

Univerzita Karlova v Praze

Přírodovědecká fakulta

Studijní program: Geologie

Studijní obor: Geologie



Jiří Pechar

Chování horninového masivu při a po vnitřní explozi - základní pojmy

The rock massif behaviour during and after internal explosion - basic terms

Bakalářská práce

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Josef Rott, Ph.D.

Praha 2019

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze, 21. 8. 2019

Podpis

Poděkování

Především bych chtěl poděkovat svému školiteli Ing. Josefu Rottovi, Ph.D., který mi svými četnými odbornými konzultacemi při tvorbě této práce, pomohl objasnit řadu problémů a za vedení a kritické posouzení předkládaného textu.

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je rešeršního charakteru a zabývá se základní charakteristice chování hornin při a po vnitřní explozi výbuchu.

Úvodní část je věnována výbuchu a jeho základnímu rozdělení, kde je podrobněji vysvětlen chemický výbuch, který je v horninách nejčastěji používán. Druhá část seznamuje čtenáře s diskontinuitami a pevností horninového masivu, které nejvíce ovlivňují mechaniku exploze. V Třetí části práce je největší prostor věnován seismickým účinkům výbuchu, kde se zejména věnují vlnám napětí a jejich šíření. Ve čtvrté části je kladen důraz na účinky výbuchu na okolní prostředí, kde je zmiňován výbuch s blízkou volnou plochou, a především výbuch v homogenním skalním masivu.

Klíčová slova: výbuch, exploze, výbušnina, skalní masiv, seismicita, seismické vlny, pevnost, diskontinuity

Summary

This bachelor thesis discusses the rock behavior during explosions. Firstly, the explosion itself and its characteristics are listed out, as well as the recognition of types of dynamic response according to the velocity of exothermic reaction or volume change. The chemical explosion, which is commonly used in rocks, is explained in detail. Secondly, the thesis introduces the properties of rocks that affect the mechanism of an explosion, such as physico-mechanical discontinuities. Followingly, the the seismic effects of the explosion and stress and explosion waves are mentioned. The next part focuses on the effects of the explosion on the surrounding rock massif. The attention is given to an influence in the near free area of the chargé in the rock massif.

Keywords: explosion, explosive, rock massif, seismicity, seismic waves, mass strength, discontinuity

OBSAH

1	ÚVOD	1
2	VÝBUCH	2
2.1	Definice výbuchu.....	2
2.2	Fyzikální výbuch	2
2.3	Chemický výbuch	3
2.4	Druhy výbušné přeměny.....	5
2.4.1	<i>Explozivní hoření</i>	5
2.4.2	<i>Detonace</i>	5
2.5	Výbuch výbušniny	6
3	ASPEKTY MASIVU OVLIVŇUJÍCÍ MECHANIKU EXPLOZE	9
3.1	Pevnost horniny a masivu.....	9
3.1.1	<i>Fyzikální vlastnosti ovlivňující pevnost</i>	9
3.1.2	<i>Základní zkoušky pevnosti – pevnost v prostém tlaku, příčném tahu, pevnost za rotačně trojosé napjatosti 10</i>	
3.2	Diskontinuity	12
4	ZÁKLADNÍ POSTUPY K STANOVENÍ VLIVU EXPLOZE NA HORNINOVÝ MASIV	15
4.1	Hoek-Brownovo kritérium porušení.....	15
4.2	Holmberg-Persson	20
4.3	Esenův model porušení.....	21
5	SEISMICKÉ ÚČINKY VÝBUCHU	23
5.1	Základní rozdělení	23
5.1.1	<i>Seismicita přírodní</i>	23
5.1.2	<i>Seismicita technická</i>	23
5.1.3	<i>Projevy seismicity na území ČR</i>	24
5.2	Vlny napětí	24
5.3	Šíření výbuchové vlny v horninách	25
5.4	Dělení seismických vln.....	26
5.4.1	<i>Objemové vlny</i>	26
5.4.2	<i>Vlny povrchové</i>	27
5.5	Lom a odraz vln.....	28

5.6	Měření otřesů způsobených výbuchem	30
5.6.1	<i>Praktický příklad zachycení seismických vln</i>	<i>31</i>
6	REÁLNÉ ÚČINKY VÝBUCHU NA OKOLNÍ PROSTŘEDÍ.....	34
6.1	Princip rozpojení hornin výbuchem za podmínek homogenního prostředí.....	34
6.2	Princip výbuchu za přítomnosti blízké volné plochy	35
6.3	Nežádoucí účinky výbuchu	36
7	ZÁVĚR.....	38
8	SEZNAM LITERATURY	40

1 ÚVOD

Nedílnou součástí dobývání pevných nerostných surovin (stavební kámen, zpevnělé sklářské písky – pískovce, živcové suroviny v aplitech apod.) v povrchových lomech nebo dalších surovin při hlubinném dobývání, při ražbě tunelů, stavebních pracích, při kterých je nutné rozrušit horninový masív apod. je použití trhavin.

Aby exploze probíhala pro člověka co nejefektivněji, nejbezpečněji a zamezilo se co nejvíce nežádoucím účinkům, je důležité znát chování hornin při explozi, respektive vliv rázových dynamických zatížení na horninový masív. Tato problematika je značně komplexní, přitom ale s přihlédnutím k rizikům provázejícím použití výbušnin nesmírně důležitá.

Na chování hornin má největší vliv druh výbuchu a pevnost horniny, avšak ve skalním masivu jako takovém mohou zejména diskontinuity nepředvídatelně napěťové vlny odrážet, lomit anebo pohlcovat úplně. Z tohoto důvodu je na zkoumání chování hornin při explozi kladen velký důraz a stále častěji jsou využívány počítačové simulace pomocí numerických metod, přičemž se využívá i analytických řešení.

2 VÝBUCH

2.1 Definice výbuchu

Výbuch je rychlý fyzikální nebo fyzikálně-chemický děj, díky kterému nastává náhlé uvolnění energie. Během výbuchu dochází k okamžitému porušení rovnovážného stavu určitého hmotného systému (výbušniny), přičemž přechod systému do nového rovnovážného stavu probíhá velmi rychle, za současné přeměny jeho vnitřní energie na mechanickou práci, která se projevuje rozrušením nebo roztržením okolí nebo pohybem jiného druhu. V místě výbuchu dochází k náhlému vzrůstu tlaku plynných povýbuchových zplodin, které konají mechanickou práci. Výbuch je tedy možno také definovat jako velmi rychlou přeměnu hmotného systému za tvorby plynů pod tlakem. Výbuch je většinou doprovázen tepelným a zvukovým efektem. Zvukový efekt se řadí mezi sekundární důsledek jevu (Henrych, 1973).

Dle Dojčára et al. (1976) můžeme výbuch rozdělit do následujících typů:

- a) fyzikální výbuch-náhlá změna fyzikálního stavu systému
- b) chemické výbuchy – rychlá exotermická chemická reakce, probíhající za tvorby silně stlačených plynných zplodin
- c) atomový výbuch – rychlá nukleární reakce.

2.2 Fyzikální výbuch

Primárním rozdílem mezi fyzikálním a chemickým výbuchem je, že se u fyzikálního podstata látky nemění. Dochází pouze k uvolnění určitého množství energie, která je ve většině případů generována při změně fáze látky, případně i při změně její hybnosti. V literatuře se můžeme setkat i s jiným názvem pro fyzikální výbuch, a to s termínem mechanický výbuch. K fyzikálním výbuchům dochází při situacích, kdy jsou překročeny příslušné parametry (např. parametr pevnosti zařízení) nad určitou limitní hodnotou. Po překročení limitní hodnoty dojde k destrukci zařízení a uvolnění obsaženého média do okolí. Tento rychlý děj, při kterém dochází k expanzi stlačeného obsahu zařízení, nese riziko, že vygeneruje silnou tlakovou vlnu. Většinou se setkáváme s fyzikálním výbuchem u stlačených plynů, které po roztržení zařízení prudce expandují do prostoru s nižším tlakem. Fyzikálním výbuchem může být například výbuch pneumatiky, popřípadě roztržení nádoby. Expanze probíhá v kulové ploše a z důvodu vysokého rozdílu tlaku a z důvodu vysokého rozdílu tlaku nedochází k okamžitému mísení média se vzduchem v okolí poškozeného zařízení. Za základní rovnici pro fyzikální výbuch lze považovat stavovou rovnici plynů:

$$pV = n R T \quad (1)$$

p: tlak [Pa]

V: objem [m³]

n: látkové množství [mol]

R: molární plynová konstanta [J.mol⁻¹.K⁻¹]

T: termodynamická teplota [K]

Z hlediska představy šíření fyzikálního výbuchu dochází k vytvoření bublin rozpínajícího se plynu, které odděluje od okolního vzduchu tenké rozhraní-stěna bubliny. Jednotlivé bubliny se důsledkem hybnosti plynu v nich obsaženém sami rozpínají. Za následek je kontinuální pokles tlaku uvnitř bubliny. V okamžiku, kdy tlak uvnitř bubliny poklesne pod hladinu atmosférického, dosahuje bublina maximálního průměru a zkolabuje. Tím se vyprodukuje negativní tlaková fáze a dojde k otočení proudění větru v okolním vzduchu (Plch, 2013). Bublina se následně stlačí a sníží svůj průměr. Jakmile se její průměr dostane na minimální hodnotu, bublina se odrazí a opět produkuje další ráz. Tento oscilační proces probíhá za postupného oslabování tlakových rázů až do okamžiku, kdy se situace zcela zklidní. Parametry tlakové vlny jsou závislé na mnoha skutečnostech. Mezi nejdůležitější skutečnosti patří rychlost uvolňování energie, vlastnosti uniklého média, parametry okolního prostředí atd. (Makovička, 2008).

2.3 Chemický výbuch

Chemický výbuch nastává chemickou reakcí. V chemické reakci se uvolňuje teplo za předpokladu splnění několika podmínek, které umožní přeměnu tepla na mechanickou energii (Kořínek, 1988).

Podmínky určující možnost chemického výbuchu

a) Velká rychlost chemické přeměny

Výbušnina musí dokázat vytvořit plyny pod vysokým tlakem ve velmi krátkém čase. Důležitým znakem výbuchu je výkon, který značí energii uvolněnou za jednotku času. (Pravda, 2010)

$$P = E/t \quad (2)$$

P =výkon [W]

E =uvolněná energie [J]

t =čas [s]

b) Exotermičnost chemické reakce

Při chemickém výbuchu (výbuchové přeměně), se musí uvolňovat energie, výbušná reakce musí být exotermická. Jestliže pro chemickou přeměnu látky je zapotřebí dodávat energii zvenčí (endotermická reakce), pak taková přeměna látky nemůže být výbuchem. Výbušninami mohou být jen takové látky, při jejichž chemické přeměně se uvolňuje teplo (Kořínek, 1988, Alhussan, 2011).

c) Samovolným šířením reakce

Ke vzniku výbuchu v nějaké látce je třeba, aby v její menší či větší části došlo působením počátečního impulsu k výbuchové přeměně. K tomu, aby látka byla výbušninou, je zapotřebí, aby se započatá výbušná přeměna šířila samovolně. Samovolné šíření výbuchu závisí na řadě fyzikálních a chemických faktorech, jako je rychlost chemické přeměny, exotermičnost chemické reakce, hustota výbušniny a dále na velikosti a rozměrech nálože výbušiny (Pravda, 2010, Alhussan, 2011).

d) Možností přeměny tepelné energie v mechanickou

Přeměna tepelné energie v mechanickou je velmi důležitá k vzniku plyných zplodin při výbuchu. Plyny se nemohou ihned rozepnout do okolního prostoru, a tak vzniká v místě výbuchu veliký tlak, který vytvoří mechanickou práci (Kedrinskiy, 2006).

2.4 Druhy výbušné přeměny

Rychlost výbuchu může být až řádově rozdílná. Závisí na druhu výbušniny, fyzikálních podmínkách a druhu roznětu. Lineární rychlost je rychlostním měřítkem výbušné přeměny. Lineární rychlost se vypočítá jako poměr tloušťky vybuchlé výbušniny k času, za který došlo k výbušné přeměně. Díky mechanismu přenosu tepla od vrstvy k vrstvě výbušniny a lineární rychlosti výbuchu dokážeme rozdělit výbušnou přeměnu na dva typy (Exner et al., 1985).

2.4.1 Explosivní hoření

Explosivní hoření neboli deflagrace probíhá rychleji než hoření. Šíří se nízkou lineární rychlostí, při atmosférickém tlaku se rychlost pohybuje v rozmezí od řádově 10 cm/s do řádově 1000 m/s. (Kalousek, 1999). Rychlost explosivního hoření závisí na složení prachů nebo plynů. Jestliže deflagrace probíhá ve volném prostranství, není doprovázena ani charakteristickým zvukovým efektem. Je to dáno tím, že plynné produkty mají čas na únik a proces probíhá za stálého tlaku. Pokud deflagrace probíhá v uzavřeném prostoru, kde jsou ztížené podmínky pro odvod zplodin a nárůst tlaku je daleko vyšší, se plynné produkty hromadí a tím vzrůstá teplota a tlak. Při výbuchu v horninovém masivu je hornina pouze posunutá a kusovost je velká. (Kalousek, 1999, Bartlová, 2002).

