

UNIVERZITA KARLOVA V PRAZE, PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA

Ústav hydrogeologie, inženýrské geologie a užití geofyziky

Studijní program: Geologie

Studijní obor: Geologie



Jan Měšťan

Pozemní seismické zdroje v seismickém průzkumu

Land Seismic Sources in Exploration Seismology

Bakalářská práce

Vedoucí bakalářské práce: Doc. RNDr. Jan Vilhelm, CSc.

Praha 2015

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně za využití pramenů uvedených v přehledu použité literatury. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze, dne

Podpis

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu práce, panu **Doc. RNDr. Janu Vilhelmovi, CSc.**, za umožnění přístupu k fakultním seismickým přístrojům, uvedení do problematiky metody Vibroseis a další cenné rady. Zároveň bych rád poděkoval panu **Ing. Stanislavu Sedlákov** za poskytnutí technické specifikace elektrodynamického vibrátoru užitého v experimentální části práce.

Abstrakt

Bakalářská práce si klade za cíl sestavit přehled informací o zdrojích seismické energie používaných v pozemním seismickém průzkumu. Na začátku práce je uvedena zmínka o fyzikálních základech seismických metod. Stručně jsou popsány základní typy seismických vln a zmíněna specifika šíření seismických vln horninovým prostředím. Dále navazuje kapitola o historii pozemních seismických zdrojů, která mapuje jejich užití od přibližně poloviny 19. století do počátku nástupu metody Vibroseis v 50. a 60. letech 20. století. Vlastní přehled seismických zdrojů je obsažen v kapitole Rozdělení pozemních seismických zdrojů. Seismické zdroje jsou rozděleny na ty, jež využívají chemické exploze a mechanické zdroje. Mechanické zdroje jsou rozděleny na impulzivní, vibrační a speciální. Pozornost je věnována technickým parametrům a jiným vlastnostem (například chemické složení v případě výbušnin), což je doplněno o příklady komerčně dostupných zdrojů. Do práce je zařazena i experimentální část. V ní je testován fakultní elektrodynamický vibrátor umožňující generovat vibrační signály libovolného časového průběhu. Experimentálně byla stanovena frekvenční charakteristika vibrátoru. K měření byl využit fakultní seismograf Geode a 10 Hz geofon. Zaznamenány byly seismogramy o délce trvání 1 sekundy při buzení vibrátoru harmonickým signálem o různých hodnotách frekvence v intervalu od 15 do 400 Hz. Pro stanovení amplitud rychlosti kmitání bylo využíváno výpočtu průměrné hodnoty obálky amplitud určené pomocí Hilbertovy transformace. Bylo zjištěno, že převrácené hodnoty amplitud frekvenční charakteristiky v intervalu frekvencí 50–400 Hz závisí lineárně na frekvenci. Vibrátor byl testován rovněž pomocí několika signálů vzestupného sweepu. V závěru práce je pak proveden souhrn, který ukazuje, že dobrá znalost možností buzení seismických vln je důležitou součástí realizace seismických měření s aktivním zdrojem.

Klíčová slova: Seismický průzkum, zdroj seismické energie, seismický vibrátor

Abstract

The purpose of the bachelor thesis is to compile an overview of the information about sources of seismic energy used in land seismic survey. At the beginning of the thesis, the physical basis of seismic methods is mentioned. Basic types of seismic waves are briefly described and the specific of the spread of seismic waves through the rock environment is mentioned. It is followed by a chapter about the history of land seismic sources, which maps their use approximately since the half of the 19th century till the beginning of the commencement of a method Vibroseis in 1950's and 1960's. The overview of seismic sources is in the chapter called Land seismic sources division. Seismic sources are divided into those, which use chemical explosives and mechanical sources. Mechanical sources are divided into impulsive, vibratory and special sources. The attention is paid to their technical parameters and other properties (for example chemical composition in a case of explosives), which is supplemented by examples of commercial sources. There is also present an experimental part in the thesis. There is tested a faculty electrodynamic vibrator. It enables to generate vibratory signals of any time course. The frequency characteristics of the vibrator was experimentally determined. A faculty seismograph Geode and 10 Hz geophone were used in order to perform the measurements. Seismograms with a duration of 1 second were recorded for harmonic signals of various frequencies in a range 15–400 Hz. A calculation of mean value of the envelope of amplitudes determined using Hilbert transform was performed in order to determine amplitudes of velocity. It was found out, that inverse values of amplitudes of frequency characteristics in the range 50–400 Hz are linearly dependent on frequency. The vibrator was tested with few upswep signals too. There is made a summary at the end of the thesis, which shows, that a good knowledge of possibilities of seismic waves excitation is an important part of realization of seismic measurements with an active source.

Key Words: Seismic Survey, Seismic Energy Source, Seismic Vibrator

Obsah

1. Úvod	6
2. Fyzikální základy seismických metod	7
2.1. Mechanické napětí.....	7
2.2. Deformace.....	7
2.3. Hookův zákon.....	8
2.4. P- a S-vlny.....	9
2.5. Útlum seismických vln.....	10
3. Stručná historie pozemních seismických zdrojů	11
4. Rozdělení pozemních seismických zdrojů	14
4.1. Zdroje využívající chemické exploze.....	14
4.2. Mechanické zdroje.....	18
4.2.1. <i>Impulzivní zdroje</i>	18
4.2.2. <i>Vibrační zdroje</i>	19
4.2.3. <i>Speciální zdroje</i>	24
5. Experimentální stanovení frekvenční charakteristiky elektrodynamického vibrátoru	25
5.1. Úvod.....	25
5.2. Metodika.....	26
5.3. Výsledky.....	29
5.3.1. <i>Záznam šumu ve skladu v mezipatře a suterénu budovy</i>	29
5.3.2. <i>Frekvenčně závislý průběh převrácených hodnot amplitud rychlosti kmitání</i>	29
5.3.3. <i>Test buzení sweepu pro 5–50, 50–100 a 100–200 Hz o délce 3200 ms</i>	32
6. Diskuse	33
6.1. Rešeršní část.....	33
6.2. Experimentální část.....	33
7. Závěr	35
8. Přehled použité literatury	37

1. Úvod

Trend zintenzivňující se interakce mezi Zemí a člověkem volá po stále nových řešeních problémů, které vznikají například při nedostupnosti některých ložisek nerostných surovin a nebo naopak při řešení ekologických zátěží vzniklých během jejich těžby. Mělké horninové prostředí je pro zmíněnou interakci vůbec nejvýznamnější. Jako mělké prostředí se v užití geofyzice obvykle uvažuje prostředí, kam zasahuje vliv staveb nebo podzemních vod (desítky až stovky metrů). Ložiska v daném prostředí jsou tak například štěrk či písek. K jeho porozumění užitá geofyzika, k níž patří také seismika, významně přispívá.

Vedle aktivních seismických zdrojů, kterými se zabývá tato práce, existuje v seismice možnost využití pasivních zdrojů (Duncan 2005). Aktivní seismika používá umělých zdrojů, například výbušnin či úderů kladiva, k vyvolání impulzu či vibrací. Výhoda umělých zdrojů seismické energie plyne z možnosti kontroly jejich buzení a schopnosti odpovídat na řadu praktických otázek (stanovení hloubky reflexních rozhraní, lokalizace zlomových struktur, charakterizace rezervoárů ropy a zemního plynu aj.).

Seismický průzkum se provádí na souši i na moři. Pro realizaci mořského průzkumu se používají speciální zdroje, které lze aplikovat ve vodě. Tato práce se zabývá vlastnostmi a použitím seismických zdrojů při průzkumu na souši (pozemní seismické zdroje). Podává fyzikální základy seismických metod, jejichž znalost je nezbytná například pro navržení způsobu buzení seismické energie pomocí umělého zdroje. Stručně se také zaměřuje na historii pozemních zdrojů od druhé poloviny 19. století do současnosti. Na historii navazuje obecný přehled zdrojů používaných v seismickém průzkumu. Děleny jsou na zdroje využívající chemické exploze, tedy výbušniny, a mechanické zdroje. Mechanické zdroje jsou rozděleny dle charakteru buzeného signálu na impulzivní a vibrační. Zařazena je rovněž kapitola o zdrojích speciálních.

Na rešeršní část práce navazuje část experimentální. V této části bylo MP3 přehrávačem připojeným k elektrodynamickému vibrátoru přehráno několik jednofrekvenčních signálů. Signály byly amplifikovány pomocí zesilovače. Z každého záznamu buzeného signálu byla separována obálka amplitud rychlosti kmitání vibrátoru. Převrácené hodnoty amplitud byly vyneseny do grafu proti příslušným frekvencím a proloženy přímkou metodou nejmenších čtverců. Vibrátorem byla posléze buzena rovněž trojice vzestupných sweepů, které představují signály s lineárně narůstajícími frekvencemi.

2. Fyzikální základy seismických metod

Úkolem seismických zdrojů v seismickém průzkumu je buzení seismických vln takovým způsobem, abychom je mohli v podobě určitého signálu registrovat pomocí seismometru. Seismické vlny mají původ v elastických deformacích hornin. V této kapitole jsou stručně popsány základní fyzikální vztahy a vlastnosti horninového prostředí, jejichž znalost je důležitá pro pochopení vztahu mezi fyzikálními základy seismických metod a parametry seismických zdrojů.

2.1. Mechanické napětí

Mechanické napětí σ je poměr mezi silou F a plochou A , na níž tato síla působí. Síla F je vektor, podobně i plocha A má svoji orientaci. Proto se ukazuje, že napětí má charakter tenzoru. Pokud uvažujeme krychli v kartézské soustavě souřadnic, jejíž hrany leží na osách x , y a z , jsou normálová napětí v jejich směrech dána (Lowrie 1997):

$$\sigma_{xx} = \lim_{A_x \rightarrow 0} \left(\frac{F_x}{A_x} \right), \sigma_{yy} = \lim_{A_y \rightarrow 0} \left(\frac{F_y}{A_y} \right), \sigma_{zz} = \lim_{A_z \rightarrow 0} \left(\frac{F_z}{A_z} \right). \quad (1)$$

Kromě normálových napětí existují rovněž napětí střížná, která jsou navzájem kolmá. Zároveň jsou kolmá k normálovým napětím. Jejich výsledkem jsou střížné deformace těles. Dohromady tak dostáváme tenzor napětí σ_{ij} , který zahrnuje 9 složek (Sheriff a Geldart 1982):

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Tenzor napětí obecně určuje, jakým způsobem jsou rozloženy složky síly působící na danou plochu elementu tělesa. Přitom platí, že na každou plochu může působit síla ve 3 nezávislých směrech. Kolmo na ni a rovnoběžně s ní ve směru zbývajících dvou os.

