

# Odhad detekční schopnosti stanice VRAC s ohledem na seismické jevy registrované v letech 2011 až 2021

Estimation of detection capability of the VRAC station in respect to seismic events recorded in the years 2011 to 2021

Josef Havíř 

Ústav fyziky Země, PřF MU, Tvrdeho 12, 602 00 Brno

## Key words:

seismic monitoring, induced seismic events, natural seismicity, detection capability, station VRAC

 havir@ipe.muni.cz

## Editor:

David Buriánek

## Abstract

Broadband seismic station VRAC (Vranov u Brna), operated by Institute of physics of the Earth (Masaryk University) is involved in various projects focused on monitoring of the seismic events. Above all, its involvement in the global seismic network of the International Monitoring System CTBTO (Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization) is very important. The VRAC station is also one of the permanent broadband stations of the Czech Regional Seismic Network. Thus, the data of the VRAC station is routinely processed in respect to detection of the seismic events situated in various epicentral distances, from local, through regional to teleseismic. This article aims to briefly show a simple estimation of the detection capability of the VRAC station with respect to seismic events from various epicentral distances. Discussed estimation of the detection capability was based on study of the magnitude-frequency relations. For this purpose, the set of seismic events recorded by the VRAC station in the years 2011–2021 was used. This set included 52 246 seismic events, 33 161 being regional events situated up to epicentral distance of 2 000 km from the VRAC station. In the framework of the magnitude-frequency analysis, two parameters were determined for each subset containing events from the particular range of epicentral distances: the most frequent magnitude  $M_a$  and magnitude  $M_m$  in the minimum of the derived non-log magnitude-frequency function. The value of  $M_m$  shows well the point where the roll-off effect occurs on the classical magnitude-frequency graph. The graphs of both observed values ( $M_a$  and  $M_m$ ) show steep increase at regional distances, followed by a flat part of the curve at epicentral distances of 20° to 80°. Low detection capability zones in the distances corresponding to seismic shadows zones connected both with the zone of decreased seismic velocities in the deep parts of the Earth (outer core) and in the asthenosphere are distinctly noticeable. Results of the study allow to estimate the detection threshold of the VRAC station between the magnitude value 4.5 to 4.9 in the case of epicentral distances from 20° to 80°.

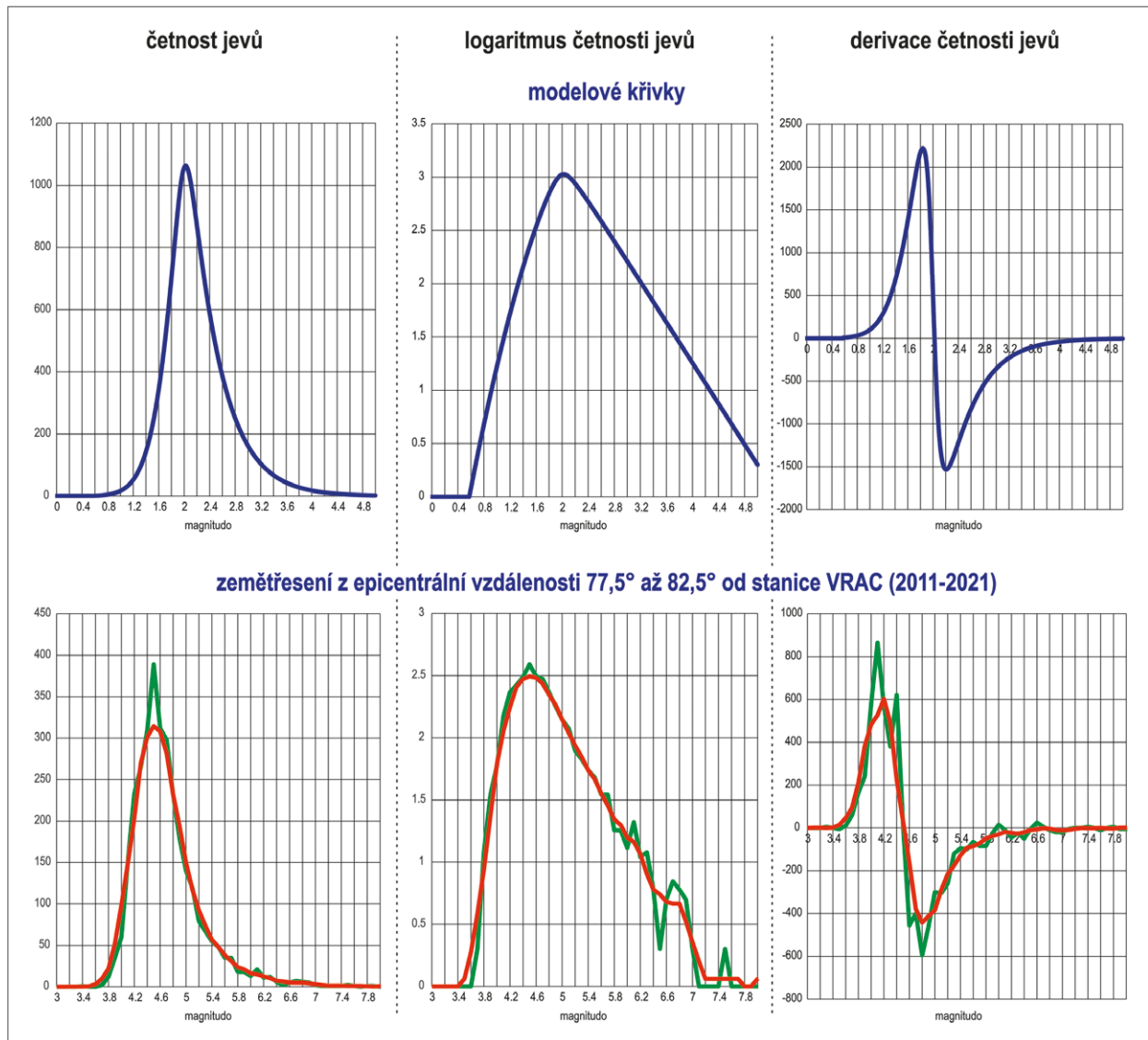
## Doporučená citace článku:

