

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**FAKULTA STAVEBNÍ**

Katedra geotechniky

# **Diplomová práce**

Studijní program: Stavební inženýrství

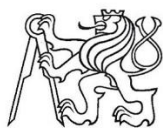
Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby

**Bc. Jan Škeřík**

**PROBLEMATIKA TECHNICKÉ SEIZMICITY PŘI BUDOVÁNÍ  
PODZEMNÍCH DĚL**

**EXCAVATION OF THE UNDERGROUND STRUCTURES  
AND  
TECHNICAL SEISMICITY**





ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Thákurova 7, 166 29 Praha 6

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Škeřík	Jméno: Jan	Osobní číslo: 370993
Zadávající katedra: geotechniky		
Studijní program: Stavební inženýrství - N3607		
Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby - 3607T009		

### II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Problematika technické seizmicity při budování podzemních děl	
Název diplomové práce anglicky: Excavation of the Underground Structures and Technical Seismicity	
Pokyny pro vypracování: rešerše dané problematiky - určování vlivu vibrací na okolní zástavbu měřením a výpočtem, vliv trhacích prací a působení trhavin na okolní horninový masiv, aplikace zásad normy ČSN 730040, stanovení odezvy horninového prostředí na vibrace a vzorový výpočet odezvy	
Seznam doporučené literatury: patříčné normy a technické předpisy (ČSN 73 0040, ČSN 73 0031, Eurokód 1998, TP), odborné články v časopisech (např. Tunel) a konferencích (např. Podzemní stavby Praha)	
Jméno vedoucího diplomové práce: Jan Pruška	
Datum zadání diplomové práce: 6.10.2017	Termín odevzdání diplomové práce: 7.1.2018 <i>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</i>
<hr/> <i>Podpis vedoucího práce</i>	<hr/> <i>Podpis vedoucího katedry</i>

### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

*Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.*

<hr/> <i>6.10.2017</i> Datum převzetí zadání	<hr/> <i>Podpis studenta(ky)</i>
---	----------------------------------

## **Poděkování**

Na tomto místě bych rád poděkoval docentu Janu Pruškovi za umožnění psát diplomovou práci pod jeho vedením, doktorce Lindě Černé Vydrové, za prvotní impuls a nasměrování k této problematice, která byla podpořena účastí ve studentské grantové soutěži. Dále bych chtěl poděkovat za cenné podklady docentce Evě Hrubéšové z VŠB v Ostravě a inženýru Václavu Dohnálkovi z firmy Subterra. V neposlední řadě bych chtěl vyjádřit své velké díky za podporu mé partnerce Monice, bez které by tato práce vznikala podstatně obtížněji.

# Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením doc. Dr. Ing. Jana Prušky, že jsem řádně citoval všechny použité prameny, literaturu a další odborné zdroje a že práce nebyla využita v rámci jiného vysokoškolského studia či k získání jiného nebo stejného titulu.

V Praze dne 7. 1. 2018

---

vlastnoruční podpis autora

## **Abstrakt:**

Trhací práce jsou často nedílnou součástí ražeb moderních podzemních děl. Aplikací však vznikají některé nežádoucí účinky. Jedním z nich je i vyvolání seizmických vln, které při umístění podzemního díla v urbanizované oblasti může přinášet dodatečné komplikace a ohrožení nadzemních objektů porušením. Práce se v první části zaměřuje na teoretické popsání prostředků trhacích prací a dějů spojených s výbuchem a šířením následných vln napětí horninovým prostředím. Jsou zmíněny především účinky seizmických vln na pozemní objekty a jejich měření, včetně aplikace platné normy.

V druhé části předkládané práce je pomocí výpočetního programu *Plaxis 2D* modelováno šíření vln napětí geologickým prostředím s důrazem na povrchové účinky. V práci jsou popsány základní vstupní parametry pro modelování těchto dynamických dějů generovaných prostřednictvím programu a materiálového modelu Mohr-Coulomb. Uvedeny jsou tři příklady, přičemž první dva se zabývají základními principy modelu a poukazují na rozdíly mezi prostředím tvořeným jedno- a vícevrstvou geologickou stavbou a třetí příklad má za úkol zmapovat pravděpodobnostní zhodnocení jednoho vybraného reálného odstřelu a poukázat na vliv vstupních parametrů. Přímé převzetí vstupních hodnot parametrů geologických vrstev ze statického výpočtu se ukázalo jako méně vhodné.

## **Klíčová slova v českém jazyce:**

seizmicita, seizmické vlny, trhaviny, trhací práce, matematické modelování, pravděpodobnostní studie, kmitání, rychlost vibrací, Plaxis 2D, dynamický modul

## **Abstract:**

Blasting practices are often an integral part of excavation in modern underground works. However, the application of them causes some adverse effects. One of such effects is the initiation of seismic waves, which in case of placing an underground work in an urbanized area can bring additional complications and threats to above-ground objects and lead to its destruction. In the first part, the thesis focuses on the theoretical description of the blasting works, the processes connected with the explosion and the spread of subsequent wave tension in the geological environment. In particular, the effects of seismic waves on ground objects and their measurements including the use of a valid standard are mentioned.

In the second part of the thesis, using the Plaxis 2D computer program the wave tension spread in a geological environment with the emphasis on surface effects is demonstrated. The basic input parameters for modelling these dynamic processes, which were generated by the computer program and by the Mohr-Coulomb material model, are described in the thesis. Three examples are presented, the first two are dealing with the basic principles of the model and pointing out the differences between the environment consisting of a single and multi-layered geological structure. The third example is given to map the odds in evaluation of one selected real blast and to point out the influence of the input parameters. This way has been chosen because the direct acquisition of input parameters of geological layers from the static calculation proved to be less appropriate.

## **Key words:**

seismicity, seismic waves, explosives, blasting, mathematical modelling, probability study, vibration, particle velocities, Plaxis 2D, dynamic module

# Obsah

ÚVOD.....	9
I. TEORETICKÁ ČÁST.....	10
1. Trhací technika.....	10
1.1 Historie.....	10
1.2 Základní rozdělení výbušnin.....	10
1.3 Prostředky trhací techniky.....	13
1.4 Určení ekvivalentní hmotnosti nálože.....	15
1.5 Mechanismus rozpojení horniny výbuchem.....	16
1.6 Trhací práce při ražbě liniových podzemních děl.....	18
1.7 Nežádoucí účinky trhacích prací a jejich omezení.....	19
2. Seizmicita a působení výbuchu na horninové prostředí.....	21
1.1 Základní rozdělení.....	21
1.2 Výbuch a jeho působení.....	21
1.3 Teorie vln napětí.....	23
1.4 Seismické účinky výbuchů.....	28
1.5 Měření seismických veličin a sledování zájmových objektů.....	30
1.6 Přístup dle ČSN 73 0040.....	32
1.7 Rozdílnost přístupů Eurokódu 1998 a ČSN 73 00 40.....	35
II. PRAKTICKÁ ČÁST.....	38
1. Software a parametry systému.....	38
1.1 Použitý výpočetní program.....	38
1.2 Vlivy jednotlivých parametrů.....	40
1.3 Modelování seismických účinků trhacích prací.....	46
1.4 Ověřovací úlohy.....	52
2. Studie vlivu parametrů přenosového prostředí pomocí stochastické metody.....	58
1.1 Lokalita a sledovaný objekt.....	58
1.2 Stanovení skupin parametrů pomocí metody LHS.....	60
1.3 Modelování a výpočet.....	62
3. Vyhodnocení a porovnání vypočtených hodnot.....	64
ZÁVĚR.....	68
BIBLIOGRAFIE.....	70
SEZNAM OBRÁZKŮ, TABULEK A GRAFŮ.....	74
PŘÍLOHY.....	76

Příloha 1:.....	76
Příloha 2: Vstupní sady geotechnických charakteristik vygenerované metodou LHS.....	77
Příloha 3: Grafické a tabulkové vyhodnocení parametrické studie .....	78



# Úvod

„Za vším hledej ženu“ – tak praví jedno české přísloví. V následně představené problematice by toto přísloví mohlo nejspíše znít: „za vším hledej přírodu“. Právě příroda dělá ve své nekonečné kreativitě a různorodosti krásu „většiny“ geotechnických úloh. Málokde to může být tak patrné jako při výbuchu nálože trhaviny. Každý úlomek a fragment prostředí může mít vliv na cestu vln napětí k zemskému povrchu. Právě díky této neskutečné složitosti je přesné určení vlivu vln a jejich šíření nesmírně náročné. Této mety je v současnosti nejbližší dosahováno pomocí pokročilých metod evolučních algoritmů v dobře známém prostředí povrchových dolů s častým opakováním seizmických jevů.

Problematika seizmických účinků trhacích prací se za současné utlumené výstavby podzemních děl v naší republice může zdát jako neaktuální, avšak je tomu právě naopak. Města a jejich aglomerace se stále zahušťují a prostorové nároky rostou. Na povrchu tak nezbývá mnoho místa pro výstavbu nových komunikací a objektů. Jedním z řešení je růst staveb směrem do výšky a zvětšování jejich užitého prostoru. Pro některé typy staveb to však nebývá ani vhodné, ani průchozí řešení. S rostoucími nároky na lepší mobilitu, dostupnost a zaručenost služeb je v kontrastu zajištění výstavby stále více „bezúdržbových“ inženýrských sítí či rekreačních ploch s „čistým“ ovzduším.

Elegantním řešením části těchto problémů je využití výškového rozměru města směrem pod povrch. Podzemní stavby jsou však technologicky a finančně náročné. Z tohoto důvodu si je mohou dovolit především země a města s dobrou ekonomickou situací, v nichž může hrát svou roli i příhodné geologické prostředí. Velkou část prací v podzemí dnes již umí zastat mohutné razicí stroje s funkcí mechanického rozpojování hornin. Zdá se, že však ještě dlouhou dobu budou tyto stroje na některé práce ekonomicky nevýhodné či nebudou schopny se vypořádat se složitějšími příčnými i půdorysnými tvary podzemních děl. V tento moment často přichází řada na aplikaci trhacích prací, které tyto nedostatky prozatím odstraňují. Jejich užití je však spojeno s některými negativními účinky, například šíření seizmických vln a jejich nežádoucí vlivy na zemský povrch, podzemní stavby a sítě. Kvůli vysokým nárokům na bezpečnost a maximální snížení rizik spojených s jejich provozováním, je nutné důkladné hodnocení jejich účinků již v momentu, kdy se o jejich užití či projekci uvažuje. Složitost posuzování nepramení jen z nehomogenit přenosového prostředí, ale také z mezioborové šíře tohoto problému. Vliv může mít technologie roznětu a nabíjení, samotné fyzikálně-chemické děje při iniciaci trhaviny, ale také třeba rozmístění vrtů v rozpojované čelbě.

V textu se na několika místech objevují „žluté rámečky“. Ty představují aplikaci některých zmíněných vztahů s důrazem na reálnost parametrů.

Na tomto místě bych rád poděkoval za možnost zapojit se při řešení této problematiky do *studentské grantové soutěže*, kterou byla mimo jiné tato práce podpořena, a to pod číslem OHK1-004/17 – *Inovativní řešení problémů podzemního stavitelství*.

# I. Teoretická část

## 1. Trhací technika

### 1.1 Historie

Každý děj, který v sobě skrývá velkou energii, a tím pádem i moc, k sobě přitahuje pozornost a vzniká snaha tento proces ovládnout. Moc je spojena s nadvládou a je jen jednou otázkou, zda bude užita ku prospěchu, či ovládnutí druhých. Energie výbuchové přeměny tuto velkou moc skrývá, a proto i její historie je spojena jak s velkou pomocí a ulehčení řady činností, tak s vojenským využitím.

Značnou část historie výbušnin tvoří černý (střelný) prach. Tuto směs pravděpodobně využívali již staří Číňané a jeho složení zůstalo po celá staletí až do dnešních dob prakticky neměnné: jeden díl síry, dva díly dřevěného uhlí a šest dílů ledku (draselného). Takto popsal složení Marcus Graecus v osmém století ve své *Knize ohňů*. V Evropě se střelný prach objevil prostřednictvím arabských kupců a jeho první využití se datuje k roku 1241 v bitvě u Legnice v Polsku a 1346 v bitvě u Kresčaku (Francie). K těžebním a dobývacím účelům byl prvně použit osmého února roku 1627, když jeho síly využil Kašpar Weindl při ražbě Horní Bobří stoly v Banské Štiavnici na Slovensku. Výhradní užívání střelného prachu bylo narušeno až objevem nitroglycerinu roku 1846 a posléze objevem hlinkového dynamitu Alfredem Nobelem roku 1867. Do konce devatenáctého století nastal s rozvojem chemie prudký nárůst užívání trhavin jak v průmyslu, tak ve vojenství.

První výroba výbušnin u nás byla zavedena Alfredem Nobelem v roce 1870 v Zámčích u Prahy a o tři roky později v Bratislavě. Velkou roli ve výrobě výbušnin u nás však hraje továrna Explosie v Pardubicích – Semtíně založená jako první akciová továrna tohoto druhu roku 1920 a je provozována dodnes. Ve dvacátém století dále došlo k rozšíření využití trhavin i v jiných průmyslových oborech jako je stavebnictví, metalurgie či destrukce. (1)

### 1.2 Základní rozdělení výbušnin

#### Výbuch

Výbuch je rychlý fyzikální či fyzikálně chemický děj, který vede k náhlému uvolnění energie. Dochází k rychlé přeměně stavu výbušnin z vnitřní energie na mechanickou práci (vysoký tlak a teplota výbuchových plynů). Výbuchy jsou obvykle doprovázeny světelným, tepelným a zvukovým (sekundárním) efektem. Mezi základní typy výbuchů patří: (1)

- **fyzikální** – náhlá změna potenciální energie. Imploze (výbuch žárovky či vakuových nádob) nebo exploze (protržení tlakové nádoby). Patří sem i elektrický výboj, například ve formě blesků;
- **chemický** – rychlá exotermická reakce. Využívá se při rozpojování hornin. Chemický výbuch je podmíněn několika podmínkami: velkou rychlostí přeměny, exotermičností reakce, samovolným šířením reakce, možností přeměny tepelné energie na mechanickou;
- **jaderný (termojaderný)** – příčinou je nukleární reakce (přestavba atomových jader).

Chemické reakce je dále možno rozdělit podle rychlosti děje a tlakového projevu: (2)

- **hoření**: rychlost řádově od  $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$  do desítek  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , nízký vývin tlaků;

- **deflagrace:** rychlost až několik stovek  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , tlak může dosáhnout desítek až stovek MPa;
- **výbuch:** rychlosti až nad  $1\,000\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , tlaky dosahují hodnot až jednotek GPa. Průběh tlakové funkce (nárůstu) je spojitý;
- **detonace:** rychlosti nad  $1\,000\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , v čele tlakového pole je rázová vlna. Skokový nárůst tlaku, nespojitá funkce (diskontinuita). Tlaky mohou dosahovat hodnot až desítek GPa.

### Rozdělení výbušnin podle způsobu vyvolání výbušné přeměny (3)

- **přímé:** energie potřebná k vyvolání výbuchového děje je malá. K iniciaci postačuje tření, náraz, plamen. Do této skupiny patří *třaskaviny* a *střeliviny*.
- **nepřímé:** vyžadována je větší iniciační energie (například výbuch přímé výbušnin). Zaručují bezpečnější manipulaci. Do této skupiny patří většina průmyslových trhavin.

### Rozdělení výbušnin podle výbuchové přeměny (1), (3)

- **střeliviny:** jsou látky, které mají schopnost uvolňovat hořením plyny o vysokém tlaku a teplotě (jejich přeměnou je defragrace). Obecně se dělí na střelné prachy a pohonné hmoty (kapalné, tuhé i hybridní). Střelné prachy se používají jako náplň do výmetných složek střelných zbraní, pohonné hmoty jsou výbušniny používané k pohonu raket (například tekutý kyslík /okysličovadlo/ a tekutý vodík či upravený – vysoce rafinovaný letecký petrolej /palivo/). Základní komponenty střelivin tvoří látky, které umožňují hoření. Střeliviny proto vždy obsahují ve své sestavě složky schopné okysličení (palivo) a složky okysličující (okysličovadlo). Tyto složky mohou být buď ve formě mechanické směsi, nebo může být palivová a okysličující složka v jedné molekule chemické sloučeniny. Představitelem prvního typu střeliviny je černý prach, představitelem druhého typu je pak bezdýmný nitrocelulóзовý prach.
- **třaskaviny:** jsou to přímé výbušniny, které lze k výbuchu přivést poměrně malým podnětem. Mají schopnost rychlého přechodu od výbuchového hoření k detonaci. Již ve velmi malých množstvích (setiny gramu) jsou schopny dosáhnout rychlého rozkladu. Uvolněná energie je menší než u výbušnin. Používají se většinou pro iniciaci průmyslových trhavin a tvoří primární náplň rozbušek. Jsou to například tyto látky: třaskavá rtuť, azid stříbrný, azid olovnatý atd.
- **trhaviny:** jejich hlavní přeměnou je detonace. Pro jejich iniciaci je nutné dodat větší energii než u třaskavin (detonace jiné výbušnin). Můžeme je rozdělit na vojenské a průmyslové. Vojenské trhaviny mívají vyšší (delší) detonační rychlosti, brizanci, spotřební lhůty, pořizovací ceny, a také vyšší produkci jedovatých plynů. Pro využití TP při ražbách a těžení jsou průmyslové trhaviny základním prostředkem rozpojování hornin.
- **výbušné pyrotechnické slože:** výbuchovou přeměnou je defragrace a výjimečně detonace. To jsou například směsi pro zábavní pyrotechniku obsahující slože s kovovými prášky.

### Rozdělení průmyslových trhavin podle složení a konzistence (1), (3)

- 1) **trhaviny s obsahem výbušných komponent** (pro iniciaci slouží standardní rozbušky; někdy nazývané jako klasické trhaviny)
  - a. *plastické (želatinové) trhaviny* – jejich konzistence je tvárná a jejich hlavní složkou bývá nitroglycerin nebo nitroglykol. Hustota bývá  $1,4$  až  $1,6\ \text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$  a využívají se

v pevných a velmi pevných horninách. Bývají voděodolné, mají vyšší brizanci a nízký kritický průměr.

- b. *Sypké trhaviny* – mají sypkou konzistenci. Bývají to směsi dusičnanu amonného s výbušnými i nevýbušnými látkami. Mívají nízkou odolnost proti vodě, menší brizanci a specifickou hmotnost, jsou náchylné k přehutnění. Přednostmi jsou nízká cena a vysoká manipulační bezpečnost.
- c. *tuhé (lisované) nebo lité trhaviny* – mívají vyšší hodnoty detonační rychlosti. Slouží jako počinové náložky (zajišťující vyšší rychlosti detonace) a pro účely druhotného rozpojování nadměrných kusů či odstřely vrtných tyčí. Patří sem například lisovaný pentrit či Semtex Razor.

2) **trhaviny bez obsahu výbušných komponent** (pro iniciaci je většinou potřeba počinová náložka; někdy nazývané jako neklasické trhaviny)

- a. *trhaviny DAP (ANFO, ANC)* – směsi dusičnanu amonného a paliva. Jsou používány především pro práce na povrchu. Palivem bývá topný olej či motorová nafta. Složení směsi bývá 95 % dusičnanu amonného a 5 % paliva. Výhodami jsou nízká cena a možnost přípravy na místě spotřeby. Mezi nevýhody patří nutnost silného počinu a menší odolnost proti vodě.
- b. *emulzní (slurry) trhaviny* – emulze typu *voda v oleji*. Mívají tekutou až gelovou konzistenci. Jsou rychle se rozvíjejícím typem výbušnin a můžeme je dělit do časových i kvalitativních generací. Nové generace se odlišují především nepřítomností výbušného senzibilátoru. Jsou to směsi nasycených organických roztoků s olejem. Jako senzibilátor jsou používány duté skleněné mikrokuličky. Tento typ trhaviny je vhodný pro ražbu velkopřůměrových děl při použití nabíjecích vozů. Při selhávce je zbytek trhaviny (kuličky se rozdrtí) znečtivěn a není již považován za trhavinu.
- c. *hybridní (kombinované) trhaviny* – směsi trhaviny DAP a emulzních matic. Využívány jsou také demilitarizované energetické materiály v kombinaci se směsí DAP. Mají vyšší koncentraci energie než trhaviny DAP a taktéž větší voděodolnost.
- d. *vodní gely* – emulze typu *olej ve vodě*. Bývají zcitlivěny TNT.

3) **deflagrující výbušniny** (při silném počinu v uzavřeném prostoru mohou i detonovat; příkladem může být černý prach používaný pro blokovou těžbu kamene a trhaviny na bázi delaborovaných bezdýmných prachů)

**Balení a dopravování trhavin (3)**

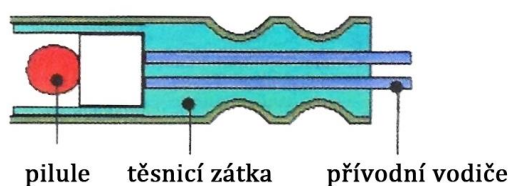
- **volně sypané** (čerpané): jedná se o trhaviny připravované na místě. Hodí se při větší aplikaci (hromadné odstřely). Lze sem zařadit směsi DAP a emulzní trhaviny, které jsou vyráběny mísicími a nabíjecími vozy.
- **pytlované**: jsou baleny většinou v PVC pytlicích a používají se pro trhaviny sypké konzistence.
- **válcované náložky**: malopřůměrové (do průměru 50 mm), velkopřůměrové (průměr nad 50 mm). Jsou baleny v PVC foliích, které poskytují trhavinám vyšší voděodolnost.
- **speciální**: cisterny či IBC nádoby pro tekuté trhaviny, sáčky pro příložné nálože, kumulativní nálože atd.

### 1.3 Prostředky trhací techniky

K iniciaci výbušnin se používají rozněcovadla. Prostředky pro roznět se dělí na základní, pomocné a doplňkové. Mezi doplňková lze zařadit (již nepoužívané) zážehovače zápalnic a milisekundové zpoždovače bleskovic.

#### Rozněcovadla (3)

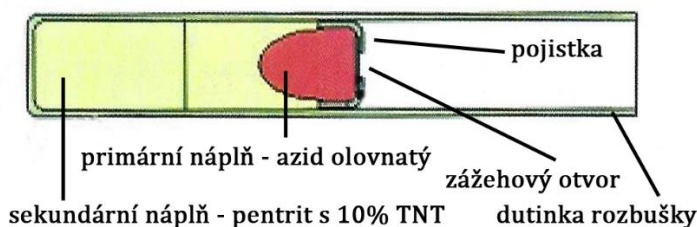
Mezi základní rozněcovadla patří elektrický palník a rozbušky. Elektrický palník slouží k iniciaci zážehových rozbušek a přímých trhavin. Je tvořen elektrickou pilulí, přívodními vodiči a dutinkou. Jeho funkce je dána ohřevem pilule díky průchodu elektrického proudu můstkem pilule (odporový drát). Dosáhne-li teplota slož zážehové teploty, dojde k její aktivaci (zašlenutí). Tato slož pak iniciuje připojenou zápalnici či zážehovou rozbušku. Hlavní vliv na funkci palníku má oteplení můstku v závislosti na velikosti procházejícího elektrického proudu. (3)



Obrázek č. 1: Schéma elektrického palníku, upraveno podle (3)

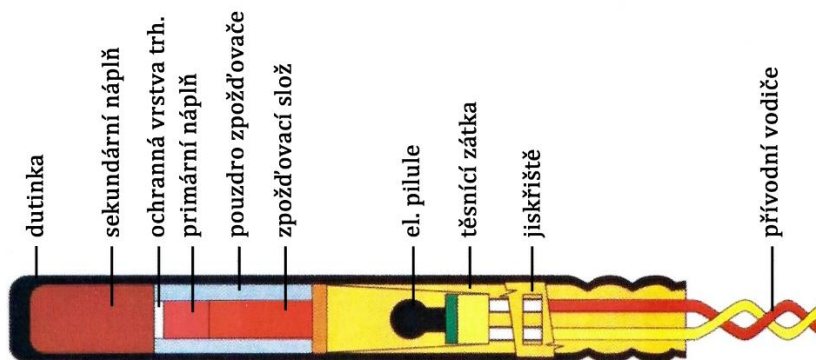
Rozbušky je možné dělit podle způsobu iniciace, a zároveň i podle jejich časového vývoje.

- **zážehové:** jsou iniciovány výšlehem zápalnice či el. palníku, nejsou časovány.



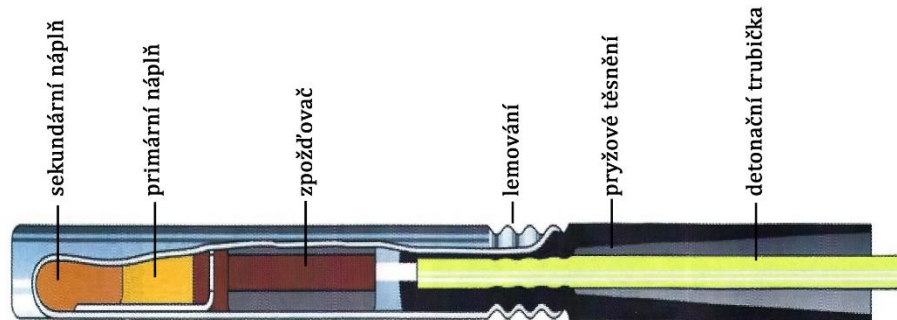
Obrázek č. 2: Schéma zážehové rozbušky, upraveno podle (3)

- **elektrické:** iniciovány elektrickým impulsem, popřípadě elektrickým proudem. Existují ve variantách mžikových (reakční čas do 4 ms) a časovaných. Časované se dělí na milisekundové (rozpětí časů zpoždění po 25 ms) a délečasované (po 250 ms a 500 ms). Zpoždění je dáno délkou zpožďovací slož.



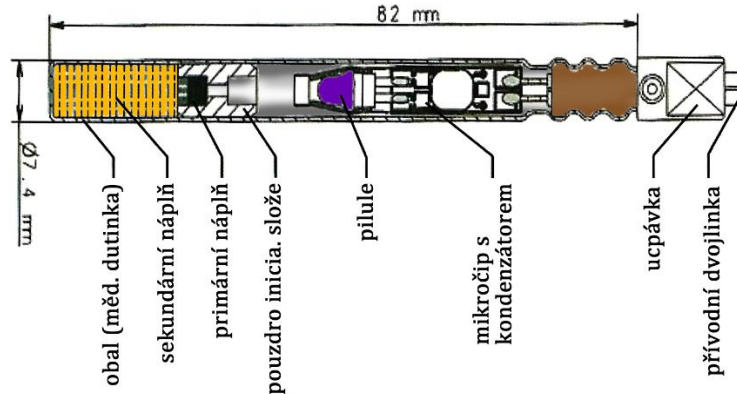
Obrázek č. 3: Schéma elektrické rozbušky, upraveno podle (3)

- **neelektrické:** iniciovány rázem, existují ve variantách pro iniciaci trhavin (milisekundové, délečasované), pro časování roznětných sítí, svazkovače. Používají se často pro ražby podzemních děl. Jejich výhodami jsou vyšší bezpečnost díky vyloučení vlivu cizích zdrojů elektrické energie, dále vytváření časovaných sítí s vysokou variabilitou, velké množství současně zapojených rozbušek, použití ve vlhkém prostředí bez zabezpečení spojů.



Obrázek č. 4: Schéma neelektrické rozbušky typ EXCEL, upraveno podle (3)

- **elektronické:** iniciovány elektrickým impulsem po elektronickém povelu. Zpoždění rozbušky není dáno hořením pyrotechnických složí, ale pomocí elektronické části rozbušky. Zážeh je proveden po uvolnění elektrické energie z kondenzátoru umístěného v rozbušce. Pomocí programovacích a testovacích jednotek je možné nastavit téměř libovolné zpoždění a je možná i kontrola jednotlivých rozbušek pomocí jejich specifického čísla v síti.



Obrázek č. 5: Schéma elektronické rozbušky, upraveno podle (3)

Jako pomocná rozněcovadla jsou považována zápalnice a bleskovice. Zápalnice se již moc nevyužívá a je tvořena náplní zápalnicového černého prachu a izolačním obalem. Rychlost hoření standardní zápalnice je přibližně 1,25 m/h. Bleskovice je tvořena brizantní trhavinou a slouží k přenosu detonace. Je vyráběna v různých množstvích nálože obsaženém v běžném metru délky zápalnice (6 až 100 g/m). Detonační rychlost se pohybuje okolo 6 500 m.s<sup>-1</sup>.

Pomůcky pro trhací práce jsou především roznětnice (přenosný zdroj energie určený pro roznět rozněcovadel), kontrolní měřicí přístroje, pomůcky pro nabíjení (nabíjecí tyče), ucpávky vývrtů (jílový materiál, vodní či vzduchové obaly) atd.

## 1.4 Určení ekvivalentní hmotnosti nálože

K výpočtu celkové hmotnosti nálože potřebné pro dosažení odpovídajícího rozpojení na délku požadovaného záběru je možné přistoupit dvěma způsoby: *globální metodou*, pomocí níž stanovíme celkovou hmotnost náloží a které se pak rozdělí na dílčí, nebo *individuální metodou*, která stanovuje hmotnost každé nálože zvlášť (za podmínek dobré znalosti rozpojovaného prostředí). (1)

Pro základní návrh technologie TP je především využívána metoda globální, kde jedním z důležitých parametrů je *střední měrná spotřeba trhaviny* –  $q_{stř}$ . Existuje mnoho empirických a poloempirických vztahů pro výpočet tohoto parametru podle různých autorů. Níže jsou na ukázkou uvedeny vztahy dle Protodjakonova (1):

$$q_{stř} = \sqrt{\frac{f}{F_{hr}}}, \quad q_{stř} = 0,5 \left( \sqrt{0,2 \cdot f} + \frac{1}{F_{hr}} \right)^2, \quad [1]$$

kde vztah vlevo je tzv. přibližná varianta a vztah napravo je tzv. upřesněná varianta;  $q_{stř}$  – střední měrná spotřeba trhaviny [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ],  $F_{hr}$  – hrubý (výlomový) průřez díla [ $\text{m}^2$ ],  $f$  – koeficient pevnosti rozpojované horniny podle Protodjakonova.

*Příklad výpočtu:* Pro zdravé prokřemenělé břidlice uvažujme součinitel podle Protodjakonova  $f = 10$ . Ražený profil má průřez  $F_{hr} = 20 \text{ m}^2$ .

$$\Rightarrow q_{stř} = \sqrt{\frac{f}{F_{hr}}} = \sqrt{\frac{10}{20}} = \underline{0,71 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}} \text{ (přibližný vztah)}$$

$$\Rightarrow q_{stř} = 0,5 \left( \sqrt{0,2 \cdot f} + \frac{1}{F_{hr}} \right)^2 = 0,5 \left( \sqrt{0,2 \cdot 10} + \frac{1}{20} \right)^2 = \underline{1,07 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}} \text{ (upřesněný vztah)}$$

Výpočet maximální délky záběru je možné provést podle vztahu Mečíře-Válka uvedeném v (3):

$$W_{max} = \sqrt{\frac{K_m}{q \cdot \chi}}, \quad [2]$$

kde  $W_{max}$  – maximální délka záběru [m] (odporová přímka),  $K_m$  – náložová hustota (množství trhaviny v jednom běžném metru vrtu, bývá cca 1,0 kg/m),  $q$  – měrná spotřeba trhaviny [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ],  $\chi$  – opravný součinitel (průměrně 0,85).

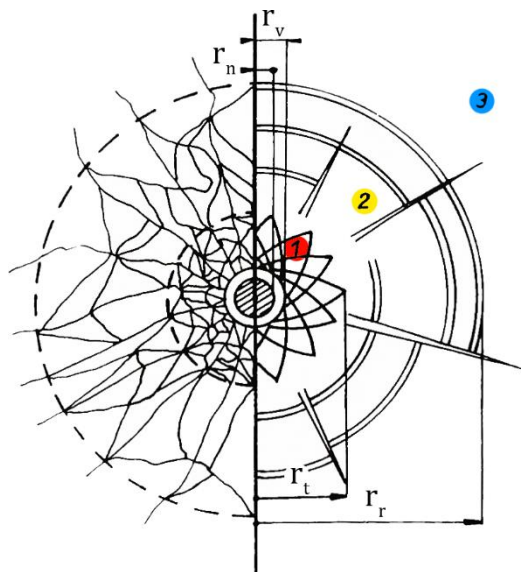
Nakonec výpočet celkové nálože je dán vynásobením měrné spotřeby trhaviny –  $q$  [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ] a předpokládaným objemem rozpojované horniny –  $V$  [ $\text{m}^3$ ].

Pro maximální hmotnost nálože, odpálené v jednom časovém stupni, je určující výpočet ekvivalentní hmotnosti nálože, který se provede dle ČSN 73 0040 v závislosti na omezení maximální rychlosti kmitání povrchu (viz níže vzorec [42]).

Při dalším výpočtu se podle navrženého vrtného schématu posuzují jednotlivé prvky schématu (nálože pro zálom, obrys atd.). (3), (1)

## 1.5 Mechanismus rozpojení horniny výbuchem

Princip rozpojení horniny výbuchem bude představen za podmínek homogenního skalního prostředí (viz níže Obrázek č. 6). Po iniciaci výbušniny (podrobněji viz níže kapitola 2.2) se všemi směry začne šířit detonační vlna. Rychlost šíření vln napětí bývá většinou nižší než detonační rychlost výbušniny, a proto bude uvažován předpoklad, že výbuchové plyny začnou působit na stěny vrtu ve všech bodech zároveň. Výbuchové plyny během velmi krátké doby, která je vymezena pro detonaci nálože, nedokážou předat teplo obklopujícímu prostředí, takže je možno tento děj považovat za *adiabatický* (soustava žádné teplo nepřijímá, ani nevydává). V počátečních fázích tlak dosahuje hodnot i několika tisíc megapascalů a vysoce převyšuje tlakovou pevnost horniny. Tímto se vytváří oblast silně stlačené a drcené horniny, která může přejít až do stavu kapaliny – tato oblast se nazývá *zóna drcení* nebo také *zóna tangenciálních trhlin* (poloměr –  $r_t$ ). Hornina se pod silným tlakem začne pohybovat směrem od nálože, a tím vzniká rázová vlna, která se šíří nadzvukovou rychlostí. S narůstající vzdáleností ale rázová vlna rychle ztrácí energii (rychlost) a v místě, kde již tlak nedosahuje napětí překračující pevnost horniny v tlaku, se začínají šířit smyková napětí. Tím se mění charakter porušení a dále se již šíří jen napěťová vlna vyvolávající radiální posuny částic. Těmito posuny vznikají tangenciální napětí, která převyšují pevnost horniny v tahu a od *zóny drcení* se tak šíří trhliny radiální. Tyto trhliny se dále šíří až do vzdálenosti, kde už napětí nedosahují tahové pevnosti a tato zóna se označuje jako *zóna radiálních trhlin* (poloměr –  $r_r$ ). Jak se trhliny šíří směrem od nálože, vzniklý prostor se vyplňuje výbuchovými plyny, které zvětšují svůj objem a snižují teplotu, a které tak mohou napomáhat dalšímu šíření trhlin. Pohyb částic horniny pokračuje ještě nějakou dobu setrvačností a takto zvyšuje svoji potenciální energii. Ve chvíli, kdy dosáhne svého maxima, se vlivem odpružení a podtlaku, vzniklém v plynech, začne pohybovat směrem k náloži. Tento proces vede k chvilkovému kmitání, avšak pod vlivem útlumu a ztrát energie při trvalých deformacích rychle odeznívá síla následných vln a ty už pak nedosahují hodnot rázové vlny. Ve vzdálenosti přibližně  $200 r_n$  (poloměr nálože) dojde k přechodu rázové vlny v akustickou a za *zónou radiálních trhlin* se již nachází pouze *zóna pružných deformací*<sup>1</sup>. Po skončení dynamických dějů zůstává v hornině výbuchová dutina naplněná povýbuchovými plyny o určité teplotě a tlaku.