2.2. Deformace

Působením mechanického napětí vznikají deformace. Deformace se často vyjadřují jako relativní změny objemu či tvaru tělesa. Deformace lze stejně jako v případě napětí vyjádřit tenzorem o velikosti 3×3 . Podélné deformace ε_{xx} , ε_{yy} a ε_{zz} představují změny v délce elementů podél os x , y a z . Mějme bod $[x, y, z]$ posunutý o infinitezimální vzdálenost do bodu $[x + u, y + v, z + w]$. Pro podélné deformace je:

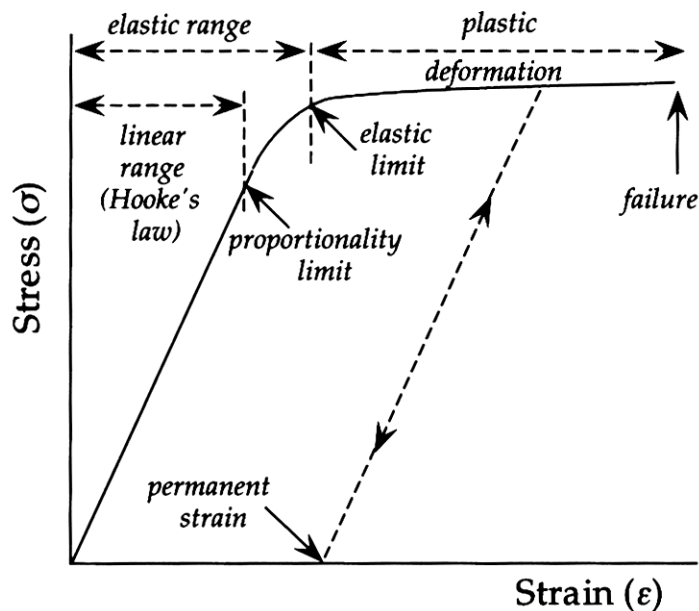
$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x}, \varepsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y}, \varepsilon_{zz} = \frac{\partial w}{\partial z}. \quad (3)$$

Střížné deformace mající úhlový charakter neprobíhají v podélném směru a jsou tedy výsledkem střížných napětí. Složky tenzoru deformace se označují:

$$\varepsilon_{ij} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_{zz} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

2.3. Hookův zákon

V elastickém prostředí je vztah mezi mechanickým napětím a deformací popsán Hookovým zákonem, který představuje jejich lineární závislost (Lowrie 1997). Hookův zákon je v důsledku elastického (pružného) chování horninového prostředí při průchodu seismických vln pro seismiku stěžejní. Smyslu pozbývá jen v těsném okolí zdrojů seismických vln, kde dochází v důsledku pohybu rázové vlny k zahřívání a porušení hornin a vztah mezi napětím a deformací není lineární. To platí především pro výbušniny (Militzer a Weber 1987). Graf na obr. 1. ukazuje vztah mezi mechanickým napětím a deformací. Lineární část na počátku představuje oblast platnosti Hookova zákona.



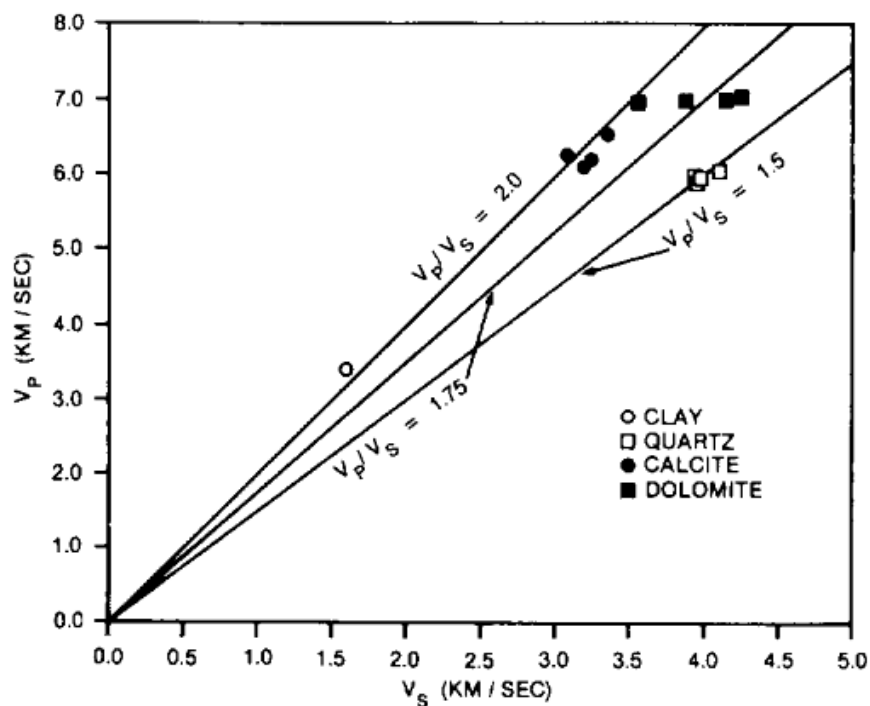
Obr. 1. Vztah mechanického napětí a deformace pro hypotetickou pevnou látku je do určitého momentu lineární (Hookův zákon), následně se materiál počíná deformovat elasticky nelineárně a posléze i plasticky (Lowrie 1997).

2.4. P- a S-vlny

Seismické vlny šířící se prostředím mohou být několika typů. P-vlny jsou vlny podélné, při jejichž šíření dochází k objemovým změnám látek. Jejich výchylka se děje ve směru šíření. S-vlny jsou příčné, jejich výchylka se děje kolmo ke směru šíření. Při šíření nedochází k objemovým změnám látek. Kromě P- a S-vln existují také povrchové vlny, například Rayleighovy.

Seismických zdrojů se nejčastěji užívá k buzení P-vln. Méně často S-vln. Orientace působící síly v seismickém zdroji určuje jeho vyzařovací charakteristiku. V seismickém zdroji často vznikají zároveň P- i S-vlny. Abychom ve zvláštních případech vytvořili převážně P- nebo S-vlny, je nutné při navrhování umělého zdroje dbát na geometrii jejich šíření. Zatímco úder vedený kolmo k zemi bude budit především P-vlny prostupující směrem do podloží, úder vedený rovnoběžně s povrchem bude v požadovaném směru budit především S-vlny.

Rychlosti seismických vln v různých materiálech jsou různé a z toho důvodu se směr šíření na rozhraních takových prostředí může měnit. Rychlost P-vln je vyšší než rychlost S-vln. Tuto skutečnost ilustruje obr. 2.



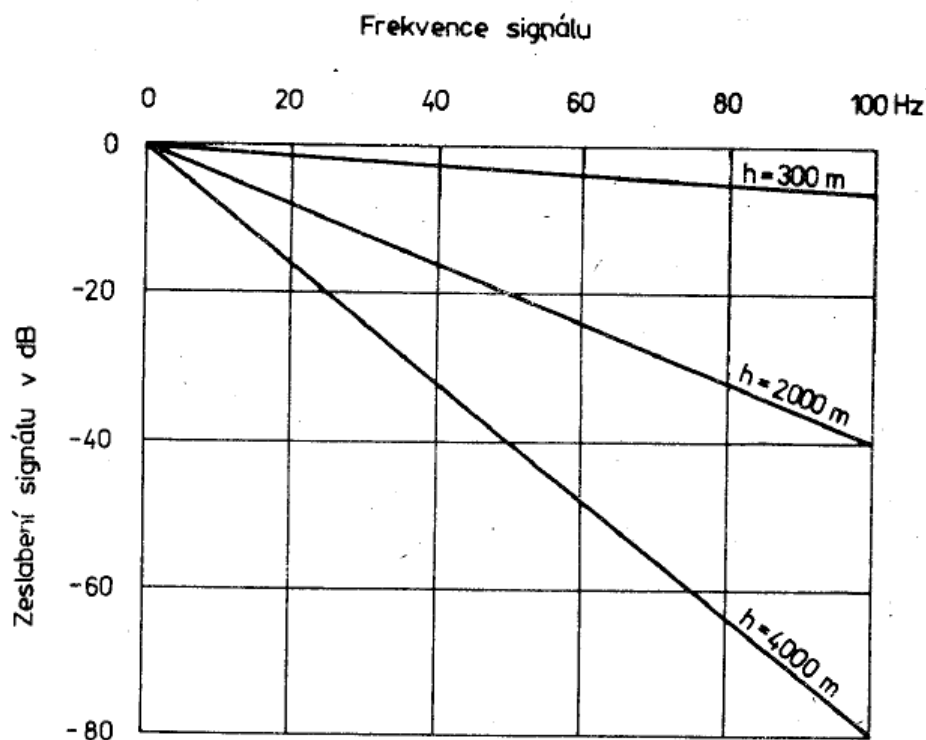
Obr. 2. Kompresní (P-vlny) a střižné (S-vlny) rychlosti pro některé minerály (Castagna et al. 1985).

2.5. Útlum seismických vln

Při šíření prostředím postihuje seismické vlny útlum jejich energie. Útlum má původ v geometrii průběhu paprsku a nedokonale elastických vlastnostech prostředí. Pokud uvažujeme vlnu, jejíž prvotní energie E_0 vyzářená seismickým zdrojem se počíná rozšiřovat přes povrch $2\pi r^2$ hemisféry o poloměru r , je energie E ve vzdálenosti r od místa seismického zdroje v důsledku geometrického rozšiřování dána vztahem (Lowrie 1997):

$$E(r) = \frac{E_0}{2\pi r^2}. \quad (5)$$

V horninovém prostředí nemohou vzájemně nikdy částice reagovat ideálně elasticky. Energie se ztrácí například třením. Daný útlum amplitud seismického signálu je proto nutné vyšetřovat měřením in-situ. Tento útlum bývá často frekvenčně závislý. I přesto, že iniciální seismický impulz může být velmi ostrý, horninové prostředí bude mít tendenci jej shlazovat v důsledku filtrace vyšších frekvencí (obr. 3). Jak bude později ukázáno, frekvence je jedním z klíčových parametrů seismických zdrojů. U některých zdrojů jsou vyzářené frekvence značně variabilní, jiné umožňují měnit jejich rozsah.



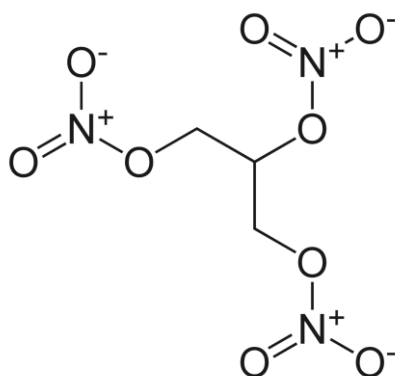
Obr. 3. Změna závislosti absorpce na frekvenci pro tři reflexní rozhraní v hloubce 300, 2000 a 4000 m; předpoklad rychlosti $v = 5000 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a absorpce $0,5 \text{ dB/vlnovou délku}$ (Cidlinský a Skopec 1990).

3. Stručná historie pozemních seismických zdrojů

Prvními seismickými zdroji byly výbušniny. Znalost výbušnin sahá do období 220 př. n. l., kdy došlo k objevu střelného prachu (Akhavan 2011). Střelný prach byl objeven patrně při náhodné explozi, když čínští alchymisté přidali směs KNO_3 a síry ke zlaté rudě v peci, ale zapomněli přidat dřevěné uhlí na počátku procedury. Jeho přidání na závěr vedlo k explozi. Užití střelného prachu za účelem buzení seismických vln přišlo až v polovině 19. století.

Jako první použil střelný prach v seismice Robert Mallet při svých pokusech v polovině 19. století. Střelný prach či později dynamit mu sloužily jako zdroj seismických vln. Miska se rtutí sloužila jako seismometr. Aby byl Mallet chvění hladiny rtuti schopen registrovat, promítal na ní terčík. Chvění tohoto terčíku pak pozoroval lupou. Vzhledem k nízké citlivosti misky se rtutí zaznamenal patrně pouze pozdní cykly vln Rayleighových, které jsou pomalejší než P- a S-vlny a vyvolávají oscilace při zemském povrchu. V té době uvedl, že „současné pokroky v umění výbuchů, v daném okamžiku, při velkém množství střelného prachu, při velkých hloubkách pod vodou, nám dávají sílu ve skutečnosti uspokojivě generovat umělé zemětřesení“.