Havíř, J. (2022). Odhad detekční schopnosti stanice VRAC s ohledem na seismické jevy registrované v letech 2011 až 2021. – *Geologické výzkumy na Moravě a ve Slezsku*, 29, 1–2, 7–12.

DOI: <https://doi.org/10.5817/GVMS2022-20824>

## Úvod

Širokopásmová seismická stanice VRAC (Vranov u Brna), provozovaná Ústavem fyziky Země (ÚFZ) Masarykovy univerzity, je zapojena do různých monitorovacích projektů sledujících různé kategorie seismických jevů. Zásadní je zejména její zapojení do globální seismické sítě Mezinárodního monitorovacího systému CTBTO (Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization). Od roku 2002 je stanice VRAC, která je vybavena seismometrem STS-2.5 (do roku 2020 STS-2) a digitizérem Quanterra Q330HR, certifikovanou stanicí tohoto globálního systému zajišťujícího verifikaci dodržování Smlouvy o úplném zákazu jaderných zkoušek (Havíř et al. 2003). Pod kódovým označením AS26 je



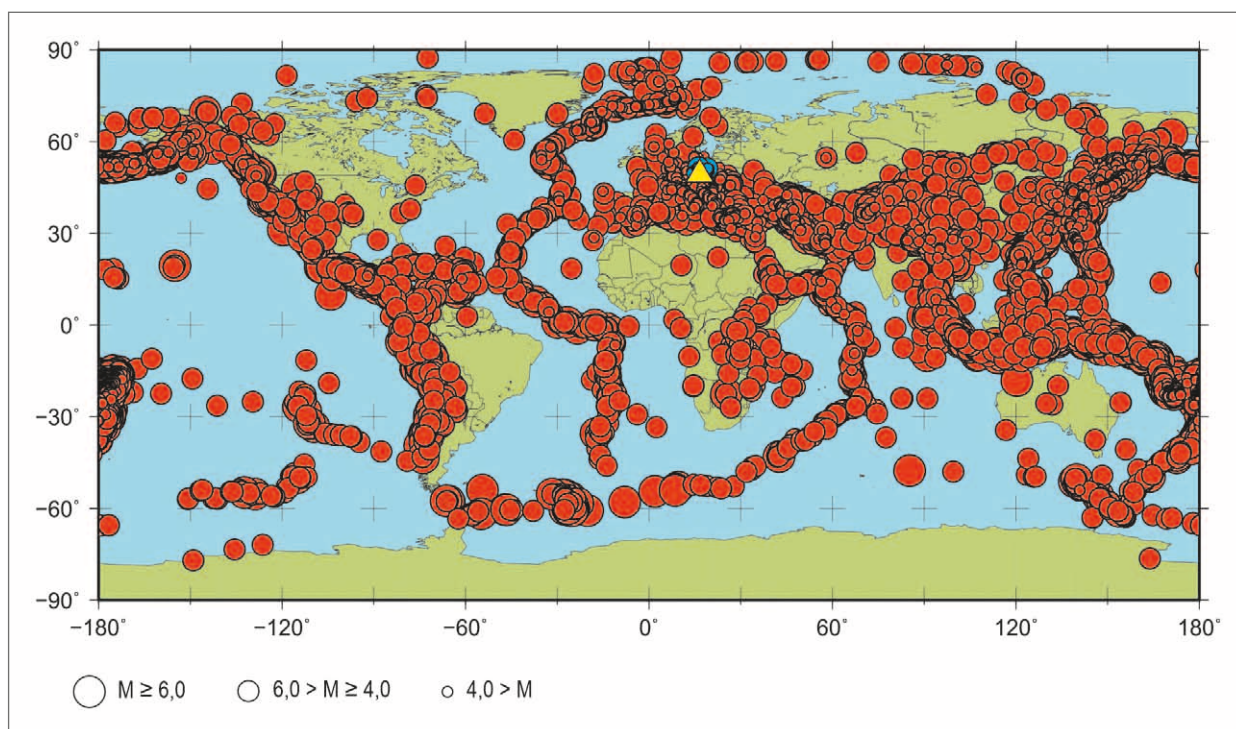
Obr. 1: Tvary křivek popisujících závislost četnosti seismických jevů na magnitudu. Zleva doprava jsou znázorněny: funkce závislosti nelogaritmované četnosti jevů na magnitudu; funkce závislosti logaritmu četnosti jevů na magnitudu (tj. klasický magnitudo-četnostní graf); první derivace funkce závislosti nelogaritmované četnosti jevů na magnitudu. V horní části jsou vykresleny modelové křivky, v dolní části jsou vykresleny reálné křivky pro soubor přirozených zemětřesení registrovaných stanicí VRAC v letech 2011 až 2021, jejichž zdroj se nacházel v epicentrální vzdálenosti 77,5° až 82,5°.

Fig. 1: Shapes of curves characterizing the dependence of the frequency of seismic events on the magnitude. From left to right are shown: the distribution function of the non-logarithmic frequency of seismic events in relation to the magnitude; the distribution function of the logarithm of frequency of seismic events in relation to the magnitude (i.e. classical magnitude-frequency graph); first derivation of the distribution function of the non-logarithmic frequency of seismic events in relation to the magnitude. In the upper part, model curves are plotted, in the lower part, real curves determined for a set of natural earthquakes recorded by the VRAC station in the years 2011–2021, situated at epicentral distance of 77.5° to 82.5°.