Obrázek č. 6: Mechanismus rozpojení horniny výbuchem (neohraničené homogenní prostředí). 1 – zóna deformací, 2 – zóna trhlin, 3 – zóna pružných deformací. Převzato a upraveno z (1)

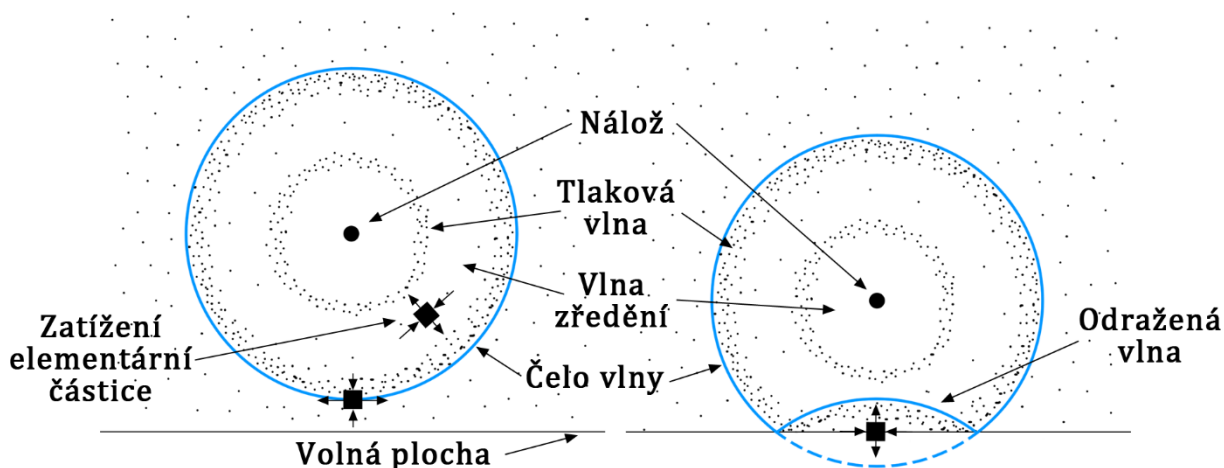
Popsaný proces šíření jednotlivých zón platí pro pevné a křehké horniny. Pro soudržné zeminy je sled zón následující: *zóna drcení*, pak *zóna pružno-plastických deformací* a nakonec *zóna pružných deformací*. (1), (4)

V reálných situacích je nálož uložena v určité hloubce či vzdálenosti od volného povrchu. Posloupnost dějů je pak následující: po iniciaci výbušniny se prostředím šíří tlakové vlny a hornina

<sup>1</sup> Hodnoty poloměrů zón se liší dle autorů. Obecně lze shrnout, že zóna drcení se nachází ve vzdálenosti jednoho až pěti poloměrů nálože od geometrického středu nálože a zóna radiálních trhlin zasahuje do vzdálenosti dvaceti až padesáti poloměrů nálože. (1)



je stlačována v radiálních směrech (platí vše výše zmíněné). Po dosažení tlakové vlny volného povrchu se vlna setká s nulovým odporem a plocha se začíná klenout a jsou vyvolávány tahová namáhání v rovině volné plochy. Vlna napětí se na hraně volné plochy štěpí a odráží. Část energie prochází rozhraním volné plochy dál a je nenávratně ztracena. Další část je pak odražena zpět do horniny jako *vlna tahová* (neboli *zředění*). Tahová napětí tvoří podmínky pro rozvoj trhlin ve tvaru koncentrických kružnic se středem v zrcadlovém obrazu nálože. Účinkem odtržení je masiv odštěpován směrem od nálože – tomuto jevu se říká *odštěpový efekt*. (1)



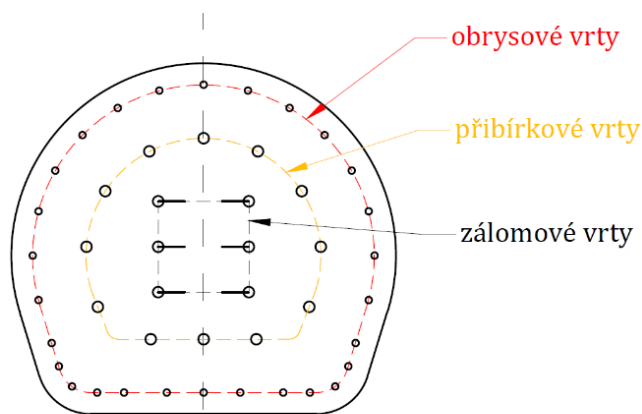
Obrázek č. 7: Odraz na hranici volné plochy. Stejný okamžik, avšak rozdílná vzdálenost náloží od volné plochy. Tečky představují hustotu prostředí, šipky na elementárních částicích hlavní směry napětí.

Ve snaze dosáhnout co nejlepšího rozpojení masivu náloží byla provedena řada studií. Důležité závěry byly následující: vysokého efektu rozpojení se dosáhne, pokud je nálož v dalším časovém stupni odpálena až po odeznění napětí vyvolané předešlou náloží. Kinetická energie masy vyvržené horniny z předešlého časového stupně se může využít k další fragmentaci následující vyvržené masy. Hlavním faktorem rozpojení horniny je systém radiálních trhlin. V tomto světle je *odštěpový efekt*, zmíněný výše, částečně vyvrácen a je připouštěn pouze v situacích, kdy měrná nálož převyšuje  $5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  (běžné hodnoty se pohybují okolo  $0,5$  až  $1 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ). (1)

U reálné geologické stavby masivu je tento proces komplikován plochami nespojitosti. Každá plocha může tvořit pro vlny napětí místo štěpení a odrazů. Míra, kterou bude vlna odražena, je dána tzv. *akustickou impedancí* (viz níže kapitola 2.3). Výsledný obraz vln je tak značně komplikován a na povrch země působí velmi interferující soubor seizmických vln s možným dopadem na pozemní objekty.

## 1.6 Trhací práce při ražbě liniových podzemních děl

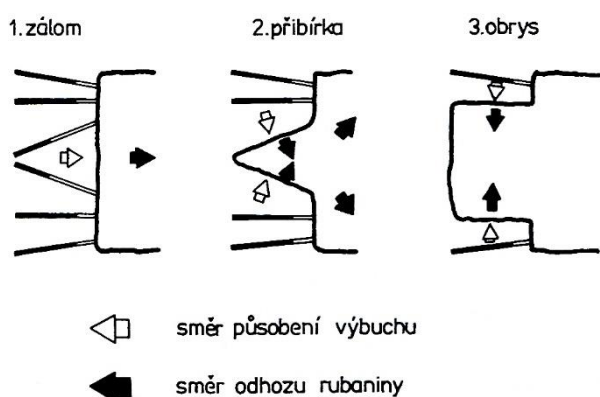
Úspěšné rozpojení horniny v požadovaném záběru je závislé především na vhodně zvoleném vrtném schématu. Na těchto schématech je k nalezení umístění jednotlivých vrtů pro nálože v ploše čelby a jejich případný úklon od kolmého směru (vzhledem k rovině čelby). Ražba štol a tunelů probíhá prakticky s maximální hodnotou upnutí horniny (daná počtem volných ploch). Pro tento stav se rozeznávají dva základní přístupy – *se zálomem* a *bez zálomu*. Častěji využívaný je prvně zmíněný *zálomový*<sup>2</sup> způsob ražby.



Obrázek č. 8: Schéma rozdělení skupin vrtů

Základní vrtné schéma pro tento způsob je vidět na obrázku č. 8 vlevo. Úkolem zálomových vrtů je vytvořit v čelbě (hornině) prvotní vlom a uvolnit tak maximální počáteční upnutí pro další část odstřelu. Spotřeba trhaviny je největší, neboť je potřeba nejvíce práce pro překonání odporu maximálně upnuté horniny. Záloem se provádí s časovým předstihem tak, aby hornina stačila dokonat odtržení a odhození z prostoru zálomových vrtů. Nálože přibírkové již nejsou ve stavu maximálního upnutí a mohou obsahovat méně nabitě vrtů, případně být ve větších rozestupech. Jejich úkolem je rozšířit vlom učiněný zálomovými vrtů. Nálože obrysové nakonec dokončují požadovaný tvar průřezu. Časové pořadí jednotlivých skupin vrtů je standardně: 1. zálomové vrtů, 2. přibírkové vrtů, 3. obrysové vrtů. Některé metody však využívají jiného pořadí časování skupin. To je například metoda zvaná *presplitting*, která pro zpřesnění obrysu a snížení namáhání způsobeného trhacími pracemi a vstupujícího do masivu časuje odpálení obrysových vrtů jako prvního děje při rozpojování čelby. Odpálení obrysových vrtů způsobí vytvoření štěrbiny (*impedanční bariéry*) kolem rozpojované oblasti, a tím omezí následné účinky ostatních výbuchů.

Další metodou pro zpřesnění obrysových prací může být metoda *hladkého výlomu* (*Smooth Blasting*), která využívá odlehčení obrysových vrtů (odstínění nálože směrem vně výrubu pomocí dřevěných či plastových latí nebo menší nálože), či metoda *ovrtání*, která využívá nenabitě obrysové vrtů. Metody, které mají za cíl omezit zaobrysové namáhání masivu, se souhrnně nazývají *metody řízeného výlomu*. Díky charakteru těchto metod je možné je využít i na snížení nežádoucích seizmických účinků TP.

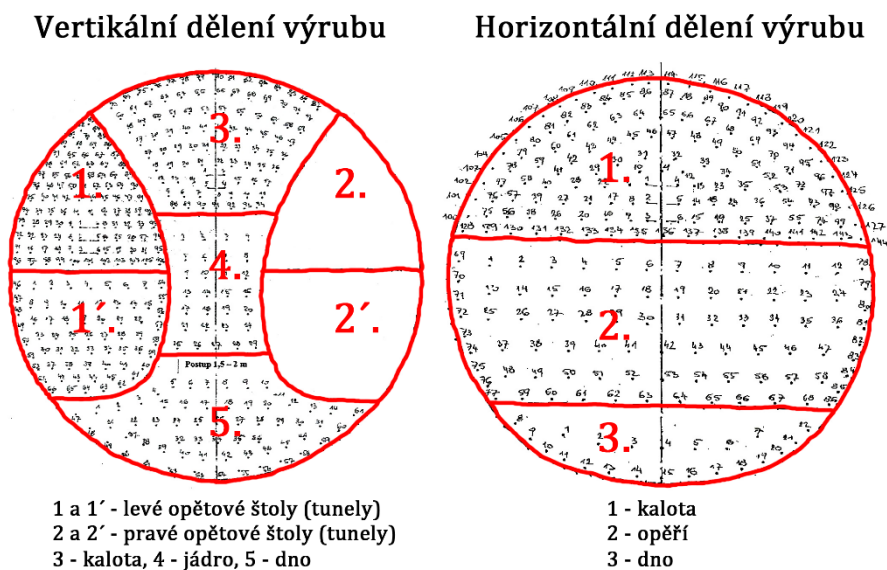


Obrázek č. 9: Směr působení výbuchu a odhozu rubaniny v jednotlivých fázích zálomového ražení, převzato z (1)

<sup>2</sup> Existuje velké množství zálomových schémat. Základní dělení je na sbíhavé, přímé a přechodné zálomy. (1)

<sup>3</sup> NRTM – observační metoda využívající spolupůsobení horninového prostředí. Výrub stříkaným betonem bývá obvykle zajištěn.

geologických podmínkách v tvrdších horninách), nebo formu čelby dělené. Čelba je nejčastěji klasifikována na vertikální nebo horizontální schéma.



Obrázek č. 10: Vrtná schémata pro velkoprofilové tunely ražené metodou NRTM, upraveno podle (3)

## 1.7 Nežádoucí účinky trhacích prací a jejich omezení

Práci, kterou vykoná nálož po iniciaci, je možné zjednodušeně rozdělit na užitečné a škodlivé účinky (viz kapitola 2.2). Užitečnými účinky se rozumí požadované rozpojení a odhození rubaniny z rozpojovaného prostoru. Míra nežádoucích účinků je přímo úměrná hmotnosti nálož, a tak jejich působení nezřídka limituje samotný návrh technologie TP. 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. Mezi nežádoucí účinky zařazujeme: (1)

- **porušení horninového masivu za požadovaným výlomem** – to může být způsobeno například větší hmotností odpálené nálož, nebo špatnými geologickými podmínkami (nevhodně ukloněné diskontinuity). Tento účinek můžeme omezit snížením hmotnosti nálož, změnou časování jednotlivých nálož, vložením stínění do obrysových vrtů, volbou rozpojovací metody (například presplitting);
- **nadměrný odhoz a rozlet horniny** – odhoz se týká celého objemu rozpojované horniny, rozlet pak jednotlivých zrn, která mohou být vržena do značně velkých vzdáleností. Obě složky jsou důsledkem expandujících produktů výbuchu. Mezi hlavní příčiny může patřit nadměrná hmotnost nálož, lokální zeslabení masivu, nedostatečná délka ucpávky. Kromě snížení hmotnosti nálož může tyto efekty redukovat použití milisekundového časování či ochranných rohoží zabraňující nežádoucímu rozletu;
- **vzdušná tlaková vlna a zvukový efekt** – je vlna tvořená úzkou vrstvou stlačeného vzduchu (podélná vlna). Ta je v blízkosti zdroje výbuchu tvořena rázovou vlnou a s narůstající vzdáleností přechází do vlny akustické, která se šíří rychlostí zvuku ve vzduchu. Při dopadu tlakové vlny na pevnou překážku se, mimo tlaku na čele rázové vlny, projeví i účinek nárazu částic vzduchu na překážku (reflexní tlak). Výsledný tlakový účinek může být dvakrát až osmkrát větší než hodnoty přetlaku na čele rázové vlny. Doprovodným jevem je efekt zvukový. Pro lidský organismus jsou škodlivé již poměrně malé hodnoty přetlaku. Lidský bubínek poruší přetlak 2 kPa až 5 kPa a skleněné tabule mohou být porušeny dle velikosti v rozmezí 1 kPa až 10 kPa. Intenzita tlakové vlny je

především funkce vzdálenosti, hmotnosti nálože a stupně utěsnění. Dovolené intenzity hluku jsou předepsány v *Narižení vlády č. 272/2011 Sb., o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací* (viz níže kapitola 2.4). V uzavřeném podzemním díle je možné přetlak na čele rázové vlny vypočítat následujícím vztahem podle Sadovského (5):

$$P_v = \frac{8,8 \cdot Q}{S \cdot L} + 1,46 \left( \frac{Q}{S \cdot L} \right)^{\frac{2}{3}} + 0,181 \left( \frac{Q}{S \cdot L} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad [3]$$

kde  $P_v$  – přetlak na čele rázové vlny [MPa],  $Q$  – hmotnost nálože [kg],  $S$  – průřez podzemního díla [m<sup>2</sup>],  $L$  – vzdálenost od výbuchu [m].

Vliv na snížení účinků vzdušné vlny může mít dobré utěsnění vrtů. Účinky jsou zároveň velmi závislé na atmosférických podmínkách, kdy vlhké prostředí lépe přenáší tlakové vlny a tím se zvětšují i nežádoucí účinky; (6)

- **seizmické účinky** – jsou probírány v kapitole 2.4. Na tomto místě zmíním především možnosti, jak seismické účinky minimalizovat. Možnost snížit seismické účinky je omezena prakticky pouze na zdroj (tzn. technologii rozpojení). První způsob zahrnuje snižování hmotnosti nálože odpálené v prostoru a čase (vyhnutí se současnému roznětu více náloží najednou), kratší délku vrtů, dělení nálože v rámci vrtu a práci s optimální hodnotou měrné nálože. Druhá možnost skýtá zajištění ideálních geometrických podmínek pro rozpojování horniny. Největším účinkem je nálož odpálená v geometricky neohraničeném prostředí. Nižšího stupně upnutí se dosáhne zešikmením stěny a vrtů, menší vzdáleností vrtů a vhodným časováním náloží, kdy nálož předešlá vytvoří volnou plochu pro následný časový stupeň. Jednou z existujících možností ochrany objektu je také vytvoření impedanční bariéry formou diskontinuity (trhliny) mezi zdrojem (výbuch) a přijímačem (budova). Vytvoření může zajistit například metoda presplitingu;
- **jedovaté povýbuchové plyny** – vliv na jejich objem je dán částečně kyslíkovou bilancí trhaviny a částečně je pevně svázán složením trhaviny a její hmotností. Hlavními složkami jsou oxidy dusíku NO<sub>x</sub> (NO + NO<sub>2</sub>), oxid uhelnatý CO, případně sirovodík H<sub>2</sub>S a oxid siřičitý SO<sub>2</sub> (pokud síru obsahují trhaviny či horniny). Měrný objem jednotlivých jedovatých plynů se v závislosti na jejich toxicitě stanovuje přepočtem na tzv. *ekvivalentní CO*. Obvyklá hodnota tohoto objemu se pohybuje okolo 50 dm<sup>3</sup>.kg<sup>-1</sup> výbušniny. Projekt větrání, který by měl být dostatečně nadimenzován pro efektivní odvádění těchto mdlých větrů, je vhodně navrženým způsobem likvidace jedovatých plynů. (1)

## 2. Seizmicita a působení výbuchu na horninové prostředí

### 1.1 Základní rozdělení

Seizmicitou nebo také seizmickým zatížením se většinou rozumí nahodilé zatížení vyvolané pohybem základové půdy a mívá vlnový charakter. Běžně se rozeznává seizmicita podle původu zdroje kmitání. Podle tohoto hlediska je pak dělena na seizmicitu *přírodní* a seizmicitu *technickou*. (7)

#### Přírodní seizmicita

Přírodní seizmicita je nazývána zemětřesením. Jeho zdrojem je náhlé uvolnění energie v zemské kůře (hloubka do 40 km) nebo ve vrchní vrstvě zemského pláště (do 700 km). Deformační energie pocházející z pohybu tektonických desek je příčinou uvolnění energie. (z podstatné části a tento zdroj tvoří až 90 % z celkového počtu zemětřesení). Dalším zdrojem může být kinetická energie vyvolaná například řícením stropů v podzemí (přibližně 3 % z celkového počtu) nebo energií výbuchu pocházející ze sopečné činnosti (7 %). Projevem zemětřesení jsou silné otřesy šířící se do okolí. Je při něm deformována zemská kůra, vznikají zlomy a trhliny. Náhlý pohyb mořského dna může vyvolat přílivové vlny – tzv. *tsunami*. Tento náhlý pohyb má krátkodobé trvání (většinou s možností opakování a doznívání otřesů) a dosah v rozmezí kilometrů až desítek kilometrů. Dominantní frekvence bývají v rozsahu  $f = 0,5 \text{ Hz}$  až  $10 \text{ Hz}$ . (7)

#### Technická seizmicita

Její zdroj je spojen s lidskou činností. Patří sem například doprava, průmyslová činnost, trhačí práce, pulzace vodního proudu atd. Seizmické otřesy vyvolané činností strojů jsou označovány jako *průmyslová seizmicita*. Zvláštní kategorií je tzv. *seizmicita indukovaná*, která vzniká za doprovodu důlní činnosti, kvůli nadměrné změně zatížení zemského povrchu (velké výsypky či přehrady) či kvůli nadměrnému čerpání podzemních zdrojů vody, plynů, ropy atd. Tyto děje mohou mít ustálené, impulsní nebo přechodové charakter. Nemívají tak velký dosah jako přírodní seizmicita, a to z důvodu menšího množství uvolněné energie. Dominantní frekvence se pohybují v rozmezí  $f = 2 \text{ Hz}$  až  $100 \text{ Hz}$ . (7)

#### Projevy na území ČR

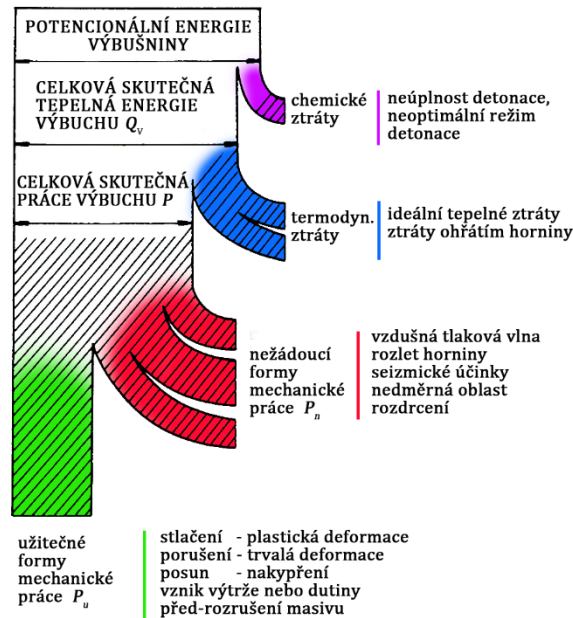
Přírodní seizmicita je na našem území nezdědká se objevující jev. Především oblasti na východě (hranice se Slovenskem) a západě republiky (hranice s Německem) jsou občas seizmicky aktivní. Z nedávné doby je možno uvést zemětřesení na přelomu let 1985 a 1986 v oblasti Nového Kostela, kde zemětřesení dosáhlo lokálního stupně magnitudo 4,8. U nás k hlavním projevům seizmicity vyvolané lidmi dochází kvůli indukované seizmicitě v oblastech Karvinska, Kladenska a Karviné. V oblasti ostravsko-karvinské pánve je v současnosti umístěna pozorovací síť seizmometrů, která detekuje ročně 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 dosahovaly tam hodnoty 3,8 magnitudo. (8), (9)

### 1.2 Výbuch a jeho působení

Energie skrytá ve výbušnině je dána jejím složením. Nosičem energie jsou molekuly výbušniny a samotná energie je obsažena ve vazbách mezi atomy. Tam byla vložena během

syntézy (slučování) látky a vzhledem k tomu, že systém výbušniny je labilnější než produkty výbušné přeměny, svým rozpadem ji umí uvolnit. (2)

Výbušné teplo (energie) je tedy možné, dle chemického složení trhaviny, vypočítat. Tato energie představuje výchozí stav veškeré dostupné potenciální energie, která může být využita ve formě práce výbušniny. Energie ale není využita bezesbýtku jen na potřebné rozpojení horniny. Přehledně shrnuje jednotlivé ztráty a nežádoucí využití energie výbuchu diagram podle Beljajeva (10).



Obrázek č. 11: Proudový diagram práce výbuchu podle Beljajeva,  $Q_v$  – výbušné teplo trhaviny, převzato z (8) a (1)

Po iniciaci výbušniny dojde k její detonaci (výbušná přeměna). Hmota výbušniny se přemění na výbušné plyny o vysoké teplotě a tlaku. Tento proces uvolní velké množství tepelné energie  $Q_v$ . Práce výbuchu se realizuje pomocí rozpínajících se výbušných plynů, které konají mechanickou práci. Působení na okolní prostředí je dvojího typu, přičemž obě formy jsou na sobě závislé a časově na sebe navazují:

- a) dynamický ráz,
- b) kvazistatický tlak plynů.

I při ideálních podmínkách výbuchu dochází ke ztrátám potenciální energie. Tato část představuje asi 10 % celkové potenciální energie výbušniny a zbývající část (považuje se za celkovou energii) se realizuje pomocí užitečných a nežádoucích forem práce (viz kapitola výše 1.7). (1)

Užitečné formy práce je možné dále rozdělit podle příslušného místa působení na *brizanci* a *pracovní schopnost*. Jejich hodnoty jsou dány druhem trhaviny a podmínkami rozpojování. *Brizance* (tříštivost) je vyvolána prudkým nárazem detonační vlny na povrch vrtu a je zodpovědná za intenzivní drčení horniny v oblasti okolí výbušniny. Závisí na hustotě trhaviny a její detonační rychlosti. Pracovní schopnost (nebo také někdy objemový účinek) charakterizuje účinek výbuchu v celém objemu, vztahuje se na deformaci i posun horniny v tělese rozpojení, je závislá na výbušném teple  $Q_v$  a měrném objemu výbušných plynů. Pracovní schopnost je charakteristická vytvořením výtrže či sklípku v horninovém masivu. (1)

Určení přesnějších poměrů rozdělení částí potenciální energie je velmi obtížné. Odhaduje se, že na užitečné 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 tedy dána součtem užitečných prací  $P_u$  a nežádoucích forem prací  $P_n$ , přičemž hodnota celkové práce je konstantní.

$$P = P_n + P_u = konst. \quad [4]$$

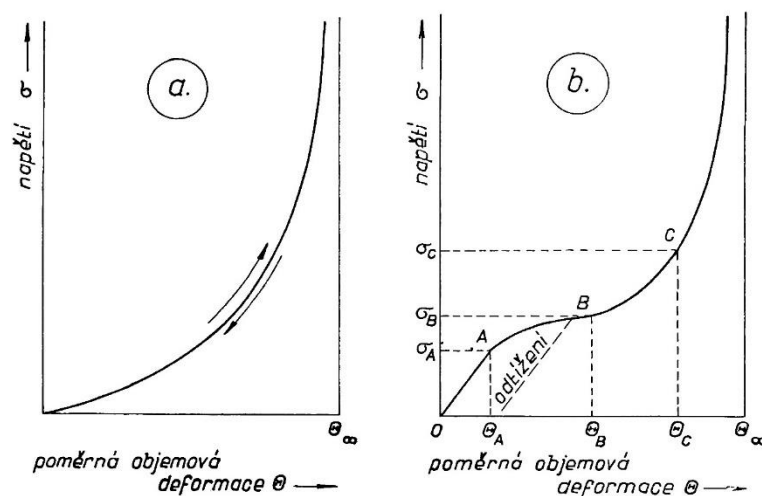
### 1.3 Teorie vln napětí

Základem výbuchového procesu probíhajícího ve výbušninách a jejich přilehlém okolí jsou vlny napětí. Již samotná detonační vlna, šířící se výbušninou, je vlnou napětí, v níž mají výbuchové plyny vysoký tlak, teplotu apod. Po detonaci se vytvoří vlna napětí i v obklopujícím prostředí.

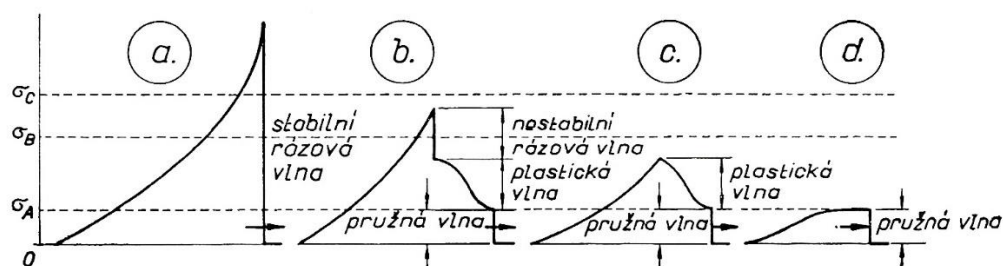
Vlnu napětí v libovolném prostředí, omezeném i neomezeném, můžeme definovat jako část (oblast) prostředí, která je obecně v přechodném pohybu a stavu napětí. Hranici mezi částí prostředí ve stavu napětí (vlnou) a ostatním prostředím nazýváme čelem vlny. Každé napětí je provázáno deformací, a proto vlny napětí jsou i vlnami deformace. Deformace představuje pohyb částic. (4)

Z fyzikálního hlediska je vlnění definováno jako kmitání, které se šíří prostorem a časem. Není spojeno s látkovou výměnou, avšak je nositelem energie. Čelo vlny napětí, ve které částice kmitají se stejnou fází, můžeme také nazývat vlnoplochu. Směr šíření vlny je pak dán kolmým směrem na vlnoplochu a nazývá se paprskem. Mezi základní parametry vlny patří délka vlny –  $\lambda$ , frekvence –  $f$ , amplituda –  $a$  a rychlost šíření –  $v$ . Rychlost šíření vln podpovrchovým prostředím je závislá především na zrnech (skeletu) zeminy a výplni jejich pórů. S rostoucí hustotou materiálu a klesající porositou narůstá i rychlost šíření vln. Stejný princip platí s narůstající hloubkou: čím větší všesměrný tlak prostředí, tím větší snaha póry minimalizovat. (11)

Základní obecnou charakteristikou prostředí je závislost napětí  $\sigma$  (při všesměrném objemovém stlačení) na poměrné objemové deformaci  $\epsilon$  (kladná při zmenšování objemu). Závislost pro plyny, kapaliny a tuhá tělesa je zobrazena níže.



Obrázek č. 12: Závislost tlakových napětí na poměrné objemové deformaci pro a) kapaliny a plyny, b) tuhá tělesa; převzato z (4)



Obrázek č. 13: Změna profilu výbuchové vlny v pevném tělese s narůstající vzdáleností, převzato z (4)

### Šíření výbuchové vlny v horninách

Šíření výbuchové vlny v pevné látce bude popsáno na základě rozboru obrázku č. 12b. V pevných látkách se v oboru tlaků  $p \leq \sigma_a$  mění napětí s deformací lineárně. Struktura materiálu zůstává nezměněna a přenáší se smykové napětí. Všechny tlaky v tomto oboru se šíří stejnou rychlostí a může se jimi šířit i rázová vlna. Pokud je vnějšími podmínkami (například nespojitostí) tvar rázové vlny změněn, nemůže se již znovu zformovat a pokračuje dále ve změněné podobě. Může se tedy šířit jen nestabilní rázová vlna.

Pokud se tlak nachází v intervalu  $\sigma_a \leq p \leq \sigma_b$ , začíná se rozrušovat struktura materiálu. Materiál se zhušťuje, přestává přenášet smyková napětí a začne mít charakter kapaliny. V bodě B jsou vazby zrušeny a materiál se stává kapalinou (prachem) a je schopen reagovat pouze tlakovým napětím. Derivace v tomto úseku klesá, což způsobuje, že vyšší tlaky se pohybují nižší rychlostí. To vede ke zpoždění vyšších tlaků za nižšími a jedná se o takzvaný plastický obor (vlny).

V rozmezí tlaků  $\sigma_b \leq p \leq \sigma_c$  se prostředí chová jako kapalina a nepřenáší smyková napětí. Derivace je v tomto intervalu rostoucí, a tak se vyšší tlaky šíří vyšší rychlostí. Jedná se tedy o stabilní rázovou vlnu podzvukovou.

Pro obor  $p > \sigma_c$  platí stále stejné podmínky jako pro obor předešlý a jedná se zde o stabilní rázové vlny nadzvukové. V tomto oboru se realizují detonační a výbuchové vlny v blízkosti nálože. Pro tento mechanismus je pak na obrázku č. 13 vynesena postupná změna profilu výbuchové vlny v závislosti na vzdálenosti od nálože. Pro blízké oblasti výbuchu, kde je šíření rázové vlny nadzvukové (část a), klesá postupně tlak a nižší tlaky začínají předbíhat tlaky vyšší a dochází k předsunutí pružné vlny – rázová vlna se dále šíří jako podzvuková (část b). Maximální tlak dále klesá a nejvyšší tlaky se nejvíce opoždějí a dochází k vytvoření tvaru zobrazeného v části c. Po dalším poklesu tlaku se již nachází hmota v pružném oboru a všechny tlaky se šíří stejnou rychlostí (pružná vlna, část d). (4)

### Dělení seizmických vln (7)

Vlny se dělí podle projevu deformace na objemové a povrchové.

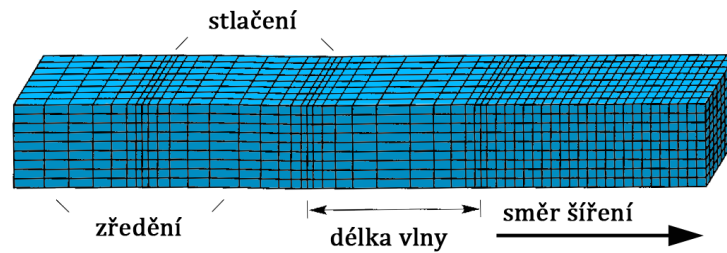
#### ► objemové vlny:

- a) *podélné vlny* (primární, longitudinální, P-vlny)

V těchto vlnách částice prostředí kmitají shodně se směrem šíření vlny. Nastává periodické stlačování a zředování hmoty. Tento typ vln se může šířit v jakémkoliv typu prostředí (v pevných, kapalných i plynných látkách). Podélné vlny patří mezi elastické vlny s nejvyšší rychlostí šíření



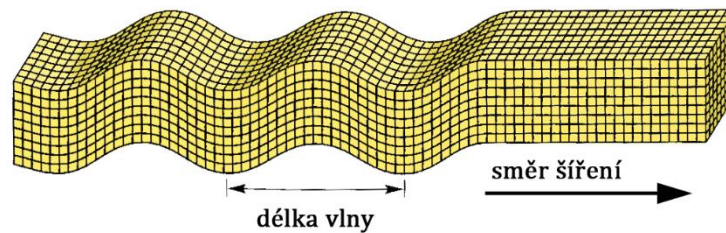
prostorem a jejich účinky nebývají na nadzemní objekty rozhodující. Rychlost jejich šíření závisí na modulu pružnosti  $E$  a hustotě prostředí  $\rho$ . Výpočet rychlosti je uveden v rovnici [26].



Obrázek č. 14: Šíření deformace prostředím podélnými vlnami, upraveno podle (12)

b) *příčné vlny* (sekundární, transversální, smykové, S-vlny)

Částice v tomto typu kmitají kolmo na směr šíření vln. V trojrozměrném prostoru se takto rozeznávají horizontálně a vertikálně kmitající příčné vlny (SH-vlny, SV-vlny). Šíří se pouze v pevném prostředí, které přenáší smyková napětí. Rychlost jejich šíření je nižší než v případě vln podélných ( $v_s \approx 0,5$  až  $0,6 \cdot v_p$ ), ale účinek na nadzemní objekty bývá naopak větší než u vln podélných. Rychlost šíření závisí na smykovém modulu  $G$  a hustotě prostředí  $\rho$ . Vztah pro výpočet je uveden v rovnici [27].

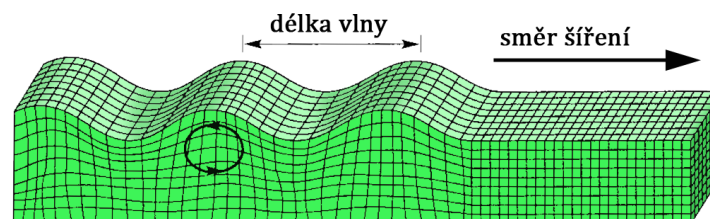


Obrázek č. 15: Šíření deformace prostředím příčnými vlnami, upraveno podle (12)

► povrchové:

a) *Rayleighovy vlny* (R-vlny)

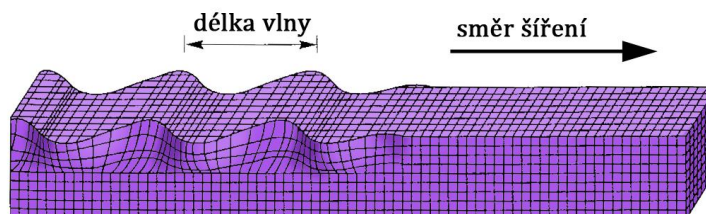
K jejich vzniku dochází pouze na rozhraní prostředí. Částice kmitají ve vertikální rovině, pohybem po eliptické trajektorii. Jejich zdrojem jsou podélné vlny v kombinaci s příčnými vlnami kmitajícími ve vertikální rovině (SV-vlny). Rychlost šíření povrchových vln je nižší než u vln objemových, dochází k jejich menšímu útlumu, a proto dosahují větších vzdáleností. Jejich amplitudy jsou v porovnání s objemovými vlnami větší, a riziko poškození nadzemních objektů je u nich tedy největší.



Obrázek č. 16: Šíření deformace povrchovými R-vlnami, upraveno podle (12)

## b) Loveho vlny (L-vlny)

Částice prostředí pro tento typ kmitají kolmo na směr šíření vlny v horizontální rovině. Jejich vliv s hloubkou velmi rychle klesá a jejich charakter je podobný SH-vlnám. Rychlost jejich šíření je vyšší než v případě vln R-vln. Pro nadzemní zástavbu představují největší rizika.



Obrázek č. 17: Šíření deformace povrchovými L-vlnami, upraveno podle (12)

Hornina nebo prostředí	Rychlost $v_p$ [m.s <sup>-1</sup> ]
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

Tabulka č. 1: Rychlosti šíření seizmických podélných vln pro vybraná prostředí, převzato z (13)

## Lom a odraz vln

Ke změně šíření vln napětí v zemním prostředí dochází při změně hodnoty tzv. *akustické impedance* –  $I_h$  (někdy též značeno  $Z$ ). Akustická impedance je dána jako součin hustoty prostředí a rychlosti šíření zvukových (akustických) vln.

$$I_h = v_p \cdot \rho_h, \quad [5]$$

kde  $I_h$  – akustická impedance prostředí (horniny),  $v_p$  – rychlost šíření podélných vln v hornině [m.s<sup>-1</sup>],  $\rho_h$  – hustota horninového prostředí [kg.m<sup>-3</sup>].

Ze vzorce [5] je patrné, že materiály o větší pevnosti (hutnosti) mají vyšší hodnotu akustické impedance. Při malých hodnotách akustické impedance dochází k většímu pohybu částic prostředí. Na rozhraní dvou rozdílných impedančních prostředí dochází k odrazu (reflexi) a lomu (refrakci) vln. Poměr  $R$  intenzity odražené a dopadající vlny lze vyjádřit pomocí následujícího vztahu:

$$R = \frac{I_{h1} - I_{h2}}{(I_{h1} + I_{h2})^2}, \quad [6]$$

kde  $R$  – poměr intenzity odražené a dopadající vlny [-],  $I_{h1}, I_{h2}$  – akustické impedance dvou různých prostředí.

