

**UNIVERZITA PALACKÉHO V OLOMOUCI**

Přírodovědecká fakulta

Katedra anorganické chemie



## **VÝBUŠNINY VE VÝUCE NA STŘEDNÍCH ŠKOLÁCH**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

Autor:	Pavel Lasák
Studijní program:	B1407 Chemie
Studijní obor:	Chemie pro víceoborové studium – Biologie
Forma studia:	Prezenční
Vedoucí práce:	doc. RNDr. Michal Čajan Ph.D.

Olomouc 2014

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Výbušniny ve výuce na středních školách“ vypracoval samostatně a veškeré použité prameny jsem uvedl v seznamu literatury.

Souhlasím s tím, že je práce prezenčně zpřístupněna na katedře anorganické chemie Přírodovědecké fakulty Univerzity Palackého v Olomouci.

V Olomouci dne .....

.....

Pavel Lasák

Děkuji doc. RNDr. Michalu Čajanovi, Ph.D. za odborné vedení a věcné připomínky, které mi pomohly ve vypracování této bakalářské práce.

Dále děkuji prof. RNDr. Jiřímu Kameníčkoví, CSc. za cenné rady v oblasti chemických experimentů.

Děkuji také doc. RNDr. Martě Klečkové, CSc. za konzultace v oblasti didaktiky a chemických pokusů a za pomoc při výběru středoškolských učebnic.

## Bibliografická identifikace

Jméno a příjmení:	Pavel Lasák
Název práce:	Výbušniny ve výuce na středních školách
Typ práce:	Bakalářská práce
Pracoviště:	Katedra anorganické chemie
Vedoucí práce:	doc. RNDr. Michal Čajan, Ph.D.
Rok obhajoby práce	2014

### Abstrakt:

Hlavním cílem práce bylo vytvoření výukového modulu pojednávajícího o výbušninách, který by byl použitelný ve výuce chemie na středních školách, a doprovodného textu k tomuto modulu. Samotný výukový modul je tvořen powerpointovou prezentací a návody k přípravě vybraných experimentů.

Doprovodný text k tomuto modulu se krátce zabývá historií výbušnin a nastiňuje základní poznatky týkající se obecných vlastností výbušnin a výbušné přeměny. Dále charakterizuje vybrané zástupce z řad výbušnin z hlediska přípravy, vlastností a použití. V závěru pojednává o výrobě výbušnin, konkrétně o nitraci a syntéze oktanitrokubanu.

Jako podklad k tomuto textu a výukovému modulu byla vypracována analýza středoškolských učebnic chemie z hlediska tématu a bylo provedeno dotazníkové šetření, které bylo adresované středoškolským učitelům chemie.

Z didaktického hlediska by měla práce pomoci učitelům k srozumitelnějšímu a poutavějšímu výkladu problematiky, žákům k lepšímu pochopení přeměn některých látek a zapamatování si základních poznatků o výbušninách.

Klíčová slova:	výbušniny, výbuch, detonace, nitrace
Počet stran:	85
Počet příloh:	2
Jazyk:	Český

## Bibliographical identification

Autor's first name

and surname: Pavel Lasák

Title: Explosives in chemistry education at secondary schools

Type of thesis: Bachelor

Department: Department of Inorganic Chemistry

Supervisor: doc. RNDr. Michal Čajan, Ph.D.

Thesis defence year: 2014

Abstract:

The main goal of this thesis is to create an educational module concerning explosives that would be usable for secondary school chemistry education, as well as a support material for this module. The actual educational module consists of PowerPoint presentation and instructions for preparation of selected experiments.

The support material for this module briefly covers history of explosives and outlines the basic knowledge concerning the general properties of explosives and explosive transformation. It further describes selected representatives of explosives in terms of preparation, properties and uses. In conclusion, this part of the work discusses the manufacture of explosives, specifically the nitration and synthesis of octanitrocubane.

As a basis for this support material and the educational module, an analysis of secondary school chemistry textbooks regarding the main topic of the thesis was made and a questionnaire survey, which was addressed to secondary school chemistry teachers, was carried out.

From the didactic point of view, this work should give to teachers materials for clear and attractive explanation of the title topics, and help students their better understanding.

