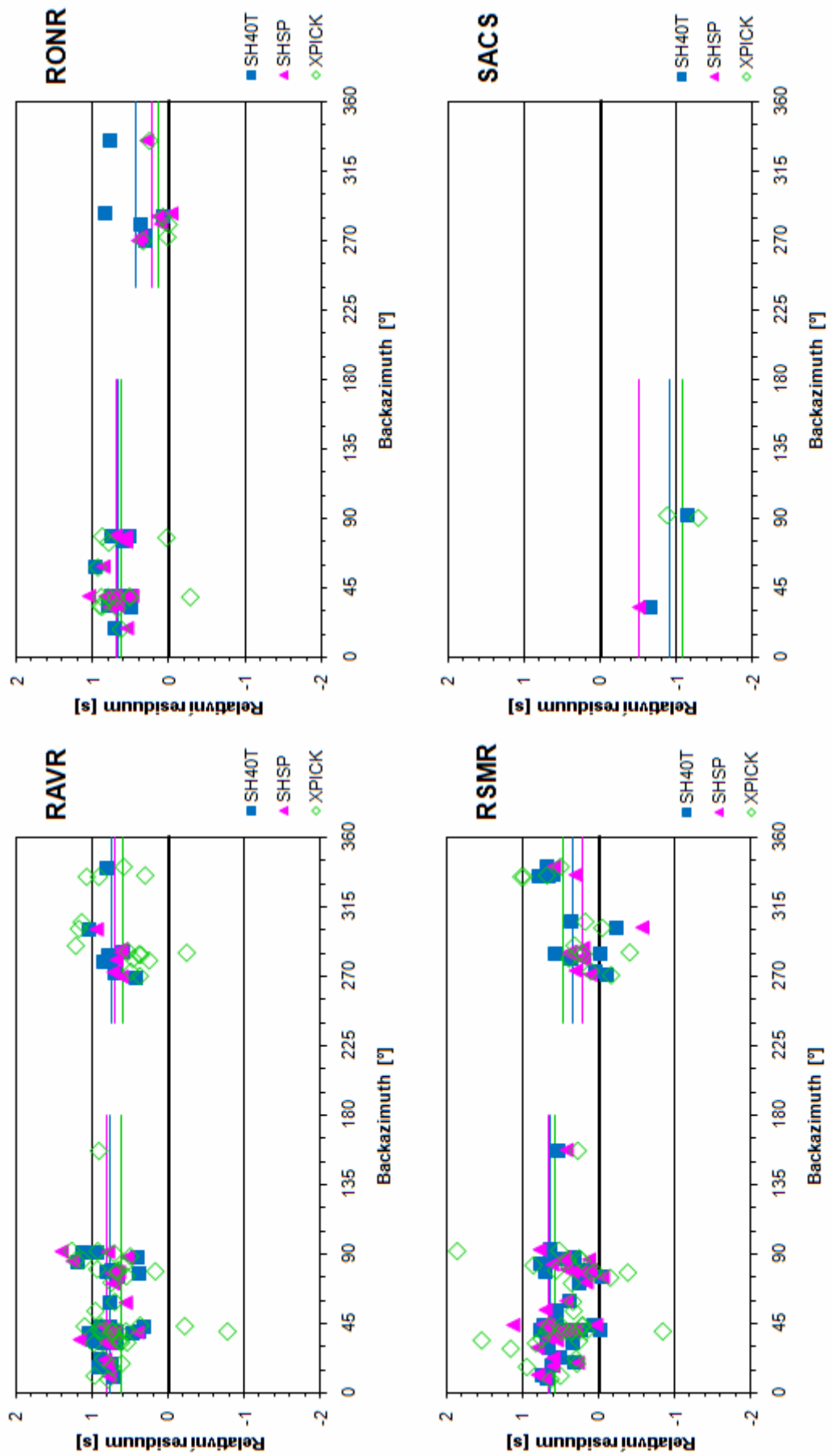
Obr. 15 Závislost residuí na 'back' azimutu na stanicích MASR, MNGR, MSTR, MTRV



