

**UNIVERZITA KOMENSKÉHO V BRATISLAVE**  
**FAKULTA MATEMATIKY, FYZIKY A INFORMATIKY**

**VÝSKUM OHNISKOVEJ ZÓNY MALÉ KARPATY**  
**ANALÝZOU H/V POMERU SEIZMICKÉHO ŠUMU**

Bakalárska práca

**Bratislava, 2014**

**Alžbeta Dufalová**

**UNIVERZITA KOMENSKÉHO V BRATISLAVE  
FAKULTA MATEMATIKY, FYZIKY A INFORMATIKY**

**VÝSKUM OHNISKOVEJ ZÓNY MALÉ KARPATY  
ANALÝZOU H/V POMERU SEIZMICKÉHO ŠUMU**

Bakalárska práca

Študijný program: Fyzika

Študijný odbor: 1160 Fyzika

Školiace pracovisko: Katedra astronómie, fyziky Zeme a meteorológie

Vedúci: doc. Mgr. Jozef Kristek, PhD.

Konzultant: Mgr. Miriam Kristeková, PhD.

**Bratislava, 2014**

**Alžbeta Dufalová**



Univerzita Komenského v Bratislave  
Fakulta matematiky, fyziky a informatiky

---

## ZADANIE ZÁVEREČNEJ PRÁCE

**Meno a priezvisko študenta:** Alžbeta Dufalová  
**Študijný program:** fyzika (Jednoodborové štúdium, bakalársky I. st., denná forma)  
**Študijný odbor:** 4.1.1. fyzika  
**Typ záverečnej práce:** bakalárska  
**Jazyk záverečnej práce:** slovenský

**Názov:** Výskum ohniskovej zóny Malé Karpaty analýzou H/V pomeru seizmického šumu  
**Cieľ:** Preskúmať možnosti využitia analýzy záznamov seizmického šumu pomocou metódy spektrálneho H/V pomeru na upresnenie rýchlostného modelu lokálnej geologickej štruktúry vo významnej epicentrálnej oblasti Malé Karpaty.

**Vedúci:** doc. Mgr. Jozef Kristek, PhD.  
**Konzultant:** Mgr. Miriam Kristeková, PhD.  
**Oponent:** RNDr. Andrej Cipciar  
**Katedra:** FMFI.KAFZM - Katedra astronómie, fyziky Zeme a meteorológie  
**Vedúci katedry:** prof. RNDr. Peter Moczo, DrSc.  
**Dátum zadania:** 29.04.2013  
**Dátum schválenia:** 02.05.2013

prof. RNDr. Jozef Masarik, DrSc.  
garant študijného programu

.....  
študent

.....  
vedúci práce,  
konzultant, oponent

## ***Pod'akovanie***

Ďakujem mojej konzultantke Mgr. Miriam Kristekovej, PhD. za množstvo obetovaného času a energie, užitočné rady, konzultácie, korekcie, smerodajné diskusie a usmerňovanie a tiež za vytvorenie príjemného pracovného prostredia na Geofyzikálnom ústave a umožnenie cvičného poľného merania.

Ďakujem vedúcemu mojej práce doc. Mgr. Jozefovi Kristekovi, PhD. za užitočné rady a technickú pomoc.

Tiež sa chcem poďakovať kolegom z Geofyzikálneho ústavu za oboznámenie s meracou aparátúrou a pomoc pri poľnom meraní a RNRr. Jurajovi Sekerešovi za poskytnutie seizmických záznamov.

# **Abstrakt**

**Alžbeta Dufalová**

## **Výskum ohniskovej zóny Malé Karpaty analýzou H/V pomeru seizmického šumu**

Univerzita Komenského

Fakulta matematiky, fyziky a informatiky

Katedra astronómie, fyziky Zeme a meteorológie

Vedúci: doc. Mgr. Jozef Kristek, PhD.

Konzultant: Mgr. Miriam Kristeková, PhD.

Bakalárska práca, 58 strán

Bratislava 2014

V tejto práci sa venujeme skúmaniu možností využitia analýzy záznamov seizmického šumu pomocou metódy spektrálneho H/V pomeru na spresnenie rýchlostného modelu lokálnej geologickej štruktúry vo významnej epicentrálnej oblasti Malé Karpaty. Táto zdrojová oblasť patrí medzi naše seizmicky najaktívnejšie oblasti. Jej dôležitosť navyše zvyšuje fakt, že sa v blízkosti nachádza jadrová elektrárňa Jaslovské Bohunice. Dôkladné monitorovanie a analýza seizmickej aktivity oblasti Malé Karpaty sú kľúčové pre zhodnocovanie seizmického ohrozenia elektrárne. Keďže doteraz používaný 3D rýchlostný model tejto tektonicky veľmi komplikovanej oblasti nie je dostatočne presný a presnosť modelu má značný vplyv na neurčitosti lokalizácií zemetrasení, ohniskových mechanizmov a ďalších charakteristík seizmickej aktivity, spresnenie modelu je veľmi dôležitým dlhodobým cieľom výskumu. Metóda H/V spektrálneho pomeru seizmického šumu by mala umožniť zistiť priestorovú variabilitu lokálnej geologickej štruktúry a pomôcť identifikovať tie časti súčasného modelu, kde sa model odlišuje od reality. V práci sumarizujeme súčasné poznatky o zložení vlnového poľa seizmického šumu, metódach jeho analýzy so zameraním na metódu H/V pomeru. Podrobne popisujeme princípy metódy, význam parametrov spracovania a faktory dôležité pre správnu interpretáciu získaných výsledkov. Analyzovali sme záznamy seizmického šumu zo stálej seizmickej stanice Špačince v oblasti Malých Karpát zaznamenané počas rôznych období roka. Na základe dôkladného testovania sme vybrali vhodnú dĺžku časového okna pre analýzu a vyšetrili sme časovú variabilitu spektrálneho obsahu seizmického šumu a H/V kriviek.

Tieto zistenia budú užitočné pre spracovanie záznamov šumu z ďalších lokalít a pre poľné merania seizmického šumu a ich analýzu.

Kľúčové slová: zdrojová oblasť Malé Karpaty, seizmický šum, metóda H/V pomeru, rýchlostný model

# **Abstract**

**Alžbeta Dufalová**

## **Investigation of the Malé Karpaty source zone using analysis of seismic noise by H/V spectral ratio method**

Comenius University

Faculty of Mathematics, Physics and Informatics

Department of Astronomy, Physics of the Earth  
and Meteorology

Supervisor: doc. Mgr. Jozef Kristek, PhD.

Consultant: Mgr. Miriam Kristeková, PhD.

Bachelor thesis, 58 pages

Bratislava 2014

We present the investigation of possibility to use the H/V analysis of seismic noise to refine velocity model of local geological structure of important epicentral zone Malé Karpaty. This source zone is one of the most seismically active zones in Slovakia. The importance of the zone is enhanced by the vicinity of the nuclear power plant Jaslovské Bohunice. Thorough monitoring and analysis of seismic activity of Malé Karpaty zone is crucial for seismic hazard assessment of the power plant. Because the valid 3D velocity model of this tectonically complex region is not sufficiently accurate and the accuracy of the model has strong impact on uncertainty of location of earthquakes, focal mechanisms and other characteristics of seismic activity, construction of more precise model is important long-term research goal. H/V spectral-ratio method applied to seismic noise should allow to find the spatial variability of local geological structure and helps to identify those parts of the model, in which it mostly differ from reality. In this work we summarize current knowledge about composition of seismic-noise wavefiled, about method of analysis of seismic noise with the intention of use of H/V method. We describe in detail principles of the method, meaning of the parameters and important factors necessary for correct interpretation of results obtained with H/V method. We have analyzed recordings of seismic noise from the permanent seismic station Špačince, located in the Malé Karpaty zone, obtained during different periods of the year. We have chosen the appropriate length of the time window for the analysis based on the detailed tests. We have also examined the time variability of spectral content of seismic noise and H/V curves. These findings will

be useful in processing of noise recordings from other locations and also for field seismic-noise measurements and their analysis.

Keywords: source zone Malé Karpaty, seismic noise, H/V method, velocity model



## Predhovor

Predkladaná práca je zameraná na preskúmanie možností využitia analýzy záznamov seizmického šumu z oblasti Malé Karpaty prostredníctvom H/V metódy spektrálneho pomeru. Oblasť Malé Karpaty je jednou z najdôležitejších epicentrálnych oblastí na Slovensku. Jednak preto, že patrí k seizmicky najaktívnejším lokalitám Slovenska a jednak preto, že sa v nej nachádza jadrová elektráreň Jaslovské Bohunice. Dôkladné vyhodnocovanie seizmického ohrozenia tejto oblasti je teda nevyhnutnou potrebou. Na správne vyhodnotenie seizmického ohrozenia je potrebné dostatočne dobre poznať model lokálnej geologickej štruktúry, ktorý pre oblasť Malé Karpaty doposiaľ nie je dosť presný. Ako účinný a relatívne nenáročný pomocný nástroj slúži metóda H/V spektrálneho pomeru seizmického šumu. Táto metóda nám pomáha identifikovať rýchlostné kontrasty v lokálnej geologickej štruktúre a tým spresniť jej rýchlostný geologický model. Vďaka svojej neinvázivnosti je obzvlášť vhodná v osídlených oblastiach a keďže využíva analýzu seizmického šumu je aplikovateľná predovšetkým v oblastiach so strednou a nízkou seizmicitou. Takouto oblasťou je aj zdrojová oblasť Malé Karpaty.

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	11
<b>1 SÚČASNÝ STAV PROBLEMATIKY</b> .....	12
1.1 Prínos informácií získaných zo seizmického šumu ku zníženiu škôd počas budúcich zemetrasení .....	12
1.1.1 Deštruktívne účinky zemetrasení a lokálne efekty .....	12
1.1.2 Význam znalosti lokálnej geologickej štruktúry pre poznanie seizmického režimu aktívnej oblasti .....	13
1.2 Seizmický šum.....	13
1.2.1 Fyzikálna podstata seizmického šumu.....	14
1.2.1.1 Mikroseizmy (Microseisms) .....	14
1.2.1.2 Mikrotremory (Microtremors) .....	15
1.2.2 Metódy analýzy seizmického šumu .....	16
1.2.2.1 Merania v špeciálnej konfigurácií viacerých seizmometrov .....	16
1.2.2.2 Merania jednou, alebo dvoma seizmickými stanicami .....	18
1.3 Zdrojová oblasť Malé Karpaty .....	19
<b>2 CIEĽ PRÁCE</b> .....	22
<b>3 METODIKA PRÁCE A METÓDY SKÚMANIA</b> .....	23
3.1 Fyzikálne vysvetlenie H/V spektrálneho pomeru.....	24
3.1.1 Súvislosť medzi jednotlivými typmi seizmických vln a H/V pomerom.....	25
3.2 Princíp výpočtu H/V pomeru .....	26
3.3 Postup a experimentálne podmienky pri meraní seizmického šumu dôležité pre spracovanie metódou H/V pomeru .....	28
3.3.1 Vplyv meracej aparatury.....	28
3.3.2 Minimálna dĺžka merania na jednej lokalite.....	29
3.3.3 Rozmiestnenie bodov meraní v priestore.....	29
3.3.4 Kontakt senzora s podložím.....	30
3.3.5 Umiestnenie senzora.....	30
3.3.6 Vplyv poveternostných podmienok.....	31
3.3.8 Zdroje rušivých tranzientných signálov.....	31
3.4 Interpretácia výsledkov H/V pomeru .....	31
3.4.1 Kritéria pre spoľahlivosť H/V krivky.....	31
3.4.2 Kritéria pre spoľahlivosť píku.....	32

3.4.3 Hlavné typy píkov.....	33
<b>4 VÝSLEDKY PRÁCE A DISKUSIA .....</b>	<b>35</b>
4.1 Test voľby dĺžky okna.....	35
4.2 Variácia H/V krivky a amplitúdových spektier v závislosti od obdobia.....	37
4.2.1 H/V krivka zo zimného obdobia.....	37
4.2.2 H/V krivka z jarného obdobia.....	38
4.2.3 H/V krivka z letného obdobia.....	39
4.2.4 Spektrá vypočítaných kriviek.....	40
4.2.5 Aplikácia časovo frekvenčnej analýzy (TFA) na pomoc pri interpretácii H/V krivky.....	42
4.3 Realizácia poľného merania .....	53
<b>ZÁVER.....</b>	<b>55</b>
<b>ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY.....</b>	<b>56</b>

## ÚVOD

Seizmický šum bol dlho považovaný za nežiaducu súčasť seizmických záznamov. Dnes analýza seizmického šumu predstavuje alternatívny prístup pre získanie informácií o lokálnej geologickej štruktúre a jej rýchlostnom modeli. V tejto práci sa budeme venovať predovšetkým metóde H/V spektrálneho pomeru seizmického šumu a preskúmame aplikovateľnosť tejto metódy na záznamy seizmického šumu z ohniskovej oblasti Malé Karpaty, najmä vzhľadom k jej seizmickej aktivite a aj blízkosti jadrovej elektrárne Jaslovské Bohunice. Kvôli dôkladnému zhodnoteniu seizmického ohrozenia tejto oblasti je dôležité venovať monitorovaniu a analýze jej seizmickej aktivity veľkú pozornosť. Na to aby bolo presne lokalizovať ohniská zemetrasení je potrebné čo najlepšie poznať rýchlostný model lokálnej geologickej štruktúry. Naša záujmová oblasť Malých Karpát je oblasťou s veľmi komplikovanou geologickou štruktúrou a jej súčasný model nie je dostatočne presný. Metóda H/V pomeru by mala umožniť zistiť priestorovú variabilitu lokálnej geologickej štruktúry a pomôcť identifikovať tie časti súčasného modelu, kde sa odlišuje od reality.

Bakalárska práca je členená nasledovne. V kapitole 1 popisujeme súčasný stav problematiky súvisiaci s témou práce. Popisujeme súvis účinkov zemetrasení s lokálnou geologickou štruktúrou a vysvetľujeme význam čo najlepšieho poznania jej modelu. Ďalej charakterizujeme zloženie vlnového poľa seizmického šumu a jeho pôvod a poskytujeme stručný prehľad v súčasnosti používaných metód analýzy seizmického šumu. Na záver tejto kapitoly popisujeme zdrojovú zónu Malé Karpaty a monitorovanie zemetrasení v tejto oblasti. V kapitole 2 sú sformulované ciele tejto bakalárskej práce. Kapitola 3 obsahuje popis metódy H/V spektrálneho pomeru, význam parametrov spracovania a faktory dôležité pre správnu interpretáciu získaných výsledkov. Jedna časť je venovaná aj vplyvu experimentálnych podmienok na výsledky merania. Kapitola 4 obsahuje výsledky bakalárskej práce rozdelené na niekoľko častí. Diskutujeme tu výsledky analýzy seizmického šumu zo stálej stanice Špačince v oblasti Malých Karpát. Na základe vykonaných testov bola vybraná vhodná dĺžka časového okna a bola vyšetrená časová variabilita spektrálneho obsahu seizmického šumu a H/V kriviek v tejto oblasti. V poslednej časti sú sformulované závery práce.

# 1 SÚČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

## 1.1 Prínos informácií získaných zo seizmického šumu ku zníženiu škôd počas budúcich zemetrasení

### 1.1.1 Deštruktívne účinky zemetrasení a lokálne efekty

Tektonické zemetrasenie je spontánny vznik a spontánne šírenie trhliny na zlome. Šíriacou sa trhlinou sú vyžarované seizmické vlny, ktoré sa šíria v Zemi a spôsobujú kmitavý pohyb aj povrchu Zeme. V histórii bolo zaznamenaných mnoho ničivých zemetrasení, ktoré spôsobili obrovské ekonomické a sociálne škody. Základná úvaha, že v prípade zemetrasenia bude amplitúda kmitavého pohybu na danom mieste povrchu Zeme tým menšia, čím je dané miesto vzdialenejšie od zlomu, na ktorom sa trhlina vyskytuje, platí iba v prípade, že sa seizmické vlny šíria homogénnym pol priestorom. V skutočnosti je to omnoho zložitejšie. Povrchové sedimentárne štruktúry zosilňujú seizmický pohyb a spôsobujú tzv. lokálne efekty zemetrasení. Lokálny efekt zemetrasenia je anomália seizmického pohybu, kedy sú amplitúdy na danej frekvencii a dĺžka trvania zemetrasenia neprimerane vyžarovacej charakteristike ohniska a tiež vzdialenosti miesta od ohniska. Anomálne zosilnenie na špecifickej frekvencii vzniká napríklad rezonanciou seizmických vln vo výplni sedimentárneho bazéna. A práve lokálne efekty sú v osídlených oblastiach zodpovedné za najväčšie škody. Na viac, ak je vlastná frekvencia budov a iných stavieb blízka vlastnej frekvencii lokálnej geologickej štruktúry, nastáva medzi nimi rezonancia a škody sa znásobia. Napríklad, frekvencie väčšie ako 1Hz, ktoré sú zosilňované tenkými mäkkými sedimentárnymi vrstvami, zodpovedajú vlastným frekvenciám väčšiny bežných budov. Frekvencie menšie ako 1Hz sú zvyčajne zosilňované sedimentárnymi vrstvami hrubšími ako 100m. Tieto frekvencie zodpovedajú napríklad vlastným frekvenciám mostov a vysokých budov (*D. Bindi et al., 2009*). Teda seizmické riziko nezávisí len od samotného seizmického pohybu, ale aj od interakcie podložia a stavebnej konštrukcie. Problémom je, že oblasti, kde môže dochádzať k lokálnym efektom zemetrasení, sú často aj najviac osídlené. Seizmické ohrozenie na danej oblasti by sa malo zohľadniť v stavebných normách a vo výstavbe odolných konštrukcií. Pre komplexné zhodnotenie seizmického ohrozenia je dôležité vedieť, kde a k akým lokálnym efektom môže dochádzať. Preto je veľmi dôležité poznať detaily lokálnej geologickej štruktúry (LGŠ).

### **1.1.2 Význam znalosti lokálnej geologickej štruktúry pre poznanie seizmického režimu aktívnej oblasti**

Znalosť detailov LGŠ je dôležitá nielen pre odhad lokálnych efektov zemetrasení, ale aj pre poznanie seizmického režimu aktívnej epicentrálnej oblasti, teda toho ako často a kde sa zemetrasenia vyskytujú. Poznanie seizmického režimu je tiež dôležité pre zhodnotenie seizmického ohrozenia danej lokality, pretože do zhodnotenia seizmického ohrozenia je základným vstupom tzv. seizmologická databáza, ktorá obsahuje výsledky lokalizácií zemetrasení (t.j. hypocentrálne parametre: súradnice a hĺbka hypocentra, čas vzniku zemetrasenia). Na presnú lokalizáciu zemetrasenia je však potrebná dostatočná znalosť LGŠ. Ak sa na lokalizáciu zemetrasení v zložitom prostredí použije príliš zjednodušený model, vedie to k značným neurčitostiam v určení hypocentrálnych parametrov zemetrasenia a teda aj k neurčitostiam v poznaní seizmického režimu oblasti. Čo najpresnejšia znalosť LGŠ je preto veľmi dôležitá pre ďalšie analýzy vedúce ku komplexnému zhodnoteniu seizmického ohrozenia skúmaného územia a teda aj pre prevenciu škôd a obetí počas budúcich zemetrasení. Spomedzi rôznych metód analýzy, ktoré slúžia na získanie detailov LGŠ sa v posledných rokoch čoraz viac dostávajú do popredia metódy založené na analýze záznamov seizmického šumu.