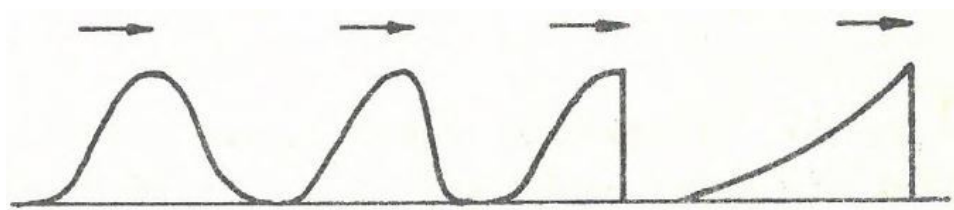
2.4.2 Detonace

Detonace je výbušná přeměna charakterizovaná tím, že probíhá větší rychlostí, než je rychlost zvuku ve zplodinách reakce za místních podmínek v detonační vlně. Mechanismus šíření chemické přeměny výbušniny při detonaci spočívá v přenosu energie mezi vrstvami rázovou vlnou. Toto převádění energie probíhá velmi rychle, v rozmezí 1000-9000 m/s. Záleží na podmínkách a druhu výbušniny. Detonaci můžeme charakterizovat prudkým skokem tlaku v místě reakční přeměny a velkým účinkem na okolní prostředí. Detonace se používá do většiny průmyslových trhavin (Horký, 1987).

Šíření detonace odpovídá postupu rázové vlny (detonační vlny) tj. vlny, ve které se hustota, tlak, teplota a rychlost prostředí prudce mění.

Kompresní vlny nízké intenzity, které jsou známy např. jako zvukové vlny ve vzduchu nebo v jiném prostředí, způsobují nepatrné změny tlaku a hustoty prostředí, kterým procházejí. Sinusová vlna zůstává během šíření stále sinusová, rychlost šíření vlny je konstantní (Kedrinskiy, 2006).

Jsou-li v prostředí vyvolány výchylky částic velké amplitudy a velké změny tlaku a hustoty ve srovnání s akustickými, pak vzniká vlna, která se svými vlastnostmi podstatně liší od vlny akustické. Kontinuální šíření vlny se může proměnit v šíření diskontinuální. Taková vlna se nazývá rázová a může vzniknout v libovolném prostředí např. ve vzduchu při pohybu letadel, při velkém elektrickém výboji apod. (Horký, 1987). Představíme-li si sinusovou polovinu velké intenzity, pak rychlost šíření vrcholu vlny bude větší tam, kde je prostředí o vysoké hustotě než rychlost čela vlny v prostředí, které je ještě téměř v původním (počátečním) stavu. Z toho vyplývá, že vrchol vlny bude dostihovat čelo a tvar vlny se bude měnit, jak je zřejmé z obr.1, až nakonec čelo vlny přechází v náhlý, prakticky diskontinuální skok do vysokého tlaku (Horký, 1987). V průběhu šíření ztrácí rázová vlna svou energii v důsledku nevratných ztrát kinetické energie. Tyto ztráty způsobí postupný přechod rázové vlny v obyčejnou vlnu akustickou. (Kořínek, 1988).



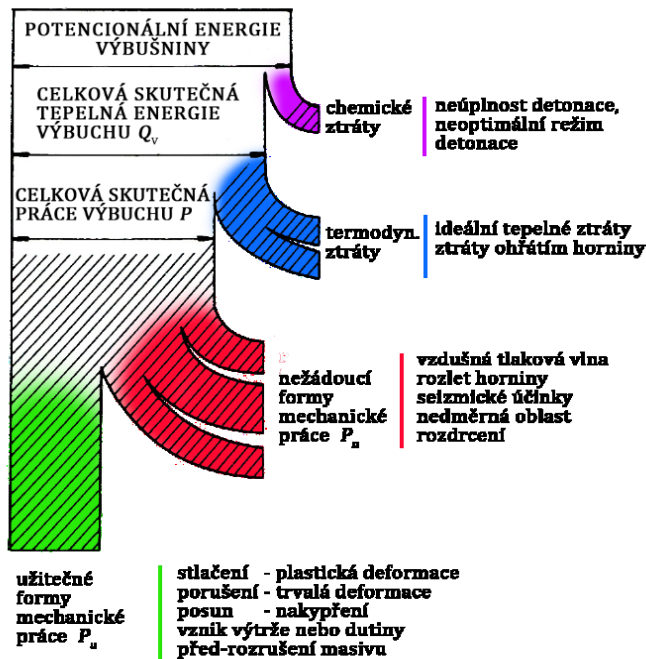
Obrázek 1: Mění se tvar vlny převzato z (Horký, 1987)

2.5 Výbuch výbušniny

Energie skrytá ve výbušnině je dána jejím složením. Nosičem energie jsou molekuly výbušniny a samotná energie je obsažena ve vazbách mezi atomy. Do vazeb byla energie vložena během syntézy (slučování) látky a vzhledem k tomu, že systém výbušniny je labilnější než produkty výbušné přeměny, svým rozpadem ji umí uvolnit (Vávra, 2002).

Výbuchové teplo, lze dle chemického složení trhaviny, vypočítat. Tato energie představuje výchozí stav veškeré dostupné potenciální energie, která může být využita ve formě práce výbušniny (Dojčár, 1996). Energie se ale nevyužije bezzbytku jen na potřebné rozpojení

horniny. Jednotlivé ztráty a nežádoucí účinky přehledně shrnuje diagram podle Beljajeva.



Obrázek 2: Proudový diagram práce výbuchu podle Beljajeva, Q_v – výbuchové teplo trhaviny, převzato z (Dojčár, 1996)

Po iniciaci výbušnin dojde k výbušné přeměně (detonaci). Hmoty výbušnin se přemění na výbuchové plyny o vysokém tlaku a teplotě. Tento proces uvolní velké množství tepelné energie Q_v . Práce výbuchu se realizuje díky rozpínajících plynů, jež konají mechanickou práci. Působí na okolí dvojím typem, přičemž jsou na sobě obě formy závislé a časově na sebe navazují:

- dynamický ráz,
- kvazistatický tlak plynů.

Ke ztrátám potenciální energie dochází i při ideálních podmínkách výbuchu. Tato část představuje asi 10 % celkové potenciální energie výbušnin a zbývající část se realizuje pomocí nežádoucích a užitečných forem práce (Dojčár, 1996).

Užitečné formy práce se můžou dále rozdělit podle příslušného místa působení na pracovní schopnost a brizanci. Jejich hodnoty jsou dány podmínkami rozpojování a druhem trhaviny. Brizance (tříštivost) je vyvolána prudkým nárazem detonační vlny a je zodpovědná za intenzivní drcení horniny v oblasti okolí výbušnin. Závisí na detonační rychlosti a hustotě trhaviny. Objemový účinek (nebo také pracovní schopnost) charakterizuje účinek výbuchu v celém objemu, vztahuje se na posun horniny v tělese rozpojení i na deformaci. Je závislá na

měrném objemu výbuchových plynů a výbuchovém teple Q_v . Pracovní schopnost je charakteristická vytvořením sklípku či výtrže v horninovém masivu (Dojčár, 1996).

Přesnější poměry rozdělení částí potenciální energie lze určit velmi obtížně. Odhaduje se, že na určité formy práce se spotřebuje od několika procent do několika desítek procent (podle zvolené technologie TP) celkové potenciální energie a že zbytek připadá na nežádoucí formy mechanické práce. Celková práce P je dána součtem nežádoucích forem prací P_n a užitečných prací P_u , přičemž hodnota celkové práce je konstantní.

$$P = P_n + P_u = konst. \quad (3)$$

3 ASPEKTY MASIVU OVLIVŇUJÍCÍ MECHANIKU EXPLOZE

3.1 Pevnost horniny a masivu

Pevnost je jednou ze základních mechanických vlastností hornin. Velikost pevnosti horniny odpovídá maximálnímu napětí při porušení horniny. Velikost pevnosti se podle jejich stavu pro různé typy hornin liší. Pevnost horniny ovlivňují fyzikální vlastnosti horniny jako objemová hmotnost horniny, měrná hmotnost, vlhkost horniny, pórovitost horniny atd. a mechanické vlastnosti jako pevnost v tlaku, smyku a tahu (Hudson & Harrison, 1997).

3.1.1 Fyzikální vlastnosti ovlivňující pevnost

a) *Objemová hmotnost*

Objemová hmotnost je definována jako poměr množství skutečné horninové hmotnosti m_0 ke skutečnému objemu horniny V_0 (je to hmotnost objemové jednotky materiálu včetně pórů, puklin i trhlin).

b) *Měrná hmotnost*

Měrná hmotnost je hmotnost objemové jednotky vysušené horniny bez pórů a dutin. Zahrnuje tedy pouze pevnou fázi horniny, a proto je hodnota měrné hmotnosti vyšší než objemové hmotnosti.

c) *Pórovitost*

Pórovitost je poměr objemu pórů a dutin k celkovému objemu horniny.

d) *Vlhkost*

Vlhkost je jedno z nejvýznamnějších kritérií, která ovlivňuje pevnost horniny. Za standartních podmínek není žádná hornina stoprocentně suchá, a když se změní její vlhkost, tak se většinou mění i její mechanické a fyzické vlastnosti. U některých hornin se může zdát, že je voda nijak neovlivňuje a u jiných naopak můžeme pozorovat její přímé dopady. Extrémním případem jsou například jílové břidlice, u kterých při saturaci může dojít až k rozpadu. (Kubica, 2013)

3.1.2 Základní zkoušky pevnosti – pevnost v prostém tlaku, příčném tahu, pevnost za rotačně trojosé napjatosti

a) Triaxiální zkouška

Triaxiální zkouška (rotačně trojosá zkouška) se provádí na přístroji s triaxiální komorou, která umožňuje působení napětí na horninu ve směru tří os. Důvod, proč se provádí tato zkouška, je snaha o navození napěťový stavu masívu při odebrání daného vzorku. V průběhu pravé triaxiální zkoušky působí v každém směru os x , y a z jiné napětí. Rotačně trojosá zkouška využívá komorový tlak, vyvolaný kapalinou v prostoru okolo vzorku, tím se zajistí působení napětí ve všech třech směrech., ale boční napětí (σ_2 , σ_3) se sobě rovnají. Vzorky jsou uloženy v nepropustném obalu, aby došlo k zamezení ovlivnění vlastností horniny komorovou kapalinou (Goodman, 1989, Kubica, 2013).

b) Pevnost v prostém tlaku

Pevnost v prostém tlaku popisuje největší sílu, kterou je schopno těleso odolat při jeho namáhání v jednoosém tlaku. Zkouška se provádí na horninových vzorcích nejčastěji válcového typu, někdy se však pevnost zkouší i na vzorcích tvaru krychle nebo kvádrů. Poměr L/D by se měl pohybovat v rozmezí 2-2,5. Výsledek zkoušky je hodnota velikosti pevnosti v tlaku σ_c a pohybuje se ve vyšších desítkách až prvních stovkách MPa. Kvůli objektivnosti by měla být hodnota průměrem nejméně 5 zkoušek (Goodman, 1989).