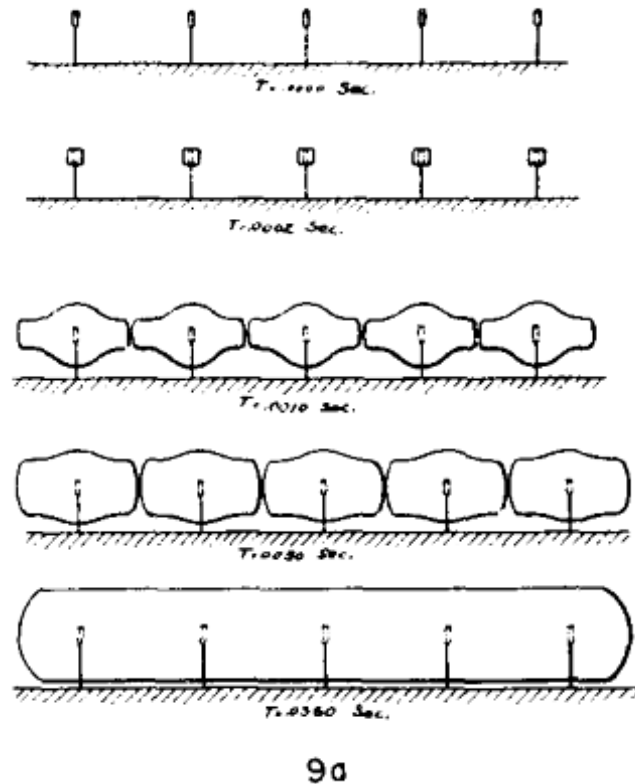
V době Malletových experimentů byl Ascaniem Sobrerem objeven kapalný nitroglycerin $[\text{C}_3\text{H}_5\text{O}_3(\text{NO}_2)_3]$. Hlavní výhodou této sloučeniny (obr. 4.) je skutečnost, že palivo a oxidant existují v těsném kontaktu v rámci jedné molekuly (Akhavan 2011). To v porovnání se střelným prachem umožnilo vytvoření silnějších explozí při podobně hmotných náložích. Z dané skutečnosti plyne však i praktická nevýhoda v podobě zvýšené citlivosti látky na vnější podněty.



Obr. 4. Molekula nitroglycerinu.

Ke snížení citlivosti nitroglycerinu přispěl Immanuel Nobel v 60. letech 19. století jeho mísením s křemelinou, na níž je absorbován. Vynálezem dynamitu želatinového, který vznikl mísením nitrátu celulózy a nitroglycerinu, se Nobel přiblížil dnešním komerčně vyráběným seismickým výbušninám.

Dynamit býval během seismických experimentů zpravidla zakopáván do země. Výjimku tvoří například experimenty kolektivu vedeného Karcherem během 20. let 20. století či experiment Poultera (1950) v metodě „air shooting“. Experimenty měly za cíl vytvořit rovinnou rázovou vlnu, která působí na zemský povrch ze vzduchu. Karcherův kolektiv shazoval dynamit z letadla. Poulter dynamit odpaloval na různě rozmístěných tyčích (obr. 5.).



Obr. 5. *Nákres tyčí s výbušninami a rozšiřující se rázové vlny v metodě „air shooting“ (Poulter 1950).*

Ke konci 80. let 19. století datujeme počátky použití neexplozivních seismických zdrojů. Volně padajícího závaží je v té době užito J. Milnem a T. Grayem. Z pohledu seismiky však daný způsob buzení seismických vln nebyl dlouho významný. Až v 50. letech 20. století dochází k vývoji variety pozemních povrchových zdrojů, které začínají výbušniny doplňovat. Od roku 1953 datujeme počátky „thumperu“ či „weight dropperu“ (Sheriff a Geldart 1982) a od roku 1961 komerční rozšiřování metody VibroseisTM (Baeten 1989). Prvně zmiňované metody byly hojně použity společností McCollum Geophysical Company. Spočívaly v opakovaném svrhávání obdélníkové ocelové desky o váze přibližně 3 tuny a výměře nepřesahující 1 m² z výšky asi 3 metrů. Značná časová variabilita mezi jednotlivými spuštěními závaží a jejich úderu nicméně nedovolila užití více

zdrojů současně. VibroseisTM je dnes hojně používaná metoda. Zpravidla systém několika seismických vibrátorů podoby vozidel (obr. 6.) budí mechanické kmity tlakem desky o zemský povrch v určitém frekvenčním rozpětí v délce několika sekund.



Obr. 6. Seismický vibrátor (Baeten 1989).

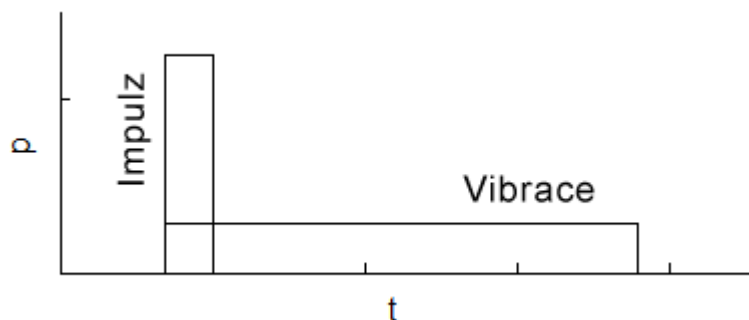
Na konci 70. let 20. století byla společností Sinclair Oil and Gas Company vyvinuta metoda DinoseisTM (Godfrey et al. 1968). Na vozidle byla připojena expanzní komora, která byla před započítím seismických prací snížena k zemskému povrchu. Směs propanu a kyslíku generovala explozi, která vedla k expanzi v komoře a úderu desky o zemský povrch. Různé modifikace metody jsou dodnes hojně používanými zdroji.

Metoda SOSIE („sampled seismic source“) byla původně vyvinuta pro použití na moři. Na počátku 70. let se metoda rozšířila na souš v podobě zařízení Mini-SOSIE, se kterými může operovat několik osob v terénu naráz. Princip metody je takový, že v rámci určité oblasti prováděného seismického průzkumu vyvoláme několik náhodných úderů během spojitého záznamu (Roy 1995). Záznam je následně rozdělen podle jednotlivých úderů a dané segmenty záznamu sečteny.

Závěrem lze říci, že principy buzení seismických vln se zachovaly od období 19. století do dnešních dnů. V zásadě je vždy zapotřebí vyvolat úder či výbuch. Podobně jako řadu jiných průmyslových odvětví, i seismiku zasáhl technologický rozmach po 2. světové válce a s ním kupříkladu spojený vývoj mikroprocesorů. Hlavní výzvou v posledních dekádách bylo zdokonalování techniky VibroseisTM rozšiřováním účinného frekvenčního rozpětí buzených signálů.

4. Rozdělení pozemních seismických zdrojů

Seismika v zásadě pracuje s elastickými deformacemi kontinua, kdy je splněn Hookův zákon. V těsném okolí výbušnin existuje rovněž rázová vlna, která ve vlnu elastickou přechází (Militzer a Weber 1987). Z hlediska podoby buzeného seismického signálu můžeme seismické zdroje rozdělit na dvě základní kategorie podle Militzera a Webera (1987) – impulzivní a vibrační zdroje. Zdroje impulzivní generují krátkodobý tlakový impulz na rozdíl od zdrojů vibračních, které přenášejí tlak harmonicky po delší dobu v trvání několika sekund (obr. 7.).



Obr. 7. Ilustrace rozdílu mezi impulzem a vibrací v závislosti tlaku na čase (podle Militzer a Weber 1987).

Seismické zdroje jsou v práci rozděleny dle jejich povahy na ty, jež využívají chemické exploze (výbušniny), a mechanické zdroje. Určité zdroje využívají chemických explozí k urychlení volného pádu desky, která udeří o zem. Tyto zdroje jsou zařazeny do kategorie zdrojů mechanických.

4.1. Zdroje využívající chemické exploze

Výbušniny lze klasifikovat mnoha způsoby na základě obsahu výbušných složek či detonačních rychlostí a jiných parametrů (viz. například Agrawal 2010 nebo Klapötke 2012). Výbušniny představují směsi několika složek. Z daného důvodu je nelze příliš jednoduše klasifikovat. Definicí seismických výbušnin podává Meyer et al. 2007: „Seismické výbušniny produkují lokální tlak během seismických měření, která jsou prováděna při prospekci geologických ložisek, zvláště ropných horizontů“.

Akhavan (2011) dělí chemické výbušniny na primární, sekundární a střeliviny a paliva (tab. 1.). Primární výbušniny se od sekundárních liší velmi náhlým přechodem od hoření k detonaci. Jsou používány v iniciačních zařízeních jako rozbušky, kde se využívá jejich vyšší citlivosti na vnější podněty a množství tepla, které se uvolňuje při jejich detonaci. K detonaci významně přispívá

formování tzv. horkých skvrn („hotspots“), které představují vysoce zahřáté bubliny plynu (0,1–10 μm) v kapalině či pevné látce. Aby došlo k iniciaci u sekundárních výbušnin, teplota v horké skvrně musí být alespoň 430 °C (Klapötke 2012). Výbušniny s teplotou tání pod 430 °C tudíž nemohou být iniciovány horkými skvrnami. Komerčně dostupné seismické výbušniny patří do skupiny sekundárních výbušnin. Ty jsou méně citlivé a k iniciaci jejich detonace je zapotřebí ráz primární výbušniny. Díky této skutečnosti je jejich použití v seismickém průzkumu velice bezpečné.

Pro nakládání s výbušninami platí zvláštní pravidla, neboť dané zdroje jsou pro člověka ze všech seismických zdrojů nejvíce nebezpečné. Základní univerzálně akceptovaná pravidla a regulace pro skladování a manipulaci s výbušninami uvádí například Agrawal (2010).

Tab. 1. Dělení výbušnin (Akhavan 2011).

Chemické výbušniny	Primární výbušniny (azid olovnatý, styfnát olovnatý, fulminát rtuťnatý, tetrazen aj.)	
	Sekundární výbušniny	Vojenské výbušniny (TNT, hexogen, PETN, tetryl aj.)
		Komerční výbušniny (gely, prášky, povolené výbušniny, ANFO, emulze aj.)
	Střeliviny a paliva	Střeliviny (SBP – nitrocelulózový prach, DBP – nitroglycerinový prach, TBP – nitroguanidinový prach, střelný prach aj.)
		Raketová paliva (DBP, směsi, kapalná paliva a oxidační činidla aj.)

V seismice se používá celá řada různých výbušnin, které se liší svým složením a vlastnostmi. Jejich složení je výrobcem udáváno v hmotnostních procentech složek. Uváděné technické parametry jsou zpravidla průměrná detonační rychlost, energie (spalné teplo), detonační tlak a hustota. Znalost technických parametrů je velice užitečná, neboť transformace chemické energie výbušnin v elastické vlny je na nich vysoce závislá (Mougenot 2006).

Z praktických hledisek je výhodná odolnost vůči vlhkosti, kterou disponuje drtivá většina seismických výbušnin. Pro potřeby interpretace je zvykem uvádět, jaká byla hmotnost nálože (dynamitu) v kg a hloubka jeho uložení (viz. například Steer et al. 1996). Důležité je rovněž

geometrické rozmístění náloží a načasování odpalů. Hustota výbušnin je důležitá s ohledem na možnost ponoření pod vodní hladinu nebo do vrtného výplachu.

Srovnání 3 komerčních seismických výbušnin poskytuje tab. 2. Vybrány byly výbušniny řady OsxTM 8 L od společnosti Orica Inc., VIBROGEL[®] MINI-HOLE od společnosti Dyno Nobel Inc. a emulze SEISPRO[®] (obr. 8.) od téhož výrobce. Z tabulky je patrná korelace napříč všemi parametry. Nižší hustota výbušniny je spjata s nižšími detonačními tlaky i detonačními rychlostmi.

Tab. 2. Srovnání seismických výbušnin.