## **1.2 Seizmický šum**

Seizmický šum sa z pôvodne nežiaducej časti seizmických záznamov stal zdrojom užitočných informácií, vďaka metódam analýzy, ktoré umožňujú získať informácie o LGŠ zo záznamov seizmického šumu. To prinieslo aj nový pohľad na záznamy zo seizmických staníc. V minulosti sa za užitočnú časť považoval len percentuálny zlomok seizmického záznamu, teda len časť, ktorá prislúchala signálom zodpovedajúcim zemetraseniam. Dnes je možné využiť prakticky celý záznam, čo predstavuje obrovský prínos v analýze seizmických signálov. Len na záznamoch existujúcich staníc je v súčasnosti k dispozícii množstvo dát vhodných pre rozbor seizmického šumu. V nasledujúcej časti 1.2.1 charakterizujeme zloženie vlnového poľa seizmického šumu a jeho pôvod. V časti 1.2.2 uvedieme stručný prehľad v súčasnosti používaných metód analýzy seizmického šumu.

### 1.2.1 Fyzikálna podstata seizmického šumu

Nízko amplitúdové relatívne trvalé seizmické signály neustále prítomné na záznamoch seizmických staníc, ktoré sú generované viacerými náhodnými zdrojmi blízko povrchu Zeme.

Frekvenčné rozpätie seizmického šumu je od desiatín Hz do niekoľkých desiatkov Hz, pričom signály pod 1Hz sú generované predovšetkým prírodnými zdrojmi ako je napríklad pohyb mäs vody v oceáne a nazývajú sa **mikroseizmy** (v angličtine: *microseisms*). Seizmický šum s frekvenciami nad 1Hz nazývame **mikrotremory** (*microtremors*), generované zväčša antropogénnymi faktormi. Antropogénnymi faktormi nazývame zdroje šumu spôsobené ľudskou činnosťou ako je priemysel, doprava a podobne. Za zdroje šumu okolo 1Hz sa považujú lokálne meteorologické podmienky a vplyv vetra, táto hodnota je samozrejme iba približná, môže sa líšiť v rôznych lokalitách. Frekvencia 1Hz zároveň predstavuje orientačné rozhranie medzi mikroseizmami a mikrotremormi. Presnejšie určiť tento limit je možné analýzou variácie seizmického šumu v rôznych fázach ľudskej činnosti, napr. cez deň a v noci. Vyššie frekvencie zaznamenávané seizmometrami zodpovedajú menším vlnovým dĺžkam a teda menším hĺbkam v modeli LGŠ, naopak nižšie frekvencie zodpovedajú väčším vlnovým dĺžkam a väčším hĺbkam.

V minulosti bol zaužívaný názor, že seizmický šum je tvorený predovšetkým objemovými vlnami (*napr. Nakamura, 2000*). V súčasnosti sa za zloženie seizmického šumu považuje vlnové pole, ktoré obsahuje všetky typy objemových, aj povrchových vln. Pričom zastúpenie jednotlivých typov vln v jednotlivých oblastiach sa líši. Podľa výsledkov 7 RP EÚ projektu SESAME tvoria mikroseizmy povrchové Rayleighove vlny, zväčša vo fundamentálnom móde a mikrotremory povrchové Rayleighove, aj Loveho vlny a objemové vlny.

#### 1.2.1.1 Mikroseizmy (*Microseisms*)

Ich zdrojom sú prírodné faktory, predovšetkým činnosť oceánu, preto ich amplitúda variuje vplyvom oceánskych búrok a podobných prírodných úkazov. Sú tvorené najmä Rayleighovými vlnami vo fundamentálnom móde.

Keď oceánske vlny dopadajú na pobrežie časť ich energia je transformovaná do seizmických vln známych ako mikroseizmy, ktoré sa šíria zemskou kôrou najmä ako Rayleighove vlny, ale taktiež boli detekované P- objemové vlny. Transformácia energie sa

môže uskutočniť 3 rôznymi mechanizmami oceánskych vln v troch rozdielnych frekvenčných pásmach (*James Traer et al., 2011*).

1. **Mikroseizmy s dvojnásobnou frekvenciou (double frequency, DB)** generované pohybom protichodných vln oceána majú ich dvojnásobnú frekvenciu a to je 0,15Hz až 0,5Hz. Časť energie dopadajúcich vln na pobrežie je odrazená späť do oceánu. Keď sa odrazené vlny zrazia s dopadajúcimi vlnami, ktoré majú opačný smer pohybu vytvoria stacionárnu vlnu s dvojnásobnou frekvenciou ako majú prenosné povrchové vlny oceánu. Na rozdiel od povrchových vln, ktorých amplitúda klesá exponenciálne s hĺbkou, amplitúda stacionárnej vlny ostáva zhruba konštantná s hĺbkou a je transformovaná na seizmickú energiu na morskom dne. Vznik DB mikroseizmov vyžaduje výrazný odraz energie morských vln na pobreží, čo sa vyskytuje s väčšou efektivitou pri strmých pobrežiach, kde sa nestráca veľa energie na lámanie vln.
2. **Primárne mikroseizmy (primary microseisms, PM)** generované dopadom morských vln na breh, tieto mikroseizmy preberajú frekvenciu zdrojových vln 0,02Hz až 0,17Hz. PM vznikajú priamo pri dopade vln na pobrežie, časť energie z dopadajúcich vln rovno vstupuje do zemskej kôry. Je to lineárny proces čo má za dôsledok, že mikroseizmy majú rovnaký frekvenčný obsah ako oceánske vlny, ktoré ich vygenerovali.
3. **Hukot (Hum)** je nízkoamplitudový singnál na omnoho nižších frekvenciách ako je tradičný šum a to od 0,002Hz po 0,02Hz. Zdrojom sú extrémne nízko-frekvenčné infragravitačné vlny (infragravity waves - IW) s periódou 50s-450s a vlnovou dĺžkou rádovo až niekoľko kilometrov. Keď sa dlho periodické vlny priblížia k pobrežiu, generujú sa IW ako nelineárna transformácia časti dopadajúcej vlnovej energie. Keď vlny interagujú so skloneným morským dnom, tak nejaká energia je odrazom zachytená blízko pobrežia. Interakcie IW vln produkujú tieto signály huhotu Zeme rovnakým tzv. vlna-vlna mechanizmom ako pri DF mikroseizmoch.

#### 1.2.1.2 Mikrotremory (Microtremors)

Ich frekvenčné rozpätie je zhruba od 1Hz vyššie. Ich zdrojom je antropogénna činnosť, súvisiaca s ľudskými aktivitami, teda priemyslom, dopravou, strojmi. Hodnota ich amplitúdy závisí na rozdielnej fáze dňa deň/noc, kedy je rozdielna ľudská činnosť a tiež variuje v závislosti od toho, či sa jedná o pracovný deň, alebo víkend (*J. C. Groos and J. R. Ritter, 2008*).



Podľa SESAME projektu, kedy prebiehal intenzívny trojročný výskum seizmického šumu sú mikrotremory tvorené povrchovými Rayleighovými, aj Loveho vlnami, aj objemovými vlnami. Taktiež je možný výskyt vyšších módov na vysokých frekvenciách. Pričom konkrétny kvantitatívny pomer medzi povrchovými a objemovými, aj Rayleighovými a Loveho vlnami je neznámy.

To, že obsahujú aj prechodové aj monochromatické signály vybudené antropogénnymi blízkymi zdrojmi, často komplikuje analýzu seizmického šumu v tomto frekvenčnom intervale.

### **1.2.2 Metódy analýzy seizmického šumu**

Existujú tri základné prístupy k výskumu LGŠ na základe seizmických signálov.

Prvý z nich je založený na spojení numerických simulácií seizmického pohybu s klasickými geofyzikálnymi a geotechnickými nástrojmi (tzv. aktívne seizmické zdroje a metódy spracovania nameraného signálu) za účelom spoľahlivo odhadnúť charakteristiky LGŠ ako hĺbka sedimentov, rýchlosti S a P vln a tak ďalej. Avšak použitie klasických metód je komplikované v osídlených oblastiach, jednak preto, že je finančne nákladne a tiež ich ekologický vplyv je čoraz menej akceptovateľný spoločnosťou.

Druhá kategória techník pozostáva z priameho merania lokálnej odozvy na základe záznamov zemetrasení zo špecifickej stanice na starostlivo vybranom mieste. Táto technika je najpresnejšia, keďže je priama, ale z rozumného časového hľadiska je problematicky realizovateľná v oblastiach so strednou a nízkou seizmicitou, kvôli nedostatku záznamov zemetrasení.

Do tretej, poslednej, čoraz populárnejšej kategórie patria metódy založené práve na analýze záznamov seizmického šumu. Sú relatívne nenáročné na získanie dát a vyžadujú nižšie náklady v porovnaní s inými metódami (*Sylvette Bonnefoy-Claudet, et al. 2006*).

Práve metódam analýzy seizmického šumu sa budeme venovať v nasledujúcej časti.

#### **1.2.2.1 Merania v špeciálnej konfigurácii viacerých seizmometrov**

V anglicky písanej odbornej literatúre metódy známe ako tzv. „Array methods“ sú zložitejšie a náročnejšie na realizáciu, ale umožňujú získať viac informácií v porovnaní s jednoduchšími metódami. Pôvodne boli vyvinuté na identifikovanie a lokalizáciu jadrových explózií. Seizmológovia ich modifikovali, tak aby boli aplikovateľné aj na seizmický šum. Pomocou array meraní a analýzy seizmického šumu je možné získať

disperzné krivky povrchových vln, a ich inverziou získať rýchlostný profil priečných vln. Array metódy využívajú merania seizmického šumu v špeciálnej konfigurácii viacerých seizmometrov súčasne. V prípade keď je k dispozícii obmedzený počet seizmometrov, môžu byť vykonané viaceré array merania navzájom doplnujúcich sa konfiguráciách a výsledky využité na spoločnú interpretáciu. Informácia získaná z vertikálnych zložiek je spojená iba s Rayleighovými vlnami, existujú však už aj metódy, ktoré umožňujú využívať všetky tri zložky záznamu a teda poskytujú informácie o Rayleighových, aj Loveho vlnách. Medzi array metódy patria:

- FK, HRFK, metódy využívajúce beamforming
- SPAC, priestorová auto - korelačná technika
- Korelačné metódy
- Odraz mikrotremorov (seizmického šumu) ReMi

## **FK**

Pomenovanie metódy FK alebo CVFK je z anglického (classical) frequency-wave number analysis, čo znamená (klasická) metóda frekvenčnej závislosti vlnového čísla (*Capon et al., 1967; Capon, 1969; Lacoss et al., 1969*). Na rozdiel od techniky SPAC táto metóda pracuje lepšie keď má vlnové pole seizmického šumu dominantný smer vln. Táto technika môže byť aplikovaná buď v časovej alebo frekvenčnej oblasti. Spôsob výpočtu vo frekvenčnej oblasti je najefektívnejším spôsobom určenia disperznej krivky v prípade, že vlnové pole je zložené iba z povrchových vln. Za tohto predpokladu sa zdanlivá rýchlosť (apparent velocity) rovná fázovej rýchlosti povrchových vln na danej konkrétnej frekvencii. Výsledkom FK metódy je disperzná krivka fázovej rýchlosti, ktorá môže byť použitá ako vstup do inverzie na získanie rýchlostného modelu LGŠ.

Iná verzia FK metódy je HRFK metóda. Pomenovanie HRFK je z anglického názvu „ the high resolution frequency wavenumber“ (*Capon, 1969*) známa tiež ako Caponova metóda. Táto verzia FK metóda umožňuje získať vyššie rozlíšenie použitím auto-adaptívnej váhovacej schémy pre analýzu úzko pásmových stacionárnych signálov. Patrí k najbežnejším a najpoužívanejším FK metódam pre analýzu seizmického šumu. Inverzia krosspektrálnej matice pre techniku vysokého rozlíšenia však vedie v niektorých prípadoch k potenciálnym nestabilitám HRFK výsledkov (*www.geopsy.com*).

## **Korelačné metódy**

Založené na korelácii záznamov seizmického šumu zaznamenaného súčasne na viacerých seizmických stanicích.

dvoch funkcií nám dáva informáciu o podobnosti funkcií závislých od času. Ak korelácia dvoch funkcií je nulová v každom čase, tak tieto dve funkcie sú nekorelované.

## **SPAC**

SPAC, priestorovo auto-korelačná technika (*Aki, 1957, 1965*), využíva priestorovú a časovú stacionárnosť seizmického šumu na výpočet priemernej azimutálnej koherencie cez rozličné stanice. Inverziou výsledkov SPAC metódy dostaneme podobne ako pri FK metóde odhad rýchlostného profilu priečných vln s hĺbkou, avšak SPAC metóda umožňuje interpretáciu cez širší rozsah frekvencií. Nevýhodou je, že táto metóda vyžaduje špecifickú konfiguráciu umiestnenia seizmometrov počas meraní, čo je často komplikované v osídlených oblastiach.

## **ReMi**

Metóda ReMi „refraction microtremor“ (odraz seizmického šumu) (*Louie, 2001*) predstavuje efektívny a účinný prostriedok na získanie všeobecných, jedno rozmerných informácií o podpovrchovej štruktúre. Metóda môže byť využitá na odhad rýchlostného profilu priečných vln. Umožňuje získať disperznú krivku povrchových vln, ktorá sa využíva na inverziu rýchlostného modelu šírenia priečných vln. Efektívna hĺbka, do ktorej sa dá pomocou tejto metódy dostať závisí od dĺžky sériového zapojenia a od frekvenčnej odozvy meracieho systému. ReMi metóda transformuje výsledky z časovej domény na frekvenčnú doménu a kombinuje mnoho príchodov počas dlhého času pre ľahké rozpoznanie disperzie povrchových vln.

### **1.2.2.2 Merania jednou, alebo dvoma seizmickými stanicami**

- Metóda spektrálneho pomeru voči referenčnému miestu
- Metóda H/V spektrálneho pomeru

#### **Metóda spektrálneho pomeru voči referenčnému miestu**

Na uskutočnenie tohto merania potrebujeme merať súčasne na dvoch stanicích. Jednu stanicu umiestnime do oblasti so sedimentárnym podložím, kde by mohlo dôjsť k lokálnemu zosilneniu a druhú stanicu umiestnime do nejakého referenčného bodu na skalnatom podloží. Pričom vzdialenosti oboch staníc sú tak ďaleko od epicentra, že ich

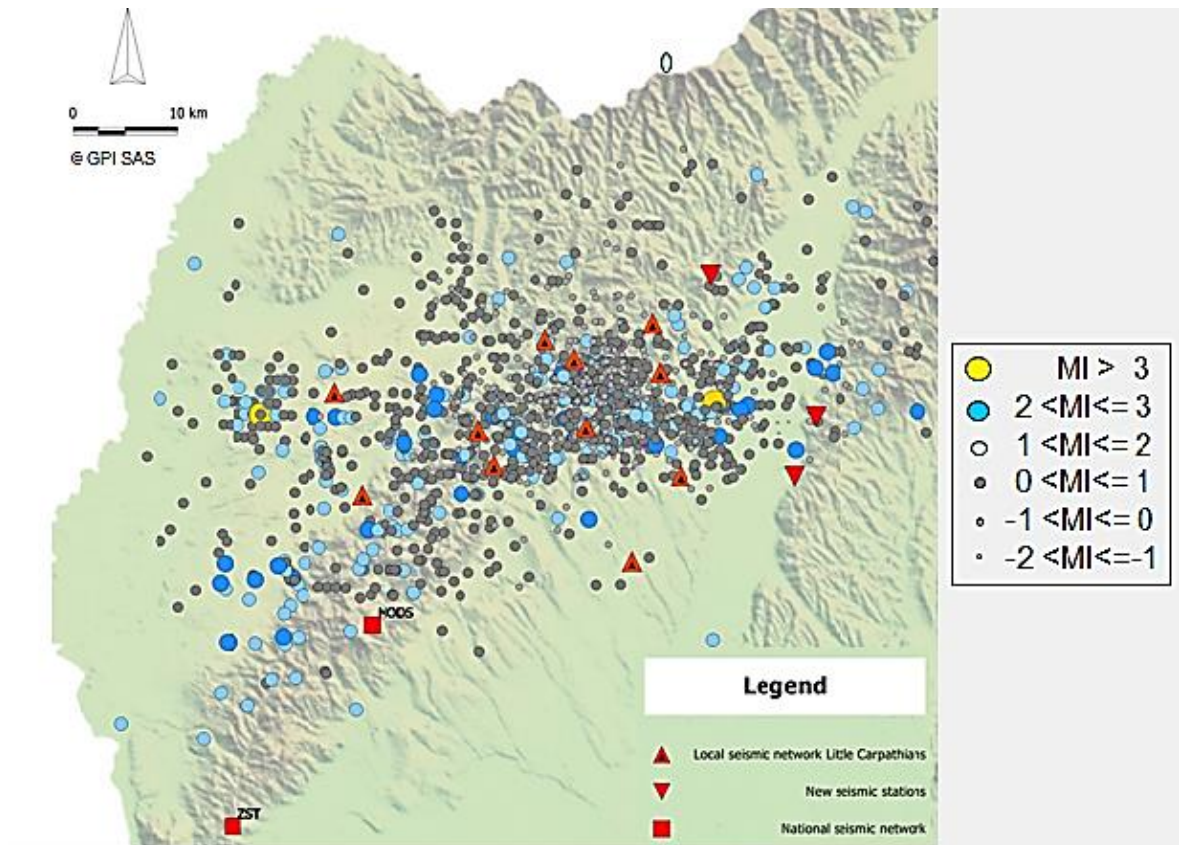
vzájomnú vzdialenosť môžeme zanedbať. Takže uvažujeme, že vlny od epicentra prejdú rovnakú dráhu do oboch staníc. A tak priamo vieme pozorovať a porovnať nie len rezonančnú frekvenciu danej sedimentárnej vrstvy, ale vieme získať aj zosilnenie na danej frekvencii, čo je veľmi veľkou výhodou tejto metódy. No neodstrániteľnou nevýhodou je, že je veľmi ťažké, v mnohých oblastiach nemožné, nájsť vhodnú konfiguráciu meracích staníc, ktorú táto metóda vyžaduje.

### **Metóda H/V spektrálneho pomeru**

Spočíva vo výpočte pomeru medzi vyhladenými Fourierovými amplitúdovými spektrami horizontálnej a vertikálnej zložky seizmického šumu zaznamenaného jednou seizmickou stanicou. Metóda H/V spektrálneho pomeru je experimentálne technika využívaná prevažne na odhad vlastností LGŠ, najmä mäkkých sedimentárnych vrstiev. Vďaka nižšej ekonomickej a časovej náročnosti v porovnaní s inými metódami sa čoraz častejšie používa vo výskumoch na seizmické mikrorajónovanie. Aplikácia len samotnej H/V metódy nie je dostatočná na komplexnú charakteristiku lokálnych efektov. Vieme pomocou nej zistiť frekvenciu, na ktorej k anomálnemu zosilneniu počas zemetrasenia môže dochádzať (čo je veľmi cenný údaj pre seizmických inžinierov a architektov), avšak nevieme zistiť konkrétnu hodnotu zosilnenia.