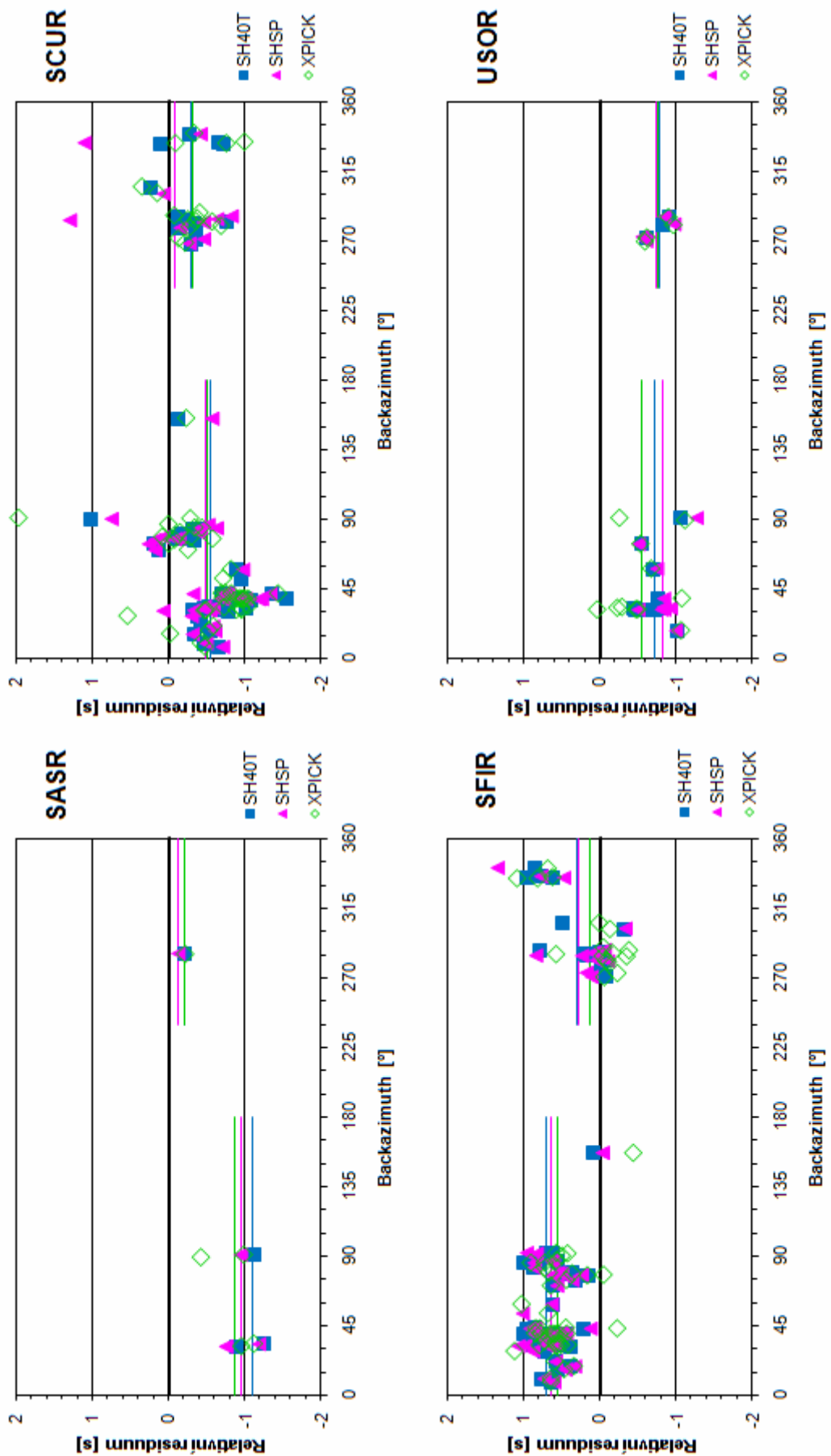
Obr. 16 Závislost residuí na 'back' azimutu na stanicích MURB, PDCR, PIRR, PIZR