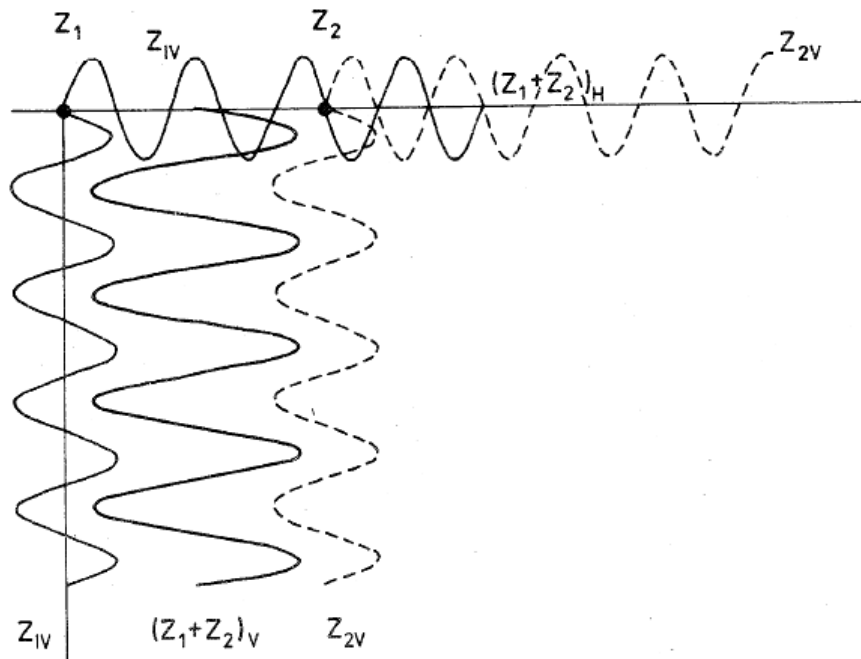
	Osx TM 8 L	VIBROGEL [®] MINI-HOLE	SEISPRO [®]
Průměrná detonační rychlost [m.s⁻¹]	7464	6100	5900
Energie [MJ.kg⁻¹]	6,19	5,23	4,19
Detonační tlak [Kbar]	238	129	103
Hustota [g.cm⁻³]	1,70	1,38	1,18
Zastoupení nejvýznamnější složky	2,4,6-Trinitrotoluen (30–90 hm. %)	Dusičnan amonný (0–75 hm. %)	Dusičnan amonný (40–65 hm. %)

Během seismických prací je důležitý způsob uložení nálože trhaviny. Jednotlivé způsoby diskutují například Cidlinský a Skopec (1990). Jako nevhodný se jeví způsob umístění výbušniny na povrchu. Odpal vytvoří intenzivní povrchovou vlnu, která nenesou žádnou geologickou informaci. Zároveň vzniká kráter, ze kterého vylétává materiál, který může zranit obsluhu a poškodit přístroje. Další škody mohou být způsobeny zvukovou vlnou. Výjimečný je vzdušný odpal (viz. například také Poulter 1950). Nejčastější je tak uložení nálože do vrtu. Vrt se hloubí tak, že je vrtným nástrojem zcela rozrušena hornina do formy drtě. Ta je vynášena k povrchu výplachem. Nálož by nikdy neměla být uložena ve vrstvě malých rychlostí a pakliže vrt prochází písčítými a jílovitými vrstvami, nálož by měla být ve vrstvách jílovitých či jílových. Vrstvy malých rychlostí či písčité vrstvy způsobují značné ztráty energie.



Obr. 8. Seismická emulze SEISPRO®.

Při reflexním seismickém průzkumu je zapotřebí zvýraznit odraženou vlnu a potlačit vlny povrchové včetně vlny přímé, která se šíří těsně pod zemským povrchem a dorazí k místu registrace jako první. Toho lze docílit pomocí tzv. grupování seismických výbušnin či obecně grupováním seismických zdrojů. Grupa je směrovým filtrem. Na obr. 9. je znázorněn způsob, který vede ke zdvojnásobení signálu ve vertikálním směru a vyrušení signálu v horizontálním směru.



Obr. 9. Rozdílnost součtu harmonického signálu dvou zdrojů Z_1 a Z_2 ve vertikálním $(Z_1 + Z_2)_V$ a v horizontálním $(Z_1 + Z_2)_H$ směru (Cidlinský a Skopec 1990).

Při seismických pracích zpravidla budíme podélné vlny. Avšak existují i způsoby buzení vln příčných. Na seismickém profilu je možné vykopat podélnou rýhu. Do stěny této rýhy uložíme výbušninu. Převážná část seismické energie se posléze uvolňuje kolmo na profil ve směru od stěny rýhy.

Seismické výbušniny generují seismické vlny, které vykazují široké frekvenční rozpětí. Pro frekvence vlnění generovaného výbušninami platí některé užitečné vlastnosti. Čím je hmotnost

nálože vyšší, tím je nižší frekvence vyzářeného vlnění. Pro dosažení vyšších frekvencí je tak výhodné seskupení několika menších náloží, než odpálení stejné hmoty nálože najednou.

4.2. Mechanické zdroje

Mechanické zdroje lze patrně nejjednodušeji definovat jako zdroje nevyužívající chemické exploze jakožto primární iniciátor seismického impulsu. Jedná se o zdroje využívající údery či vibrace za pomoci mechanických zařízení.

Patrně nejjednodušším mechanickým zdrojem je ruční kladivo s palicí o takové hmotnosti, aby byla osoba vykonávající úder schopna kladivo zdvihnout nad hlavu a plnou silou mnohokrát udeřit o zem či ocelovou podložku předem na zem umístěnou. Vodivá podložka i palice kladiva je v obvodu s registračním zařízením a úder kladiva spouští záznam seismického signálu.

V následujícím přehledu jsou zdroje impulzivní odlišeny od vibračních. Zařazena je také kapitola o speciálních zdrojích.

4.2.1. Impulzivní zdroje

Úkolem impulzivních zdrojů je v co nejkratším čase vyvolat v určitém místě stlačení hornin. Mechanické impulzivní zdroje působí zpravidla shora na zemský povrch. Rázová vlna při jejich účinku není tak výrazná, jako v případě zdrojů využívajících chemické exploze. Avšak i v okolí úderů lze nezdědka evidovat frakturaci či prohlubeň. Ideální impuls by vyžadoval nekonečné množství výkonu (Baeten 1989). V časové doméně by se projevil jako ostrý vrchol v čase $t = 0$ o nekonečně malé šířce dt . Ve frekvenční doméně by se jednalo o široké pásmo. Všechny frekvence by měly rovnocenné amplitudy.

Patrně nejvýznamnějšími zdroji dané kategorie jsou seismická kladiva, volně padající závaží a urychlená volně padající závaží. Seismická kladiva jsou mechanická zařízení o hmotnosti až několika tun, která mají za úkol silně udeřit do podložky. Urychlená volně padající závaží jsou podobnými zdroji. Jejich součástí je rovněž deska či jiný podobný prvek, který je však vystaven urychlenému volnému pádu. Urychlení je docíleno zvýšením tlaku v expanzní komoře v prostoru nad deskou.

Rychlost úderu seismických kladiv může být v řádech několika metrů za sekundu (například několikatunová seismická kladiva) i vyšších (například úder ručním kladivem). Pro okamžitou rychlost $v(t)$ zdrojů s urychleným volně padajícím závažím můžeme při zanedbání odporu prostředí psát:

$$v(t) > \frac{\partial^2 s}{\partial t^2} t, \quad (6)$$

kde s představuje dráhu a $\frac{\partial^2 s}{\partial t^2}$ tíhové zrychlení.

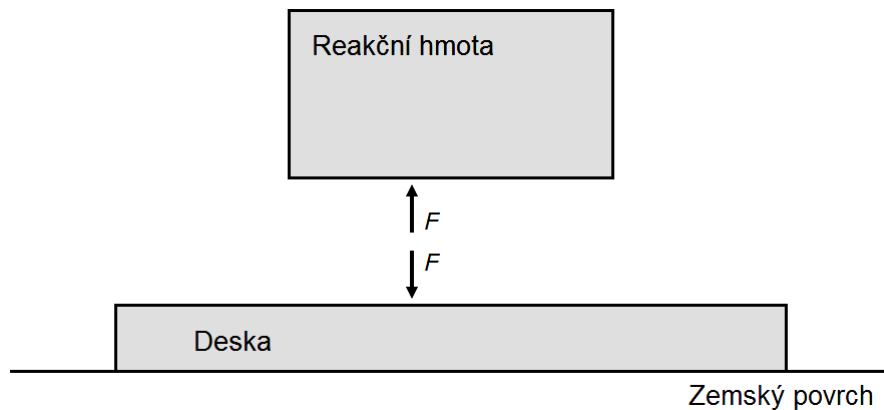
Mezi seismická kladiva můžeme zařadit menší zařízení, jejichž obsluhu a transport zvládne vykonávat jeden operátor (například Mini-SOSIE), i větší zařízení o hmotnosti několika tun. Ke zdrojům využívajícím urychlené volně padající závaží patří zařízení jako je PEG („Propelled Energy Generator“) či větší zařízení o hmotnosti několika tun jako například DinoseisTM. Mobilní zařízení PEG-40 o celkové váze 40 kg je připojitelné k zadní části automobilu (obr. 10.)



Obr. 10. PEG-40 instalovaný k automobilu a připravený na práci (převzato z <https://www.passcal.nmt.edu>).

4.2.2. Vibrační zdroje

Zatímco impulz má velice krátkodobé trvání v řádu zlomků sekundy, vibrační zdroje či seismické vibrátory vyvolávají při relativně nízkých amplitudách harmonické tlakové změny na zemském povrchu pomocí desky v trvání několika sekund. Deska působí silou pomocí hydraulického či elektrodynamického systému zpravidla ve vertikálním směru tak, aby generovala P-vlny. Tuto sílu doplňuje reakční hmota vibrátoru (obr. 11.). Baeten ve své práci z roku 1989 uvádí rovněž vibrace v horizontálním směru, které umožňují vznik S-vln.



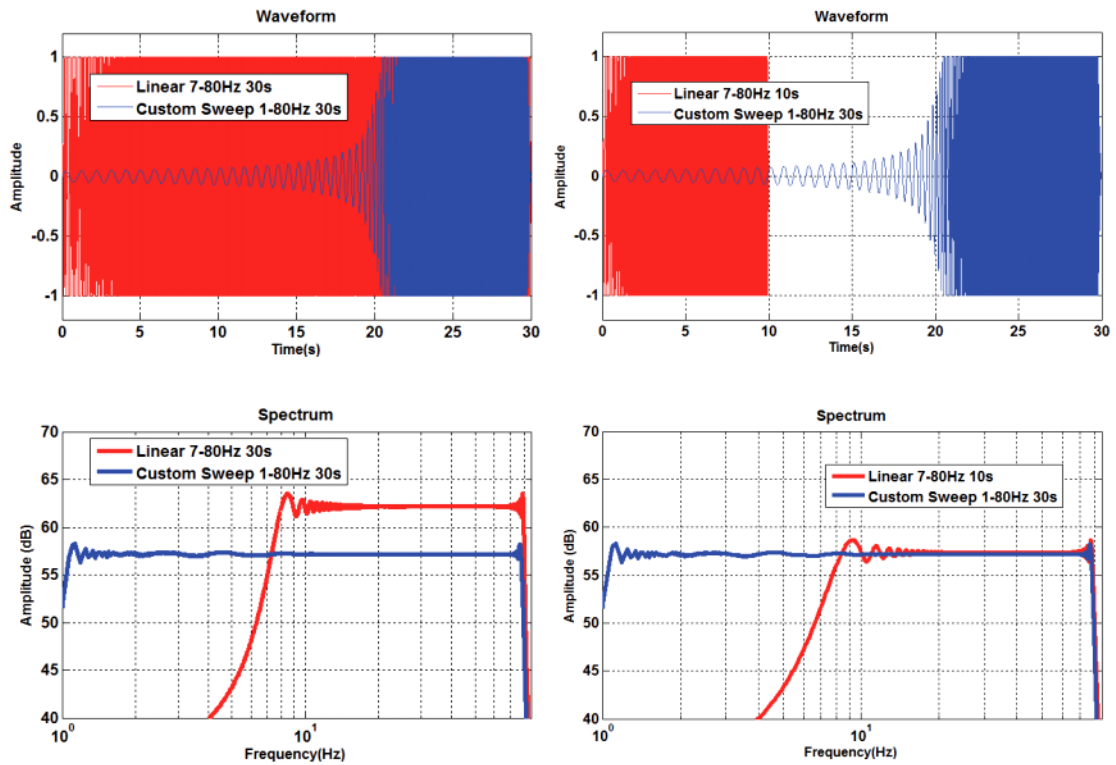
Obr. 11. Mechanismus generující tlak v konceptu seismického vibrátoru (podle Baetena 1989).