## **1.2 Zdrojová oblasť Malé Karpaty**

Zdrojová oblasť Malé Karpaty patrí k našim najaktívnejším epicentrálnym oblastiam s bohatou históriou seizmickej aktivity. V tejto lokalite je zaznamenaných množstvo mikroseizmických aj makroseizmických záznamov zemetrasení. 9.1.1906 tu vzniklo dokonca, v rámci Slovenska, najsilnejšie makroseizmicky pozorované zemetrasenie 20. storočia s magnitúdom 5.7, ktorého otrasená oblasť zasahovala až na územia dnešného Rakúska, Maďarska a Českej republiky (účinky tohto zemetrasenia sú popísané v práci Réthly (1907). Zóna bradlového pásma, ktorá sa v okolí depresie Dobrá Voda zbieha s tektonickou líniou resp. perikarpatským zlomom na severozápadnom okraji pohoria Malých Karpát, predstavuje najvýraznejšiu a najdôležitejšiu tektonickú líniu prvého rádu. Táto oblasť je zároveň najbližšia zdrojová zóna k lokalite Atómových elektrární Bohunice (AEB). Údaje o seizmicite tejto oblasti majú teda zásadnú hodnotu pre určenie seizmického ohrozenia tejto lokality. Z týchto dôvodov je potrebné podrobne skúmať túto oblasť a venovať jej zvýšenú pozornosť. Keď si uvedomíme, že v posledných desaťročiach



Obr. A: Seizmická aktivita v oblasti Malých Karpát v období 3/1987 – 3/2013; Červené trojuholníky s bodkou označuje stanice lokálnej siete AEB, červený trojuholník bez bodky tri nové seizmické stanice funkčné od roku 2012, červené štvorce stanice NSSS a krúžky znázorňujú epicentrá zemetrasení s lokálnym magnitúdom podľa legendy uvedenej v obrázku

(Fojtíková, L., Kristeková, M., Málek, J., Zahradník, J. 2013)

neboli zaznamenané výrazne silné zemetrasenia, čo znamená, že sa hromadí deformačná energia, ostáva len otázkou času, kedy sa uvoľní v podobe pomerne silného zemetrasenia.

V súčasnosti je táto oblasť monitorovaná Národnou sieťou seizmických staníc (NSSS), ktorá má v oblasti Malých Karpát 2 stanice a Lokálnou sieťou seizmických staníc AEB. NSSS je najstaršou (najstaršia stanica registruje od 1902) seizmometrickou sieťou na území Slovenska. Je prevádzkovaná Geofyzikálnym ústavom Slovenskej Akadémie vied (GFÚ SAV). Lokálna sieť seizmických staníc Malé Karpaty (AEB) začala monitorovanie v roku 1985, prevádzkuje ju spoločnosť Progseis. Konfigurácia seizmických staníc sa do roku 1992 vyvíjala a často menila, po tomto roku sa konfigurácia a počet staníc výrazne nemenili. V roku 2012 boli uvedené do prevádzky ďalšie 3 stanice (v spolupráci s GFÚ SAV a USMH AVČR). Zdrojová oblasť Malé Karpaty je teda v súčasnosti monitorovaná pomocou 16 seizmických staníc (viď. Obr. A). V tejto časti sme vychádzali najmä z prác *Moczo et al. (2002)*, *Cipciar (2001)*.

Ako sme rozdiskutovali v časti 1.1.2 znalosť LGŠ je kľúčová pre výskum seizmicky aktívnej oblasti. Seizmický rýchlostný model komplikovanej geologickej štruktúry v oblasti Malých Karpát však nie je známy s dostatočnou presnosťou. Ukázali to napríklad viaceré analýzy vykonané v rámci projektu 7RP EÚ AIM.

## 2 CIEĽ PRÁCE

Hlavným cieľom tejto bakalárskej práce je preskúmať možnosti využitia analýzy záznamov seizmického šumu pomocou metódy spektrálneho H/V pomeru na spresnenie rýchlostného modelu lokálnej geologickej štruktúry vo významnej epicentrálnej oblasti Malé Karpaty.

Na dosiahnutie hlavného cieľa je potrebné

- naštudovať súčasný stav problematiky o zložení vlnového poľa seizmického šumu a o zdrojoch, ktoré do vlnového poľa seizmického šumu prispievajú
- naštudovať prehľad základných princípov najpoužívanejších metód analýzy seizmického šumu
- charakterizovať výhody a nevýhody aplikácie metódy H/V pomeru so zameraním na spresnenie rýchlostného modelu lokálnej geologickej štruktúry
- podrobne naštudovať princíp analýzy seizmického šumu pomocou H/V metódy
- v rámci prípravy na poľné merania sa naučiť pracovať s poľnou aparatúrou na merania seizmického šumu a oboznámiť sa s vplyvom najdôležitejších experimentálnych podmienok na výsledky poľných meraní
- preskúmať kvalitu dostupných údajov zo stálych seizmických staníc v oblasti Malých Karpát a vhodnosť ich využitia na analýzu pomocou H/V pomeru na spresnenie rýchlostného modelu tejto zdrojovej oblasti

### 3 METODIKA PRÁCE A METÓDY SKÚMANIA

Metóda H/V spektrálneho pomeru, niekedy sa tiež nazýva ako Nakamurova metóda (*Nakamura, 1989*), bola prvý krát predstavená japonskými seizmológmi Nogoshi a Igarashi (1971) založená na počiatočnom štúdií Kanai a Tanaka (1961). Od vtedy sa tejto metóde venovalo mnoho seizmológov z celého sveta. Spoľahlivosť tejto metódy bola skúmaná numericky aj experimentálne. V časti opublikovaných prác (*okrem iných Field and Jacob, 1993; Lachet and Bard, 1994; Lermo and Chávez-García, 1994*) bola technika H/V spektrálneho pomeru a interpretácie jej výsledkov teoreticky podporená aj numerickými simuláciami. Bolo tiež prevedených veľké množstvo štúdií na experimentálne overenie dôveryhodnosti metódy H/V pomeru (*Ohta et al., 1978; Mucciarelli, 1998; Rodriguez and Midorikawa, 2002 a iní*).

Na realizáciu meraní seizmického šumu pomocou metódy H/V pomeru potrebujeme len jeden seizmometer, teda predstavuje relatívne lacný nástroj analýzy seizmického šumu. Bolo preukázané, že táto metóda je užitočná pri odhadovaní fundamentálnej frekvencie vrstiev sedimentárnych depozitov. Hlavným možným využitím tejto techniky pri mikrozonácii je nájsť vlastnú frekvenciu LGŠ a pomôcť spresniť geotechnický, prípadne geologický model LGŠ. Spresnený model potom môže byť ďalej využitý napr. pri numerických simuláciách seizmického pohybu na danej lokalite. Najviac efektívna je metóda pri odhadovaní vlastných frekvencií mäkkých sedimentárnych vrstiev v prípade ak tieto vrstvy majú veľké impedančné kontrasty medzi sebou alebo s podložíom. Je užitočná najmä pre oblasti s nízkou až strednou seizmicitou, vzhľadom k nedostatku dostatočného počtu záznamov silnejších zemetrasení. Takúto oblasť predstavuje aj nami skúmaná oblasť Malých Karpát.

Ide o predovšetkým o empirickú metódu. Princíp výpočtu je pomerne jednoduchý, no voľba parametrov vystupujúcich vo výpočte je nesmierne dôležitá a správna interpretácia získaných výsledkov je v niektorých prípadoch veľmi komplikovaná.

Keďže v minulosti bola metóda H/V mnoho krát používaná ako „čierna skrinka“, pričom niekedy vznikali príliš silné, alebo skreslené závery, medzinárodný projekt 5 RP EÚ SESAME sa špeciálne venoval výskumu zloženia vlnového poľa seizmického šumu, aplikovateľnosti H/V metódy v rôznych konfiguráciách problémov, vplyvu experimentálnych podmienok počas meraní a spôsobu vyhodnocovania a napokon vierohodnosti výsledkov získaných pomocou tejto metódy (napr. rezonančná frekvencia  $f_0$ ,



odhad zosilnenia). Na základe veľkého množstva testov na reálnych dátach a numerických simulácií boli vypracované odporúčania ohľadom meraní a vyhodnocovania pomocou tejto metódy. Najdôležitejšie odporúčania sú zhrnuté v dvoch tzv. deliverables:

- Deliverable D23.12 „Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations. MEASUREMENTS, PROCESSING AND INTERPRETATION“ (*Bard & SESAME team, 2004*)
- Deliverable D08.02 „Final report on Measurement Guidelines. H/V technique : experimental conditions“ (*Bard et al., 2003*)

Ak výsledná H/V krivka vykazuje signifikantný pík, ktorý nie je umelého pôvodu a tiež súčasne spĺňa SESAME kritéria spoľahlivosti a zreteľnosti, potom takýto pík indikuje prítomnosť lokálneho efektu s anomálnym zosilnením seizmického pohybu počas zemetrasení. Lokálna geologická štruktúra potom pravdepodobne obsahuje rozhranie s pomerne výrazným rýchlostným kontrastom. Frekvencia, na ktorej sa nachádza signifikantný pík výslednej H/V krivky by mala zodpovedať rezonančnej frekvencii LGŠ. Rezonančná frekvencia je závislá lineárne od rýchlosti S-vĺn v danej vrstve a hrúbky sedimentárnej vrstvy nepriamo úmerne, podľa vzťahu

$$F_n = \frac{(2n+1)v_s}{4h}. \quad (1)$$

Aj keď niektorí autori (*napr. Nakamura, 1989*) predpokladajú opak, vzhľadom na najnovšie poznatky nie je možné vo všeobecnosti interpretovať amplitúdu H/V píku v termínoch veľkosti zosilnenia seizmického pohybu v dôsledku lokálneho efektu.

### 3.1 Fyzikálne vysvetlenie H/V spektrálneho pomeru

Interpretácia H/V spektrálneho pomeru je úzko spojená so zložením vlnového poľa seizmického šumu, ktoré je závislé od zdrojov, ktorými je seizmický šum generovaný a od LGŠ. Treba však pripomenúť, že vedomosti o vlnovom poli seizmického šumu sú stále nekompletné. V rôznych prácach sú uvádzané rozličné výsledky pre pomer medzi Loveho, Rayleighovými a objemovými vlnami v rôznych lokalitách. Vlnové pole seizmického šumu je zmesou Loveho a Rayleighových povrchových vĺn a objemových vĺn. K tvaru získanej H/V krivky, jej píku alebo minimu, teda prispieva viacero faktorov: elipticita

Rayleighových vln, Airyho fáza (Airy phase) módov Loveho vln, rezonancia S a/alebo P objemových vln.

### 3.1.1 Súvislosť medzi jednotlivými typmi seizmických vln a H/V pomerom

V horizontálne zvrstvenej LGŠ sa rýchlosť seizmických vln mení s hĺbkou a teda fázové rýchlosti povrchových vln sú frekvenčne závislé. Táto závislosť sa dá vyjadriť pomocou tzv. disperzných kriviek. Vrstevnatosť tiež spôsobuje existenciu viacerých módov Rayleighových vln. Kým fundamentálny mód existuje na všetkých frekvenciách, vyššie módy existujú iba mimo konkrétneho intervalu frekvencií, pričom frekvencia rastie s číslom módu. Mnoho autorov sa zaoberalo touto témou, *napr.: Kudo (1995), Bard (1998), Stephenson (2003), Malischewsky and Scherbaum (2004) and Bonnefoy-Claudet (2004) a iní*. V závislosti od hĺbky sa mení aj elipticita pohybu častice vplyvom Raileghovej vlny. Príspevok elipticity *napr. fundamentálneho módu Rayleighových vln k H/V pomeru seizmického šumu sa prejaví píkom s nekonečne veľkou amplitúdou na frekvencii  $f$  (ktorá je pre veľké impedačné kontrasty blízka fundamentálnej rezonančnej frekvencii S-vln)*. Nekonečná amplitúda H/V píku na danej frekvencii zodpovedá vymiznutiu vertikálnej zložky pohybu častice prostredia v hĺbke zodpovedajúcej tejto frekvencii. V inej hĺbke dochádza k vymiznutiu horizontálnej zložky Rayleighových vln, čo sa prejaví minimom krivky H/V pomeru.

Loveho vlny sú nosičom energie iba na horizontálnej zložke, takže ich vplyv vo frekvenčnej závislosti H/V pomeru môže pochádzať iba z frekvenčnej závislosti horizontálnej zložky. Viaceré štúdie ukázali (*napr. Konno and Ohmachi, 1998*), že frekvencie, na ktorých majú povrchové vlny najviac energie a teda najvyššie amplitúdy zodpovedajú minimám grupovej rýchlosti. Pre veľké impedačné kontrasty medzi vrstvami sa minimum grupovej rýchlosti fundamentálneho módu Loveho vln vyskytuje na frekvencii blízkej frekvencii fundamentálneho módu S-vln a zároveň aj píku elipticity Raileighových vln. Vyššie módy Loveho vln môžu mať tiež minimá grupovej rýchlosti a Airyho fázou na vyšších frekvenciách. To v prípade, že vyššie módy majú dostatočné množstvo energie, môže viesť k ďalším maximám. Teda Loveho vlny zosilňujú H/V pík, hoci nemajú vplyv na vertikálnu zložku pohybu.

Avšak pri objemových vlnách, mimo fundamentálnej frekvencie S-vln, je H/V pomer výrazne ovplyvnený zosilnením na vertikálnej zložke, ktorá nemôže byť zanedbaná, obzvlášť v oblastiach s výraznou podpovrchovou štruktúrou. Uvažujme jednoduchú LGŠ s jednou mäkkou vrstvou na polpriestore. Horizontálne zložky vykazujú rezonančné píky

na rezonančných frekvenciách S-vĺn a vertikálna zložka preukazuje rezonančné píky na rezonančnej frekvencii P-vĺn. Na základe toho, že fundamentálna frekvencia S-vĺn je vždy výrazne menšia než fundamentálne frekvencia P-vĺn, pre fundamentálny mód platí nasledovné: V prípade veľkých impedačných kontrastov, H/V pomer pre objemové vlny by mal vždy vykazovať pík v okolí fundamentálnej frekvencii S-vĺn, pretože fundamentálna rezonančná frekvencia je len málo závislá na topografii rozhraní v rámci LGŠ. Pri objemových vlnách H/V pomer môže vykazovať aj píky zodpovedajúce vyšším harmonickým módom rezonancie S-vĺn. V špeciálnom prípade vlnového poľa seizmického šumu s dominantným obsahom objemových vĺn by amplitúda prvého píku H/V pomeru mala byť v korelácii s hodnotou zosilnenia objemových S-vĺn .

Súčasný príspevky rôznych typov vĺn (objemových, povrchových vĺn, ich fundamentálne aj vyššie módy, atď.) vo vlnovom poli seizmického šumu môžu mať za následok komplikovaný charakter výslednej krivky H/V pomeru a teda kladú veľké nároky na správnu interpretáciu získaných výsledkov.

### 3.2 Princíp výpočtu H/V pomeru

Výpočet H/V pomeru je realizovaný nasledovne:

1. Najprv analyzujeme všetky tri zložky seizmického šumu, teda vertikálnu, severojužnú a východnozápádnu v časovej oblasti. Vizualne identifikujeme výrazne prechodové (transient) časti signálu, odlišujúce sa od stacionárneho „pozadia“.

2. Signál rozdelíme na časové okná vhodnej dĺžky. Záznam seizmického šumu musí byť dosť dlhý na to, aby sme ho mohli rozdeliť na dostatočný počet neprekrývajúcich sa časových okien, ktoré sú nasledovne osobitne spracovávané. Keďže rozsekanie záznamu je ekvivalentné použitiu obdĺžnikového okna, na vyhladenie ostrých hrán sa zvyčajne použije 5% dlhé kosínusové okno z oboch koncov analyzovaného časového okna všetkých troch zložiek šumu. Potom sa aplikuje rýchla Fourierova transformácia (FFT) na všetky 3 zložky seizmického šumu v danom časovom okne a získajú sa tak 3 amplitúdové spektrá.

3. H/V pomer sa počíta zo spojených horizontálnych zložiek pre každé časové okno najčastejšie ich kvadratickým priemerom (v *prácach Bonnefoy-Claudet et al., 2006, 2008; Fäh et al., 2001*)

$$H = \frac{\sqrt{H_1^2 + H_2^2}}{2}, \quad (2)$$

kde  $H_1$  je amplitúdové spektrum jednej horizontálnej zložky a  $H_2$  druhej.

Okrem toho sa pre výpočet horizontálnej časti používa 5 iných procedúr. Medzi nimi napr. výpočet H/V pomeru samostatne pre dve horizontálne zložky (*Lermo & Chavez-Garcia 1993,1994*), aritmetickým priemerom (*Chavez-Garcia et al. 2007*), geometrickým priemerom (napr. podľa odporúčaní SESAME projektu) a tak ďalej.

4. Pri analýze šumu sa odporúča vždy použiť vyhladenie spektier. Pri výpočte H/V pomeru sa vyhladzujú už zlúčené horizontálne Fourierove spektrá a vertikálne spektrum. Existuje viacero typov vyhladzovania.

Medzi najpoužívanejšie patrí Konno a Ohmachi vyhladzovanie (*Konno K. a T. Ohmachi, 1998*). Využíva konštantnú šírku pásma v logaritmickú škále a je veľmi vhodné pretože jeho vyhladzovacia funkcia

$$\left( \frac{\sin(b \log_{10}(f / f_c))}{b \log_{10}(f / f_c)} \right)^4, \quad (3)$$

kde

$f$  je frekvencia

$f_c$  je centrálna frekvencia

$b$  je koeficient šírky pásma

zachováva rozdielny počet bodov na nízkych a vysokých frekvenciách a jeho šírka je konštantná na logaritmickú škále.

. Je nastaviteľné vyhladzovacou konštantou, ktorá variuje medzi hodnotou 0 a 100, pričom 0 znamená veľmi silné vyhladzovanie a 100 veľmi jemné vyhladzovanie.

Iná možnosť je použiť vyhladzovanie s oknom konštantnej šírky, kde má funkcia trojuholníkový tvar centrovanej na aktuálnu frekvenciu a jej šírka je nastaviteľná používateľom. Lepšia možnosť je proporcionálne vyhladzovanie, kde má vyhladzovacia funkcia taktiež trojuholníkový tvar, ale jej šírka závisí od aktuálnej frekvencie.

5. Výsledný priemer H/V pomeru je vypočítaný geometrickým priemerom z jednotlivých H/V pomerov pre  $n$  okien.

$$H / V_{priem.} = \frac{\sum \log_{10}(H / V)}{n} \quad (4)$$

A štandardná odchýlka H/V pomeru je dané vzťahom

$$\sigma_{H/V} = \frac{\sqrt{\sum \log^2_{10}(H/V) - n \log^2_{10}(H/V_{priem})}}{\sqrt{(n-1)}} \quad (5)$$

možno to prepočítať do lineárnej škály podľa vzťahov:

$$\overline{H/V} = 10^{H/V_{priem}} \quad (6)$$

$$\sigma_{\overline{H/V}} = 10^{\sigma_{H/V}} \quad (7)$$

Nový alternatívny spôsob ako určiť výsledný H/V pomer bol navrhnutý v práci *Dario Albarello a Enrico Lunedei (2012)*. Od konvenčného spôsobu výpočtu sa odlišuje tým, že výsledná H/V krivka sa počíta z priemerných hodnôt zložiek spektra vypočítanej z veľkého počtu časových okien. Autori článku udávajú, že týmto spôsobom výpočtu sa môže radikálne zmenšiť skreslenosť vypočítanej H/V krivky oproti reálnej. Táto nová metóda zatiaľ nie je implementovaná v žiadnom z bežne dostupných softwarov na spracovanie seizmického šumu pomocou H/V metódy.