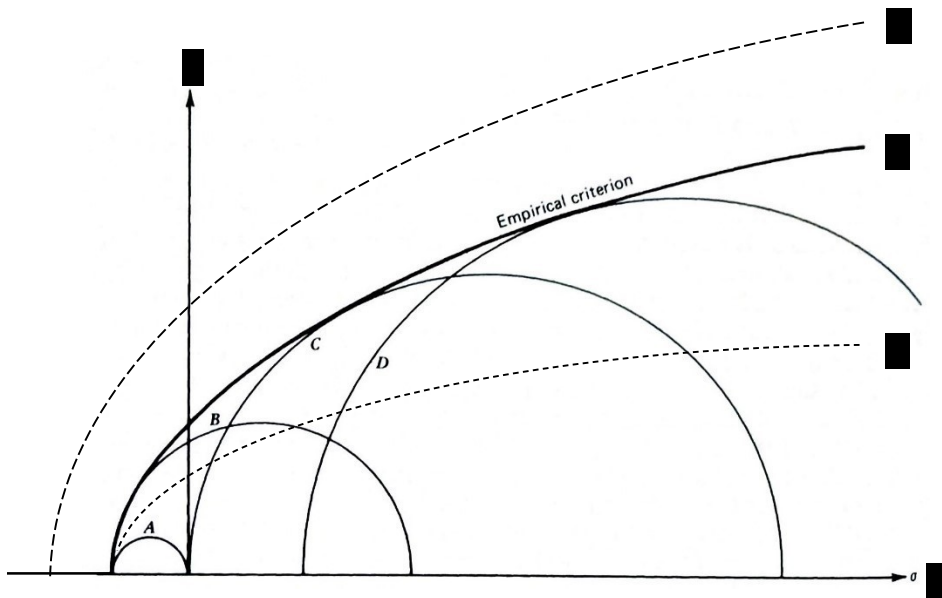
c) Zkouška pevnosti v příčném tahu

Během zkoušky pevnosti v příčném tahu (brazílské zkoušce) působíme tlakem na horninový vzorek válcového tvaru napříč poloměrem kružnice a v důsledku deformace dochází k porušení příčným tahem, jenž se utváří ve směru kolmém na působení napětí. Osa působení tlakového napětí je shodná s rovinou porušení vzorku. Výhoda této zkoušky od zkoušky v prostém tahu je v tom že je její provedení výrazně jednodušší (Goodman, 1989).

d) Zobrazení pevnostních zkoušek

Nejlépeším způsobem, jak zobrazit pevnost hornin a výsledky zkoušek lze za použití Mohrových kružnic. Mohrovy kružnice jsou definovány hlavními normálovými napětími v různých směrech, v podstatě zobrazují rotaci tenzoru napjatosti. Křivka, která se dotýká kružnic, se nazývá obálka pevnosti, tj. tečná Mohrova kružnice značí porušení. Stejně jako se všechny horniny liší svojí pevností, tak má každá jinou obálku pevnosti. Tvar obálky pevnosti

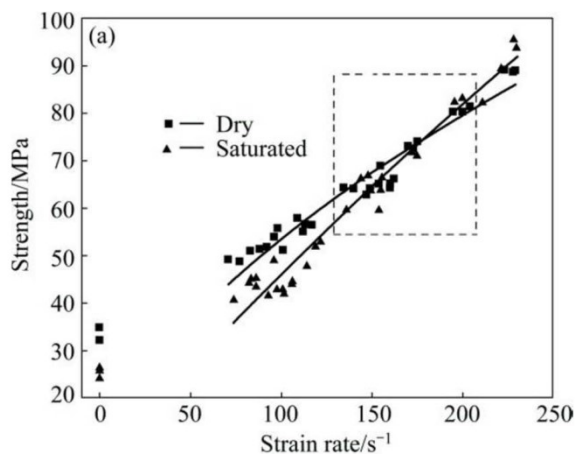
můžeme zjistit empiricky nebo díky některému z kritérií porušení (Goodman, 1989, Hoek & Brown, 1980b). Tvar obálky se liší pro rostlou horninu a horninový masív.



Obrázek 3: Mohrovy kružnice pro jednotlivé typy zkoušek. A-zkouška v prostém tahu, B- Brazilská zkouška, C- zkouška v prostém tlaku, D- rotačně trojosá zkouška. (Goodman, 1989)

Vliv nasycenosti masivu na pevnost

Při zkoumání vlivu exploze na masiv je zapotřebí zohlednit velikost nasycení, která může pevnost řádově ovlivnit. Příklad podává Zhou et. al. (2016) kteří zkoumali pevnost nenasyčeného a nasyceného dynamicky namáhaného pískovce.



Obrázek 4: Porovnání nasyceného a nenasyčeného dynamicky namáhaného převzato z (Zhou, et. al, 2016)

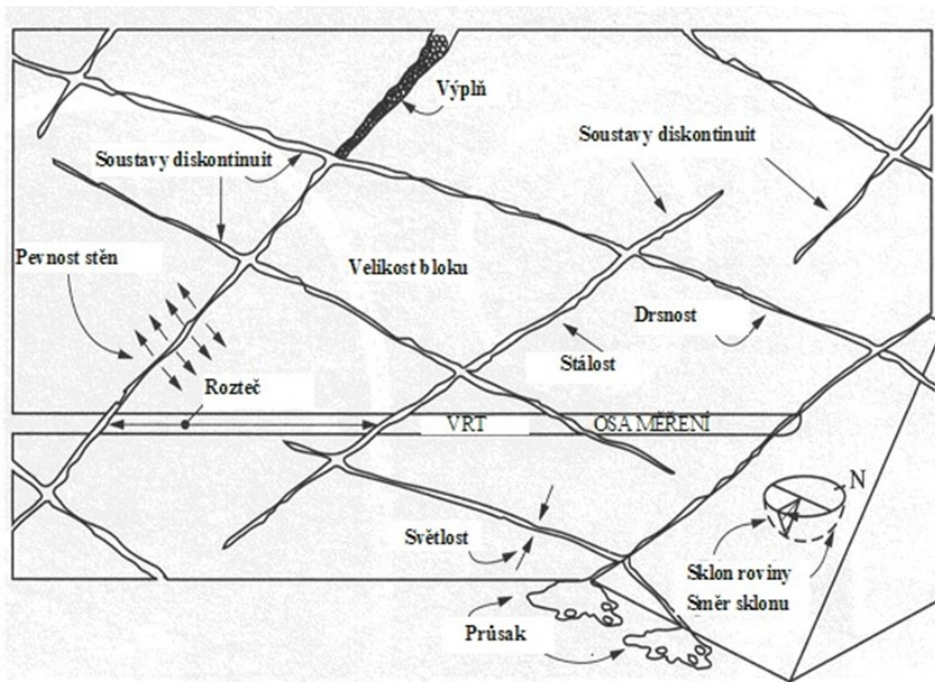
3.2 Diskontinuity

Kromě fyzikálně-mechanických vlastností má na výbuch v hornině největší vliv rozpukanost. Plochy diskontinuit snižují parametry šíření napěťové vlny po výbuchu. Plochy nespojitosti, mohou vlny odrážet, lomit anebo pohlcovat úplně (Kaláb, 2009). Horninový masiv je jedinečný přítomností diskontinuit, jenž jej dělí na oblasti neporušené (intaktní) horniny. Diskontinuita (plocha nespojitosti) je charakterizována jako jakékoli rozdělení masivu (kontinua horninového masivu) bez ohledu na její vznik. Mezi plochy nespojitosti můžeme tedy zařadit praskliny, pukliny, zlomy apod. Po miliony let byl horninový masiv vystaven vnějším vlivům – chemickým, termálním a mechanickým. Tyto vlivy vytvořily v různých geologických dobách různé napjatostní stavy diskontinuit. (Barták, et al., 2009, Priest, 1976).

Plochy nespojitosti jsou buď tektonického nebo netektonického původu. Mezi tektonické plochy nespojitosti patří různé systémy puklin a zlomové plochy vzniklé při horotvorných procesech, mezi netektonické plochy nespojitosti patří:

- 1) Systémy puklin zhruba rovnoběžných s povrchem terénu, vznikají uvolněním napětí pod odlehčení tíhy nadloží,
- 2) Plochy nespojitostí, jenž vznikají ochlazováním, popř. smršťováním magmatu,
- 3) Systémy puklin provázející procesy diagenetického zpevnění sedimentů
- 4) Smykové plochy a systémy puklin provázející gravitační pohyby na svazích i vertikální poklesy v důsledku nerovnoměrné koncentrace podložních hornin (Barták, et al., 2009, Priest, 1976),
- 5) Zlomy, které jsou výsledkem například kerných posunů nebo tektoniky,

Velmi často můžeme v horninách najít více ploch systémů nespojitosti, např. jeden hlavní systém, jenž dělí horninový masiv na velké bloky a podružný systém či systémy. U sedimentů jsou nejčastějšími hlavními plochami nespojitosti tektonické poruchy a vrstevní plochy. U jílových sedimentů bývá hlavní systém puklin rovnoběžný se směrem vrstevních ploch, podružné systémy jsou tvořeny hustými a krátkými puklinami kolmými k vrstevnatým plochám (Priest, 1976, Einstein, 1983). Základní vlastnosti diskontinuit jsou zobrazeny na obr. 3.



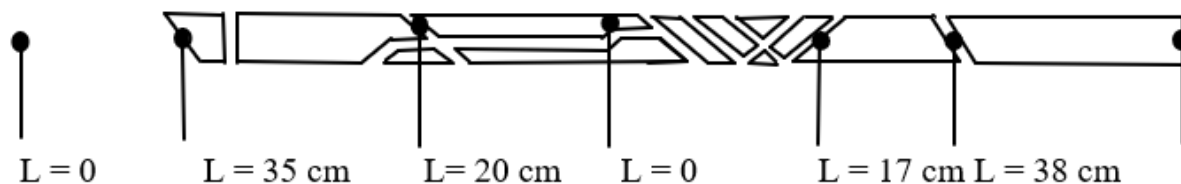
Obrázek 5: Schématické zobrazení základních vlastností diskontinuit převzato z (Barták, et al., 2009)

Index kvality horniny RQD

Pro přibližné určení hustoty diskontinuit je určena klasifikace horninového masivu RQD. Metoda RQD (Rock Quality Designation) je jedna ze základních klasifikačních metod navržená Deereem v roce 1967. Metoda je založena na určení kvality skalního masivu podle kvality vrtného jádra. RQD je definováno jako procentuální poměr neporušených kusů vrtných jader delších než 100 mm k celkové délce vrtného jádra. Průměr vrtného jádra by měl být alespoň 54,7 mm. K odběru vrtných jader je nejlepší použít dvojité jádrovnice. Při prozkoumání vrtných jader je nutné, aby byly rozlišeny trhliny vzniklé vrtací technologií (Deere, 1988).

Výpočet indexu *RQD*:

$$RQD = \frac{\sum \text{délka kusů jádra } > 100 \text{ mm}}{\text{celková délka jádra}} \times 100\% \quad (4)$$



Obrázek 6: Znáznornění výpočtu RQD z jednotlivých kusu vrtných jader převzato z (Pruška, 2009)

Na základě vypočítaného indexu RQD je hornina klasifikována podle tabulky níže:

Tabulka 1: Index RQD podle tabulky převzato z (Pruška, 2009)

Hodnoty indexu RQD	Klasifikace kvality horninového masivu
<u>0 - 25</u>	velmi nízká
<u>25 - 50</u>	nízká
<u>50 - 75</u>	střední
<u>75 - 90</u>	dobrá
<u>90 - 100</u>	výborná

V roce 1982 odvodil Palmström metodu tak, aby mohla být vypočtena, když nemáme k dispozici vrtné jádro. RQD určíme z celkového počtu viditelných trhlin na povrchu horského masivu. Platí vztah (Palmström, 1982):

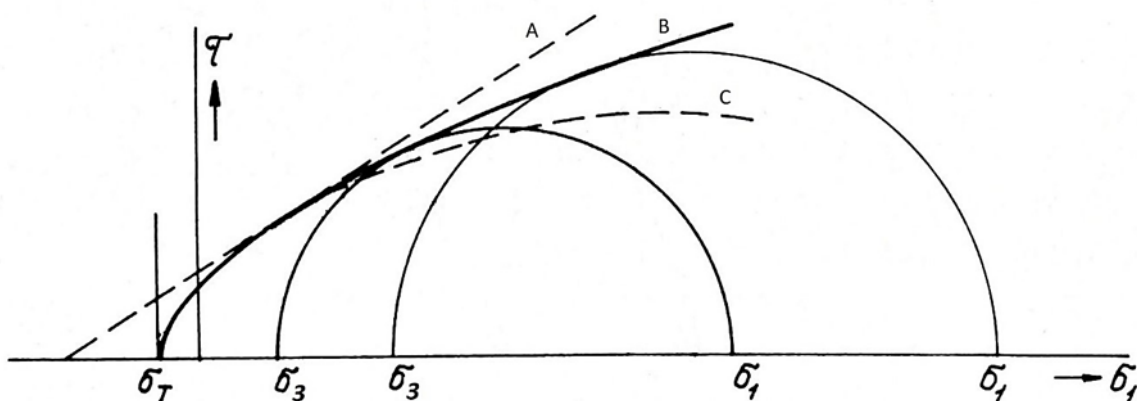
$$RQD = 115 - 3,3Jv \quad (5)$$

Jv je počet trhlin v horninovém masivu na jednotku objemu.

4 ZÁKLADNÍ POSTUPY K STANOVENÍ VLIVU EXPLOZE NA HORNINOVÝ MASIV

4.1 Hoek-Brownovo kritérium porušení

Pevnostním kritériem, které zohledňuje mechanické účinky exploze součinitelem D , je kritérium Hoek-Brown, jenž bylo navrženo v roce 1980. Postupně se toto kritérium dále upravovalo za účelem určení pevnosti potřebných pro aplikaci na Mohr-Coulombovu podmínku. V roce 2002 Hoek odvodil modifikovanou Hoek-Brownovu podmínku porušení horniny s pomocí provedených analýz svahů a podzemních děl. Předchozí tvar z roku 1980 upravuje podmínka tak, aby mohl být použitelný pro velmi porušené horniny. Hoek-Brown předpokládá, že porucha horninového masívu je řízena posunem či otočením jednotlivých kusů horniny, které jsou odděleny mnoha puklinami. Tento předpoklad je splněn u neporušeného masívu tím, že se nachází v takovém stavu porušení, že nemůžeme zjistit řídicí soustavu ploch nespojitosti, a můžeme na něj pohlížet, jako na izotropní materiál. Objemová přetvořená v pružné oblasti se řídí deformačními charakteristikami E a ν . Při narušení bude hornina zvětšovat objem a přetvoření se vypočítá podle pravidel teorie plasticity. Podmínka porušení je nelineární a je postavena na vztahu mezi menším a větším hlavním napětím (Hoek, et al., 2002).



