

VŠB – Technická univerzita Ostrava,
Fakulta stavební,
Katedra geotechniky.

Moderní trendy při rozpojování hornin
Modern Trends in Rock Blasting

Student:

Jan Židek

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Lukáš Ďuriš

Ostrava 2013

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě

.....

Jan Židek

Prohlašuji, že

- Jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Lukášovi Ďurišovi, za svědomité vedení a věcné rady. Mé díky patří i Vladimíru Pravdovi za ochotné jednání a poskytnutí informací ohledně metody rozpojování Green Break Technology.

ANOTACE

Bakalářská práce se zaměřuje na rozpojování hornin a destrukce pomocí trhavin. Hlavním cílem je porovnat rozdíly mezi klasickou metodou rozpojování pomocí trhavin a novým netrhavinovým rozpojováním pomocí technologie Green Break Technology.

První část práce je zaměřena na rozpojování pomocí trhacích prací, kde k rozpojení horniny dochází následkem výbuchu trhavinové nálože. Zabývám se zde faktory ovlivňující rozpojování hornin a metodami využívající energii výbuchu. Druhá část věnuje pozornost nové metodě v rozpojování, konkrétně se jedná o neexplozivní technologii Green Break Technology. Ta je založena na tlakovém působení plynu na stěny vrtu, kde tlakové účinky jsou až tisíckrát menší než u klasických trhavin. Tak malé tlaky jsou v určitých případech dostačující k rozpojení horniny, nebo betonu a jsou vhodnější z hlediska bezpečnosti a účinku na okolí.

Klíčová slova: rozpojování hornin, trhací práce, Green Break Technology

ANNOTATION

The bachelor thesis focuses on rock breaking and destruction by the help of explosives. The main aim is to compare the differences between conventional methods of rock breaking by explosives with a new non-detonating rock breaking technology of Green Break Technology Company.

The first part of the thesis is focused on breaking by the help of blasting operations, where rock breaking is done as a consequence of explosive load blasting. I deal with factors influencing rock breaking and with methods using blast energy. The second part is devoted to the new method of rock breaking; particularly it is non-detonating Green Break Technology. It is based on compression action of gases on drill hole sides, where the pressure developed by the gases is ten thousand times smaller than by conventional explosives. So small pressures are sufficient at specific cases to break rock or concrete and are more suitable in terms of security and effect on the surrounding.

Key words: rock breaking, blasting operation, Green Break Technology

OBSAH

SEZNAM POUŽITÉHO ZNAČENÍ	7
1. ÚVOD	8
2. ÚVOD O ROZPOJOVÁNÍ HORNIN	10
2.1. Způsoby rozpojování hornin (primární rozpojování)	10
2.1.1. Explosivní rozpojování	10
2.1.2. Mechanické rozpojování	13
2.1.3. Hydraulické rozpojování	14
2.1.4. Fyzikální rozpojování	14
2.2. Úvod o výbušninách	15
3. METODY ROZPOJOVÁNÍ HORNÍ POMOCI TRHAVIN	16
3.1. Faktory ovlivňující rozpojování hornin	16
3.1.1. Základní parametr nálože	17
3.1.2. Druhy a vlastnosti hornin	19
3.1.3. Technologie trhacích prací	20
3.2. Metody ražení podzemních děl	23
3.2.1. Úvod o ražení podzemních děl	23
3.2.2. Ražení horizontálních a úklonných děl	28
3.2.3. Ražení svislých děl	28
3.2.4. Ražení velkoprostorových děl	29
3.3. Destrukce stavebních objektů	30
4. NOVÁ METODA V ROZPOJOVÁNÍ HORNIN – Green Break technology (GBT)	31
4.1. Úvod o technologii Green Break Technology	31
4.2. Produkty Green Break Technology	33
4.3. Rozsah použití Green Break Technology	35
4.4. Pracovní postup rozpojování	36
5. SROVNÁNÍ METODY Green Break Technology a klasických trhavin	38
5.1. Rozpojování volně stojících balvanů	38
5.2. Rozpojování ŽB konstrukce	39
6. ZÁVĚR	42
7. SEZNAM LITERATURY	43
8. SEZNAM OBRÁZKŮ	44
9. SEZNAM TABULEK A GRAFŮ	45
10. PŘÍLOHY	45

SEZNAM POUŽITÉHO ZNAČENÍ

d_n	průměr nálože [mm],
d	průměr vrtů [mm],
H	výška etáže [m],
Q_n	náložová hustota trhavin [kg/m^3],
q_r	specifická (měrná) spotřeba trhaviny [kg/m^3],
Q_c	celková hmotnost nálože [kg],
Q_d	dolní hmotnost nálože [kg],
Q_c	horní hmotnost nálože [kg],
V_h	objem rozpojené horniny [m^3],
I_t	akustická impedance trhaviny [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$],
I_h	akustická impedance horniny [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$],
C_p	rychlost šíření podélných vln horninou [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$],
ρ_h	hustota horninového prostředí [kg/m^3],
ρ_t	hustota trhaviny [kg/m^3],
S_u	míra upnutí horniny [-],
R	záběr [m],
p	koncentrace nálože [kg/m],
L	délka vrtů [m]

ČBÚ	Český Báňský úřad,
GBT	Green Break Technology,
ŽB	železobeton,
NRTM	Nová Rakouská Tunelovací metoda.

1. ÚVOD

První zmínky použití této technologie ražení na našem území je datováno do 17. století, ze dne 8. 2. 1627, kdy Kašpar Weindl využil energii výbušniny pro těžbu suroviny. Stalo se ve městě Báňská Štiavnica na Slovensku, při dobývání štol Horní Bobří. V minulosti byl využíván pro trhací práce černý střelný prach. Jeho složení, je směsí mletého draselného ledku (75%), dřevěného uhlí (15%) a síry (10%). V roce 1867 si nechal Alfred Nobel patentovat dynamit, který byl složen z kapalného nitroglycerinu a hlínky. Později svůj patent rozšířil o trhavou želatinu, vyrobenou z nitroglycerinu a střelné bavlny. Položil tak základ k výrobě moderních průmyslových trhavin. V dnešní době nabízí trh nepřeberné množství různých průmyslových trhavin, kde jejich složení a vlastností se odvíjí od toho, v jakém prostředí budou používány.

Při výbuchu pár set gramů moderní trhaviny, se během tisícín sekundy přemění výbuchová energie trhaviny na mechanickou práci, dosahující výkonů několika tisíců megawatt. Tak velkého výkonu vzniklého z výbuchu, využívá člověk k ulehčení své práce. Naopak špatným a nezodpovědným zacházením s výbušninou, může člověk napáchat nedozírné následky, ať už na lidských životech nebo na majetku. Z toho důvodu musí být používání výbušnin a manipulace s nimi upravena legislativou, schválená Českým Báňským úřadem a vymezena řadou přísných nařízení a předpisů. Manipulace s výbušninou je povolená osobám, které mají potřebné oprávnění a odbornou způsobilost pro práci s výbušninou.

Trhací práce řadíme mezi klasickou technologii používanou zejména při rozpojování hornin. Součástí těchto prací je ražení podzemních děl, úprava vlastností horninového masívu, těžba surovin, ale také aplikace trhacích prací ve stavebnictví, jako je demolice objektů, nakypření zeminy apod. S pokrokem dnešní doby člověk vynalezl nové technologie při rozpojování hornin, jako jsou například razící štíty, které se podepsaly na mírném úpadku používání trhacích prací. To mělo dopad i na vývoj a výzkum trhacích prací, který se mírně zpomalil. Přesto trhaviny jsou a po delší dobu budou prvotním prostředkem pro rozpojování hornin.

Na trhací práce jsou v dnešní době kladeny čím dál větší požadavky. Ať už na bezpečnost práce, seizmické účinky na okolí, nebo v neposlední řadě bezpečnost proti zneužití teroristy. Uvedené nedostatky se snaží eliminovat nová metoda v rozpojování hornin Green Break Technology. Technologie je založena na explozivním hoření pyrotechnické složky, která je obsažená v plastových nábojkách. Rozpojení horniny je tedy způsobeno tlakem povýbuchových plynů působících na okolí vrtu a jeho následkem je pouze „posunutí“

horniny. Tato technologie je odlišná od rozpojování hornin pomocí výbušnin a řadíme ji mezi neexplozivní rozpojování, na které se kladou jiné požadavky při práci.

2. ÚVOD O ROZPOJOVÁNÍ HORNIN

Rozpojování je možné chápat jako odolnost hornin proti působení nástroje, který použijeme k oddělení části horninového masívu. Můžeme ho vyjádřit jako množství práce, kterou potřebujeme k oddělení určitého objemu horniny. Faktory ovlivňující rozpojení horniny jsou závislé na druhu a vlastnostech horniny, použité technologii a parametrech rozpojovacího nástroje [6].

2.1. Způsoby rozpojování hornin (primární rozpojování)

2.1.1. Explosivní rozpojování

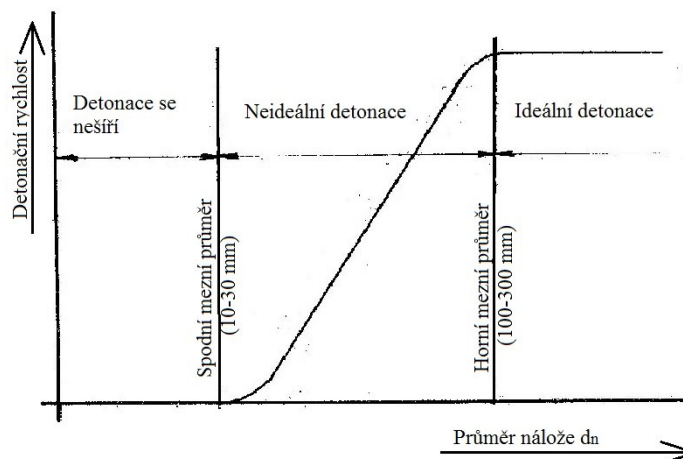
U explozivního rozpojování využíváme přeměny energie výbuchu trhaviny na mechanickou práci. U trhacích prací se setkáváme s náložemi umístěnými ve vývrtech, komorách nebo sklípcích vytvořených v hornině. Hlavním mechanismem přeměny v explozivním rozpojování je výbuch. Výbuch je definován jako rychlý fyzikální nebo chemický děj, který vede k náhlému uvolnění energie [2]. K rozpojení hornin nejčastěji využíváme chemický výbuch. V ojedinělých případech využíváme fyzikální výbuch.

Fyzikální výbuch je způsobený náhlým a rychlým snížením potenciální energie systému. Může se projevit jako exploze nebo imploze. Exploze je způsobena uvolněním přetlaku, například výbuch tlakové nádoby. U imploze se jedná o uvolnění podtlaku, jako je například výbuch žárovky, nebo vakuovaných nádob [2].

Chemický výbuch vzniká velmi rychlou exotermickou chemickou reakcí výbušniny, u které vznikají velmi stlačené plynné zplodiny [2]. Podle rychlosti výbušné přeměny rozdělujeme chemický výbuch na detonaci, nebo explozivní hoření (deflagraci).

Detonace je chemický výbuch, u kterého vzniká ve výbušnině detonační vlna větší rychlosti, než je rychlost zvuku ve zplodinách výbuchu. Rychlost detonační přeměny se pohybuje od 1000 m/s do 9000 m/s a dochází k prudkému vývinu tlaků v místě reakční přeměny. Účinek detonace se projeví drobnou kusovitostí a podrcením rozpojovaného

materiálu. Rozpojení materiálu je způsobeno dynamickým rázem a tlakem plynů povýbuchových zplodin. U detonace je důležité, aby výbušnina detonovala konstantní rychlostí po celé délce nálože. Rychlost výbušné přeměny nazýváme *detonační rychlostí*, ta je závislá na průměru nálože, závislost je znázorněná na grafu 1.