Tlak desky vibrátoru přenáší vibrace do země. Vibrace mají časově proměnnou frekvenci, kdy dochází k jejímu lineárnímu či nelineárnímu nárůstu či poklesu zpravidla v rozpětí od několika Hz do několika desítek Hz. Mougnot (2006) uvádí, že při nižších frekvencích dochází ke zvyšování seismického šumu (< 10 Hz) a při vyšších zase k vysokému útlumu seismických vln (> 80 Hz). V seismickém průzkumu bývá tudíž užíváno rozpětí v blízkém okolí 10 až 80 Hz. Z možnosti kontroly frekvenčního rozpětí emitované seismické energie plyne značná výhoda seismických vibrátorů. Obecný tvar signálu zvaného sweep $q(t)$ uvádí Baeten (1989):

$$q(t) = a(t)\sin[2\pi\theta(t)], \quad (7)$$

kde $a(t)$ je náběhovou funkcí a $\theta(t)$ určuje frekvenci sinové vlny jako funkci času. První derivace $\theta(t)$ odpovídá okamžité frekvenci.

Náběhová funkce je zpravidla lineárního či sinového (cosinového) průběhu a omezuje signál při obou jeho koncích. Obecným úkolem náběhové funkce je zachování hladkého průběhu spektra (Tellier et al. 2015). Důvodem jejího použití jsou mechanická a hydraulická omezení seismických vibrátorů při nižších i vyšších frekvencích (Wei a Pan 2015). Efekt náběhové funkce na frekvenční spektrum je patrný z obr. 12. Zachování emitované energie si v daném případě kromě užití náběhové funkce vyžádalo rovněž pomalejší frekvenční nástup z oblasti nižších frekvencí.



Obr. 12. Důsledky rozšiřování vlnového pásma k nižším frekvencím: (vlevo) stejná délka trvání dvou signálů sweep ovlivňuje amplitudy; (vpravo) delší sweep zachovává amplitudy, ale ovlivňuje produktivitu (Tellier et al. 2015).

Signál sweep je nejčastěji lineární ve tvaru:

$$q(t) = a(t) \sin \left[2\pi \left(f_0 + \frac{1}{2} \frac{f_1 - f_0}{T} t \right) t \right]. \quad (8)$$

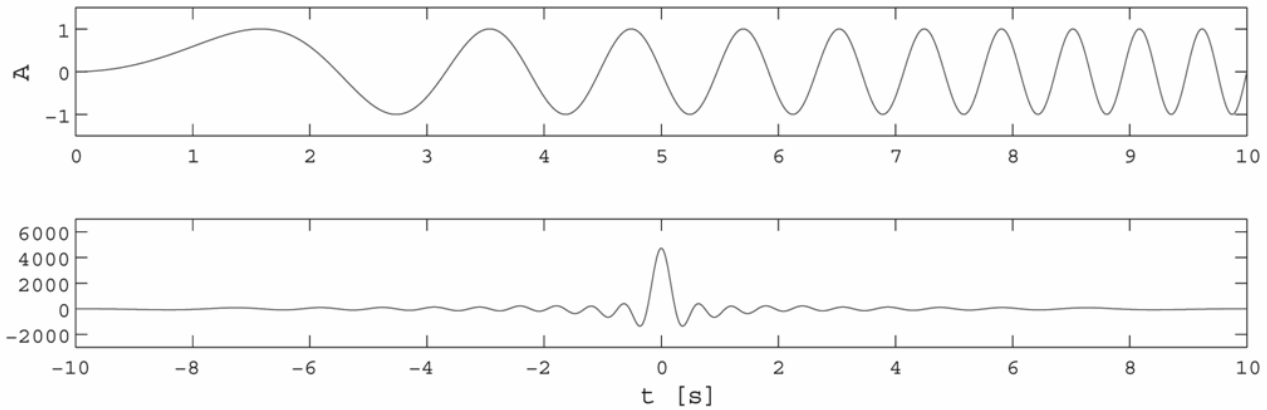
Pakliže platí, že $f_0 > f_1$, je sweep nazván jako sestupný sweep. Opačně, při platnosti $f_0 < f_1$, je sweep nazván jako vzestupný sweep. V případě, že je vzestup frekvencí $f(t)$ nelineární, platí, že $\frac{df(t)}{dt} \neq konst.$ Takový signál zpravidla některé frekvence zvýrazní a jiné potlačí.

Samotný vibrační signál by byl bez dalšího počítačového zpracování pro potřeby seismického průzkumu nečitelný, neboť potřebujeme měřit časy příchodu P- či S-vln, které jsou kratší než daný signál. K převedení vibračního signálu do podoby analogického záznamu od impulzivního zdroje se využívá výpočtu funkce vzájemné korelace.

Militzer a Weber (1987) uvádějí autokorelační funkci φ_{xx} spojitého vibračního signálu $x(t)$:

$$\varphi_{xx}(\tau) = \int x(t)x(t + \tau)dt. \quad (9)$$

Autokorelační funkce ukazuje závislost mezi velikostí posunu signálu a podobností (obr. 13). Výsledkem autokorelace je signál obsahující vrchol, který indikuje nulový posun.



Obr. 13. Vzestupný sweep s frekvenčním rozpětím 0–2 Hz o délce trvání 10 sekund (nahore) a autokorelační funkce (dole).

Metoda využívající časově proměnný vibrační signál se komerčně označuje jako Vibroseis. V metodě se zavádí obecnější metoda vzájemné korelace, která umožňuje identicky porovnat vyslaný signál se seismogramem. Daný způsob se dobře uplatnil v reflexní seismice. Zaznamenané reflexy lze v seismogramu odlišit ve formě vrcholů podobných obr. 13. Při současné znalosti délky trvání vyslaného signálu sweep můžeme odečítat časy příchodu seismických vln.

Funkce vzájemné korelace $\varphi_{xy}(\tau)$ mezi funkcí $x(t)$ a $y(t)$ je definována integrálem:

$$\varphi_{xy}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} y(t)x(t + \tau)dt, \quad (10)$$

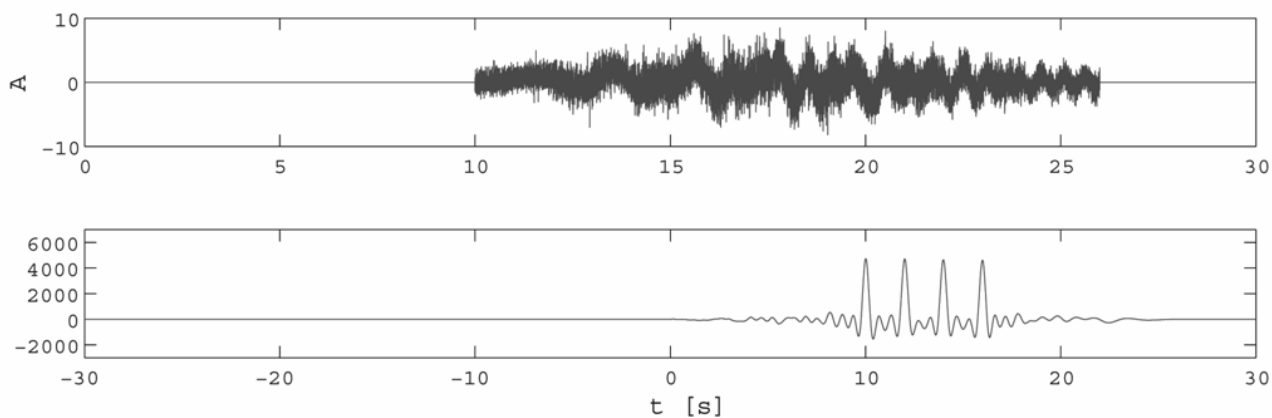
kde $y(t)$ je vibrogram a $\varphi_{xy}(\tau)$ korelovaný vibrogram (korelogram) obsahující korelační funkci. Modelový vibrogram a korelogram jsou na obr. 14.

Aby došlo k zúžení vrcholu funkce vzájemné korelace a tím ke zvýšení rozlišovací schopnosti, je nezbytné volit vyšší frekvence sweepu. Ještě podstatnější je rozdíl frekvencí f_0 a f_1 , který by měl být co největší. Cidlinský se Skopcem (1990) uvádějí rovněž podmínku, která musí platit, abychom získali korelogram s jednoduchou korelační funkcí bez většího počtu extrémů. Pro vzestupný sweep je:

$$\frac{f_0}{f_1} = \frac{1}{4}. \quad (11)$$

Pro sestupný sweep je potom:

$$\frac{f_0}{f_1} = 4. \quad (12)$$



Obr. 14. Modelový vibrogram se čtyřmi signály vzestupného sweepu (0–2 Hz) a náhodným signálem (nahore). Výsledek vzájemné korelace (dole). Vrcholy indikují modelové časy příchodu seismických vln.

Seismické vibrátory se grupují. Grupování má za cíl zvýšit amplitudu vlnění. Rovněž se používá pro směrovou filtraci, která má za úkol potlačit povrchové vlny. Ty jsou v případě vibrátorů velmi intenzivní. Především pro ropný průzkum se používá seismických vibrátorů podoby vozidel, kdy zpravidla čtyři vozidla o hmotnosti několika tun na profilu naráz budí seismické vlny. Tabulka 3. shrnuje typické parametry vibrátoru Nomad 65 a Nomad 65 Neo (Tellier et al. 2015).

Tab. 3. Porovnání seismických vibrátorů Nomad 65 a Nomad 65 Neo (Tellier et al. 2015).

	Nomad 65	Nomad 65 Neo
Hmotnost reakční hmoty [kg]	4082	4700
Rozkmit [cm]	7,62	10,12
Plocha pístu [cm²]	133,4	112,6
Diferenciální tlak [bar]	200	247
Nejnižší provozní frekvence [Hz]	7,0	5,4

4.2.3. Speciální zdroje

Některé mechanické zdroje se od uvedených a hlavně v ropném seismickém průzkumu užívaných zdrojů odlišují v oblastech buzeního frekvenčního rozpětí nebo umístěním na zemském povrchu. Pro vytvoření vibrací o vyšších frekvencích jsou využívány piezoelektrické zdroje. Piezoelektrický jev je schopností krystalů (krystalických látek) generovat elektrické napětí při jejich deformaci, popřípadě jev opačný, kdy se krystal v elektrickém poli deformuje (Irschik et al. 2010).

Zdroje užívající metodiky SIST („Swept Impact Seismic Technique“) vysílají sekvence pulzů při vysokých napětích (tisíce voltů) na skupiny krystalů. Frekvenční rozpětí je v řádech stovek až tisíců Hz. Zdroj podoby ocelového válce může být umístěn do vrtu či může být ruční, kdy jej lze přikládat například na stěnu raženého tunelu. Výhodou těchto zdrojů je díky užití vyšších frekvencí vyšší rozlišovací schopnost. Nevýhodou je naopak vyšší útlum horninového prostředí.

V laboratorních podmínkách lze s úspěchem pracovat i s frekvencemi výrazně převyšujícími 20 kHz, které limitují oblast ultrazvuku. Vilhelm et al. (2010) se zabýval srovnáním měření rychlostí P-vln v laboratorních podmínkách a v přirozeném prostředí. Zatímco přirozené prostředí vykázalo značnou anizotropii rychlosti, laboratorní ozařování peridotitů nikoliv. Experimentální práce tak poukázala na obtíže přímého užití laboratorně získaných rychlostí do podmínek přirozeného prostředí.

5. Experimentální stanovení frekvenční charakteristiky elektrodynamického vibrátoru

5.1. Úvod

Ústav hydrogeologie, inženýrské geologie a užití geofyziky Přírodovědecké fakulty Univerzity Karlovy vlastní přenosný elektrodynamický vibrátor (obr. 15.), který představuje přestavěný reproduktor. Vibrátor je výrobkem firmy 3S Sedlak, s.r.o. se sídlem v Brně. Tento zdroj dovoluje definovat vlastní časový průběh mechanických vibrací. Jedná se o slabý zdroj, který vzhledem k jeho velikosti nelze užít pro řešení standardních úkolů (například ropný průzkum, dynamické testování mostů aj.) seismiky v terénu. Jeho charakter z něj však činí vhodný nástroj pro laboratorní použití, například pro testování správné funkce geofonů. Smyslem této části práce bylo otestovat přístroj v laboratorních podmínkách.