Keywords: explosives, explosion, detonation, nitration

Number of pages: 85

Number of appendices: 2

Language: Czech

# Obsah

1. Úvod.....	8
2. Teoretická část .....	10
2.1 Historie výbušnin .....	10
2.2 Výbušnina a výbuch .....	12
2.2.1 Typy výbušné přeměny.....	13
2.2.2 Účinky exploze .....	15
2.2.3 Vlastnosti výbušnin .....	16
2.3 Klasifikace výbušnin .....	18
2.3.1 Třaskaviny .....	18
2.3.2 Střeliviny.....	28
2.3.3 Pyrotechnické slože .....	31
2.3.4 Trhaviny.....	35
2.4 Výroba výbušnin .....	45
2.4.1 Nitrace.....	45
2.4.2 Pokročilejší metody syntézy výbušnin .....	47
3. Praktická část .....	54
3.1 Analýza středoškolských učebnic chemie.....	54
3.1.1 Českojazyčná literatura.....	54
3.1.2 Cizojazyčná literatura .....	59
3.2 Dotazníkové šetření.....	60
3.3 Shrnutí informací získaných analýzou učebnic a dotazníkovým šetřením .....	68
3.4 Výukový modul.....	69
3.4.1 Prezentace .....	69

3.4.2 Návody na přípravu experimentů .....	71
3.4.2.1 Acetylid stříbrný .....	72
3.4.2.2 Azid olovnatý .....	72
3.4.2.3 Bengálské ohně .....	73
3.4.2.4 Černý prach .....	73
3.4.2.5. Dýmavnice .....	74
3.4.2.6 Flash směsi .....	74
3.4.2.7 Jododusík .....	75
3.4.2.8 Nitrocelulóza .....	76
3.4.2.9. Peklo ve zkumavce .....	76
3.4.2.10 Termit .....	77
4. Závěr .....	78
5. Seznam použité literatury .....	80
6. Přílohy .....	85

# 1. Úvod

Přesto, že je přínos výbušnin, zejména pro průmysl (těžba, stavebnictví, ...), nesporný a výbušniny zde hrají mnohdy nezastupitelnou roli, setkáváme se dnes, pravděpodobně především v důsledku nárůstu terorismu, spíše s opačným vnímáním. Tento jednostranně zatížený a dnes i patrně převažující pohled může vést některé pedagogy k záměrnému přehlížení této problematiky, která však do hodin chemie nepochybně patří. Proto by bylo lépe toto téma spíše neopomíjet a studenty s ním konfrontovat. Na jedné straně je nezbytné zdůraznit pozitivní dopad, který výbušniny pro společnost mají, na straně druhé také upozornit na možná rizika a stinné stránky s tím spojené. Osvěta v této oblasti by tak nejen že mohla působit jako prevence proti neuváženému chování studentů (dostupnost návodů k přípravě výbušnin na internetu), ale také by mohla zvýšit jejich motivaci a zájem o chemii.

Hlavním důvodem pro volbu tohoto tématu byla snaha dovědět se něco více o problematice, která by se dala využít v mé budoucí pedagogické praxi. Věřím, že právě využití poznatků a efektních pokusů z oblasti výbušnin by pro studenty mohlo být tím pravým zpestřením hodin chemie, a pro některé z nich dokonce částečnou motivací, proč se v budoucnu ubírat cestou přírodních věd. Problematiku jsem také vnímal jako výzvu skloubit něco, co se na první pohled zdánlivě vylučuje. Na jedné straně bylo nezbytné zahrnout skutečnosti, které jsou od výbušnin ze své podstaty neoddelitelné (např. přípravy nebezpečných třaskavin), na straně druhé nesmí být porušován zákon (obecné ohrožení, navádění k trestné činnosti, např. nedovolenému ozbrojování, atd.). Udržet tyto protichůdné tendence v rovnováze nebylo vždy jednoduché.

Ústředním cílem bakalářské práce bylo sestavení výukového modulu věnovanému základním poznatkům z oblasti historie, přípravy, vlastností a použití výbušnin, který by byl použitelný ve výuce chemie na středních školách. K tomu, aby odpovídal současné vzdělávací strategii, byla provedena analýza vybraných středoškolských učebnic chemie. Ke zkvalitnění výukového modulu vedlo také dotazníkové šetření adresované učitelům chemie působících na gymnáziích. Samotný výukový modul pak sestává z návodů na experimenty, které by se daly zařadit do hodin chemie, a výukové prezentace, která se opírá o teoretickou část. Analýza učebnic, dotazníkové šetření, výuková prezentace a návody k vybraným experimentům jsou součástí praktické části.



Úvod teoretické části je věnován stručné historii výbušnin od objevení ledku, přes objev střelného prachu a význam průmyslové revoluce, až po současnost. Následuje vymezení pojmů výbušnina a výbuch, popis pyrotechnických vlastností výbušnin a důsledků výbušné přeměny. Dále jsou výbušniny rozčleněny do čtyř hlavních skupin na třaskaviny, střeliviny, pyrotechnické slože a trhaviny. Toto dělení bylo vybráno z praktických důvodů. Zástupci zmíněných skupin mají totiž často podobný chemizmus, což umožňuje začlenění skupiny nebo její části do výkladu takovým způsobem, aby to odpovídalo právě probíranému tématu a nenarušovalo tak jeho plynulost. Je představeno hlavní poslání těchto skupin a uveden jejich částečný fyzikálně – chemický popis. Uvedeni jsou také hlavní zástupci těchto skupin, kteří jsou blíže charakterizováni z hlediska vlastností nebo využití. U většiny zástupců nechybí chemická rovnice nebo reakční schéma. U zástupců, jejichž syntéza je složitá nebo nejsou tolik významní, jsou uvedeny pouze strukturní vzorce. Závěr teoretické části je věnován výrobě výbušnin, konkrétně nitraci a syntéze oktanitrokubanu, na které je vysvětleno několik základních nebo mírně pokročilých reakcí organické chemie.