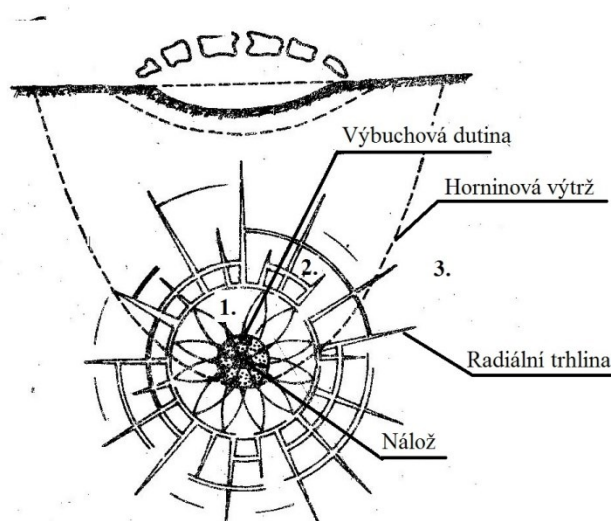


Graf 1: Závislost detonační rychlosti a průměru nálože [3].

Deflagrace (explozivní hoření) je druh chemického výbuchu, u kterého je rychlost přeměny menší, než je rychlost zvuku ve zplodinách [2]. Řádově se jedná pouze o rychlost, až několik stovek metrů za sekundu. Rozpojení materiálu je způsobeno statickým působením tlaku plynů povýbuchových zplodin na okolí. Hornina je z pravidla pouze posunutá a kusovitost rubaniny je velká. Výbušná přeměna probíhá tak pomalu, že vzniklé zplodiny můžou z místa přeměny „odtéct“ a nedojde k podstatnému vývoji tlaků. Proto je důležité dbát na správné uzavření vrtu nálože a zamezit tak odtékání povýbuchových plynů. Správným uzavřením vrtů docílíme zvětšování tlaků a navyšování rychlosti hoření. Na principu výbuchu typu deflagrace pracuje i technologie Green Break Technology, kterou se budu zabývat ve čtvrté kapitole této práce.

Po výbuchu nálože nám v prostředí vzniknou příčné a podélné vlny šířící se od místa výbuchu. Označujeme je jako vlny objemové a tvarové, protože způsobují změnu objemu a tvaru prostředí. Jejich vzájemným působením s povrchem, nám vznikají další typy vln, které souhrnně nazýváme jako vlny povrchové. Ty se převážně podílejí na seismickém působení výbuchu [2]. Popis výbuchu si popíšeme na případě, kdy horninový masiv je homogenní a obsahuje volné plochy (rozmezí hornina-vzduch). Popis výbuchového děje rozdělím do 4. fázi:

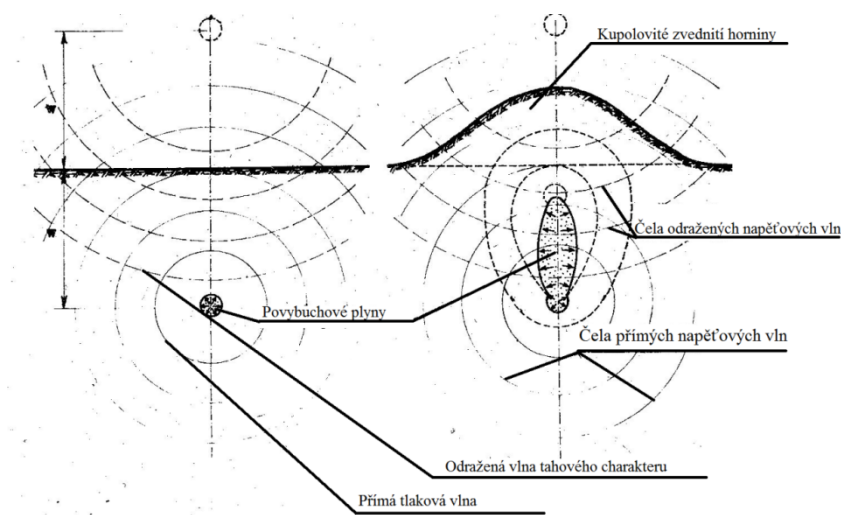
- Po odpálení nálože se šíří trhavinou detonační rázová vlna, kde tlak zplodin je mnohonásobně větší než pevnost horniny v tlaku. To způsobí v okolí drcení a stlačování horniny a vznik tzv. zóny drcení (zóna *tangenciálních trhlin*). Po snížení rychlosti rázové vlny na úroveň rychlosti zvuku, přechází tato vlna na vlnu napěťovou. Po určité vzdálenosti dochází k velmi rychlému snížení energie vlny a tlakové napětí klesne pod hodnotu napětí horniny v tlaku. V této fázi se změni napěťové vlny na tangenciální tahové, přesahující hodnotu napětí horniny v tahu. A následkem toho se horninou šíří *radiální trhliny* a vzniká typická růžice radiálních trhlin.



1- Zóna drcení, 2- Zóna trhlin, 3- Zóna pružných deformací

Obr. 1: Porušení horninového prostředí způsobené výbuchem nálože [3].

- Dosáhne-li napěťová vlna volné plochy (čelby) končí první fáze výbuchu. V druhé fázi se pohybující hornina přemístí nad volnou plochou (důsledek nulového odporu prostředí) a způsobí odhoz horniny (Obr. 2).
- V třetí fázi se vlna napětí po dosažení volné plochy odráží a zlomek energie prochází a mizí bez užitku. Odražená vlna působí jako vlna tahová (zředění), šířící se směrem k epicentru výbuchu od volné plochy. To způsobí odštěpování horninového masívu od volné plochy, tzv. odštěpový efekt.
- V poslední fázi nám vznikne samotná horninová výtrž, vymezena radiálními trhlinami od nálože. Největší porušení má hornina právě v oblasti těchto radiálních trhlin a v okolí nálože.



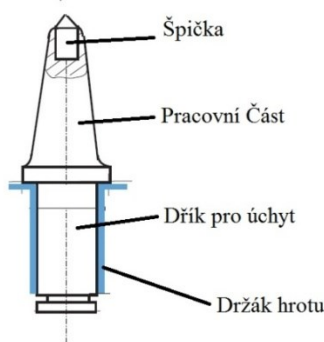
Obr. 2: Mechanismus rozpojení horniny výbuchem v blízkosti volné plochy [2].

Tento popis výbuchových dějů je celkem reálný, až na jednu skutečnost a to, že horninový masiv je nehomogenní prostředí. Do děje jsem neuvedl systém ploch nespojitosti (ploch diskontinuity), kde každá plocha je v podstatě překážkou pro vlny. Plochy nespojitosti, mohou vlny odrazet, lomit anebo pohlcovat úplně.

2.1.2. Mechanické rozpojování

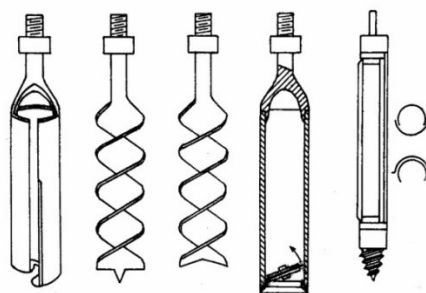
U mechanického rozpojování je pracovní nástroj v přímém kontaktu s horninou. Způsoby rozpojování můžeme rozdělit na dvě základní technologie: řezání a vrtání. Mechanickým způsobem je těženo cca 80%-85% hornin [1].

- a) *rozpojování řezáním*: Hornina je oddělena od horninového masívu pomocí břitů, nebo kuželových hrotů. Rozpojení je závislé na geometrii břitů, které musí přenést velké síly a potřebné napětí k rozpojení horniny. Síla na břitu (hrotu) musí být tak velká, aby nástroj zeminu rozpojil, ale nesmí překročit hodnotu, při které dojde k deformaci břitů. Hrot má oproti břitu obvykle menší kontaktní plochu, to umožňuje vyvolat vyšší napětí. Hrot tedy dokáže rozpojit hůře rozpojitelné zeminy. Řezacích nástrojů využívají např. razící štíty, kombajny, tunelovací stroje, ale také lopata rýpadla apod. [7]



Obr. 3: Hrot pro rozpojování hornin [7].

- b) *Rozpojování vrtáním*: K rozpojení horniny dochází důsledkem otáčení vrtného nástroje. Vrtání se z pravidla používá v přípravné fázi trhacích prací k vytvoření vrtu v hornině.



Obr. 4: Ukázka vrtných nástrojů [8].

2.1.3. Hydraulické rozpojování

K rozpojení se využívá proudy tlakové vody. Vodu lze také využít k dopravě rozpojené horniny. K provedení rozpojení horniny se využívá tzv. hydromonitor, který usměrňuje paprsek tlakové vody. Za hydraulické rozpojování můžeme považovat i těžbu štěrku nebo písku z vody, kde se využívá sacích čerpadel [1].

Hydraulický způsob se často kombinuje s mechanickým způsobem rozpojování např. vrtání s přívodem vody do vrtu apod. Hydraulickým způsobem je těženo 7 – 8% horniny [1].

2.1.4. Fyzikální rozpojování

Tento způsob rozpojování je ve fázi experimentů. Jedná se například o rozpojení hornin pomocí ultrazvuku, kde by mělo dojít k rozpraskání horninového masívu. Nebo rozpojení horniny pomocí ohřátí horniny na vysokou teplotu a náhlým ochlazením vodou, které již bylo používáno v historickém dobývání.

2.2. Úvod o výbušninách

Pro výbušniny je typická schopnost chemického výbuchu, podle vyvolané chemické přeměny je dělíme na *přímé* a *nepřímé*. U přímých výbušnin nám stačí k výbuchu jednoduchý podnět (náráz, tření, plamen apod.). Zde spadají střeliviny a třaskaviny. U nepřímých výbušnin musíme vyvolat výbuch větším množstvím energií, převážně využíváme výbuch přímé výbušniny. Do této kategorie patří trhaviny.

U *střelivin* je výbuchovou přeměnou deflagrace (explozivní hoření). Jsou to látky schopné uvolňovat hořícím plyny o velikém tlaku a teplotě [2]. Do střelivin patří např. černý prach, nebo bezdymné prachy.

U *třaskavin* je výbuchovou přeměnou detonace. Třaskaviny lze k výbuchu přivést malým podnětem a jsou schopné rychlého přechodu od výbuchového hoření k detonaci [2]. Jejich vlastnosti se uplatňují při výrobě rozbušek, kde slouží, jako primární slož. To znamená, že je využíváme k detonaci jiné výbušniny, převážně trhaviny.

Pro *trhaviny* je typickou výbušnou přeměnou detonace a jsou málo citlivé k vyvolání výbušné přeměny. Jedná se o směsi organických a anorganických látek, které jsou jak výbušné, tak nevýbušné povahy [2]. Podle obsahu výbušných látek je dělíme na *klasické trhaviny* a *neklasické (moderní) trhaviny*. Dále rozdělujeme trhaviny podle toho, kde je budeme používat:

- povrchové,
- důlní: skalní, bezpečné,
- pro zvláštní použití.

Trhaviny povrchové, jsou ve většinou realizované přímo na místě odstřelů, jako sypané. Dodávají se v pytlích, nebo jsou nabíjeny tzv. nabíjecími vozy.