Hlavní část experimentu si kladla za cíl určit frekvenční charakteristiku vibrátoru. Pro skutečné stanovení frekvenční charakteristiky, která by dovolila měřit velikost kmitů ve fyzikálních jednotkách (posunutí, rychlost posunutí nebo zrychlení), by bylo potřeba použít kalibrovaný měřicí řetězec. Pro registraci generovaných kmitů byl použit 10 Hz geofon připevněný k vibrátoru lepící páskou. Vibrátor byl umístěn na čtyřech polystyrenových kvádrech. Postupně bylo generováno několik jednofrekvenčních signálů. Pro každou frekvenci byla stanovena amplituda rychlosti kmitání zaznamenaného vlnění. Ve druhé části experimentu byly vibrátorem buzeny tři signály vzestupného sweepu o frekvenčním rozpětí 5–50, 50–100 a 100–200 Hz v délce trvání 3200 ms.



Obr. 15. Velikost elektrodynamického vibrátoru v porovnání s velikostí mobilního telefonu.

5.2. Metodika

Základem elektrodynamického vibrátoru je reproduktor ARN165-61/4 o impedanci 4 Ohm a jmenovitém šumovém příkonu 100 W (jmenovitý kmitočtový rozsah 40–4000 Hz, DIN IEC 268-5, uzavřená ozvučnice 15 dm³). Namísto membrány je působeno silou na rigidní čtvercovou desku. K reproduktoru bylo přidáno závaží o hmotnosti 0,5 kg a kompenzační pružina pro vyrovnávání jeho hmotnosti v pracovní poloze. Vibrátor je vybaven přepravní pojistkou zajištěnou pomocí čtyř šroubů s magnetickou fixací.

Vibrátor je při práci napájen elektrickým signálem, jehož časový průběh je uložen v MP3 přehrávači MuVo V200. Signál je zesílen pomocí dvoukanalového zesilovače Blaupunkt GTA 280, který je napájen baterií. Časové průběhy vysílaných signálů jsou vytvářeny v prostředí MATLABu a zapsány do formátu *.wav pomocí implementované funkce wavwrite (16 bitů, vzorkovací frekvence 8000 Hz). Frekvenční filtry ani volba basů na zesilovači nebyly uplatňovány.

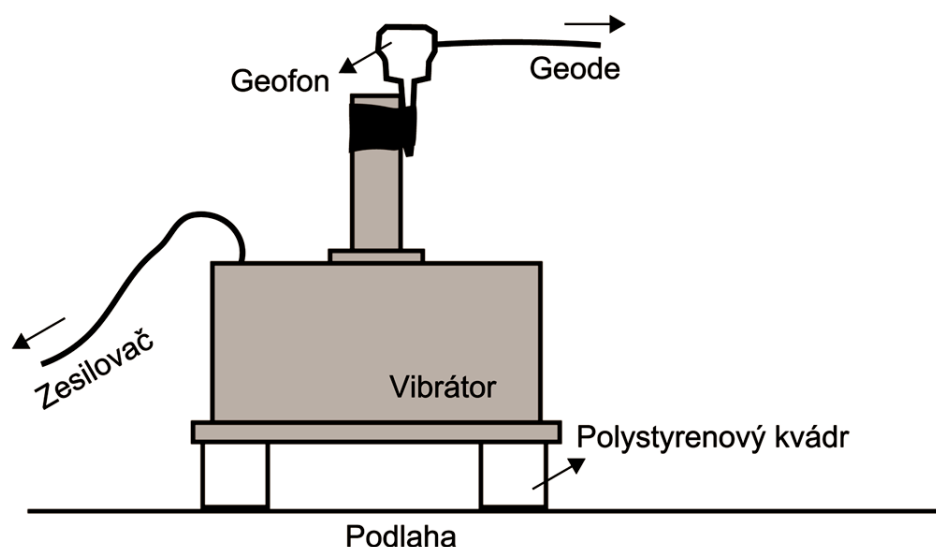
Při konstrukci mechanického systému reproduktoru je snaha o zachování úměry mezi vstupním napětím a působící silou membrány. Takovým způsobem je docíleno úměry mezi tvarem vstupního elektrického signálu a tlakem buzeným membránou. U reproduktorů je důležité, aby úměra platila hlavně v oblasti slyšitelných frekvencí, a dosáhlo se tak nezkresleného přenosu zvuku ze záznamu na ušní bubínky. V lineárním přiblížení tedy můžeme pro vstupní napětí U_i regulovatelné hlasitosti na MP3 přehrávači psát:

$$U_i \propto F, \quad (13)$$

kde F představuje budící sílu v seismickém zdroji.

Pro příliš nízké frekvence v řádech jednotek až desítek Hz vztah (13) jistě neplatí. Pro příliš vysoké frekvence v řádech tisíců či spíše desetitisíců Hz zase mechanický systém přestane kmitat tak, abychom byli schopni kmity nějakým způsobem detekovat. Pohyb vibrátoru byl registrován pomocí 10 Hz geofonu připevněného k vibrátoru lepicí páskou. Pomocí geofonu měříme rychlost A_v , se kterou vibrátor kmitá. U všech grafů je amplituda rychlosti, označená písmenem A , relativní a úměrná výstupnímu napětí geofonu. Schéma uložení vibrátoru na polystyrenových kvádrech a uchycení geofonu je na obr. 16.

Vlastní frekvence použitého geofonu je 10 Hz. Pro registrování kmitů s frekvencemi nižšími než 10 Hz je geofon z pohledu jeho frekvenční charakteristiky nevhodný, neboť dochází k rapidnímu poklesu výstupního napětí v závislosti na frekvenci. Pro vyšší frekvence se charakteristika shlazuje a nabývá konstantních hodnot.



Obr. 16. Grafické schéma experimentu.

Pomocí harmonických signálů na různých frekvencích je možné získat celou řadu bodů frekvenční charakteristiky vibrátoru. K vizualizaci dat lze přistoupit různými způsoby. V případě, že nabývá tvaru hyperboly, je možné vztah mezi převrácenou hodnotou amplitud měřených rychlostí a buzených frekvencí f jednofrekvenčních signálů popsat přímkou:

$$\frac{1}{A_v} = kf + q. \quad (14)$$

Určení převrácených hodnot amplitud frekvenční charakteristiky je obecně praktické. Vypočtený budící signál sweepu lze totiž jimi vynásobit a tím docílit rovnocenných amplitud všech měřených frekvenčních složek.

Tvar (14) lze stanovit numericky z několika jednofrekvenčních signálů metodou nejmenších čtverců. Hodnoty amplitud měřeného harmonického signálu byly určovány jako průměrná hodnota obálky amplitud signálu o délce 1 s. Výhodou takového postupu je omezení rušení vlivem seismického šumu v okolí místa měření.

Amplitudu A_v pro i -tý jednofrekvenční signál stanovuje průměr z n absolutních hodnot jeho Hilbertovy transformace $z(t)$:

$$A_v = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n |z_k(t)|. \quad (15)$$

Elektrické napětí indukované geofonem je registrováno pomocí seismografu Geode od společnosti Geometrics Inc. Seismograf je připojen k počítači a napájen baterií. Jeho frekvenční rozsah je od 1,75 Hz 20 kHz. Seismograf se ovládá pomocí programu Geometrics Seismodule Controller, který umožňuje nastavit hodnotu vzorkovací frekvence seismické stopy, přičemž platí,

že s rostoucí vzorkovací frekvencí klesá maximální délka zaznamenávání stopy (paměť seismografu je 16000 vzorků na jednu stopu). Pro všechna měření byla splněna podmínka:

$$\frac{1}{Tf_{max}} \geq 8, \quad (16)$$

kde f_{max} představuje maximální frekvenci přehrávaného signálu a T časový interval mezi dvěma body záznamu. Vždy tak byl s velkou rezervou dodržen Shannonův teorém a nikdy nemohlo dojít k aliasingu.

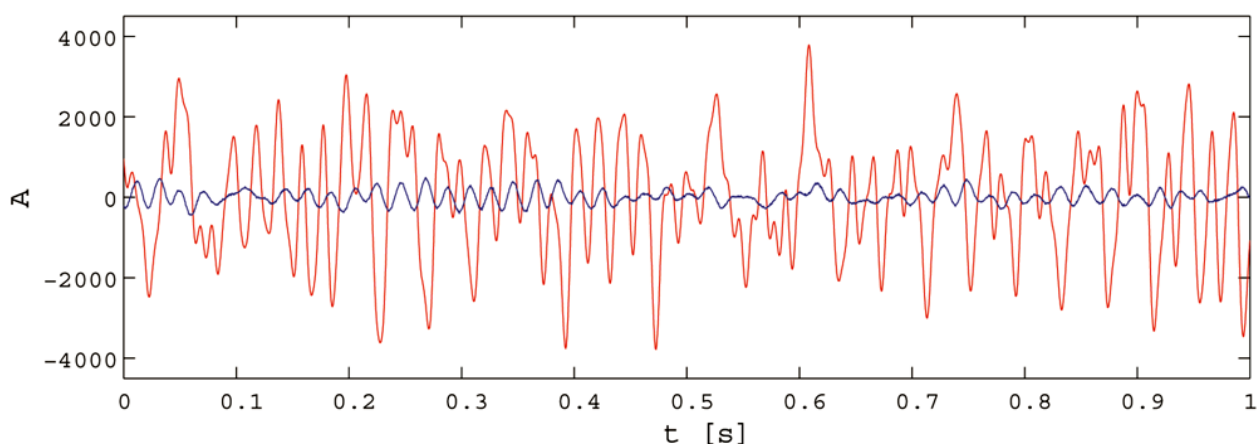
Při hledání frekvenční charakteristiky bylo třeba dávat pozor na to, aby nedošlo k překročení maximální zaregistrovatelné amplitudy. Problém byl vyřešen stanovením jednotné hlasitosti na MP3 přehrávači pro přehrávanou frekvenci s nejvyšší amplitudou tak, aby při této frekvenci k ořezávání nedocházelo.

5.3. Výsledky

5.3.1. Záznam šumu ve skladu v mezipatře a suterénu budovy

Prvotní experimenty s vibrátorem byly prováděny ve skladu Oddělení užitě geofyziky v mezipatře budovy děkanátu na Albertově 6. Bylo zjištěno, že v daném místě budovy je poměrně vysoká úroveň seismického neklidu. Ukázalo se, že pakliže amplituda rychlostí, která je úměrná výstupnímu napětí geofonu, byla v řádu přibližně $2 \cdot 10^3 - 4 \cdot 10^3$ (přibližně od 300 Hz výše), počal se signál ztrácet v šumu. Z daného důvodu bylo rozhodnuto přemístit celou aparaturu do suterénu budovy a zaznamenat úroveň šumu v daném prostředí. Úroveň šumu poklesla o jeden řád. Tento pokles přinesl značné zkvalitnění záznamu a veškeré experimenty byly následně prováděny v suterénu budovy.

Zároveň se ukázalo, že hladina seismického šumu se výrazně mění v průběhu dne a proto byly experimenty provedeny ve večerních hodinách, kdy je pohyb osob v budově či dopravních prostředků v jejím okolí a zvuky jiných zařízení minimální. Porovnání přirozeného šumu ve skladu a suterénu budovy je na obr. 17.