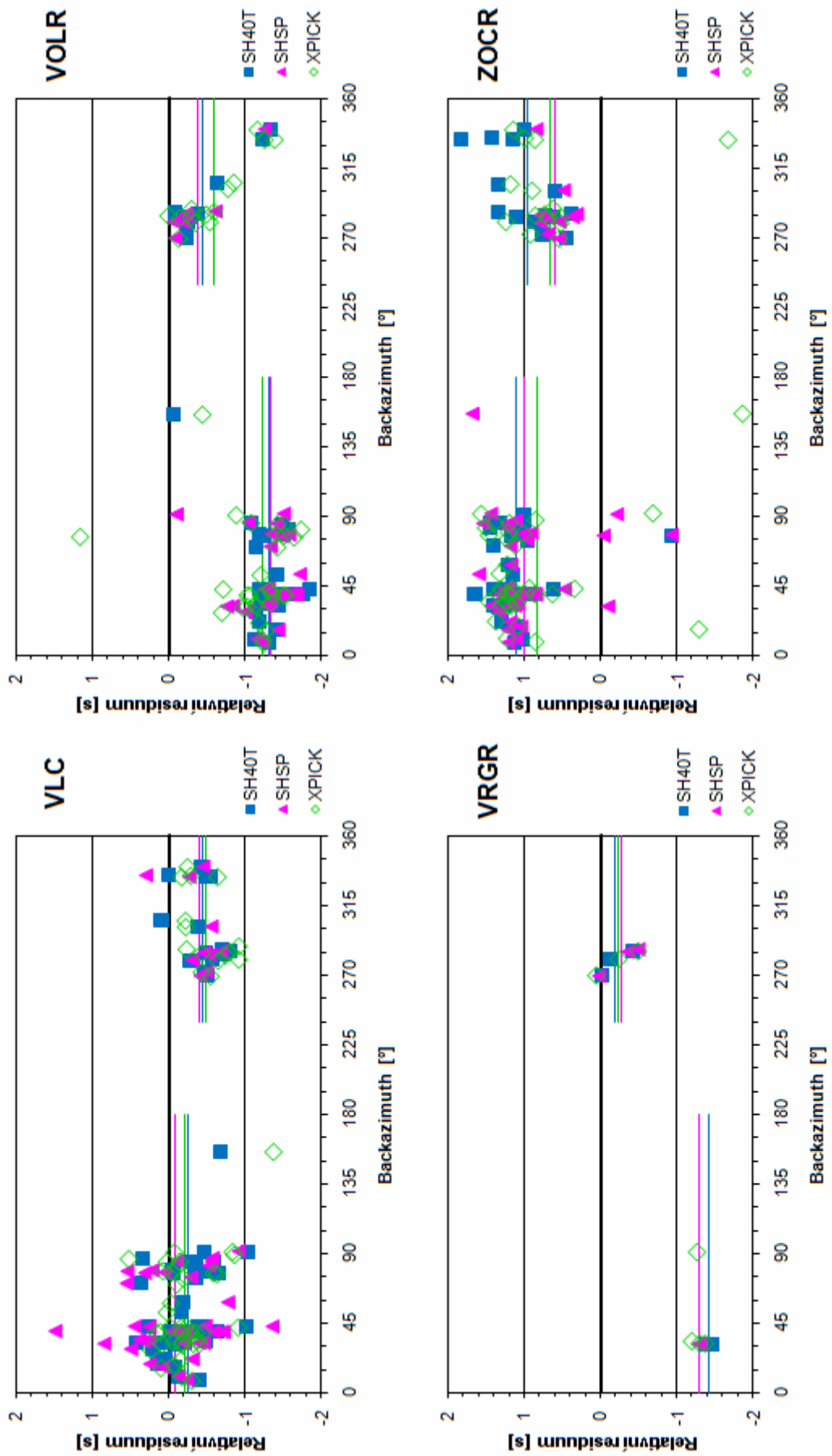
Obr. 17 Závislost residuí na 'back' azimutu na stanicích PNTR, POPR, PRUR, PTCR