Důlní trhaviny se dodávají převážně v maloprůměrových válcových náložkách. Pro tento typ trhaviny je hlavním požadavkem minimální znečištění ovzduší, především toxickými zplodinami.

Klasické trhaviny se vyznačují obsahem výbušných látek, nebo směsí několika výbušnin. To má za následek špatné hygienické a technologické problémy, jako jsou vysoké

bezpečnostní nároky na manipulaci. Pro výrobu klasických trhavin, můžeme suroviny rozdělit na:

- *výbušnou směs*, kde se jedná o chemickou sloučeninu, například nitroestery, nitrolaky, nitraminy.

- *okysličovadla*, jedná se o látky obsahující velké množství kyslíku, který je při výbušné přeměně snadno uvolňován. Zde patří např. dusičnan amonný, chloristan amonný apod.

- *paliva*, jedná se o látky organického původu, nejčastěji se používá nafta, topný olej, hliníkový prach apod.

- *pomocné směsi*, látky sloužící například pro snížení výbuchové teploty (hasicí látky), nebo látky zvyšující výkon (ostřicí látky).

*Neklasické (moderní) trhavin*y, eliminují nevýhody klasických trhavin. Jedná se o látky neobsahující výbušné složky a výbušnost je výsledkem fyzikální senzibilizace. Do této skupiny řadíme trhavin y obsahující vodu, jednoduché trhavin y typu DAP (směs dusičnanu amonného a paliva), nebo jejich kombinace.

3. METODY ROZPOJOVÁNÍ HORNÍ POMOCI TRHAVIN

Rozpojování hornin pomocí výbuchu je velmi složitý děj, do kterého vstupuje mnoho faktorů. Pro správné rozpojení horniny, nebo nakypření máme požadavky především na navržení správného projektu odstřelu, předpověď výsledného odstřelu a určení správné fragmentace horniny apod.

3.1. Faktory ovlivňující rozpojování hornin

Jeden z hlavních faktorů ovlivňující proces rozpojení je charakter prostředí, v němž k výbuchu dochází. V horninovém prostředí to jsou fyzikálně mechanické vlastnosti, odvíjející se od druhu horniny. Dalšími faktory vstupující do procesu jsou samozřejmě parametry nálože a geometrie systému (technologie trhacích prací), které si popíšeme v další části textu.

3.1.1. Základní parametr nálože

V trhacích pracích je trhavina umístěna v náložích. Optimální výbuch je závislý na následujících parametrech: tvaru nálože, průměrem vrtu a nálože, náložovou hustotou trhaviny, specifickou spotřebou trhaviny a hmotnost nálože.

U tvaru rozlišujeme nálože táhle a soustředěné. *Táhlé nálože* mají tvar válce, kde převažuje délka. *Soustředěné nálože* mají tvar koule a používají se především u komorových, nebo sklípkových odstřelů, u ostatních odstřelů používáme nálože táhle.

Při návrhu *průměru vrtu* se lze řídit určitými zásadami. U odstřelu pomocí táhlé nálože provádíme vrt většího průměru, z důvodu nedokonalého vrtání nemusíme náložku zatlačit do požadované hloubky. Doporučený poměr mezi průměrem náložky a průměrem vrtu je 0,8. U volně sypaných trhavin je poměr mezi průměrem nálože a vrtu roven 1 tedy 100% vyplnění vrtu. Minimální průměr vrtů je určen minimálním dolním kritickým průměrem trhaviny a měl by se pohybovat v rozmezí [2]:

$$d = (5 \sim 1,25) \cdot H$$

Kde:

d průměr vrtu [mm],
H výška etáže [m].

Maximálního rozpojovacího efektu dosáhneme tehdy, je-li poměr průměru roven 1. Proto je vhodné, pokud to dané podmínky dovolí, nabíjet vrty sypanými trhavinami (vhodné jsou i tekuté trhaviny). Rostoucí průmět vrtů má vliv na seizmické účinky, porušení horniny za obrysem výlomu a zhoršení kusovitosti rubaniny. Naopak roste výkon vrtání, který ovlivňuje růst výnosu horniny.

Náložová hustota trhaviny Q_n [kg/m³] popisuje poměr mezi hmotností nálože a objemem vrtu. Čím je vyšší náložová hustota, tím je vyšší množství energie uvolněné výbuchem a má příznivý vliv i na detonační rychlost a stabilitu detonace. Náložová hustota má také své meze, při nízké hodnotě hustoty nemusí dojít k detonaci a při přehutnění může dojít k zastavení výbuchu, nebo detonace se přemění v hoření výbušniny. S rostoucí hodnotou Q_n se zvětší objem rozpojené horniny jedním vrtem o délce 1m, tzv. *výnos horniny*.

Specifická (měrná) spotřeba trhaviny q_r [kg/m³], jedná se o hlavní parametr pro určení hmotnosti nálože. Je definována jako hmotnost trhaviny v kilogramech, které je zapotřebí k rozpojení 1 m³ horniny v rostlém stavu [2]. Specifickou spotřebu trhaviny ovlivňuje mnoho faktorů jako je počet volných ploch, pracovní schopnost trhaviny, průměr nálože, pevnost horniny, charakteristiky horninového masívu, a mnoho dalších. Výpočtem se zabývá mnoho autorů, kteří zohledňují různé faktory vstupující do výpočtu. Konečné hodnoty můžeme docílit například aritmetickým průměrem těchto výpočtů, ale takto stanovená hodnota je ovlivněna řadou chyb a nemusí být dostatečně přesná. V běžné praxi se na závodech sleduje specifická spotřeba trhaviny a jedná se již o hodnotu známou. V některých literaturách ji označujeme, jako střední měrná spotřeba trhaviny.

Hmotnost (válcové) nálože potřebné pro rozpojení horniny je možné vypočítat pomocí tzv. *Objemové metody* a to jako součin objemu rozpojované horniny a měrné spotřeby trhaviny. Jedná se o základní vzorec:

$$Q_c = q_r \cdot V_h$$

Kde:

Q_c	celková hmotnost nálože [kg],
q_r	specifická (měrná) spotřeba trhaviny [kg/m ³],
V_h	objem rozpojované horniny [m ³].

Další možnosti výpočtu hmotnosti nálože je pomocí tzv. *Langeforsovy metody*. Způsob výpočtu vychází z koncentrace nálože ve vrtu, která je potřebná k rozpojení horniny.

Hmotnost nálože, potřebnou pro rozpojení horniny v záběru lze vypočítat pomocí součtu dolní hmotnosti Q_d a horní hmotnosti Q_h nálože. Vypočtená hodnota je sice minimální, ale dostatečná pro normální rozpojení. Tento způsob výpočtu je možné provést za podmínky, kdy výška etáže H musí být menší, nebo rovná než dvojnásobek ze záběru V .

$$Q_d = 1,3 \cdot V_{\max} \cdot p_d$$

$$Q_h = p_h \cdot (L - 2,3V)$$

Kde:

V_{\max}	maximální délka zabírky [m],
p_h, p_d	koncentrace nálože [kg/m],
L	celková délka vrtu [m],
V	délka zabírky [m].

Konstrukce nálože určuje tvar napěťové vlny a zajišťuje optimální podmínky přenosu a účinků energie výbuchu na horninové okolí. Pod pojmem konstrukce nálože si můžeme představit parametry jako je tvar nálože, místo uložení počinu, použité druhy a typy trhavin a délka nálože [4]. Změnou jednoho z těchto parametru ovlivníme proces rozpojení hornin. Do konstrukce nálože můžeme také zařadit ucpávku vrtu nálože.

Ucpávka zaplňuje prostor mezi, náloží a ústím vrtu, nebo se používá u dělených náloží s meziucpávkou. Délka ucpávky musí být taková, aby trhavina mohla vykonat požadovanou práci. Velikost ucpávky je různá, podle toho na jakém pracovišti provádíme trhací práce, nebo se upravuje podle předepsaných bezpečnostních předpisů. Ucpávka musí splňovat požadavky jako je nehořlavost, nezhoršovat hygienické požadavky na pracovišti a musí klást dostatečný odpor napěťovým vlnám a zabránit úniku povýbuchových zplodin. Jako vhodný ucpávkový materiál se používá jíl, písek, směs pisku a jílu, vrtná drť nebo štěrky, voda v plastových obalech, nebo voda volně nalévaná [4].

3.1.2. Druhy a vlastnosti hornin

Hlavními faktory ovlivňující proces trhacích prací jsou fyzikální, mechanické a elastické vlastnosti horninového masívu, avšak nejzásadnější vliv na rozpojování mají plochy diskontinuity. Ty rozčleňují horninový masiv na nespojitě části neboli bloky. Plochy diskontinuity snižují parametry šíření napěťové vlny po výbuchu. Při těžbě zhoršují stabilitu masívu, komplikují vrtání, ale naopak usnadňují těžbu kamene určeného pro výrobu štěrku. Vhodná orientace puklin také ovlivňuje (pozitivně) dobývání kamene pro ušlechtilou kamenickou výrobu. Proto musíme vždy uvažovat, jaký konečný produkt chceme z horninového masívu vyrábět.

Dalšími činiteli vstupující do rozpojování hornin je objemová hmotnost horniny, součinitel pevnosti (dle Protodjakonova), akustická impedance trhaviny a horniny, vzdálenost mezi trhlinami a jiné. Tyto charakteristiky hornin a rud se využívají k navrhování trhacích prací jejich souhrn je uveden v příloze 1.

Akustickou impedanci (horniny I_h , trhaviny I_t) lze definovat jako vlastnost trhaviny a prostředí z hlediska šíření, odrazu a prostupu napěťových vln [2]. Do výpočtu vstupuje hustota prostředí a rychlost šíření vln, nebo detonační rychlost (uvedeno ve výpočtu). Narazí-li rázová vlna na hranici mezi dvěma prostředími s různou akustickou impedancí, dojde

k částečnému odrazu vlny. Aby došlo k odrazení vlny od volné plochy zpět do masivů, musí být akustická impedance před volnou plochou (horninou) větší, než za volnou plochou (vzduchu). V případě prostředí hornina-vzduch je tato podmínka dostatečně splněna. Kvalita rozpojení horniny je závislá na vhodném druhu použité trhaviny pro daný typ horniny. Využití energie je tím větší, čím menší je rozdíl mezi akustickou impedancí horniny a trhaviny.

Výpočet *akustické impedance* [2]:

$$I_t = D \cdot \rho_t$$

$$I_h = c_p \cdot \rho_h$$

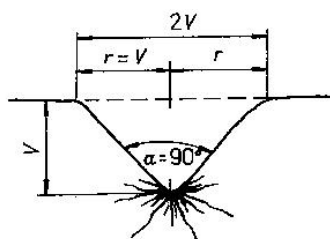
Kde:

I_t	akustická impedance trhaviny [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$],
I_h	akustická impedance horniny [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$],
c_p	je rychlost šíření podélných vln horninou [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$],
ρ_h	hustota horninového prostředí [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$],
ρ_t	hustota trhaviny [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$],
D	detonační rychlost trhaviny [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$].

3.1.3. Technologie trhacích prací

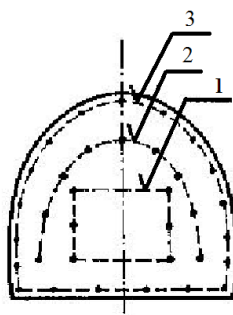
Rozpojování hornin vzniká v geometricky ohraničeném prostředí tehdy, je-li nálož umístěná poblíž povrchu masívu (volné plochy). Zvolení vhodné technologie se odvíjí od parametrů rozpojované horniny, což je upnutí rozpojovaného objektu, dále rozmístění vývrťů a načasování nálože v horninovém prostředí.