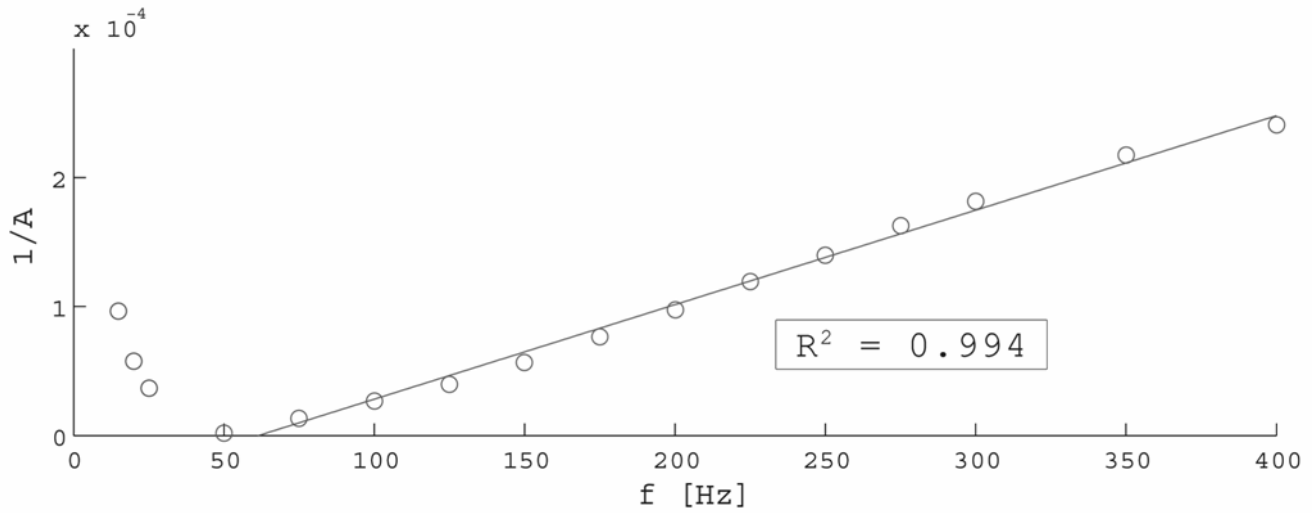


Obr. 17. Šum ve skladu (červeně, 17:30 SEČ) a v suterénu (modře, 17:50 SEČ).

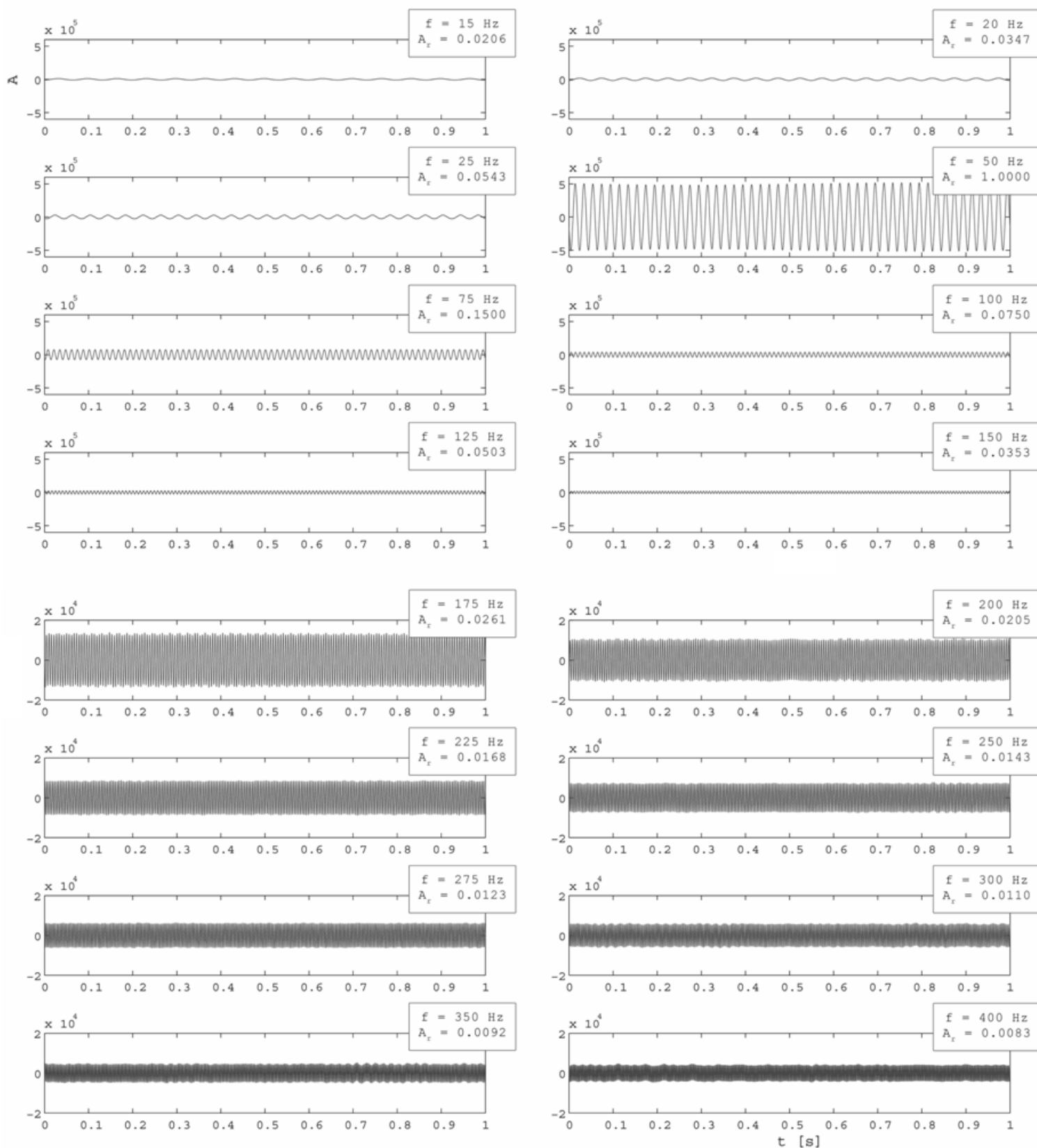
5.3.2. Frekvenčně závislý průběh převrácených hodnot amplitud rychlosti kmitání

Pomocí MP3 přehrávače byly postupně generovány signály o frekvencích 15, 20, 25, 50, 75, 100, 125, 150, 175, 200, 225, 250, 275, 300, 350 a 400 Hz. Vztah mezi převrácenou hodnotou amplitud rychlosti kmitání vibrátoru stanovených podle (15) a příslušnými frekvencemi je na obr. 18. Pro frekvenční rozpětí 50–400 Hz je proložena přímka metodou nejmenších čtverců. U přímky je uveden koeficient determinace. Jeho hodnota vyšla 0,994.

Ze všech záznamů byla vybrána 1 sekunda a tyto jsou zobrazeny na obr. 19.



Obr. 18. Lineární fit převrácených hodnot amplitud rychlostí kmitání vibrátoru pro frekvence v rozmezí 50–400 Hz (amplitudy byly určeny jako průměr absolutních hodnot Hilbertovy transformace).

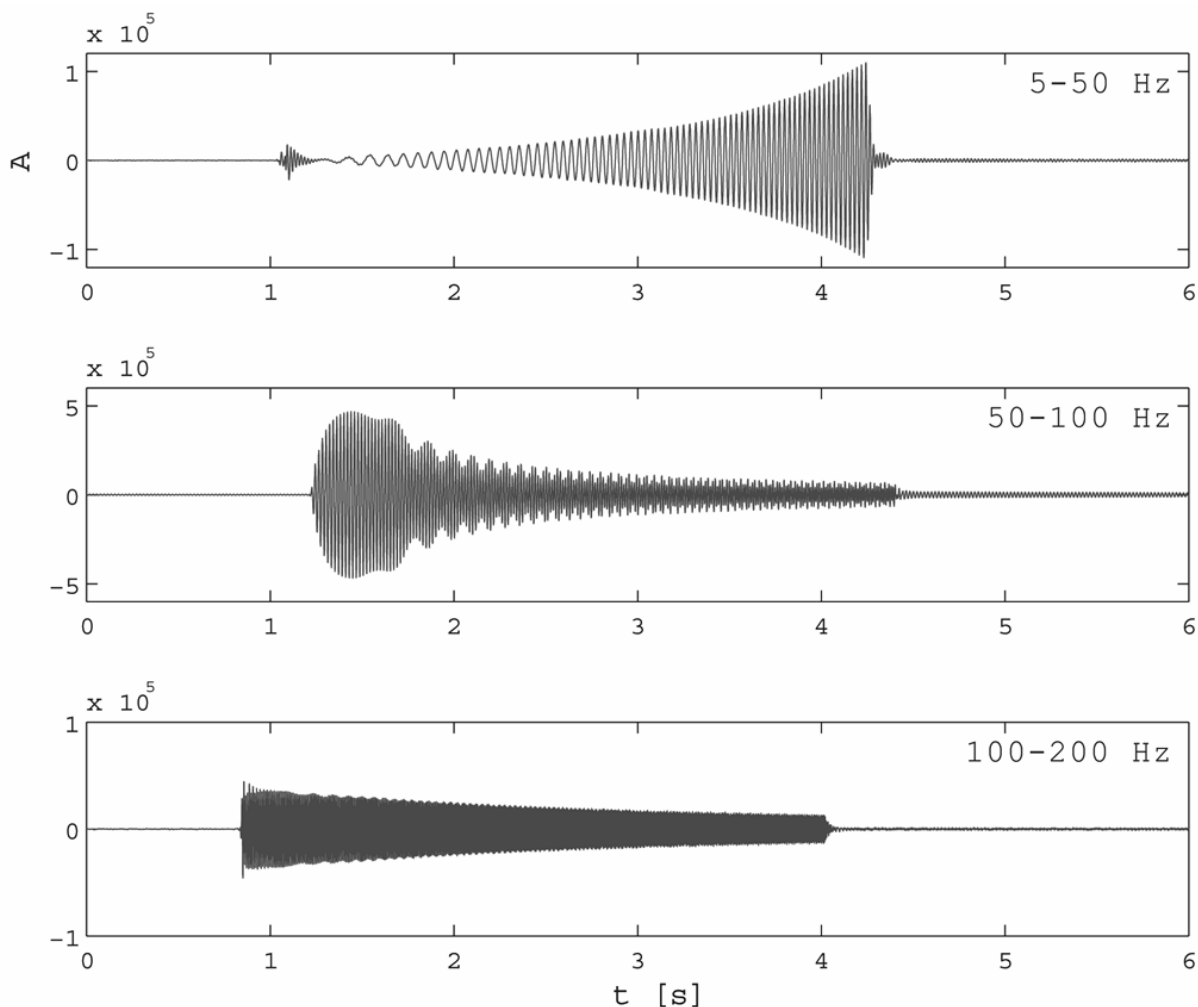


Obr. 19. Rychlosti kmitání vibrátoru pro různé frekvence. Hodnota A_r je poměr mezi příslušnou amplitudou a amplitudou pro 50 Hz (amplitudy byly určeny jako průměr absolutních hodnot Hilbertovy transformace).

5.3.3. Test buzení sweepu pro 5–50, 50–100 a 100–200 Hz o délce 3200 ms

Doplňkem k předchozímu experimentu bylo buzení signálů vzestupných sweepů. Vzestupný sweep na rozdíl od předchozího experimentu umožnil budit signál se spojitě proměnnou frekvencí v daném rozpětí 5–50, 50–100 a 100–200 Hz v délce trvání 3200 ms.

Pro oblast počátečních frekvencí prvního sweepu není reproduktor ani geofon konstruován. V řádech desítek Hz dochází k nárůstu amplitud rychlosti. Tento nárůst kulminuje přibližně mezi 50 a 60 Hz a poté začíná klesat. U druhého sweepu si lze povšimnout nepravidelností v obálce amplitud. U třetího rovněž, zde jsou však méně patrné. Ze všech záznamů je zřejmé, že po ukončení průběhu sweepu amplitudy rychlosti ještě několik sekund nabývají hodnot vyšších než před počátkem měření, kdy je vibrátor v klidu (obr. 20).



Obr. 20. Rychlosti kmitání vibrátoru pro vzestupné sweepty.