### **3.3 Postup a experimentálne podmienky pri meraní seizmického šumu dôležité pre spracovanie metódou H/V pomeru**

Pred uskutočnením terénneho merania seizmického šumu je dôležité oboznámiť sa s dostupnými geologickými informáciami o študovanej lokalite a s možnými antropogénnymi zdrojmi seizmického šumu. Počas projektu SESAME sa pomocou cieľených rozsiahlych testov skúmal vplyv experimentálnych podmienok na stabilitu a reprodukovateľnosť kriviek H/V pomeru (*Bard et al., 2003*). Na Slovensku v roku 2001 tiež vznikla diplomová práca, ktorá sa zaoberala vplyvom experimentálnych podmienok na H/V spektrálny pomer seizmického šumu (*Fojtíková, 2001*). Faktory, ktoré môžu mať vplyv na výsledky meraní a analýzy pomocou H/V pomeru môžu byť principiálne rozčlenené do niekoľkých kategórií: vplyv meracej aparatúry, minimálna dĺžka merania na jednej lokalite, rozmiestnenie bodov meraní v priestore, kontakt senzora s podloží, umiestnenie senzora, vplyv poveternostných podmienok, zdroje rušivých prechodových signálov.

#### **3.3.1 Vplyv meracej aparatúry**

Podľa zistení SESAME projektu je vzorkovacia frekvencia 50Hz dostačujúca, pretože maximálna inžiniersky zaujímavá frekvencia je 25Hz. Zvýšenie vzorkovacej frekvencie

by nemalo mať vplyv na výsledky. Výsledky testov ukázali, že dĺžka kábla medzi senzorom a stanicou nemá vplyv na výsledný H/V pomer, prinajmenšom do dĺžky 100m. Testy s použitím rôznych značiek senzorov s ekvivalentným frekvenčným pásmom nepreukázali signifikantný vplyv na výslednú H/V. Čas postačujúci na stabilizáciu senzoru po nainštalovaní je zväčša len niekoľko sekúnd. Azimutálna orientácia senzora nemá vplyv na výsledok.

Na analýzu veľmi nízkych frekvencií sa odporúča použiť dlho periodický senzor. Krátko periodické senzory môžu byť použité na analýzu na veľmi nízkych frekvenciách pod 0,1-0,2Hz, ale vo všeobecnosti potrebujú veľké zosilnenie, inak môžu byť hodnoty amplitúd na frekvenciách pod 0,2Hz maskované vlastným šumom aparatury (Strollo et al., 2007; Forbriger, 2006).

### 3.3.2 Minimálna dĺžka merania na jednej lokalite

Pre spoľahlivosť merania sa podľa SESAME odporúča dodržať nasledujúce podmienky:

- $F_0 > 10/l_w$

Čo znamená, že zaujímavá frekvencia, by mala byť prinajmenšom desať krát zopakovaná v každom časovom okne (Pozri tabuľku 1.).

- $N_c = l_w \cdot n_w \cdot f_0 > 200$

Je potrebný veľký počet okien a cyklov. Odporúčaný počet signifikantných cyklov má byť väčší ako 200 (Pozri tabuľku 1.).

Tabuľka 1.

Očakávaná frekvencia $f_0$ [Hz]	Minimálna hodnota pre $l_w$ [s]	Minimálny počet signifikantných cyklov ( $n_c$ )	Minimálny počet okien	Minimálne trvanie užitočného signálu [s]	Odporúčaná minimálna dĺžka merania [min]
0.2	50	200	10	1000	30'
0.5	20	200	10	400	20'
1	10	200	10	200	10'
2	5	200	10	100	5'
5	5	200	10	40	3'
10	5	200	10	20	2'

Odporúčané minimálne hodnoty parametrov merania podľa výsledkov projektu SESAME (Bard & SESAME team, 2004)

### 3.3.3 Rozmiestnenie bodov meraní v priestore

Pre účel mikrozonácie je odporúčané rozmiestnenie meracích bodov v mriežke s 500m krokom. V prípade laterálnej variácie výsledkov sa odporúča zahustenie siete meracích

bodov s menším krokom, napr. 250m. V prípade merania iba na jednom meracom bode pre účely výskumu odozvy jednej konkrétnej lokality sa odporúča nikdy neurčovať  $f_0$  iba z jedného merania na tejto lokalite – odporúča sa vykonať merania prinajmenšom na 3 blízkych bodoch merania a výsledky navzájom porovnať.

### **3.3.4 Kontakt senzora s podložím**

Typ kontaktu senzora s podložím je dôležitý experimentálny faktor pri meraní seizmického šumu. Pre čo najlepší kontakt by mal byť senzor umiestený priamo na povrchu, okrem špeciálnych situácií, ako je napr. strmý svah, pri ktorých je použitie dodatočnej medzivrstvy medzi senzorom a podložím nutnosťou. V rámci SESAME projektu boli vykonané rozsiahle štúdie vplyvu rôznych druhov kontaktu, v tomto texte popíšeme len najdôležitejšie z nich. Merania na betónových a asfaltových povrchoch neskresľujú výsledky, teda tento druh povrchových vrstiev nemá vplyv na tvar H/V krivky v rozsahu inžiniersky najdôležitejších frekvencií, odchýlky môžu byť pozorované v rozsahu 7-8Hz . Naopak, je potrebné vyhnúť sa umiestneniu senzora na mäkkých, nepravidelných povrchoch ako je bahno, zoraná pôda, štrk, alebo umelý materiál na športoviskách. Meranie na nízkom trávnom poraste samo o sebe nespôsobuje chyby, avšak ak fúka vietor, najmä v prípade vyššej trávy, môže byť tvar H/V krivky na frekvenciách pod 1Hz výrazne skreslený. Odporúča sa preto aspoň odstrániť trávu pod senzorom, alebo vykopať jamu a umiestniť senzor do nej. V prípade povrchu z ľadu, alebo snehu sa odporúča umiestniť senzor najprv na kovovú, alebo drevenú platňu, kvôli tlaku nožičiek senzora by totiž mohlo prísť k lokálnemu nataveniu a náklonu prístroja.

Ak je pri meraní potrebné umelé rozhranie medzi povrchom a štruktúrou, je potrebné prešetriť možný vplyv rozhrania na výsledky pred začatím daného merania pomocou testovacích meraní. Požitie kovovej platne zväčša nemodifikuje výsledky, zatiaľ čo mäkkým, nespojeným materiálom ako penová guma, lepenky a pod. sa treba vyhnúť.

### **3.3.5 Umiestnenie senzora**

Senzor má byť umiestnený horizontálne podľa odporúčaní výrobcu. Nie vždy je potrebné senzor umiestňovať do jamy, ale môže to byť užitočný spôsob ako sa zbaviť efektu vetra v tráve v prípade, že sa v okolí nenachádzajú iné vyššie štruktúry ako napr. budovy, alebo stromy, ktoré môžu tiež vyvolať silné nízkofrekvenčné skreslenie H/V krivky v dôsledku

vetra. Tiež sa treba vyhnúť meraniam nad podzemnými štruktúrami (garáže, potrubia atď.), ktoré môžu značne ovplyvniť amplitúdy vertikálneho pohybu.

### **3.3.6 Vplyv poveternostných podmienok**

Pohyb štruktúr vplyvom vetra môže vyvolať v zemi silné nízkofrekvenčné kmitanie, preto sa neodporúča robiť merania v blízkosti štruktúr ako sú budovy, stromy a iné. Nie je možné určiť minimálnu vzdialenosť kedy rušenie spôsobené štruktúrami môžeme zanedbať, keďže to závisí od mnohých faktorov napr. rýchlosť vetra, výška štruktúr, hĺbka ukotvenia v zemi.

Z poveternostných podmienok má najväčší rušivý vplyv vietor, preto sa treba vyhnúť meraniam počas veterných dní. Tiež sa odporúča vyhnúť sa meraniam počas silného dažďa, slabý dážď nemá významný vplyv na výsledky H/V pomeru. Pri extrémnych teplotách sa treba riadiť odporúčaniami výrobcu senzora.

### **3.3.8 Zdroje rušivých tranzientných signálov**

Všetky druhy krátko trvácich lokálnych zdrojov ako sú napr. prejazdy áut, vlakov, chôdza, môžu umelo ovplyvňovať výsledky H/V pomeru. Presnú vzdialenosť, v ktorej už nemajú rušivý vplyv ťažko určiť, avšak vieme, že rýchla a občasná doprava (napr. diaľnica) má rušivý vplyv do väčšej vzdialenosti v porovnaní s pomalou súvislou dopravou (napr. premávka v mestách), ktorá má rušivý vplyv len keď je pomerne blízko miesta merania. Je dôležité vyhnúť sa meraniam v blízkosti monochromatických zdrojov (napr. rôzne priemyselné stroje). Je to preto, lebo takéto zdroje majú zväčša vplyv počas veľkej časti merania a je problematické ich vplyv zo spracovania odstrániť. Krátko trvajúce rušivé signály možno pri analýze H/V pomeru vylúčiť, pri meraniach seizmického šumu však treba odhadnúť podiel časových okien, ktoré bude treba zo spracovania vylúčiť a teda prispôbiť tomu celkovú dĺžku merania.

## **3.4 Interpretácia výsledkov H/V pomeru**

### **3.4.1 Kritéria pre spoľahlivosť H/V krivky**

Prvou požiadavkou pred výberom informácií a interpretáciou krivky H/V spektrálneho pomeru je spoľahlivosť interpretovanej H/V krivky, jej dostatočná reprezentatívnosť a stabilita. Tieto kritéria spoľahlivosti H/V krivky SESAME formuloval nasledovne :

- $f_0 > 10 / l_w$  , kde  $f_0$  je frekvencia H/V píku a  $l_w$  je dĺžka okna



Táto podmienka je navrhnutá tak, aby sa pre nás zaujímavá frekvencia zopakovala najmenej 10 krát v každom okne. Ak to dáta umožňujú je osožné použiť aj prísnejšie kritérium.

- $n_c(f_0) > 200$  , kde  $n_c = l_w \cdot n_w$ .  $f_0$  = počet signifikantných cyklov,

$n_w$  je počet okien,  $l_w$  dĺžka okna a  $f_0$  je frekvencia píku H/V krivky.

Odporúčaný počet signifikantných cyklov je viac ako 200, to znamená napr. pre pík na 1Hz, potrebujeme najmenej 20 desať- sekundových okien. Podľa SESAME v prípade, že vyhadzujeme nejaké tranzienty, sa na nízkych frekvenciách odporúča zvýšiť táto hodnota  $n_c$  dvakrát a na vysokých frekvenciách, kde je výskyt tranzientov vyšší, aj 4-5 krát.

- $\sigma_A(f) < 2$  pre  $0.5f_0 < f < 2f_0$  keď  $f_0 > 0.5\text{Hz}$  ,

alebo

$$\sigma_A(f) < 3 \text{ pre } 0.5f_0 < f < 2f_0 \text{ keď } f_0 < 0.5\text{Hz} ,$$

kde  $\sigma_A(f)$  je štandardná odchýlka amplitúdy H/V krivky na okamžitej frekvencii  $A_{H/V}(f)$ ,  $\sigma_A(f)$  je faktor, ktorým je priemer  $A_{H/V}(f)$  krivky vynásobený, alebo predelený.

Toto kritérium odporúča veľkosť smerodajnej odchýlky, lebo veľké odchýlky často znamenajú, že seizmický šum je silne nestacionárny a v niektorých časových oknách pravdepodobne pôsobia zdroje šumu, ktoré sú umelého pôvodu a tieto môžu potom značne ovplyvniť správnu fyzikálnu interpretáciu H/V krivky.

Pre overenie stability píku sa odporúča spracovať dáta s viacerými rôznymi parametrami. Ak H/V krivka nadobúda hodnoty amplitúd rádovo rozdielnych od hodnoty 1, je pravdepodobné, že záznam seizmického šumu je chybný a merania by mali byť vykonané nanovo.

### 3.4.2 Kritéria pre spoľahlivosť píku

Nasledovné kritéria, sformulované v SESAME projekte, uvádzajú šesť podmienok. Ak H/V krivka spĺňa aspoň 5 z nasledujúcich 6 podmienok, môžeme hodnotu  $f_0$  považovať za spoľahlivý odhad fundamentálnej frekvencii podložia.

$$1) \exists f \in [f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f) < A_0/2$$

Existuje taká frekvencia, z intervalu  $f_0/4$  až  $f_0$ , že jej prislúchajúca amplitúda je menšia ako polovičná amplitúda na frekvencii  $f_0$ .

$$2) \exists f^+ \in [f_0, 4f_0] \mid A_{H/V}(f^+) < A_0/2$$

Existuje taká frekvencia, z intervalu  $f_0$  až  $4f_0$ , že jej prislúchajúca amplitúda je menšia ako polovičná amplitúda prislúchajúca frekvencii  $f_0$ .

### 3) $A_0 > 2$

Amplitúda  $A_0$  má presahovať hodnotu dva.

### 4) $f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$

Pík na H/V krivke by sa mal objaviť na rovnakej frekvencii s percentuálnou odchýlkou 5%.

### 5) $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$

Štandardná odchýlka H/V píku  $f_0$  frekvencie má byť menšia ako hranica  $\varepsilon(f_0)$  (hodnoty  $\varepsilon(f_0)$  vid'. Tabuľka 2).

### 6) $\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$

Štandardná odchýlka amplitúdy H/V pomeru má byť nižšia ako  $\theta(f_0)$  (vid'. Tabuľka 2). Podmienky zhrnuté v bodoch 1 až 3 sú kvantitatívne amplitúdové kritéria a podmienky 4 až 6 sú kritéria pre určenie stability píku.

Tabuľka 2. Minimálne hodnoty pre podmienky stability H/V krivky

Frekvenčný rozsah [Hz]	< 0.2	0.2 – 0.5	0.5 – 1.0	1.0 – 2.0	> 2.0
$\varepsilon(f_0)$ [Hz]	0.25 $f_0$	0.20 $f_0$	0.15 $f_0$	0.10 $f_0$	0.05 $f_0$
$\theta(f_0)$ pre $\sigma_A(f_0)$	3.0	2.5	2.0	1.78	1.58

(Bard & SESAME team, 2004)

V každom prípade je ešte potrebné skontrolovať frekvenčný rozsah a citlivosť seizmometra, treba byť obzvlášť opatrným najmä pri frekvenciách nižších ako 1Hz. A tiež treba overiť či výrazný pík nemá industriálny pôvod.

### 3.4.3 Hlavné typy píkov

*Čistý pík.* Prípád čistého píku nastáva vtedy, keď H/V krivka vykazuje pík, ktorý je výrazný oproti píkom na iných frekvenciách. Žiaden iný pík vo frekvenčnom pásme nespĺňa amplitúdové kritéria.

*Ostrý pík a pík industriálneho pôvodu.* Výrazné úzke píky, alebo žľaby sú často spôsobené ľudskou priemyselnou činnosťou. Ak sa na všetkých jednotlivých troch spektrálnych zložkách nachádza výrazný pík na príslušnej frekvencii je pravdepodobné, že ide o umelý pík a treba ho vylúčiť z interpretácie H/V krivky. Účinným nástrojom na rozpoznanie umelého píku H/V krivky je tiež použitie časovo-frekvenčnej analýzy (TFA) (Moczo et al., 2013) Ďalšou metódou je aplikácia RD (random decrement) metódy na časť signálu so záujmovými frekvenciami, ak je útlm veľmi nízky, tak takmer určite ide o industriálny pík.

*Nejasný nízko frekvenčný pík (nesplnené kritérium 1., prípadne 2.).* Vznik nezreteľného píku môže byť zapríčinený viacerými faktormi ako nízko frekvenčnou oblasťou s miernym rozhraním, impedančným kontrastom, alebo rýchlostným gradientom. Tiež zlými poveternostnými podmienkami počas merania, nevhodným umiestnením senzora, alebo ak bolo meranie vykonané nevhodným senzorom. Rozlíšiť medzi týmito alternatívami je náročné. Vo všeobecnosti veľmi mäkké vrstvy preukazujú výrazné, jasné píky, kvôli veľkým impedačným kontrastom, pokým nejasné, nezreteľné píky sú charakteristické skôr pre hrubé, konsolidované depozity. V prípade nezreteľných píkov treba skontrolovať poveternostné podmienky v čase merania. Limitnú hodnotu H/V pomeru, keď je frekvencia blízko nuly, keď asymptotická hodnota výrazne väčšia ako 2, tak sú nízke frekvencie pravdepodobne zapríčinené vplyvom vetra, dopravy, alebo nevhodným senzorom. Odporúča sa dáta spracovať opäť s voľbou dlhších časových okien a s prísnejšími kritériami pre výber okien, za účelom zníženia štandardnej odchýlky. Alebo dáta opätovne spracovať s pomocou frekvenčne závislej vyhladzovacej funkcie a slabšieho vyhladenia. Ak toto vylepší zreteľnosť a stabilitu nízko frekvenčného píku je vysoká šanca, že tento pík súvisí s lokálnymi geologickými podmienkami.

*Široký alebo viacnásobný pík.* V tomto prípade je potrebné zmeniť parametre vyhladzovania spektier, v prípade širokého píku aplikovať slabšie vyhladenie a v prípade viacnásobného píku aplikovať silnejšie vyhladenie a overiť stabilitu píku. Tiež je treba overiť, či dané píky nie sú umelého pôvodu.

## 4 VÝSLEDKY PRÁCE A DISKUSIA

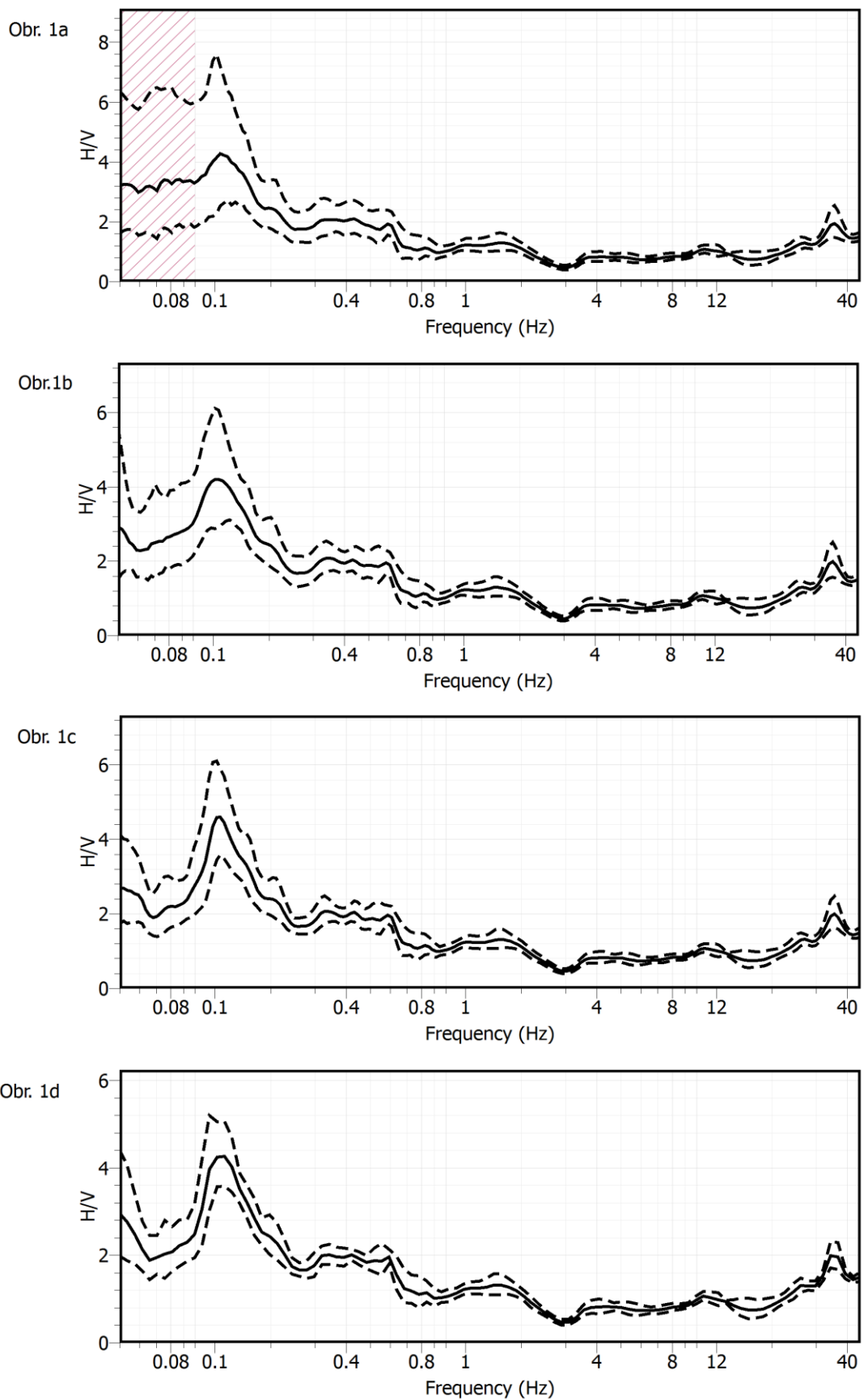
V predchádzajúcom texte sme popísali základný princíp výpočtu a experimentálne podmienky metódy analýzy seizmického šumu H/V pomerom. V tejto kapitole si ukážeme experimentálne podmienky a vplyv voľby parametrov v analýze H/V pomeru na vlastných dátach z lokality Špačince, ktorá sa nachádza v dôležitej epicentrálnej oblasti Malé Karpaty (pozri 1.3). Pomocou testov H/V krivky vyberieme najvhodnejšie ročné obdobie a časť dňa na uskutočňovanie merania, čím si pred pripravíme túto lokalitu na ďalšiu analýzu H/V pomerom. V druhom kroku si popíšeme realizáciu samotného terénneho merania seizmického šumu.