Huygensův-Fresnelův princip nás informuje o tom, že každou kmitající částici je možné považovat za vlastní zdroj elementárního vlnění a že výsledné vlnění je pak součtem všech dílčích elementárních vlnění. Vlnění se vyruší ve všech směrech s výjimkou čela vlny. Díky tomuto

principu a spojení s difrakcí vln je možné vysvětlit vlnění vznikající ve zdánlivém stínu za překážkou. (14)

Pro úhel odrazu vln je možné použít Snellův zákon, který dává do závislosti úhel příchozího a odchozího paprsku vlny a jejich rychlosti šíření. (11)

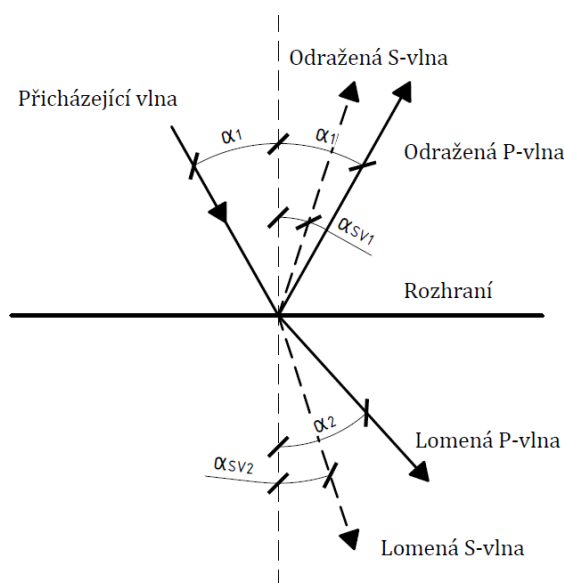
$$\frac{\sin \alpha_1}{v_1} = \frac{\sin \alpha_2}{v_2}, \quad [7]$$

kde  $\alpha_1$  a  $\alpha_2$  – úhel dopadu paprsku ke kolmici na rozhraní [°],  $v_1$  a  $v_2$  – rychlosti šíření vln v jednotlivých vrstvách [m.s<sup>-1</sup>].

Snellův zákon je také možno využít k určení změny z podélné vlny na příčnou po odrazu či lomu: (11)

$$\frac{\sin \alpha_1}{v_{p1}} = \frac{\sin \alpha_{s2}}{v_{s2}} = \frac{\sin \alpha_{s1}}{v_{s1}}, \quad [8]$$

kde  $\alpha_{s1}$  a  $\alpha_{s2}$  – úhly odrazu (lomu) transformované S-vlny [°],  $v_{s1}$  a  $v_{s2}$  – rychlosti šíření příčných vln v první, respektive druhé, vrstvě [m.s<sup>-1</sup>],  $v_{p1}$  – rychlost příchozí podélné vlny [m.s<sup>-1</sup>].



Tabulka č. 2: Transformování vln na rozhraní, upraveno podle (14)

### Výbuch ve vzdušném a vodním prostředí

Tato prostředí jsou charakteristická šířením rázové vlny na mnohonásobně větší vzdálenosti než v látkách pevných. Podle obrázku č. 12a se vzrůstajícím tlakem narůstá i derivace, a tak se vyšší tlaky šíří vyšší rychlostí. Vyšší tlaky se dostávají do čela šíření a vytvářejí „ostrou“ nespojitost (viz výše obrázky č. 13a). Pokud je tvar vlny rozrušen, tak dojde – na rozdíl od pevných látek – k opětovnému přetvoření na vlnu rázovou, která je tak v určitém smyslu „stabilní“. Pro kapaliny a plyny je dále typická absence smykových vazeb, a tak se šíří pouze vlny podélné (tlakové). Podobné parametry jako kapaliny mívají i zvodnělé zeminy. (4)

Pokud dojde k výbuchu pod vodní hladinou ve velké hloubce, přemění se přibližně polovina energie výbuchu na rázovou vlnu, která se vzdáleností přejde ve vlnu zvukovou, a druhá polovina je obsažena v podobě výbuchových plynů. (1)

## 1.4 Seizmické účinky výbuchů

V této části bude zmíněn především vliv vibrací na povrchovou zástavbu, který může být značný vzhledem k zahušťování městského prostoru a nutnosti výstavby víceúčelových a dopravních podzemních staveb v jejich centrech a blízkém okolí. Vliv šíření seizmických otřesů na ostatní podzemní díla je specifický především přítomností v obklopujícím zemním (horninovém) prostředí a častou malou vzdáleností od zdroje vibrací. Princip šíření vln napětí zůstává obdobný ovšem bez přítomnosti povrchových vln. Jedná se především o vliv na ostění a vybavení podzemních děl. Na rozdíl od povrchové zástavby je uvažováno s řádově většími dovolenými rychlostmi kmitání (stovky mm/s oproti jednotkám až nízkým desítkám u pozemních staveb) a uplatnění může najít i prokluz sítí v zeminovém prostředí a kmitání obezdívky v protifázi v blízkosti odstřelu. (15)

Návrh TP v městském prostoru vychází z předpokladu nulového poškození budov (viz níže kapitola 2.8). Na počátku je nutno posoudit stavebně-technický stav budov v zájmové oblasti a správně zhodnotit odezvu přenosového prostředí, která je závislá na velikosti nálože odpálené v jednom časovém stupni a na vzdálenosti od výbuchu. Poté je na projektantovi, aby určil maximální hmotnost nálože, jež za daných podmínek vyvolá bezpečné hodnoty rychlosti kmitání na zájmových objektech. Pro získání zkušeností a experimentálních dat o pohybu půdy byly za tímto účelem prováděny odstřely v lomech, při stavebních pracích nebo v povrchových dolech. (15)

Za účelem srovnání velkého množství naměřených dat ve studiích a zjednodušení trojrozměrné úlohy byl zaveden parametr redukované vzdálenosti  $r_{red}$  ve tvaru:

$$r_{red} = \frac{R}{Q^{\frac{1}{3}}} \quad \text{nebo} \quad r_{red} = \frac{R}{Q^{\frac{1}{2}}}, \quad [9]$$

kde  $R$  – vzdálenost od výbuchu obvykle v [m] a  $Q$  – hmotnost odpálené nálože obvykle v [kg].

V literatuře jsou užívány oba výrazy různými autory – pro válcové nálože je spíše užíván vztah  $Q^{\frac{1}{2}}$ . Použití jedné, či druhé veličiny nemá, kromě počátečního sklonu přímky, zásadnější vliv na průběh studovaných závislostí. (15), (4)

Pro obtížnost určení šíření vln v hornině byly z mnohých pozorování odvozeny empirické vztahy různými autory na základě regresní analýzy s proměnnými  $K$ ,  $B$  a  $L$  (nejlépe se osvědčila metoda nejmenších čtverců). Některé z těchto vztahů jsou uvedeny v článku (16); v následující tabulce je uveden jejich souhrn.

Autor / organizace (rok publikování)	Vztah
US Bureau of Mines (1981)	$v = K \left( \frac{L}{\sqrt{Q}} \right)^B$
Langefors a Kihlstrom (1963)	$v = K \left( \frac{\sqrt{\frac{Q}{L^2}}}{\sqrt{\frac{1}{3}}} \right)^B$
Crandell (1949)	$v = K \left( \frac{N^{\frac{1}{2}}}{L} \right)^B$
Ambraseys a Hendron (1968)	$v = K \left( \frac{L}{Q^{\frac{1}{3}}} \right)^B$

Tabulka č. 3: Vztahy pro výpočet maximální rychlosti kmitání podle různých autorů;  
*v* – rychlost kmitání [mm.s<sup>-1</sup>], *Q* – hmotnost nálože [kg], *L* – vzdálenost od místa výbuchu, *N* – výbušná energie, například v násobcích *Q* [t/kg]

Empirické parametry v těchto vztazích jsou však velmi závislé na lokální geologii a druhu výbušniny. Není proto možné jejich výsledky brát jako plně dostačující, pokud není dobrá znalost přenosového prostředí a nálože v jiné lokalitě, než pro kterou byly odvozeny. Norma ČSN 73 0040 proto doporučuje před začátkem TP provést zkušební odstřel s hmotnostně menší náloží pro ověření a korelaci vypočtených hodnot (viz níže kapitola 2.8).

Zjednodušeně lze říci, že v současnosti je na jedné straně většina posouzení technické seizmicity realizována přes empirické vztahy dávající orientační hodnotu maximální rychlosti kmitání půdy, na druhé straně stojí odhady a posudky jednotlivých objektů, které udávají maximální zatížení amplitudou rychlosti a které mohou být stanoveny např. podle druhu objektu a jeho stavebně-technického stavu. Některé zkušenosti, poznámky a doporučení dané praxí (např. (17), (15)) i normami (například. (18)) uvádějící do závislostí intenzitu zdroje a odezvu na technickou seizmicitu jsou vyjmenovány níže:

- **Vliv založení a konstrukce objektu.** Pro vícepodlažní budovy je nutno počítat s možností rozdílné odezvy v závislosti na podlaží a tuhosti nosného systému. Velkou roli může hrát také hmotnost objektu, kdy lehčí stavby mohou být rozkmitány ve vlastní frekvenci energií výbuchu snáze než budovy hmotnější. Rozdílné založení částí objektu může také vyvolat odlišnou odezvu v různých místech stavby.
- **Vliv podloží.** Odezva a přípustné limity maximální amplitudy rychlosti jsou závislé na druhu podloží a rychlosti šíření vln napětí. Pro méně tuhé zeminy (písek, štěrk, jílovitá půda) s nízkou rychlostí šíření vln platí výrazně nižší hodnoty rychlosti kmitání (pro dosažení odezvy beze škod cca do 20 mm/s) než pro horninové podloží (žula, rula, diabas) s vysokými rychlostmi šíření vln, kde mohou být beze škod přeneseny i rychlosti kmitání o hodnotách cca 70 mm/s. V horninovém prostředí má však šíře a orientace diskontinuit zásadní vliv na šíření seizmických vln. (19)
- **Vliv přenosu výbušné energie do horniny.** Část energie výbuchu je spotřebována na rozpojení horniny a její drcení a část energie uniká do masivu v podobě vln napětí. Přesné určení množství energie, která se spotřebuje na pružné rozkmitání horniny, je obtížné a závisí jak na typu výbušniny, stavu horniny (rozpukanost, pevnost, ...), tak na vrtném schématu a časování náloží. (15), (1)

V současné době je dobrých matematických predikcí rychlosti kmitání povrchu dosahováno pomocí užití pokročilých simulačních metod založených na evolučních algoritmech (např. neuronové sítě). Tyto metody umožňují postupně vylepšit predikci až do velmi dobrých korelací s naměřenými daty. Je však nutné mít dostatek informací z mnohých odstřelů v dané lokalitě. Proto jsou úspěšně využívány především u pozemního dobývání surovin a při výstavbě velkých děl (např. přehrady), kde jsou obě podmínky splněny. Více podrobností o těchto technikách lze nalézt např. v těchto článcích (20), (21), (22).

Je velice důležité posoudit účinky TP na člověka. Lidský organismus je velmi citlivý na vibrace a akustický tlak, který může být (především v počátcích rážeb v otevřených jámách) značný. Pro člověka jsou nepříjemné již daleko menší hodnoty vibrací, než které by způsobily škody na budovách, a při poškození objektu by již byly vibrace pro člověka nesnesitelné. Ačkoli jde u odstřelů o krátkodobý efekt, může právě tento náhlý a nečekaný zásah do pohody lidí vyvolat mnohem větší reakci, než pokud by se jednalo o jev opakovaný a očekávaný. Dochází tak ke spojování trhlin a poškození na objektech právě s účinky TP. Analýza rizik v oblasti lidské percepce ve vztahu k TP byla popsána například v článku (23) v němž na základě stížností obyvatel byly TP nahrazeny mechanickým způsobem rážby. (15)

Pro měření a určení limitů zatížení hlukem a vibracemi jsou v ČR platné např. následující normy a nařízení:

- *Nařízení vlády č. 272/2011 Sb., o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací (včetně změny 217/2016 Sb.)*
- *ČSN ISO 4866: Vibrace a rázy – Vibrace pevně zabudovaných konstrukcí – Pokyny pro měření vibrací a hodnocení jejich účinků na konstrukce*
- *ČSN ISO 2631-1: Vibrace a rázy – Hodnocení expozice člověka celkovým vibracím. Část 1: Všeobecné požadavky*
- *ČSN ISO 2631-2: Vibrace a rázy – Hodnocení expozice člověka celkovým vibracím. Část 2: Nepřerušované vibrace a rázy v budovách (1 až 80 Hz)*

Pro ochranu práv a zájmů osob a organizací při použití TP se obvykle stanovují následující podmínky:

- dodržování přípustných hodnot dle ČSN 73 0040 a *Nařízení vlády č. 272/2011 Sb., o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací*;
- dodržování stanovených technologických postupů a mezních náloží;
- kontrola skutečně dosažených seizmických a akustických účinků;
- pro objekty s očekávaným zatížením rychlostí kmitání nad 5 mm.s<sup>-1</sup> provést pasportizaci a dokumentaci stavebního stavu; po skončení prací provést repasportizaci. (3)

## 1.5 Měření seizmických veličin a sledování zájmových objektů

Záznamy pohybů půdy jsou měřeny přístroji (snímači) nazývanými seismometry. Mezi základní principy měření pohybů patří relativní posunutí mezi dvěma body (strainmetry) nebo jako relativní pohyb půdy vůči ní volně spřažené setrvačné hmotě (setrvačné seismometry). Přenosné terénní snímače se nazývají geofony a obvykle fungují na principu setrvačného seismometru. V magnetickém poli (permanentní magnet) je umístěna cívka, při průchodu vlny napětí je tělo geofonu rozkmitáno a vlivem setrvačných sil se dostává cívka do vzájemného pohybu s tělem geofonu. Dle intenzity otřesů generuje pohyb elektrické napětí na koncích cívky, které se úměrně rychlosti pohybu geofonu. Snímače mohou měřit v jedné složce pohybu

(například. svislá cívka zaznamenávající podélné vlny), či ve dvou nebo třech složkách pro zaznamenání i vodorovného směru kmitání (smykové vlny). Schopnost správného zachycení příchozího vlnění a tím i odezvy je také dána vlastní frekvencí kmitání geofonu. Pokud je příchozí frekvence vyšší, než vlastní frekvence snímače bude odezva odpovídat příchozí vlně, jestliže však bude nižší bude příchozí signál silně tlumen. Záznamovou sestavu mimo snímače většinou ještě tvoří A/D převodník (přeměna elektrického napětí na výstupní digitální časovou řadu) a záznamový počítač. Pro propojení snímače se záznamovým počítačem jsou používány kabely, optická vlákna či rádiové signály. (24), (25)

Seizmická měření TP mají svá specifika. Některá doporučení jsou uvedena například zde (26). Níže je uveden stručný výčet z tohoto článku.

- Registrační aparatura by měla mít pro blízká měření od TP vysoký dynamický rozsah.
- Zvláště pro správné zachycení vyšších frekvencí je doporučeno použít co možná nejvyšší vzorkovací frekvenci (cca 500 Hz) – hrozí tzv. aliasing (zkreslení spektra). (25)
- Z metodického hlediska je vhodné zajistit dobrý kontakt snímače s podložím (například přitížením či zafixováním pomocí třmenu či šroubů).

### **Měření a sledování objektů v oblasti zájmu**

Rozsah a specifikace požadovaných měření akustických a otřesových účinků se stanovuje v rámci geotechnického monitoringu v rámci dané stavby. Dodržování stanoveného plánu měření náleží do povinností dodavatele TP. Návrh opatření k ochraně práv občanů a organizací se příkládá k žádosti o povolení TP na Obvodní báňský úřad a náleží taktéž do povinností dodavatele TP. Rozhodujícím faktorem pro stanovení účastníků řízení o povolení TP je vyžadováno respektování 50% hodnoty maximálního přípustného dynamického zatížení daného stavebního objektu. Maximální hodnoty zatížení objektu musí být stanoveny znalcem v oboru posuzování dynamických účinků a TP. Stanovuje se tak na základě výsledků pasportizace a zhodnocení stavebně-technického a statického stavu objektu. (3)

Při realizaci díla je prováděno kontrolní úřední měření otřesových a akustických účinků a průběžné měření k operativním úpravám náloží a technologii TP. Tato měření jsou součástí technologie TP a slouží k upřesnění přenosových koeficientů  $K$  seizmického vlnění a na základě vyhodnocení jsou pak upřesňovány podmínky a mezní parametry náloží pro další úseky ražby atd.

- **úřední měření:** obsahuje vyhodnocení seizmických účinků dle ČSN 73 0040, matematickou analýzu, vyhodnocení dráhy kmitů, rychlostí a zrychlení. Výsledkem je zhodnocení navržené technologie TP a případná doporučení na úpravu hmotností nálože, změny vrtného schématu či časování náloží. Hodnocení může provést osoba s oprávněním technického vedoucího odstřelu nebo znalce v oboru TP a inženýrské seizmiky. Toto měření je rozhodující pro případná řešení soudních sporů o náhradě škod.
- **průběžné měření:** je většinou realizováno pomocí monitorovacího systému automatickými seizmografy (geofony). Umožňují dálkovou a průběžnou kontrolu provádění TP s možností nastavení rozhodujících mezních limitů a okamžitým informováním o jejich překročení. Součástí měření jsou i akustické účinky. Toto měření je zejména rozhodující pro povolení sbíjení, vrtání a TP v nočních hodinách. (3)

## 1.6 Přístup dle ČSN 73 0040

V současné době je pro stanovování dynamického zatížení technickou seizmicitou a odezvy běžných pozemních staveb<sup>4</sup> v platnosti *Norma ČSN 730040 – Zatížení stavebních objektů technickou seizmicitou a jejich odezva*.

Historický vývoj této normy můžeme sledovat do roku 1973, kdy po přibližně desetileté přípravě vychází *Norma ČSN 730036 – Seismická zatížení staveb*. Na čtyřiceti šesti stranách se norma věnovala z třetiny tématu zemětřesení a zbylá část pak již postihovala technickou seizmicitu, včetně účinků TP. Norma byla na svoji dobu technicky vyspělá a svým přístupem v oblasti zemětřesení odpovídala současnému Eurokódu. Během osmdesátých let započaly snahy o revizi normy. Podařilo se však postihnout pouze část týkající se technické seizmicity, a tak v březnu roku 1996 vychází norma *ČSN 730040*, která je oprostěna o téma zemětřesení. Samotná odezva a posuzování seizmických účinků zemětřesení je dnes řešena v rámci převzatých evropských norem, a to Eurokódem 8<sup>5</sup>. Norma *ČSN 730040* vznikla vyjmutím části týkající se technické seizmicity z normy předešlé (tedy *ČSN 730036*) a doplněním ustanovení pro posuzování seizmických sil způsobených velkými výbuchy<sup>6</sup>, včetně posouzení vlivu seizmicity na nadzemní nádrže s vodou. (18), (27)

### Trhací práce dle ČSN 730040

Trhací práce jsou definovány jako nahodilé, krátkodobé, popř. nahodilé mimořádné zatížení. Uvažují se koeficientem 1,0 v první skupině mezních stavů a mohou se taktéž uvažovat i ve skupině druhé<sup>7</sup>. Intenzita a charakter otřesů závisí na:

- vlastnostech objektu (obecně receptoru) – hmotnost, základové poměry atd.
- vlastnostech geologického (přenosového) prostředí – horniny, základové půdy
- druhu odstřelu – velikost nálože, utěsnění, geometrie odstřelu, způsob časování, upnutí apod.

Charakter kmitů vyvolaný explozí trhaviny má neperiodický průběh a je popsán velkou amplitudou a uvolněnou energií. Mezi významné typy šířících se vln řadí norma povrchové vlny Rayleighovy a Loveho. Pokud časový interval mezi odpálením dvou dílčích náloží překročí 0,25 sekund, pak se (kvůli utlumení kmitů) taková situace považuje za situaci dvou samostatných náloží. Pokud je použit mžikový roznět, uvažuje se celková nálož trhaviny. Při časování kratším než 0,25 sekund se vliv časování vyšetřuje experimentálně. Dominantní frekvence<sup>8</sup> buzení od trhacích prací norma uvažuje v rozmezí 5 – 50 Hz, přičemž pro nálože o ekvivalentní hmotnosti větší než 2 000 kg jsou typické frekvence nižší než 10 Hz a naopak – pro nálože o ekvivalentní hmotnosti menší než 5 kg je frekvence vyšší než 50 Hz<sup>9</sup>. (18)

---

<sup>4</sup> Občanské, bytové, průmyslové a zemědělské stavební objekty.

<sup>5</sup> EN 1998:2004 – je rozdělen na dílčí části které se věnují např. mostům, věžím či zásobníkům. Některé z těchto témat neměli do té doby v českých normách svoje zastoupení v ohledu posuzování na účinky zemětřesení. Způsobeno to však bylo i faktem, že malá seizmicita vyskytující se na velké části území ČR tuto potřebu nevyžadovala.

<sup>6</sup> Není specifikována konkrétní hodnota hmotnosti nálože, kterou lze již považovat za velkou. Obecně se však jedná o tisíce kilogramů trhaviny odpalované v jednom časovém stupni či jaderné výbuchy.

<sup>7</sup> Charakter zatížení může být zpřesněn dle Eurokódu 1 (ČSN EN 1991).

<sup>8</sup> Frekvence, pro níž úroveň frekvenčního spektra v měřítku výchylky je větší alespoň o 30 % (tj. asi o 2,5 dB) než u ostatních frekvencí.

<sup>9</sup> V jiné části normy také uvádí informaci o změně frekvenčního spektra se vzdáleností. Pro vzdálenosti do 100 metrů se považuje frekvence neměnná a pro vzdálenosti větší než 100 metrů se frekvence nad 10 Hz (pokud se nešíří skalním či vodou nasyceným prostředím) utlumují, a mohou být proto zanedbány.



Pro odhad rychlosti kmitání používá norma tzv. *Langeforsův* či *Kochův vzorec*. Základní tvar vzorce je následující<sup>10</sup>:

$$v_{max} = K \cdot Q^m \cdot l^{-n}, \quad [10]$$

kde  $v_{max}$  – maximální rychlost kmitání [ $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ],  $Q$  – hmotnost nálože [kg],  $l$  – vzdálenost od zdroje kmitání [m] a  $K$ ,  $m$  a  $n$  – empirické parametry.

Jak v české normě ČSN 730040, tak i např. ve slovenské STN 730036 jsou empirické parametry uvažovány jako  $n = 1$  a  $m = 0,5$ . Pro konstantu přenosu  $K$  (viz níže Tabulka č. 4 4) předkládá norma informativní hodnoty pro horniny, skalní a poloskalní podloží (mimo zvodnělého prostředí). Vztah je pak nazýván jako *zákon útlumu seizmických vln* a má následující tvar<sup>11</sup>: (17)

$$u = K \frac{\sqrt{m_{ev,n}}}{l}, \quad [11]$$

kde  $K$  [ $\text{kg}^{-1/2} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ] – konstanta přenosu závislá na geologickém prostředí a na vzdálenosti  $l$ , pro nenasyčené prostředí jsou v normě uvedeny informativní rozsahy konstanty  $K$ ;  $m_{ev,n}$  – ekvivalentní normová hmotnost nálože [kg],  $l$  – vzdálenost od těžiště odstřelu [m].

Tabulka č. 4: Informativní hodnoty konstanty přenosu „K“, převzato z (18)

Vzdálenost $l$ [m]	Konstanta přenosu $K$	
	Podloží ze skalních a poloskalních hornin se střední až velmi malou hustotou diskontinuit	Ostatní horniny (mimo horniny ve zvodnělém prostředí)
10	350	250
50	250	150
200	150	120
500 a více	120	100

Poznámka: mezilehlé hodnoty vzdálenosti lze interpolovat podle přímky

**Příklad výpočtu:** Objekt je umístěn na poloskalním, středně diskontinuitním podloží ve vzdálenosti 50 m od těžiště odstřelu. Ekvivalentní hmotnost nálože je 5 kg.

⇒  $K = 250$  (tabulka č. 4);  $l = 50$  m;  $m_{ev,n} = 5$  kg

⇒ Rychlost kmitání podloží objektu je pak:  $u = 250 \frac{\sqrt{5}}{50} = 11,18 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$

V reálných podmínkách závisí konstanta přenosu  $K$  na mnoha lokálních proměnných (např. na podmínkách odstřelu, přenosovém prostředí, druhu trhavy atd.). Konečným důsledkem je fakt, že konstanta nabývá pro jednu lokalitu vysokých hodnot rozpětí, a její spolehlivější užití zajistí většinou pouze parametrické studie provedené v dané lokalitě. Informativní hodnoty konstanty přenosu  $K$  uvedené v normě jsou tedy vhodné pouze pro lokality, v nichž chybí podrobnější informace o přenosovém prostředí. V praxi dává varianta vzorce (a konstanty přenosu) uvedená v normě lepší shodu pro vzdálenější objekty (vzdálená zóna) a odstřely

<sup>10</sup> Někdy také bývá pro výpočet rychlosti kmitání užívána závislost maximální rychlosti kmitání na tzv. redukované vzdálenosti:  $v = K_1 \left(\frac{l}{Q^{0,5}}\right)^\alpha$ , kde  $Q$  – hmotnost nálože [kg],  $l$  – vzdálenost od výbuchu [m],  $K_1$  – součinitel závislý na podmínkách odstřelu, vlastnostech přenosového prostředí, druhu trhavy atd.,  $\alpha$  – parametr útlumu seizmických vln. (26)

<sup>11</sup> Pro rychlost kmitání podloží do  $30 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$

provedené v lomech, při kterých se množství trhavyiny odpáleného v jednom časovém stupni pohybuje v řádech stovek kilogramů. (17), (28)

Pro posouzení odezvy způsobené trhacími pracemi zavádí norma šest stupňů poškození objektů (viz níže Tabulka č. 55):

Tabulka č. 5: Stupně poškození objektů, převzato z (18)

Popis poškození	Stupeň poškození
<b>Bez poškození.</b> Nevznikají žádná viditelná poškození. Funkce objektů jako např. vodotěsnost nádrží apod. jsou plně zachovány.	0
<b>První známky poškození.</b> Trhliny o šířce do 1 mm na styku stavebních prvků (ve stropních fabionech).	1
<b>Lehká rozrušení s malými škodami.</b> Trhliny o šířce do 5 mm v omítce, příčkách, v komínovém zdivu, dále opadávání omítky, uvolnění krytiny.	2
<b>Střední rozrušení s vážnými škodami.</b> Stabilita není ohrožena. Trhliny širší než 5 mm v příčkách i nosných zdech. Opadávání krytiny a částí komínů.	3
<b>Značné rozrušení s nebezpečnými škodami.</b> Trhliny v nosných zdech a překladech ohrožují statickou funkci. Zřícení příček, výplňového zdiva a komínů. Trhliny v prostém betonu. Porušení stability.	4
<b>Úplné rozrušení a destrukce.</b> Zřícení cihelných staveb nebo jejich částí s hlavními nosnými prvky. Trhliny i v železobetonu.	5

Výše uvedené stupně poškození dává dále do závislosti s třídou odolnosti objektu a druhem základové půdy. Tímto způsobem vznikla informativní závislost stupně poškození na maximální rychlosti kmitání<sup>12</sup>. Informativní tabulka dále dává do souvislosti rychlost kmitání a obor frekvence otřesu, který rozděluje do intervalů  $f < 10$  Hz,  $10 \text{ Hz} \leq f \leq 50$  Hz,  $f > 50$  Hz. Tabulka je k nahlédnutí v příloze 1. Třída odolnosti objektu je rozdělena na kategorie A – F, přičemž třída A odpovídá nejchatrnějším a historickým stavbám (stavby z kamene, cihel, s klenbami; pomníky aj.), třída B zahrnuje běžné cihelné stavby a řadové domky do půdorysné plochy 200 m<sup>2</sup>; na opačné straně třída F obsahuje nejodolnější stavby (železobetonové a ocelové ostění tunelů a kolektorů; úkryty civilní obrany, ocelové potrubí). Druhy základových půd norma dělí na kategorie *a*, *b* a *c* v závislosti na výpočtové únosnosti horniny a hloubce podzemní vody pod základovou spárou, přičemž jakmile se podzemní voda nachází ve vzdálenosti menší než 1 metr pod základovou spárou, je vyžadováno individuální posouzení<sup>13</sup>.

Pro ověření lokálních geologických podmínek a způsobu šíření seizmických vln prostředím umožňuje norma učinit zkušební měření. Podmínkami zkušebního měření jsou jeho provedení v blízkosti posuzovaného místa či v obdobných geologických poměrech. Hmotnost zkušební nálože by měla být nejvýše deset procent uvažované normové hmotnosti maximální dílčí nálože. Budoucí maximální výchyly pak lze odhadnout dle vztahu: (18)

<sup>12</sup> Po jednotlivých složkách v osách X, Y, Z.

<sup>13</sup> Požadavek individuálního posouzení dále vzniká při experimentálním ověřování vlastností horninového prostředí a pokud způsob založení neodpovídá místním geologickým podmínkám.

$$v_1 = v_2 \left( \frac{m_{1n}}{m_{2n}} \right)^\alpha, \quad [12]$$

kde  $m_{1n} < m_{2n}$ ,  $\alpha < 1$  (přibližně  $\alpha = 0,5$ ),

a dále frekvence kmitání vzniklé od nálože:

$$f_1 = f_2 \left( \frac{m_{2n}}{m_{1n}} \right)^{\beta_n}, \quad [13]$$

kde  $m_{1n} < m_{2n}$ ,  $\beta_n = \left( \frac{1}{5}; \frac{1}{3} \right)$ , (přibližně  $\beta_n = 0,25$ ).

Odhad vzdálenosti od místa odstřelu pro danou třídu odolnosti objektu a přípustný stupeň poškození (pokud nelze předem provést zkušební odstřel<sup>14</sup>) se stanoví podle:

$$l = \kappa_1 \cdot m_{ev,n} \cdot \kappa_2, \quad [14]$$

kde  $\kappa_1$  – součinitel vyjadřující druh stavby, stupeň poškození a je závislý na hmotnosti nálože,  $\kappa_2$  – součinitel závislý na normové hmotnosti nálože  $m_{ev,n}$ ,  $m_{ev,n}$  – ekvivalentní normová hmotnost [kg].

*Příklad výpočtu:* Objektem je běžný řadový dům třídy odolnosti B. Použitá ekvivalentní hmotnost nálože je 5 kg. Je požadován stupeň poškození 0.

⇒  $\kappa_1 = 10$ ,  $\kappa_2 = 2/3$  (Tabulka 15 normy);  $m_{ev,n} = 5$  kg

⇒ Pak minimální vzdálenost od místa odstřelu je:  $l = 10 \cdot 5 \cdot \frac{2}{3} = 33,33$  m.

V zástavbě jsou návrhy stupně možného poškození budov vždy projektovány na úroveň nula se snahou zabránit poškození sledovaných objektů. Tento případ je však ideální. Pokud jde o porovnání s reálnými daty, bylo by vhodnější uvažovat míru pravděpodobnosti, že díky účinkům těchto prací nedojde k porušení sledovaného objektu. (29)

Pro větší úplnost je uváděn stručný přehled norem a předpisů věnujících se tématu seizmického zatížení budov:

- ČSN EN 1998 (73 00 36)
- STN 73 0036 (Slovensko)
- DIN 4150 (Německo)
- СНИП II-7-81 (Rusko)
- ISO 3010 (mezinárodní, revidována 2017)
- ISO 4866:2010 (mezinárodní)

## 1.7 Rozdílnost přístupů Eurokódu 1998 a ČSN 73 00 40

Jak již bylo nastíněno v minulé kapitole, dřívější vývoj norem u nás věnujících se seizmicitě do značné míry vycházel z původní československé normy 73 0036. Rozdělením této normy na dva svébytné celky – jeden věnující se technické seizmicitě (73 0040 – doplněna oproti původní části) a druhý ponechaný, 73 0036, užívaný především k posuzování staveb na zatížení od seizmicity přírodní, vznikl mírný deficit v neprospěch jevů „přirozeného“ zemětřesení. Tato

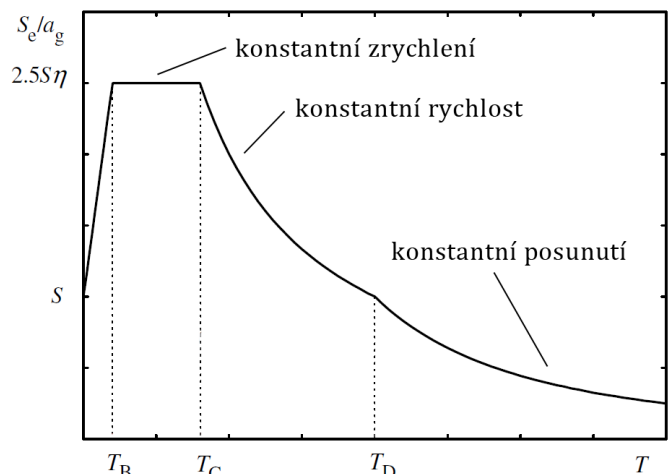
<sup>14</sup> Platí pro běžné případy a lokality se skalním nebo poloskalním podložím a vrstvou pokryvných útvarů alespoň v několikametrové mocnosti. Hloubka podzemní vody pak má být nejvýše tři metry pod povrchem terénu. Mezi místem odstřelu a sledovaným místem nesmí být výrazné rozmezí geologického prostředí, ani výskyt poruchových pásem s mocností větší než jeden metr.

situace byla postupně měněna nejprve přijetím přeložené předběžné evropské normy Eurokód 8, ČSN P ENV 1998-1-1 v roce 1998 až po současnost, kdy jsou přeloženy či přežaty v originálu všechny části Eurokódu 8 jako ČSN EN 1998 (1-6).<sup>15</sup> Hlavní rozdíly mezi současným Eurokódem a bývalými normami lze shrnout do následujících bodů:

- Liší se rozsahem daným celoevropskou platností (přes pět set stran A4 v porovnání s jednotkami až první desítkou u norem minulých). V ČR, kde je seizmicita malá (na rozdíl od jiných evropských států), se většina z tohoto rozsahu neuplatní.
- Předchozí normy byly orientovány především na budovy, zatímco Eurokód 8 postihuje i jiné typy staveb.
- Odlišují se i hloubkou zpracování a použitím výpočtu i v případech, kde se dříve používal inženýrský „cit“.
- Eurokód na rozdíl od ČSN 73 00 36 podrobně uvádí konstrukční pokyny a návody na ověření vlastností konstrukcí (duktilita, prostorová tuhost konstrukcí, působení patra jako diafragma aj.).
- Normy jsou rozdílné také množstvím nových a odlišných značení veličin. (27)

Pokud se jedná o přímé srovnání Eurokódu 8 a normy ČSN 73 0040, jsou rozdílné již počáteční povahou řešených problematik. Zatím co u zemětřesení se jedná o druh pravděpodobnostního mimořádného zatížení s uvažovanou dobou návratu (Eurokód užívá nejčastěji hodnotu 475 let), technická seizmicita je problémem spíše deterministickým, v němž za jeho působení může lidská činnost. Jako hlavní vodítko pro určení seizmického zatížení v dané oblasti jsou používány mapy, v nichž základní hodnotu tvoří návrhové zrychlení základové půdy  $a_{gR}$  (v násobcích gravitačního zrychlení). U technické seizmicity se pro určení zatížení daného objektu využívá maximálních amplitud rychlosti kmitání. „Filosofie“ návrhu na tyto seizmické účinky je taktéž rozdílná. Pro zemětřesení se uvažuje především s mezním stavem porušení<sup>16</sup>, v němž je základním principem ochrana lidských životů a taková míra poškození objektu, která má co nejmenší nároky na opravy. U technické seizmicity se setkáváme s nulovou mírou poškození objektů, na kterou musí být toto zatížení dimenzováno, a velkou roli hraje také míra působení na lidský organismus (15). Jako jeden ze způsobů získávání odezvy zemětřesení se využívá spektrum odezvy. Jedná se o křivku udávající maximální zrychlení, kterého

je dosaženo během očekávaného zemětřesení soustavou s jedním stupněm volnosti o vlastní periodě  $T_1$ . Odezva je závislá na posuzovaném umístění oblasti, třídě a součiniteli významu



Obrázek č. 18: Spektrum vodorovné pružné odezvy dle Eurokódu 8

$S_e$  – spektrální zrychlení,  $a_g$  – návrhové zrychlení,  $S$  – součinitel podloží, ( $T_B$ ,  $T_C$ ,  $T_D$ ) – periody závislé na typu základové půdy

je dosaženo během očekávaného zemětřesení soustavou s jedním stupněm volnosti o vlastní periodě  $T_1$ . Odezva je závislá na posuzovaném umístění oblasti, třídě a součiniteli významu

<sup>15</sup> Výčet témat, kterým se jednotlivé části věnují, je následující: Část 1: Obecná pravidla, seizmická zatížení a pravidla pro pozemní stavby, Část 2: Mosty, Část 3: Zesilování a rekonstrukce, Část 4: Zásobníky, nádrže, potrubí, Část 5: Základy, opěrné, zárubní zdi a geotechnická hlediska, Část 6: Věže, stožáry, komíny.