Obrázek 7: Porovnání obálek pevnosti podle Mohr-Coulombova (A), Griffithova (C) a hoek Brownova (B) kritéria porušení převzato z (Škopek, 1986)

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^2 \quad (6)$$

σ_1 : maximální hlavní efektivní napětí

σ_3 : minimální hlavní efektivní napětí

σ_{ci} : pevnost horniny v jednoosém tlaku

m_b : redukovaná hodnota materiálové konstanty dle vztahu:

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI-100}{28-14D}\right) \quad (7)$$

s : je nelineární parametr, který závisí na vlastnostech horniny, nabývá hodnot $1 \cdot 10^{-5}$

$$s = \exp\left(\frac{GSI-100}{9-3D}\right) \quad (8)$$

m_i : pevnostní parametr u neporušené horniny pro vrcholové podmínky

a : nelineární parametr závisející na stupni rozpukání horniny

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-\frac{GSI}{15}} - e^{-\frac{20}{3}} \right) \quad (9)$$

D veličina: je faktor porušení, který závisí na stupni porušení. Porušení může být způsobeno uvolněním napětí nebo odstřelem v hornině. Hodnota D se může pohybovat v rozmezí 0 pro neporušené až 1 pro velmi narušené horniny (Zheng, 2018).

GSI: se používá pro odhad pevnosti horninového masivu a modulu deformace horninového masivu. Systém GSI se zaměřuje na popis dvou faktorů, struktury hornin a povrchu diskontinuit.

Parametry m_b, s , a jsou odvozeny ze složení horniny a vlastnostech ploch nespojitosti v horninovém masivu. Parametr m_i horniny, která je neporušená se určí na základě laboratorních výsledků (Hoek, et al., 2002).

Modul deformace:

Vztah pro zjištění hodnoty modulu přetvárnosti horniny. Tento vztah platí pro horniny, které mají pevnost v prostém tlaku σ_c menší či rovnou 100 MPa

$$E_m(GPA) = \left(1 - \frac{D}{2}\right) \sqrt{\frac{\sigma_c}{100}} 10^{\frac{(GSI-10)}{40}} \quad (10)$$




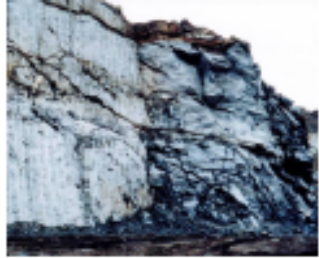

σ_c :pevnost neporušené horniny v prostém tlaku

Pro horniny, které mají pevnost v prostém tlaku σ_c větší než 100 MPa

$$E_m(GPA) = \left(1 - \frac{D}{2}\right) \sqrt{\frac{\sigma_c}{100}} 10^{\frac{(GSI-10)}{40}} \quad (11)$$

INDEX GSI PRO HORNINY S BLOKOVÝM ROZPADEM		STAVBA				
		STAV POVRCHU DIKONTINUIT				
		VELMI DOBRÝ Velmi drsný, nezvětralý povrch	DOBŘÍ Drsný, lehce zvětralý povrch	STŘEDNÍ Hladký, středně zvětralý alterovaný povrch	ŠPATNÝ Velmi hladký a zvětralý povrch s kompaktními povlaky, výplní nebo ostrohranými úlomky	VELMI ŠPATNÝ Velmi hladký a zvětralý povrch s jílovými povlaky nebo výplní
		POKLES KVALITY POVRCHU DIKONTINUIT →				
	NEPORUŠENÁ NEBO MASIVNÍ - neporušené horninové vzorky, masivní in situ hornina s několika vzdálenými diskontinuitami	90			N/A	N/A
	BLOKOVITÁ - velmi dobře vzájemně zaklíněný neporušený masiv skládající se z krychlových bloků tvořených třemi soubory	80	70			
	VELMI BLOKOVITÁ - vzájemně zaklíněný částečně porušený masiv s ostrohranými bloky tvořenými 4 nebo více soubory diskontinuit		60	50		
	BLOKOVITÁ/PORUŠENÁ - zvrásněný masiv s ostrohranými bloky tvořený velkým množstvím vzájemně protínajících se souborů diskontinuit. Průběžná vrtevnatost nebo břidličnatost			40	30	
	ROZPADAJÍCÍ SE - špatně zaklíněné silně rozlámané bloky horninového masivu s oblými nebo ostrohranými úlomky				20	
	LAMINOVANÁ/SMYKEM PORUŠENÁ - nedostatečná blokovitost z důvodu malé vzdálenosti břidličnatosti nebo smykových ploch	N/A	N/A			10
		↑ POKLES VZÁJEMNÉHO ZAKLÍNĚNÍ HORNINOVÝCH BLOKŮ				

Obrázek 8: Index GSI pro horninové masivy s blokovým rozpadem upraveno z (Hong, 2017)

Appearance of rock mass	Description of rock mass	Suggested value of D
	Excellent quality controlled blasting or excavation by Tunnel Boring Machine results in minimal disturbance to the confined rock mass surrounding a tunnel.	$D = 0$
	Mechanical or hand excavation in poor quality rock masses (no blasting) results in minimal disturbance to the surrounding rock mass. Where squeezing problems result in significant floor heave, disturbance can be severe unless a temporary invert, as shown in the photograph, is placed.	$D = 0$ $D = 0.5$ No invert
	Very poor quality blasting in a hard rock tunnel results in severe local damage, extending 2 or 3 m, in the surrounding rock mass.	$D = 0.8$
	Small scale blasting in civil engineering slopes results in modest rock mass damage, particularly if controlled blasting is used as shown on the left hand side of the photograph. However, stress relief results in some disturbance.	$D = 0.7$ Good blasting $D = 1.0$ Poor blasting
	Very large open pit mine slopes suffer significant disturbance due to heavy production blasting and also due to stress relief from overburden removal. In some softer rocks excavation can be carried out by ripping and dozing and the degree of damage to the slopes is less.	$D = 1.0$ Production blasting $D = 0.7$ Mechanical excavation

Obrázek 7: Hodnota D pro různé typy hornin převzato z (Hoek, 2002)

4.2 Holmberg-Persson

Jeden ze základních způsobů vyhodnocení poškození hornin navrhli v roce 1978 Holmberg a Persson. Metoda je založena na poškození hornin související s maximální rychlostí částic. Maximální rychlost částic se měří na několika místech zároveň, jenž jsou určeny podle známého výbušného zdroje. Cílem je stanovení charakteristiky útlumu horninové hmoty ve specifickém směru pro daný typ výbušniny. (Onederra, I., et al. 2004)

$$PPV = \frac{KQ^\alpha}{R^\beta} \quad (12)$$

PPV : vrcholová rychlost částic

K, α, β : konstanty určitelné pro danou lokalitu na základě seismometrických záznamů

Q : charakteristika nálože

R : vzdálenost

Rovnice platí pro válcovou nálož. Silva et al. (2019) uvádějí diskretizaci rovnice dle Hustrulida a Lu (tj. sumaci destrukčních vlivů jednotlivých částí sloupové nálože)

$$PPV = Kq^\alpha \sum_{\Delta L=T}^H \left(\frac{\Delta L}{(r_0^2 + (z-z_0)^2)^{\frac{\beta}{2\alpha}}} \right) \quad (13)$$

q : hustota zatížení výbušniny na jednotku délky

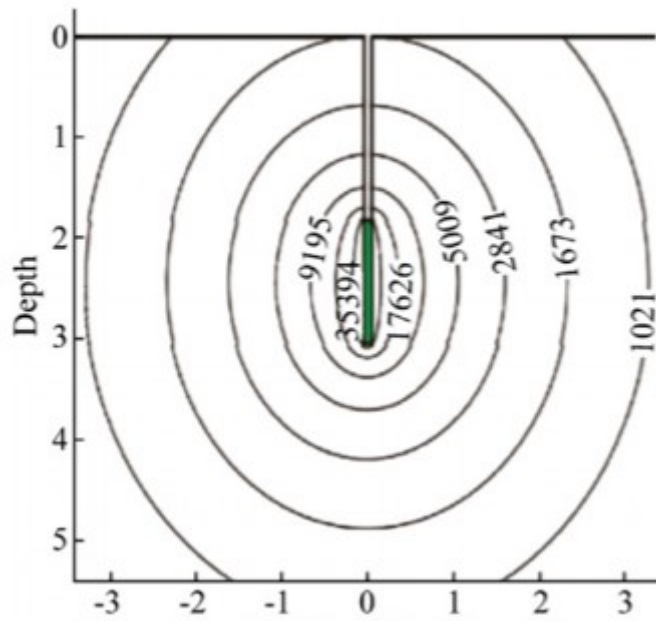
H : hloubka ke dnu výbušného sloupce

T : hloubka do horní části výbušného sloupce

ΔL : délka přírůstkového náboje

r_0 a z_0 : souřadnice uvažovaného bodu v prostoru (Silva et. al, 2019)

Užitím pro určitou lokalitu lze získat kontury kolem modelové nálože:



Obrázek 8: vzdálenost od osy výbuchu a předpokládané kontury vybrací (mm/s) použitím H-P modelu (vzdálenosti v metrech) převzato z (Silva, et al, 2019)

4.3 Esenův model porušení

Esen et. al. (2003) navrhli model, který předpovídá rozsah drcení kolem výbuchového vrtu. Esenův modul porušení je založen na výsledcích studia mechanismu exploze na 92 vzorcích z kombinace betonu + syntetických materiálů. Betonové tvárnice kolísaly od nízké, střední až vysoké pevnosti s velikostí 1,5 m na délku, 1 m na šířku a 1,1 m na výšku. Definují tzv. Crushing zone index (Esen et. al, 2003)

$$CZI = \frac{P_b^3}{K\sigma_c^2} \quad (14)$$

P_b : tlak ve vrtu

K : Tuhost hmoty

σ_c : Pevnost v prostém tlaku

$$P_b = \frac{P_{CJ}}{2} = \frac{\rho_0 D_{CJ}^2}{4} \frac{1}{2} \quad (15)$$

$$K = \frac{E_d}{1+V_d} \quad (16)$$

ρ_0 : hustota nevybuchlé nálože

D_{cj} : rychlost ideální detonace

E_d : dynamický youngův modul

V_d : Dynamický poissonův součinitel

Je odvozen vztah mezi poloměrem popraskané zóny r_c a indexem CZI

$$\frac{r_0}{r_c} = 1,23 \times CZI^{-0,219} \quad (17)$$

r_0 : poloměr výbuchové díry

r_c : poloměr drcené zóny

Poloměr popraskané zóny dokážeme získat ze vztahu

$$r_c = 0,812 \times CZI^{-0,219} \quad (18)$$

Obecný vztah lze napsat ve tvaru exponenciální rovnice

$$r_c = aCZI^b$$

5 SEISMICKÉ ÚČINKY VÝBUCHU

Za zónou porušení, tj. mimo bezprostřední blízkost zdroje exploze se dynamika výbuchu projevuje seismickým vlněním. Seismicitu charakterizujeme jako zatížení, které je vyvoláno pohybem půdy a má vlnový charakter. Můžeme rozeznat dva typy zdroje kmitání, seismicitu přírodní a technickou (Máca, 2017).

5.1 Základní rozdělení

5.1.1 Seismicita přírodní

Seismicita přírodní je také nazývána zemětřesením. V nejčastějších případech vzniká při náhlém uvolnění energie v zemské kůře, nebo ve vrchní vrstvě zemského pláště. Uvolnění energie je zapříčiněno pohybem tektonických desek. Dalším iniciátorem může být kinetická energie způsobená řícením stropů v podzemí, nebo energie výbuchu ze sopečné činnosti. Zemětřesení se projevuje jako otřesy šířící se do okolí. Při zemětřesení se deformuje zemská kůra a tvoří se zlomy a trhliny. Frekvence mají rozsah $f=0,5 \text{ Hz}$ až 10 Hz (Kaláb, et al., 2006).

5.1.2 Seismicita technická

Seismicita technická je vyvolána lidskou činností. Může mít několik zdrojů jako například doprava, trhací práce, průmyslová činnost. Strojem vyvolané seismické otřesy nazýváme průmyslová seismicita. Seismicita indukovaná vzniká při důlní činnosti, díky změně zatížení povrchu. Technická seismicita nemá takový rozsah jako přírodní, kvůli menšímu množství uvolnění energie. Frekvence mají rozsah v rozmezí $f=2 \text{ Hz}$ až 100 Hz (Máca, 2017).