### 4.1 Test voľby dĺžky okna

Na dátach zo stálej seizmickej stanice Špačince sme testovali vplyv voľby jedného z najdôležitejších parametrov analýzy – dĺžky okien použitých na výpočet H/V pomeru. Tento test nám pomôže pri výbere optimálnej dĺžky okna pre budúce analýzy seizmického šumu z oblasti Malých Karpát dát.

Na obr.1 môžeme vidieť výsledné H/V krivky (celou čiarou) a ich odchýlky (prerušovanými čiarami) pre 100s, 200s, 300s a 600s okná (obr.1a,1b,1c,1d) z dvojhodinového záznamu seizmického šumu zaznamenaného 31.1.2013 (štvrtok) v čase 00:00 do 02:00. Pri výpočte H/V pomeru v softwari *Geopsy* sme použili kosínusové vyhladenie okrajov vyselektovaných časových okien, Konno a Ohmachi vyhladzovanie Fourierových spektier s nastavenou vyhladzovacou konštantou hodnoty 40, výslednú horizontálnu zložku sme zráтали ako kvadratický priemer horizontálnych zložiek podľa vzťahu (2), výslednú H/V krivku sme zráтали podľa vzťahu (4) (pozri 3.2). Na obrázku 1a je H/V krivka vypočítaná s 100s dĺžkou okna, zašrafovaná plocha pri nízkych frekvenciách označuje pásmo frekvencií, ktoré sa pri danom nastavení nepovažujú za spoľahlivé. Vidíme, že tvar krivky, pre všetky hodnoty nami skúmaného parametra dĺžky časového okna, nad hodnotu zhruba 0,2 Hz výrazne nevariuje, čo svedčí o stabilite H/V krivky. V nižších frekvenciách je rozptyl značnejší, znižuje sa zvyšovaním dĺžky časového okna. Najmenší rozptyl oblasti veľmi nízkych frekvencií preukazuje výpočet H/V krivky pre 600s okno, ktoré sa v našom dvojhodinovom zázname 12 krát zrealizuje. No už 300s voľba okien, s možným počtom realizácií 24, vedie k relatívne uspokojivému rozptylu okolo veľmi nízkych frekvencií. Hoci 600s okno vedie k výsledkom s menším rozptylom,

Obr.1 H/V krivky pre rôznu voľbu parametra dĺžky časového okna



považujeme za vhodnejšiu voľbu na spracovanie dát 300s okno, uvažujúc potrebu vyhadzovania okien z dôvodu výskytu rušivých signálov na zázname, ktoré nemôžu byť pre spoľahlivosť H/V krivky vo výpočte obsiahnuté. V tomto prípade by sme pri príliš dlhej voľbe časového okna stratili dlhý časový úsek záznamu a mali by sme neuspokojivý počet okien na spoľahlivé správanie štatistiky.

## **4.2 Variácia H/V krivky a amplitúdových spektier v závislosti od obdobia**

V tejto časti prešetríme variácie výslednej krivky H/V pomeru a amplitúdových spektier zaznamenaného seizmického šumu v závislosti od ročných období a fázy dňa. Vďaka čomu budeme môcť vybrať vhodné obdobie na uskutočnenie terénnych meraní a spoznať časový režim oblasti v zmysle variácií vlastností seizmického šumu. Ukážeme si H/V krivky a amplitúdové spektrá seizmického šumu prislúchajúce štvorhodinovým výsekom z 24 hodinových dát zo stálej seizmickej stanice Špačince zo zimy, jari, leta a tiež porovnáme denné a nočné dáta z rovnakého obdobia. U výraznejších H/V pík rozdiskutujeme, či sú tieto píky umelého pôvodu a teda ich bude treba z ďalších interpretácií vylúčiť, alebo môžu súvisieť s vlastnosťami LGŠ a teda byť ďalej interpretované. Seizmická stanica Špačince zaznamenáva seizmický šum pomocou 10s seizmometra Gurlap. Všetky H/V spektrálne pomery boli vypočítané s parametrami ako dáta v predchádzajúcom texte a pre dĺžku okna 300s.

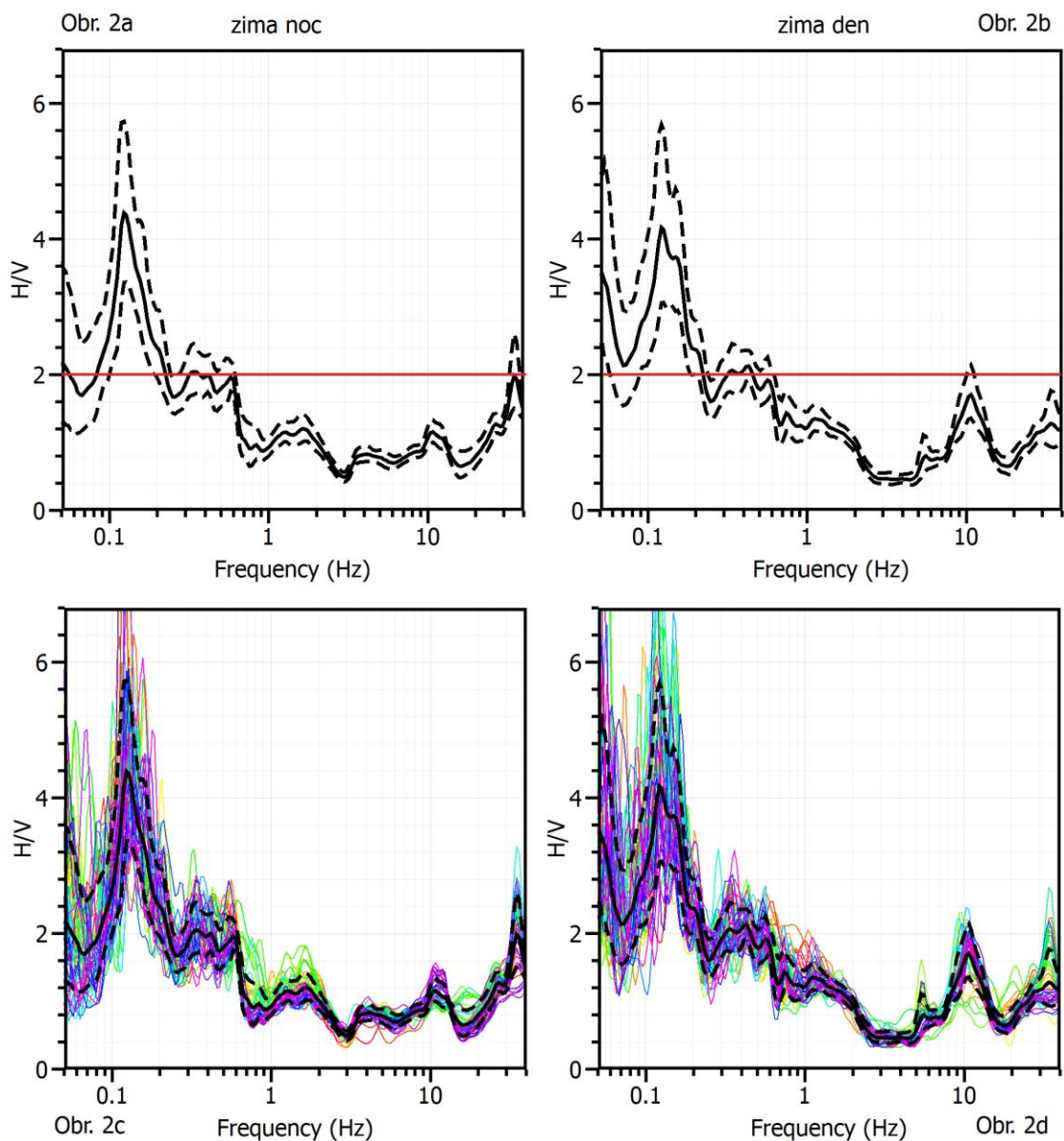
### **4.2.1 H/V krivka zo zimného obdobia**

Na *Obr. 2* sú znázornené krivky H/V pomeru zo štvorhodinového záznamu seizmického šumu zo dňa 31.1.2013. Na *Obr. 2a* je znázornená výsledná krivka so štandardnou odchýlkou znázornenou prerušovanou čiarou z nočných hodín od 00:00 do 04:00 hod a pod ním na *Obr. 2c* je H/V krivka z noci s farebnými krivkami, ktoré predstavujú H/V pomer pre jednotlivé okná. Na pravo na *Obr. 2b* a *Obr. 2d* sú priemerné H/V krivky s odchýlkami a pre jednotlivé časové okná zo záznamu seizmického šumu od 09:00 do 13:00 hod.

Výrazný rozdiel v krivkách medzi nocou a dňom je v okolí 10 Hz, v noci jeho amplitúda nepresahuje hodnotu jeden, pričom cez deň sa pohybuje na amplitúdovej hranici určujúcej signifikantnosť píku veľkosti 2 (pozri 3.4.2), ktorú znázorňuje červená horizontálna čiara. Je zrejme, že ho nemožno považovať za prírodný pík, ktorý súvisí s lokálnou geologickou štruktúrou, keďže hodnotu 2 jeho amplitúda takmer presahuje iba cez deň. Pravdepodobne do neho prispievajú umelo generované signály. Ďalší pík, ktorého

amplitúda cez deň nadobúda hodnotu 2 je pík H/V pomeru nachádzajúci sa okolo frekvencii 40Hz, ktorý ale túto hranicu výrazne podlieza cez noc. Krivky vykazujú vzájomné rozdiely pozdĺž celého frekvenčného pásma. Variácie na nižších frekvenciách, pod 1Hz, nie sú až na toľko markantné, ale napriek tomu viditeľné. Najvýraznejší pík oboch H/V kriviek nachádzajúci sa medzi frekvenciami 0,1 až 0,2 Tento pík sa javí ako mierne viacnásobný pík. Pričom na dennej krivke je jeho zdvojenie výraznejšie, treba teda overiť, či do neho neprispieva aj nejaký umelo generovaný zdroj.

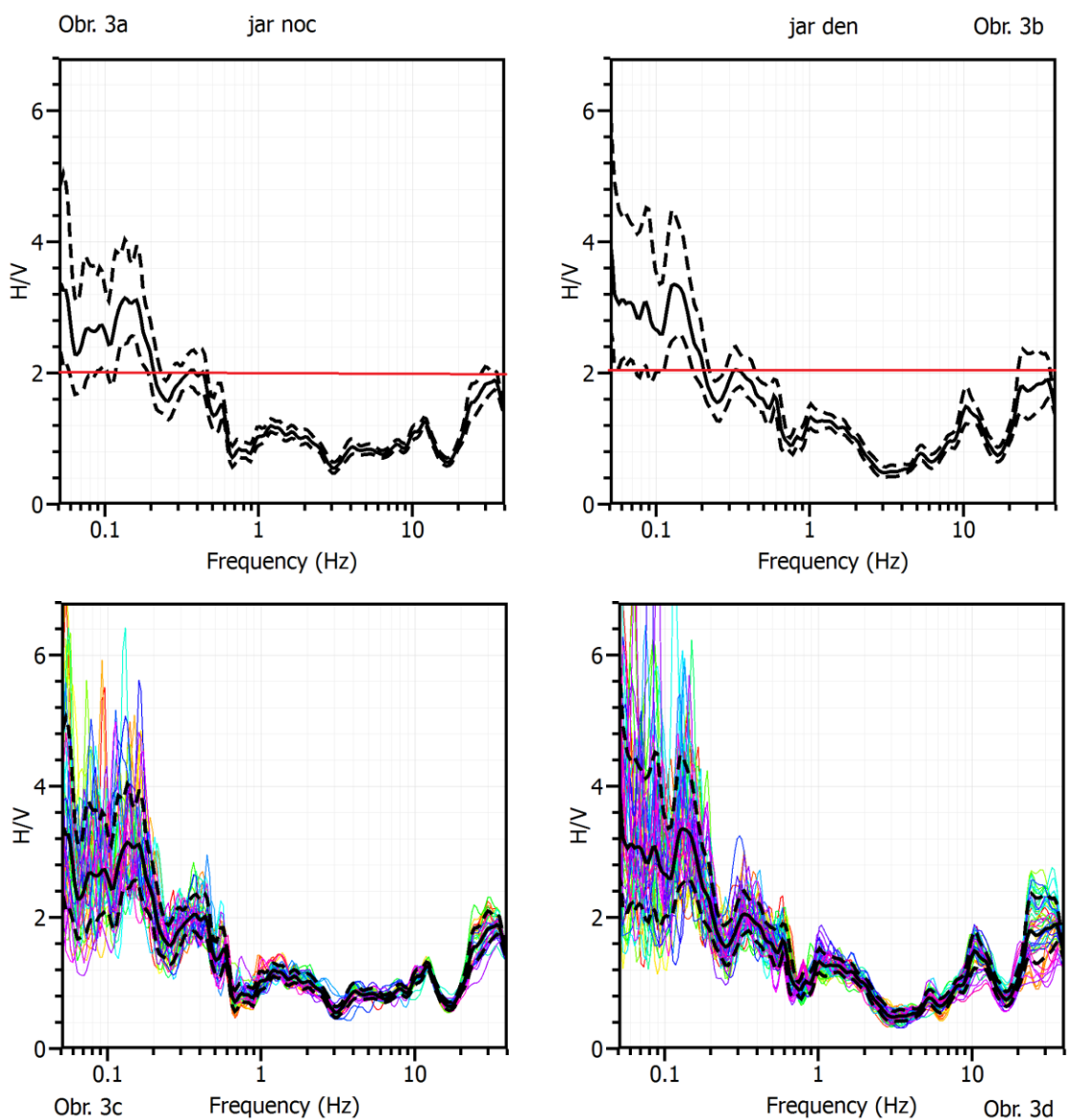
Obr. 2 H/V krivky zo zimného obdobia



#### 4.2.2 H/V krivka z jarného obdobia

Na Obr.3 sú znázornené krivky H/V pomeru zo dňa 4.4.2013 (štvrtok). Boli použité 4hodinové dáta z noci od 00:00 do 04:00 a z dňa od 09:00 do 13:00 hod. Na Obr. 3a a 3b sú priemerné krivky H/V pomeru s odchýlkami (prerušované čiary) z nočných a denných hodín a pod nimi na Obr. 3c a Obr. 3d sú farebné H/V krivky spočítané pre každé časové okno záznamu. Základný charakter dennej a nočnej krivky je podobný, avšak opäť si môžeme všimnúť zväčšenie amplitúdy píku okolo 10 Hz na denných dátach.

Obr. 3 H/V krivky z jarného obdobia



Amplitúda najvýraznejšieho píku na frekvencii medzi 0,1 až 0,2 Hz dosahuje hodnotu približne 3, čo spĺňa kvantitatívne amplitúdové kritérium a tiež spĺňa ostatné kritéria

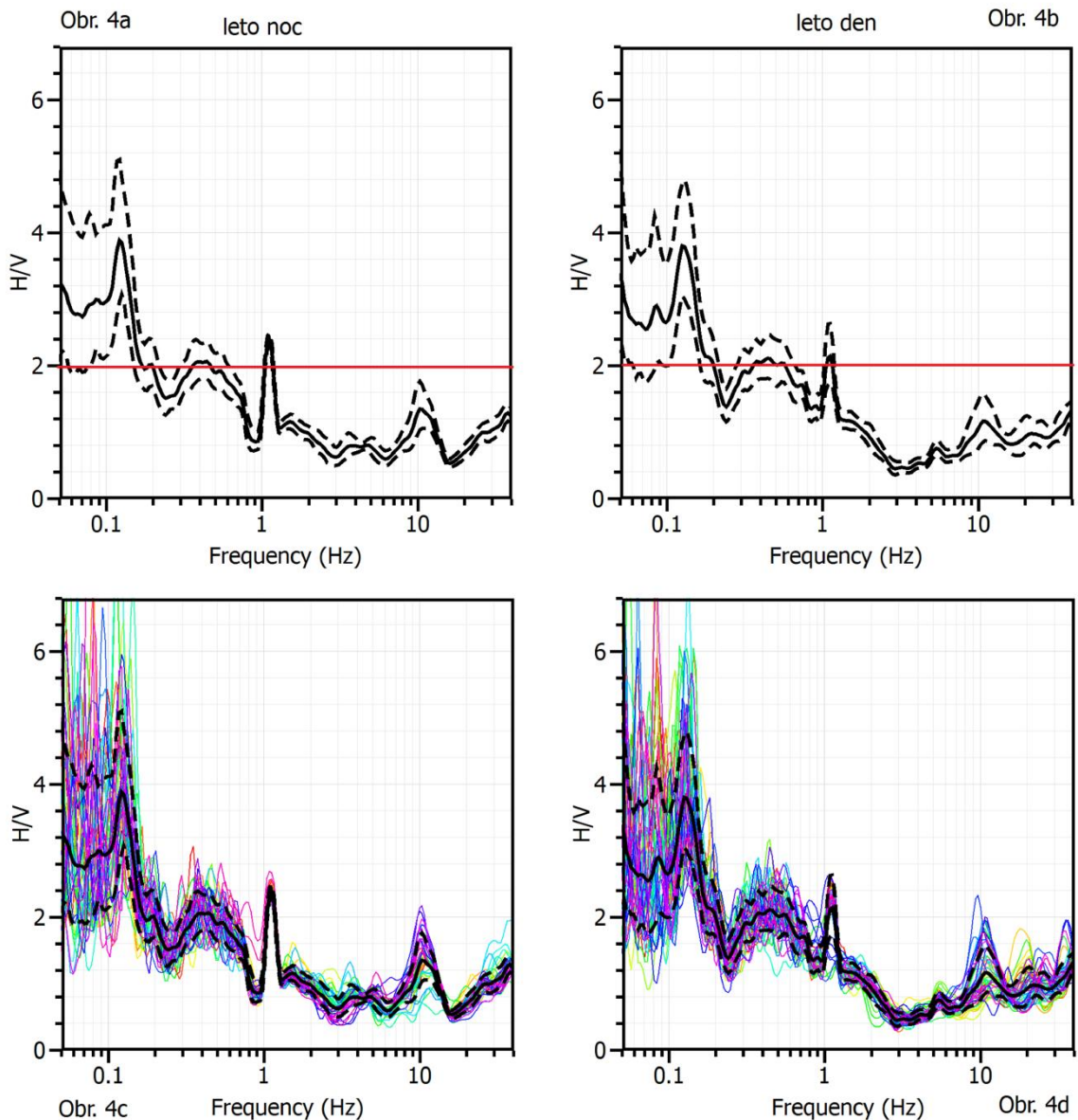


signifikantnosti píku (viď. 3.4.2). Na frekvenciách pod 0,1 Hz rastie výrazne rozptyl, čo súvisí s prenosovou charakteristikou aparatury (viď. 3.3.1).