<sup>16</sup> Jedná se především o duktilitu (nelineární odezvu objektu, v níž dochází k disipaci – tzn. rozptýlení energie v plastických oblastech za hranicí meze kluzu a schopnost objektu tímto způsobem odolávat cyklickému zatížení). (30) (7)

objektu, na typu základové půdy a typu konkrétně použitého spektra<sup>17</sup>. Pro technickou seizmicitu je důležité především určení dynamické charakteristiky zdroje zatížení, rozpoznání přenosového prostředí a určení míry citlivosti objektu vůči těmto parametrům. (30), (7), (18)

---

<sup>17</sup> Jako základní materiálová charakteristika s významným vlivem je v Eurokódu 8 uváděn smykový modul  $G$  a rychlost šíření příčných (smykových) vln  $v_s$ .

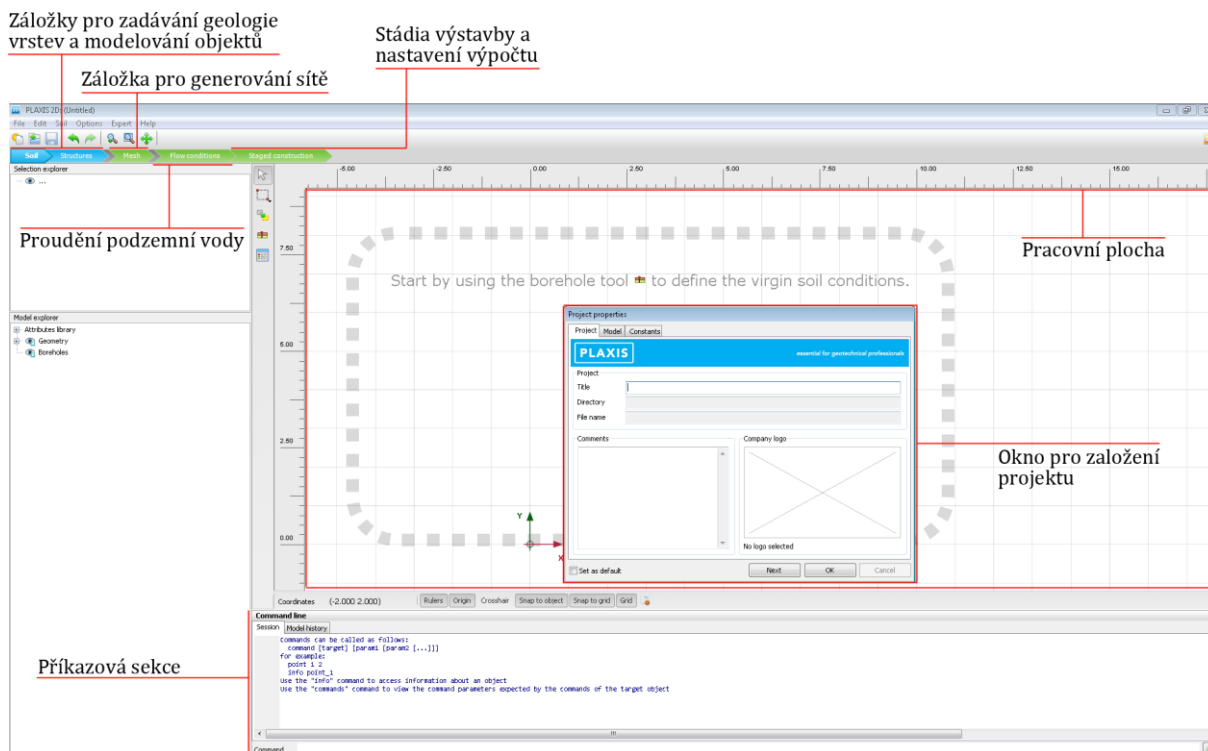
## II. Praktická část

### 1. Software a parametry systému

#### 1.1 Použitý výpočetní program

##### Úvod

Pro modelování účinků trhacích prací a jejich vlivu na povrchové objekty skrze vlny napětí bude v praktické části použit výpočetní program *PLAXIS 2D*. Program obecně využívá metodu konečných prvků (MKP) v dvourozměrném prostředí k nelineární analýze deformací, stability a proudění podzemní vody v geotechnických aplikacích. Program vyvíjí holandská firma *Plaxis bv* založená roku 1993 za účelem rozvoje a rozšiřování schopností programu *PLAXIS*. Počátky vývoje kódu se datují do roku 1987 a jsou pevně spjaty s Technickou univerzitou v Delftu (Delft University of Technology). Program má i svoji trojrozměrnou verzi a celkově se vyznačuje přehledným grafickým prostředím (viz níže Obrázek č. 19). Software je rozdělen na dva základní moduly, a to vstupní modul pro zadávání parametrů modelu, generování sítě a výpočet (INPUT) a výstupní modul pro zobrazení výsledků a jejich další zpracování (OUTPUT). Základní jádro programu je dále možno rozšířit o další doplňkové moduly, které se zabývají danými oblastmi konkrétněji a nabízejí jejich hlubší analýzu. Tři doplňkové moduly jsou zaměřeny na proudění v zemním prostředí, tepelnou vodivost a dynamickou analýzu. Právě posledně jmenovaný dynamický modul bude využit a blíže rozebrán v další části této práce. (31), (32)



Obrázek č. 19: Základní prostředí programu *Plaxis 2D* (INPUT) s vyznačením základního rozdělení rozhraní

##### Dynamická analýza

Program využívá jako základní rovnici pro výpočet časově závislých veličin od dynamického zatížení následující vztah:

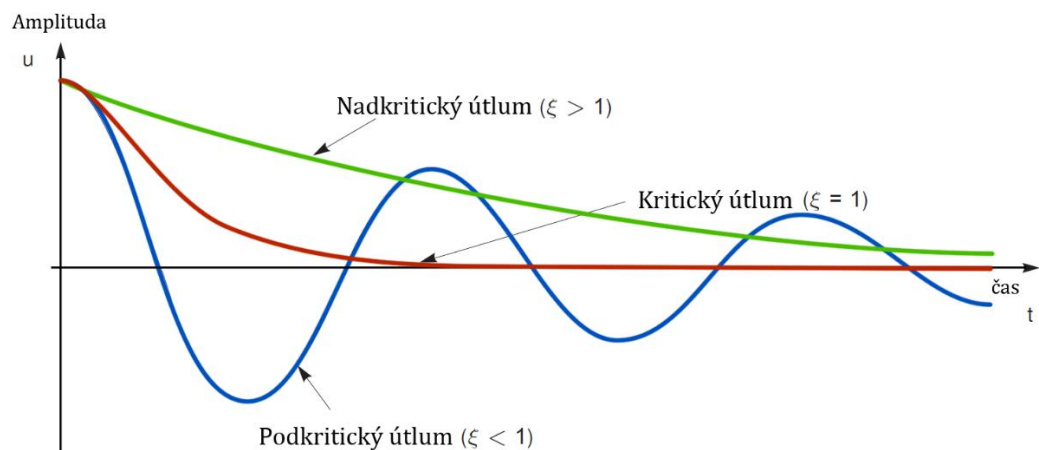
$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = F, \quad [15]$$

kde  $M$  – matice hmotnosti,  $u$  – vektor posunutí,  $C$  – matice útlumu,  $K$  – matice tuhosti a  $F$  – vektor zatížení. Posunutí  $u$  a jeho derivace ( $\ddot{u}$  – zrychlení,  $\dot{u}$  – rychlost) jsou vzájemně závislé a mění se s časem.

Je uvažováno lineárně pružné působení, které lze aplikovat na jakýkoliv materiálový model (dostupný v programu *Plaxis*) s dynamickým zatížením. Při použití neodvodněných podmínek je tuhost vody přidána do celkové matice tuhosti  $K$ . V matici hmotnosti  $M$  je uvažován součet hmotností všech materiálů – tzn. zeminy, vody a případné veškeré konstrukce, které model obsahuje. Matice tlumení  $C$  reprezentuje materiálové tlumení. Ve skutečnosti je toto tlumení způsobené viskózními vlastnostmi, třením a plasticitou materiálu. Materiálové tlumení je definováno pomocí Rayleighových součinitelů tlumení  $\alpha_R$  a  $\beta_R$ , které jsou v praxi obtížně stanovitelné. Matice  $C$  je formulována jako funkce hmotnostní matice  $M$  a matice tuhosti  $K$  následovně: (33), (32)

$$C = \alpha_R \cdot M + \beta_R \cdot K, \quad [16]$$

kde  $\alpha_R$  a  $\beta_R$  – Reyleighovy součinitele tlumení.

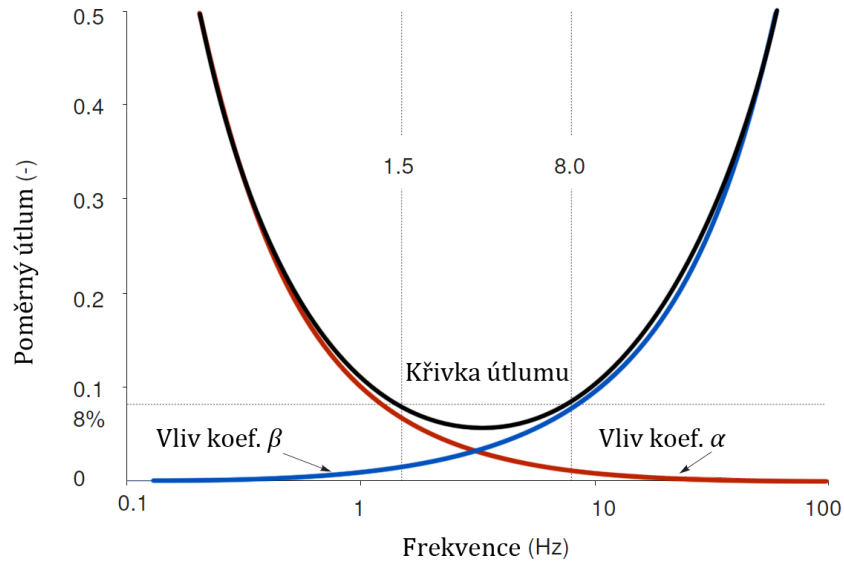


Obrázek č. 20: Vliv hodnoty poměrného útlumu na volně kmitající soustavu o jednom stupni volnosti

Součinitelé mají následující význam: pokud bude  $\alpha_R$  řádově větší hodnota než  $\beta_R$ , nabyde dominantní role matice hmotnosti  $M$  a budou tím více tlumeny nižší frekvence (vliv objemu). V opačném případě, tj. když  $\alpha_R$  bude řádově menší než  $\beta_R$ , získá rozhodující funkci matice tuhosti  $K$  a budou tím více tlumeny vyšší frekvence (vliv tuhosti systému). Pro stanovení  $\alpha_R$  a  $\beta_R$  je zapotřebí znát alespoň dvě existující hodnoty poměrného tlumení  $\xi_i$ , které odpovídají dvěma frekvencím vibrování  $\omega_i$ . Ke stanovení Rayleighových součinitelů tlumení tedy využijeme vztahu mezi  $\alpha_R$ ,  $\beta_R$ ,  $\xi_i$  a  $\omega_i$ , který může být zapsán následovně: (33), (32)

$$\alpha_R + \beta_R \cdot \omega_i^2 = 2 \cdot \omega_i \cdot \xi_i, \quad [17]$$

kde  $\omega_i$  – frekvence vibrování a  $\xi_i$  – poměrné tlumení.



Obrázek č. 21: Vliv parametrů Reyleighova útlumu

### Časová integrace

Pro dynamické výpočty tvoří důležitý faktor pro stabilitu a přesnost výpočtu tzv. časová integrace. Dvě základní využívaná schémata tvoří implicitní a explicitní integrace. Explicitní metody zaručují pouze podmíněnou stabilitu (krok musí být menší než určitá hodnota), avšak jejich formulace bývá jednodušší. Implicitní metody jsou složitější na rozdíl od explicitních, ale zaručují nepodmíněnou stabilitu a tím bývá jejich využití přesnější a spolehlivější. Program *Plaxis* využívá časové integrační schéma podle Newmarka, ve kterém jsou posunutí a rychlost v následném časovém kroku  $t + \Delta t$  stanoveny následovně: (33)

$$u^{t+\Delta t} = u^t + \dot{u}^t \Delta t + \left( \left( \frac{1}{2} - \alpha \right) \ddot{u}^t + \alpha \ddot{u}^{t+\Delta t} \right) \Delta t^2 \quad [18]$$

$$\dot{u}^{t+\Delta t} = \dot{u}^t + \left( (1 - \beta) \ddot{u}^t + \beta \ddot{u}^{t+\Delta t} \right) \Delta t \quad [19]$$

V obou výše uvedených vzorcích je  $\Delta t$  časový krok a koeficienty  $\alpha$  a  $\beta$  určují přesnost číselné integrace času. Pro stabilní výpočet musí koeficienty splňovat následující:

$$\beta \geq 0,5; \alpha \geq \frac{1}{4} \left( \frac{1}{2} + \beta \right)^2 \quad [20]$$

Standardní hodnoty nastavené v programu *Plaxis* pro Newmarkovo schéma jsou  $\alpha = 0,25$  a  $\beta = 0,5$  (metoda průměrné akcelerace).

### 1.2 Vlivy jednotlivých parametrů

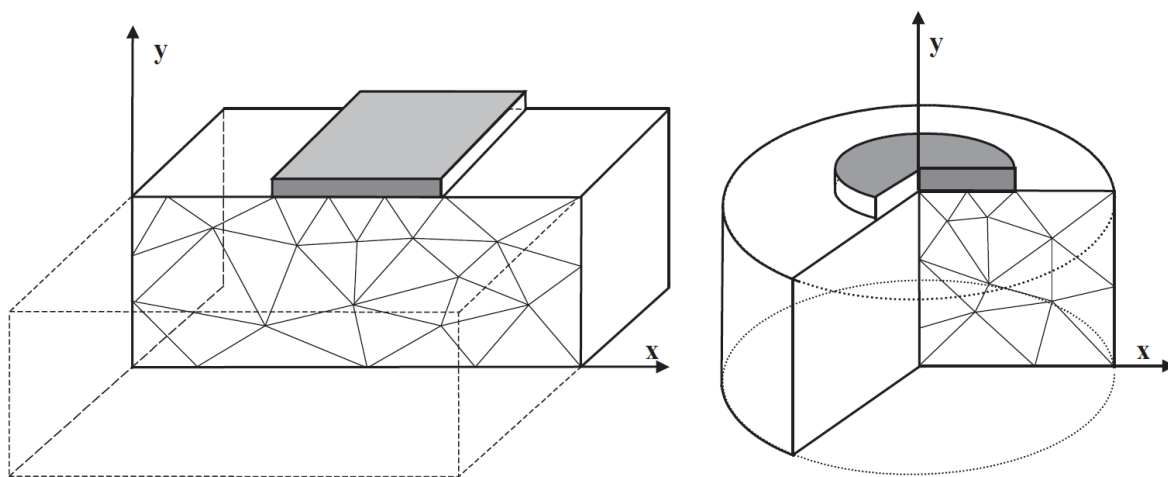
Parametry ovlivňující výslednou odezvu systému na dynamické zatížení lze pomyslně rozdělit na problematiku vlivu nejistot a nepřesností ve vstupních veličinách (způsobenými nehomogeností reálného přenosového prostředí a obtížným získáním přesných hodnot) a na omezení při použití dostupných materiálových modelů (aproximace při zadávání zatížení či okrajových podmínek). Některé z těchto důležitých vlivů týkajících se přímo této práce budou rozvedeny níže.



## Volba geometrie modelu

Jedno ze základních nastavení při vytváření modelu v programu *Plaxis* je určení konkrétní geometrie dvoudimenzionálního prostředí. V nabídce jsou možnosti *Plane strain* (rovinná deformace<sup>18</sup>) a *Axisymmetry* (osově symetrický model). V modelu rovinné deformace jsou uvažovány posunutí a deformace v ose-z jako nulové, přičemž normálové napětí zůstává plně zachováno. Tento typ modelu je využíván například pro modelování zemětřesných účinků, jejichž dynamickým zdrojem bývají předepsané posuny (či rychlosti) na spodní hraně modelu, což vede k vytvoření smykových vln šířících se směrem k volnému povrchu.

Druhou geometrií je osově souměrný model, který je využíván pro kruhové struktury se zatížením kolem centrální osy (předpokládá se, že napětí a deformace jsou stejné v libovolném radiálním směru). Tímto modelem jsou řešeny problémy s jedním bodovým zatížením z důvodu obdobného šíření vln napětí jako v trojrozměrném prostoru. To může vést ke značnému zrychlení výpočtu obdobných úloh při zachování stejné úrovně vypočtených dat. Energie vln se se vzdáleností snižuje a dochází přirozeně k útlumu. Tento efekt je přičítán geometrickému či radiálnímu tlumení, který je ze své podstaty využíván v osově symetrických modelech. (34)



Obrázek č. 22: Příklad modelu rovinné deformace (vlevo) a osově symetrického modelu (vpravo). Převzato z (34)

Trhací práce při ražbě a jejich dynamické působení vychází z energie uvolněné po výbuchu trhaviny. Tento děj lze – vzhledem k rozměrům díla a prostředí – popsat jako téměř bodový. Tyto úlohy jsou pak modelovány většinou jako osově symetrické, v nichž se krátký sled impulsů zatížení od výbuchů jednotlivých náloží radiálně šíří prostředím všemi směry. Vzhledem k tomu, že se nejedná o dlouhodobé periodické buzení, bývá zanedbáváno materiálové tlumení, které je reprezentováno pomocí Reyleighových součinitelů a je uvažováno pouze tlumení geometrické (viz např. práce (35) a (36)).

## Rozměry výpočetního modelu

Obecně lze říci, že vzdálenost hranic modelu při dynamické analýze by měla být od zdroje kmitání dostatečně velká na to, aby bylo zabráněno nechtěným odrazům vln na hranicích modelu, a tím i ovlivnění sledované oblasti. Pro zohlednění okrajových podmínek jsou v programu dostupné různé možnosti nastavení hranic modelu. Využívá se například viskózních hranic pro pohlcení vln napětí a zabránění jejich odrazu zpět do modelu. Tyto hranice však nemusí

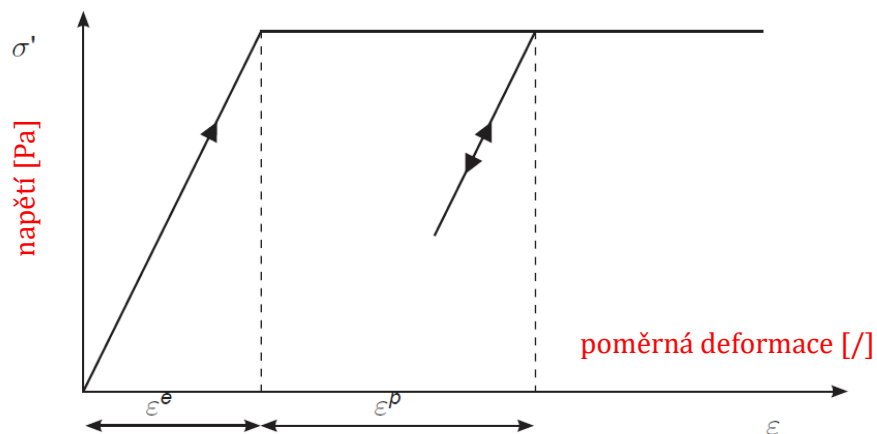
<sup>18</sup> Někdy též nazýváno rovinné přetvoření (31).

poskytnout dokonalý útlum, a i to je jeden z důvodů proč je doporučováno, aby rozměry úloh s dynamickou povahou problému byly umístovány do větších vzdáleností než při statické analýze. (34), (33)

### Mohr-Coulombův materiálový model

Jako základní materiálový model byl pro potřeby modelování vybrán Mohr-Coulombův lineárně elastický, ideálně plastický model (ideálně pružnoplastický model). Program *Plaxis* nabízí i pokročilejší modely – např. HS-small (Hardening Soil model with small-strain stiffness, českým výrazem *model se zpevněním*), který sice poskytuje přesnější výsledky především v oblasti malých přetvoření, je však náročný na vstupní parametry, které se získávají většinou pomocí nákladných triaxiálových zkoušek. Z důvodu dostupnosti vstupních údajů, všeobecné známosti modelu a dobrých výpočetních časů byl zvolen právě tento model. Základem pružnoplastického modelu je rozdělení deformací na elastickou  $\varepsilon^e$  a plastickou část  $\varepsilon^p$ , které dohromady tvoří celkovou deformaci  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p; \dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}^e + \dot{\varepsilon}^p \quad [21]$$



Obrázek č. 23: Chování ideálně pružnoplastického modelu, převzato z (37)

Lineární část vychází z obecného Hookova zákona [22] a je určena parametry  $E$  – Youngovým modulem pružnosti [ $\text{kN/m}^2 = \text{kPa}$ ] a  $\nu$  – Poissonovým číslem [-]. Po dosažení meze plasticity nastává plastické přetváření charakteristické zvyšujícím se přetvořením za konstantního napětí.

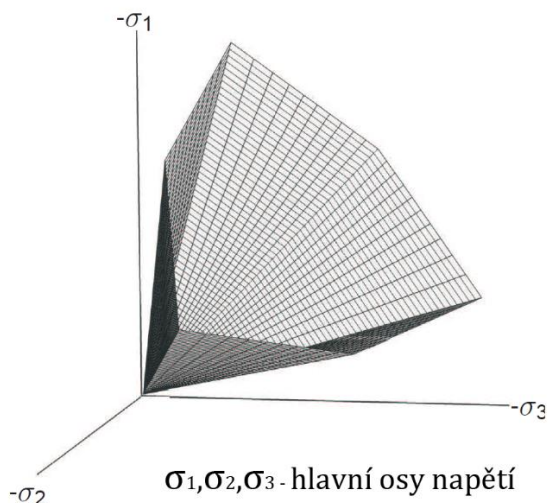
$$\sigma = D_e \cdot \varepsilon \quad [22]$$

Jedná se o maticový zápis, kde  $\sigma$  – sloupcová matice složek napětí,  $D_e$  – matice pružné tuhosti a  $\varepsilon$  – sloupcová matice složek deformací.

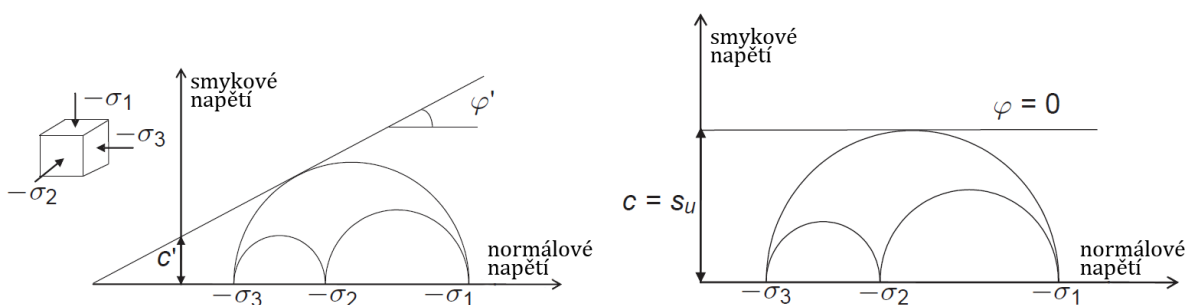
K plastickému přetváření dojde tehdy, pokud smykové napětí na kterékoliv rovině a v kterémkoliv směru dosáhne kritické hodnoty v Mohr-Coulombově podmínce. Kritická hodnota smykového napětí není konstanta, ale závisí na normálovém napětí působícím kolmo na příslušnou rovinu. Plastickou část určují parametry  $c$  – soudržnost [ $\text{kN/m}^2 = \text{kPa}$ ] a  $\varphi$  – úhel vnitřního tření [°]. Matematický zápis je pak následující:

$$\tau + \sigma \cdot \tan \varphi - c = 0, \quad [23]$$

kde  $\tau$  a  $\sigma$  – smykové, resp. normálové, napětí [kPa].



Obrázek č. 24: Přípustná oblast napětí pro Mohr-Coulombovu podmínku ve tvaru šestibokého jehlanu ( $c = 0$ ), převzato z (37).



Obrázek č. 25: Zobrazení Mohrových kružnic s užitím efektivních parametrů (vlevo) a s použitím neodvodněných totálních parametrů. Převzato z (37).

Program do modelu dále umožňuje zadání doplňujících parametrů:

**Ψ – úhel dilatance** [°] je veličina udávající objemové zvětšení během fáze plastického tečení. Kromě silně překonsolidovaných vrstev mají hlinité půdy  $\psi \approx 0^\circ$ . Obecně bývá úhel dilatance podstatně menší než úhel vnitřního tření. U písků je úhel dilatance závislý na ulehlosti a úhlu vnitřního tření. Orientační hodnota pro písky a šterky s úhlem vnitřního tření  $\varphi > 30^\circ$  se udává  $\psi = \varphi - 30^\circ$ . Záporná hodnota úhlu dilatance je reálná pouze u extrémně kyprých písků. Ve většině případů je však úhel dilatance roven nule. (37)

**G – smykový modul** [kN/m<sup>2</sup> = kPa] dle Hookeova zákona je dán vztah mezi Youngovým modulem  $E$ , smykovým modulem  $G$  a Poissonovým číslem  $\nu$  následovně: (37)

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad [24]$$

**E<sub>oed</sub> – edometrický modul** [kN/m<sup>2</sup> = kPa] dle Hookeova zákona je dán vztahem mezi Youngovým modulem  $E$  ( $E_{def}$ ), edometrickým modulem  $E_{oed}$  a Poissonovým číslem  $\nu$  následovně: (37)

$$E_{oed} = \frac{(1 - \nu) \cdot E}{(1 - 2 \cdot \nu) \cdot (1 + \nu)} \quad [25]$$

Pro účely dynamické analýzy umožňuje program zadat přímo rychlosti šíření podélných a příčných vln napětí. Při nezadání jsou hodnoty automaticky dopočteny ze zadaných výchozích parametrů pomocí vztahů uvedených níže. Nezadání rychlostí šíření vln může mít za následek jejich nesprávné určení, a naopak – při zadání jejich rychlosti může dojít k výrazným změnám v parametru tuhosti (Poissonovo číslo zůstává nezměněno). (37)

**$V_p$  – rychlost podélných vln napětí** [m.s<sup>-1</sup>] je dána vztahem mezi tuhostí  $E_{oed}$  a hustotou  $\rho$  jako:

$$V_p = \sqrt{\frac{E_{oed}}{\rho}}, \quad \text{kde } \rho = \frac{\gamma}{g}, \quad [26]$$

**$E_{oed}$  – edometrický modul** [kN.m<sup>-2</sup>],  $\gamma$  – objemová hmotnost [kN.m<sup>-3</sup>],  $g$  – tíhové zrychlení (9,81 m.s<sup>-2</sup>),  $\rho$  – hustota [t.m<sup>-3</sup>].

**$V_s$  – rychlost příčných vln napětí** [m.s<sup>-1</sup>] je dána vztahem mezi smykovým modulem  $G$  a hustotou  $\rho$  jako: (37)

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad [27]$$

Pro speciální situace je dále možno zadat parametry:

- **$E_{inc}$  – zvýšení tuhosti** (s tímto parametrem lze modelovat nárůst Youngova modulu pružnosti s ohledem na narůstající hloubku, což ve výsledku více odpovídá chování reálných zemin),
- **$c_{inc}$  nebo  $s_{u,inc}$  – zvýšení soudržnosti či pevnosti ve smyku s ohledem na narůstající hloubku,**
- **omezení tahových napětí**, v němž základní nastavení neuvažuje pevnost v tahu (respektive je nulová).

### Volba dynamických hraničních podmínek

V dynamických úlohách má velký význam zadání konkrétních okrajových podmínek na hranicích modelu. Z důvodu definování postupu po příchodu vlny napětí na úroveň hranice a jejího chování umožňuje program *Plaxis* zadat pět základních hraničních podmínek:

- *None (žádné)* – na hranici jsou aplikovány pouze standardní podmínky podepření. Je možné tuto hranici použít při zemětřesné analýze, v níž jsou na rozhraní aplikovány předepsané posuny simulující hranici s velkým impedančním kontrastem (např. vrstva měkkých jílu spočívající na tuhém horninovém podkladu). Na této hranici pak dochází k plnému odrazu vln napětí směrem zpět do modelu.
- *Viscous (viskózní)* – hranice absorbují energii vlny a ta se dále neodráží směrem do modelu. Tato podmínka odpovídá situaci, ve které jsou podél hranic modelu aplikovány viskózní tlumiče, jež poskytují odpovídající sílu v normálovém a tangenciálním směru a jež je úměrná rychlosti v blízkosti hranic modelu. Tato hranice je obecně využívána při řešení problémů s dynamickým zdrojem uvnitř modelu. Tyto podmínky vyžadují jako jeden ze vstupů historii zatížení. Pro výstižnější

chování hranic je potřeba zvážit hodnoty relaxačních koeficientů  $C_1$  a  $C_2$ . Použití viskózních hranic v programu *Plaxis* je založeno na teorii popsané autory Lysmer & Kuhlmeyer, 1969 /cit. podle (37)/, v níž normálové  $\sigma_n$  a smykové  $\tau$  napětí ve směru osy  $x$  jsou absorbovány tlumičem podle následujícího vztahu:

$$\sigma_n = -C_1 \cdot \rho \cdot V_p \cdot \dot{u}_x, \quad [28]$$

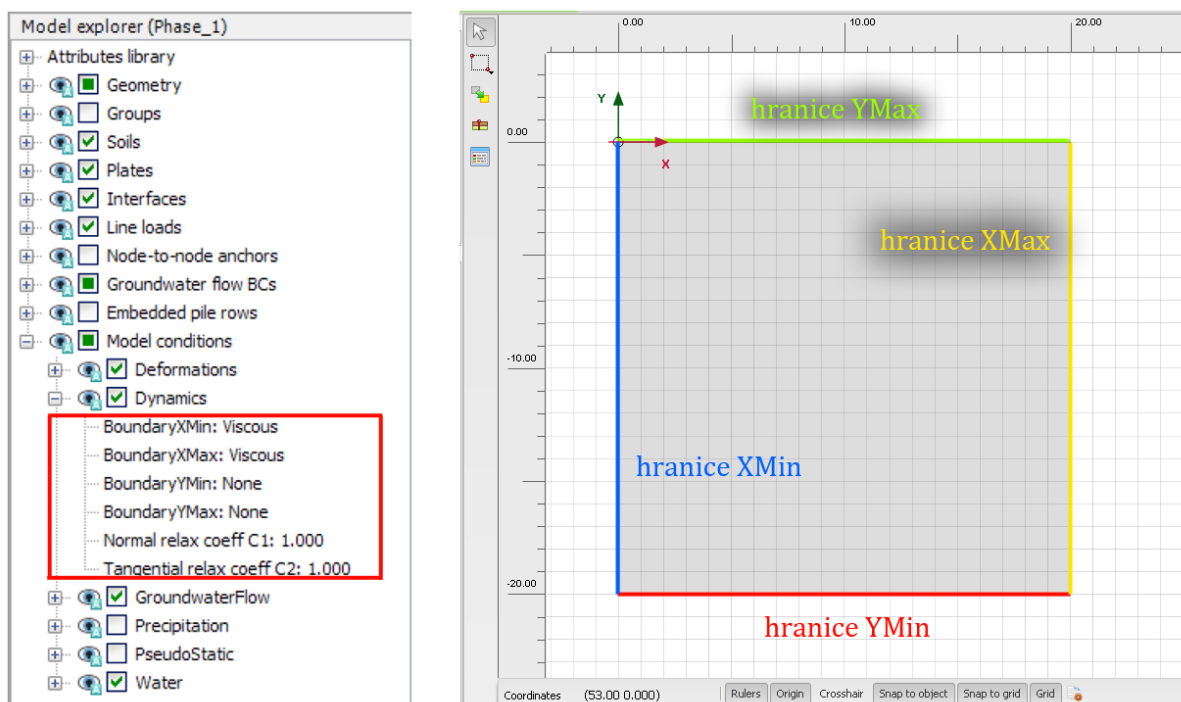
$$\tau = -C_2 \cdot \rho \cdot V_s \cdot \dot{u}_y, \quad [29]$$

Kde  $V_p$  je rychlost šíření podélných vln napětí [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ],  $V_s$  je rychlost šíření příčných vln napětí [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ],  $C_1$  a  $C_2$  jsou relaxační koeficienty zaváděné z důvodu zlepšení absorpčních schopností [-],  $\rho$  – hustota [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ],  $\dot{u}_x$  a  $\dot{u}_y$  – jsou rychlosti pohybu prostředí v příslušných osách [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ].

Pokud narazí vlny napětí na hranici ve směru kolmém na ni, jsou koeficienty  $C_1 = C_2 = 1$ . V přítomnosti příčných vln napětí však nedochází k dokonalé absorpci na hranici a část energie vln je uvolňována zpět do modelu. Tento efekt lze částečně zredukovat zadáním součinitele  $C_2 = 0,25$ . (37)

- *Free-field (volná plocha)* – volba je dostupná pouze pro boční hranice (XMin, XMax) a napodobuje šíření vln napětí do vzdáleného prostoru s minimálním odrazem na hranicích modelu. Funkce přidává u každého hraničního uzlu dvojici tlumících podpor ve směru normálového a smykového namáhání. Volba je vhodná pro simulaci zemětřesení, v níž bývá dynamické zatížení zadáváno podél hranic modelu a která dále vyžaduje manuální zadání oddělovacích prvků (*interface elements*) na svislých hranicích modelu.
- *Compliant base (poddajné podloží)* – tato možnost je povolena pouze pro spodní hranici modelu (YMin). Přístup kombinuje viskózní hranici s volnou plochou, což umožňuje současný pohyb hranice generující dynamické zatížení a pohlcování vln napětí přicházejících z vnitřního prostoru modelu. Volba je vhodná pro analýzu zemětřesných účinků, v nichž hloubka modelu neodpovídá hloubce skalního podloží a vlny se mohou volně šířit skrz spodní hranici modelu.
- *Tied degrees of freedom (svázané stupně volnosti)* – je k dispozici pouze pro boční hranice modelu (XMin a XMax). Funkce spojuje uzly se stejnou vertikální pořadnicí na obou okrajích modelu tak, že mají stejný jak vertikální, tak horizontální posun. Tato volba bývá využívána pro simulaci volného kmitání sloupce půdy. (31)

Analýza seizmických účinků trhacích prací při ražbě podzemních děl může být aproximována jako osově souměrná úloha. Pro tento případ analýzy je možno použít na spodní a pravé hranici modelu (YMin, XMax) viskózní okrajové podmínky (počátek souřadného systému umístěn v levém horním rohu modelu – viz níže Obrázek č. 2626) a pro volný povrch spolu s osou souměrnosti (YMax, XMin) nastavení „Žádných – None“ okrajových podmínek.



Obrázek č. 26: Pohled na okno „Průzkumníka modelu“ v prostředí programu Plaxis. Je vyznačena oblast, ve které je možno provést volbu hraničních podmínek (vlevo). Dále vidí čtenář náhled pracovní plochy s modelem, počátkem souřadného systému a vyznačenými hranicemi modelu (vpravo).

### Zkušenosti z parametrických studií

V publikovaných článcích (32) a (38) byly v prostředí dynamického modulu programu *Plaxis 2D* modelovány a vyhodnoceny vlivy změn parametrů prostředí na šíření seizmického vlnění. Studie byly provedeny pro materiály dobře zrněného sítěru GW, dobře zrněného písku SW a sítěru hlinitého G4 (GM). Jako konstantní parametry byly zvoleny: objemová hmotnost –  $\gamma$  a Poissonovo číslo –  $\nu$ . V následující tabulce jsou shrnuty zjištěné poznatky, přičemž jako sledovaná veličina byla vybrána amplituda rychlosti kmitání  $\dot{u}_y$ .

Parametr, jehož hodnota se zvyšuje $\uparrow$	Vliv na amplitudu rychlosti kmitání – $\dot{u}_y$
Deformační modul – $E_{def}$	Snížení $\downarrow$
Soudržnost – $c$	Zvýšení $\uparrow$ (výrazné)
Úhel vnitřního tření – $\varphi$	Zvýšení $\uparrow$ (nepatrné)

Tabulka č. 6: Vliv změny parametrů podloží na amplitudu rychlosti kmitání

Dalším pozorovaným faktem bylo snižování amplitud rychlostí s narůstající vzdáleností a zvyšující se rychlost vln napětí s narůstajícím deformačním modulem –  $E_{def}$ .