Obr. 18 Závislost residuí na 'back' azimutu na stanicích RAVR, RONR, RSMR, SACS

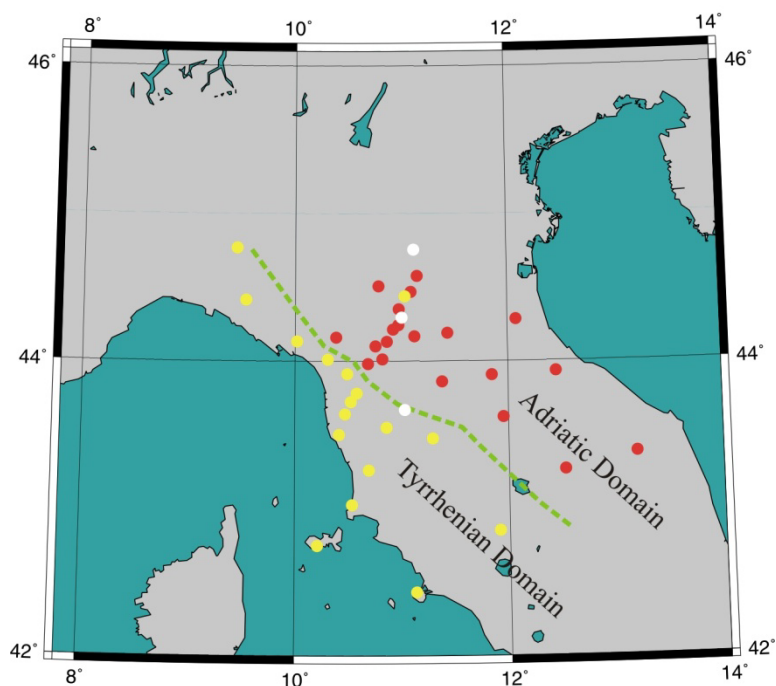


Obr. 19 Závislost residuí na 'back' azimutu na stanicích SASR, SCUR, SFIR, USOR

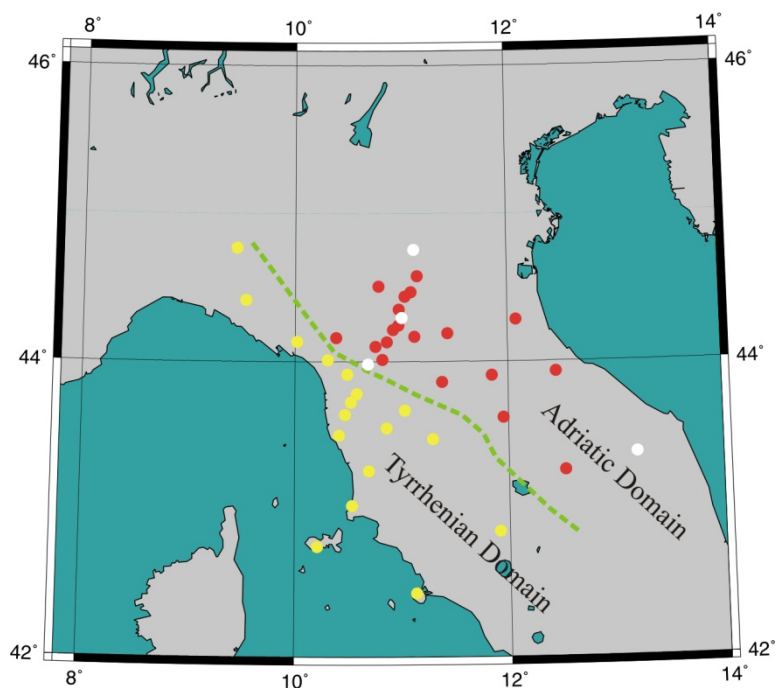


Obr. 20 Závislost residuí na ‚back‘ azimutu na stanicích VLC, VOLR, VRGR, ZOGR

# XPICK



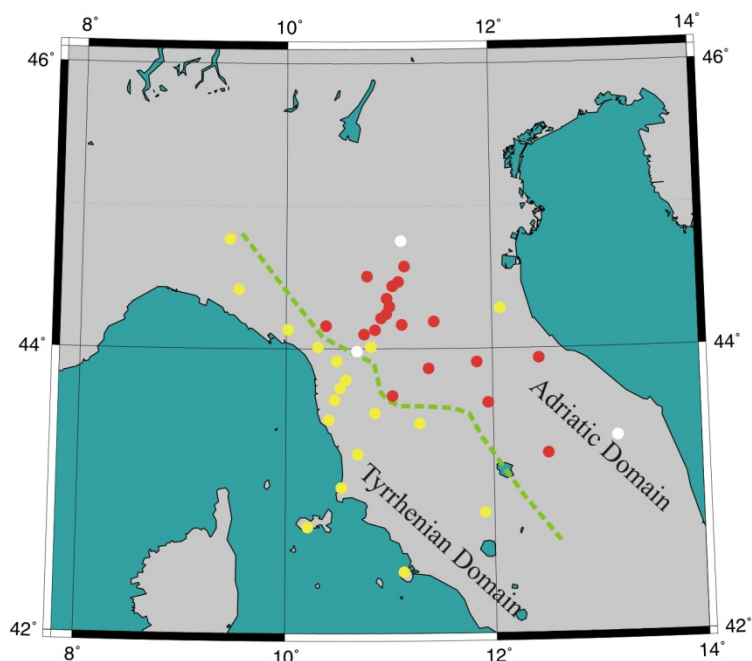