6. Diskuse

6.1. Rešeršní část

Těžištěm rešeršní části práce je přehled seismických zdrojů používaných v seismickém průzkumu. V rámci dané části se nabízí především otázka, jaká je jejich budoucnost. Lze očekávat stále větší potřebu měření i v obydlených oblastech. Z tohoto hlediska se budou zhoršovat možnosti použití seismických výbušnin pro řešení problémů na daných územích. Jedním z důvodů jsou bezpečnostní rizika spojená s jejich použitím. Lze tedy předpokládat, že významnou roli budou na těchto územích přebírat zdroje mechanické a to hlavně seismické vibrátory. A to i přesto, že velikost a hmotnost vibrátoru je konečná a omezená například velikostí silnic a dálnic. Seismické vibrátory totiž lze grupovat a zvyšováním jejich počtu lze seismické vlny účinně zesilovat. Efektu zesílení energie zdroje se dosahuje i volbou delší doby trvání práce vibrátorů a rovněž lze realizovat vibrace na každém bodě opakovaně. Naproti tomu výbušniny lze snadno transportovat prakticky kamkoliv. Zároveň lze prakticky téměř libovolně zvyšovat hmotnost nálože a tím seismickou energii buzených vln. Ve špatně přístupných oblastech tedy půjde stále o nenahraditelný zdroj. Srovnání seismických vibrátorů a dynamitu přinesl například experiment COCORP (Steer et al. 1996). Experiment měl snahu postihnout situaci až v hlubších partiích zemské kůry v oblasti MOHO. Ukázalo se, že nevýhodou použití vibračních zdrojů oproti výbušninám může být nižší energie prostoupivší horninovým prostředím, která má za následek nižší kvalitu seismických záznamů. Dalším významným hlediskem je cena seismického měření. Na průzkum dané oblasti seismickými vibrátory se vynaloží polovina až třetina prostředků oproti výbušninám (Vermeer 2012). Měření s výbušninami také ve srovnání s vibrátory zabere více času.

Kontrolou frekvenčního rozpětí vln buzených vibrátory se lze dostávat blíže ke stavbám i k citlivějším strukturám než při užití výbušnin či mechanických impulzivních zdrojů. Z tohoto pohledu bude vhodné jít směrem testování vibrátorů v různých podmínkách za užití různých lineárních či nelineárních sweepů. Nesporně užitečné z tohoto pohledu budou jak experimenty v terénu, tak laboratorní přístup.

6.2. Experimentální část

Experimentální část podle předpokladů ukázala, že použití elektrodynamického vibrátoru se základem v reproduktoru ARN165-61/4, jakožto budiče seismických vln při přehraní signálu vzestupného sweepu pro první jednotky Hz za využití 10 Hz geofonu, není vhodné. Bude také vhodné uvážit, zda je na místě použití sweepů v rozmezí přibližně 50–60 Hz, kdy amplitudy

rychlostí kulminují. Diskrétními kroky byla zjištěna charakteristika vibrátoru pro rozpětí 50–400 Hz. Závislost převrácených hodnot amplitud rychlostí kmitání na daných frekvencích je dobře nahraditelná přímkou. Pro dané frekvence lze tedy uvažovat hyperbolickou frekvenční charakteristiku vibrátoru.

Uvažujme charakteristiku $A_v(f)$. Když budeme chtít nalézt vhodné amplitudy budícího signálu, při kterém by byla amplituda všech buzených frekvenčních komponent pro rychlost rovnocenná, můžeme úpravou charakteristiky $A_v(f)$ vytvořit náběhovou funkci $a(t)$ signálu sweepu. Možností je určit převrácené hodnoty charakteristiky, můžeme psát:

$$a(t) = \frac{1}{A_v(f)}. \quad (17)$$

Pokud jsou funkční hodnoty ve vztahu (17) normalizovány do intervalu $\langle 0, 1 \rangle$ a délka charakteristiky $A_v(f)$ je shodná s délkou příslušného sweepu, můžeme vztah pro signál sweepu (8) přepsat do tvaru:

$$q(t) = \frac{1}{A_v(f)} \sin \left[2\pi \left(f_0 + \frac{1}{2} \frac{f_1 - f_0}{T} t \right) t \right]. \quad (18)$$

Vzhledem k tomu, že pro registraci byl použit běžný provozní geofon místo kalibrovaného měřícího řetězce, má provedená studie jen orientační, metodický charakter. Nicméně lze uvažovat o tom, že pokud bychom ke skutečnému měření používali právě zmíněné 10 Hz geofony a seismograf Geode, je uvedený postup návrhu amplitudového průběhu signálu sweepu v praxi použitelný.

7. Závěr

V bakalářské práci se podařilo vytvořit přehledné rozdělení pozemních seismických zdrojů. V úvodu práce je stručná zmínka o fyzikálních základech seismických metod. Vychází z učebnice Lowrieho *Fundamentals of Geophysics* z roku 1997, která je vhodným zdrojem dalších podrobností k této kapitole. Fyzikální základy zcela jistě nejsou vyčerpávající a jako takové by zabraly práci o možně větším rozsahu, než jaký má tato práce. Kapitola týkající se historie je dle mého názoru vyčerpávající. Podstatným sdělením této kapitoly je skutečnost, že se využití seismických zdrojů historicky vydělilo na výbušniny počínaje střelným prachem a mechanické zdroje počínaje volně padajícím závažím či prostými údery o zem. Etapa po 2. světové válce se vývojem mikroprocesorů podepsala prakticky na všech technologiích. V případě seismických zdrojů šel vývoj směrem užití seismických vibrátorů.

Kapitola Rozdělení pozemních seismických zdrojů v práci vychází i z historického vývoje. Zdroje jsou rozděleny na ty, jež využívají chemické exploze (jakožto primární iniciátor seismického impulzu) a mechanické zdroje. Kategorie mechanických zdrojů je rozdělena na impulzivní, vibrační a speciální zdroje. Studium komerčně dostupných seismických výbušnin byl učiněn závěr o značné variabilitě jejich chemického složení. Výbušniny jsou směsí několika složek s různým zastoupením hmotnostních procent. Značné odlišnosti jsou také v parametrech průměrná detonační rychlost, energie, detonační tlak a hustota. Napříč parametry je v porovnání mezi několika výbušninami patrná korelace, kdy snižování hodnoty jednoho znamená snižování druhého. Zásadní při práci s výbušninami je důraz na bezpečnost. Dále pak zhodnocení ekonomické stránky, protože seismický průzkum pomocí výbušnin je nejvíce nákladný. Mechanické zdroje jsou rozděleny na impulzivní, vibrační a speciální. Impulzivní zdroje představují mechanická kladiva, volně padající závaží a urychlená volně padající závaží. Mezi zdroji není příliš zásadní rozdíl, všechny mají za úkol silně udeřit do zemského povrchu či podložky. Vibrační zdroje jsou patrně zdroji budoucnosti, neboť možnost kontroly buzeného signálu z nich činí zcela unikátní systém. Vhodná volba frekvenčního rozpětí a délky záznamu umožňuje rozlišit různě citlivé struktury pod zemským povrchem. Zároveň je použití vibrátorů relativně finančně výhodné. Se zvětšováním zastavěných a osídlených ploch bude stále snazší vibrátory přemísťovat a zároveň půjde o bezpečnější variantu průzkumu než využití výbušnin. Speciální zdroje mohou napomoci simulovat horninové prostředí v laboratorních podmínkách. Zároveň budou nadále dominantní tam, kde užití jiných zdrojů nebude možné (například ve stěně tunelu).

Experiment s elektrodynamickým vibrátorem přinesl několik zajímavých výsledků. Frekvenční charakteristika pro rychlosti jeho kmitání je pro rozpětí 50–400 Hz hyperbolického tvaru. Při

přehraní signálu sweepu v rozpětí 50–100 Hz v délce trvání 3200 ms se v obálce amplitud objevily nepravidelnosti, které bude vhodné při dalším měření prošetřit. Jejich původ bude s nejvyšší pravděpodobností v mechanickém kmitacím systému. Do budoucna by se mohl vibrátor uplatnit jako testovací zařízení různorodých materiálů menších rozměrů v řádu metrů. Nabízí se také možnost jeho použití v seismice malého měřítka nebo testování správné funkce geofonů. Vhodnou úpravou náběhové funkce signálu sweepu bude možné měnit energie buzených frekvenčních komponent.

8. Přehled použité literatury

- Agrawal, J. P. (2010), *High Energy Materials, Propellants, Explosives and Pyrotechnics*, Wiley-VCH Verlag, Weinheim, Spolková republika Německo.
- Akhavan, J. (2011), *The Chemistry of Explosives*, Royal Society of Chemistry, Cambridge, Spojené království.
- Baeten, G. J. M. (1989), *Theoretical and practical aspects of the Vibroseis method*, dizertační práce, Delft University of Technology.
- Castagna, J. P., Batzle, M. L. a Eastwood, R. L. (1985), Relationships between compressional-wave and shear-wave velocities in clastic silicate rocks, *Geophysics*, 50, 571–581.
- Cidlinský, K. a Skopec, J. (1990), *Seismický průzkum I.*, Státní pedagogické nakladatelství, Praha, Česká republika.
- Duncan, P. M. (2005), Is there a future for passive seismic?, *First Break*, 23, 111–115.
- Godfrey, L. M., Stewart, J. D. a Schweiger, F. (1968), Application of Dinoseis in Canada, *Geophysics*, 33, 65–77.
- Irschik, H., Krommer, M. a Vetyukov, Y. (2010), On the Use of Piezoelectric Sensors in Structural Mechanics: Some Novel Strategies, *Sensors*, 10, 5626–5641.
- Klapötke, T. M. (2012), *Chemistry of High-Energy Materials*, Walter de Gruyter, Göttingen, Spolková republika Německo.
- Lowrie, W. (1997), *Fundamentals of Geophysics*, Cambridge University Press, Cambridge, Spojené království.
- Mallet, R. (1848), On the Dynamics of Earthquakes; being an attempt to reduce their observed phenomena to the known laws of Wave Motion in solids and fluids, *The Transactions of the Royal Irish Academy*, 21, 51–106.
- Meyer, R., Köhler, J. a Homburg, A. (2007), *Explosives, Sixth, Completely Revised Edition*, WILEY-VCH Verlag, Weinheim, Spolková republika Německo.
- Militzer, H. a Weber, F. (1987), *Angewandte Geophysik, Band 3: Seismik*, Springer, Vídeň, Rakouská republika.
- Mougenot, D. (2006), Toward the low frequencies: land and marine equipment, *First Break*, 24, 37–41.
- Poulter, T. C. (1950), The Poulter seismic method of geophysical exploration, *Geophysics*, 15, 181–207.
- Roy, J. S. (1995), *Birdog, Philosophy and practice of seismic data quality supervision*, Chapman & Hall, Londýn, Spojené království.

- Sheriff, R. E., Geldart, L. P. (1982), *Exploration Seismology*, Cambridge University Press, Cambridge, Spojené království.
- Steer, D. N., Brown, L. D., Knapp, J. H. a Baird, D. J. (1996), Comparison of explosive and Vibroseis source energy penetration during COCORP deep seismic reflection profiling in the Williston Basin, *Geophysics*, 61, 211–221.
- Tellier, N., Ollivrin, G. A., Boucard, D. (2015), Vibroseis equipment for efficient low-frequency generation and high-productivity operations, *First Break*, 33, 77–83.
- Vermeer, Gijs J. O. (2012), *3D Seismic Survey Design, Second Edition*, SEG Books, Spojené státy americké.
- Vilhelm, J., Rudajev, V., Živor, R., Lokajíček, T. a Pros, Z. (2010), Influence of crack distribution of rocks on P-wave velocity anisotropy – a laboratory and field scale study, *Geophysical Prospecting*, 58, 1099–1110.
- Wei, Z. a Pan, Y. (2015), Vibroseis source improvements towards broadband land acquisition, *First Break*, 33, 61–65.