stanice VRAC přímo uvedena v seznamu verifikačních zařízení v příloze Smlouvy o úplném zákazu jaderných zkušek (CTBTO Preparatory Commission 1996) a její provozování tak patří k úkolům spjatým s plněním mezinárodních závazků České republiky vyplývajících ze zmíněné smlouvy, podepsané Českou republikou v roce 1996 a ratifikované o rok později. Stanice VRAC je také součástí České regionální seismické sítě jako jedna z jejích stálých širokopásmových stanic (viz např. Zedník – Pazdírková 2009). Spolu s dalšími stanicemi, provozovanými především Ústavem fyziky Země MU a Geofyzikální ústavem AV ČR, se tak stanice VRAC podílí na monitorování

seismické aktivity na území České republiky a v jejím okolí. Data stanice VRAC jsou tak rutinně využívána pro monitorování signálu seismických jevů přicházejícího z různých epicentrálních vzdáleností a jejím úkolem je tedy registrovat nejrůznější kategorie seismických jevů, od jevů lokálních, přes regionální až po jevy teleseismické (tj. s epicentrální vzdáleností větší než 2 000 km).

Smyslem tohoto článku je ukázat, jak silné seismické jevy z různých epicentrálních vzdáleností je stanice VRAC schopna detekovat. Odhad detekční schopnosti je založen na statistickém zpracování magnitudo-četnostních vztahů pro seismické jevy se známou lokací



Obr. 2: Schematická mapa epicenter seismických jevů registrovaných stanicí VRAC v letech 2011–2021 (celý svět). Červeně jsou vyznačena přirozená zemětřesení, modře indukované seismické jevy. Poloha stanice VRAC je vyznačena žlutým trojúhelníkem.

Fig. 2: Schematic maps of epicentres of seismic events recorded by station VRAC in the years 2011–2021 (global scale – whole world). Red circles show natural earthquakes, blue circles show induced seismic events. Position of the VRAC station is marked by yellow triangle.