# SH\_CMG40T



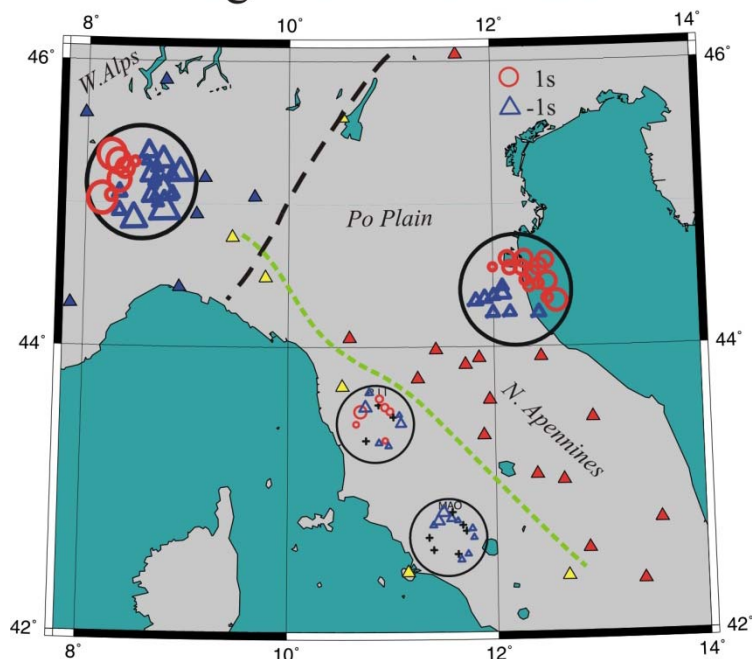
**Obr. 21** Rozdíly v průměrných hodnotách relativních residuí počítaných zvlášť pro směry šíření z východu a ze západu (viz. obr. 11-20). Červeně  $\Delta R \geq 0.1s$ , žlutě  $\Delta R \leq -0.1s$ , bíle  $\Delta R \in (-0.1; 0.1)s$ . Zeleně je naznačena hranice mezi oběma oblastmi.