Tabulka 2: Některé typy zdrojů technické seismicity s příslušnými rozsahy akcelerací převzato z (Pruška, 2018)

Zdroj vibrací	Rozsah amplitudy zrychlení kmitání [m·s ⁻²]	Dynamický součinitel γ_a [-]
Pozemní doprava	0,02 – 1	1,00 – 1,10
Trhací práce	0,02 – 50	1,00 – 2,00*
Beranění pilot	0,02 – 2	1,00 – 1,20
Stroje venku	0,02 – 1	1,00 – 1,10
Stroje uvnitř	0,02 – 1	1,00 – 1,10
Lidské aktivity		
a) náraz	0,02 – 5	1,00 – 1,51
b) přímé	0,02 – 0,2	1,00 – 1,02

5.1.3 Projevy seismicity na území ČR

Na našem území je přírodní seismicita nezdědka objevující jev. Především na západě republiky (hranice s Německem) a východě (hranice se Slovenskem) jsou občas seismicky aktivní. Z nedávné doby je možno uvést zemětřesení na přelomu let 1985 a 1986 v oblasti Nového Kostela, kde zemětřesení dosáhlo lokálního stupně magnitudo 4,8 (Křížek, 2007). K hlavním projevům technické seismicity u nás dochází kvůli indukované seismicitě v oblastech Kladenska, Karvinska a Karviné. V oblasti ostravsko-karvinské pánve je umístěna pozorovací síť seismometrů, na kterých je detekováno až 50 000 jevů, z čehož 100 až 500 jevů (lokální magnitudo 1,0). Nejsilnější otřesy byly vyvolány na dole ČSA v ostravsko-karvinském revíru v roce 1983 a hodnoty tam dosahovaly 3,8 magnitudo (Kaláb, et al., 2006).

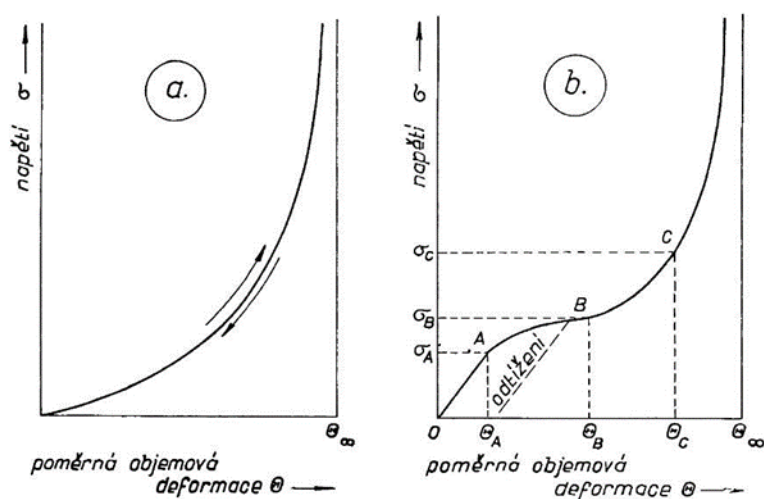
5.2 Vlny napětí

Vlny napětí jsou základem výbuchových procesů, které se uskutečňují ve výbušninách a v jejich okolí. Vlnou napětí je i detonační vlna, která se šíří výbušninou. Napětí se šíří i po detonaci v obklopujícím prostředí.

Vlnu napětí definujeme jako oblast prostředí, která je v přechodném pohybu a stavu napětí. Rozhraní mezi vlnou napětí a ostatním prostředím nazýváme čelo vlny. Deformace provází veškeré napětí a z toho důvodu se vlny napětí nazývají i vlnami deformace. Deformace představuje pohyb částic. Hmotová rychlost pohybu částic ve vlně bývá u intenzivních vln značná (Henrych, 1973).

Z fyzikálního hlediska definujeme vlnění jako kmitání, které se šíří prostorem a časem. Je nositelem energie, avšak není spojeno s látkovou výměnou. Čelo vlny, kde částice kmitají se stejnou fází nazýváme vlnoplochu. Směr šíření vlny je dán kolmým směrem na vlnoplochu a

je označován jako paprsek. Základní parametry vlny jsou délka vlny- λ , frekvence- f , amplituda – a a rychlost šíření- v . Vlny se šíří podpovrchovým prostředím rychlostí, která je závislá především na zrnech zeminy a výplni jejich pórů. S klesající porositou a rostoucí hustotou materiálu narůstá i rychlost šíření vln. Tento princip platí i s narůstající hloubkou: čím větší všesměrný tlak prostředí, tím větší snaha póry minimalizovat (Sheriff et al., 1995). Charakter vln napětí, jejich chování a modifikace v horninovém prostředí, závisí především na vlastnostech prostředí. Základní charakteristika prostředí je závislost napětí σ na poměrné objemové deformaci ϵ . Závislost pro plyny, kapaliny a tuhá tělesa je zobrazena níže (Henrych, 1973).



Obrázek 9: Závislost tlakových napětí na poměrné objemové deformaci pro a) kapaliny a plyny, b) tuhá tělesa převzato a upraveno z (Henrych, 1973)

5.3 Šíření výbuchové vlny v horninách

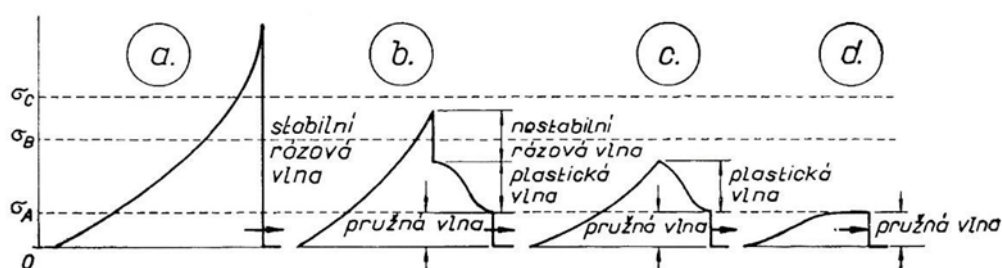
Šíření vlny napětí popíši z obr. č. 9b. V pevné látce, kde $p \leq \sigma_a$, se deformace s napětím mění lineárně. Materiál zůstává neporušený a přenáší se smykové napětí. Rychlost všech látek je stejná a může se jimi šířit rázová vlna. Pokud vnější podmínky (například nespojitost) tvar rázové vlny změní, tak se už nemůže zformovat a pokračuje dále ve změněné podobě. V tomto případě se může šířit jen nestabilní rázová vlna (Henrych, 1973).

Jestli se tlak nachází v rozmezí $\sigma_a \leq p \leq \sigma_b$, začíná rozrušování struktury materiálu. Materiál se začíná zhušťovat, přestává přenášet smykové napětí a začíná mít charakter kapaliny. Při dosažení bodu B jsou vazby zrušeny a materiál se stává kapalinou. Materiál je schopen reagovat jenom tlakovým napětím, a proto se vyšší tlaky pohybují nižší rychlostí. Tím se zpožďují vyšší tlaky za nižšími a jedná se o tzv. plastický obor (Henrych, 1973).

V rozmezí $\sigma_b \leq p \leq \sigma_c$ se materiál chová jako kapalina a nepřenáší smyková napětí. Vyšší tlaky se pohybují rychleji. Jedná se o stabilní rázovou vlnu (Henrych, 1973).

V oboru $p > \sigma_c$, se prostředí chová stejně jako pro předešlý interval. Jedná se o stabilní rázové vlny nadzvukové. Tento interval se nachází v blízkém okolí výbuchu (Henrych, 1973).

Na obr. č. 10 je popsán průběh deformace s narůstající vzdáleností od zdroje výbuchu. V blízkém okolí se šíří vlny rázové nadzvukové. Maximální tlak klesá se vzdáleností od výbuchu a nižší tlaky předbíhají vyšší - rázová vlna se začíná šířit jako vlna podzvuková. V části C stále klesá maximální tlak a nejvyšší tlaky se nejvíce opožďují. Maximální tlak stále klesá a všechny a hmota se nachází v pružném oboru. Všechny tlaky se šíří stejnou rychlostí (Henrych, 1973).



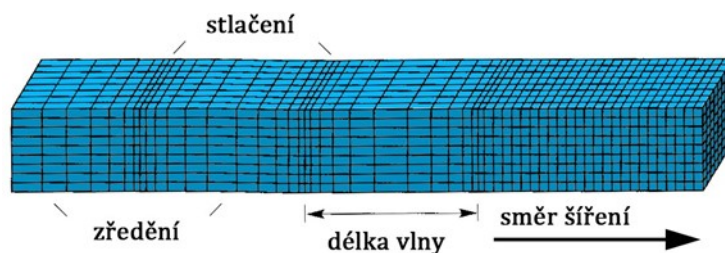
Obrázek 10: Změna profilu výbuchové vlny v pevném tělese s narůstající vzdáleností převzato a upraveno z (Henrych, 1973)

5.4 Dělení seismických vln

5.4.1 Objemové vlny

a) Podélné vlny (P-vlny)

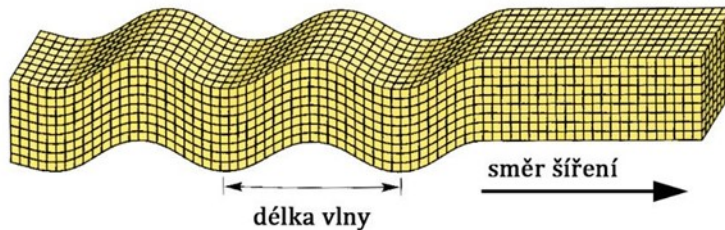
Od místa detonace se všemi směry šíří vlny objemové: podélné P (tlak, tah) a příčné (smyk). U těchto vln částice prostředí kmitají shodně se směrem šíření vlny. Vlny P jsou elastické vlny, které mají nejvyšší rychlost šíření prostorem. Účinky na nadzemní budovy nebývají velké (Máca, 2017).



Obrázek 11: Šíření deformace prostředím podélnými vlnami upraveno z (Bolt, 1993)

b) Příčné vlny

U příčných vln kmitají částice kolmo na směr šíření. Šíří se pouze v pevném prostředí. Šíří se nižší rychlostí než vlny podélné. Účinky na nadzemní budovy jsou větší, než je to u vln podélných (Máca, 2017).

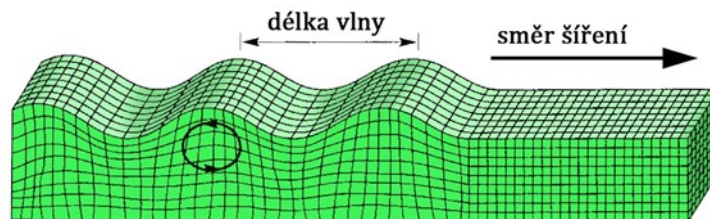


Obrázek 12: Šíření deformace prostředím příčnými vlnami upraveno z (Bolt, 1993)

5.4.2 Vlny povrchové

a) Rayleighovy vlny (R-vlny)

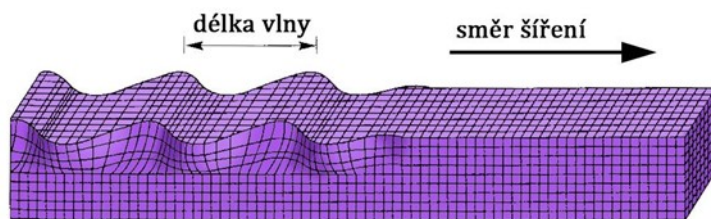
Interakce objemových vln s volným povrchem uvede volný povrch do kmitavého pohybu, kterého je projevem vznik povrchové Rayleighovy vlny. Vlny R se šíří všemi směry, mají dlouhou periodu a velkou amplitudu a způsobují největší kmitání povrchu země hlavně ve velkých vzdálenostech od zdroje. Povrchové vlny se šíří na rozhraní prostředí. Riziko pro nadzemních objektů je u nich největší (Máca, 2017).



Obrázek 13: Šíření deformace povrchovými R- vlnami upraveno z (Bolt, 1993)

b) Loveho vlny (L-vlny)

Částice kmitají kolmo na směr šíření vlny v horizontální rovině. S hloubkou jejich význam velmi rychle klesá. Šíří se rychleji než R-vlny (Máca, 2017).



Obrázek 14: Šíření deformace povrchovými L-vlnami upraveno z (Bolt, 1993)

Rychlosti šíření seismických vln pro vybraná prostředí jsou uvedena v tabulce níže.

Tabulka 3: Rychlosti šíření seismických podélných vln pro vybraná prostředí převzato z (Mareš, 1990)

Hornina nebo prostředí	Rychlost v_p [m.s ⁻¹]
Vzduch	310 – 360
Voda	1430 – 1590
Štěrk, suchý písek	150 – 600
Suchá jílovitá vrstva	300 – 900
Vlhký písek	600 – 1300
Pískovec, jílovec	1500 – 4500
Metamorfované horniny	4000 – 6600
Žula	4000 – 6000
Gabro	6000 – 6500

5.5 Lom a odraz vln

Vlastnosti prostředí z hlediska šíření, odrazů a prostupů napěťových vln je v současné teorii rozpojování výbuchem nejčastěji definováno jako akustická impedance. Akustická impedance je dána jako součin hustoty prostředí a rychlosti šíření zvukových vln.

$$I_h = v_p \cdot \rho_h \quad (19)$$

I_h : akustická impedance horniny, v_p : rychlost šíření podélných vln horninou ρ_h : hustota horninového prostředí

Z předešlého vzorce se dá pozorovat, že materiály o větší pevnosti mají vyšší hodnotu akustické impedance. K většímu pohybu částic prostředí dochází při malých hodnotách akustické impedance. Na rozhraní dvou rozdílných impedančních prostředí dochází k odrazu a lomu vln. Poměr R intenzity dopadající a odražené vlny vyjádříme pomocí vztahu.

$$R = \frac{I_{h1} - I_{h2}}{(I_{h1} + I_{h2})^2} \quad (20)$$

R: poměr intenzity dopadající a odražené vlny

I_{h1}, I_{h2} : akustické impedance dvou různých prostředí

Huygensův-Fresnelův princip nám říká, že můžeme každou kmitající částici považovat za vlastní zdroj elementárního vlnění, a že výsledné vlnění je součtem všech dílčích elementárních vlnění. Vlnění se vyruší s výjimkou čela vlny ve všech směrech. Díky tomuto principu a spojení s difrakcí můžeme vysvětlit vznikající vlnění ve zdánlivém stínu za překážkou (Lowrie, 2007).