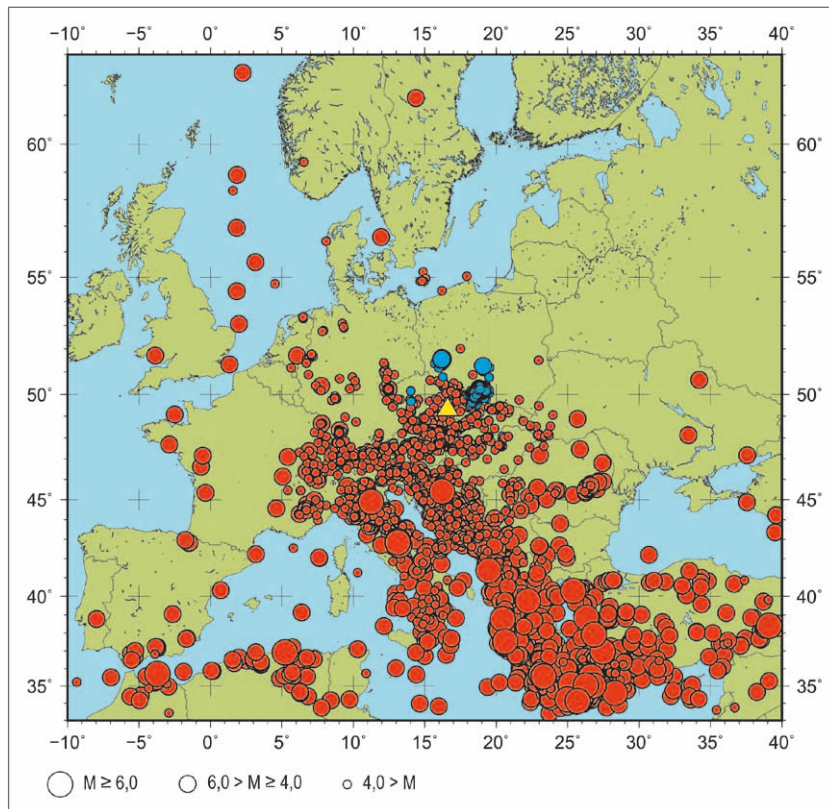
a s určenou hodnotou magnitudy, které byly registrovány stanicí VRAC v letech 2011 až 2021. Pro tento účel byla použita jak parametrická data (lokace potřebné k výpočtu epicentrálních vzdáleností a hodnoty seismického magnitudy) určená v rámci zpracování signálu na ÚFZ, tak i data převzatá z vybraných zdrojů. Lokace a magnitudo vzdálených jevů bylo přebíráno z REB-bulletinů CTBTO (tyto bulletiny obsahují údaje, které prošly, mimo jiné, také kontrolou operátorem), pro indukované jevy v sv. části České republiky a v Polsku byla použita data z bulletinů AV ČR (bulletiny shrnující výsledky monitorování České regionální seismické sítě), v případě jevů na území Rakouska byly využity také bulletiny rakouské seismologické služby (ZAMG) a u jevů v regionálních vzdálenostech byly částečně využity také údaje dostupné prostřednictvím bulletinů EMSC (Euro-Mediterranean Seismological Center).

### Magnitudo-četnostní graf a úplnost dat

Studium magnitudo-četnostních vztahů přirozených seismických jevů tradičně vychází z práce Gutenberga a Richtera (1944) dokládající lineární vztah mezi logaritmem četností seismických jevů a magnitudou. Analogické závěry předložili již před nimi Ishimoto a Iida (1939), kteří porovnávali logaritmus četnosti jevů s logaritmem amplitudy. Pro nízké hodnoty magnitudy je ale soubor registrovaných seismických jevů statisticky neúplný, protože část seismických jevů, jejichž signál byl překryt šumem, nebyla detekována. S klesajícím magnitudou míra nedetekovaných jevů roste. V důsledku ztráty

detekční schopnosti seismických sítí pak lze pozorovat, že četnost registrovaných slabých jevů s klesající hodnotou magnitudy rychle klesá.