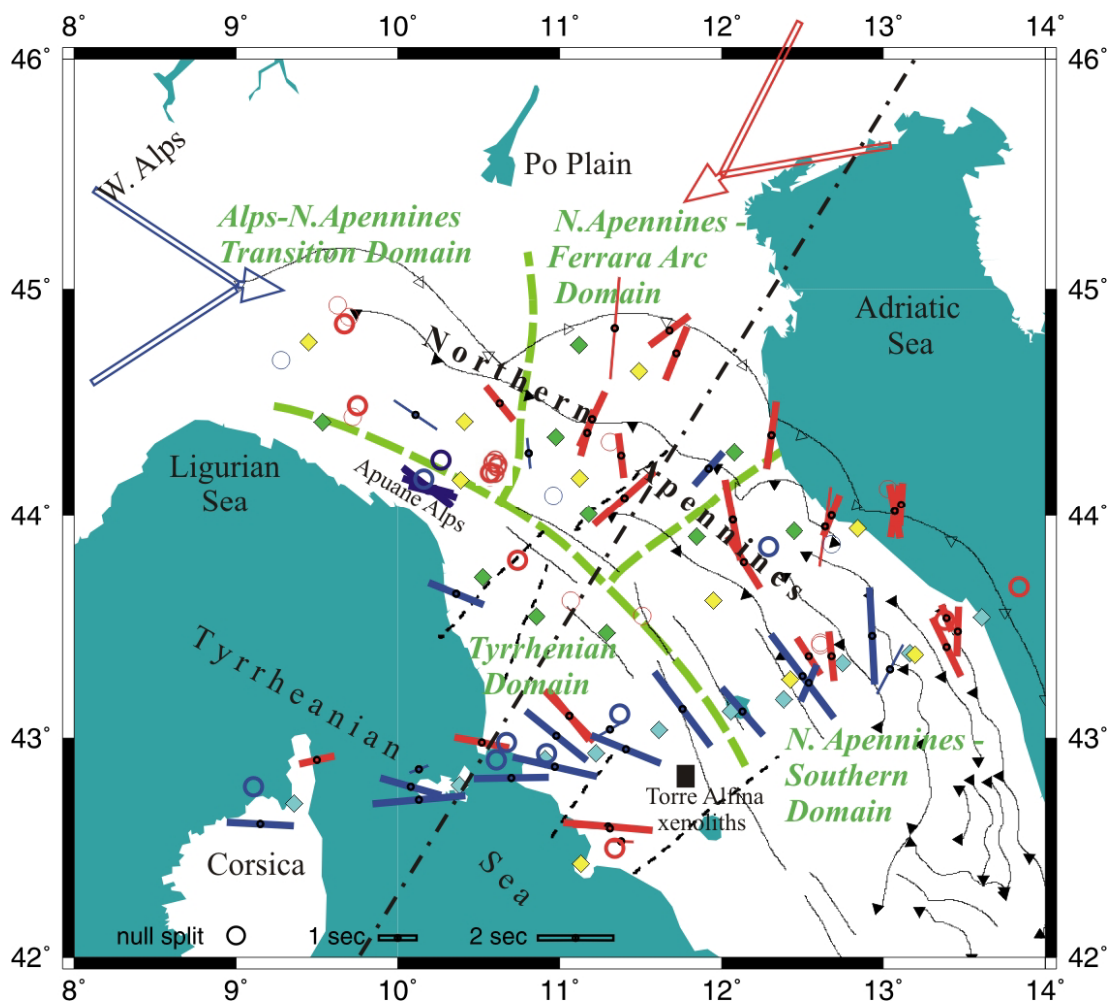
## SH\_WWSSN\_SP



## Regional bulletin data



**Obr. 22** Nahore: rozdíly v průměrných hodnotách relativních residuí počítaných zvlášť pro směry šíření z východu a ze západu (viz. obr. 11-20). Červeně  $\Delta R \geq 0.1s$ , žlutě  $\Delta R \leq -0.1s$ , bíle  $\Delta R \in (-0.1; 0.1)s$ . Dole: typová analýza směrové závislosti relativních residuí v polárních diagramech - červené kroužky - pozitivní hodnoty, modré trojúhelníky - negativní hodnoty; zeleně hranice mezi dvěma typy směrových závislostí (převzato z Plomerová a kol, 2006).



**Obr. 23** Výsledky analýzy štěpení příčných vln – průměrné azimuty polarizace rychlé vlny SKS a zpoždění pomalé vlny SKS (převzato z Plomerová a kol., 2006). Zeleně jsou vyznačeny domény s podobnou anizotropní strukturou.

## 4 Diskuse

Z výsledků porovnání relativních residuí v kapitole 3 vyplývá, že poloautomatický ‚picker‘ XPICK, jehož princip je založen na metodě ‚cross correlation‘ (kapitola 2.2), dokáže najít časy prvních nasazení vlny P. Otázkou však zůstává, zda-li je ke zpracování dat vhodnější než Seismic Handler, použitý k manuálnímu odečítání časů příchodů.

Podíváme-li se na obr. 9, v němž jsou znázorněny rozdíly rozptylů průměrných hodnot na jednotlivých stanicích, vidíme, že nejmenší rozptyly průměrných hodnot vycházejí pro soubor relativních residuí vypočtených z časů příchodů změřených pomocí SH CMG-40T. Na horním grafu je rozdíl rozptylů z XPICKu a rozptylů z SH

CMG-40T, tedy rozdíl hodnot vypočtených z měření na stejných záznamech (restituovaných na Guralp CMG-40T). ‚Pickovala‘ jsem tudíž poloautomaticky i manuálně seismogramy se stejným vlnovým obrazem. Ze zmíněného grafu je patrné, že pomocí SH jsem získala hodnoty s nižším rozptylem (rozdíly jsou spíše kladné). Je zřejmé, že pokud se zpracovávají shodná data dvěma různými způsoby a jedním z nich získáme menší rozptyl, byl tento způsob přesnější. V rozptylech jsou zahrnuty chyby vzniklé během měření a zároveň i závislost na ‚back‘ azimutu. Je nepravděpodobné, že by se chyby z měření poskládaly tak, aby zmenšily rozptyl residuí.