Upnutí rozpojované horniny můžeme definovat, jako odpor horniny proti vytváření horninové výtrže s vrcholovým úhlem $\alpha \geq 90^\circ$ [2], zobrazeno na obr. 5. Upnutí horniny je ovlivněno počtem volných ploch a ploch upnutí. Volná plocha, je plocha, na kterou působí výbuch nálože. Například při ražení štol, máme zpravidla jedinou volnou plochu a to plochu čelby. Oproti tomu při hromadných odstřelech nebo odstřelech v lomu máme k dispozici dvě a více volných ploch. Počet volných ploch podstatně ovlivňuje spotřebu trhavin. Při větším počtu ploch, bude potřebná nižší hmotnost nálože k rozpojení stejného objemu horniny, znázorněno v příloze 2. Velikost upnutí vyjádříme jako tzv. míru upnutí $S_u = \text{plocha upnutá} / \text{plocha volná}$. Například při rozpojení volně stojícího balvanu bude míra upnutí $S_u = 1/5$. U ražení důlních chodeb (štol, tunelu) bude nejvyšší míra upnutí v rozích čelby $S_u = 2/3$, nebo při rozšiřování záalomové dutiny.



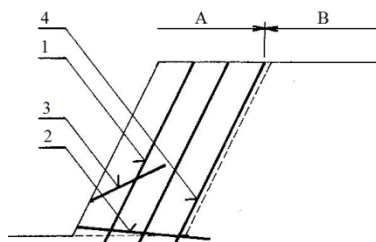
Obr. 5: Horninová výtrž po výbuchu nálože [2].

Rozmístění vrtů v hlubinných dolech je závislé na použité dobývací metodě. Vrtý lze rozdělit do třech základních typů: zálomové vrtý, přibírkové vrtý a obrysové vrtý (Obr. 6). Zálomové vrtý vytvoří zálomovou dutinu, po odstřelu nám zajistí vznik nových volných ploch a jsou časované v první fázi odstřelu. Přibírkové vrtý rozšiřují zálomovou dutinu a časují se v druhé fázi. Obrysové vrtý nám vytvoří obrys navrženého díla. Další možnosti uspořádání vrtů v hlubinném dobývání je tzv. vějířovité uspořádání, kdy vrtý jsou realizovány z díla (kolmo na osu díla). V povrchových lomech rozdělujeme vrtý na hlavové, patní, zálomové a obrysové vrtý (viz. obr. 7)



1- zálomové vrtý, 2- přibírkové vrtý, 3- obrysové vrtý

Obr. 6: Rozmístění vrtů při ražení důlních děl [2].

1- hlavové vrtý, 2- patní vrtý, 3- zálomové vrtý, 4- obrysové vrtý
A- předobrysový masiv, B- zaobrysový masiv

Obr. 7: Typy vrtů v povrchovém dobývání [2].

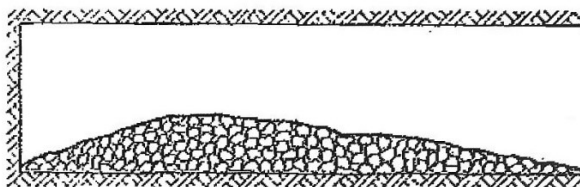
Další důležitý faktor k úspěšnému odstřelu je jeho správné *načasování odstřelu*. Správným časováním rozumíme rozdělení času výbuchu do několika etap, které jsou

časovány po sobě s určitým zpožděním. To má za následek vytvoření nových volných ploch. Podle délky zpoždění odstřelu rozeznáváme tyto případy, dělení dle [2]:

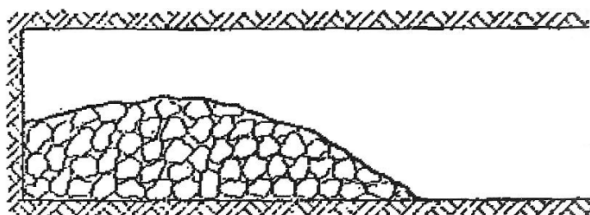
- a) Současný (mžikový), kde interval zpoždění je 0 ms, jedná se pouze o teoretickou hodnotu z důvodů reakčních časů mžikových rozbušek je to až ± 6 ms [2].
- b) Krátkodobě časovaný (milisekundový), kde interval zpoždění je menší než 100 ms. Zde patří rozbuška označovaná jako DeM a DeR. Průměrná doba zpoždění rozbušky DeM je 30 ms, u rozbušky typu DeR je zpoždění v intervalu 40 až 80 ms.
- c) Dlouhodobě časovaný, kde interval zpoždění je větší než 100 ms. Jedná se už v podstatě o odstřel jednotlivých náloží. Do této skupiny patří rozbušky DeD (čtvrtsekundové tj. 250 ms) a DeP (půlsekundové tj. 500 ms).

Způsob časování náloží má vliv na kusovitost a odhoz rozpojované horniny. Závislost mezi časováním a odhozem horniny je znázorněno níže na obrázku 8. Nejvhodnějším časováním v běžné praxi je časování pomocí milisekundových rozbušek. V případě mžikových odstřelů dochází ke vzniku velkých kusu horniny a nežádoucích vysokých seismických účinků na okolí.

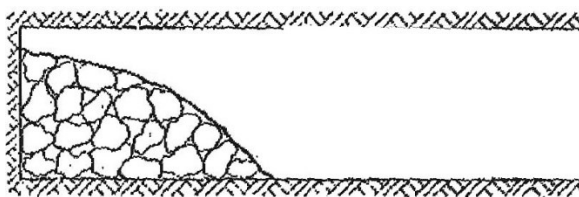
- milisekundový roznět pomocí rozbušky DeM



- kombinovaný roznět rozbuškami DeM a DeD



- Dlouhodobě časovaný roznět rozbuškami DeD a Dep



Obr. 8: vliv časování na rozlet a kusovitost horniny [4].

3.2. Metody ražení podzemních děl

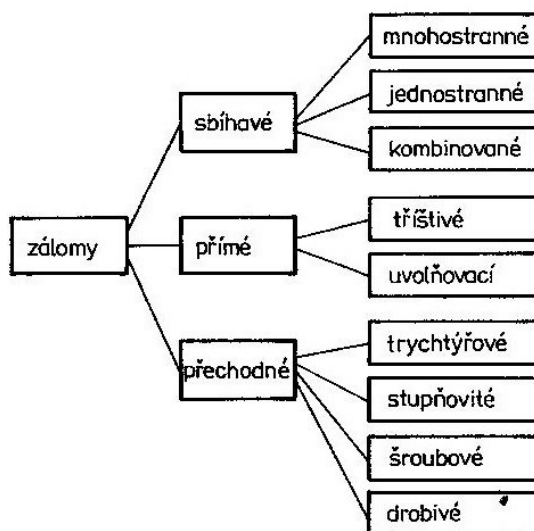
3.2.1. Úvod o ražení podzemních děl

Hlavním cílem u ražení podzemních děl je dosažení projektované délky zabírky, to znamená posunutí čelby o určitou vzdálenost. Další cíle trhacích prací jsou správné vylomení co nejpřesnějšího tvaru díla s minimálním nadvýlomem, nejmenší délka odhozu rubaniny, dobrá kusovitost rozpojené horniny (vyhovující je z pravidla drobná kusovitost). Z hlediska bezpečnostních požadavků to jsou slabé seizmické účinky, minimální poškození výztuže díla, vznik nejlépe nulových toxických plynů apod.

Jedním ze základních znaků u trhacích prací v podzemí je ražení s jednou volnou plochou (čelbou). To má vliv na maximální míru upnutí horniny, která se podílí na velké spotřebě použité trhaviny a vzniku velkého odhoz rubaniny od čelby. Problém můžeme vyřešit ražením se zálohem, kdy po vytvoření zálomové dutiny získáme více volných ploch a snížíme míru upnutí. V určitých případech využíváme bezzálohmé ražení.

Nejběžnější postup ražení podzemních děl je ražení, kde provádíme následující typy vrtů: zálomové, přibírkové a obrysové vrty. Nálož v zálomových vrtech má za úkol vytvořit prvotní výlom a zvýšit počet volných ploch z toho to důvodu se časuje v první fázi před ostatními náložemi díla. Časový předstih musí být dostatečně velký, aby došlo k odtržení horniny a k jejímu vyhození ze zálomové dutiny [2]. V tomto případě trhavina vykonává největší práci a spotřeba trhaviny je maximální. Nálož v přibírkových vrtech rozšiřují zálomovou dutinu a v obrysových vrtech dotvarují profil díla, podle požadavku projektu. Obrysové nálože časujeme v poslední časové fázi odstřelu. Uvedené postupy se obvykle aplikují i při ražení podzemních staveb jako je, ražba tunelů, kolektorů, různých zásobníků apod.

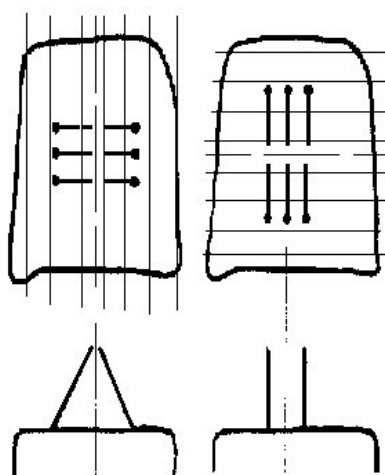
Podle geometrie zálohmů, konstrukce zálomových náloží a jejich časování při roznětu dělíme zálohy na sbíhavé, přímé, přechodné [2]. Na obrázku 9 je podrobnější dělení zálohmů. V další části si uvedeme pár základních typů zálohmů.



Obr. 9: Typy zálomů [2].

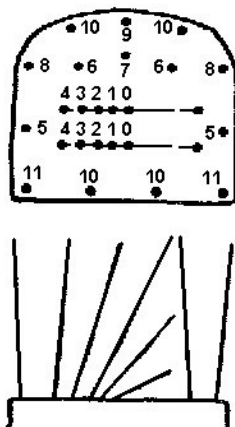
Sbíhavé zálomy mají zálomové vrty ukloněny k rovině čelby. Úhel úklonu je závislý na pevnosti rozpojované horniny v tlaku. Jeho optimální hodnota je okolo 45° , to vede k malé délce zabírky. Praktická hodnota úhlu zálomových vrtů se pohybuje od 55° do 76° [2]. Nálož má ve vrtu působit od paty (z hloubi), její délka by neměla překročit 40% délku vrtu.

Zálomy sbíhavé mnohostranné se řadí mezi nejstarší používané zálomy. Nejběžnější sbíhavý zálom je typ *klínový*. Používá se při ražení horizontálních děl v pevných a středně pevných horninách. Vzdálenost mezi vrty je závislá na velikosti profilu díla a na pevnosti horniny. Poloha zálomového klínu je ovlivněná směrem a sklonem vrstevnatosti horniny. Podle polohy klínu dělíme zálom klínový na horizontální, vertikální a šikmý (obr. 10). V špatně rozpojitelných horninách realizujeme dva zálomy, kde první zálom vrtáme pod úhlem 45° druhý zálom je vrtán pod větším úhlem.



Obr. 10: Sbíhavý zálom - klínový [9].