## 1.3 Modelování seizmických účinků trhacích prací

### Dynamické zatížení v programu Plaxis 2D

Program *Plaxis 2D* zadává dynamické zatížení pomocí vstupní (referenční) hodnoty<sup>19</sup> a jejího příslušného dynamického násobitele (Dynamic Multiplier). Dynamický násobitel se může přiřadit buď k dynamické části zatížení, či k předepsanému posunutí. Dynamický násobitel je závislý na

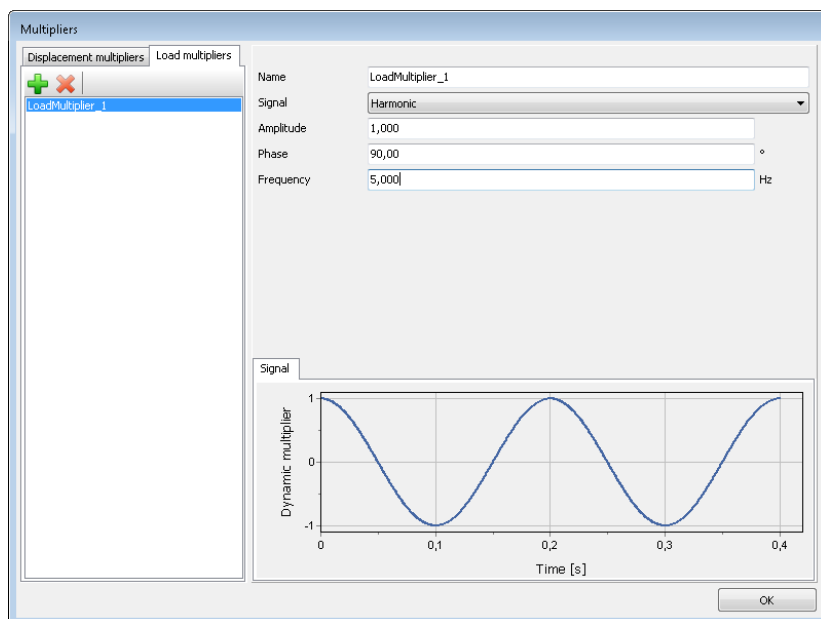
<sup>19</sup> U liniového zatížení jsou jednotkami [kN/m/m].

čase, a tak hodnota příslušného dynamického zatížení v jeden časový okamžik se získává vynásobením referenční hodnoty aktuální hodnotou dynamického násobitele. (31)

Samotný dynamický násobitel je možno zadávat a upravovat v okně „Násobitelů“ (Multipliers). Nalezneme zde dvě záložky pro zadání násobitelů posunutí a zatížení (Obrázek č. 27). Obě záložky mají takřka totožné parametry zadání, takže se budeme dále zabývat pouze záložkou *násobitele zatížení*. Tento násobitel je určen typem zdrojového signálu. V nabídce je harmonické buzení či buzení zadané pomocí tabulky. Tabulkové zadávání umožňuje předdefinovat si jak vlastní průběh zatížení (například pomocí běžných tabulkových editorů – MS Excel), tak zadání reálného průběhu zaznamenaného seizmografem a dodaného jedním z podporovaných formátů<sup>20</sup>. Harmonické buzení je určeno parametry frekvence, amplitudy a počáteční fáze. Matematicky je tento vztah dán rovnicí:

$$F = \hat{M} \cdot \hat{F} \cdot \sin(\omega \cdot t + \phi_0), \quad [30]$$

kde  $F$  – harmonické zatížení,  $\hat{M}$  – násobitel amplitudy,  $\hat{F}$  – vstupní hodnota zatížení,  $\omega$  – kruhová frekvence ( $2 \cdot \pi \cdot f$ ;  $f$  – frekvence [Hz])[Hz = s<sup>-1</sup>],  $t$  – čas [s],  $\phi_0$  – počáteční fáze [°].  $\hat{M} \cdot \hat{F}$  je amplituda dynamického zatížení.



Obrázek č. 27: Okno pro zadávání parametrů násobitelů. Zobrazena je záložka „násobitelů zatížení“ se zadaným harmonickým zatížením a vizualizací průběhu dynamického násobitele v čase.

## Frekvence

Určení převládající frekvence kmitání vyvolané výbuchem nálože v jednom časovém stupni je bez předešlého měření a rozboru záznamu kmitání velmi obtížné. Samotná frekvence je závislá především na měrné hmotnosti nálože a v blízkosti nálože může hrát větší roli i parametr brizance výbušniny. (18), (1)

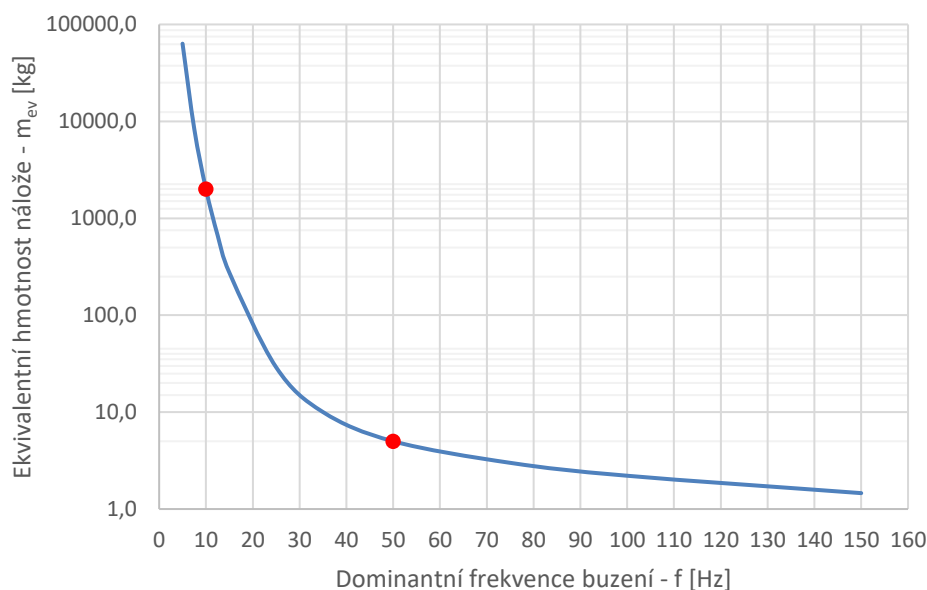
Frekvence vyvolaná výbušninou je nepřímo úměrná její hmotnosti. Abychom její hodnotu určili alespoň hrubě, bude použito doporučení dané ČSN 73 0040, dle které jsou hodnoty dominantní frekvence buzení od TP v rozmezí 5 Hz – 50 Hz. Konkrétnější hodnoty pak hovoří o frekvencích  $f < 10$  Hz pro nálože odpovídající ekvivalentní hmotnosti  $m_{ev,n} > 2\,000$  kg

<sup>20</sup> Podporovány jsou formáty ASCII – možno vytvořit v textovém editoru a SMC (Strong Motion CD-ROM) – formát používaný pro záznam zemětřesení, který je dostupný v databázi NGDC (National Geophysical Data Center) a který je spravovaný Národním úřadem pro oceán a atmosféru (NOAA). (31)

a frekvencích  $f > 50$  Hz pro nálože s ekvivalentní hmotností  $m_{ev,n} < 5$  kg. Pro lepší možnost aproximace byla sestavena závislost mezi ekvivalentní hmotností nálože a dominantní budicí frekvencí (viz níže Graf č. 1), která byla vsazena do hodnot doporučených normou ČSN 73 0040. Výsledkem je exponenciální rovnice v následujícím tvaru:

$$m_{ev} \cong 1,97815 \cdot 10^8 \cdot f^{-5} + 2,185 \cdot 10^2 \cdot f^{-1}, \quad [31]$$

kde  $m_{ev}$  – ekvivalentní hmotnost nálože odpálená v jednom časovém stupni [kg],  
 $f$  – dominantní budicí frekvence [Hz].



Graf č. 1: Závislost ekvivalentní hmotnosti nálože na dominantní budicí frekvenci. Červeně jsou vyznačeny body odpovídající doporučením z normy ČSN 73 0040

Zvýšenou odezvu přenosového prostředí (rezonanci) může vyvolat přiblížení dominantní frekvence vyvolávané výbuchem k vlastní frekvenci kmitání vrstvy podloží. Ve vědeckém manuálu k programu *Plaxis* je uveden vztah podle /Kramer, 1996 cit. podle (37)/, který umožňuje výpočet vlastní frekvence vrstvy podloží následujícím vztahem:

$$f_n = \frac{V_s}{4 \cdot H} (1 + 2 \cdot n), \quad [32]$$

kde  $f_n$  –  $n$ -tá vlastní frekvence vrstvy podloží [Hz],  $n$  nabývá hodnot v oboru přirozených čísel,  $V_s$  – rychlost příčných vln napětí [ $m \cdot s^{-1}$ ],  $H$  – mocnost vrstvy podloží [m].

Pro první vlastní frekvenci vrstvy podloží  $f_0$  o mocnosti  $H$  je vzorec zjednodušen níže:

$$f_0 = \frac{V_s}{4 \cdot H} \quad [33]$$



**Příklad výpočtu:** Pro dobře zrněný štěrk GW o parametrech:  $\gamma = 21 \text{ kN.m}^{-3}$ ,  $E_{\text{def}} = 425 \text{ MPa}$ ,  $\nu = 0,2$  a mocnosti vrstvy  $H = 2 \text{ m}$  je první vlastní frekvence vrstvy:

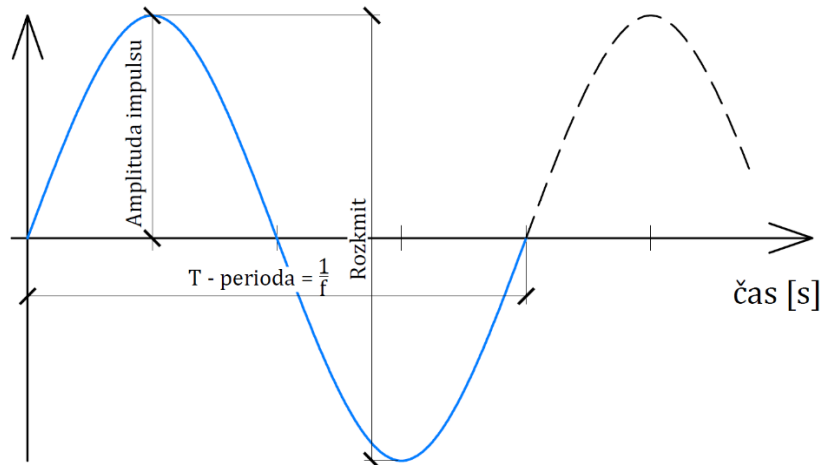
$$\Rightarrow G = \frac{E}{2(1+\nu)} = \frac{425\,000}{2(1+0,2)} = 177\,083 \text{ kN.m}^{-2}; \quad \rho = \frac{\gamma}{g} = \frac{21}{9,81} = 2,141 \text{ t.m}^{-3}$$

$$\Rightarrow V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{177\,083}{2,141}} = 287,6 \text{ m.s}^{-1}; \quad f_0 = \frac{V_s}{4H} = \frac{287,6}{4 \cdot 2} = \underline{\underline{35,95 \text{ Hz}}}$$

### Fázový posun a časové působení

Dle práce (36) nemá nastavení počátečního fázového posunu na získání maximálních amplitud rychlosti kmitání žádný vliv. Pokud tedy nebude uvedeno jinak, bude ve všech následných výpočtech dosazena hodnota  $\phi_0 = 0^\circ$ .

Působení výbuchu na okolní prostředí má charakter krátkého impulsního zatížení. S ohledem na tento předpoklad bude délka působení zatížení omezena délkou jednoho kmitu, či jeho poloviny (jedné periody či půlperiody), vyplývající z hodnoty budící frekvence (viz níže Obrázek č. 2828).



Obrázek č. 28: Znárodnění časového působení omezeného harmonického buzení

### Amplituda

Zadání tohoto parametru lze realizovat pomocí hodnoty násobitele amplitudy, která je aplikována na jednotkové zatížení či jednotkovou velikosti amplitudy a která násobí zadanou velikost zatížení. Hodnoty amplitudy jsou úzce spjaty s parametry výbuchových vln šířících se prostředím. Obecně se jedná o závislost napětí ve vlně na čase či vzdálenosti, kterou souhrnně nazýváme profilem či tvarem vlny. Řešení tohoto problému ve velkém rozsahu vzdáleností obsahujících jak blízkou zónu v okolí výbušniny, tak malé hodnoty přetlaků ve větších vzdálenostech, je velmi obtížné. V praxi se nejvíce osvědčily vztahy teoreticko-empirické, jejichž základem je *zákon modelové podobnosti*. (1), (4)

Základem teorie je úvaha, že nestacionární výbuchové pole napětí a různé deformace v prostředí málo citlivém na rychlosti těchto deformací (zeminy, horniny, voda atd.) jsou ovlivněny jen energií výbuchu. Nálože totožného složení, avšak rozdílné hmotnosti, pak budou v geometricky stejném prostředí a stejném místě generovat pole napětí a deformací, které budou geometricky, časově a silově podobné. Tato podobnost je vyjádřena následujícími obecnými vztahy: (1)

$$R_2 = \alpha \cdot R_1, \quad t_2 = \alpha \cdot t_1, \quad \sigma_2 = \sigma_1, \quad [34]$$

kde  $\alpha$  – lineární měřítko,  $R$  – vzdálenost,  $t$  – čas,  $\sigma$  – napětí při výbuších náloží ( $i = 1, 2$ ).

Pro velikost hodnoty amplitudy je rozhodující maximální přetlak výbuchové vlny v určité vzdálenosti od středu nálože. Z předchozího vztahu vyplývá, že maximální přetlaky od dvou různě velkých náloží jsou si rovny ve chvíli, kdy jsou si rovny i jejich redukované vzdálenosti:

$$\bar{R} = \frac{R}{\sqrt[3]{Q}}, \quad [35]$$

kde  $\bar{R}$  – redukovaná vzdálenost [ $\text{m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ ],  $R$  – vzdálenost uvažovaného místa od středu nálože [m],  $Q^{21}$  – ekvivalentní nálož [kg]. Platí pro sférickou nálož v neomezeném prostoru.

Vzorce pro výpočet maximálního přetlaku ve výbuchové vlně (neboli dynamického tlaku) byly stanoveny řadou autorů. Tyto vzorce závisí na různých vstupních veličinách. Níže jsou uvedeny některé z nich.

Henrych ve své monografii (4) uvádí obecný vzorec na základě modelové podobnosti pro určení maximálního přetlaku vzhledem ke vzdálenosti od místa výbuchu sférické nálože. Vztah je platný pro skalní horniny a pentritové nálož, v poměrné vzdálenosti  $\bar{r} > 50$  pak již na druhu výbušniny nezáleží. (1)

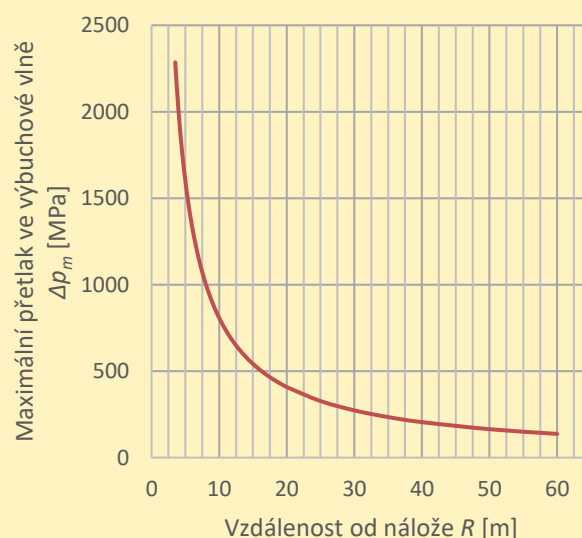
$$\Delta p_m = 10^5 \cdot \rho_h v_p \left( \frac{B_1}{\bar{r}^3} + \frac{B_2}{\bar{r}^2} + \frac{B_3}{\bar{r}} \right), \quad \bar{r} = \frac{R}{r_n}, \quad [36]$$

kde  $\Delta p_m$  – maximální přetlak ve výbuchové vlně [Pa],  $\rho_h$  – hustota horniny [ $\text{N} \cdot \text{m}^{-4} \cdot \text{s}^2 = \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ],  $v_p$  – rychlost šíření podélných vln v hornině [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ],  $B_1, B_2, B_3$  – konstanty,  $B_1 = 332,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $B_2 = -3,96 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $B_3 = 0,363 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $\bar{r}$  – poměrná vzdálenost [-],  $R$  – vzdálenost od nálože [m],  $r_n$  – poloměr nálože [m].

*Příklad výpočtu:*

Vstupní hodnoty:

- hornina: zdravá břidlice
- hustota horniny:  $\rho_h = 2600 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
- rychlost podélných vln:  $v_p = 3500 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
- poloměr nálože:  $r_n = 0,025 \text{ m}$



Graf č. 2: Výpočtová závislost maximálního přetlaku na čele vlny na vzdálenosti od nálože dle Henrycha

<sup>21</sup> Pod pojmem  $Q$  – nálož se rozumí tritolový ekvivalent rázové vlny  $Q = Q_s \frac{Q_{vs}}{Q_{vt}}$ ,

kde  $Q$  – nálož trhaviny [kg],  $Q_s$  – nálož skutečné trhaviny [kg],  $Q_{vs}$  – výbuchové teplo skutečné výbušniny [ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ],  $Q_{vt}$  – výbuchové teplo tritolu [ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ].

Doba trvání přetlaku je závislá na druhu horniny a redukované (poměrné) vzdálenosti. Pro malé hodnoty redukované vzdálenosti od výbuchu ( $\bar{r} \leq 120$ , což pro příklad výše je do 3 m) nabývají časy hodnot 2,5  $\mu\text{s}/\text{m}$  až 25  $\mu\text{s}/\text{m}$ . (4)

Opět pomocí modelové podobnosti odvodil japonsce Kumao Hino vztah pro maximální přetlak ve výbuchové vlně od válcové nálože. Tento vztah závisí více na parametrech konkrétní výbušniny:

$$\Delta p_m = p_d \left(\frac{1}{\bar{r}}\right)^a = p_d \left(\frac{r_n}{R}\right)^a, \quad p_d = \frac{\rho_t \cdot D^2}{(1+k)}, \quad [37]$$

kde  $\Delta p_m$  – maximální přetlak ve výbuchové vlně [Pa],  $\bar{r}$  – poměrná vzdálenost [-] viz [37],  $a$  – konstanta závislá na druhu horniny a výbušniny ( $a = 1$  až  $2$ ; pro většinu skalních hornin  $a \cong 1,5$ ),  $\rho_t$  – hustota nálože [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ],  $D$  – detonační rychlost [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ],  $k$  – konstanta závislá na hustotě nálože ( $k = 3$  pro  $\rho_t > 1\,200\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,  $k = 2,1$  pro  $\rho_t < 1\,200\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ).

Dále pak pro maximální hmotovou rychlost platí vztah:

$$u_m = \frac{\Delta p_m}{\rho_h \cdot v_p}, \quad [38]$$

kde  $u_m$  – maximální hmotová rychlost částic v čele tlakové vlny [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ],  $\rho_h$  – hustota horniny [ $\text{N}\cdot\text{m}^{-4}\cdot\text{s}^2 = \text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ],  $v_p$  – rychlost šíření podélných vln v hornině [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ].

Dalším vztahem pro určení hodnoty dynamického tlaku je vzorec profesorky Fotievové uvedený v (39). Jedná se o vztah používaný pro určení zatížení seizmickými účinky na podzemní i nadzemní objekty a má následující tvar:

$$p_{dyn} = \frac{1}{2\pi} K_c \cdot \gamma \cdot v_p \cdot T_0, \quad v_p = \sqrt{\frac{E_{oed}}{\rho}}, \quad E_{oed} = \frac{(1-\nu) \cdot E}{(1+\nu) \cdot (1-2\nu)}, \quad [39]$$

kde  $p_{dyn}$  – dynamický tlak působící na objekt [kPa],  $K_c$  – koeficient seizmicity [-] (dosazován většinou v hodnotách  $K_c = 0,05$  až  $0,1$ , závisí na síle otřesů a stupni odolnosti objektu),  $\gamma$  – objemová tíha zeminy [ $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ ],  $T_0$  – převládající perioda seizmických kmitů horninových částic [s] (určeno z převládající budící frekvence výbuchu),  $v_p$  – rychlost šíření podélných vln v hornině [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ],  $\rho$  – hustota horniny [ $\text{t}\cdot\text{m}^{-3}$ ].

Pro určení výbuchového tlaku v malých vzdálenostech od nálože je v příručce k výpočtovému softwaru *MIDAS GST* v části (*Effects on Adjacent Structure due to Blast*) uveden vztah od *Národního silničního ústavu Spojených států (US, National Highway Institute, 1991)*:

$$p_{det} = \frac{4,18 \cdot 10^{-7} \cdot \rho_t \cdot D^2}{1 + 0,8 \cdot \rho_t}, \quad [40]$$

kde  $p_{det}$  – výbuchový tlak [kbar = 100 MPa],  $\rho_t$  – hustota nálože [ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ],  $D$  – detonační rychlost [ $\text{ft}\cdot\text{s}^{-1} = 0,3048\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ],

Výbuchový tlak  $p_{det}$  je pak dán v závislosti na čase následovně:

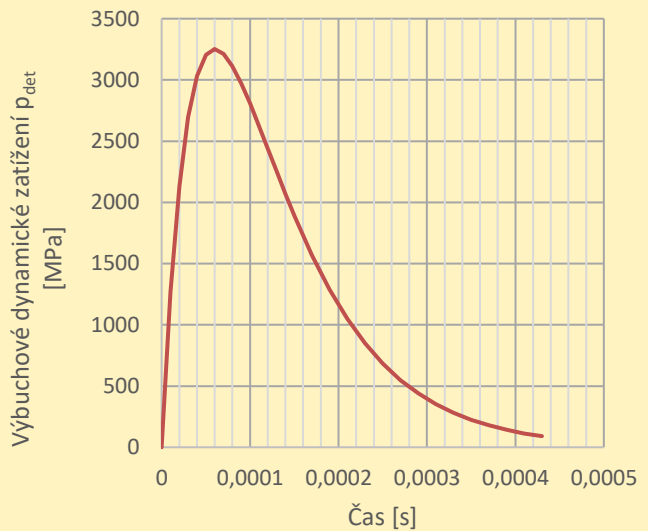
$$p_{det}(t) = 4 \cdot p_B \left( e^{\frac{-B \cdot t}{\sqrt{2}}} - e^{-\sqrt{2} \cdot B \cdot t} \right), \quad p_B = p_{det} \left( \frac{d_c}{d_h} \right), \quad [41]$$

kde  $p_B$  – tlak na vnitřním povrchu vrtu [kbar = 100 MPa],  $d_c$  – průměr výbušniny [mm],  $d_h$  – průměr vrtu, v němž je výbušnina uložena [mm],  $B$  – konstanta zatížení (většinou  $B = 16338$ ),  $t$  – čas [s].

*Příklad výpočtu:*

Vstupní hodnoty:

- trhavina na bázi nitroglykolu
- hustota trhaviny –  $\rho_t = 1,4 \text{ g.cm}^{-3}$
- detonační rychlost –  $D = 6200 \text{ m.s}^{-1}$
- průměr nálože –  $d_c = 50 \text{ mm}$
- průměr vrtu –  $d_h = 76 \text{ mm}$
- konstanta zatížení –  $B = 16338$



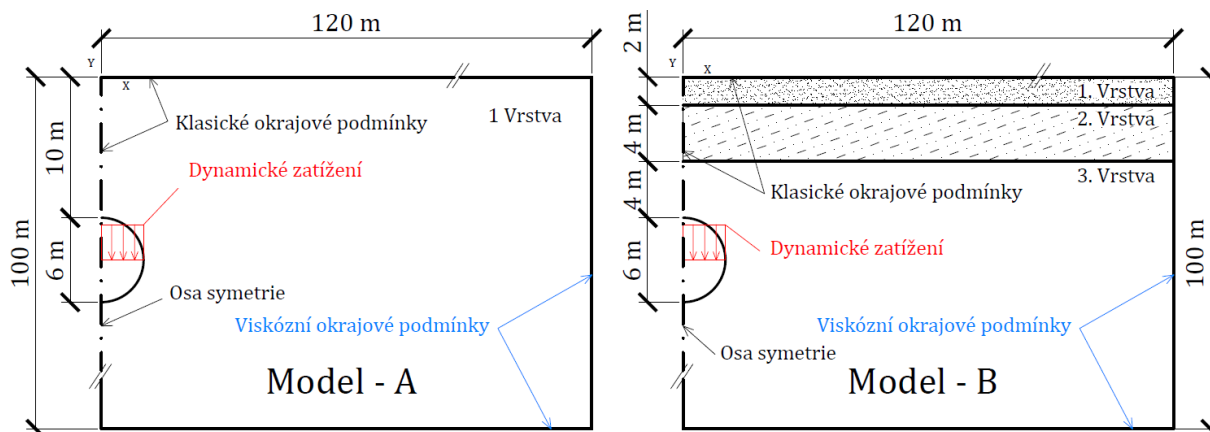
Graf č. 3: Závislost výbuchového dynamického zatížení na čase podle US, National Highway Institute

## 1.4 Ověřovací úlohy

Pro ověření základního nastavení výpočtových úloh byly vytvořeny dva základní modely, na kterých budou demonstrovány výstupy z programu *Plaxis* a jejich vyhodnocení.

### Popis modelů a jejich geometrie

U obou modelů byla zvolena osově-symetrická geometrie o rozměrech ve směru osy  $x$  120 m (horizontální rozměr) a ve směru osy  $y$  100 m (vertikální rozměr). Podzemní dílo je tvořeno tunelem o kruhovém průřezu s průměrem 6 m a výšce nadloží 10 m. Aby se zamezilo odrazu vln napětí zpět do modelu, jsou na *spodní* (YMin) a *pravé* (XMax) hranici zvoleny viskózní okrajové podmínky. Zbylé hranice mají standardní nastavení (*None*). Jako zdroj dynamického zatížení je do středu předpokládaného výrubu umístěno vodorovné spojitě zatížení s harmonickým násobitelem.



Obrázek č. 29: Schéma ověřovacích modelů

### Vstupní parametry

*Model - A* je celý tvořen jediným (horninovým) materiálem, čímž je simulováno zjednodušení, ve kterém nedochází u vln napětí k průchodu více vrstvami a přímo ovlivňují povrch (objekt stojí přímo na skalním podloží). *Model - B* se skládá ze tří materiálových vrstev, přičemž spodní třetí vrstva zůstává totožná jako u *modelu - A* a přidány jsou dvě méně mocné svrchní vrstvy představující situaci, v níž je nadloží nad skalním podložím tvořeno sedimenty či zvětralými horninami. Ve druhém uvedeném modelu dochází při průchodu vln napětí k odrazům a změnám rychlosti šíření a model se tím více blíží reálným podmínkám.

Aby charakteristiky jednotlivých vrstev co nejvíce odpovídaly skutečnosti, čerpal jsem geotechnické charakteristiky ze zdrojů (40) a (41). Veškeré vstupní parametry shrnuji v tabulce č. 7 níže.

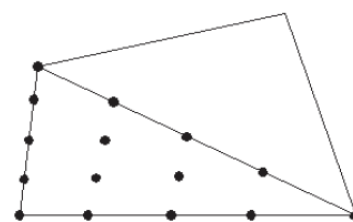
Materiálový model: Mohr - Coulomb	
Podmínky: Odvodněné	
MODEL - A	
Charakteristika	Hodnota
Název vrstvy: břidlice - navětralá (R3 - R4)	
Objemová hmotnost - $\gamma$ [kN.m <sup>-3</sup> ]	25,5
Modul pružnosti - E [MPa]	2 500
Poissonovo číslo - $\nu$ [-]	0,31
Modul pružnosti ve smyku - G [MPa]	954,2*
Soudržnost - $c_{ef}$ [kPa]	60,0
Úhel vnitřního tření - $\varphi_{ef}$ [°]	33,0
Rychlost podélných vln $v_p$ - [m.s <sup>-1</sup> ]	1155*
Rychlost příčných vln $v_s$ - [m.s <sup>-1</sup> ]	605,9*
Přírůstek modulu pružnosti s hloubkou - $E_{inc}$ [MPa/m]	100
Přírůstek soudržnosti s hloubkou - $c_{inc}$ [kPa/m]	0,4
Reyleighovy parametry útlumu - $\alpha, \beta$	0; 0

Materiálový model: Mohr - Coulomb	
Podmínky: Odvodněné	
<b>MODEL - B</b>	
Charakteristika	Hodnota
1. vrstva: zemina – štěrková (G3 – G2)	
Objemová hmotnost – $\gamma$ [kN.m <sup>-3</sup> ]	22,0
Modul pružnosti – E [MPa]	450
Poissonovo číslo – $\nu$ [-]	0,32
Modul pružnosti ve smyku – G [MPa]	170,5*
Soudržnost – $c_{ef}$ [kPa]	0,0
Úhel vnitřního tření – $\varphi_{ef}$ [°]	38,0
Rychlost podélných vln – $v_p$ [m.s <sup>-1</sup> ]	535,9*
Rychlost příčných vln $v_s$ – [m.s <sup>-1</sup> ]	275,7*
Reyleighovy parametry útlumu – $\alpha, \beta$	0; 0
2. vrstva: břidlice – zvětralá (R5 – R6)	
Objemová hmotnost – $\gamma$ [kN.m <sup>-3</sup> ]	22,0
Modul pružnosti – E [MPa]	800
Poissonovo číslo – $\nu$ [-]	0,37
Modul pružnosti ve smyku – G [MPa]	292,0*
Soudržnost – $c_{ef}$ [kPa]	15,0
Úhel vnitřního tření – $\varphi_{ef}$ [°]	24,0
Rychlost podélných vln $v_p$ – [m.s <sup>-1</sup> ]	794,3*
Rychlost příčných vln $v_s$ – [m.s <sup>-1</sup> ]	360,1*
Reyleighovy parametry útlumu – $\alpha, \beta$	0; 0
3. vrstva: břidlice – navětralá (R3 – R4)	
Parametry totožné jako u MODELU - A	

Tabulka č. 7: Souhrn materiálových parametrů jednotlivých vrstev. Hvězdičkou (\*) jsou označeny parametry, které jsou programem automaticky dopočteny.

## Výpočet

Sít konečných prvků byla zhotovena pomocí automatického generátoru obsaženém v programu *Plaxis*. V oblasti zatížení a horní hranice modelu byla síť zahuštěna z důvodu zvýšení přesnosti výpočtu. Každý jednotlivý prvek modelu je rozdělen pomocí automatického schématu na patnáct dílčích uzlů. Jednotlivé hrany trojúhelníkového polygonu jsou rozděleny třemi uzly na čtyři části a další tři uzly se pak nacházejí uvnitř trojúhelníku (viz vpravo Obrázek č. 30).



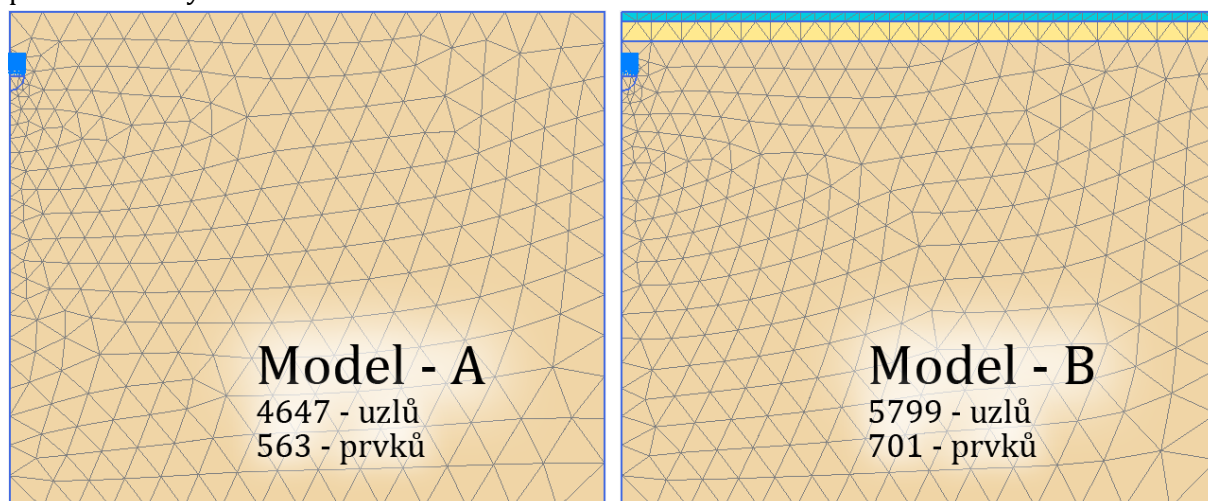
Obrázek č. 30: Schéma trojúhelníkového prvku o patnácti uzlech

Parametr	Hodnota
Amplituda	1000 (násobitel)
Frekvence	50 Hz
Počáteční fáze	0°

Tabulka č.8: Parametry dynamického zatížení

Výpočet byl rozdělen na tři jednotlivá zatěžovací stadia. V prvním byla (staticky) vypočtena primární napjatost modelu. Ve druhém bylo aktivováno spojitě jednotkové zatížení, respektive jeho dynamická složka s parametry (viz vlevo tabulka č. 8). Dynamická výpočetní fáze vyžaduje zadání hodnoty časového úseku, po který daná fáze probíhá. Délka fáze vychází z hodnoty frekvence zdroje buzení tak, že odpovídá přesně jedné periodě, a je tak modelováno zatížení impulsem. V této úloze bude tedy doba trvání výpočetní fáze rovna  $1/50 = 0,02$  s. Třetí, závěrečná fáze je taktéž dynamickým výpočtem a slouží pro volné kmitání prvků přenosového prostředí a šíření vln napětí. Délka fáze je stanovena tak, aby ve všech sledovaných bodech došlo s dostatečnou rezervou k průchodu několika vln napětí a

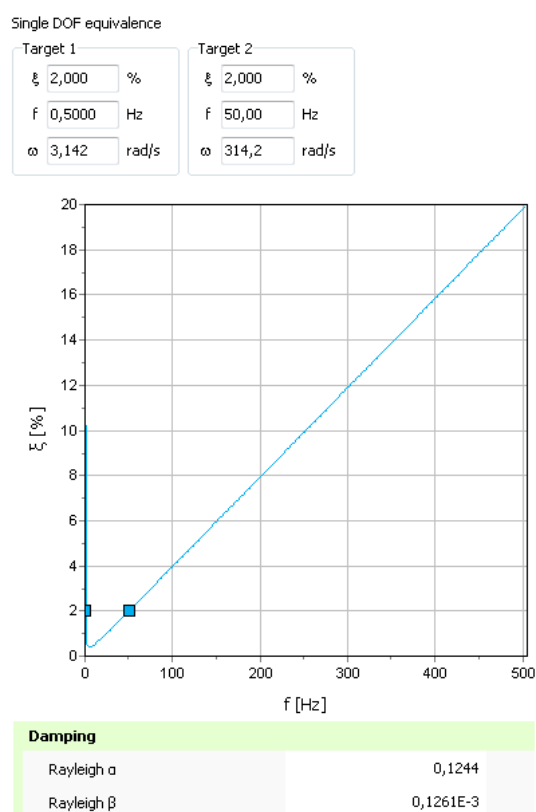
aby bylo možné vyhodnotit ze vzešlých záznamů maximální amplitudy rychlosti kmitání. Délka této fáze byla nastavena na 0,6 s. V modelech nebylo pro zjednodušení počítáno s vlivem podzemní vody.



Obrázek č. 31: Síť konečných prvků pro modely A a B

### Model pro porovnání vlivu ne-geometrického útlumu

Pro určení vlivu vnitřního (viskózního) útlumu byl vytvořen *Model - A\_útlum*, který je geometricky i materiálově totožný s *Modelem - A*, pouze jsou doplněny parametry Reyleighova útlumu. Z důvodu nedostupnosti hodnot útlumu pro vrstvu břidlic ze vstupních zdrojů, byly odhadem zvoleny jako 2 % poměrného útlumu ve frekvencích 0,5 Hz a 50 Hz<sup>22</sup>. V těchto bodech nabývá hodnota útlumu přesně 2 % a v mezilehlém úseku jsou hodnoty doplněny útlumovou křivkou (hodnoty vždy nižší – viz vpravo Obrázek č. 32). Pro úseky vně intervalu jsou hodnoty útlumu vyšší. Po zadání bodů křivky jsou koeficienty  $\alpha$  a  $\beta$  automaticky dopočteny. Vložení útlumu je docíleno „vymazání“ případného šumu daného volným kmitáním a interferencí vln i v pozdějších časových fázích, které by byly za reálných podmínek utlumeny.