Ke ztrátě linearitu magnitudo-četnostního vztahu, tj. k tzv. „roll-off“ efektu, dochází ovšem již u hodnoty magnitudy, která je o něco vyšší, než je maximum křivky magnitudo-četnostního grafu. Již tento bod, v němž se projevuje ztráta linearitu, ukazuje skutečný detekční práh sítě, tedy hodnotu magnitudy, pod kterou jsou již data ve významné míře neúplná (významná část seismických jevů není registrována). V případě reálných datových souborů může být ovšem určení hodnoty magnitudy, u které dochází ke ztrátě linearitu, nesnadné, protože data mohou být zkreslena dalšími vlivy (např. v důsledku náhodných fluktuací u málo četných souborů dat apod.). Mnohem snazší je rozpoznat místo, kde se projevuje „roll-off“ efekt, na grafu derivace četnosti  $\partial \log N(M) / \partial M$  či  $\partial N(M) / \partial M$ . Pro funkci popisující závislost logaritmu četnosti na magnitudu je ta část, v níž je zachována linearita, v případě derivované funkce plochá (lineární funkce má konstantní sklon a její derivace je tedy konstanta). Ještě vhodnější je pak využití derivace funkce závislosti nelogaritmované četnosti na magnitudu, protože křivka popisující závislost četnosti jevů na jejich magnitudu má v místě, kde u grafu s logaritmickou osou četnosti dochází k „roll-off“ efektu, inflexní bod. Na křivce derivované funkce se pak v místě hledané hodnoty magnitudy nachází minimum. A nalezení takových míst na grafu, jako je extrém funkce, je pak matematicky relativně snadný úkol.



Obr. 3: Schematická mapa epicenter seismických jevů registrovaných stanicí VRAC v letech 2011–2021 (region Evropy). Červeně jsou vyznačena přirozená zemětřesení, modře indukované seismické jevy. Poloha stanice VRAC je vyznačena žlutým trojúhelníkem.  
Fig. 3: Schematic maps of epicenters of seismic events recorded by station VRAC in the years 2011–2021 (Europe area). Red circles show natural earthquakes, blue circles show induced seismic events. Position of the VRAC station is marked by yellow triangle.

Příklad magnitudo-četnostních grafů s modelovými i reálnými daty ukazuje obrázek 1. V horní části jsou vykresleny modelové křivky popisující lineární charakter vztahu mezi logaritmem četnosti a magnitudem, přičemž tato linearita je narušena ztrátou dat pro jevy s magnitudem 2,2 a nižším, přičemž tato ztráta dat je matematicky popsána hyperbolickou funkcí. Modelové křivky ukazují maximum v distribučních funkcích znázorňujících závislost četnosti jevů na magnitudu v bodě  $M_a = 2,0$ . Minimum křivky derivace četnosti jevů pak odpovídá bodu  $M_m = 2,2$ , tedy bodu, v němž dochází ke ztrátě linearit magnitudo-četnostního vztahu (hodnoty modelové křivky byly počítány pro hodnoty magnitudy s krokem 0,001). Ve spodní části obrázku 1 jsou pak pro srovnání vykresleny grafy popisující příslušné vztahy na základě analýzy reálných dat, a to souboru přirozených zemětřesení registrovaných stanicí VRAC v letech 2011 až 2021, jejichž zdroj se nacházel v epicentrální vzdálenosti 77,5° až 82,5°. Podobně jako v případě modelových dat, i zde lze dobře identifikovat rozdíl mezi maximem magnitudo-četnostních funkcí ( $M_a = 4,5$ ) a minimem křivky derivace četnosti jevů ( $M_m = 4,8$ ). Přitom lze konstatovat, že maximum magnitudo-četnostních funkcí ( $M_a = 4,5$ ) sice ukazuje hodnoty magnitudy, pod nimiž je již detekce stanice VRAC zcela jistě nespolehlivá, ovšem minimum křivky derivace četnosti jevů ( $M_m = 4,8$ ) vystihuje lépe místo ztráty linearit magnitudo-četnostních vztahů,

a tedy věrněji kvantifikuje detekční práh stanice VRAC pro daný soubor jevů.