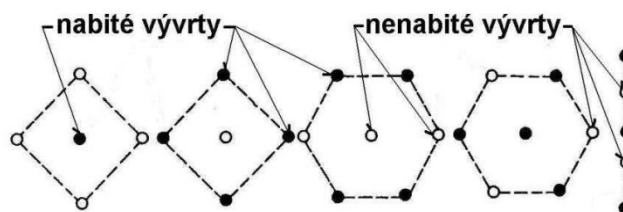
Zálomy *sbíhavé jednostranné (poloklínové)* jsou realizované dvojicemi vrtů, kde jedna řada slouží jako vrty obrysové. Používají se ve vrstevnatých horninách s malou mocností a vrty mají být kolmé na vrstvy. Mezi tento typ zálomu řadíme zálom *nůžkový* a *vějířový*. Na obrázku 11 je znázorněn zálom vějířový, který se využívá častěji a má univerzální použití. Je realizován postupným vytvářením klínu.



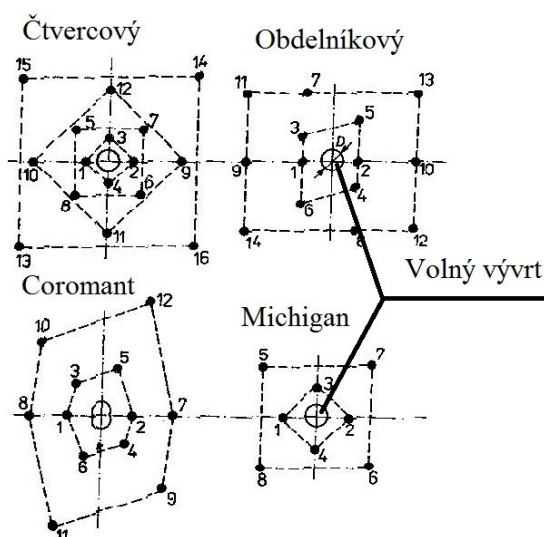
Obr. 11: *Sbíhavý zálom – Vějířový* [9].

Základními parametry sbíhaných zálomu jsou hmotnost náloží, rozteč vrtů, úhel vrtů s plochou čelby a počet vrtů [2].

Přímé zálomy jsou vrtány rovnoběžně s osou díla o stejné délce vrtu. Některé vrty se nenabíjejí a působí jako malá volná plocha. Nálož je rozložena po celé délce vrtů s krátkou ucpávkou a jsou konstruovány jako nálože souvislé, nebo dělené se vzduchovou mezerou. Důležité je navrhnout správnou hmotnost zálomových náloží, ty musí horninu dobře rozdrtit na velmi drobné kusy a zamezit dalšímu zpevnění v zálomové dutině. Dle průměrů vývrtů a časování dělíme zálomy na tříštivé (tzv. kanadské) znázorněné na obr. 12 a uvolňovací (tzv. válcové) na obr. 13. Tříštivé zálomy se z důvodů krátké zabírky používají výjimečně.



Obr. 12: *Přímé zálomy – tříštivé (kanadské)* [2].



Obr. 13: Přímé zálomy – uvolňovací (válcové) [2].

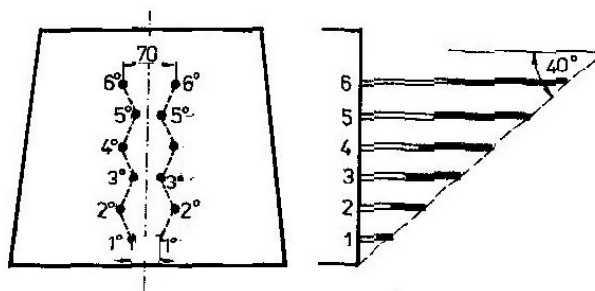
Zálom *uvolňovací* je tvořen soustavou nabitých vrtů a převážně jedním volným vrtem o průměru 50 až 200mm, který ovlivňuje hodnotu zabírky zálomu. Odpal se provádí postupně, zpravidla protisměrně.

Základní parametry ovlivňující funkci přímých zálomu jsou rozteč nabitého a volného vrtu, hmotnost nálože, průměr volného vrtu, charakteristika horninového masívu a časování náloži [2]. Na obr. 13 jsou uvedeny příklady přímých uvolňovacích zálomů včetně nejpoužívanějšího typu – Michigan.

Zálomy přechodné jsou kombinací zálomu sbíhavých a přímých. Vrty jsou rovnoběžné s osou díla a mohou mít různé délky a průměry, nálož je umístěná u dna vrtu, ale i po celé délce. Používají se i volné vrty, které usnadní práci náložím. Patří zde zálomy trychtýřové, stupňovité, šroubové a drobivé

Zálom trychtýřový je tvořen jedním vrtem velkého průměru, to je celkem obtížně realizovatelné a málo efektivní. Jeho modifikací je trychtýřový zálom tvořený několika vrty, vrtáními blízko sebe a nabíjené u dna. Nevýhodou je velký odhoz rubaniny a nepravidelný výlom. Tento zálom se převážně používá pro ražení komínu v pevných horninách.

Zálom stupňovitý (obr. 14) je realizován soustavou rovnoběžných náloží s různou délkou. Tento typ v poslední době nahradil zálom klínový a nejčastěji se používá při ražení důlních děl v pevných horninách. Při odpalu časujeme milisekundové rozbušky zdola nahoru, to má za následek malý odhoz rubaniny a neohrožení výztuže díla. Další výhody jsou snadné vrtání, zvětšení zabírky i v malých profilech díla [2].



Obrl 14: Přechodný zálom – stupňovitý [2]

Zálom šroubový, u kterého vrtáme soustavu rovnoběžných vrtů po kružnici a uprostřed provádíme vrt delší o 10 až 15cm než plánovaná zabírka. Středový vrt se časuje, jako první a to způsobí rozrušení horniny a vznik radiálních trhlin. Dále časujeme vrt nad ním a ostatní vrty po směru hodinových ručiček. Používá se v měkkých horninách, a při ražení chodeb, nebo prorážek v uhlí. V pevnějších horninách je možné zálom rozšířit o pomocné nenabitě vývrty umístěné v blízkosti středového vrtu. Výhody tohoto typu jsou libovolné umístění v čelbě, spolehlivá funkce, snadné vrtání, velká teoretická zabírka [2].

Drobivý zálom je realizován pomocí rovnoběžných vrtů, vrty jsou rozmístěny tak, aby spotřeba trhavin byla minimální a efekt práce, byl maximální. Sestavy zálomu jsou odvozené od zkušeností z různých důlních podniků. Zálomy mají všestranné použití a lze je používat jak u trhacích prací v uhlí, tak při ražení v pevných horninách (až do 250 MPa) [2].

Bezzáломové ražení je realizováno soustavou rovnoběžných vrtů s osou díla. Vrty jsou stejné délky a průměru, jedinými ukloněnými vrty jsou obrysové vrty. Při odstřelu využíváme vlastnosti milisekundových roznětu náloží. To má za následek, že každý výbuch nálože způsobí v okolí soustavu trhlin, které jsou fyzikálním rozhraním pro napěťové vlny dalších časovaných náloží. Výhody bezzájomového ražení jsou vyšší hodnota zabírky, dobrá fragmentace rozpojené horniny a jednoduché vrtání [2]. Velkou nevýhodou je mohutný odhoz horniny od čelby, oproti zálomovému ražení to může být, až 5násobek a hrozí poškození výztuže díla.

3.2.2. Ražení horizontálních a úklonných děl

Používáme převážně ražení se zálomem, kde výběr typu je ovlivněn fyzikálně mechanickými vlastnostmi rozpojované horniny a charakteru pracoviště.

Při ražení překopu a štol se nejčastěji používá zálohm stupňovitý, klínový vertikální a drobný. Velikost zabírky se pohybuje okolo 2 až 2,8 m, dle pevnosti rozpojované horniny.

Technologie ražení chodeb se v zásadě neliší od ražení v uhlí nebo v hornině. Základní rozdíl je v jiné hodnotě tlakových pevnosti a akustické impedanci. Důležitým faktorem při ražbě v uhlí je bezpečnost práce z důvodu výskytu uhelného prachu a výbušného plynu (metanu).

3.2.3. Ražení svislých děl

U hloubení jam a šibíku s jednou volnou plochou platí podobné zásady jako u ražení horizontálních děl. V tomto případě razíme převážně kruhové profily. Nejčastěji se používá zálomové ražení s přímými (kanadskými) nebo sbíhavými zálomy. Vrty na čelbě jsou rovnoběžné s osou díla a umísťují se po okruhu. Počet okruhu vrtů je závislý na průměru hloubené jámy. V prvním okruhu jsou vrtány zálomové vrty a uprostřed vrtáme 3 až 4 pomocné (nenabíjené) vrty. Při hloubení se obvykle používají vodovzdorné trhaviny.

Pro hloubení jam a šibíku, které jsou „podfárané“ používáme hloubení s předvrtem o průměru 1200 až 2500mm. Předvrt se realizuje s povrchu budoucí jámy, až do štoly pod jámou. Slouží jako druhá volná plocha, využívá se k odklizení horniny a plní funkci větrací cesty. Je nutné rozpojit horninu na drobnou fragmentaci horniny, aby nedošlo k ucpání předvrtu.

Při ražbě komínu postupujeme směrem zdola nahoru. Běžně razíme se zálomem válcovým, můžeme využít i bezzálomového ražení. Metody ražení lze rozdělit na dva základní typy, klasické ražení s volnou plochou a ražení s předvrtem (po vodicím vrtu). Častěji se využívá ražení s předvrtem, kde provádíme vrt o průměru 100 až 200mm, který slouží jako druhá volná plocha a větrání. Všechny vrty díla jsou rovnoběžné s osou komínu. Modifikací této metody je ražení pomocí dlouhých vrtů, kde v první fázi odvrtáme profil komína po celé jeho délce a dále, už jen provádíme odstřel po určitém záběru.

3.2.4. Ražení velkoprostorových děl

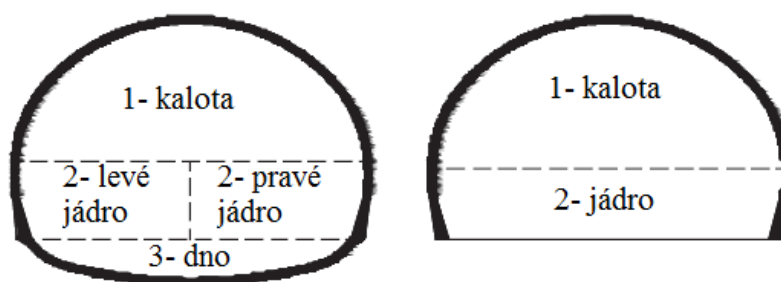
S ražením velkých profilů se častěji setkáváme v inženýrském stavitelství, při ražení tunelů, nebo metra. Technologie trhacích prací závisí na zvolené metodě, na našem území se v dnešní době nejčastěji používá Nová Rakouská Tunelovací metoda (NRTM).

Rozpojování hornin při použití NRTM, lze podle geologických podmínek rozdělit do dvou skupin:

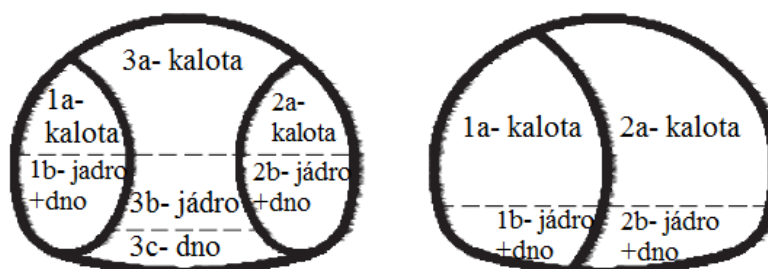
- *Ražení plným profilem* (nedělenou čelbou), kdy geologické prostředí je stabilní. Výlom se po odstřelu stabilizuje stříkaným betonem.