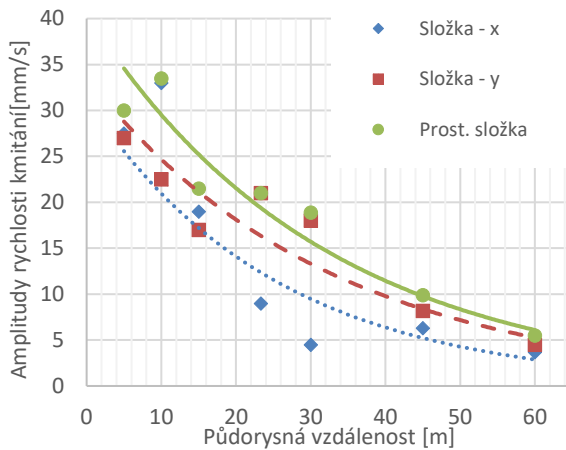
Obrázek č. 32: Zadání parametrů Reyleighova útlumu a útlumové křivky v prostředí programu

### Výsledky a vyhodnocení

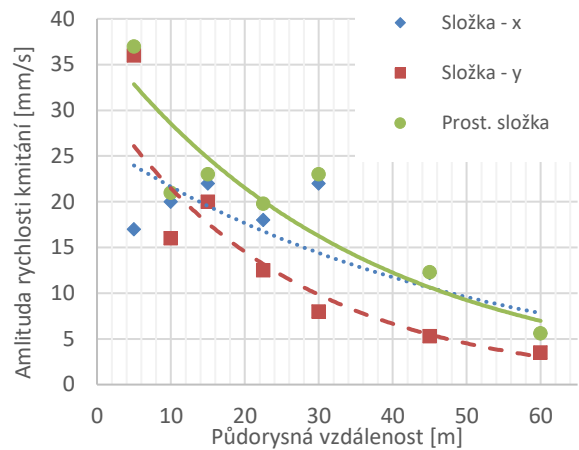
Za základní ukazatel vlivu dynamických účinků technické seismicity je považována amplituda rychlosti sledovaného bodu nacházejícího se na zemském povrchu či na vhodných referenčních

<sup>22</sup> Hodnoty útlumu zemin je možno dohledat v ČSN EN 1998-5 (Eurokód 8: Navrhování konstrukcí odolných proti zemětřesení – Část 5: Základy, opěrné a zárubní zdi a geotechnická hlediska).

stanovištích (15). Pro vyhodnocení výsledků bylo na horní hranici modelu vybráno sedm bodů v různých vzdálenostech od osy symetrie, které sledují postup vln napětí.

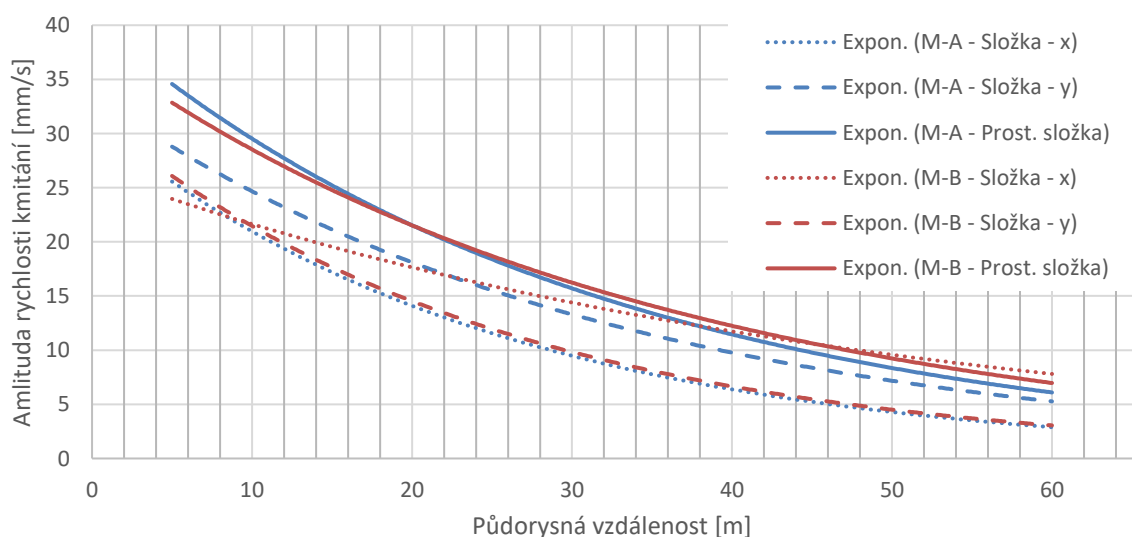


Graf č. 4: Útlumová křivka MODELU – A



Graf č. 5: Útlumová křivka MODELU – B

Na grafech č. 4 a č. 5 jsou vyneseny maximální hodnoty amplitudy rychlosti po jednotlivých složkách (křivky útlumu) zaznamenané v daných vzdálenostech od osy symetrie (5; 10; 15; 23,3; 30; 45; 60 m) na povrchu. Body jsou po jednotlivých složkách proloženy exponenciálními křivkami pro zvýraznění závislosti maximální hodnoty amplitudy rychlosti na vzrůstající vzdálenosti od zdroje dynamického zatížení. Z grafů č. 4 a č. 5 je patrné, že všechny složky amplitudy rychlosti mají se vzrůstající vzdáleností klesající exponenciální charakter. Rozptyl hodnot amplitud se se vzrůstající vzdáleností taktéž snižuje. Velký rozptyl v blízkosti dynamického zdroje je dán především různou interferencí jednotlivých vln. V malých vzdálenostech se podélné a příčné vlny pohybují prakticky společně, s narůstající vzdáleností se začínají oddělovat a dochází k jejich vzájemnému působení, které může mít na výslednou hodnotu amplitudy kladný i negativní dopad.

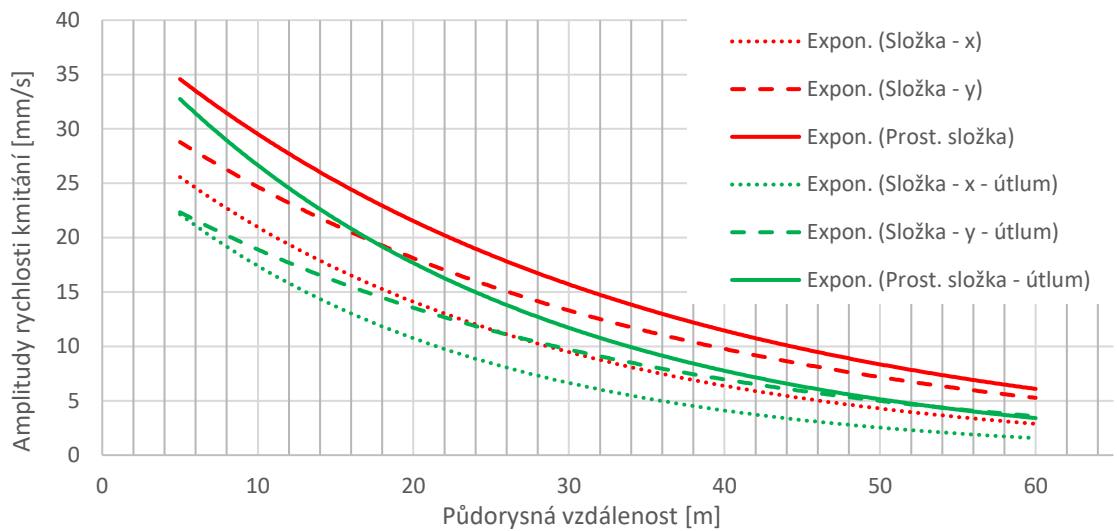


Graf č. 6: Porovnání útlumových křivek (jednovrstvého) MODELU – A a (třívrstvého) MODELU – B

Na Graf č. 6 jsou vykresleny exponenciální křivky útlumu pro oba modely bez viskózního útlumu. Hodnoty „prostorové“ součtové křivky amplitud zůstávají pro oba modely přibližně rovnocenné. Hlavní změnou při průchodu více vrstvami je přesunutí větších amplitud ze svislé

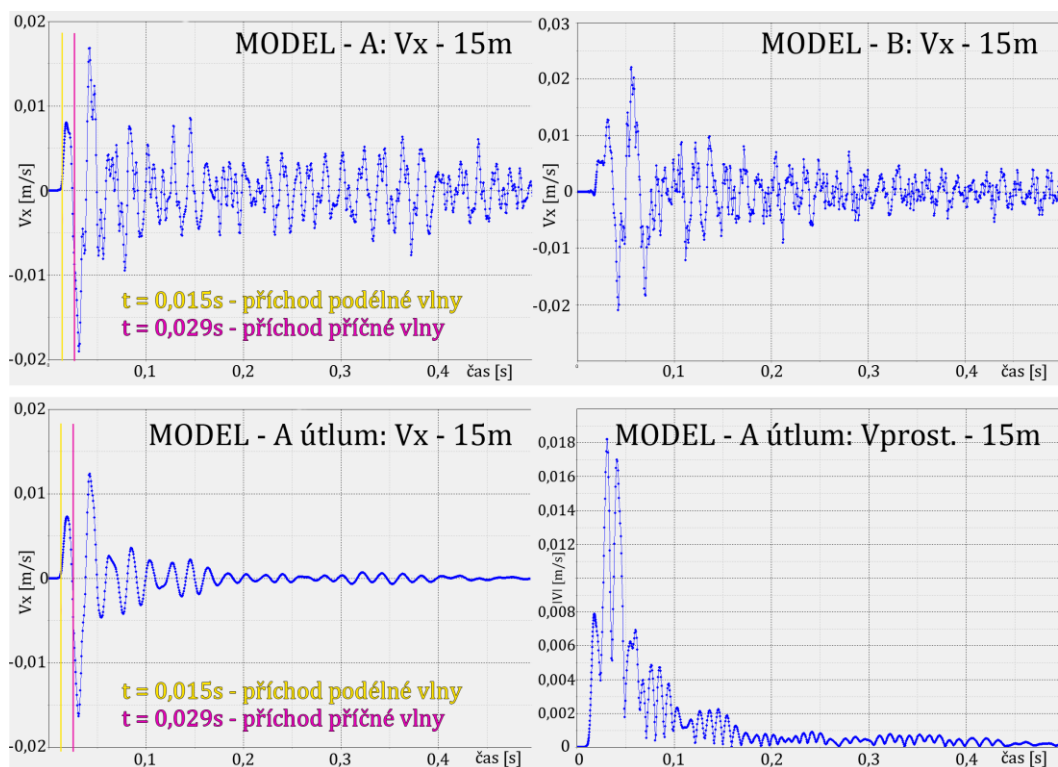


(osa  $y$ ) složky do složky vodorovné (osa  $x$ ). Nižší hodnoty modulu pružnosti pro *Model - B* ve dvou povrchových vrstvách mají za následek zvýšení především amplitud vodorovných ve větších vzdálenostech od dynamického zdroje.



Graf č. 7: Porovnání útlumových křivek MODELU - A a MODELU - A s vnitřním útlumem

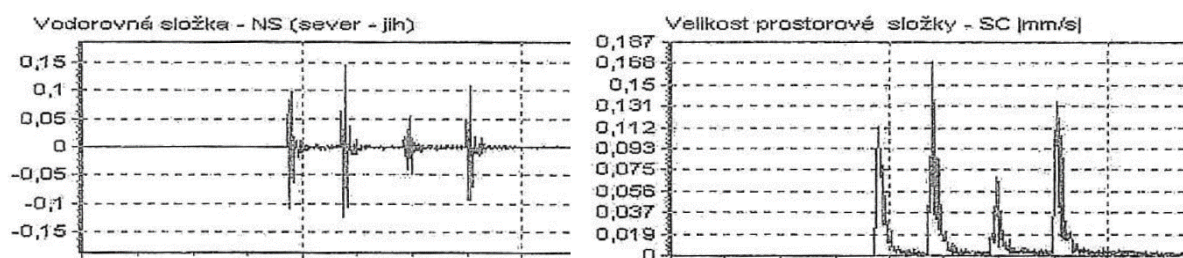
V případě porovnání *Modelu - A* s útlumem a *Modelu - A* bez útlumu (Graf č. 7) můžeme vidět, že maximální hodnoty amplitud rychlosti jsou (v absolutních hodnotách) takřka rovnoměrně sníženy ve prospěch modelu bez útlumu. Poměr útlumu se s narůstající vzdáleností postupně zvětšuje, v počátečních fázích šíření vln tvoří přibližně 10 % až 20 % a u nejvzdálenějších pozorovaných bodů pak vliv útlumu snižuje dosažené amplitudy takřka o 50 %. Zahrnout vliv parametru vnitřního útlumu je tedy důležité především u posuzování objektů nacházejících se ve vzdálenosti, kde jsou maximální hodnoty amplitudy přibližně poloviční (a nižší) oproti hodnotám v epicentru.



Obrázek č. 33: Záznamy vlnových průběhů vodorovné složky amplitudy

Na záznamech vlnových průběhů (viz výše Obrázek č. 33) ze stejné půdorysné vzdálenosti jsou patrné rozdíly mezi jednotlivými modely. Jednovrstvý model s útlumem dává reálnější průběh bez velkého šumu následného volného kmitání prvků prostředí oproti modelu bez vnitřního útlumu. Hodnoty amplitud jsou u modelu s útlumem nejnižší. Naopak největší odezvu má model s více poddajnými vrstvami při povrchu. Je také možné registrovat příchod čela podélné a příčné vlny. Minimální vzdálenost mezi zdrojem dynamického zatížení a sledovaným bodem je přibližně  $l = 17,7 \text{ m}$ . Pro rychlost vln v jednovrstvém modelu pak platí, že čas příchodu vlny je roven nejkratší vzdálenosti dělenou rychlostí příslušného typu vln. Čas příchodu čela pro podélnou vlnu je tedy  $17,7 \text{ m}/1155 \text{ m.s}^{-1} \cong 0,0153 \text{ s}$  a pro příčnou vlnu  $17,7 \text{ m}/605,9 \text{ m.s}^{-1} \cong 0,0292 \text{ s}$ .

Pro porovnání je níže uveden vlnový obraz seizmického projevu TP realizovaných při rekonstrukci štoly Jeroným<sup>23</sup> v Čisté u Krásna. Na záznamu jsou dobře rozeznatelné odstřežely jednotlivých časových stupňů a jejich následný útlum.



Obrázek č. 34: Vybrané vlnové obrazy seizmického projevu TP realizované při rekonstrukci štoly Jeroným (převzato z (42)).

## 2. Studie vlivu parametrů přenosového prostředí pomocí stochastické metody

Jako posuzované místo byl vybrán objekt sledovaný v rámci geotechnického monitoringu při příležitosti výstavby kolektoru Hlávkův most v Praze. Značná různorodost geologického prostředí si zde vyžádala využít během výstavby rozličných způsobů rozpojování. Jednou z použitých technologií byly i trhací práce. Studie se zaměří na vyhodnocení vlivu reálných vstupních geotechnických parametrů na seizmickými účinky postižený sledovaný objekt. Značné rozsahy vstupních parametrů a nejistota vyplývající z nehomogenity přenosového prostředí a jeho neúplné znalosti budou vyhodnoceny pomocí stochastické metody latinských hyperkrychlí (LHS). Metoda LHS umožní generování sad parametrů, které budou následně využity v matematickém modelu vytvořeném v programu *Plaxis 2D* a za použití dynamického modulu tohoto programu bude posuzován vliv geotechnických parametrů na velikost amplitudy rychlosti v oblasti sledovaného objektu. Vypočtené hodnoty budou na závěr statisticky vyhodnoceny.

### 1.1 Lokalita a sledovaný objekt

Projekt výstavby kolektoru Hlávkův most je prováděn jako předstihová stavba před generální rekonstrukcí Hlávkova mostu v Praze. Stavba je situována na pomezí několika pražských městských částí. V jižní části navazuje na Rohanské nábřeží a podchází Těšnovský tunel, vede paralelně podél Hlávkova mostu pod tokem Vltavy, dále přes ostrov Štvanice a v severní části je

<sup>23</sup> Středověký cínový důl.

zakončen vyústěním na holešovickém nábřeží. Budovaný kolektor je kolektor hlubinného typu (II. kategorie) s výškou nadloží přibližně 15 m pod dnem Vltavy.

## Geologie

Morfologické poměry území jsou výsledkem erozně akumulární činnosti Vltavy. Říční koryto zahloubené do komplexu ordovických hornin je intenzivně zvrásněno, tektonicky porušeno a vyniká taktéž pestrostí petrografického složení. Původní morfologie terénu je výrazně narušena vlivem lidské činnosti. Na zvětralém ordovickém skalním podloží leží fluviální sedimenty a navážky. Horniny skalního podloží nacházející se na studovaném objektu jsou na rozhraní souvrství letenského a vinického. Letenské souvrství je charakterizováno jako prachovité a písčité, s vložkami křemenných pískovců a křemenců. Břidlice jsou jemně až hrubě slídnaté a tlustě deskovitě až lavicovitě vrstevnaté. Tvoří nejpevnější horniny na trase kolektoru. Vinické souvrství je zastiženo jako černé, jemně a hrubě slídnaté jílovité břidlice s podílem křemenného prachu, převážně tence vrstevnaté. Tyto břidlice patří k měkčím, plastičtějším horninám střeodočeského ordoviku. (43)

## Posuzovaný objekt

Byl vybrán objekt určený jako zájmový pro projekt geotechnického monitoringu z důvodu své blízkosti a možného ovlivnění TP při ražbách hlavní trasy kolektoru. Jedná se o budovu označovanou jako „Vila Štvanice“ a nachází se na pražském ostrově Štvanice. Podkladem pro modelování se stal konkrétní odstřel provedený v těsné blízkosti sledovaného objektu a po dobu ražeb byl vyhodnocen jako největší seizmický účinek na tento objekt.



Obrázek č. 35: Situace sledovaného objektu a probíhajících ražeb

Došlo k němu v půdorysné vzdálenosti 28,2 m od objektu během přibližování čelby k prorážce. Výška nadloží byla v tento okamžik přibližně 22,7 m. Na referenčním stanovišti v budově byl osazen indukční snímač měřící rychlost kmitání (ve třech složkách  $v_x$ ,  $v_y$ ,  $v_z$  [mm/s]) a maximální frekvenci kmitů. Softwarově pak byla dopočtena prostorová výslednice a vyhodnocena efektivní rychlost kmitání.



Obrázek č. 36: Osazení indukčního snímače rychlostí v objektu Vily Štvanice (foto poskytnuto firmou INSET s.r.o.)

## Projekt odstřelu

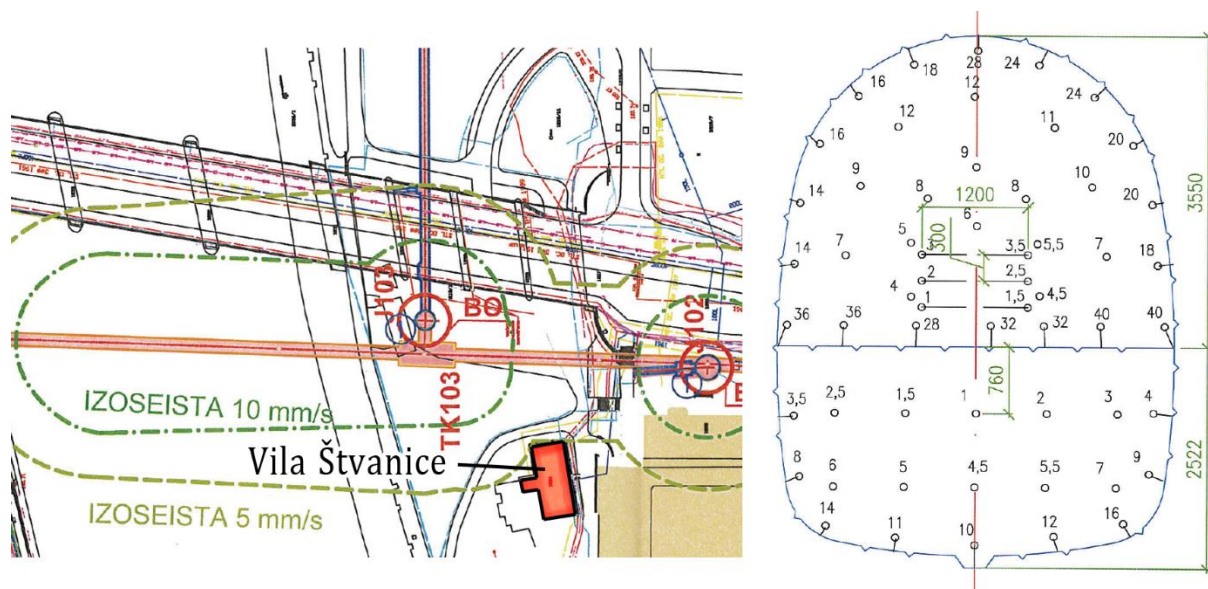
Štola byla ražena metodou NRTM (nová rakouská tunelovací metoda), byla členěna na dvě lávky a celková délka dosáhla přibližně 400 m. Příčným profilem je modifikovaný oblouk o vnitřních rozměrech 3,8 m šířky a 5,45 m výšky (plocha výrubu 23,2 m<sup>2</sup>). Na raženém úseku se nacházejí také čtyři jámy a dvě technologické komory.

Dynamické zatížení objektů bylo v generálním technickém projektu odstřelu posuzováno dle normy ČSN 73 0040 na stupeň poškození 0 – *beze škod* (viz kapitola 2.6). Pro oblast letenského souvrství byla předpokládána dominantní frekvence kmitů *nad 50 Hz* a pro vrstvy vinické *10 až 50 Hz*. Sledovaný objekt je zařazen jako *historická budova v památkové ochraně, staticky porušená*. Z této klasifikace vyplývá nejnižší třída odolnosti *A* a přípustná rychlost kmitání pro frekvence *nad 50 Hz = 6 mm.s<sup>-1</sup>*. Výpočet velikosti ekvivalentní nálože byl proveden podle Kochovy úpravy Morrisova vzorce uvedeného v ČSN 73 0040.

$$m_{ev,n} = \left( \frac{v_p \cdot L_p}{K} \right)^2, \quad [42]$$

kde  $m_{ev,n}$  – ekvivalentní nálož [kg],  $v_p$  – přípustná rychlost kmitání [mm.s<sup>-1</sup>],  $L_p$  – prostorová vzdálenost posuzovaného objektu od epicentra výbuchu [m],  $K$  – koeficient přenosového prostředí šíření seizmických vln [-].

Pro úsek, ve kterém se nacházel objekt Vily Štvanice, byla zvolena hmotnost ekvivalentní nálože  $m_{ev,n} = 0,8 \text{ kg}$  a předpokládané zatížení bylo vypočteno jako  $v_p = 5,2 \text{ mm.s}^{-1}$ . Návrh byl proveden tak, aby nebyly překročeny snížené hodnoty povolených namáhání dotčeného objektu stanoveného znaleckým posudkem. Vzhledem k dosažení odolnosti na úrovni 86 % maximální povolené rychlosti kmitání, byl objekt zařazen do seznamu účastníku řízení o povolení TP. (44)



Obrázek č. 37: Situace sledovaného objektu s vyznačením hodnot izoseist (vlevo), vrtné schéma výrubu hlavní trasy pro třídu NRTM 4 (vpravo). Převzato z (44)

## 1.2 Stanovení skupin parametrů pomocí metody LHS

Metoda LHS (Latin Hypercube Sampling) je redukční simulační pravděpodobnostní metoda typu Monte Carlo (MC). Počátky metody MC sahají již do čtyřicátých let dvacátého století a od druhé světové války je s narůstajícím vývojem výpočetní techniky využívána na řešení náhodných

problémů, u kterých jsou požadovány statistické a pravděpodobnostní informace o odezvě systému. Metoda MC však obvykle vyžaduje velké množství simulací či průchodů pro dosažení požadované úrovně chyby. Abychom snížili počet nutných simulací (z důvodu často velmi velké časové náročnosti výpočtů), byla vyvinuta řada redukčních metod. Jednou z nich je právě metoda latinských hyperkrychlí.

Metoda byla prvně publikována Imanem, Conoverem a jejich kolegy /cit. podle (45)/ na konci sedmdesátých let dvacátého století. Metoda výrazně snižuje počet simulací při zachování vysoké přesnosti odhadů. Každá spojitá náhodná veličina  $X$ , vstupující do výpočtu, je charakterizována funkcí hustoty pravděpodobnosti  $f(x)$  a kumulativní distribuční funkcí  $F(x)$ :

$$F(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x)dx \quad [43]$$

Mezi základní charakteristiky souboru hodnot náhodných veličin patří *střední hodnota* –  $\mu$  ( $EX$ ) a *rozptyl* –  $\sigma^2$  ( $VarX$ ) vyjadřující míru variability dat.

$$\mu = \int_{-\infty}^{+\infty} x \cdot f(x)dx, \quad \sigma^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - \mu)^2 \cdot f(x)dx \quad [44]$$

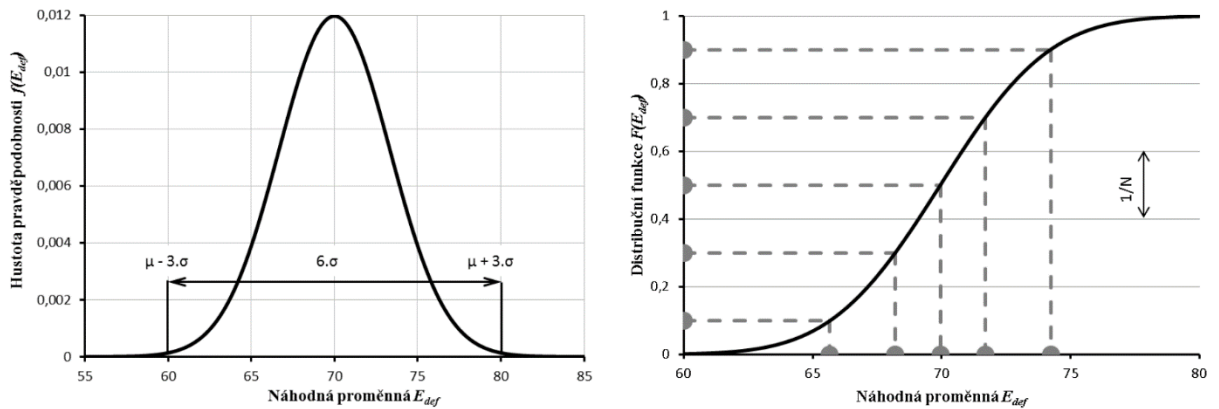
Principem LHS je rozdělení oboru hodnot distribučních funkcí jednotlivých vstupních parametrů na předem daný, konečný počet  $N$  intervalů se stejnou pravděpodobností  $1/N$ . Z každého takového intervalu je pomocí různých způsobů náhodných generací vybrána jedna charakteristická hodnota, která je při simulačním procesu použita právě jednou. Pro výběr charakteristických hodnot bývají užívány především následující metody:

- střední hodnota daného intervalu (LHS – median),
- hodnota odpovídající mediánu daného intervalu neboli těžišti plochy intervalu (LHS – mean<sup>24</sup>),
- náhodná hodnota z intervalu (LHS – random).

Na základě inverzní transformace distribuční funkce se z vybrané hodnoty určí odpovídající reprezentativní hodnota  $x_i$  náhodné veličiny  $X_i$ . Tímto způsobem se rovnoměrně pokryje celý obor hodnot distribuční funkce, a docílí se uspokojivého odhadu výsledných pravděpodobností při relativně malém počtu simulací. Základní koncept metody LHS má však zásadní nevýhodu, a to je nemožnost libovolně přidávat simulace k již vypočteným realizacím. Pokud by byly přidány další sady realizací, došlo by ke ztrátě konzistence a rovnoměrného rozdělení v oboru distribuční funkce<sup>25</sup>. Před započítáním statistického zpracování je však nutno popsat variabilní vstupní parametry pravděpodobnostním rozdělením. Při geotechnických aplikacích dochází často k nedostatečnému množství vstupních dat a nezhůdka bývá dostupný pouze interval vstupních parametrů. V těchto případech je doporučeno použít k popsání dat rozložení normální či lognormální. Výjimkou je použití Weibullova rozdělení, případně exponenciálního rozdělení, a to především z důvodu existence jednoduchého řešení distribuční funkce. (45), (46)

<sup>24</sup> Metoda *LHS-mean* má oproti metodě *median* lepší rozdělení hustoty pravděpodobnosti a rychleji konverguje ke správnému řešení.

<sup>25</sup> Řešení této nevýhody bylo předloženo v podobě metody HSLHS (Hierarchical Subset Latin Hypercube Sampling) (Vořechovský, 2009, 2010, cit. podle (45)).



Obrázek č. 38: Ukázka principu výběru vzorku metodou LHS, převzato z (46).

V této práci byla generátorem skupin parametrů aplikace v prostředí *MS Excel*; vytvořena na katedře geotechniky Fakulty stavební ČVUT. Aplikace generuje deset sad parametrů ze zadaných vstupních intervalů daných maximální a minimální hodnotou konkrétní charakteristiky. Uvažováno je normální rozdělení souboru dat a pro výběr charakteristických hodnot je použita metoda LHS – median. Podkladem pro skladbu geologických vrstev byla realizační dokumentace daného úseku výstavby kolektoru Hlávčův most v jejím plném rozsahu, tj. šest geologických rozhraní. Jako konkrétní charakteristiky bylo vybráno pět parametrů, které byly vyžádány použitým materiálovým modelem Mohr-Coulomb. Jedná se o *objemovou hmotnost* –  $\gamma$  [ $\text{kN/m}^3$ ], *modul pružnosti* –  $E$  [ $\text{MPa}$ ], *Poissonovo číslo* –  $\nu$  [-], *efektivní soudržnost* –  $c_{ef}$  [ $\text{kPa}$ ] a *efektivní úhel vnitřního tření* –  $\varphi_{ef}$  [ $^\circ$ ]. Vstupní rozsahy charakteristik byly převzaty ze statického výpočtu primárního ostění štoly (40). Výpis všech deseti sad vstupních parametrů pro šest geologických vrstev, včetně základních statistických charakteristik, je uveden v příloze 2. Jednotlivé charakteristiky nejsou mezi sebou navzájem korelovány.

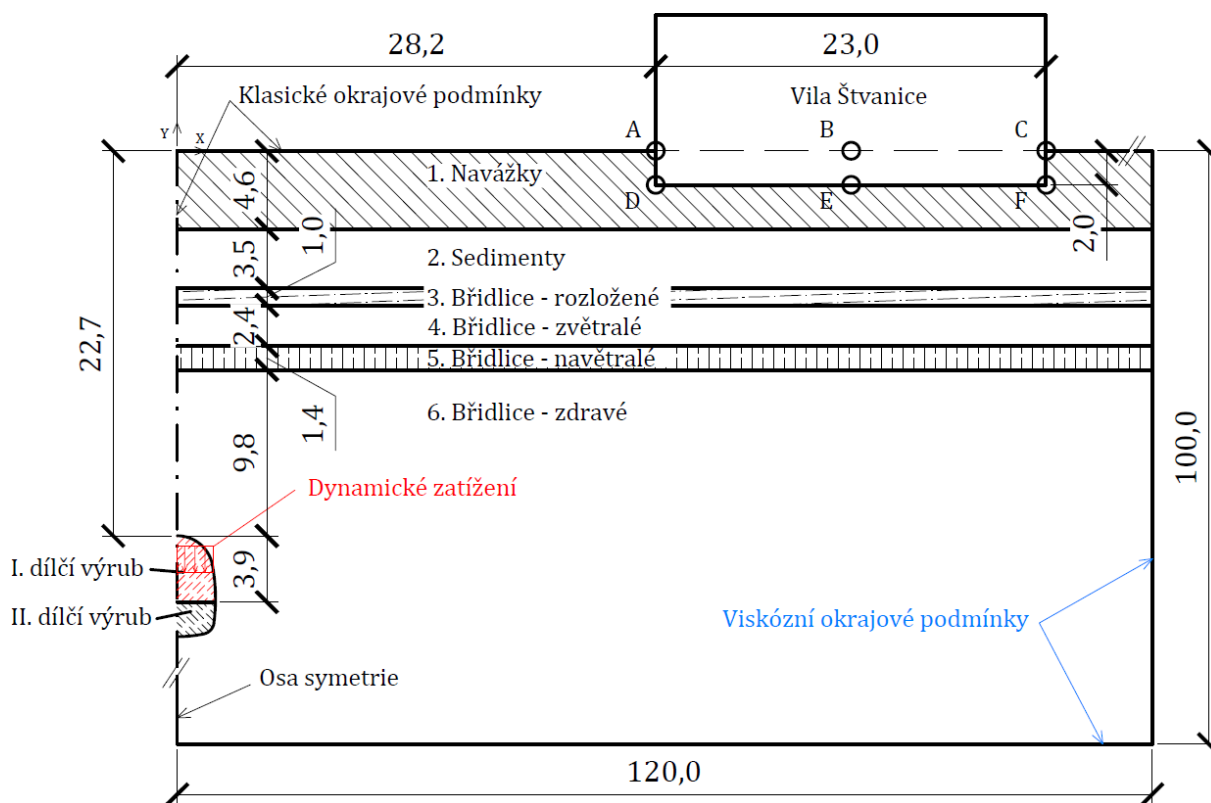
### 1.3 Modelování a výpočet

Celkově bylo zhotoveno 11 modelů v prostředí dynamického modulu programu *Plaxis 2D* (10 modelů s parametry dle metody LHS a 1 základní model pro určení odpovídajícího dynamického zatížení). Geometrie modelů byla vždy stejná; byly měněny pouze materiálové

Parametr	Hodnota
Amplituda	1000 (násobitel)
Frekvence	125 Hz
Počáteční fáze	$0^\circ$

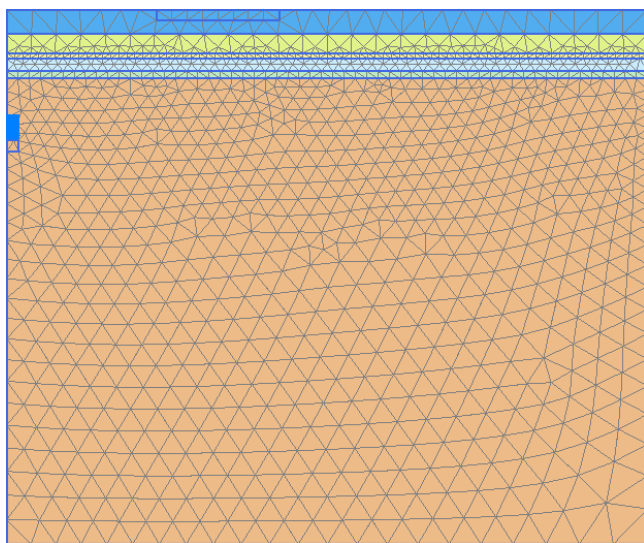
Tabulka 9: Parametry dynamického zatížení

charakteristiky jednotlivých vrstev dle výstupu z metody LHS. Model byl zhotoven jako osově symetrický o rozměrech 120 m (*osa x*) a 100 m (*osa y*) – viz níže Obrázek č. 39. Na pravý a spodní okraj modelu byly aplikovány viskózní (absorpční) okrajové podmínky za účelem zabránění vlnám napětí ve zpětném odrazu směrem do modelu. Zbylé hranice byly ponechány ve výchozím nastavení. Veškeré geologické rozhraní bylo pro zjednodušení uvažováno jako vodorovné a jak již bylo zmíněno, byl taktéž zanedbán vliv podzemní vody. Šíření vln napětí bylo uvažováno pouze s geometrickým útlumem – kromě dvou svrchních vrstev (navážky, sedimenty), u nichž byly nastaveny parametry Reyleighova útlumu  $\alpha = 0,1252$  a  $\beta = 5,073 \cdot 10^{-5}$ , což odpovídá 2 % poměrnému útlumu při frekvencích 0,5 Hz a 125 Hz.



Obrázek č. 39: Schéma základní geometrie výpočtového modelu

Dynamické zatížení bylo modelované pomocí spojitého liniového zatížení s aktivovanou dynamickou složkou a vloženým harmonickým násobitelem. Bylo umístěno přibližně do poloviny výšky prvního dílčího výrubu na šířku kaloty. Parametry dynamického zatížení byly určeny tak, aby odpovídaly maximální reálné odezvě zaznamenané během ražby pomocí TP. V prostorové složce při dominantní frekvenci  $125 \text{ Hz}$  činila po vyhodnocení firmou INSET s.r.o. tato hodnota maximální rychlosti kmitání  $4,1 \text{ mm.s}^{-1}$ . Frekvence dynamického zdroje byla tedy nastavena na tuto hodnotu a násobitel byl nastaven hodnotou  $1000$  (při tomto nastavení odpovídala odezva ve vybraných bodech na objektu přibližně hodnotám  $4 \text{ mm.s}^{-1}$ ). Parametr počáteční fáze zůstal ve



Obrázek č. 40: Vizualizace generované sítě konečných prvků.