Snellův zákon můžeme použít pro úhel odrazu vln. Tento zákon dává do závislosti úhel přichozího a odchozího paprsku vlny a jejich rychlosti šíření (Sheriff et al., 1995).

$$\frac{\sin\alpha_1}{v_1} = \frac{\sin\alpha_2}{v_2} \quad (21)$$

α_1 a α_2 : úhel dopadu paprsku ke kolmici na rozhraní

v_1 a v_2 : rychlosti šíření vln v jednotlivých vrstvách

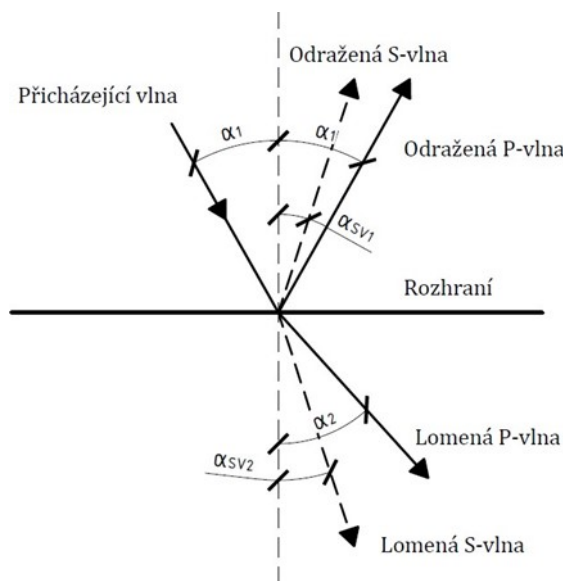
Snellův zákon můžeme také využít k určení změny z podélné vlny na příčnou po odrazu či lomu (Sheriff et al., 1995):

$$\frac{\sin\alpha_1}{v_{p1}} = \frac{\sin\alpha_{s2}}{v_{s2}} = \frac{\sin\alpha_{s1}}{v_{s1}} \quad (22)$$

α_{s1} a α_{s2} : úhly odrazu transformované s-vlny

v_{s1} a v_{s2} : rychlost šíření příčných vln v první, respektive druhé vrstvě

v_{p1} : rychlost přichozí podélné vlny.



Obrázek 15: Transformování vln na rozhraní, upraveno z (Lowrie, 2007)

5.6 Měření otřesů způsobených výbuchem

Výsledky, díky kterým posuzujeme dynamické účinky výbuchu ve skalním masivu, jsou závislé na použitých měřících přístrojích. Přesné objektivní výsledky závisí na vhodných parametrech měřících přístrojů a správných postupech. Při otřesech je charakter pohybu hmoty v materiálu velice specifický, proto nemůžeme použít jakékoliv přístroje pro měření kmitavého pohybu. Používané přístroje se většinou skládají ze tří hlavních částí (Pandula, 2010).

První z nich je snímač. Je to měnič, který reaguje na kmitavý pohyb materiálu, jenž převádí elektrický nebo mechanický signál, který vysílá do převodního ústrojí. Nejčastěji se používá registrační zařízení, jenž je schopné zaznamenávat celý průběh seismického vlnění a z něj se odečítají veličiny, které jsou potřebné pro posouzení dynamických účinků. Podle způsobu spojení snímačů se seismickým polem rozlišujeme jejich dva typy.

Relativní snímače (snímače nultého řádu) předávají signál vznikající rozdílem pohybu hmoty vzhledem k pevné základně. Tento typ je však při měření otřesů z výbuchu téměř nepoužitelný, protože nelze zajistit pevnou (nepohyblivou) základnu. Používá se jenom tam, kde se měří rozdíl pohybu dvou blízkých bodů.

Absolutní snímače (prvního řádu) vysílají signál, jenž vzniká rozdílem pohybů hmotných bodů seismického pole vůči pružně uložené hmotě, která představuje za určitých podmínek nepohyblivý bod. Skládá se z pohyblivé části, nepohyblivé části, pružiny a tlumiče. Část pohyblivá kmitá okolo své rovnovážné polohy se stejnou amplitudou, jakou má měřené kmitající prostředí, ale s poměrně větší frekvencí. Tyto snímače též neměří kmitavý pohyb seismických vln moc přesně (Bolt, 1993).

Výsledkům, které jsou nejméně zkreslené se docílí použitím netlumených snímačů. Musí však být dosaženo podmínky, kdy frekvence kmitání měřeného prostředí musí být 5krát menší než frekvence kmitání daného snímače. Díky tomu se však výrazně sníží frekvenční rozsah snímače (Pandula et al., 2010,).

Velice důležité je i kromě správného výběru snímače i jeho umístění. Nejčastěji se aplikují do objektů přímo ohrožených účinky exploze. V nich se většinou umístí do částí, kde pravděpodobně dojde k největšímu kmitání. Snímače mohou být uloženy s dostatečným upevněním nebo bez upevnění (volně). Instalovat volně stojící snímače je možné tehdy, pokud je jejich hmotnost větší než síla vyvolaná zrychlením kmitavého pohybu působící proti této hmotnosti. Nutné je, aby nedošlo k pohybům (např. odsakování) samotného

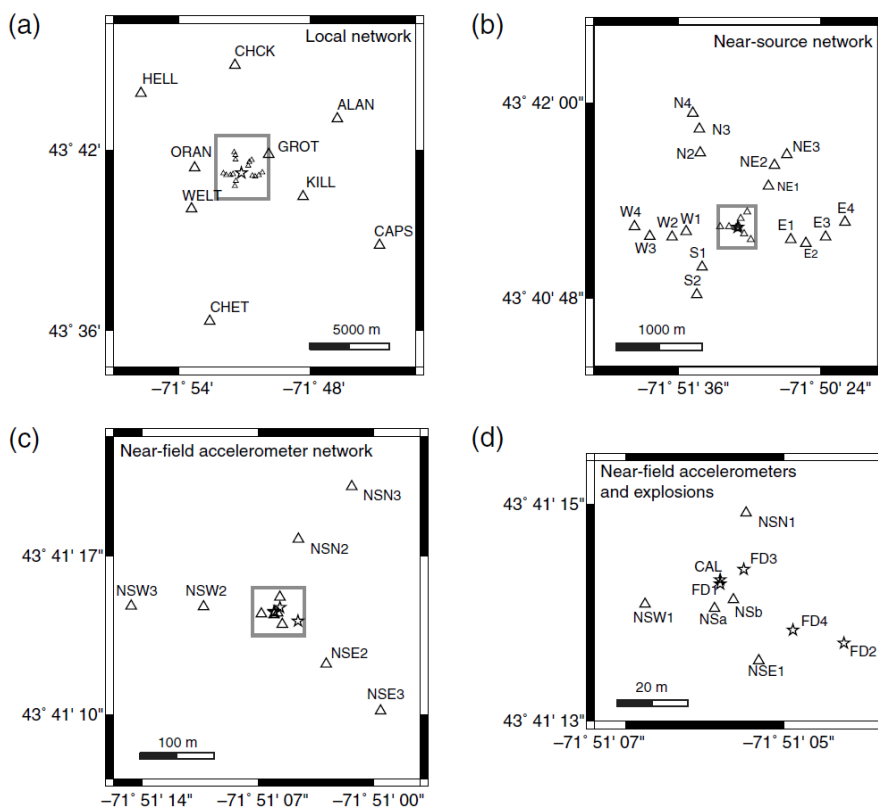
přístroje. U lehčích snímačů je nutno zabránit jeho pohybům, a tak se musí upevnit. Nejjednodušší způsob znehybnění je jeho zatížení, dále lze např. přišroubovat přivázat, přilepit atd. Na kvalitě spoje do jisté míry závisí i přesnost měření. Mezi další faktory ovlivňující přesnost je správná orientace snímače k epicentru výbuchu (Sheriff, 1995).

Další hlavní částí přístrojů pro měření seismických účinků je tzv. převodník. Převodník přijímá signál ze snímače, úměrně ho zmenší nebo zvětší a převede ho dále k registračnímu nebo indikačnímu zařízení. Zajišťuje přesné převedení signálu buď nepřímo pomocí měniče (elektronicky) nebo přímo (mechanicky, mechanicko-opticky). Převodník nesmí signál ze snímače amplitudově nebo frekvenčně zkreslit (Pandula et al., 2010, Sheriff, 1995).

Třetí hlavní částí je registrační nebo indikační zařízení. Tyto zařízení zaznamenávají vlnový průběh otřesu. Indikační zařízení jsou levnější, jednodušší a menší. Slouží však jen k orientačnímu hodnocení úrovně otřesu. Registrační zařízení zpracovává upravený signál z převodového zařízení. Pro měření frekvence otřesů má časovou základnu, která vysílá v pravidelných intervalech impulzy (Sheriff, 1995). Pro posouzení dynamických účinků se hodnotí tři základní veličiny-zrychlení, výchylka a frekvence. Díky tomu lze pomocí integrálů a derivací dopočítat jednotlivé veličiny. Není rozhodující, která z nich je v danou chvíli měřena. V dnešní době se používají digitální lehké přístroje s vysokým frekvenčním rozsahem, které pracují s velmi vysokou přesností autonomně a nezávisle na zásahu operátora (Bolt, 1993).

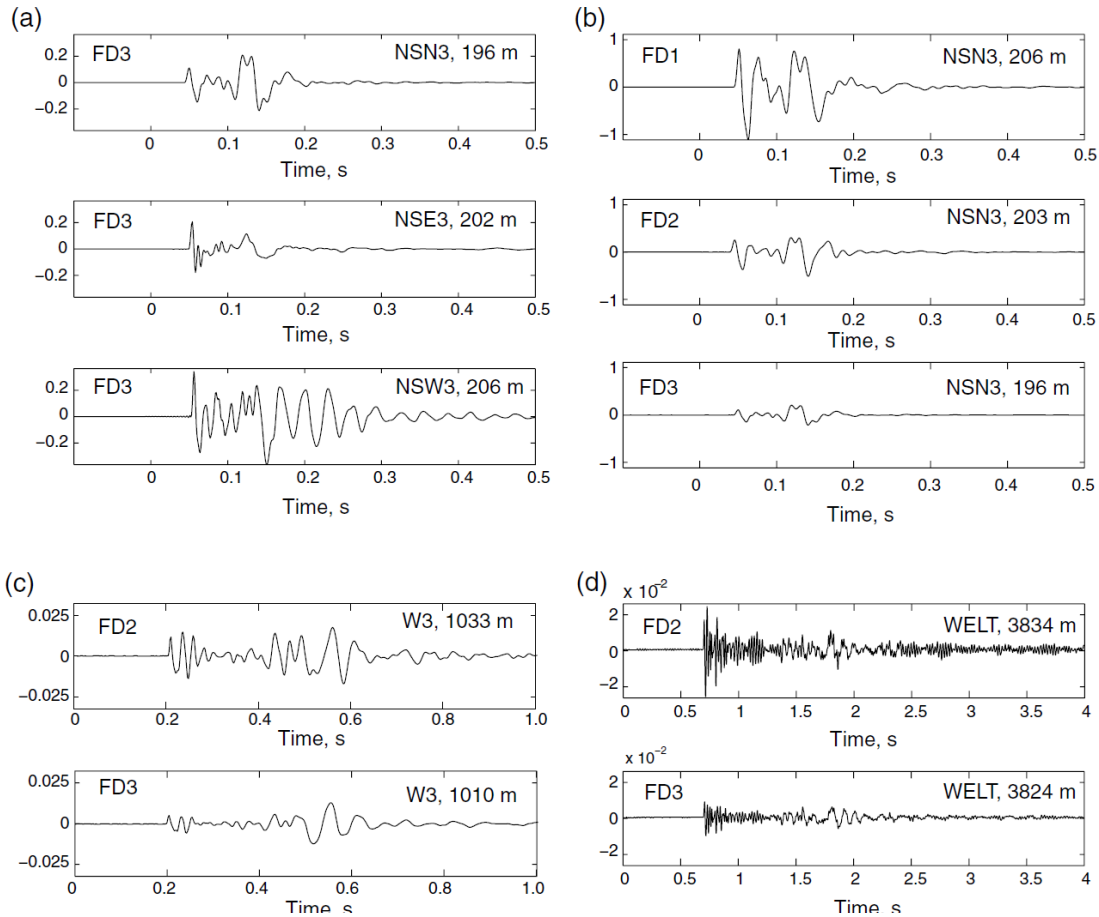
5.6.1 Praktický příklad zachycení seismických vln

Praktický příklad zachycení seismických vln pomocí akcelerometrů v masivu poblíž Newfound Lakes, New Hampshire v rozpukaném granodioritu udává Stroujková (2013).