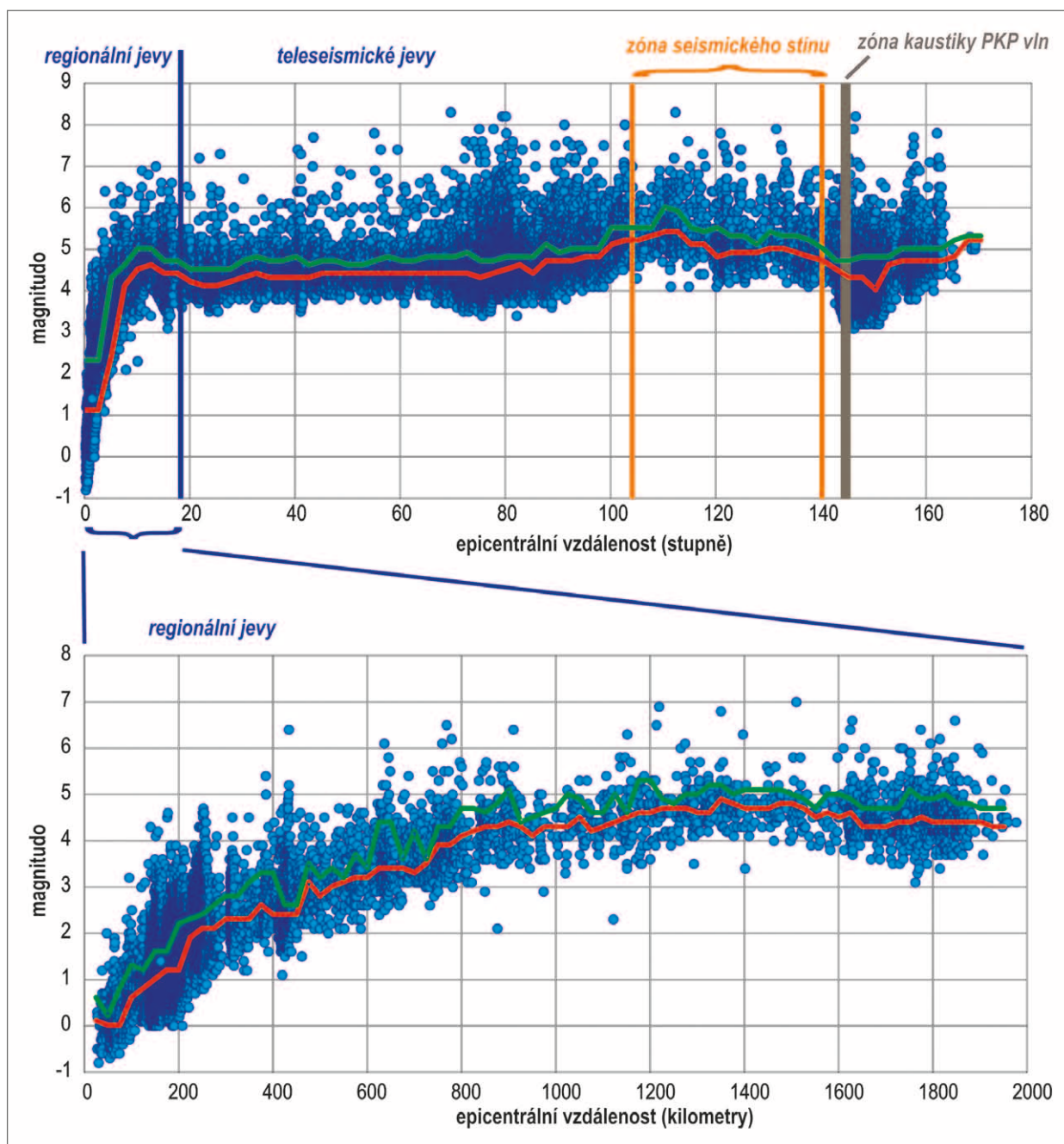
### Odhad detekční schopnosti stanice VRAC

Pro odhad detekční schopnosti stanice VRAC byla využita data o přirozených a indukovaných jevech registrovaných stanicí VRAC v letech 2011 až 2021. Soubor jevů registrovaných stanicí VRAC během tohoto desetiletého období zahrnoval 52 246 seismických jevů (obr. 2), přičemž zdroje 33 161 jevů se nacházely ve vzdálenosti do 2 000 km od stanice (obr. 3), zatímco epicentrální vzdálenost zbylých 19 085 jevů překračovala hodnotu 2 000 km.

Při statistickém zpracování celého souboru jevů byly nejprve analyzovány podsoubory, do nichž byly zahrnovány jevy s epicentrálními vzdálenostmi z intervalu  $\Delta_n - 2,5^\circ$  do  $\Delta_n + 2,5^\circ$ , přičemž střední epicentrální vzdálenost jednotlivých intervalů  $\Delta_n$  byla volena s krokem 2,5°. Protože počet jevů z regionálních vzdáleností umožňoval detailnější členění, byly dále analyzovány také podsoubory

regionálních jevů zahrnující vždy seismické jevy s epicentrálními vzdálenostmi z intervalu  $d_n - 25$  km do  $d_n + 25$  km, přičemž střední epicentrální vzdálenost jednotlivých intervalů  $d_n$  byla volena s krokem 25 km. Pro každý podsoubor byla analyzována magnitudo-četnostní křivka, která byla vyhlazena využitím klouzavých průměrů o délce 5. Vždy bylo určena hodnota magnitudy  $M_a$  v maximu této křivky (tedy nejčetněji zastoupená hodnota magnitudy) a vždy byla určena hodnota magnitudy  $M_m$  odpovídající minimu derivace křivky popisující vztah četnosti jevů a magnitudy. Výsledné hodnoty zjištěné v jednotlivých intervalech pak byly vyneseny do grafu (obr. 4).