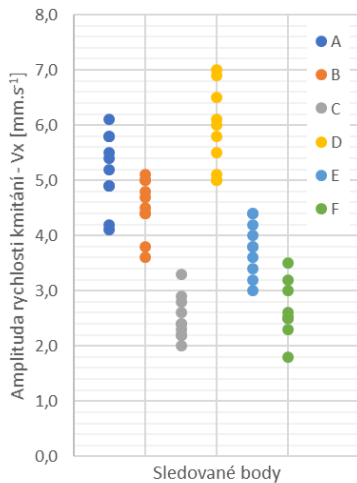
výchozím nastavení, tj.  $0^\circ$ . V místech sledovaného objektu vily Štvanice bylo umístěno celkem šest sledovaných bodů. Tři z nich (A-C) se nacházely v úrovni terénu a další trojice (D-F) příslušela přibližně úrovni základů (sklepu) v hloubce  $2,0 \text{ m}$  pod povrchem terénu. Generovaná síť konečných prvků byla zahuštěna v okolí zdroje kmitání, v oblastech sledovaného objektu a na rozhraní geologických vrstev pro získání přesnější vypočtené odezvy. Výsledná síť se skládala z  $2\,236$  prvků a  $18\,144$  uzlů (podoba sítě viz vlevo Obrázek č. 40).

Výpočet byl rozdělen do třech fází. Během první, statické fáze provedl program výpočet primární napjatosti modelu. Zbývající dvě fáze byly již dynamické: v první z nich byl aktivován dynamický zdroj po dobu jedné periody

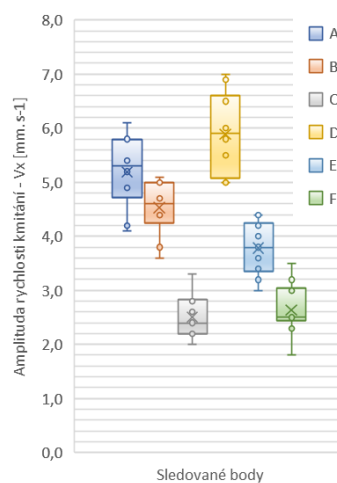
nastavené budicí frekvence kmitání, tj.  $1/125 = 0,008$  s; dynamický čas poslední fáze byl nastaven na hodnotu  $0,7$  s a představoval období šíření vln napětí a jejich interakce s obklopujícím prostředím.

### 3. Vyhodnocení a porovnání vypočtených hodnot

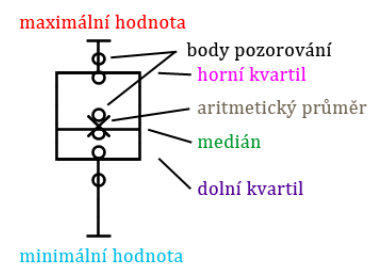
Na výpočetních modelech se nacházelo šest sledovaných bodů ležících v oblasti základů a v úrovni terénu dotčeného objektu. Pro každý z těchto bodů byl vytvořen časový obraz vlnového průběhu a z něho odečtena maximální amplituda rychlosti kmitání ve dvou osách ( $x, y$ ) a celkové prostorové složce (viz výše Graf č. 9). Z důvodu větší přehlednosti budou níže uvedeny jen některé



Graf č. 9: Záznam vypočtených maximálních amplitud

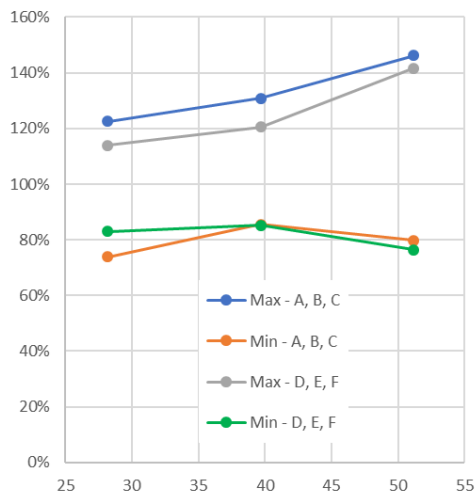


Graf č. 8: Krabicové grafy se základními statistickými charakteristikami amplitud rychlostí



grafy související se slovním komentářem výsledků analýzy; kompletní přehled nalezne čtenář v příloze 3.

Odečtené hodnoty amplitud byly dále statisticky zpracovány a souborům byly po jednotlivých složkách přiděleny základní pravděpodobnostní charakteristiky. Tyto charakteristiky pak byly pro názornost zaneseny do krabicových grafů (viz výše Graf č. 8), ze kterých je patrné, jak se se zvětšující se vzdáleností od výbuchu rozptýl hodnot amplitud rychlostí zmenšuje. Mohlo by se zdát, že se zvětšující se vzdáleností od epicentra vzrůstá i přesnost vypočtených hodnot a nedochází již ve větší míře k odlehlým pozorováním. Z tohoto důvodu byl

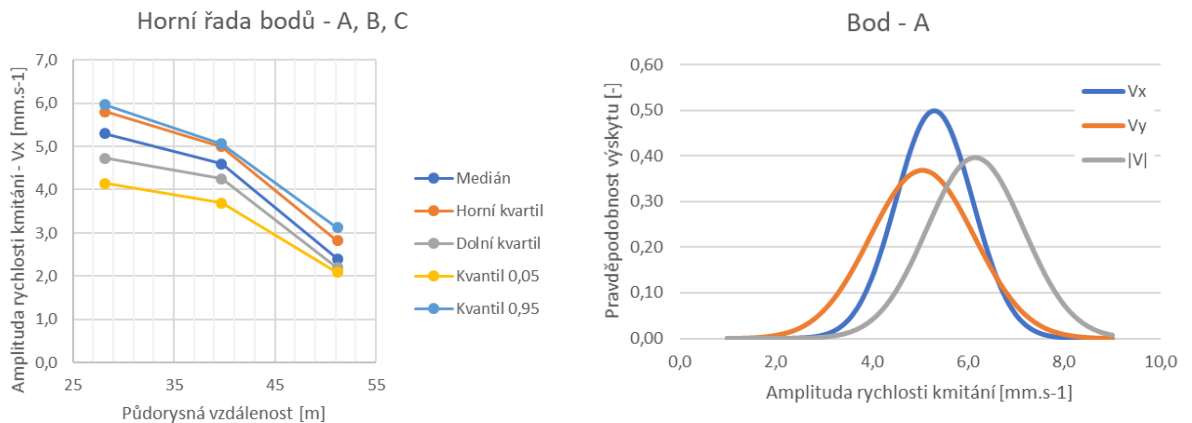


Graf č. 10: Poměrné rozpětí max. a min. hodnot amplitud rychlostí

sestaven Graf č. 10 (viz níže), který bere do úvahy závislost minimální a maximální prostorové výchylky v procentech a střední hodnotu uvažuje jako 100%. Z grafu vyplývá, že s narůstající vzdáleností se poměrné rozpětí mezi maximálními a minimálními hodnotami spíše mírně zvyšuje. Pokud porovnáme rozsah odezvy a vstupních údajů (především *modulu pružnosti* a *soudržnosti*, viz níže příloha 2, vidíme, že závislost je přibližně přímo úměrná a závislá především na rozsahu *modulu pružnosti*. Dále byly vykresleny a statisticky vyhodnoceny útlumové křivky po délce sledovaného objektu pro obě výškové úrovně (viz výše Graf 12). Sledovaný objekt má převládající rozměr kolmý na směr šíření vln napětí, a tudíž je dobře patrný pokles amplitud



rychlosti po jeho délce. Zatížení části objektu přilehlé ke směru provádění TP je tak až trojnásobně více seizmicky namáhán než část vzdálenější. Dominantní frekvence otřesů 125 Hz je poměrně



Graf 12: Statistický vyhodnocení útlumových křivek

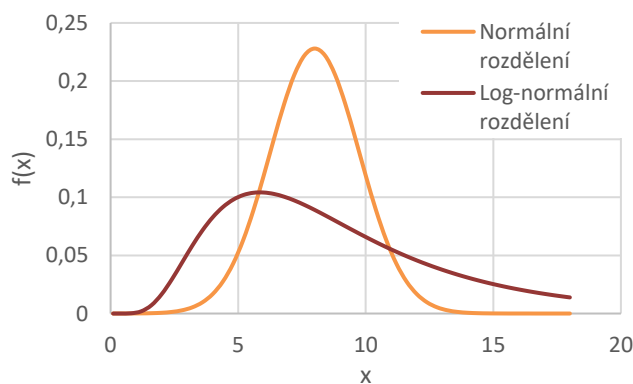
Graf 11: Hustota pravděpodobnosti výskytu za předpokladu normálního rozložení hodnot.

vysoká, avšak za přítomnosti podloží, které by mělo velké rychlosti šíření vln (konkrétní hodnoty pro posuzovanou budovu nebyly známy), by mohlo při nevhodné kombinaci vlivem délky vlny<sup>26</sup> dojít k značně nerovnoměrnému namáhání budovy a prvky křehké na ohyb by se mohly porušit.

Se statistickým souborem bylo při vykreslení hustoty pravděpodobnosti zacházeno jako s normálním rozložením. Některé soubory však vykazovaly spíše prvky log-normálního rozložení (viz níže příloha 2 a vykreslení histogramů četností pro dva nejzatíženější body na straně 81). Oba typy rozdělení jsou v oblasti geotechnických charakteristik velmi běžné (45).

### Problém rychlosti šíření vln prostředím

Během vyhodnocování došlo k obtížím s určením maximální hodnoty amplitud rychlosti kmitání. I přes zadaný vnitřní útlum ve dvou svrchních materiálových vrstvách docházelo i po příchodu smykových vln napětí ke zvyšování amplitud. Za příčinu tohoto jevu byla stanovena hodnota deformačního modulu  $E$  převzatá ze statického výpočtu. Obecně se doporučuje používat pro dynamické výpočty vyšší hodnoty modulu pružnosti  $E$  (31). Jelikož cílem bylo určit rozsah odezvy přenosového prostředí na předem daný rozsah hodnot získaný z reálného geologického



Graf č. 13: Ukázka typických tvarů hustot náhodných veličin pro normální a log-normální rozdělení

řezu, nemohly být tyto hodnoty již na počátku zkruseny. Vlastnosti zemin a hornin se při cyklickém zatěžování mění a jsou někdy nazývány *dynamickými*. Dynamické zkoušky jsou však pro primární statický výpočet méně využitelné, a proto nebývají před zahájením stavby standardní součástí inženýrsko-geologického průzkumu.

Rychlost šíření vln je v materiálovém modelu Mohr-Coulomb vypočítána podle vztahů [26] a [27], ve kterých hraje primární roli právě *modul pružnosti – E*. Když jsem porovnal hodnoty ze statického výpočtu a

<sup>26</sup> Vlnová délka  $\lambda$  [m] se vypočítá jako podíl rychlosti šíření vlny  $v$  [m/s] a její frekvence  $f$  [Hz] ( $\lambda = v/f$ ).

hodnot uvedených v (41), dospěl jsem k názoru, že představené hodnoty modulu pružnosti pro geologické vrstvy jsou spíše na nižších, konzervativnějších úrovních a společně s vlastností materiálového modelu došlo k nepříjemné kombinaci, která ve svém důsledku vedla k méně reálnému obrazu seizmických vln.

### Model 10 - rychlosti

Během výstavby kolektoru Hlávkův most došlo k rozhodnutí provádět na čelbách po předem daných vzdálenostech bezpečnostní horizontální předvrty sloužící ke zjištění poruch (případně zvodnělé čočky či poruchová pásma) a nehomogenit v prostoru před čelbou. V rámci geotechnického monitoringu pak probíhalo i geofyzikální a seizmické měření v těchto vrtech. Z výsledků dodaných firmou INSET s.r.o. vyplývá, že v úrovni kaloty se rychlosti šíření pohybují v rozmezí 1 200 m.s<sup>-1</sup> (v blízkém pásmu před čelbou narušenou trhacími pracemi) až po rychlosti blízké se 5 000 m.s<sup>-1</sup> s lokálním výskytem křemenců. Pro ověření chování modelu s vyššími rychlostmi byl geometricky převzat model č. 10 a byly dosazeny předpokládané vyšší rychlosti šíření vln napětí. Byly zadány rychlosti podélných vln s automatickým dopočtením hodnoty modulu pružnosti  $E$ , a tím došlo také k přepočítání smykového modulu  $G^{27}$  s vlivem na rychlost příčných (smykových) vln (viz níže Tabulka č. 10).

Vrstva	Modul pružnosti - $E$ [MPa]	Rychlost podélných vln - $v_p$ [m.s <sup>-1</sup> ]	Rychlost příčných vln - $v_s$ [m.s <sup>-1</sup> ]
Navážky	239,5 (16,7)	450 (118,7)	204,4 (53,9)
Sedimenty	1 076 (112,9)	850 (275,4)	428,2 (138,7)
Břidlice - rozložené	703,2 (23,1)	800 (144,8)	339,7 (61,5)
Břidlice - zvětralé	3 730 (120,3)	1 600 (287,3)	768,6 (138,0)
Břidlice - navětralé	8 510 (361,6)	2 200 (453,4)	1 132 (233,3)
Břidlice - zdravé	18 080 (630,5)	3 000 (560,2)	1 632 (304,7)

Tabulka č. 10: Nové parametry pro numerický model. V závorkách jsou uvedeny (původní) hodnoty pro model č. 10, ze kterého parametrově nový model vychází.

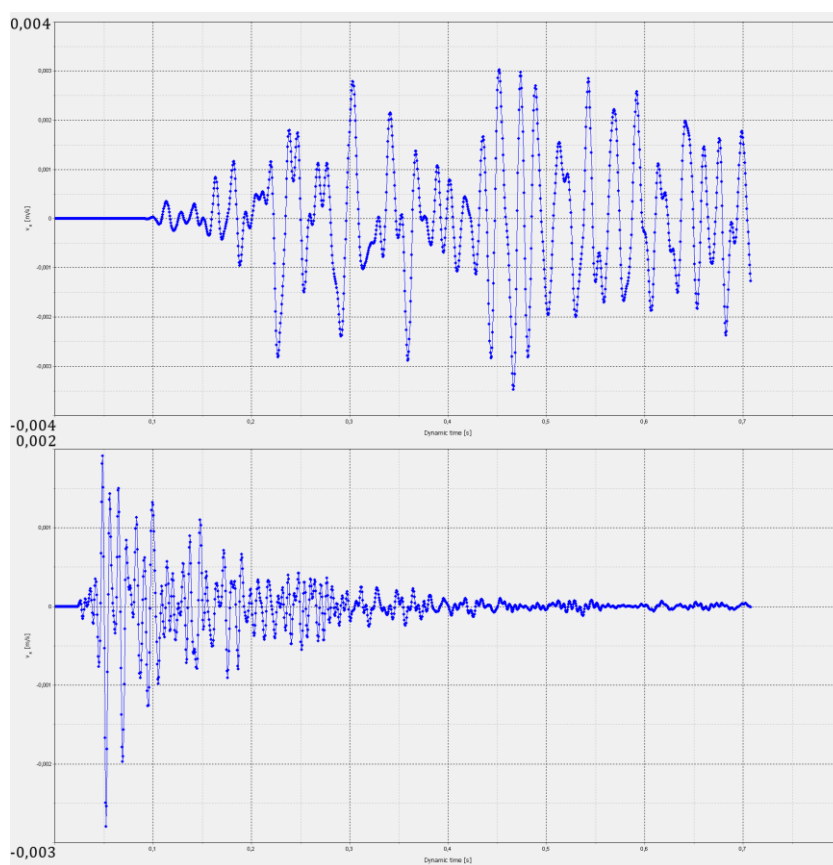
S výrazným zvýšením modulu pružnosti  $E$  došlo ke snížení odezvy prostředí na seizmické vlny v celém oboru vzdáleností od zdroje (viz níže Tabulka č. 11). Pro dosažení původních hodnot amplitud rychlosti kmitání by muselo dojít ke zvýšení amplitudy (násobitele) dynamického zdroje, která představuje energii uvolněnou výbuchem nálože. Zvýšením modulu pružnosti  $E$  došlo také ke zlepšení čitelnosti seizmického obrazu (viz níže Obrázek č. 41) a vizuálnímu přiblížení reálnému odstřelu (viz výše Obrázek č. 34).

Při dynamické analýze trhacích prací lze tedy doporučit, aby se věnovala pozornost vstupním hodnotám modulu pružnosti -  $E$ , a to z důvodu výrazného projevu do výsledné odezvy i do průběhu seizmického vlnění.

<sup>27</sup> Alternativně je možno zadávat smykový modul -  $G$  jako hlavní parametr (s přímým vlivem na rychlost šíření smykových vln) a analogicky dopočten bude modul pružnosti -  $E$ .

		Sledované body – maximální hodnoty amplitudy rychlosti [mm/s]					
		A	B	C	D	E	F
Model 10	V <sub>x</sub>	5,8	3,8	2,3	5,0	3,0	3,5
	V <sub>y</sub>	5,2	4,5	2,9	5,5	4,4	3,4
	V	7,9	5,2	3,2	6,8	4,6	3,5
Model Rychlosti	V <sub>x</sub>	4,5	2,5	1,3	3,5	2,8	1,0
	V <sub>y</sub>	3,6	2,4	1,1	3,4	1,5	1,2
	V	4,5	2,7	1,5	4,2	2,8	1,3

Tabulka č. 11: Porovnání nových maximálních hodnot amplitudy rychlosti oproti výchozímu modelu



Obrázek č. 41: Porovnání seizmických obrazů pro vodorovnou složku kmitání bodu E. Původní obraz s nízkými rychlostmi šíření vln (nahore). Je dobře patrný pozdější příchod čel vln, výrazné interference a pomalý útlum kmitání

## Závěr

Cílem práce bylo zpracování rešerše problematiky seizmických účinků trhacích prací a dále určování vlivu vibrací na okolní zástavbu měření a výpočtem. Další úlohou bylo popsání vlivu trhavin na okolní horninový masiv a aplikace zásad normy ČSN 73 0040. Cílem praktické části diplomové práce bylo stanovit odezvu horninového prostředí na vibrace a ukázání vzorového výpočtu.

Teoretická část je rozdělena na dva dílčí celky. První se věnuje problematice a základní charakteristice prostředků trhacích prací a působení výbuchu nálože na horninové prostředí. Druhá část je pak více zaměřena přímo na jevy související se šířením vln napětí prostředím a na seizmické účinky TP. V závěru této části je pak uvedeno, jak k problematice přistupuje norma ČSN 73 0040 a je probrán i vztah Eurokódu 8 k problematice dynamického zatížení budov.

Praktická část se plně věnuje modelování účinků trhacích prací ve výpočetním softwaru. Pro tyto účely byl vybrán program *Plaxis 2D*, který umožňuje dynamickou analýzu geotechnických problémů, v tomto případě v dvourozměrném prostředí.

Jako materiálový model byl zvolen Mohr-Coulomb a po úvodním představení programu následuje část věnující se základním parametrům tohoto modelu jako je objemová tíha  $\gamma$ , modul pružnosti  $E$ , soudržnost  $c$ , úhel vnitřního tření  $\varphi$  a rychlosti šíření vln napětí  $v_p$ ,  $v_s$ .

V prvním příkladu modelování účinků TP se věnuji zadání vstupních parametrů dynamického zatížení, které je modelováno jako spojitě harmonické zatížení. Dynamickými parametry jsou pak hodnota amplitudy, frekvence buzení a počáteční fáze. Účinek výbuchu je modelován jako „téměř“ impulsní, kdy doba trvání zatížení je shodná s délkou jedné periody buzení frekvence výbuchu. Aby mohly být ukázány základní vlastnosti šíření vln napětí, byly zhotoveny dva modely (osově symetrické), které jsou geometricky totožné a liší se pouze složením geologického prostředí. Ve vyhodnocení modelů jsou prezentovány především maximální amplitudy rychlosti kmitání, které jsou pro určení míry zatížení nadzemních objektů rozhodující. Jsou ukázány útlumové křivky (amplitudy rychlosti kmitání), které mají se vzrůstající vzdáleností snižující se exponenciální charakter. Pro porovnání je taktéž ukázán vliv negeometrického (viskózního) tlumení, který dopomáhá k dosažení reálnějšího vlnového obrazu odezvy sledovaných bodů a snížení maximálních amplitud rychlosti kmitání.

Druhý příklad principiálně vychází z prvního představeného příkladu. Jsou v něm však dosazeny reálné rozměry a geotechnické charakteristiky geologického prostředí, které byly získány z probíhající stavby kolektoru Hlávkův most v Praze. Pro nastavení reálných parametrů dynamického zatížení byl použit maximální účinek seizmických vln na jeden vybraný objekt, který byl sledován v rámci geotechnického monitoringu. Ve vyhodnocení tohoto příkladu je uvedena diskuse nad vhodností zadávání statických veličin pro dynamické výpočty orientované především na hodnotu modulu pružnosti, který se pro účely modelu ukázal jako příliš malý. Následně je ukázána možnost pravděpodobnostního zpracování výsledků odezvy sledovaných bodů. Pro tento účel bylo zpracováno deset variant modelu s rozdílnými hodnotami geotechnických charakteristik, které byly určeny ze zadaných rozmezí převzatých ze statického výpočtu. Na generování deseti sad nezávislých skupin parametrů byl použit generátor vyvinutý na katedře geotechniky ČVUT v Praze a založený na metodě latinských hyperkrychlí (LHS). Z výsledků je patrné, že lze pomocí pravděpodobnostní analýzy dobře postihnout charakter proměnného geologického prostředí. Zároveň bylo poukázáno na vysokou míru rozpětí těchto hodnot.

Pro ukázkou výpočtu byl vybrán jeden z běžně dostupných výpočetních softwarů a stochastická analýza výsledků. Další rozvíjení této práce by mohlo mít mnoho směrů a soustředění se na téměř jakýkoliv aspekt výpočtu by mohlo být podnětem ke vzniku nového materiálu. Například by bylo možné porovnat přístupy a výpočty pomocí dalších softwarů umožňujících analýzu geotechnických dynamických úloh jako je například *Midas GTS NX* nebo *FLAC 3D*, případně se věnovat problematice vlivu podzemní vody a rozměru diskontinuit na odezvu prostředí.

# Bibliografie

- (1) DOJČÁR, Ondrej, Jiří HORKÝ a Robert KOŘÍNEK. *Trhacia technika*. Ostrava: MONTANEX, a.s., 1996. ISBN 80-85780-69-0.
- (2) VÁVRA, Pavel. *Teorie výbušin*. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2002. ISBN 80-7194-444-0.
- (3) PRAVDA, Vladimír a Jiří BĚTÍK. *Trhací práce v hornictví, stavebnictví a speleologii*. Jesenice u Prahy: Montanika o.s., 2010. ISBN 978-80-254-8542-2.
- (4) HENRYCH, Josef. *Dynamika výbuchu a její užití*. Praha: Academia, 1973.
- (5) POKROVSKIJ, G. I. *Vzryv*. 1980. Moskva: Nedra, b.r.
- (6) BARTOŠ, Josef a Roman MEČÍŘ. *Příručka pro střelmistry v hornictví, stavebnictví a ostatních oborech*. 2. přepracované vydání. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1975.
- (7) MÁCA, Jiří. *Přednášky předmětu 132YSEI - Seizmické inženýrství*. Praha: FSv ČVUT, 2017.
- (8) KŘÍŽEK, M. Zemětřesení na území České republiky. *V zorném poli geografů: Geografické rozhledy*. b.r., **07-08**(2). ISSN 12103004.
- (9) KALÁB, Z. a J. KNEJZLÍK. *Field Measurement of Surface Seismic Vibrations Provoked by Mining in Karvina Region*. Warszawa: Geophys. Pol. Acad. Sc., 2006, (-29395, 185-194).
- (10) MOSINEC, V. N. a kol. *Rozrušenie gornych porod vzryvom*. Moskva: Nedra, 1975.
- (11) SHERIFF, Robert E. a L. P. GELDART. *Exploration seismology*. 2nd ed. New York: Cambridge University Press, 1995. ISBN 978-052-1468-268.
- (12) BOLT, B.A. *Earthquakes*. New York: W.H.Freeman, 1993.
- (13) MAREŠ, Stanislav a kol. *Úvod do užití geofyziky*. 2., přeprac. vyd. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1990. ISBN 80-030-0427-6.
- (14) LOWRIE, William. *Fundamentals of geophysics*. 2nd ed. New York: Cambridge University Press, 2007. ISBN 978-0521675963.
- (15) HOLUB, Karel. Vibrace vyvolané trhacími pracemi a jejich účinky na podzemní díla, povrchovou zástavbu a na obyvatelstvo. In: *Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské - Technické univerzity Ostrava: řada stavební*. Ostrava: Vysoké škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2006, s. 113-123. ISBN 80-248-1187-1. ISSN 1213-1962.
- (16) ISAAC, I.D. a C. BUBB. A study of blast vibrations.: Part 1. *Tunnels & Tunneling*. 1981, **13**(6), 35-41.

- (17) PANDULA, Blažej. *Metodológia seizmiky trhacích prác* [online]. In: . Košice, 2014 [cit. 2017-12-10].
- (18) ČSN 73 0040 - *Zatížení stavebních objektů technickou seizmicitou a jejich odezva*. Praha: Český normalizační institut, 1996.
- (19) GUSSTAFSSON, R. a B. HALL. Zulässige Werte von Bodenerschütterungen beim Sprengen in Schweden. *Nobel Hefte*. 1969, (), 33-38.
- (20) GHASEMI, Ebrahim, Hamid KALHORI a Raheb BAGHERPOUR. A new hybrid ANFIS–PSO model for prediction of peak particle velocity due to bench blasting. *Engineering with Computers*. 2016, **32**(4), 607-614. DOI: 10.1007/s00366-016-0438-1. ISSN 0177-0667. Dostupné také z: <http://link.springer.com/10.1007/s00366-016-0438-1>
- (21) SHIRANI FARADONBEH, R, D JAHED ARMAGHANI, M. Z. ABD MAJID, M. MD TAHIR, B. RAMESH MURLIDHAR, M. MONJEZI a H. M. WONG. Prediction of ground vibration due to quarry blasting based on gene expression programming: a new model for peak particle velocity prediction. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2016, **13**(6), 1453-1464. DOI: 10.1007/s13762-016-0979-2. ISSN 1735-1472. Dostupné také z: <http://link.springer.com/10.1007/s13762-016-0979-2>
- (22) HAJIHASSANI, Mohsen, Danial JAHED ARMAGHANI, Aminaton MARTO a Edy TONNIZAM MOHAMAD. Ground vibration prediction in quarry blasting through an artificial neural network optimized by imperialist competitive algorithm. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2015, **74**(3), 873-886. DOI: 10.1007/s10064-014-0657-x. ISSN 1435-9529. Dostupné také z: <http://link.springer.com/10.1007/s10064-014-0657-x>
- (23) REVEY, G.F. Evaluating and managing construction blasting risk. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*. 2001, **6**(1), 1-4. ISSN 1943-5576.
- (24) Seismometry. In: *Geofyzikální ústav Akademie věd ČR, v.v.i.* [online]. b.r. [cit. 2018-01-01]. Dostupné z: <https://www.ig.cas.cz/userdata/files/popular/Seismometry.pdf>
- (25) BUNEŠ, Josef. *Přehled metod mělkého seismického průzkumu*. Praha, 2016. Bakalářská práce. Univerzita Karlova v Praze - Přírodovědecká fakulta.
- (26) KALÁB, Zdeněk. Mělká podzemní díla a vibrace. *Časopis tunel*. 2007, **16**(2), 12-20. ISSN 1211-0728.
- (27) FISCHER, Ondřej. Nová norma pro navrhování konstrukcí odolných proti účinkům zemětřesení. *Časopis stavebnictví: statika a dynamika staveb*. 2009, **3**(3), 32-36. ISSN 1802-2030.
- (28) STOLÁRIK, Martin, Zdeněk KALÁB a Miroslav PINKA. Analýza koeficientů přenosu prostředí na třech mělce ražených tunelech. *Tunel*. 2017, **26**(2), 41-47. ISSN 1211 – 0728.
- (29) KALÁB, Zdeněk a Markéta LEDNICKÁ. *Přednáška - ČSN 73 0040* [online]. In: . b.r. [cit. 2017-12-10]. Dostupné z: <http://homel.vsb.cz/~pin078/TOJU/prednaska10b.pdf>

- (30) ČSN EN 1998-1: Eurokód 8: Navrhování konstrukcí odolných proti zemětřesení - Část 1: Obecná pravidla, seizmická zatížení a pravidla pro pozemní stavby. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- (31) PLAXIS 2D: Reference Manual [online]. 2017. Delft, Nizozemsko: Plaxis bv, 2017 [cit. 2017-12-21]. Dostupné z: <https://www.plaxis.com/support/manuals/plaxis-2d-manuals/>
- (32) PETŘÍK, Tomáš a Eva HRUBEŠOVÁ. VLIV ZMĚNY DEFORMAČNÍHO MODULU ZEMINY NA ŠÍŘENÍ SEIZMICKÉHO VLNĚNÍ. *EGRSE: International Journal of Exploration Geophysics, Remote Sensing and Environment*. Praha: Česká Asociace Geofyziků, 2012, **19**(2), 75-83. ISSN 1803-1447.
- (33) *Plaxis: Material Models Manual* [online]. Build 8601. Delft, Nizozemsko: Plaxis bv, 2017 [cit. 2017-12-21]. Dostupné z: <https://www.plaxis.com/support/manuals/plaxis-2d-manuals/>
- (34) *PLAXIS 2017: General information* [online]. 2017. Delft, Nizozemsko: Plaxis bv, 2017 [cit. 2017-12-21]. ISBN 978-90-76016-22-1. Dostupné z: <https://www.plaxis.com/support/manuals/plaxis-2d-manuals/>
- (35) HRUBEŠOVÁ, Eva a Barbara LUŇÁČKOVÁ. Modelování dynamických vlivů odstřelu na napětovo-deformační stav svahového tělesa. In: *Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské - Technické univerzity Ostrava: řada stavební*. Ostrava, 2006, s. 65-71. ISBN 80-248-1248-7. ISSN 1213-1962.
- (36) STOLÁRIK, Martin. Matematické modelování seizmických účinků trhacích prací. In: *Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské - Technické univerzity Ostrava: řada stavební*. Ostrava: VŠB - TU Ostrava, 2008, s. 273-282. ISBN 987-80-248-1873-3. ISSN 1213-1962.
- (37) *Plaxis: Scientific Manual* [online]. Build 8601. Delft, Nizozemsko: Plaxis bv, 2017 [cit. 2017-12-21]. Dostupné z: <https://www.plaxis.com/support/manuals/plaxis-2d-manuals/>
- (38) PETŘÍK, Tomáš a Eva HRUBEŠOVÁ. MODELOVÁNÍ VLIVU VLASTNOSTÍ ZEMINY NA AMPLITUDU RYCHLOSTI KMITÁNÍ. *EGRSE: International Journal of Exploration Geophysics, Remote Sensing and Environment*. Praha: Česká Asociace Geofyziků, 2014, **21**(1), 79-84. ISSN 1803-1447.
- (39) BULYČEV, N.S. *Mechanika podzemnych sooruzenij*. Moskva: Nedra, 1988. UDK (622.012.2:69.035.4)(075.8).
- (40) *Statický výpočet - stavba č. 8615 "Kolektor Hlávkův most": provizorní konstrukce*. INGUTIS, spol. s.r.o. Praha, 2017.
- (41) HUDEK, Jiří, Jaroslav PAŠEK a Zdeněk PÍCHAL. *Praha a inženýrská geologie*. Praha: Československá vědeckotechnická společnost stavební pobočka Projektový ústav dopravních a inženýrských staveb, 1979.
- (42) KALÁB, Zdeněk a Markéta LEDNICKÁ. Interpretace seizmických záznamů trhacích prací prováděných ve štole Jeroným v Čisté. In: *Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské -*



*Technické univerzity Ostrava: řada stavební.* Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2006, s. 155-160. ISBN 80-248-1187-1. ISSN 1213-1962.

- (43) *Technická zpráva: SO 202.01 - Hlavní trasa úsek J102-TK103 - provizorní konstrukce.* INGUTIS, spol. s.r.o. Praha, 2017.
- (44) PŘENOSIL, Michal. *Generální technický projekt odstřelu: Stavba č. 8615 Kolektor Hlávkův most.* S u b t e r r a a.s., Praha, 2016.
- (45) SVOBODA, Tomáš a Matouš HILAR. Pravděpodobnostní analýza metodou latin hypercube sampling. *Časopis tunel.* Praha: Česká tunelářská asociace a Slovenská tunelárska asociácia ITA-AITES, 2012, **21**(4), 80-89. ISSN 1211-0728.
- (46) PETŘÍK, Tomáš, Marek MOHYLA a Eva HRUBEŠOVÁ. Numerický model odezvy dynamického zatížení v zemině s použitím metody latin hypercube sampling. In: *Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské - Technické univerzity Ostrava: řada stavební.* Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2013, s. 57-64. ISBN 1213-1962.