#### 4.2.3 H/V krivka z letného obdobia

Na Obr. 4 sú H/V krivky z letného obdobia, z dát zo dňa 28.6.2013 (piatok), na Obr. 4a priemerné krivky z noci od 00:00-04:00 hod s odchýlkami, na pravo zo dňa od 09:00-13:00

Obr. 4 H/V krivky z letného obdobia



hod (Obr. 4b) a pod nimi (Obr. 4c, 4d) H/V krivky pre všetky časové okná.

Na H/V krivkách z letných dát opäť možno pozorovať miernu amplitúdovú variáciu píku na frekvencii okolo 10Hz a tiež amplitúd na ostatných frekvenciách, pričom približný charakter tvaru krivky sa značne nezmenil. Na frekvencii okolo 1Hz je podozrivý, výrazne ostrý pík, ktorý dosahuje amplitúdu hodnoty 2 vyznačenú červenou horizontálnou čiarou,

v krivkách z denných aj nočných dát. Najpravdepodobnejšie pôjde o pík generovaný umelým zdrojom.

Na obrázkoch Obr.2- Obr.4 môžeme vidieť súvislosť H/V krivky s ročnými obdobiami a tiež variáciu H/V krivky počas dňa a noci. Všetky H/V pomery boli vypočítané softwarom Geopsy s rovnakými parametrami a z rovnakej dĺžky záznamu. Všetky vybrané dáta z jednotlivých ročných období boli zaznamenané počas pracovných dní.

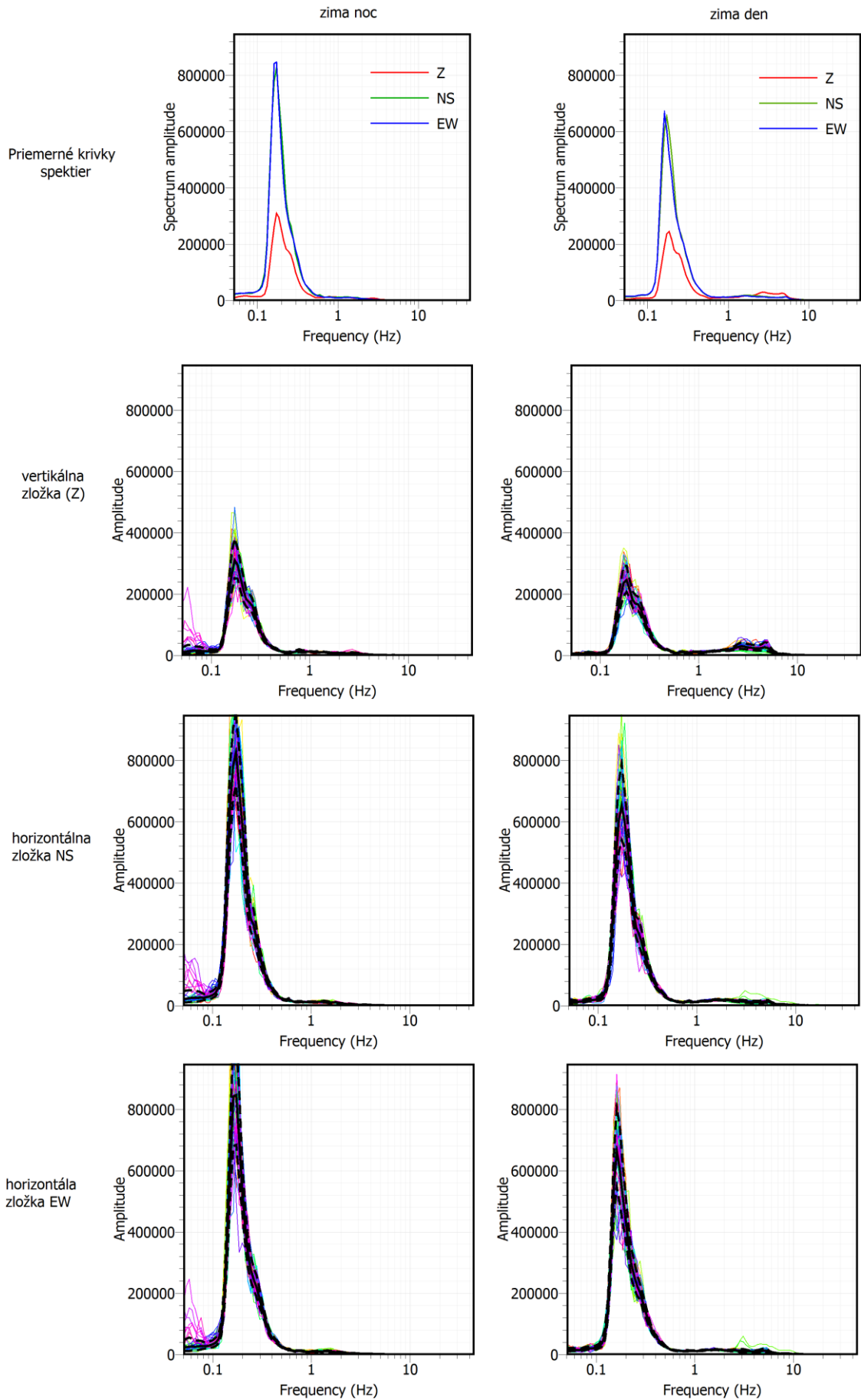
H/V krivky z každého ročného obdobia vykazujú podobný základný tvarový charakter ovplyvnený amplitúdovou variáciou na jednotlivých frekvenciách. Najvýraznejšiu variáciu preukazoval pík v okolí frekvencie 10Hz a v okolí 40Hz, ale ani jeden z nich nedosahuje v každom ročnom období hraničnú amplitúdovú hodnotu 2. Zmena veľkosti amplitúdy počas dňa a noci môže indikovať príspevok umelých zdrojov. Výrazný pík s amplitúdou prekračujúcou hodnotu 2 v okolí 1Hz je prítomný iba na letných dátach, čo je mimoriadne podozrivé a taktiež indikuje umelý pôvod píku. Medzi frekvenčným intervalom 0,2Hz až 1 Hz môžeme na každej H/V krivke pozorovať široký pík, ktorý tesne dosahuje veľkosť amplitúdy 2. No ďalšie kritéria pre určenia signifikantnosti píku popísané v časti 3.4.2 nemôžeme jednoznačne považovať za splnené. Najzaujímavejší pík s hodnotou amplitúdy okolo 4 vykazuje tiež výraznú variáciu s ročnými obdobiami a menšiu medzi dňom a nocou. Splňa kritéria z časti 3.4.2 podľa ktorých ho môžeme považovať za signifikantný a jeho frekvenciu označiť ako frekvenciu  $f_0$ , ktorá je blízka rezonančnej frekvencii LGŠ. A ktorý pravdepodobne poukazuje na ostré rozhranie LGŠ s veľkým rýchlostným kontrastom. Najväčšie hodnoty amplitúdy a najmenšie rozmazanie tento pík dosahuje počas zimného obdobia čo pravdepodobne súvisí s energiou mikroseizmov, ktorej hodnota je cez zimu najväčšia a tak tento výsledok je najmenej skreslený prenosovou charakteristikou aparatúry na nízkych frekvenciách, ktorý spôsobuje nestabilitu a rozmazanosť píku v hodnotách frekvencie blízko nuly (viď. 3.3.1).

#### **4.2.4 Spektrá vypočítaných kriviek**

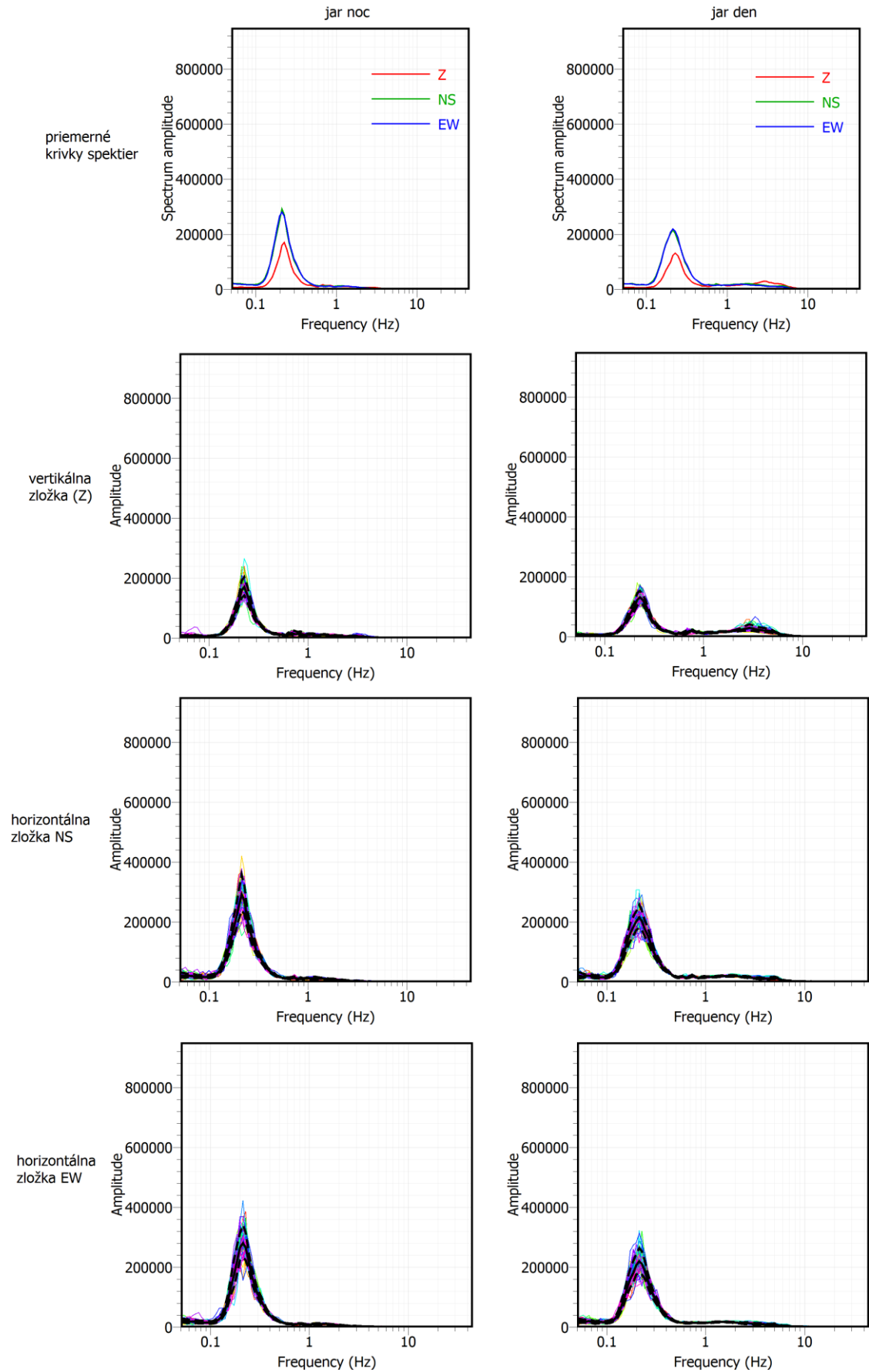
V software Geopsy sme vypočítali spektrá jednotlivých zložiek seizmického šumu pre všetky časové okná a tiež priemerné krivky spektier jednotlivých zložiek.

Na nasledujúcich stranách sú Obr. 5 až Obr. 7, ktoré sa skladajú zo sady 8 obrázkov. Pod sebou sú umiestnené vždy 4 obrázky v 2 stĺpcoch. Na ľavo sú spektrá nočných dát konkrétneho obdobia a na pravo denných, v poradí: priemerné krivky spektier, spektrum horizontálnej zložky a spektrá vertikálnych zložiek NS a EW.

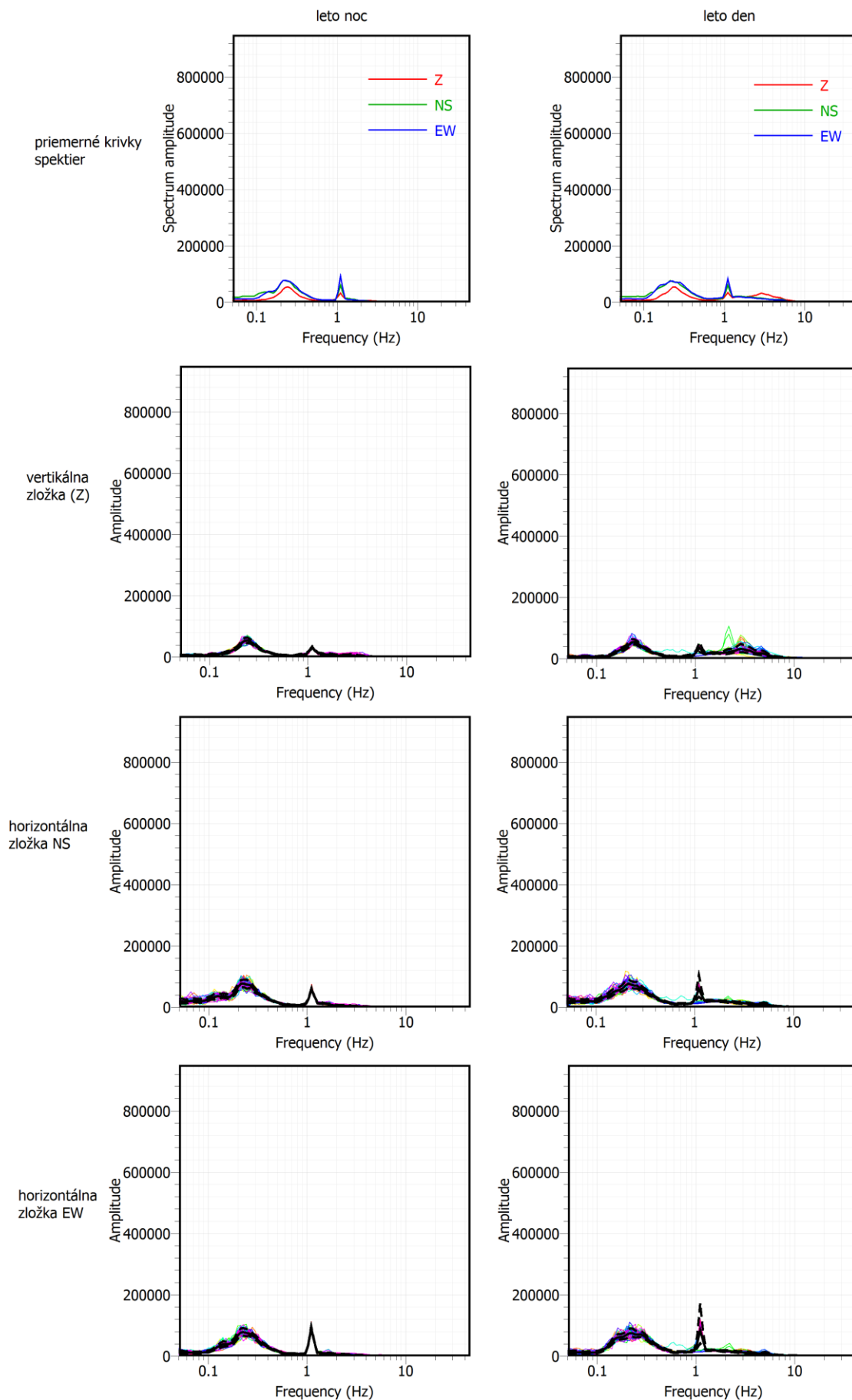
Obr. 5 Spektrá zo zimných nočných a denných záznamov vypočítaných H/V kriviek



Obr.6 Spektrá z jarných nočných a denných záznamov vypočítaných H/V kriviek

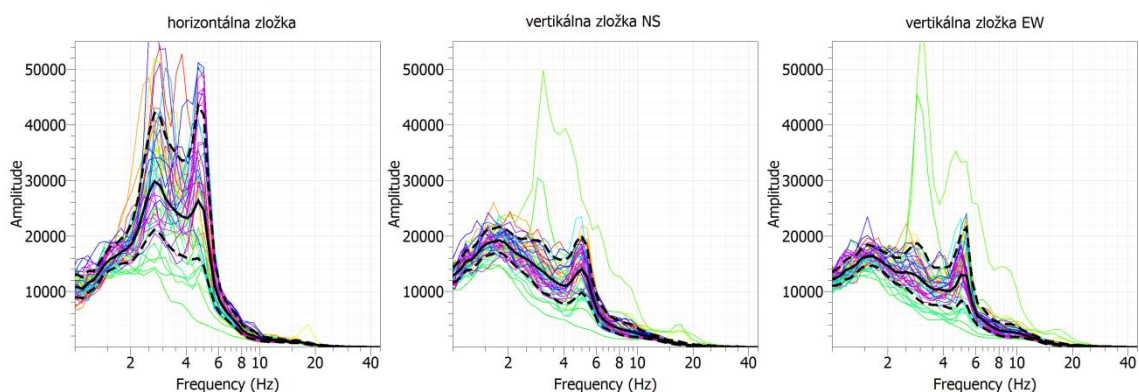


Obr. 7 Spektrá z letných nočných a denných záznamov vypočítaných H/V kriviek



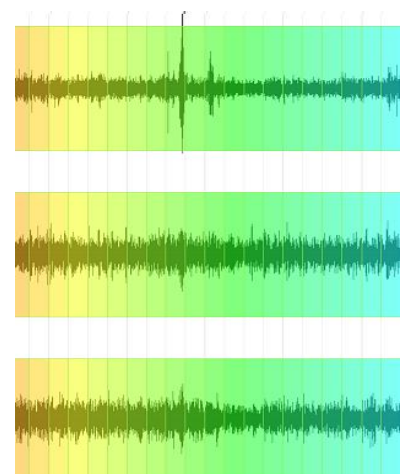
Všetky amplitúdové spektrá sú znázornené v rovnakej škále, takže môžeme zreteľne vidieť pokles amplitúd v závislosti od ročných období. Môžeme vidieť kvantitatívny frekvenčný obsah spektier, ktorý sa sústreďuje na nízkych frekvenciách, teda vo frekvenčnom pásme mikroseizmov. Najvyššie hodnoty amplitúd, ktoré dosahujú spektrá zimných dát potvrdzujú fakt, že v zimnom období majú mikroseizmy najviac energie. Taktiež už v spektrálnom zložení letných dát je výrazný atypický pík na každej zložke seizmického šumu na frekvencii 1Hz, čo zosilňuje indikáciu umelého pôvodu píku H/V krivky vznikajúceho na tejto frekvencii. Na iných, v predchádzajúcom texte spomínaných, frekvenciách napr. frekvencia 10Hz, spektrá neukazujú výrazne hodnoty amplitúd. Rozptyl vidno medzi frekvenciami 1-10Hz predovšetkým spektrách z denných záznamov seizmického šumu, čo pôsobí ako efekt prechodových javov, keďže rozptýlené sú krivky pre jednotlivé časové okná. Tieto rozptyly sú voči hodnotám amplitúd mikroseizmov nevýrazné. Tento frekvenčný interval, neobsahujúci frekvenčný interval mikroseizmom, si v amplitúdovom zložení zložiek seizmického šumu zimných denných dát, priblížime (viď. Obr. 8).