- *Ražení dělenou čelbou*, kde výrub dělíme na vertikální a horizontální členění. *Horizontální členění* (obr. 15), používáme převážně z důvodů jednoduššího provádění prací, nebo z důvodu špatné stability čelby. *Vertikální členění* (obr. 16) se realizuje u tunelu větších profilů, kde má vliv na provádění a stabilitu čelby, zároveň snižuje deformace na povrchu. Výlom se prvně realizuje v méně soudržných horninách, jako dočasná výztuž se zde používají radiální kotvy a stříkaný beton.

Technologie trhacích prací je obdobná, jako u ražení horizontálních podzemních děl. Vrty dělíme na záломové, které jsou vrtané v menší vzdálenosti a vrty obrysové, vrtané po obvodu čelby ve vzdálenosti 0,5 až 0,8 m. Pomocné vrty se rozmísťují po čelbě v četnosti 1 vrt na 1,0 až 1,5 m² [10]. Při odstřelu je nutné dbát, aby účinek byl maximální a profil díla co nejpřesněji vyražený.



Obr. 15: Horizontální dělení výrubu, čísla označují pořadí provádění výrubu [10].



Obr. 16: Vertikální dělení výrubu, čísla označují pořadí provádění výrubu [10].

3.3. Destrukce stavebních objektů

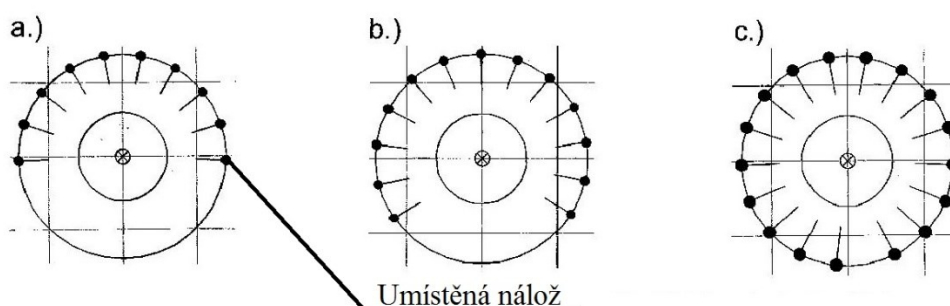
Hlavním cílem je porušení statické stability a tuhosti objektu, popřípadě dosáhnout požadovaného směru pádu konstrukce. Při destrukci stavebních objektů, umísťujeme trhaviny na nosné konstrukce. Destrukci konstrukce provedeme vhodným rozmístěním a načasováním náloží, které umístíme do tzv. *destrukčního řezu*. Vzdálenosti náloží ve vrtném schématu volíme v rozmezí 1,1 až 1,8 R, kde R je záběr[4]. Pro trhací práce se využívá velké množství malých náloží (do 0,5 kg).

V destrukčním řezu dochází k rozrušení a odhození konstrukce způsobené výbuchem nálože. V praxi rozeznáváme tyto druhy destrukčních řezů, rozdělení dle [4]:

Jednoduchý destrukční řez, kde se převážně jedná o vodorovný řez, kopírující okolní terén konstrukce. Používá se především u cihelných konstrukcí.

Nejpoužívanějším druhem je *víceřadý destrukční řez*, kde provádíme dvojřadé nebo třířadé destrukční řezy. Pevně se používá u demolic konstrukcí z betonu, železobetonu, komínů, nebo věží. Podle orientace a umístění destrukčních řezů rozeznáváme tři typy:

- Odstřel bude proveden pouze do půlky obvodu (obr. 17a) a konstrukce se položí požadovaným směrem.
- Odstřel se provádí, až za půlku obvodu (obr. 17b), to má za následek položení konstrukce do určitého směru a zkrácení.
- Odstřel se provádí po celém obvodu (obr. 17c), to má za následek podstřelení objektů a následné složení do sebe. Tento typ se převážně používá pro cihelné komíny.



Obr. 17: Rozmístění náloží při demolici komínu [4].

Plný destrukční řez, který se uplatňuje v případech, kdy požadujeme rozpojení celé konstrukce. Například u destrukce základových desek, betonových patek apod.

Pomocné destrukční řezy, používané k rozpojení konstrukce mimo hlavní řez. Je používán například k destrukci příček demolovaného domu apod. Podle potřeby provádíme řezy vodorovné, svislé a šikmé.

Demolice objektu pomocí trhavin je velmi rychlý a jednoduchý proces. Mezi další výhody patří například provádění demolic bez různých podpůrných konstrukcí, můžeme dosáhnout různé fragmentace stavební suti a je zabezpečena bezpečnost zaměstnanců při realizaci demolice.

Při destrukci vysokých konstrukcí dochází k seismickým účinkům, způsobených nikoliv výbuchem nálože, ale pádem konstrukce. Při výpočtu seismických účinků vycházíme z pádové energie tělesa, kterou přepočítáváme na výbuchovou energii trhaviny. A seismické zatížení je potom vypočteno z výbuchu volně uložené nálože v místě dopadů konstrukce [4].

4. NOVÁ METODA V ROZPOJOVÁNÍ HORNIN – Green Break technology (GBT)

4.1. Úvod o technologii Green Break Technology

Společnost Green Break Technology (Pty) Ltd. A Non-Detonating Solutions, byla založena roku 1997. Po letech výzkumu a vývoje přinesla na trh novou bezpečnou technologii v odvětví rozpojování hornin a demolic objektu ve stavebnictví. V roce 2011 byl zahájen prodej nábojek Green Break Gas Generator Safety Cartridges.

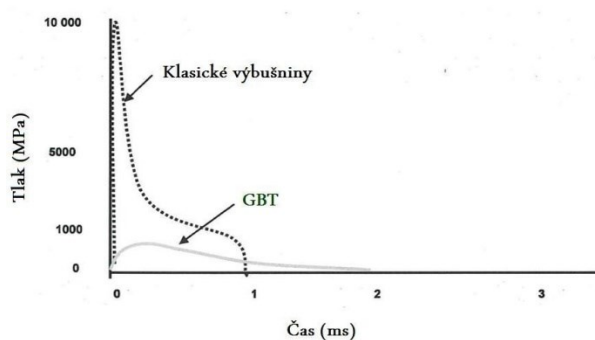
Technologie Green Break Technology (dále jen GBT) se řadí mezi expanzivní rozpojování (tzv. neexplozivní). Nábojky spadají do ostatních pyrotechnických výrobků kategorie P2 (pro technické účely) a nelze je brát jako klasické výbušniny. Pro práci s technologií GBT na území ČR potřebujeme pouze proškolení autorizovanou firmou, činnost provádí Green Break Technology CZ s.r.o., a dále odbornou způsobilost s pyrotechnickými výrobky. Není zapotřebí povolení Českého Báňského úřadu a můžeme se tak vyhnout administrativní činnosti ČBÚ.

Nábojky GBT jsou konstruovány jako plastové válce, barevně rozlišené podle typu. Dodávají se v různých průměrech a hmotnostech. Nábojky obsahují, granulovanou pyrotechnickou slož, která po zážehu instalovaným elektrickým palníkem uvolní velké množství plynů. Složení povýbuchových plynů je uvedeno v tabulce 2. Principem rozpojení je tlakové působení plynu na stěnu vývrtů, které je vyvoláno deflagrací (explozivní hoření) pyrotechnických slož nábojky. Rychlost deflagrace nábojek GBT je okolo 300 m/s, proto

nevzniká žádná tlaková vlna a oblast podrcení horniny v okolí vrtu je minimální (viz. Obr. 18). Tlakové projevy plynů na okolí jsou až 1000x menší než u klasických trhavin, to je znázorněno na grafu 2. Ze stejného důvodu je i minimální nadměrný rozlet horniny do velkých vzdáleností a seismické účinky na okolí jsou až 100x menší než u klasických trhavin. V tabulce 1 jsou shrnuty parametry nábojek GBT.



Obr. 18: Oblast podrcení horniny [11].



Graf 2: Průběh tlaků v závislosti na čase [11].

Rychlost deflagrace	300 m/s
Maximální tlak	450 Mpa
Otřesy	zanedbatelné
Akustické projevy	zanedbatelné
Časovaná iniciace	ano
Fragmentace	0,1 - 5,0m
Oblast drcení horniny	ne
Práce v zástavbě	ano
Bezpečnost použití	vysoká
Riziko požáru	zanedbatelné
Ekologické riziko	není
Riziko zneužití (terorismem)	vyloučeno

Tabulka 1: Parametry nábojek GBT

Oxid uhličitý	30,10%
Oxid uhelnatý	0,01%
Vodní pára	38,50%
Dusík	28,30%
Kyslík	2,00%
Hydroxid draselný	0,10%

Tabulka 2: Složení deflagračních zplodin GBT

4.2. Produkty Green Break Technology

Nábojky GBT se vyrábějí v průměrech 18, 28, 32, 34, 60 mm o hmotnostech 20,40,60,80,100 g. Dle požadavku zákazníka je firma schopná dodat požadované velikosti a hmotnosti nábojek. Vyrábějí se dva typy nábojek, iniciační a zesilovací nábojky, které můžeme podle potřeb spojit (viz. Obr. 19). Spojování se provádí pomocí speciálního konektoru.



Obr. 19: Napojení zesilovací nábojky na iniciační [11].

Iniciační nábojky (Safety Cartridge), jedná se o signálně zelené válcové nábojky, obsahující pyrotechnickou slož a elektrické iniciační zařízení (elektrický palník). Nábojky jsou vybaveny zpětnými trny, takže je lze bez obav použít i v dovrchních a úklonných vrtech. Nábojky jsou hermeticky uzavřené a vodovzdorné.

Zesilovací nábojky (Auxiliary Cartridge), signálně oranžové válcové nábojky, obsahující pyrotechnickou slož bez elektrického iniciačního zařízení. Nábojky jsou hermetický uzavřené a vodovzdorné.



Obr. 20: *Iniciační a zesilovací nábojky* [11].

Firma GBT rozšířila svou řadu výrobku o nábojky AUTOSTEM. V podstatě se jedná se o stejnou technologii jako u nábojek GBT, až na jeden rozdíl, nábojky AutoStem jsou modernizované o patentovaný samosvorný mechanismus (obr. 21). To znamená, že nám odpadá fáze utěšňování. Vyrábějí se ve dvou variantách, jako AutoStem nábojky „*AutoStem Cartridge*“ obsahující pyrotechnickou slož a elektrické iniciační zařízení. Zesilovací nábojky „*Booster Cartridge*“ obsahující pyrotechnickou slož, bez iniciačního zařízení. Nábojky jsou barevně rozlišeny podle gramáže (obr. 22).



Obr. 21: *Samosvorný mechanismus Autostem* [11].



Obr. 22: *Nábojky Autostem* [11].

Nábojky GBT a AutoStem mají certifikát CE v oblasti pyrotechnických výrobků.

Firma GBT také vyrábí a vyvíjí zařízení pro zážeh nábojek. Jedná se o elektrický kontroler (281G a 521G) sloužící pro mžikový zážeh nábojek, nebo elektronický sekvenční kontroler (GBT Wireless Sequential Initiator) pro časovaný zážeh nábojky, bez časovacích elementů. Pro přesný časový zážeh nábojek vyvinula firma elektrický časovací kontroler (GBT Electronic Timing System).