Obrázek 16: (a) rozmístění stanic, (b) síť blízkého zdroje, (c) akcelometry, (d) rozmístění výbuchů převzato z (Stroujková 2013)

V obrázku 18 se popisuje (a) Rozmístění seismických stanic od výbuchů poblíž Newfound Lakes v New Hampshire. Trojúhelníky představují měřící stanice, hvězdy ukazují body exploze; trojúhelníky uvnitř obdélníku představují seismometrickou síť. (b) Síť blízkého zdroje umístěná ve Spruce Ridge v New Hampshire. Trojúhelníky uvnitř obdélníku zobrazují blízkou síť. (c) blízké akcelometry (d) rozmístění jednotlivých výbuchů (Stroujková, 2013).



Obrázek 17: Záznamy akcelometrů pro jejich různá umístění (Stroujková 2013)

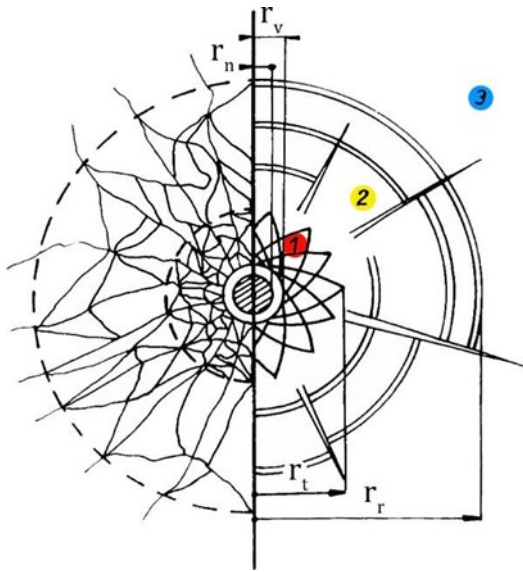
Obrázek 17 popisující (a) Vertikální složku seismických tras pro zdroj výbuchu FD3 zaznamenaná blízkými akcelerometry (přečtené na rychlosti) NSN3, NSE3 a NSW3 umístěné v různých směrech přibližně 200 m od zdroje; (b) Zdroj výbuchu FD1, FD2 a FD3 zaznamenané stanicí NSN3; (c) Zdroj výbuchu FD2 a FD3 zaznamenaný stanicí W3; a (d) Zdroj výbuchu FD2 a FD3 zaznamenané místní stanicí (WELT), která se nachází 3000 m od exploze. Všechny amplitudy jsou uvedeny v cm/s. převzato z (Stroujková 2013)

6 REÁLNÉ ÚČINKY VÝBUCHU NA OKOLNÍ PROSTŘEDÍ

6.1 Princip rozpojení hornin výbuchem za podmínek homogenního prostředí

Po iniciaci výbušniny se začne všemi směry šířit detonační vlna. Detonační rychlost výbušniny bývá většinou větší než rychlost šíření vln napětí, a proto bude uvažován předpoklad, že výbuchové plyny začnou působit ve všech směrech zároveň. Během velmi krátké doby, která je vymezena pro detonaci nálože, nedokážou výbuchové plyny předat teplo obklopujícímu prostředí, takže můžeme tento děj považovat za adiabatický (žádné teplo nepřijímá ani nevydává).

V počátečních fázích může tlak dosahovat hodnot i několika tisíc megapascalů a vysoce převyšuje tlakovou pevnost horniny. Tímto se vytvoří oblast drcené a stlačené horniny, která může přejít až do stavu kapaliny. Tato oblast se nazývá zóna tangenciálních trhlin nebo také zóna drcení (poloměr $-r_t$). Pod silným tlakem se hornina začne pohybovat směrem od výbuchu, a tím vzniká rázová vlna, která se šíří nadzvukovou rychlostí. Rázová vlna ztrácí s narůstající vzdáleností energii a v místě, kde tlak nedosahuje napětí překračující pevnost horniny v tlaku, se začne šířit smyková napětí. Tím se změní charakter porušení a dále se již šíří jen napěťová vlna, jenž vyvolává radiální posuny částic. Těmito posuny vznikají tangenciální napětí, která převyšují pevnost horniny v tahu a z toho důvodu se od zóny drcení šíří trhliny radiální. Tyto trhliny se šíří až do vzdálenosti, kde už nedosahuje napětí tahové pevnosti a tato zóna se nazývá jako zóna radiálních trhlin (poloměr $-r_r$). Jak se trhliny šíří směrem od výbuchu, tak se vzniklý prostor vyplňuje výbuchovými plyny, které snižují teplotu a zvětšují svůj objem a mohou napomáhat dalšímu šíření trhlin. Díky setrvačnosti pohyb částic horniny pokračuje ještě nějakou dobu a takto zvyšuje svoji potenciální energii. Ve chvíli, kdy dosáhne svého maxima, se vlivem podtlaku a odpružení vzniklém v plynech, začne pohybovat směrem k výbušnině. Tento proces vede k chvilkovému kmitání, avšak pod vlivem ztrát energie a útlumu při trvalých deformacích rychle odeznívá síla následných vln a ty nedosahují hodnot rázové vlny. Ve vzdálenosti kolem $200 r_n$ (poloměr nálože) dochází k přechodu rázové vlny v akustickou a za zónou radiálních trhlin se již nachází pouze zóna pružných deformací. Po skončení těchto dynamických dějů zůstává v hornině výbuchová dutina naplněná povýbuchovými plyny o určité teplotě a tlaku (Silva, et al., 2018, Kořínek, 1988, Kochanov, et al., 2016).



Obrázek 18: Mechanismus rozpojení horniny výbuchem (neohraničené homogenní prostředí). 1-zóna deformací, 2- zóna trhlin, 3- zóna pružných deformací. Upraveno z (Dojčár, et al., 1996)

6.2 Princip výbuchu za přítomnosti blízké volné plochy

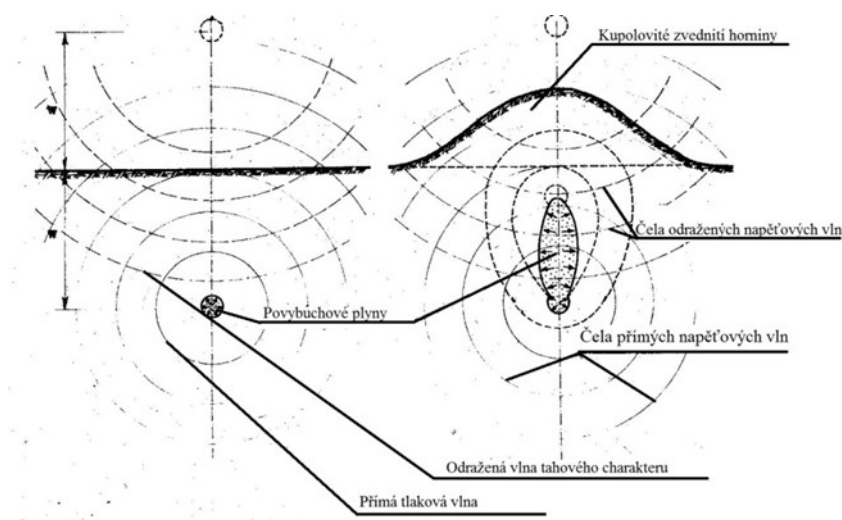
Výbuch za přítomnosti volné plochy probíhá v několika fázích:

Při výbuchu za přítomnosti blízké volné plochy se v první fázi šíří všemi směry od nálože tlaková vlna. V této fázi platí vše, co bylo řečeno při výbuchu bez blízké volné plochy, neboť vliv volné plochy se dosud nemohl projevit

První fáze končí, jakmile čelo tlakové vlny dosáhne volné plochy. Částice horniny uváděné do pohybu vlnou napětí se na volné ploše setkávají s nulovým odporem a pohybující hornina se začíná klenout nad volnou plochou (obr. 21).

Vlna napětí, jež doposud působila tlakovým účinkem, se na volné ploše štěpí a odráží. Část její energie prochází rozhraním a bez užitku mizí. Zbytek se odráží jako vlna tahová, šířící se od volné plochy zpět do masívu (Dojčár, et al. 1996).

V tomto okamžiku jsou částice masívu ještě poněkud stlačeny po průchodu tlakové napěťové vlny. Odražená vlna napomáhá jejich opětné expanzi. Překročí-li rychlost rozpínání kritickou rychlost deformace, vznikají další soustavy trhlin radiálních a tangenciálních, tentokrát na koncentrických kružnicích se středem v zrcadlovém obrazu nálože. Účinkem odražené vlny je horninový masív odštěpován od volné plochy (Dojčár, et al., 1996, Kořínek, 1988).



Obrázek 19: Mechanismus rozpojení horniny výbuchem v blízkosti volné plochy (Horký, 1979)

6.3 Nežádoucí účinky výbuchu

Práci, která je vykonaná náloží po iniciaci, se může jednoduše rozdělit na škodlivé a užitečné účinky. Míra nežádoucích účinků je přímo úměrná hmotnosti nálože, a tak jejich působení nezřídka limituje samotný návrh technologie TP. Užitečnými účinky se rozumí požadované rozpojení a odhození rubaniny z rozpojovaného prostoru. Součet prací vykonaných na užitečných a nežádoucích účincích je konstantní. Pokud budou nežádoucí účinky již v návrhu co nejvíce potlačeny, bude efektivnost TP o tuto část větší. K nežádoucím účinkům patří:

a) Porušení horninového masivu za požadovaným výlomem

Může být způsobeno například špatnými geologickými podmínkami (nevhodně ukloněné diskontinuity) nebo větší hmotností odpálené nálože. Tento účinek může být omezen změnou časování jednotlivých náloží, snížením hmotnosti náloží, vložením stínění do obrysových vrtů, volbou rozpojovací metody.

b) Nadměrný rozlet a odhoz horniny

Rozlet se týká jednotlivých zrn, která mohou být vržena do značně velkých vzdáleností, odhoz se pak týká celého objemu rozpojované horniny. Obě složky jsou důsledkem expandujících produktů výbuchu. Mezi hlavní příčiny může patřit lokální zeslabení masivu, nadměrná hmotnost nálože, nedostatečná délka ucpávky. Tyto efekty se můžou redukovat použitím milisekundového časování, snížením hmotnosti nálože či ochranných rohoží zabraňujících nežádoucímu rozletu. (Dojčár, et al. 1996)

c) Zvukový efekt a vzdušná tlaková vlna

Vzdušná tlaková vlna je vlna, která je tvořena úzkou vrstvou stlačeného vzduchu (podélná vlna). Tu v blízkosti výbuchu tvoří rázová vlna a s narůstající vzdáleností přechází do vlny akustické, jenž se šíří rychlostí zvuku ve vzduchu. Při dopadu tlakové vlny na překážku se mimo tlaku na čele rázové vlny, projeví i účinek nárazu částic vzduchu na překážku. Výsledný tlakový účinek může být až osmkrát větší než hodnoty přetlaku na čele rázové vlny. Zvukový efekt je jevem doprovodným. Škodlivé jsou pro lidský organismus již poměrně malé hodnoty přetlaku. Skleněné tabule mohou být porušeny dle velikosti v rozmezí 1 KPa až 10 KPa a lidský bubínek poškodí přetlak 2 KPa až 5 KPa. Intenzita tlakové vlny je především funkce hmotnosti nálože, vzdálenosti a stupně utěsnění. Účinky jsou velmi závislé na atmosférických podmínkách, kdy vlhké prostředí lépe přenáší tlakové vlny a tím se zvětšují nežádoucí účinky (Bartoš, 1975).

7 ZÁVĚR

Předložená bakalářská práce pod názvem „chování horninového masívu při a po vnitřní explozi - základní pojmy“ je výsledkem rešerše a studia materiálů zabývajících se základními parametry výbuchu.

V rámci práce je popisován vlastní výbuch, vlastnostmi horninového masívu ovlivňující mechaniku výbuchu, postupy ke stanovení vlivu exploze na horninový masív, seismickými účinky výbuchu a reálnými účinky výbuchu na okolní prostředí.

V úvodní části je kromě vlastních definic a základní charakteristiky je v práci provedeno základní rozdělení výbuchu na výbuch fyzikální, chemický a atomový. Dále pak jsou zde popisovány základní způsoby výbušné přeměny a to explozivní hoření a detonace. Na závěr úvodní kapitoly je provedena charakteristika vlastního výbuchu výbušniny a jeho účinku na okolní horniny.