Obr. 8 Frekvenčný výsek zložiek spektra z obdobia: zima deň



Výrazný rozptyl iba zelenej krivky vyzerá ako prechodový jav, ukážme si ešte záznam seizmického šumu z prisluchajúceho časového okna (viď. Obr. 9).

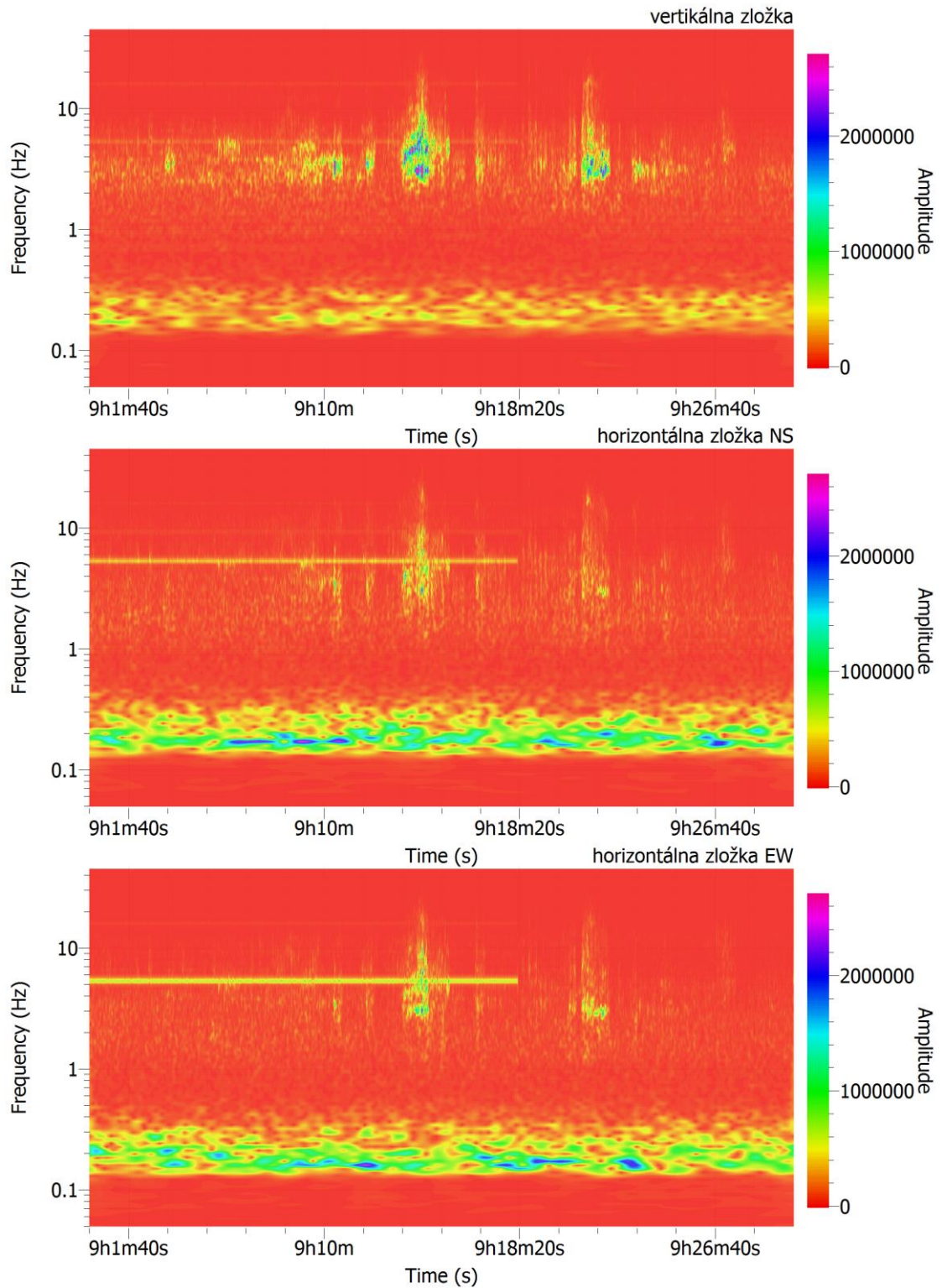
Zelenej rozptylovej krivke prislúcha časové okno rovnakej farby, v zázname seizmického šumu na Obr. 9 si môžeme všimnúť prítomnosť prechodového javu, ktorý zrejme rozptyl spôsobuje. Túto časť záznamu je lepšie pri výpočte H/V pomeru odtrániť.



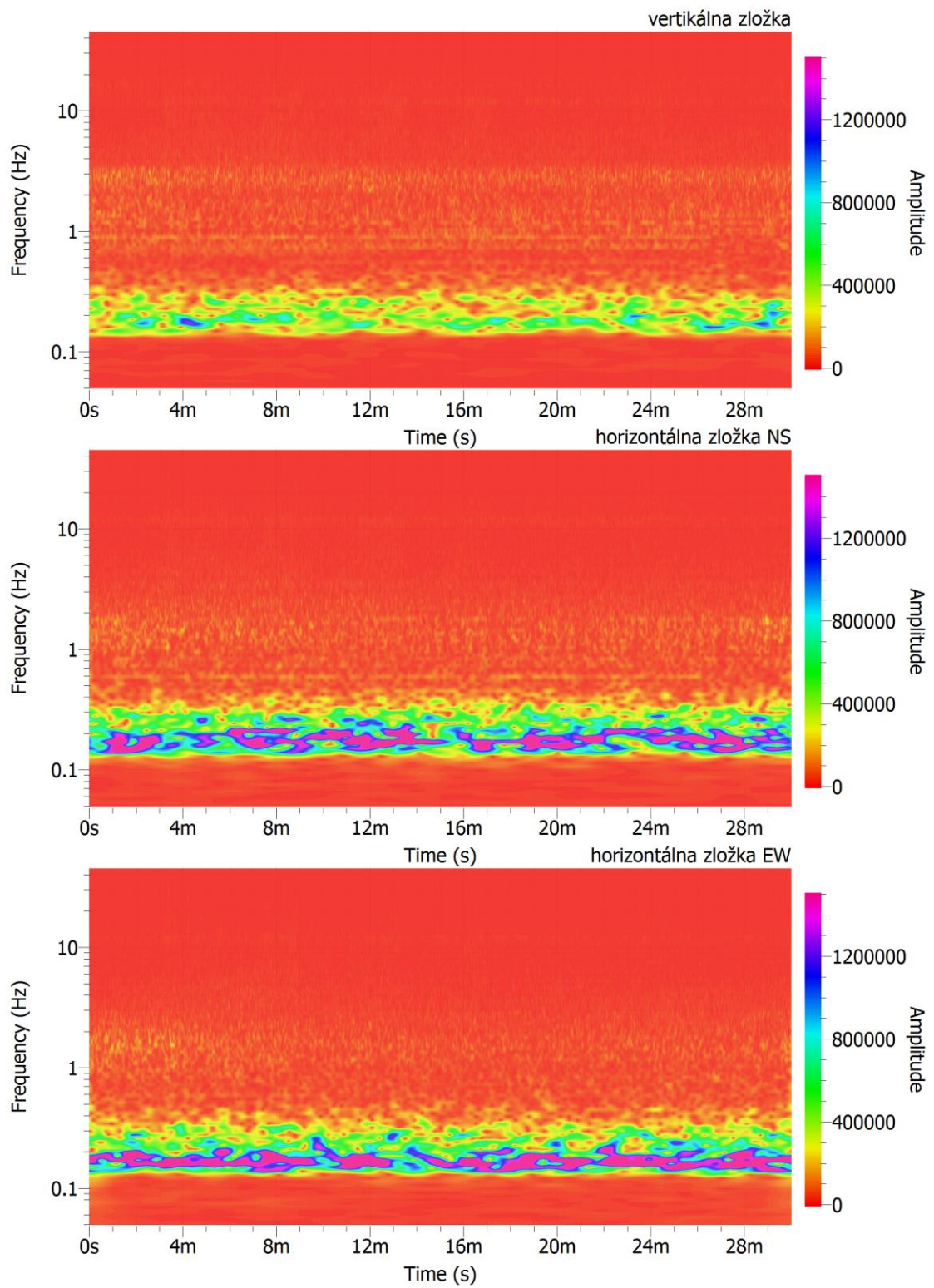
Obr. 9 Výsek záznamu seizmického šumu z obdobia: zima deň

## 4.2.5 Aplikácia časovo frekvenčnej analýzy (TFA) na pomoc pri interpretácii H/V krivky

Obr. 10 TFA záznamu seizmického šumu z obdobia: zima deň

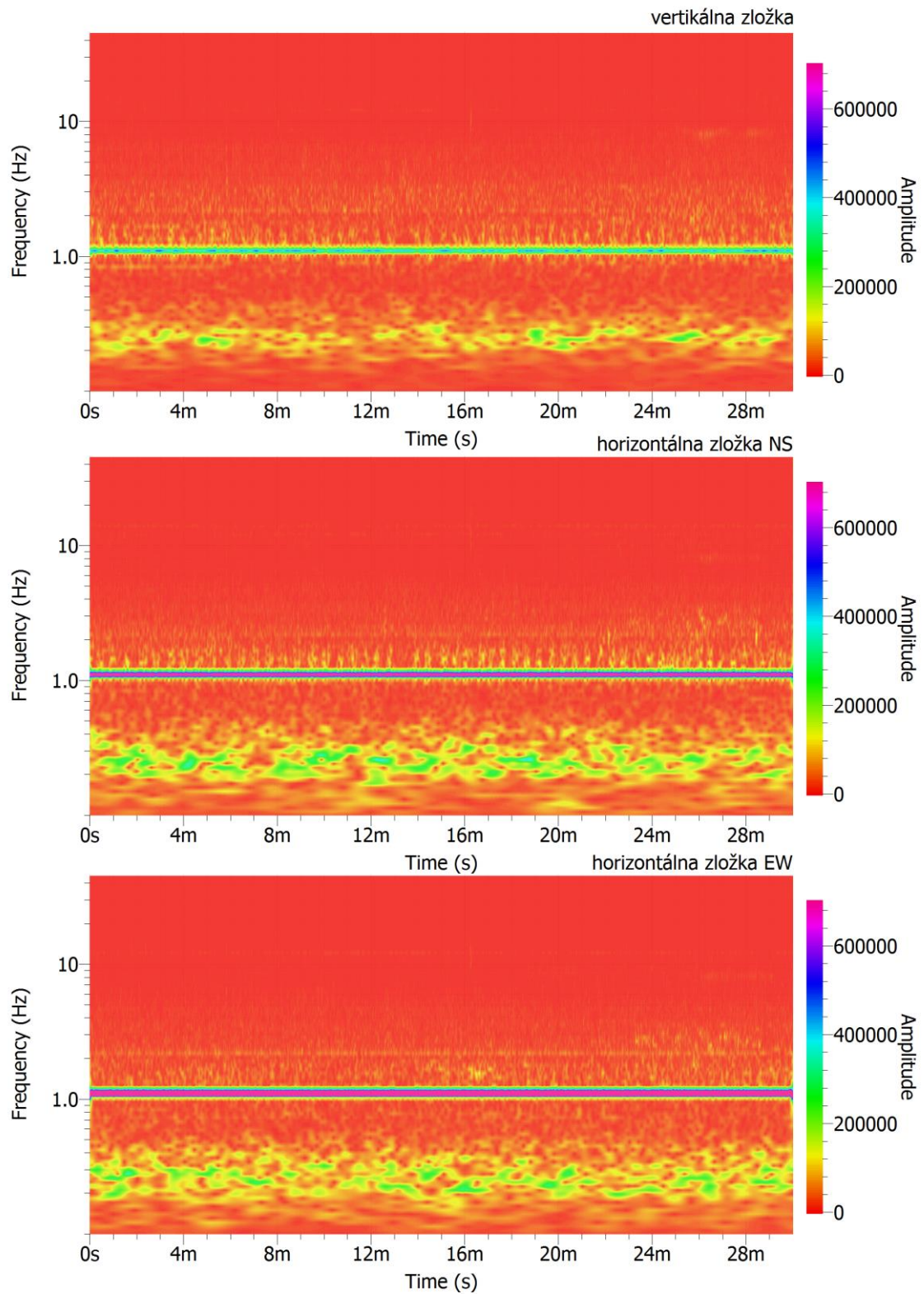


Obr. 11 TFA záznamu seizmického šumu z obdobia: zima noc

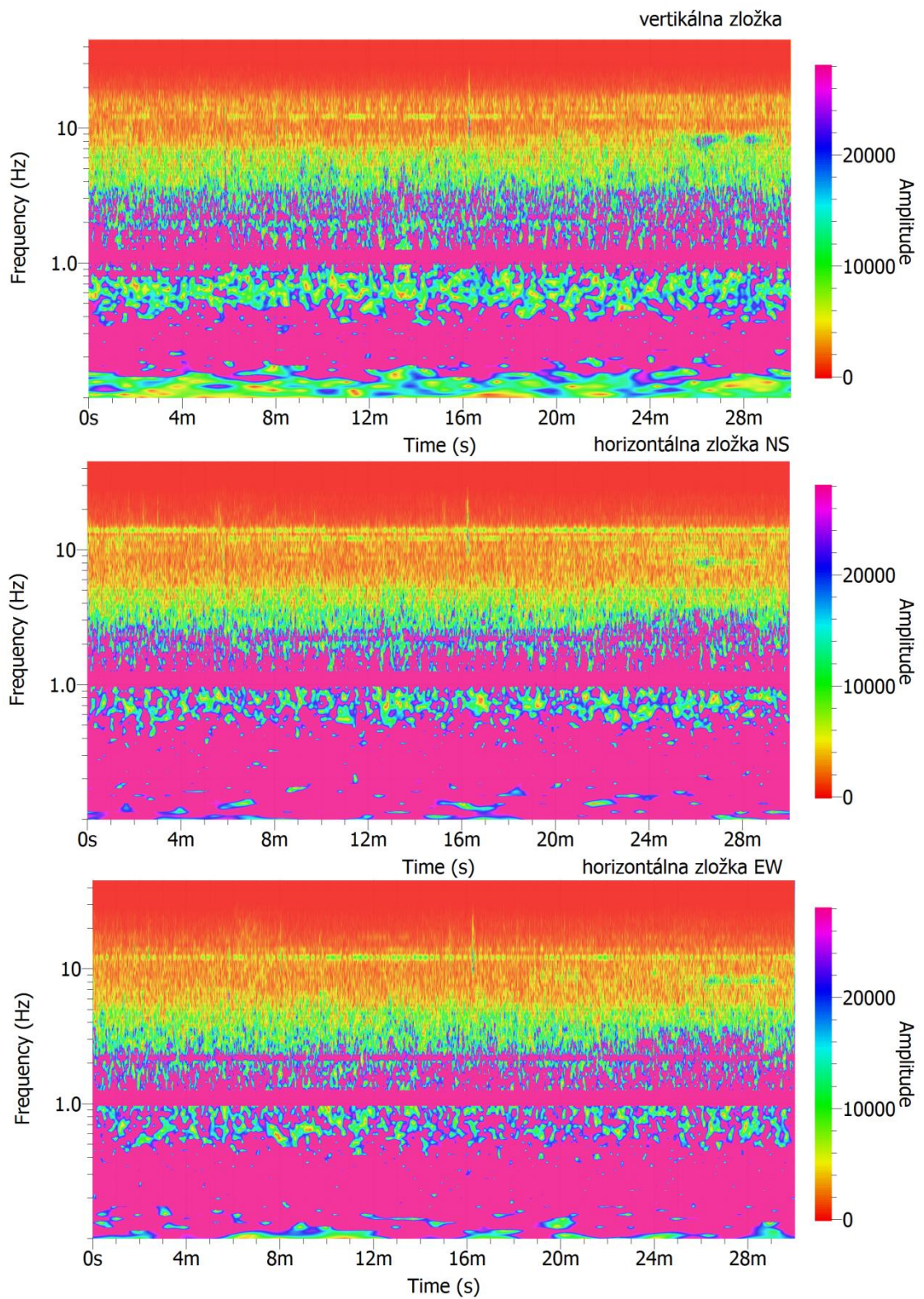




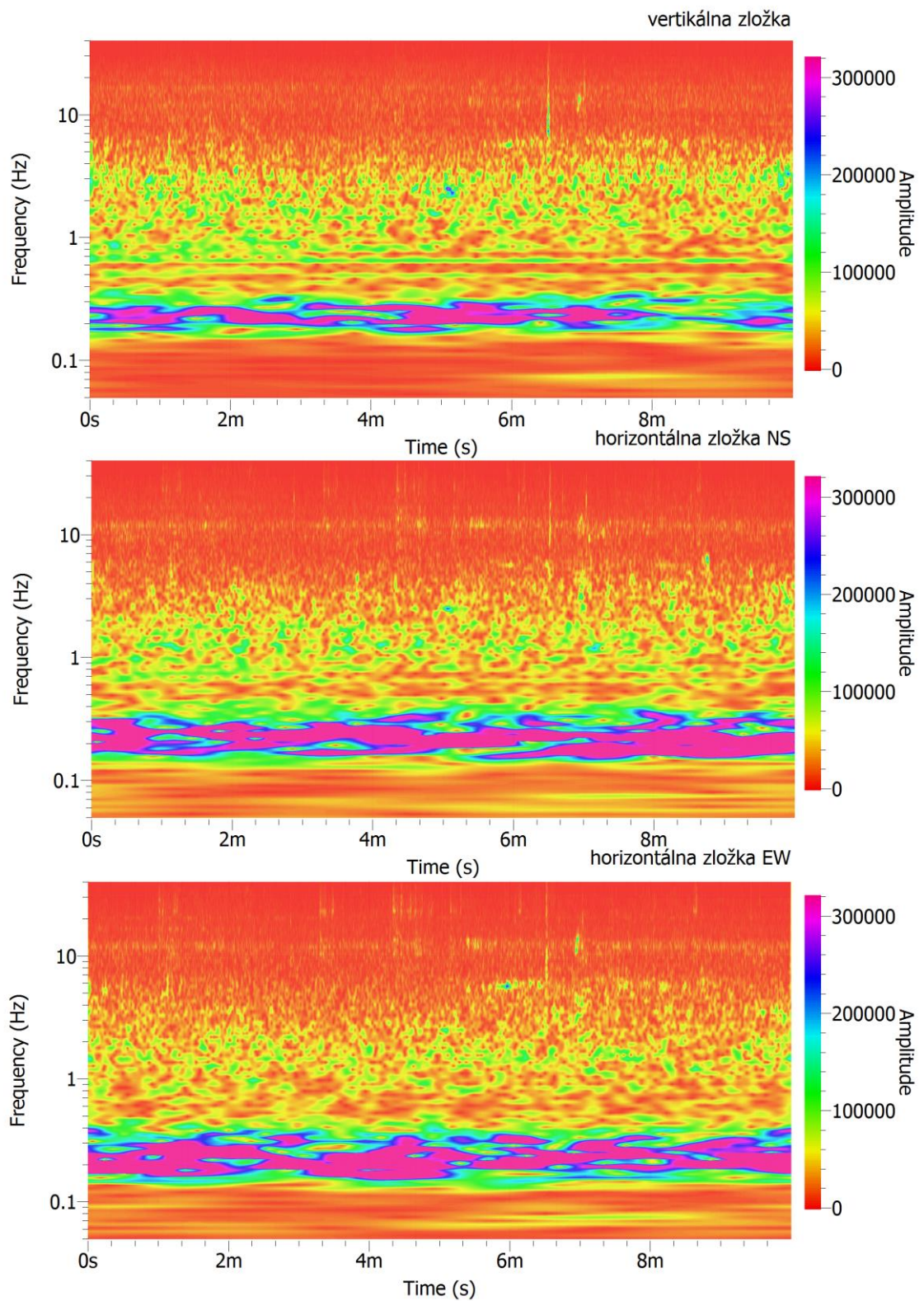
Obr. 12 TFA záznamu seizmického šumu z obdobia: leto deň



Obr. 13 TFA záznamu seizmického šumu z obdobia: leto deň



Obr. 14 TFA záznamu seizmického šumu z obobia: jar noc



Metódu časovo frekvenčnej analýzy sme použili na pomoc pri interpretácii výslednej krivky H/V pomeru. Na predchádzajúcich stranách na obrázkoch obr.10 až obr.14 sú výsledky TFA pre vybrané časové úseky záznamov seizmického šumu, ktoré sme použili na výpočet H/V pomeru, chceme si na nich overiť a preukázať charakter signálov použitých na výpočet H/V pomeru.