4.3. Rozsah použití Green Break Technology

Nábojky GBT jsou neúčinnější při rozpojování tvrdých hornin, jako je např. žula nebo křemen. Naopak v měkkých horninách je jejich použití nevhodné. Technologie je vhodná k rozpojování nadrozměrných balvanů v lomu, kde oproti klasickým trhavinám nedochází k nadrozměrným rozletům horniny. U těžby kamene pro kamenickou výrobu nedochází k znehodnocení bloku od zplodin a nevzniká oblast podrcení. A u hlubinného dobývání rud a užitkových nerostu, nám nevzniká jemná frakce, což ovlivňuje větším množstvím vytěženého nerostu. U dobývání pomocí klasických trhavin může jít o ztrátu, až 20% suroviny (nerostu). Tato hodnota byla ověřena v jihoafrických dolech, těžících surovinu, která obsahuje jemně rozptýlené zlato.

GBT se hojně používá pro destrukci betonových a železobetonových konstrukcí, nebo pro oddělení betonu od armatury. Práce je možné provádět i uvnitř budov, nebo v blízkosti inženýrských sítí jako je plynovod, vodovod apod. Používají se i ve speleologii k zpřístupňování jeskyní, kde je výhodou šetrnost k výzdobě jeskyní.

Před samotným rozpojováním si musíme uvědomit, jak chceme požadovanou horninu rozpojit a jak s ní budeme dále nakládat. Jestli ji rozpojíme pouze na velké kusy a dále jen odtěžit, nebo rozdělit na menší kusy a zpracovávat, např. drtit, řezat na bloky apod. Velkých (hrubších) kusů docílíme především časováním v jednom časovém stupni, kde nám hornina zpravidla jen popraská.

4.4. Pracovní postup rozpojování

Před zahájením vrtání odstraníme všechny volné kusy z oblasti rozpojování. Musíme se přesvědčit, zda vrt nebude procházet plochou diskontinuity. Doporučuje se provést zkušební vrt, do kterého nalijeme vodu a zjistíme, zda je horninový masív kompaktní, nebo obsahuje trhliny [11]. V případě výskytu trhlín, může dojít ke ztrátě povýbuchových tlaků ve vývrtnu a hodnota deflagrace bude moc malá, aby horninu rozpojila. Vrtání se provádí klasickými vrtnými kladivy (obr. 23). Nejpoužívanější vrtné schéma je šachovnicové, nebo čtvercové (podle typu rozpojování) a u tunelovacích prací obvykle využíváme sbíhavých zálamu doplněné o příbírkové a obrysové vrty. Doporučený průměr vrtu je uveden v tabulce 1.

PRŮMĚR NÁBOJKY	DOPORUČENÝ PRŮMĚR VRTU
18 mm	20 - 24 mm
28 mm	30 - 34 mm
32 mm	34 - 36 mm
34 mm	36 - 38 mm
60 mm	64 - 70 mm

Tabulka 3: Doporučený průměr vrtu k průměru nábojky [11].



Obr. 23: Ruční vrtání vrtu, pomoci pneumatického kladiva [11].

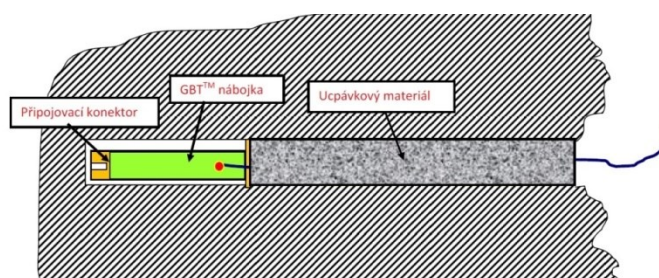
U nabíjení vrtu je důležité dbát na zasunutí nábojky, až na dno vrtu. Je-li to potřeba, spojíme iniciační a zesilovací nábojky do kupy a zasuneme vodícím kroužkem napřed.

Utěsňování vrtu nábojky je velmi důležitá fáze celkového rozpojení a je nutné dbát na kvalitu provedení. Při špatném provedení ucpávky nedojde k vývinu potřebného množství

plynu pro rozpojení horniny a nábojka nevykoná potřebnou práci. Pro utěšňování nábojek GBT se používá tuhý jíl (např. cihlářský jíl), dobře pěchovaný písek nebo kamenná drť frakce 6 – 8 mm, můžeme využít i mechanických ucpávek od firmy GBT. Vodní ucpávka nebo měkká ucpávka je neúčinná! Minimální délka ucpávky se doporučuje jako trojnásobek průměru nábojky a je dobré pěchovat ucpávku po částech dynamickou nabíjecí tyčí znázorněnou na (obr. 24). Pěchování ucpávky je způsobeno pohybem závaží na konci pěchovací tyče, šipky znázorňují směr pohybu závaží, a samotnou tyčí se nepohybuje (tam a zpět) jako u klasického nabíjení.



Obr. 24: Pěchování ucpávky [11]



Obr. 25: Řez vrtu nabitého nábojkou GBT [11].

Nábojky GBT se převážně zapojují do série. Spoje na vodičích důkladně zaizolujeme a po zapojení všech nábojek proměříme ohmmetrem uzavřenost elektrického obvodu (max. měřící proud 1 mA). Při použití elektrického časovacího systému GBTest postupujeme podle návodu na použití doloženého výrobcem.



Obr. 26: Měření elektrického obvodu [11].

Zážeh nábojek můžeme provádět klasickou roznětnicí nebo baterii, můžeme využít výrobky dodávané firmou GBT. Při odpalu se musíme přesvědčit, zda je oblast vyklizena od všech osob, zvířat a poškoditelných zařízení. Doporučený bezpečnostní okruh je 30–50m, záleží na rozmístění vrtů, velikosti a počtu GBT náložek a také na druhu horniny. Po ověření, že bezpečnostní okruh je vyklizen, se před zážehem ohlásí signál odstřelu „pálím“. U technologie GBT nám odpadá čekací doba po odstřelu, z důvodů minimálního vzniku škodlivých zplodin. U 1kg GBT nám vzniká 0,0012 m³ oxidů uhelnatého [11].

5. SROVNÁNÍ METODY Green Break Technology a klasických trhavin

5.1. Rozpojování volně stojících balvanů

Při rozpojování balvanů, nám rozpojení ovlivňuje velikost balvanu a tvrdost horniny. Dále je rozpojení ovlivněno požadavkem, na jak velké kusy chceme balvan rozdělit. Dále si uvedeme pár ověřených příkladů na rozpojení samostatně stojícího balvanu.

Umístíme-li uprostřed balvanu o velikosti 1–2 m³ (z tvrdé horniny) 40g nábojku GBT, dojde k rozpojení na 6–12 kusů. V případě měkké horniny, kdy použijeme stejnou nábojku, dojde k rozpojení na 2–3 kusy. Pokud požadujeme rozpojení balvanů na drobnější kusy, zvolíme trojúhelníkové vrtné schéma, kdy rozteč vrtu se bude pohybovat v rozmezí 600–800 mm [11].

V případě balvanu o velikosti 2–8 m³ z tvrdé horniny použijeme 100 g nábojku umístěnou uprostřed balvanu, a získáme tak až 16 kusů. Bude-li se jednat o měkké horniny, použijeme trojúhelníkové vrtné schéma, kde vrty nabijeme 40–60 g nábojkou. Chceme-li rozpúlit balvan na půl, použijeme jednu 100 g nábojku umístěnou uprostřed balvanu [11].



Obr. 27: Rozpukání skalního masívu [vlastní přínos]

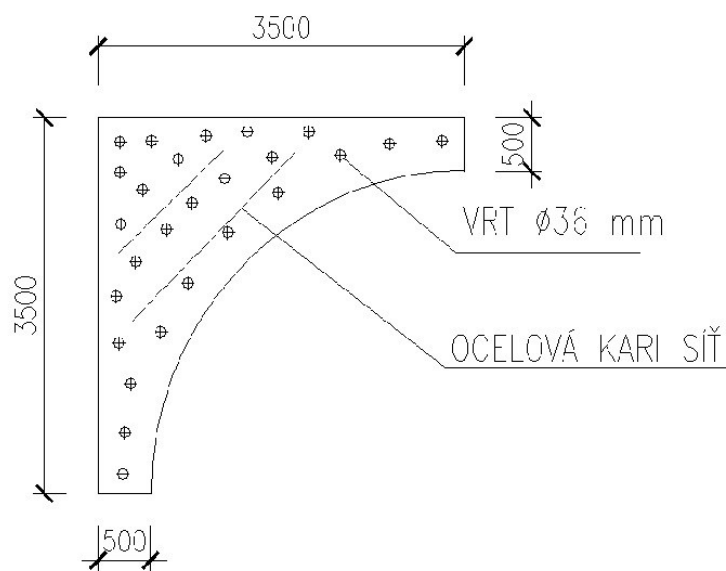
Na obrázku 27 je znázorněno rozpukání měkké horniny, způsobeno devíti nábojkami o hmotnosti 100g. Fotku jsem pořídil při likvidaci skalního sesuvů v Táboře u řeky Lužnice, dne 23. 3. 2013. Nadrozměrný kus horniny technologie GBT rozpukala, ale důsledkem pevnosti a ploch diskontinuity nedošlo k požadovanému odsunutí a následnému sesunutí horniny.

5.2. Rozpojování ŽB konstrukce

Porovnání metod popisují na příkladě železobetonové patky o rozměrech 3,5 x 3,5 m a výšky 3 m, která byla demolována technologií GBT. V tomto případě bylo použito plného destrukčního řezu. Pro prvotní odstřel bylo použito 26 kusů nábojek GBT průměru 34 mm a hmotnosti 100 g. Rozmístění vrtu bylo provedeno dle schématu na obrázku 28.



Obr. 28: Železobetonová patka [11].



Obr. 29 : Vrtné schéma žb patky [vlastní přínos].

Po provedení přípravných prací odstřelu a samotného odstřelu, byl ŽB blok rozpojen na několik kusů a připraven na odklizení. V tomto případě se musel realizovat i druhotný odstřel kusů, které se nepovedlo vlivem upnutí odpojit prvním odstřelem. Výsledek prvního rozpojení je znázorněn na obr. 29.



Obr. 30: Rozpojení ŽB bloku pomocí GBT[11].

Výhodou použití GBT v tomto případě, bylo rychlé provedení přípravy demolice, hlavně z hlediska nepotřebného schválení trhavých prací ČBÚ. Za další výhody můžeme považovat minimální rozlet rozpojeného bloku a neohrožení okolí jámy (staveniště). Na úkor toho je nevýhodou nutnost provedení i druhotného odstřelu a prodloužení času při přípravě, jako je vrtání, nabíjení a ucpávání vrtu.

Pro srovnání s klasickými trhavinami, by v tomto případě bylo zapotřebí 2 kg trhaviny. Hodnotu hmotnosti vypočteme pomocí vzorce [5]:

$$Q = (R^2 + R) \cdot c \cdot t = (1,8^2 + 1,8) \cdot 0,4 \cdot 1 = 2,02 \text{ kg}$$

Kde:

- Q hmotnost nálože [kg],
- R zabírka [m],
- c součinitel charakterizující rozpojovaný materiál, pro ŽB roven 0,4 [-],
- t součinitel materiálu ucpávky, pro jíl roven 1 [-].

Můžeme tedy říct, že poměr hmotnosti nálože mezi trhavinou a hmotnosti nálože GBT se bude rovnat 1:1,3 kg. GBT má díky upnutí bloku nižší účinnost než trhaviny. V některých případech se při rozpojování tvrdých balvanů udává hmotnostní poměr (trhavina:GBT) cca 1:1. Tento poměr platí i pro sloupy z betonu nebo volné betonové bloky.

6. ZÁVĚR

V své práci jsem se zaměřil na rozpojování hornin a demolic objektu klasickými, ale i novými metodami. Součástí práce je úvod a popis rozpojování pomocí výbuchu a prezentace základních faktorů ovlivňujících rozpojování. Snažil jsem se stručně popsat rozsah použití klasických trhavin a porovnat jejich účinky s novou metodou.