Na grafech je dobře patrný strmý nárůst obou sledovaných hodnot ( $M_a$  i  $M_m$ ) v regionálních vzdálenostech, následovaný pak plochou částí křivky v epicentrálních vzdálenostech 20° až 80°. Nárůst sledovaných mezních hodnot magnitudy ve vzdálenostech 104° až 140° souvisí se snížením detekční schopnosti v důsledku existence zóny snížených rychlostí v hlubokých partiích Země (vnějšího jádra). Tato zóna se pak na povrchu projevuje existencí tzv. zóny seismického stínu, v níž jsou registrovány pouze difrakované či sekundární (odražené) fáze, které nesou menší energii a tudíž mají jejich vlnové funkce v seismickém záznamu menší amplitudu. Diskutovaná základní charakteristika křivky odrážející prahové hodnoty magnitudy odpovídá modelové závislosti amplitudy objemových vln na epicentrální vzdálenosti



Obr. 4: Schematický graf ukazující magnitudo seismických jevů registrovaných stanicí VRAC v letech 2011–2021 vůči jejich epicentrální vzdálenosti od stanice VRAC (nahore – globální měřítko; dole – regionální jevy). Červená křivka vyznačuje hodnoty nejčastějšího magnituda  $M_a$ ; zelená křivka vyznačuje hodnoty magnituda  $M_m$  v minimu derivace funkce závislosti neologaritmované četnosti jevů na magnitudo (blíže viz text).

Fig. 4: Graph of the magnitude of seismic events registered by station VRAC in the years 2011–2021 plotted against their epicentral distance (at top – global scale; at bottom – regional events). The red curve indicates the values of the most frequent magnitude  $M_a$ ; the green curve indicates the values of the magnitude  $M_m$  in the minimum of the derived non-log magnitude-frequency function (see text for more details).

(viz Bormann et al. 2009; Veith and Clawson 1972), pro stanici VRAC byla pozorována již dříve (Havíř 2018) a je možné ji pozorovat i na jiných širokopásmových seismických stanicích Mezinárodního monitorovacího systému CTBTO (např. Kværna, Ringdal 2013). Novější analýza využívající výrazně rozsáhlejšího souboru seismických jevů registrovaných stanicí VRAC ovšem umožňuje lépe pozorovat některé další detaily a blíže odhadnout

prahové hodnoty magnituda v závislosti na epicentrální vzdálenosti.

V regionálních vzdálenostech sledované mezní hodnoty rychle narůstají až na hodnoty 4,5 až 4,9 v případě nejčastějšího magnituda  $M_a$  a na hodnoty 4,7 až 5,2 pro magnitudo  $M_m$  v minimu derivované magnitudo-četnostní funkce v epicentrálních vzdálenostech 1 200 až 1 600 km. Sníženou detekční schopnost ve zmíněné epicentrální vzdálenosti, kdy je stanice VRAC schopna

spolehlivě detekovat až jevy s magnitudem kolem hodnoty 5 či vyšším, lze dobře vysvětlit jako projev zóny seismického stínu vzniklé v důsledku zóny snížených rychlostí seismických vln v astenosféře.

Ve větších epicentrálních vzdálenostech, konkrétně ve vzdálenostech 20° až 80°, se pak detekční práh stanice VRAC jeví jako téměř konstantní. Velikost nejčtenějšího magnituda  $M_a$  pozvolna roste z hodnot 4,1 až 4,2 na hodnoty 4,4 až 4,5, velikost magnituda  $M_m$  v minimu derivované magnitudo-četnostní funkce narůstá z hodnoty 4,5 na hodnotu 4,7 až 4,9. Tyto výsledky jsou v souladu s předběžnými studii založenými na porovnání počtů všech jevů registrovaných seismickou sítí Mezinárodního monitorovacího systému CTBTO s počtem jevů registrovaných stanicí VRAC v letech 2001 až 2003 (Havíř 2004).