Na obr. 10 je polhodinový záznam z denných zimných hodín, na ktorom môžeme zreteľne vidieť výrazné flaky vo frekvenčnom rozsahu 2-10Hz s inou amplitúdou ako je pre túto frekvenčnú oblasť na TFA charakteristické. Tieto škvrnky zodpovedajú prechodovému signálu (viď. obr. 8 a obr. 9.), pravdepodobne, mohlo ísť o prejazd auta v blízkosti miesta merania. Výrazná žltá čiara v horizontálnych zložkách okolo frekvencie 7Hz tiež určite nezodpovedá prírodným vplyvom, ale ide príspevok umelo generovaných signálov. Predpokladáme, že čiara môže znázorňovať pôsobenie a vypnutie stroja. V okolí tejto frekvencie 7Hz je v H/V pomere zimných dát prítomný ostrý pík s hodnotou amplitúdy 1 (viď. obr. 2). Amplitúdy vo frekvenčnom pásme do 1Hz počas celej dĺžky záznamu zodpovedajú prírodnému seizmickému šumu, mikrosezimom.

Na ďalšom obr. 11 vidíme TFA z polhodinového záznamu seizmického šumu zaznamenaného v nočných hodinách. Škála amplitúd je nižšia, teda mikrosezimy vystupujú do popredia, keďže v tomto zázname sa nenachádzajú žiadne prechodové javy.

Na obr. 12 je TFA z polhodinového záznamu z leta, z denných hodín. Na H/V krivke vypočítanej zo zložiek záznamu získaného v tomto období (viď. obr. 3) bol výrazný, podozrivý ostrý pík na frekvencii okolo 1Hz. Táto časovo frekvenčná analýza nám preukázala, že tento pík má umelý pôvod ako sme sa domnievali. Môžeme vidieť výraznú ohraničenú vysokofrekvenčnú čiaru prechádzajúcu celým záznamom v okolí frekvencie 1Hz na každej zložke spektra seizmického šumu. Tento účinok pripisujeme pôsobeniu umelého zdroja, pravdepodobne monofrekvenčného stroja, ktorý pôsobil v tomto období, cez deň aj v noci, keďže aj nočné záznamy preukazujú tento efekt.

Obr. 13 je TFA z letných denných dát s preškálovanou amplitúdou, tak aby sme mohli pozorovať, aj nižšie amplitúdy. V pôvodnej škále bola dominantná amplitúda 1Hz signálu, takže signály s nižšou amplitúdou boli vizuálne potlačené. V tejto škále už môžeme pozorovať, aj signály v okolí frekvencie 10Hz, ktorých charakter svedčí o ich umelom pôvode. Opäť sa domnievame, že mohlo ísť o pôsobenie periodicky pracujúceho stroja.

Na poslednom obrázku TFA obr. 14, z 10 minút dlhého záznamu seizmického šumu, tiež môžeme pozorovať rovné čiary v okolí 10Hz indikujúce umelý príspevok pri tejto frekvencii.

Dodatočnou analýzou spektier seizmického šumu a časovou frekvenčnou analýzou časových výsekov záznamu seizmického šumu sme ukázali, že z interpretácie H/V kriviek v súvislosti s LGŠ môžeme vylúčiť pík vznikajúci na frekvencii okolo 10Hz, kvôli jeho umelému pôvodu. Čo nám indikovala už jeho výrazná variácia na H/V krivke medzi dňom a nocou a potvrdili sme to použitím časovo frekvenčnej analýzy. A tiež výrazný pík na frekvencii okolo 1Hz z letných dát. Hoci tento pík spĺňa kritéria signifikantnosti píku (vid'. 3.4.2), TFA preukázala jeho umelý pôvod.

Dodatočná analýza záznamu seizmického šumu použitého na výpočet H/V krivky je veľmi dôležitá súčasť správnej interpretácií H/V krivky. Je rozumné si pred spracovaním zaznamenaného seizmického šumu metódou H/V pomeru vypočítať spektrá a časové okná prislúchajúce uleteným krivkám jednotlivých zložiek vylúčiť zo spracovania.

V prípade, že umelý zdroj pôsobí počas celého času zaznamenávania signálu umelý príspevok je obsiahnutý v každom časovom okne, teda nejde ho vylúčiť z výpočtu. Je potrebné použitím napr. časovo frekvenčnej analýzy vyšetriť frekvenčné príspevky a umelé príspevky zohľadniť pri interpretácií H/V krivky ich vylúčením.

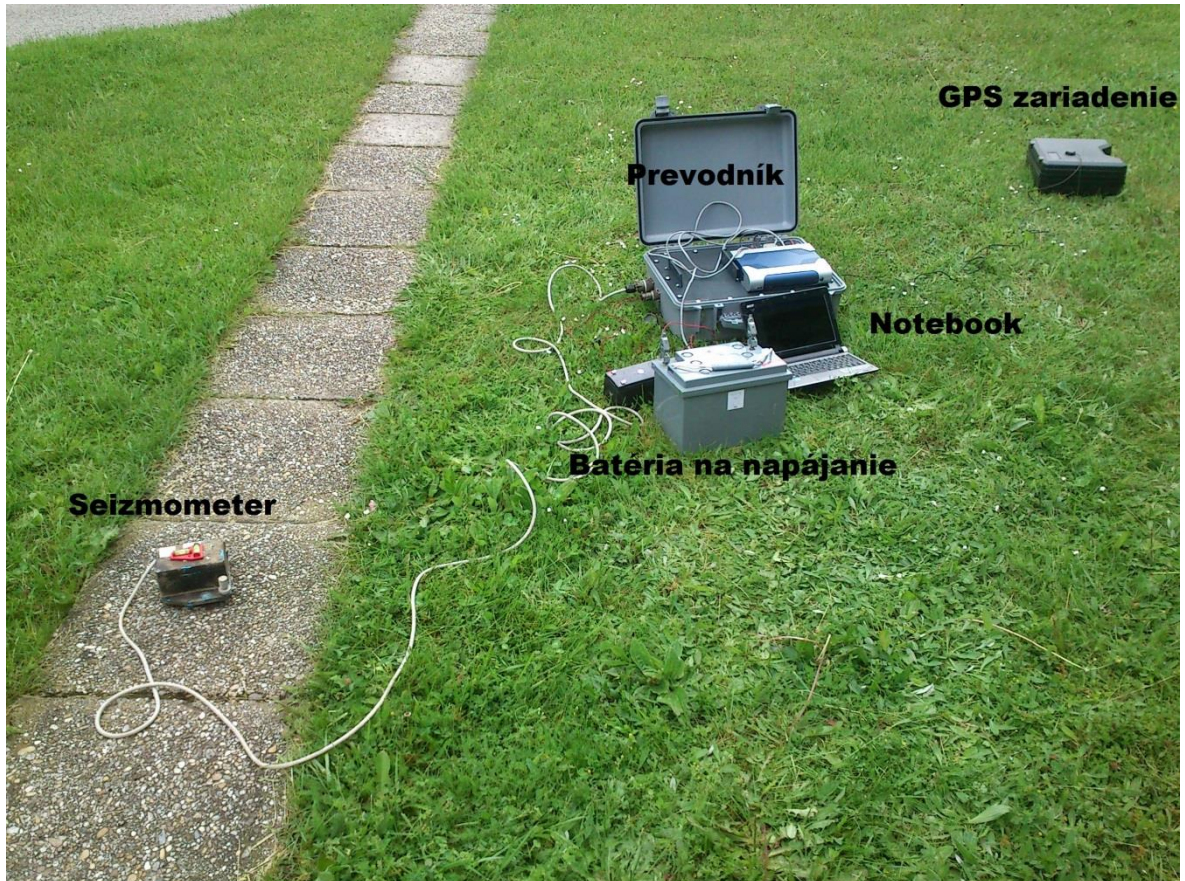
Na základe analýzy variácie H/V kriviek sme dospeli k záveru, že najvhodnejšie obdobie pre uskutočňovanie meraní seizmického šumu za účelom spracovania metódou H/V pomeru je v nočných hodinách, kedy je nižší príspevok nežiaduceho antropogénneho ruchu. A počas zimného obdobia, kedy majú mikroseizmy najviac energie, teda aj najvyššie amplitúdy a nižšie frekvencie sú tak menej zaťažené prenosovou charakteristikou meracej aparatúry.

#### **4.3 Realizácia poľného merania**

Počas tejto bakalárskej práci sme sa počas cvičného merania v teréne naučili zapájať a obsluhovať aparatúru potrebnú na meranie seizmického šumu, čím sme sa pripravili na vykonávanie budúcich potrebných meraní.

Na nasledujúcom obrázku obr. 15 je zapojená aparatúra na meranie seizmického šumu s popisom jednotlivých častí.

Obr. 15 Aparatúra na meranie seizmického šumu



Aparatúra sa skladá z 5 hlavných častí:

- trojzložkový seizmometer na zaznamenávanie seizmického šumu
- prevodník - obsahuje počítač, spracúva analógový signál zo senzoru na číslicový, je pripojený z jednej strany na napájanie a z druhej na GPS zariadenie
- batéria na napájanie
- GPS zariadenie- slúži ako anténa, posiela správy o polohe a čase
- Notebook- slúži len na zobrazovanie záznamu merania, s prevodníkom je spojený sieťovým káblom

Pri poľnom meraní si treba dávať pozor na umiestnenie senzora, má byť umiestnený vodorovne a vo všeobecnosti orientovaný na sever, ale pre bežné H/V orientácia nie je dôležitá. Treba sa vyhnúť nerovnomernému, nespevnenému povrchu a myslieť na experimentálne podmienky zhrnuté v 3.3 . GPS zariadenie treba umiestniť, tak aby malo spojenie aspoň so 4 satelitmi.

## ZÁVER

Hlavným cieľom tejto bakalárskej práce bolo preskúmať možnosti využitia analýzy záznamov seizmického šumu pomocou metódy spektrálneho H/V pomeru na spresnenie rýchlostného modelu lokálnej geologickej štruktúry vo významnej ohniskovej oblasti Malé Karpaty.

Na splnenie cieľa práce sme našťudovali a zosumarizovali súčasné poznatky o zložení vlnového poľa seizmického šumu, o zdrojoch, ktoré do tohto vlnového poľa prispievajú. Vypracovali sme prehľad základných princípov najpoužívanejších metód analýzy seizmického šumu. Zároveň sme charakterizovali výhody a nevýhody aplikácie metódy H/V pomeru so zameraním na spresnenie rýchlostného modelu lokálnej geologickej štruktúry.

Podrobne sme popísali metódu H/V pomeru, fyzikálnu podstatu interpretácie jej výsledkov, princíp a parametre výpočtu, dôležité experimentálne podmienky a faktory, ktoré treba zohľadniť pri interpretácii výsledkov.

V rámci tejto bakalárskej práce sme absolvovali cvičné poľné merania, na ktorých sme sa naučili pracovať s poľnou aparátúrou na merania seizmického šumu a oboznámili sme sa s vplyvom najdôležitejších experimentálnych podmienok na výsledky poľných meraní. Týmto sme sa pripravili na budúce poľné merania v oblasti Malých Karpát.

Pomocou H/V metódy sme analyzovali záznamy seizmického šumu zo stálej seizmickej stanice Špačince v oblasti Malých Karpát zaznamenané počas rôznych období roka. Na základe dôkladného testovania sme vybrali vhodnú dĺžku časového okna pre analýzu a vyšetrili sme časovú variabilitu spektrálneho obsahu seizmického šumu a H/V kriviek. Takto sme identifikovali obdobie počas roka vhodné pre vykonanie budúcich poľných meraní metódou H/V pomeru v oblasti Malých Karpát. Tieto zistenia budú užitočné pre spracovanie záznamov šumu z ďalších lokalít a pre poľné merania seizmického šumu a ich analýzu.



## Zoznam použitej literatúry

Acerra, C., Aguacil, G., Anastasiadis, A., Atakan, K., Azzara, R., Bard, P. Y., ... & Moreno, B. (2004). Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations measurements, processing and interpretation. Deliverable D23.12 „Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations. Measurement, processing and interpretation“

Albarello, D., & Lunedei, E. (2013). Combining horizontal ambient vibration components for H/V spectral ratio estimates. *Geophysical Journal International*, 194(2), 936-951.

Atakan, K., Azzara, R., Bard, P. Y., Bonnefoy-Claudet, S., ... & Wassner, J. (2003). Site Effects Assessment Using Ambient Excitations. Deliverable D08.02 „Final report on Measurement Guidelines. H/V technique : experimental conditions“

Atakan, K., Azzara, R., Bard, P. Y., Bonnefoy-Claudet, S., ... & Wassner, J. (2003). Site Effects Assessment Using Ambient Excitations.

Bard, P. Y., Cadet, H., Endrun, B., Hobiger, M., Renalier, F., Theodulidis, N., ... & Kristekova, M. (2010). From non-invasive site characterization to site amplification: recent advances in the use of ambient vibration measurements. In *Earthquake Engineering in Europe* (pp. 105-123).

Bonnefoy-Claudet, S., Cotton, F., & Bard, P. Y. (2006). The nature of noise wavefield and its applications for site effects studies: a literature review. *Earth-Science Reviews*, 79(3), 205-227.

Bonnefoy-Claudet, S., Baize, S., Bonilla, L. F., Berge-Thierry, C., Pasten, C., Campos, J., ... & Verdugo, R. (2009). Site effect evaluation in the basin of Santiago de Chile using ambient noise measurements. *Geophysical Journal International*, 176(3), 925-937.

Bindi, D., Marzorati, S., Parolai, S., Strollo, A., & Jäkel, K. H. (2009). Empirical spectral

ratios estimated in two deep sedimentary basins using microseisms recorded by short-period seismometers. *Geophysical Journal International*, 176(1), 175-184.

Cipciar, A. (2001). Analýza údajov o zemetraseniach v seizmickej zdrojovej zóne Dobrá Voda: rigorózna práca. Bratislava: Univerzita Komenského, 2001, 39 s.

Cornou, C., Kristek, J., Ohrnberger, M., Di Giulio, G., Schissele, E., Guillier, B., ... & Moczo, P. (2004). Simulation of seismic ambient vibrations: II. H/V and array techniques for real sites. In *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Canada, August 2004, Paper* (Vol. 1130).

Cornou, C. (2005). Using Ambient Vibration Array Techniques for Site Characterisation. *Université Joseph Fourier Grenoble, France*

Fojtíková, L., Málek, J., Kristeková, M., Brož, M., Štrunc, J., Sekereš, J., Sekerešová D. (2011). The Second annual meeting of the AIM project 2011, 29.9. – 30.9. 2011, Praha, Czech Republic (poster)

Fojtíková, L. (2001). Analýza seizmického šumu vo vzťahu k prenosovým vlastnostiam lokálnych povrchových štruktúr, diplomová práca. *Fakulta matematiky, fyziky a informatiky Univerzity Komenského v Bratislave*

Forbriger, T. (2006). Low-frequency limit for H/V studies due to tilt. *Geophysical Institute, University of Karlsruhe and Black Forest Observatory (BFO)*.

Groos, J. C., & Ritter, J. R. R. (2009). Time domain classification and quantification of seismic noise in an urban environment. *Geophysical Journal International*, 179(2), 1213-1231.

Guillier, B., Chatelain, J. L., Bonnefoy-Claudet, S., & Haghshenas, E. (2007). Use of ambient noise: From spectral amplitude variability to H/V stability. *Journal of Earthquake Engineering*, 11(6), 925-942.

Hollender, F., Andre, M., Guyonnet-Benaize, C., Cornou, C., Caillot, V., & Bard, P. Y. (2011). Can high daily-variation of noise level alter results of ambient vibration H/V technique?. *University of California Santa Barbara*.

Kawase, H., Sánchez-Sezma, F. J., Matsushima, S. (2011). Application of the H/V spectral ratios for earthquake and microtremor ground motions. *University of California Santa Barbara*.

Kristeková, M., Časovo-frekvenčná analýza seizmických signálov, dizertačná práca, Bratislava (2006)

Moczo, P., Labák, P., Cipciar, A., Kristek, J., Kristeková, M., Bielik, M., Šajgalíková, J., & Režuchová, D. (2002). 100 rokov seizmológie na Slovensku. *Geofyzikálny ústav SAV, Fakulta matematiky, fyziky a informatiky Univerzity Komenského v Bratislave..*

Moczo, Kristek, Kysel, Franek, Kristeková; Posúdenie seizmicity a geologických pomerov pre Projekt NJZ EBO, Záverečná správa, Geofyzikálny ústav SAV, Bratislava (2013)

Panou, A. A., Theodulidis, N., Hatzidimitriou, P. M., Papazachos, C. B., & Stylianidis, K. (2004). Ambient noise horizontal-to-vertical spectral ratio for assessing site effects in urban environments: the case of Thessaloniki city (Northern Greece). *Bulletin of the Geological Society of Greece*, 36, 1467-1476.

Strollo, A., Parolai, S., Jäckel, K. H., Marzorati, S., & Bindi, D. (2008). Suitability of short-period sensors for retrieving reliable H/V peaks for frequencies less than 1 Hz. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 98(2), 671-681.

Sánchez-Sesma, F. J., Rodríguez, M., Iturrarán-Viveros, U., Luzón, F., Campillo, M., Margerin, L., ... & Rodríguez-Castellanos, A. (2011). A theory for microtremor H/V spectral ratio: application for a layered medium. *Geophysical Journal International*, 186(1), 221-225.

Traer, J., Gerstoft, P., Bromirski, P. D., & Shearer P. M. (2011). Shallow water microseism generation. *University of California San Diego*.

Použité internetové zdroje: <http://www.geopsy.com/>