U prostředního grafu na obr. 9 již nelze na první pohled určit, jestli menší rozptyl měla data získaná programem XPICK (stále simulace dat na Guralp CMG-40T) nebo SH, kterým jsem tentokrát zpracovávala data restituovaná na WWSSN-SP. Větší rozptyl výsledků získaných z dat restituovaných na krátkoperiodickou charakteristiku (WWSSN-SP) může souviset s tím, že kratší periody (v tomto případě ~ 1s) jsou citlivější na menší struktury. A nakonec ze spodního grafu na obr. 9 je v souladu s předchozími úvahami zřejmé, že datový soubor SH CMG-40T má menší rozptyl než SH WWSSN-SP. Navíc jsou na tomto grafu rozdíl rozptylů blíže nule.

Lze tudíž prohlásit, že poloautomatickým odečítáním prvních nasazení programem XPICK jsme nezískali tak přesné výsledky jako manuálním měřením v programu SH. Další důležitou stránkou při práci s jakýmkoli programem jsou jeho možnosti, pokud jde o zpracování dat, a celkové pracovní prostředí programu. Je nutné poznamenat, že SH oproti nově vyvinutému XPICKu prošel již dlouhým vývojem a řadou úprav podle podnětů mnoha uživatelů, což se odráží na větší přívětivosti uživatelského prostředí SH.

Pracovní prostředí ‚pickeru‘ XPICK je velmi jednoduché a oproti SH je jeho ovládání intuitivní a zvladatelné i úplným začátečníkem. U SH by se začátečník bez manuálu nebo pomoci někoho zkušenějšího neobešel. To samozřejmě rovněž znamená, že možnosti XPICKu jsou v porovnání s SH velmi omezené. Lze s ním odečítat pouze časy prvního nasazení fází P, S a SKS. U fází S a SKS provádí navíc XPICK automaticky rotaci (viz kapitola 2.3.2) již při načítání dat. Není ani možnost si zobrazit a prohlédnout jiné složky než Z u vlny P (nerotuje se), T u vlny S a Q u SKS.

Další podstatný rozdíl mezi XPICKem a SH je v tom, že XPICK nerozlišuje, kolik seismogramů pro načtený jev existuje. Všechny seismogramy se zobrazují najednou bez možnosti okno rolovat. Amplitudy jsou pak velmi malé a navíc zcela chybí další okno s detailem oblasti, v níž chceme najít čas příchodu vlny. Takové okno je součástí SH. Kromě toho XPICK seismogramy řadí abecedně podle názvu stanice a ne např. podle epicentrální vzdálenosti jako SH. Řazení seismogramů podle vzdálenosti je lepší pro představu o vývoji vlnového obrazu s rostoucí vzdáleností od epicentra.

Když na vybraném seismogramu zadáváme oblast, která má být korelována, musíme XPICKu zadat přímo čas příchodu vlny. U slabších nebo zašuměných jevů, a nebo u pozdějších fází to může být velký problém, protože ‚picker‘ je pak ovlivněn i neklidem před příchodem vlny. Je proto důležité po ukončení korelace a vyznačení časů prvních nasazení seismogramy překontrolovat. Občas totiž bylo zřetelné, že XPICK čas posunul např. o celou jednu periodu.

Zřetelná nasazení u vln P dokázal XPICK určit bez problémů (asi 15% ze všech měřených jevů). Avšak u většiny jevů bylo nutné časy upravovat. Poloautomatické měření tudíž nebylo výraznou úsporou času. Často se stalo, že přibližně polovina seismogramů měla čas příchodu označen shodně se zadaným seismogramem, a zbylé seismogramy měly čas posunutý. Souvisí to nejen se změnou vlnového obrazu v důsledku závislosti na epicentrální vzdálenosti ale rovněž s rozdělením stanic na stanice, které se nacházejí na Adriatické desce, a na ty, jež byly umístěny na území blíže Tyrhénskému moři.

Dalším efektem, který znesnadňoval poloautomatické odečítání času metodou korelace, byla nestejná velikost šumu na různých stanicích. Vlnový obraz na seismogramu, který jsem na začátku měření vybrala jako vzorový a s nímž pak byla provedena vzájemná korelace, z výše uvedených důvodů nemohl reprezentovat všechny seismogramy. Je to zřejmý nedostatek metody ‚cross correlation‘.