# Seznam obrázků, tabulek a grafů

Obrázek č. 1: Schéma elektrického palníku, upraveno podle (3) .....	13
Obrázek č. 2: Schéma zážehové rozbušky, upraveno podle (3) .....	13
Obrázek č. 3: Schéma elektrické rozbušky, upraveno podle (3) .....	13
Obrázek č. 4: Schéma neelektrické rozbušky typ EXCEL, upraveno podle (3) .....	14
Obrázek č. 5: Schéma elektronické rozbušky, upraveno podle (3) .....	14
Obrázek č. 6: Mechanismus rozpojení horniny výbuchem (neohraničené homogenní prostředí). 1 – zóna deformací, 2 – zóna trhlin, 3 – zóna pružných deformací. Převzato a upraveno z (1) .....	16
Obrázek č. 7: Odraz na hranici volné plochy. Stejný okamžik, avšak rozdílná vzdálenost náloží od volné plochy. Tečky představují hustotu prostředí, šipky na elementárních částicích hlavní směry napětí .....	17
Obrázek č. 8: Schéma rozdělení skupin vrtů .....	18
Obrázek č. 9: Směr působení výbuchu a odhozu rubaniny v jednotlivých fázích zálomového ražení, převzato z (1) .....	18
Obrázek č. 10: Vrtná schémata pro velkoprofilové tunely ražené metodou NRTM, upraveno podle (3) .....	19
Obrázek č. 11: Proudový diagram práce výbuchu podle Beljajeva, $Q_v$ – výbuchové teplo trhavin. Převzato z (8) a (1) .....	22
Obrázek č. 12: Závislost tlakových napětí na poměrné objemové deformaci pro a) kapaliny a plyny, b) tuhá tělesa; převzato z (4) .....	23
Obrázek č. 13: Změna profilu výbuchové vlny v pevném tělese s narůstající vzdáleností, převzato z (4) ....	24
Obrázek č. 14: Šíření deformace prostředí podélnými vlnami, upraveno podle (12) .....	25
Obrázek č. 15: Šíření deformace prostředí příčnými vlnami, upraveno podle (12) .....	25
Obrázek č. 16: Šíření deformace povrchovými R-vlnami, upraveno podle (12) .....	25
Obrázek č. 17: Šíření deformace povrchovými L-vlnami, upraveno podle (12) .....	26
Obrázek č. 18: Spektrum vodorovné pružné odezvy dle Eurokódu 8 .....	36
Obrázek č. 19: Základní prostředí programu Plaxis 2D (INPUT) s vyznačením základního rozdělení rozhraní .....	38
Obrázek č. 20: Vliv hodnoty poměrného útlumu na volně kmitající soustavu o jednom stupni volnosti .....	39
Obrázek č. 21: Vliv parametrů Reyleighova útlumu .....	40
Obrázek č. 22: Příklady modelu rovinné deformace (vlevo) a osově symetrického modelu (vpravo). Převzato z (34) .....	41
Obrázek č. 23: Chování ideálně pružnoplastického modelu, převzato z (37) .....	42
Obrázek č. 24: Přípustná oblast napětí pro Mohr-Coulombovu podmínku ve tvaru šestibokého jehlanu ( $c = 0$ ), převzato z (37) .....	43
Obrázek č. 25: Zobrazení Moohrových kružnic s užitím efektivních parametrů (vlevo) a s použitím neodvodněných totálních parametrů. Převzato z (37) .....	43
Obrázek č. 26: Pohled na okno „Průzkumníka modelu“ v prostředí programu Plaxis. Je vyznačena oblast, ve které je možno provést volbu hraničních podmínek (vlevo). Dále vidí čtenář náhled pracovní plochy s modelem, počátkem souřadného systému a vyznačenými hranicemi modelu (vpravo) .....	46
Obrázek č. 27: Okno pro zadávání parametrů násobitelů. Zobrazena je záložka „násobitelů zatížení“ se zadaným harmonickým zatížením a vizualizací průběhu dynamického násobitele v čase .....	47
Obrázek č. 28: Znázornění časového působení omezeného harmonického buzení .....	49
Obrázek č. 29: Schéma ověřovacích modelů .....	53
Obrázek č. 30: Schéma trojúhelníkového prvku o patnácti uzlech .....	54
Obrázek č. 31: Síť konečných prvků pro modely A a B .....	55
Obrázek č. 32: Zadání parametrů Reyleighova útlumu a útlumové křivky v prostředí programu Plaxis .....	55
Obrázek č. 33: Záznamy vlnových průběhů vodorovné složky amplitudy .....	57
Obrázek č. 34: Vybrané vlnové obrazy seizmického projevu TP realizované při rekonstrukci štoly Jeroným (převzato z (42)) .....	58
Obrázek č. 35: Situace sledovaného objektu a probíhající ražeb .....	59

Obrázek č. 36: Osazení indukčního snímače rychlostí v objektu Vily Štvanice (foto poskytnuto firmou INSET s.r.o.) .....	59
Obrázek č. 37: Situace sledovaného objektu s vyznačením hodnot izoseist (vlevo), vrtné schéma výrubu hlavní trasy pro třídu NRTM 4 (vpravo). Převzato z (44) .....	60
Obrázek č. 38: Ukázka principu výběru vzorku metodou LHS, převzato z (46). .....	62
Obrázek č. 39: Schéma základní geometrie výpočtového modelu .....	63
Obrázek č. 40: Vizualizace generované sítě konečných prvků. ....	63
Obrázek č. 41: Porovnání seizmických obrazů pro vodorovnou složku kmitání bodu E. Původní obraz s nízkými rychlostmi šíření vln (nahore). Je dobře patrný pozdější příchod čel vln, výrazné interference a pomalý útlum kmitání .....	67
Tabulka č. 1: Rychlosti šíření seizmických podélných vln pro vybraná prostředí, převzato z (13) .....	26
Tabulka č. 2: Transformování vln na rozhraní, upraveno podle (14) .....	27
Tabulka č. 3: Vztahy pro výpočet maximální rychlosti kmitání podle různých autorů .....	29
Tabulka č. 4: Informativní hodnoty konstanty přenosu „K“, převzato z (18) .....	33
Tabulka č. 5: Stupně poškození objektů, převzato z (18) .....	34
Tabulka č. 6: Vliv změny parametrů podloží na amplitudu rychlosti kmitání .....	46
Tabulka č. 7: Souhrn materiálových parametrů jednotlivých vrstev. Hvězdičkou (*) jsou označeny parametry, které jsou programem automaticky dopočteny .....	54
Tabulka č. 8: Parametry dynamického zatížení .....	54
Tabulka 9: Parametry dynamického zatížení .....	62
Tabulka č. 10: Nové parametry pro numerický model. V závorkách jsou uvedeny (původní) hodnoty pro model č. 10, ze kterého parametrově nový model vychází. ....	66
Tabulka č. 11: Porovnání nových maximálních hodnot amplitudy rychlosti oproti výchozímu modelu .....	67
Graf č. 1: Závislost ekvivalentní hmotnosti nálože na dominantní budící frekvenci. Červeně jsou vyznačeny body odpovídající doporučení z normy ČSN 73 0040 .....	48
Graf č. 2: Výpočtová závislost maximálního přetlaku na čele vlny na vzdálenosti od nálože dle Henrycha .....	50
Graf č. 3: Závislost výbuchového dynamického zatížení na čase podle US, National Highway Institute .....	52
Graf č. 4: Útlumová křivka MODELU – A      Graf č. 5: Útlumová křivka MODELU – B .....	56
Graf č. 6: Porovnání útlumových křivek (jednovrstvého) MODELU – A a (třívrtvého) MODELU – B .....	56
Graf č. 7: Porovnání útlumových křivek MODELU – A a MODELU – A s vnitřním útlumem .....	57
Graf č. 9: Krabicové grafy se základními statistickými charakteristikami amplitud rychlostí .....	64
Graf č. 8: Záznam vypočtených maximálních amplitud .....	64
Graf č. 10: Poměrné rozpětí max. a min. hodnot amplitud rychlostí .....	64
Graf 11: Hustota pravděpodobnosti výskytu za předpokladu normálního rozložení hodnot. ....	65
Graf 12: Statistický vyhodnocení útlumových křivek .....	65
Graf č. 13: Ukázka typických tvarů hustot náhodných veličin pro normální a log-normální rozdělení .....	65

# Přílohy

## Příloha 1:

Informativní tabulka – Závislosti stupně poškození na maximální rychlosti kmitání  $u_{max}^{(1)}$ ,  $v_{max}^{(1)}$ ,  $w_{max}^{(1)}$ , na druhu objektu a na základové půdě. (převzato z (18))

$u_{max}, v_{max}, w_{max}$ [mm.s <sup>-1</sup> ] pro obor frekvence otřesu			Stupeň poškození ( <i>tabulka 13 – normy</i> )	Třída odolnosti objektu ( <i>tabulka 9 – normy</i> )	Druh základové půdy ( <i>podle článku 5.5.3 – normy</i> )
$f < 10$ Hz	$10 \text{ Hz} \leq f \leq 50$ Hz	$f > 50$ Hz			
do 3	3 až 6	6 až 15	0	A	a
3 až 6	6 až 12	12 až 20	0	A	b, c
				B	a
6 až 10	10 až 20	15 až 30 <sup>(1)</sup>	0	B	b, c
				C	a
8 až 15	15 až 30	20 až 40	0	C	b
				B	c
10 až 20	20 až 30	30 až 50	1	A	b, c
				B	a
15 až 25	25 až 40	40 až 70	0	C	c
				D	a
				B	b
20 až 40	40 až 60	60 až 100	1	C	a
				B	b, c
				A	a
30 až 50	50 až 100	100 až 150	2	B	b, c
				C	a
				C	a
do 3	3 až 6	6 až 15	0	E	b, c
				F	a
				C	c
3 až 6	6 až 12	12 až 20	0	D	a
				B	b, c
				C	a
6 až 10	10 až 20	15 až 30 <sup>(1)</sup>	0	E	b, c
				F	a
				C	c
8 až 15	15 až 30	20 až 40	0	D	a
				B	b, c
				C	a
10 až 20	20 až 30	30 až 50	1	B	b, c
				C	a
				C	a
15 až 25	25 až 40	40 až 70	1	B	b, c
				A	a
				B	a
20 až 40	40 až 60	60 až 100	2	E	b, c
				F	a
				C	c
30 až 50	50 až 100	100 až 150	2	D	b, c
				E	a
				C	b

<sup>1)</sup> Hodnoty uvedené ve sloupci pro  $f > 50$  Hz nelze použít pro potrubí uložená v zásypu

## Příloha 2: Vstupní sady geotechnických charakteristik vygenerované metodou LHS

### Navážky

skupina charakteristik	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	E [MPa]	$\nu$ [-]	cef [kPa]	$\phi_{ef}$ [°]
min	19	10	0,37	5	20
1	20,19	18,08	0,39	11,67	24,25
2	19,94	27,97	0,39	12,59	27,19
3	20,33	25,17	0,38	8,33	22,66
4	19,67	21,92	0,38	9,68	26,07
5	19,81	19,37	0,38	6,02	20,81
6	20,80	14,83	0,39	9,04	23,75
7	19,48	23,34	0,38	7,41	25,34
8	19,20	12,03	0,39	10,32	23,23
9	20,06	20,63	0,40	13,98	21,93
10	20,52	16,66	0,37	10,96	24,77
max.	21	30	0,4	15	28
průměr X	20,00	20,00	0,39	10,00	24,00
medián	20,00	20,00	0,39	10,00	24,00
$\sigma$ (směrodat.odchylka)	0,59	5,85	0,01	2,93	2,34
X + $2\sigma$ (p=95,45 %)	21,17	31,70	0,40	15,85	28,68
X - $2\sigma$ (p=95,45 %)	18,83	8,30	0,37	4,15	19,32
X + $\sigma$ (p=68,27 %)	20,59	25,85	0,39	12,93	26,34
X - $\sigma$ (p=68,27 %)	19,41	14,15	0,38	7,07	21,66
VarX (rozptyl)	0,34	34,24	0,00008	8,56	5,48

### Štěrkové a písčité zeminy

skupina charakteristik	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	E [MPa]	$\nu$ [-]	cef [kPa]	$\phi_{ef}$ [°]
min	20,50	50,00	0,32	0,00	34,00
1	21,00	57,12	0,34	0,00	34,41
2	20,65	87,21	0,33	0,00	37,59
3	20,86	78,29	0,32	0,00	35,33
4	21,20	82,79	0,34	0,00	36,38
5	21,30	96,69	0,33	0,00	35,62
6	21,50	91,72	0,33	0,00	37,03
7	21,11	103,11	0,33	0,00	36,67
8	21,39	66,90	0,33	0,00	34,97
9	21,85	73,31	0,32	0,00	35,87
10	21,64	112,89	0,33	0,00	36,13
max.	22,00	120,00	0,34	0,00	38,00
průměr X	21,25	85,00	0,33	0,00	36,00
medián	21,25	85,00	0,33	0,00	36,00
$\sigma$ (směrodat.odchylka)	0,439	20,481	0,006	0,000	1,170
X + $2\sigma$ (p=95,45 %)	22,13	125,96	0,34	0,00	38,34
X - $2\sigma$ (p=95,45 %)	20,37	44,04	0,32	0,00	33,66
X + $\sigma$ (p=68,27 %)	21,69	105,48	0,34	0,00	37,17
X - $\sigma$ (p=68,27 %)	20,81	64,52	0,32	0,00	34,83
VarX (rozptyl)	0,193	419,472	0,00003	0,000	1,370

### Břidlice - rozložené

skupina charakteristik	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	E [MPa]	$\nu$ [-]	cef [kPa]	$\phi_{ef}$ [°]	$\sigma_c$ [MPa]
min	20,50	20,00	0,37	15,00	21,00	0,25
1	21,64	32,12	0,38	18,33	21,72	1,71
2	21,00	46,95	0,39	17,41	22,21	1,54
3	21,85	29,99	0,37	16,02	21,31	1,89
4	21,30	35,95	0,38	20,96	23,00	2,08
5	21,39	40,01	0,38	22,59	23,70	0,53
6	21,20	42,76	0,40	20,32	22,00	0,91
7	20,86	34,05	0,39	23,98	22,41	2,72
8	21,11	37,88	0,38	19,04	22,59	1,17
9	20,65	27,24	0,39	19,68	23,28	1,36
10	21,50	23,05	0,39	21,67	22,79	2,34
max.	22,00	50,00	0,40	25,00	24,00	3,00
průměr X	21,25	35,00	0,39	20,00	22,50	1,63
medián	21,25	35,00	0,39	20,00	22,50	1,63
$\sigma$ (směrodat.odchylka)	0,439	8,778	0,009	2,926	0,878	0,805
X + $2\sigma$ (p=95,45 %)	22,13	52,56	0,40	25,85	24,26	3,23
X - $2\sigma$ (p=95,45 %)	20,37	17,45	0,37	14,15	20,74	0,02
X + $\sigma$ (p=68,27 %)	21,69	43,78	0,39	22,93	23,38	2,43
X - $\sigma$ (p=68,27 %)	20,81	26,22	0,38	17,07	21,62	0,82
VarX (rozptyl)	0,193	77,046	0,00008	8,561	0,770	0,647

### Břidlice - zvětralé

skupina charakteristik	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	E [MPa]	$\nu$ [-]	cef [kPa]	$\phi_{ef}$ [°]	$\sigma_c$ [MPa]
min	22,00	50,00	0,34	15,00	24,00	0,50
1	23,52	99,95	0,35	19,04	26,13	4,95
2	23,06	163,80	0,36	16,02	26,38	5,55
3	23,33	110,62	0,34	22,59	25,62	1,47
4	23,80	184,76	0,35	19,68	24,97	6,16
5	22,20	150,06	0,36	23,98	27,59	9,03
6	22,67	139,39	0,35	18,33	27,03	6,84
7	22,81	129,73	0,36	20,32	25,87	2,79
8	22,48	65,26	0,36	17,41	24,41	7,71
9	23,19	86,21	0,37	21,67	26,67	3,66
10	22,94	120,27	0,35	20,96	25,33	4,34
max.	24,00	200,00	0,37	25,00	28,00	10,00
průměr X	23,00	125,00	0,36	20,00	26,00	5,25
medián	23,00	125,00	0,36	20,00	26,00	5,25
$\sigma$ (směrodat.odchylka)	0,585	43,888	0,009	2,926	1,170	2,780
X + $2\sigma$ (p=95,45 %)	24,17	212,78	0,37	25,85	28,34	10,81
X - $2\sigma$ (p=95,45 %)	21,83	37,23	0,34	14,15	23,66	-0,31
X + $\sigma$ (p=68,27 %)	23,59	168,89	0,36	22,93	27,17	8,03
X - $\sigma$ (p=68,27 %)	22,41	81,12	0,35	17,07	24,83	2,47
VarX (rozptyl)	0,342	1926,147	0,00008	8,561	1,370	7,726

### Břidlice - navětralé

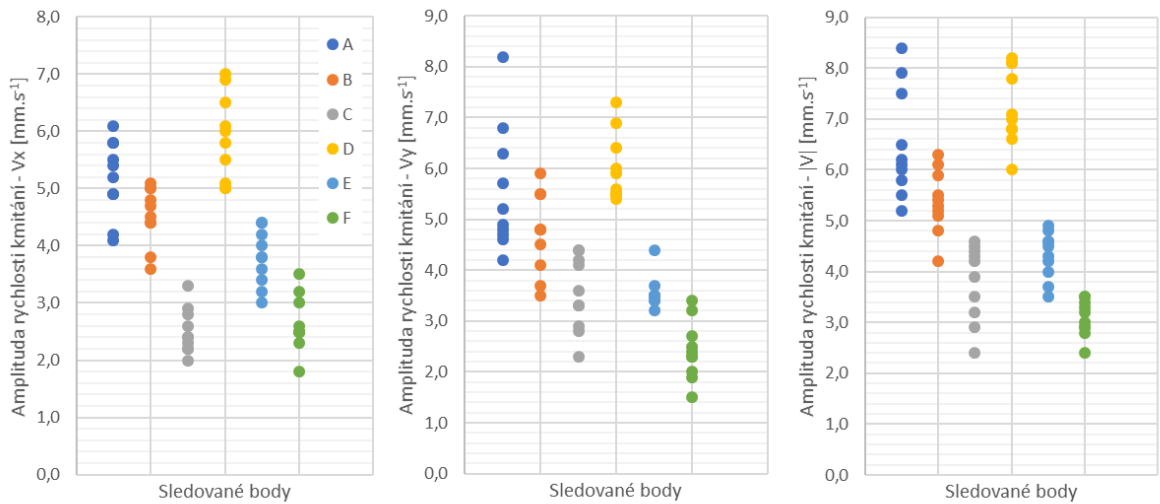
skupina charakteristik	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	E [MPa]	$\nu$ [-]	cef [kPa]	$\phi_{ef}$ [°]	$\sigma_c$ [MPa]
min	24,00	200,00	0,31	25,00	28,00	3,00
1	24,36	412,62	0,31	43,60	31,34	13,91
2	25,35	333,21	0,33	48,35	29,67	11,99
3	24,50	240,68	0,32	39,14	31,79	21,01
4	24,15	559,35	0,32	36,66	30,34	19,09
5	24,61	503,46	0,33	51,55	29,21	9,52
6	24,89	466,82	0,33	33,45	32,49	27,26
7	25,00	387,40	0,34	56,44	28,51	23,48
8	24,80	296,57	0,32	45,86	30,02	5,75
9	25,14	438,37	0,33	28,56	30,98	15,65
10	24,70	361,65	0,32	41,40	30,66	17,35
max.	25,50	600,00	0,34	60,00	33,00	30,00
průměr X	24,75	400,01	0,33	42,50	30,50	16,50
medián	24,75	400,01	0,33	42,50	30,50	16,50
$\sigma$ (směrodat.odchylka)	0,439	117,034	0,009	10,241	1,463	7,900
X + $2\sigma$ (p=95,45 %)	25,63	634,08	0,34	62,98	33,43	32,30
X - $2\sigma$ (p=95,45 %)	23,87	165,94	0,31	22,02	27,57	0,70
X + $\sigma$ (p=68,27 %)	25,19	517,05	0,33	52,74	31,96	24,40
X - $\sigma$ (p=68,27 %)	24,31	282,98	0,32	32,26	29,04	8,60
VarX (rozptyl)	0,193	13697,04	0,00008	104,868	2,140	62,407

### Břidlice - zdravé

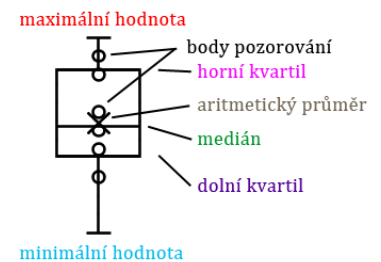
skupina charakteristik	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	E [MPa]	$\nu$ [-]	cef [kPa]	$\phi_{ef}$ [°]	$\sigma_c$ [MPa]
min	25,50	600,00	0,25	60,00	33,00	10,00
1	26,10	759,47	0,26	69,15	34,21	78,28
2	25,60	827,59	0,30	96,37	35,98	39,97
3	26,26	869,51	0,27	107,84	33,51	31,73
4	25,97	721,24	0,30	89,97	37,49	52,16
5	25,74	778,78	0,28	140,85	36,79	63,63
6	25,90	672,43	0,27	102,16	35,02	70,03
7	26,40	800,11	0,26	120,03	35,34	19,15
8	26,03	699,90	0,28	128,28	35,66	57,84
9	26,17	740,55	0,29	113,63	34,67	90,85
10	25,83	630,51	0,29	81,73	36,34	46,37
max.	26,50	900,00	0,31	150,00	38,00	100,00
průměr X	26,00	750,01	0,28	105,00	35,50	55,00
medián	26,00	750,01	0,28	105,00	35,50	55,00
$\sigma$ (směrodat.odchylka)	0,293	87,776	0,018	26,333	1,463	26,333
X + $2\sigma$ (p=95,45 %)	26,59	925,56	0,32	157,67	38,43	107,67
X - $2\sigma$ (p=95,45 %)	25,41	574,46	0,24	52,34	32,57	2,34
X + $\sigma$ (p=68,27 %)	26,29	837,78	0,30	131,34	36,96	81,34
X - $\sigma$ (p=68,27 %)	25,71	662,23	0,26	78,67	34,04	28,67
VarX (rozptyl)	0,086	7704,586	0,00031	693,413	2,140	693,413

## Příloha 3: Grafické a tabulkové vyhodnocení parametrické studie

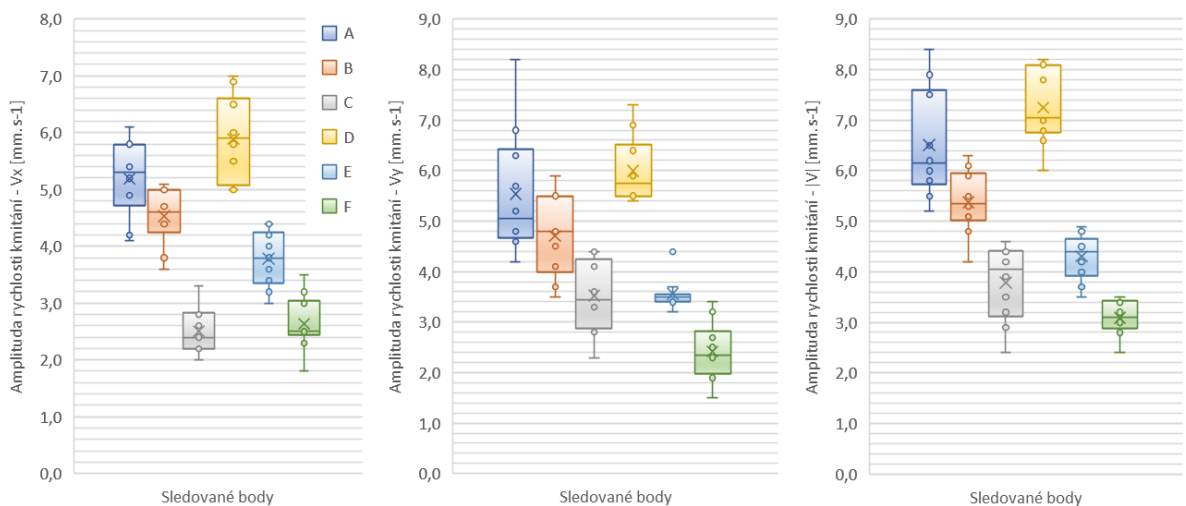
Záznamy všech vypočtených hodnot amplitud rychlosti ↓



Doplňující legenda pro krabicové grafy →



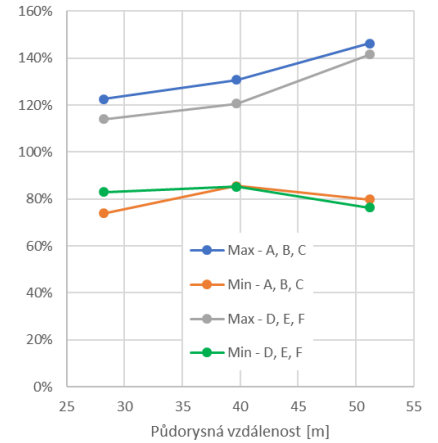
Krabicové grafy se základními statistickými charakteristikami pro jednotlivé body a složky kmitání ↓



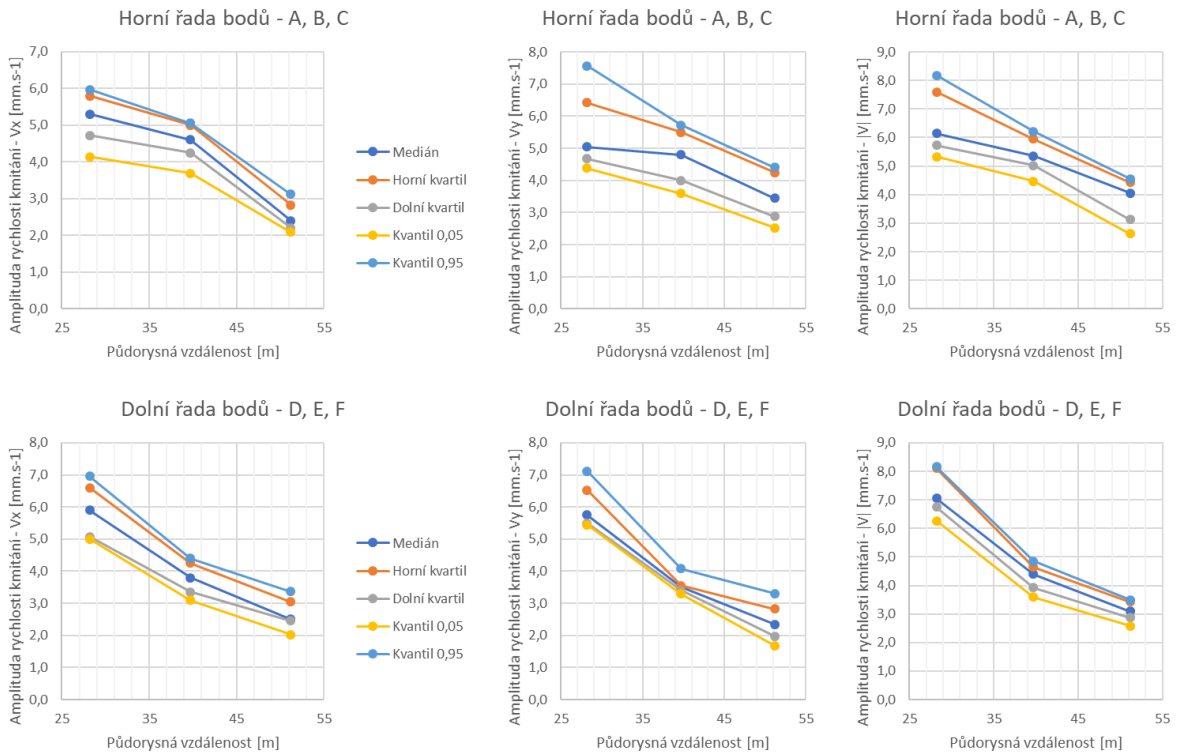
Tabulka vyjadřující poměr mezi maximální a minimální hodnotou dosažené amplitudy rychlosti při střední hodnotě rovné 100 %. ↓ (Graf + rozsahy vstupních hodnot →)

	Bod A			Bod B			Bod C			Bod D			Bod E			Bod F			Průměr celkem						
	V <sub>x</sub>	V <sub>y</sub>	V	V <sub>x</sub>	V <sub>y</sub>	V	V <sub>x</sub>	V <sub>y</sub>	V	V <sub>x</sub>	V <sub>y</sub>	V	V <sub>x</sub>	V <sub>y</sub>	V	V <sub>x</sub>	V <sub>y</sub>	V							
Max	129%	120%	118%	123%	128%	127%	131%	120%	150%	169%	146%	118%	106%	118%	114%	127%	109%	126%	121%	139%	157%	129%	142%	129%	
Min	87%	62%	73%	74%	90%	81%	85%	85%	73%	78%	88%	80%	84%	79%	86%	83%	86%	80%	90%	85%	71%	69%	89%	76%	81%

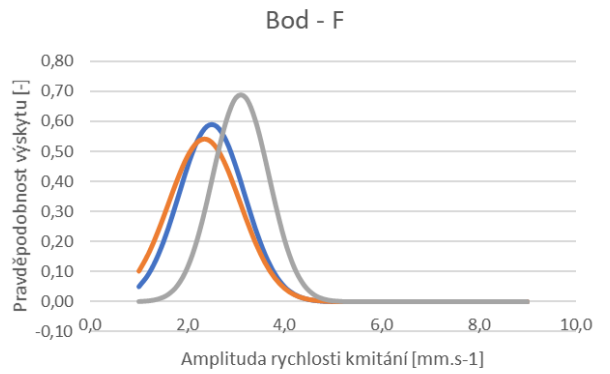
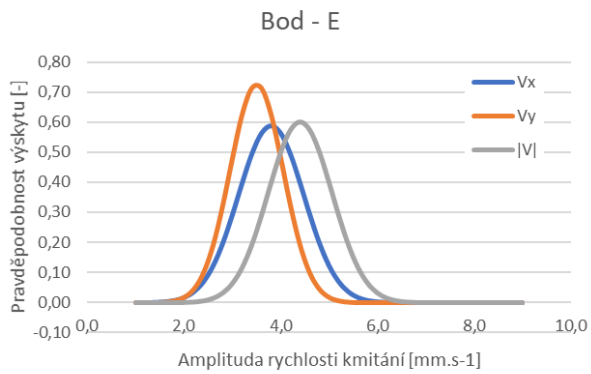
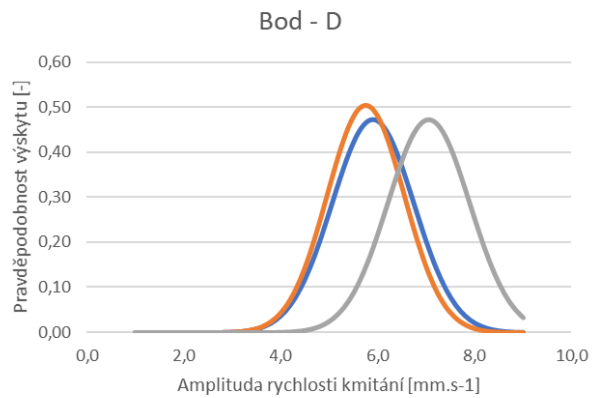
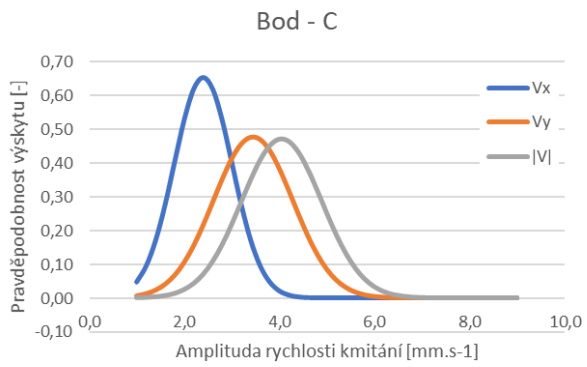
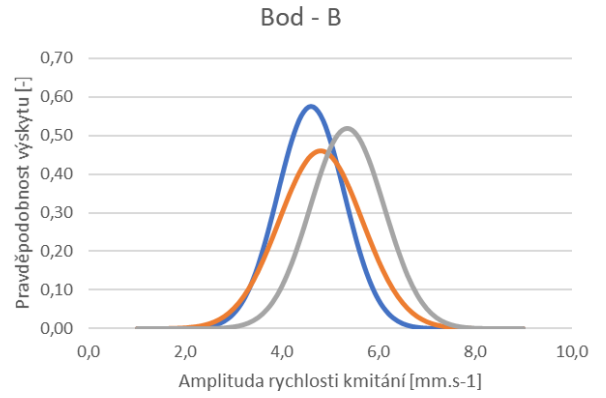
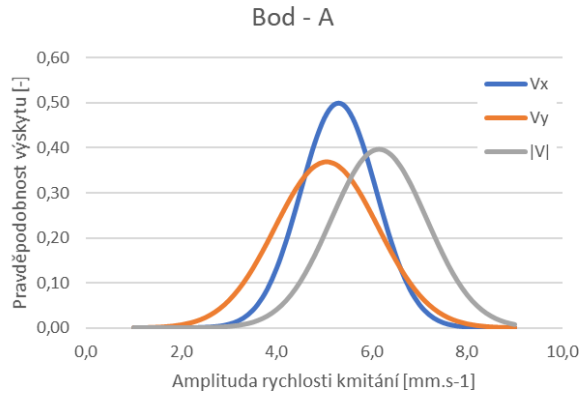
	objemová hmotnost - $\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]		modul pružnosti - E [MPa]		poissonovo číslo - $\nu$ [-]		soudržnost - c <sub>ef</sub> [kPa]		úhel vnitřního tření - $\varphi_{ef}$ [°]	
	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
Navážky	95%	105%	67%	200%	96%	104%	67%	200%	86%	120%
sedimenty	97%	104%	71%	170%	97%	103%	-	-	95%	106%
Břidlice - rozložené	97%	104%	70%	175%	96%	104%	80%	133%	94%	107%
Břidlice - zvětralé	96%	105%	63%	250%	96%	104%	80%	133%	93%	108%
Břidlice - navětralé	97%	103%	67%	200%	96%	105%	71%	170%	92%	109%
Břidlice - zdravé	98%	102%	83%	125%	90%	112%	70%	175%	93%	108%
Průměr	97%	104%	70%	187%	95%	105%	74%	162%	92%	110%



### Útlumové křivky amplitudy rychlosti. ↓

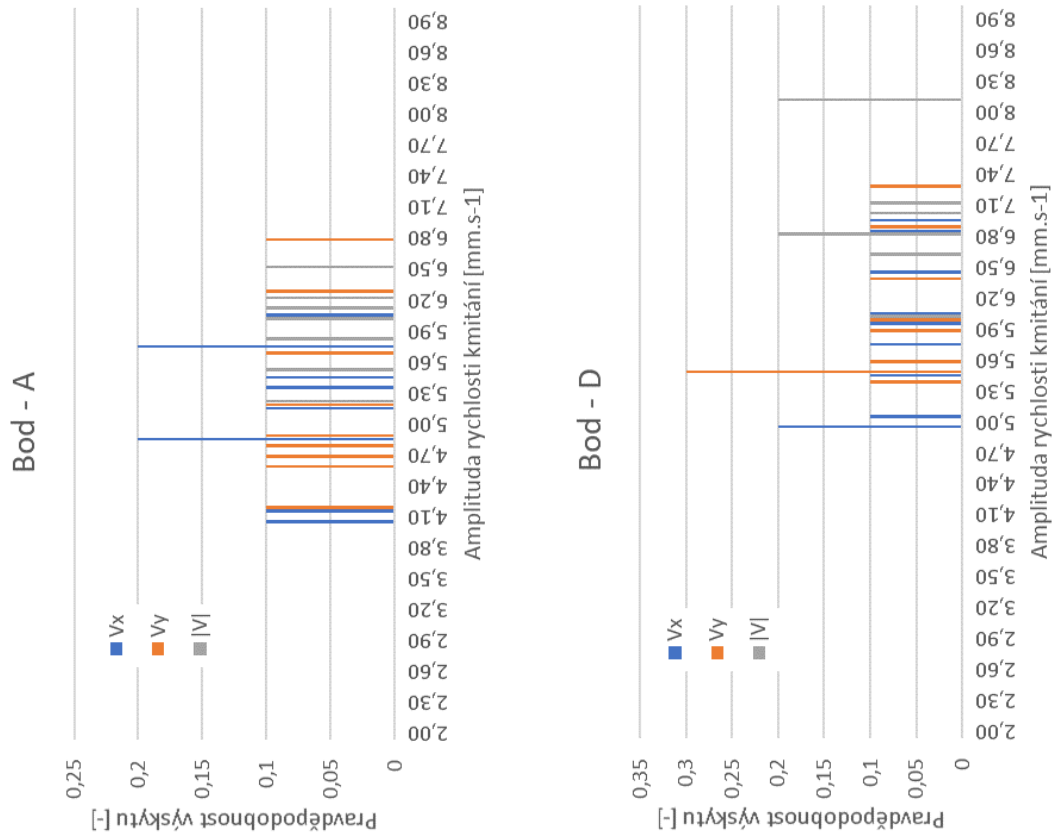


### Hustota pravděpodobnosti výskytu za předpokladu normálního rozložení hodnot. ↓





Histogramy četnosti výskytu pro dva nejzatíženější body. ↓



Souhrn vypočtených amplitud rychlosti a základní statistické charakteristiky souboru. ↓

Složky kmitání	Bod A		Bod B		Bod C		Bod D		Bod E		Bod F	
	V <sub>x</sub>	V <sub>y</sub>	V <sub>x</sub>	V <sub>y</sub>	V <sub>x</sub>	V <sub>y</sub>	V <sub>x</sub>	V <sub>y</sub>	V <sub>x</sub>	V <sub>y</sub>	V <sub>x</sub>	V <sub>y</sub>
M1	5,4	4,6	3,6	3,5	2,2	2,8	5,5	6,4	4,0	3,5	3,2	1,5
M2	4,9	4,2	4,4	5,5	3,3	4,2	6,9	5,5	3,8	3,7	2,6	2,3
M3	4,1	5,7	5,0	3,7	2,0	2,3	5,0	5,5	3,4	3,4	2,5	1,9
M4	4,2	8,2	4,8	5,5	2,9	3,6	7,0	7,3	3,2	3,4	3,0	2,3
M5	5,2	6,8	5,1	4,8	2,4	4,4	6,1	6,0	3,8	3,5	2,5	3,2
M6	5,8	4,8	5,0	4,8	2,8	3,3	5,1	5,6	4,4	3,5	2,5	2,4
M7	6,1	4,9	4,4	4,8	2,6	4,1	5,8	5,9	4,2	3,5	2,5	2,7
M8	5,5	6,3	4,7	5,9	2,2	4,4	6,0	6,9	3,6	3,2	1,8	2,0
M9	4,9	4,7	4,5	4,1	2,4	3,3	6,5	5,4	4,4	3,5	2,3	2,5
M10	5,8	5,2	3,8	4,5	2,3	2,9	5,0	5,5	3,0	4,4	3,5	3,4
Průměr	5,2	5,5	4,5	4,7	2,5	3,5	5,9	6,0	3,8	3,6	2,6	2,4
Medián	5,3	5,1	4,6	4,8	2,4	3,5	5,9	5,8	3,8	3,5	2,5	2,4
Směrodatná odchylka	0,636	1,171	0,480	0,748	0,373	0,696	0,711	0,628	0,460	0,304	0,457	0,546
Minimum	4,1	4,2	3,6	3,5	2,0	2,3	5,0	5,4	3,0	3,2	1,8	1,5
Maximum	6,1	8,2	5,1	5,9	3,3	4,4	7,0	7,3	4,4	4,4	3,5	3,4
Rozpětí	2,0	4,0	1,5	2,4	1,3	2,1	2,0	1,9	1,4	1,2	1,7	1,9
Rozptyl	0,405	1,372	0,250	0,559	0,139	0,484	0,505	0,394	0,212	0,092	0,208	0,298
Dolní kvartil	4,73	4,68	4,25	4,00	2,20	2,88	5,08	5,50	3,35	3,40	2,45	1,98
Horní kvartil	5,80	6,43	5,00	5,50	2,83	4,25	6,60	6,53	4,25	3,55	3,05	2,83
Kvantil 0,05	4,15	4,38	3,69	3,59	2,09	2,53	5,00	5,45	3,09	3,29	2,03	1,68
Kvantil 0,95	5,97	7,57	5,06	5,72	3,12	4,40	6,96	7,12	4,40	4,09	3,37	3,31
Vypočtené základní statistické charakteristiky pro jednotlivé sady												
Amplitudy rychlosti zaznamenané pro jednotlivé modely [mm/s]												