Dále od stanice, zejména pak v zóně seismického stínu spjaté se sníženými rychlostmi seismických vln ve vnějším jádře, obě sledované veličiny opět výrazněji rostou, a to (v epicentrální vzdálenosti kolem 110°) až k hodnotám 5,2 až 5,4 pro nejčtenější magnituda  $M_a$  a k hodnotám 5,9 až 6,0 pro magnitudo  $M_m$  v minimu derivované magnitudo-četnostní funkce. Odhadovaný detekční práh pro zemětřesení, vůči kterému se stanice VRAC nachází v seismickém stínu způsobeném snížením rychlostí seismických vln ve vnějším jádře, je tedy zapotřebí, pokud jde o hodnoty magnituda, vyšší nejméně o jeden

stupeň (tj. pro spolehlivou detekci je zapotřebí více než třicetinásobně vyšší uvolněná seismická energie) oproti detekčnímu prahu pro epicentrální vzdálenosti 20° až 80°.

### Závěr

Statistická analýza jevů registrovaných stanicí VRAC umožnila provést odhad detekční schopnosti této stanice, aniž by bylo nezbytné mít k dispozici nezávislé informace také o jevech, které stanicí VRAC registrovány nebyly. Přitom využití derivace funkce popisující nelo-garitmovanou četnost registrovaných seismických jevů v závislosti na jejich magnitudu, respektive sledování minima této derivované funkce, umožňuje získat odhady, jejichž výsledky jsou srovnatelné s předešlými výsledky získanými pomocí metod, které nezávislé informace o neregistrovaných jevech využily. Pro epicentrální vzdálenosti od 20° do 80° lze mezní hodnotu magnituda jevů, od kterého je výrazná většina seismických jevů seismickou stanicí VRAC detekována, odhadnout na hodnotu 4,5 až 4,9.

### Poděkování

*Príspevek vznikl s finanční podporou projektu MŠMT, program č. LM2015079, CzechGeo/Epos. Autor děkuje oběma recenzentům (Jiří Málek, Lucia Fojtíková) za jejich připomínky.*

### Literatura

- Bormann, P., Baumbach, M., Bock, G., Grosse, H., Choy, G. L., Boatwright, J. (2009). Seismic Sources and Source Parameters. – In: Bormann P. (ed.). *New Manual of Seismological Observatory Practice (NMSOP)*, Potsdam: Deutsches GeoForschungs-Zentrum GFZ, 1–94.
- CTBTO Preparatory Commission (1996). *Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty (CTBT) and Text on Establishment of a Preparatory Commission for the Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization*.
- Gutenberg, B., Richter, C. F. (1944). Frequency of earthquakes in California. – *Bulletin of the Seismological Society of America*, 34, 4, 185–188.
- Havíř, J. (2004). Detekce vzdálených zemětřesení na stanici VRAC – využitelnost pro účely Mezinárodní monitorovací sítě CTBTO. – In: *Sborník 13. regionální konference „Rozvoj seismologie, inženýrské geofyziky a geotechniky“*. Sborník vědeckých prací VŠB–TU Ostrava, řada stavební, 4, 2, 105–113.
- Havíř, J. (2018). Seismické jevy registrované stanicí VRAC v roce 2017. – *Geologické výzkumy na Moravě a ve Slezsku*, 25, 1–2, 39–44.
- Havíř, J., Švancara, J., Otruba, J. (2003). Úloha a využití nově certifikované seismologické stanice VRAC v rámci Mezinárodního monitorovacího systému CTBTO. – In: *Sborník 12. regionální konference „Nové výsledky seismologických, geofyzikálních a geotechnických průzkumů“*. Sborník vědeckých prací VŠB–TU Ostrava, řada stavební, 3, 2, 77–84.
- Ishimoto, M., Iida, K. (1939). Observation sur les Séismes enregistrés par le Microseismographe construit dernièrement. – *Bulletin of Earthquake Research Institute, University Tokyo*, 17, 2, 443–478 (japonsky, francouzské resumé).
- Kværna, T., Ringdal, G. (2013). Detection capability of the seismic network of the International Monitoring System for the Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty. – *Bulletin of the Seismological Society of America*, 103, 2A, 759–772.
- Veith, K. F., Clawson, G. E. (1972). Magnitude from short-period P-wave data. – *Bulletin of the Seismological Society of America*, 62, 2, 435–452.
- Zedník, J., Pazdírková, J. (2009). Seismicity in the Czech Republic in 2007. – *Studia Geophysica and Geodaetica*, 53, 2, 269–274.