Vhodnou alternativou k poloautomatickým ‚pickerům‘ založeným na principu metody ‚cross correlation‘, by mohly být programy, u nichž se porovnávání signálu uskutečňuje metodou ‚adaptive stacking‘ (kapitola 2.2). Předností této metody by mělo být to, že není nutné vybírat ‚nejlepší‘ seismogram, ale že lineární ‚stack‘ seismogramů, sloužící jako vzorový vlnový obraz, by měl skutečně reprezentovat signály registrované na všech stanicích.

## 5 Závěr

Poloautomatický ‚picker‘ XPICK dokázal bez problému určit časy prvních nasazení vln P jen u výrazných signálů s nízkou hladinou šumu (~15% ze všech měřených jevů). Ostatní data bylo nutné ručně přeměřit a tudíž nedošlo k úspoře času při měření prvních nasazení vln. Relativní residua vypočtená pro manuálně změřená data mají ve většině případů menší rozptyly průměrných hodnot. Přestože metoda ‚cross correlation‘ v rámci programu XPICK nepředstavovala na zpracovávaném souboru dat ani úsporu času ani větší přesnost měření, byla dostatečná k zachycení vlastností residuí s přesností  $\pm 0.1s$ . Další metodou měření časů příchodů vln, kterou budu testovat, je založena na ‚adaptive stacking‘ a předpokládám její aplikaci na kompletní soubor všech seismogramů, získaných během experimentu RETREAT, s cílem věnovat se výzkumu struktury svrchního pláště.

## Literatura

- Amaru M.L., Spakman W., Villaseñor A., Sandoval S., Kissling E. (2008): A new absolute arrival data set for Europe. *Geophys. J. Int.* **173**, 465-472.
- Bormann P. (2002): New Manual of Seismological Observatory Practice. GFZ Potsdam.
- Brokešová J. (2008): Teoretické základy Fourierovy spektrální analýzy. Praha. (*V tištěné podobě dosud nepublikováno.*)
- Englich J. (1999/2000): Zpracování výsledků fyzikálních měření. Praha.
- Lillie R. J. (1999): Whole Earth geophysics. Prentice Hall, New Jersey.
- Kennett B.L.N. (1998): Seismic wave propagation and seismic tomography. Research School of Sci., Australian National University, Canberra, 116 pp.
- Kennett B.L.N. (1991): IASPEI 1991 Seismological tables. Research School of Sci., Australian National University, Canberra, 167 pp.
- Margheriti L., Pondrelli S., Piccinini D., Agostinetti N.P., Giovani L., Salimbeni S., Lucente F.P., Amato A., Baccheschi P., Park J., Brandon M., Levin V., Plomerová J., Jedlička P., Vecsey L., Babuška V., Fiaschi A., Carpani B., Ulbricht P. (2006): The subduction structure of the Northern Apennines: results from the RETREAT seismic deployment. *Annals of geophysics* **49**, 1119-1131.
- Plomerová J., Margheriti L., Park J., Babuška V., Pondrelli S., Vecsey L., Piccinini D., Levin V., Baccheschi P., and Salimbeni S. (2006): Seismic Anisotropy beneath the Northern Apennines (Italy): Mantle Flow or Lithosphere Fabric? *Earth Planet. Sci. Lett.* **247**, 157-170.
- Rawlinson N., Kennett B.L.N. (2004): Rapid estimation of relative and absolute delay times across a network by adaptive stacking. *Geophys. J. Inter.* **157**, 332-340.
- Salimbeni S., Pondrelli S., Margheriti L., Levin V., Park J., Plomerová J., Babuška V. (2007): Abrupt change in mantle fabric across Northern Apennines detected using seismic anisotropy. *Geophys. Res. Letters* **34**, L07308, doi:10.1029/2007GL029302.
- Stammler K. (1993): Seismichandler programmable multichannel data handler for interactive and automatic processing of seismological analyses. *Computers & geosciences* **19**, 135-140.
- Udías A., Mézcua J. (1997): Fundamentos de sismología. UCA Editores, Madrid.
- Van Decar J.C, Crosson R.S. (1990): Determination of teleseismic relative phase arrival times using multi-channel cross correlation and least squares. *Bull. seism. Soc. Am.* **80**, 150-169.