Hlavním přínosem bakalářské práce je prezentace a popis nové technologie Green Break Technology. Zaměření práce je zejména na manipulaci a použití expanzních nábojek a jejich možností použití v praxi. Prozatím hlavní výhody této technologie se projevují u demolic objektů, rozpojování nadrozměrných kusů horniny. Do budoucna se snad technologie začne uplatňovat i více při ražení podzemních děl. Oproti klasickým trhavinám vyniká z hlediska malých seismických účinků, malého rozletu kusu horniny, nízkého obsahu toxických povýbuchových zplodin a navíc pro manipulaci s nimi není navíc nezbytné povolení ČBÚ. Nevýhodou expanzního rozpojování je např. použití v měkkých materiálech, kde nedojde k požadovanému efektu rozpojení. Příkladem může být například likvidace skalního sesuvů tvořeného měkkými slídovými horninami, kterému jsem mohl osobně přihlížet. Nadrozměrný kus horniny technologie GBT rozpukala, ale nedošlo k požadovanému odsunutí a následnému sesunutí horniny. Jedná se o výrobek, který sám o sobě nemůže při bezpečné manipulaci člověku, ani životnímu prostředí nijak ublížit.

Rozpojování hornin, nebo demolic objektů pomocí GBT má podle mého názoru velkou budoucnost. Samozřejmě nemůže úplně vytlačit klasické trhavinu z trhu, ale do jisté míry může trhavinu v určitých případech nahradit. Lze předpokládat, že technologie se bude dále vyvíjet, modernizovat své parametry a tím přinášet nové možnosti do bezpečného rozpojování hornin a demolic.

7. SEZNAM LITERATURY

- [1] Celjak, I.: *Stroje pro zemní a lesní práce*, České Budějovice: Zemědělská fakulta, 2004.
- [2] Dojčar, O., Horký, J., Kořínek, R.: *Trhacia technika*, Ostrava: Vydavatelství MONTANEX, a. s., 1996.
- [3] Horký, J., Exner, K.: *Trhací práce a ražení důlních děl*, Ostrava: Vydala Vysoká Škola Báňská Ostrava, 1990.
- [4] Pravda, V., Běťík, J.: *Trhací práce v hornictví, stavebnictví a speleologii*, Vydavatelství Montanika, 2010.
- [5] Münchner, E. a kol.: *Průručka pre strelmajstrov a technických vedúcich odstrelou*, Vydavatelství Slovanská spoločnosť pre trhacie a vrtacie práce v Banskej Bystrici, 2000.

Internetové zdroje (odkazy):

- [6] Klasifikace těžitelnosti hornin [online]. [cit. 2012-12-6]. Dostupné z: <http://geologie.vsb.cz/>.
- [7] Rozpojování hornin řeznými nástroji razicích strojů [online]. [cit. 2012-11-23]. Dostupné z: <http://www.ita-aites.cz/files/tunel/2005/1/cast8.pdf>.
- [8] Typy vrtných nástrojů [online]. [cit. 2012-11-23]. Dostupné z: <http://departments.fsv.cvut.cz/k135/wwwold/webkurzy/ig/ig-web/sondy.html>.
- [9] Sbíhavé zálomy [online]. [cit. 2012-12-21]. Dostupné z: <http://www.hornictvi.info/prirucka/razba/odstrely.htm>.
- [10] Aplikace Nové Rakouské Tunelovací metody na stavbě [Online]. [cit. 2013-02-15]. Dostupné z: http://www.ita-aites.cz/files/edice_CTuK/ctuk_02.pdf.
- [11] Green Break Technology [Online]. [cit. 2013-03-01]. Dostupné z: <http://greenbreaktechnology.cz/index.php>.

8. SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obr. 1: *Porušení horninového prostředí způsobené výbuchem nálože* [3].
- Obr. 2: *Mechanismus rozpojení horniny výbuchem v blízkosti volné plochy* [2].
- Obr. 3: *Hrot pro rozpojování hornin* [7].
- Obr. 4: *Ukázka vrtných nástrojů* [8].
- Obr. 5: *Horninová výtrž po výbuchu nálože* [2].
- Obr. 6: *Rozmístění vrtů při ražení důlních děl* [2].
- Obr. 7: *Typy vrtů v povrchovém dobývání* [2].
- Obr. 8: *vliv časování na rozlet a kusovitost horniny* [4].
- Obr. 9: *Typy zálomů* [2].
- Obr. 10: *Sbíhavý zálom - klínový* [9].
- Obr. 11: *Sbíhavý zálom – Vějířový* [9].
- Obr. 12: *Přímé zálomy – tříštivé (kanadské)* [2].
- Obr. 13: *Přímé zálomy – uvolňovací (válcové)* [2].
- Obr1 14: *Přechodný zálom – stupňovitý* [2].
- Obr. 15: *Horizontální dělení výrubu, čísla označují pořadí provádění výrubu* [10].
- Obr. 16: *Vertikální dělení výrubu, čísla označují pořadí provádění výrubu* [10].
- Obr. 17: *Rozmístění náloži při demolici komínu* [4].
- Obr. 18: *Oblast podrcení horniny* [11].
- Obr. 19: *Napojení zesilovací nábojky na iniciační* [11].
- Obr. 20: *Iniciační a zesilovací nábojky* [11].
- Obr. 21: *Samosvorný mechanismus Autostem* [11].
- Obr. 22: *Nábojky Autostem* [11].
- Obr. 23: *Ruční vrtání vrtu, pomoci pneumatického kladiva* [11].
- Obr. 24: *Pěchování ucpávky* [11].
- Obr. 25: *Řez vrtu nabitého nábojkou GBT* [11].
- Obr. 26: *Měření elektrického obvodu* [11].
- Obr. 27: *Rozpukání skalního masívu [vlastní přínos, pořízeno dne 23. 3. 2013 v Táboře].*
- Obr. 28: *Železobetonová patka* [11].
- Obr. 29 : *Vrtné schéma žb patky [vlastní přínos].*
- Obr. 30: *Rozpojení ŽB bloku pomoci GBT[11].*

9. SEZNAM TABULEK A GRAFŮ

Tabulka 1: *Parametry nábojek GBT*

Tabulka 2: *Složení deflagračních zplodin GBT*

Tabulka 3: *Doporučený průměr vrtu k průměru nábojky [11].*

Graf 1: *Závislost detonační rychlosti a průměru nálože [3].*

Graf 2: *Průběh tlaků v závislosti na čase [11].*

10. PŘÍLOHY

Příloha 1: *Základní charakteristiky hornin[2]*

Hornina	Objemová hmotnost ($t \cdot m^{-3}$)	Rychlost pozdížnej vlny c_p ($km \cdot s^{-1}$)	Akustická impedancia A_h ($10^6 \text{ kg} \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)	Pevnost v tlaku σ_u (MPa)	Pevnost v tahu σ_t (MPa)	Pevnost v strihu σ_{str} (MPa)	Modul pružnosti E (10^4 (MPa))	Poissonovo číslo μ
Žuly	2,6 ÷ 2,8	4,3 ÷ 6,8	11 ÷ 19	100 ÷ 250	10 ÷ 20	18 ÷ 113	5 ÷ 9	0,1 ÷ 0,37
Čadiče	2,7 ÷ 2,86	5,4 ÷ 7,0	14,6 ÷ 20	300 ÷ 400	–	–	7 ÷ 12	0,2 ÷ 0,3
Diabázy	2,5 ÷ 3,05	6 ÷ 7,5	15 ÷ 23	160 ÷ 260	10 ÷ 20	18 ÷ 23	9 ÷ 14	0,2 ÷ 0,32
Gabrá	2,85 ÷ 3,1	5,4 ÷ 6,3	16,4 ÷ 21	150 ÷ 310	14 ÷ 23	20 ÷ 25	7 ÷ 11	0,2 ÷ 0,3
Andezity	2,7	5,5 ÷ 5,8	15	200	9	34	3,4	0,3
Syenity	2,6 ÷ 2,8	1,8 ÷ 4,5	4,7 ÷ 12	50 ÷ 80	4 ÷ 15	4 ÷ 6	1 ÷ 5,5	0,1 ÷ 0,26
Vápence	2,3 ÷ 3,0	3,0 ÷ 5,5	7,3 ÷ 16,5	50 ÷ 160	2,5 ÷ 15	10 ÷ 35	0,8 ÷ 5	0,2 ÷ 0,33
Dolomity	2,5 ÷ 3,1	3,1 ÷ 6,7	9,6 ÷ 18,8	90 ÷ 120	20 ÷ 40	–	1,4 ÷ 10	0,2 ÷ 0,4
Pieskovce	2,1 ÷ 2,9	3,0 ÷ 4,6	6,3 ÷ 13,6	35 ÷ 150	2 ÷ 10	–	1,7 ÷ 5,0	0,2 ÷ 0,45
Bridlice	2,3 ÷ 2,7	2,5 ÷ 6,9	5,8 ÷ 17	40 ÷ 170	4 ÷ 25	7 ÷ 30	0,7 ÷ 10,2	0,15 ÷ 0,26
Ruly	2,64 ÷ 2,93	4,7 ÷ 6,4	12,4 ÷ 17,4	110 ÷ 280	6 ÷ 20	18 ÷ 42	4,6 ÷ 8,4	0,11 ÷ 0,4
Mramory	2,7 ÷ 2,88	4,3 ÷ 5,9	11,7 ÷ 17	60 ÷ 190	6 ÷ 21	24 ÷ 25	5 ÷ 9	0,25 ÷ 0,4
Kremeň	2,65 ÷ 2,66	4,9 ÷ 6,7	13 ÷ 17,8	290 ÷ 300	10 ÷ 15	–	4 ÷ 10	0,07 ÷ 0,28
Kremence	2,65 ÷ 2,9	3,6 ÷ 6,5	9,8 ÷ 18,9	120 ÷ 300	6 ÷ 15	–	3,6 ÷ 10	0,17 ÷ 0,10
Diabázový porfýrit	2,91	7,14	20,8	258	–	25	10,5	0,32
Kremítý porfýrit	2,63	5,1	13,4	335,5	38,5	68	6,97	0,21
Porfýrit	2,93	6,41	18,8	160	20	–	8,85	0,31
Rohovec	2,59	6,15	15,9	237	4,8	37,5	4,38	0,28
Magnezit	2,95 ÷ 2,99	7,0 ÷ 7,4	21 ÷ 22	98 ÷ 143	3 ÷ 7	80 ÷ 113	12 ÷ 13	0,2 ÷ 0,25
Dolomit	2,79 ÷ 2,89	7,0 ÷ 7,2	19 ÷ 21	137 ÷ 171	4 ÷ 12	65 ÷ 81	11 ÷ 12	0,22 ÷ 0,27
Siderit	–	–	–	–	–	–	–	–
– hrubozr.	3,78	–	–	150 ÷ 160	5 ÷ 6	–	–	–
Siderit	–	–	–	–	–	–	–	–
– jemnozr.	3,65	–	–	177 ÷ 197	9 ÷ 11	–	5 ÷ 8	0,20

Příloha 2: *Závislost volných ploch a měrná spotřeba trhaviny [2]:*

Počet volných ploch	Relativní měrná spotřeba trhaviny pro nálož	
	soustředěnou	táhlou
1	1,00	1,00
2	0,50	0,60
3	0,30	0,40
4	0,20	0,24
5	0,16	0,20
6	0,14	0,17
Při ohraničené šířce volné plochy	1,3 až 1,7	1,3 až 1,8
V patě svislé stěny	až 2,0	2,0 až 2,7