V další části je práce zaměřena na vlastnosti masívu ovlivňující mechaniku exploze, kdy hlavním takovýmto činitelem je pevnost horniny a vlastního masívu. Jsou zde charakterizovány hlavní fyzikální vlastnosti ovlivňující pevnost (objemová hmotnost, měrná hmotnost, pórovitost a vlhkost), základní zkoušky pevnosti (triaxiální zkouška, pevnost v prostém tlaku, zkouška v příčném tahu) a zobrazení pevnostních zkoušek. Dále jsem se v této části práce dotkl problému vlivu nasycenosti masívu na pevnost a především pak se zde práce zabývala diskontinuitami masívu, jako jednoho z hlavních vlastností masívu mající vliv na vlastní mechaniku exploze.

Samostatná část bakalářské práce je věnována základním postupům ke stanovení vlivu exploze na horninový masív. Je zde popsáno Hoek-Brownovo kritérium porušení, metoda Holmberg - Persson a Esenův model porušení.

V další samostatné kapitole jsou studovány seismické účinky výbuchu. Bylo provedeno základní členění seismicity (seismicita přírodní a technická), popsány základní projevy seismicity v ČR. Podrobněji jsou popsány vlny napětí a jejich šíření v pevném prostředí, rozdělení seismických vln (objemové a povrchové) a popsán lom a odraz seismických vln. Závěr této části je věnován měření otřesů způsobených výbuchem a je zde uveden praktický příklad zachycení seismických vln pomocí akcelerometrů v masívu poblíž Newfound Lakes, New Hampshire v rozpukaném granodioritu.

Závěrečná část předkládané bakalářské práce je věnována reálným účinkům výbuchu na okolní prostředí. Je zde v zásadních parametrech popsán princip rozpojení hornin výbuchem za podmínek homogenního prostředí, princip výbuchu za přítomnosti blízké volné plochy a dále popsány nežádoucí účinky výbuchu.

Práce jako celek si klade za cíl ve stručných rysech provést základní charakteristiku výbuchu a jeho působení na masiv. Údaje shrnuté v této práci by měly představovat souhrn vstupních informací pro další studium této poměrně složité vědecké i technické disciplíny s velkým přesahem do průmyslového uplatnění.

8 SEZNAM LITERATURY

Alhussan, K., Stepanov, K. L., Stankevich, Y. A., Smetannikov, A. S., & Zhdanok, S. A. (2011). Hydrodynamics of the initial phase of explosion. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54(7-8), 1627-1640.

Barták, J., & Hánek, J., (2009) Skripta - Praktická cvičení: *Vybrané klasifikace hornin* [online]. Dostupné z: https://ceg.fsv.cvut.cz/CEG_site/o-nas/stola-josef/vyuka/skripta-prakticka-cviceni-v-uef-josef

BARTLOVÁ, I., & DAMEC, J., (2002) EDICE SPBI SPEKTRUM 30.: *Prevence technologických zařízení*. 1. vydání. Kleinwächter, Frýdek - Místek: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství v Ostravě.

Bartoš, J., & Mečír, 1975, *Příručka pro střelmistry v hornictví, stavebnictví a ostatních oborech*. 2. přepracované vydání. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury.

Bolt, B. A. (1993). Abridged Modified Mercalli Intensity Scale. *Earthquakes. Newly Rev. & expanded*. New York, WH Freeman.

Deere, D. (1988). The rock quality designation (RQD) index in practice. In *Rock classification systems for engineering purposes*. ASTM International.

Dojčár, O., Horký, J. & Kořínek, R. 1996, *Trhacia technika*, Montanex, Ostrava.
Henrych, J. (1973). *Dynamika výbuchu a její užití*. Academia.

Einstein, H. H., Veneziano, D., Baecher, G. B., & O'reilly, K. J. (1983, October). The effect of discontinuity persistence on rock slope stability. In *International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts* (Vol. 20, No. 5, pp. 227-236). Pergamon.

Esen, S., Onederra, I., & Bilgin, H. A. (2003). Modelling the size of the crushed zone around a blasthole. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40(4), 485-495.
Exner, K., & Horký, J. (1985). *Trhací práce a ražení důlních děl: určeno pro posl. HGF [hornicko-geolog. fak.], 3.[roč.]*. Vysoká škola báňská.

Goodman, R. E. (1989). *Introduction to rock mechanics* (Vol. 2). New York: Wiley.

Hoek, E., & Brown, E. T. (1980). *Underground excavations in rock*. CRC Press.

Hoek, E., Carranza-Torres, C., & Corkum, B. (2002). Hoek-Brown failure criterion-2002 edition. *Proceedings of NARMS-Tac*, 1(1), 267-273.

- Hong, K., Han, E., & Kang, K. (2017). Determination of geological strength index of jointed rock mass based on image processing. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 9(4), 702-708.
- Horký, J. (1987). Trhací práce a rozpojování hornin: učební texty VŠB (Blasting and rock disintegration: textbook of VSB).
- Hudson, J. A., & Harrison, J. P. (2000). *Engineering rock mechanics: an introduction to the principles*. Elsevier.
- Kaláb, Z., & Knejzlík, J. (2006). Field measurement of surface seismic vibrations provoked by mining in Karvina region. *Publs. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sc*, 29(395), 185-194.
- Kaláb, Z. & Kořínek, R. (2009) *TECHNICKÉ ODSTŘELY A JEJICH ÚČINKY*
- Kalousek J. (1999) *Základy fyzikální chemie hoření, výbuchu a hašení*. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství
- Kedrinskiy, V. K. (2006). *Hydrodynamics of Explosion: experiments and models*. Springer Science & Business Media.
- Kochanov, A. N., & Odintsev, V. N. (2016). Wave prefracturing of solid rocks under blasting. *Journal of Mining Science*, 52(6), 1080-1089.
- KOŘÍNEK, R. (1988). *Trhací práce v lomech*. Ostrava: Vysoká škola báňská.
- Křížek, M., 2007, *Zemětřesení na území České republiky, V zorném poli geografů: Geografické rozhledy*
- Kubica, J., & Kroul, j., (2013). *Geotechnika 1 Dobývání ložisek nerostů*. [online] dostupné z <http://www.spskarvina.cz/www/images/stories/HORNIK/Geotechnika-1.pdf>
- Lowrie, W. (2007). *Fundamentals of geophysics*. Cambridge university press.
- Makovička, D., Janovský, B., & Černín, M. (2008). *Příručka protivýbuchové ochrany staveb*. Česká technika-nakladatelství ČVUT v Praze.
- Mareš, S. (1990). *Úvod od užité geofyziky*. SNTL-Nakladatelství technické literatury.
- Máca, J. (2017). Přednášky předmětu 132YSEI-Seizmické inženýrství.
- Onederra, I., & Esen, S. (2004). An alternative approach to determine the Holmberg-Persson constants for modelling near field peak particle velocity attenuation. *Fragblast*, 8(2), 61-84.

Palmström, A. (1982). The volumetric joint count—a useful and simple measure of the degree of rock jointing. *Proc. 4th Int. Cong. Int. Assoc. Eng. Geol.*, 5, 221-228..

Pandula, B., & Kondela, J. (2010). Methodology of seismic blasting works Slovak Society for drilling and blasting work= Metodológia seizmiky trhacích prác Slovenská spoločnosť pre trhacie a vrtacie práce—ZSVTS Banská Bystrica.

Plch, L. (2013). *Účinky fyzikálních výbuchů.*

Pravda, V., & Bětík, J. (2010). *Trhací práce v hornictví, stavebnictví a speleologii.* Montanika. Horký, J., & Kořínek, R. (1979). *Návody ke cvičením z předmětu trhací práce a rozpojování hornin.* Vysoká škola báňská..

Priest, S. D., & Hudson, J. A. (1976, May). Discontinuity spacings in rock. In *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* (Vol. 13, No. 5, pp. 135-148). Pergamon.

Sheriff, R. E., & Geldart, L. P. (1995). *Exploration seismology.* Cambridge university press.

Silva, J., Worsey, T., & Lusk, B. (2019). Practical assessment of rock damage due to blasting. *International Journal of Mining Science and Technology*, 29(3), 379-385..

Škopek, J., Ťavoda, O. & Drozd, K., 1986. *Mechanika hornin I., Praha: Státní pedagogické nakladatelství Praha.*

Vávra, P. (2002). *Teorie výbušin: vedení pedagogické praxe.* Univerzita Pardubice, Katedra teorie a technologie výbušin.

Zheng, H., Li, T., Shen, J., Xu, C., Sun, H., & Lü, Q. (2018). The effects of blast damage zone thickness on rock slope stability. *Engineering geology*, 246, 19-27.

Zhou, Z. L., Xin, C. A. I., Yuan, Z. H. A. O., Lu, C. H. E. N., Xiong, C., & Li, X. B. (2016). Strength characteristics of dry and saturated rock at different strain rates. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 26(7), 1919-1925.

Internetové zdroje:

<http://departments.fsv.cvut.cz>, (2014). *Mechanika hornin.* [online] dostupné z <http://departments.fsv.cvut.cz/k135/data/wp-upload/2014/03/mechanika-hornin-3.pdf>

Pruška, J, 2008, *klasifikace-hornin,* [online] dostupné z <http://departments.fsv.cvut.cz/k135/data/wp-upload/2008/05/klasifikace-hornin.pdf>

Pruška, J, 2009, *klasifikace-rezim-kompatibility* [online]. dostupné z <http://departments.fsv.cvut.cz/k135/data/wp-upload/2009/05/klasifikace-rezim-kompatibility.pdf>

Pruška, J., 2018, technická seismicita [online] dostupné z <http://people.fsv.cvut.cz/~Pruskjan/2018/DYKG/Prednes%204/Technick%C3%A1%20seismicita%20.pdf>

SEZNAM OBRÁZŮ

Obrázek 1: Měnící se tvar vlny převzato z (horký, 1987).....	6
Obrázek 2: Proudový diagram práce výbuchu podle Beljajeva, Q_v – výbuchové teplo trhaviny, převzato z (Dojčár, 1996).....	7
Obrázek 3: Mohrovy kružnice pro jednotlivé typy zkoušek. A-zkouška v prostém tahu, B-Brazilská zkouška, C- zkouška v prostém tlaku, D-rotačně trojosá zkouška. (Goodman, 1989)	11
Obrázek 4: Porovnání nasyceného a nenasyceného dynamicky namáhaného převzato z (Zhou, et. al, 2016).....	11
Obrázek 5: Schématické zobrazení základních vlastností diskontinuit převzato z (Barták, et al., 2009).....	13
Obrázek 6: Znázornění výpočtu RQD z jednotlivých kusu vrtných jader převzato z (Pruška, 2009).....	14
<i>Obrázek 7: Hodnota D pro různé typy hornin převzato z (Hoek, 2002)</i>	<i>19</i>
Obrázek 8: vzdálenost od osy výbuchu a předpokládané kontury vybrací (mm/s) použitím H-P modelu (vzdálenosti v metrech) převzato z (Silva, et al, 2019).....	21
Obrázek 9: Závislost tlakových napětí na poměrné objemové deformaci pro a) kapaliny a plyny, b) tuhá tělesa převzato a upraveno z (Henrych, 1973).....	25
Obrázek 10: Změna profilu výbuchové vlny v pevném tělese s narůstající vzdáleností převzato a upraveno z (Henrych, 1973)	26
Obrázek 11: Šíření deformace prostředím podélnými vlnami upraveno z (Bolt, 1993)	26
Obrázek 12: Šíření deformace prostředím příčnými vlnami upraveno z (Bolt, 1993).....	27
Obrázek 13: Šíření deformace povrchovými R- vlnami upraveno z (Bolt, 1993)	27
Obrázek 14: Šíření deformace povrchovými L-vlnami upraveno z (Bolt, 1993)	28
Obrázek 15: Transformování vln na rozhraní, upraveno z (Lowrie, 2007)	29
Obrázek 16: (a) rozmístění stanic, (b) síť blízkého zdroje, (c) akcelometry, (d) rozmístění výbuchů převzato z (Stroujková 2013)	32

Obrázek 17:(a) Složka tras pro zdroj výbuchu blízkými akcelometry v blízkosti. (b) Zdroj výbuchu FD1, FD2 a FD3 zaznamenané stanicí NSN3; (c) Zdroj výbuchu FD2 a FD3; a (d) Zdroj výbuchu FD2 300 m vzdálenými (Stroujková 2013) 33

Obrázek 18: Mechanismus rozpojení horniny výbuchem (neohraničené homogenní prostředí). 1-zóna deformací, 2- zóna trhlin, 3- zóna pružných deformací. Upraveno z (Dojčár, et al., 1996)..... 35

Obrázek 19: Mechanismus rozpojení horniny výbuchem v blízkosti volné plochy (Horký, 1979)..... 36

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Index RQD podle tabulky převzato z (Pruška, 2009) 14

Tabulka 2: Některé typy zdrojů technické seismicity s příslušnými rozsahy akcelerací převzato z (Pruška, 2018) 23

Tabulka 3: Rychlosti šíření seismických podélných vln pro vybraná prostředí převzato z (Mareš, 1990) 28