## 2. Teoretická část

První kapitola teoretické části je věnována historii výbušnin. Další kapitola se věnuje charakterizaci výbušniny a popisu výbušné přeměny. Nejobsáhlejší část se zaměřuje na klasifikaci výbušnin. Poslední kapitola pojednává o výrobě výbušnin, konkrétně o nitraci a syntéze oktanitrokubanu.

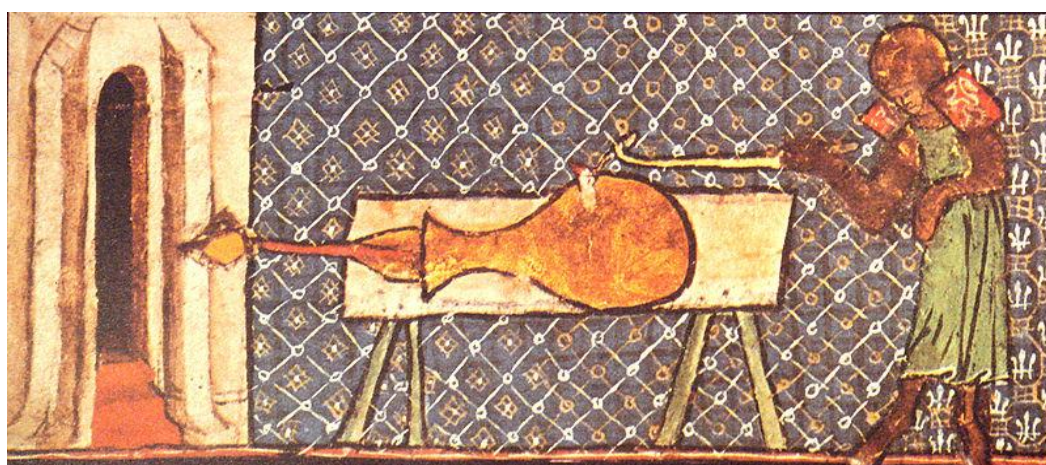
### 2.1 Historie výbušnin

Cesta k prvním výbušninám započala objevem ledku na přelomu 3. a 4. století ve starověké Číně (Obrázek 1). Do Evropy se znalost ledku dostala až mnohem později. Někteří historikové se domnívají, že ledek mohl být součástí Řeckého ohně, který poprvé použili Byzantinci roku 678 na obranu Araby obléhané Konstantinopole. Překlady dobových rukopisů pojednávajících o složení Řeckého ohně nedávají ohledně přítomnosti ledku jasnou odpověď, avšak popisy bitev, dobové ilustrace a způsoby použití, například prostřednictvím primitivních plamenometů - sifonů, a chování Řeckého ohně, např. vznícení při kontaktu z vodou (pravděpodobně iniciace CaO) dávají za pravdu spíše druhé, převažující, skupině historiků, která se domnívá, že šlo pouze o zápalnou směs a ledek se tak do Evropy dostal až s nájezdy Mongolů v první polovině 13. století. Ledeck se tak stal na dlouhou dobu nezbytnou součástí výbušných směsí, které lze z kvalitativního hlediska označit za střelné prachy. /1, 2/



Obrázek 1: První vyobrazení granátu a palné zbraně, Čína, 10. století.

Vůbec první zmínka na Evropském kontinentu o střelném prachu je zaznamenána v díle *Opus Majus* (1240-1242), které sepsal anglický františkánský mnich Roger Bacon. Jeho návod na přípravu střelného prachu však obsahoval jen 41 % dusičnanu, což není dostatečné množství pro to, aby takto připravený prach explodoval. Z tohoto důvodu se jako objevitel střelného prachu někdy uvádí německý dominikán Albert Veliký, jehož receptura obsahovala 67 % draselného ledku. Poprvé byl Evropany pravděpodobně použit v průběhu 7. křížové výpravy (1248 – 1254) proti Saracénům v Egyptě ještě ve formě náloží vrhaných katapulty. První vyobrazení děla se vztahuje k roku 1326 (Obrázek 2), první použití děla se vztahuje až k bitvě u Kresčaku (1346). Již v té době se vědělo, že černý střelný prach lze užit také jako trhaviny, ale v důsledku poměrně složité výroby, která byla navíc realizována podomácku, se jeho využití touto cestou jevílo jako ekonomicky neefektivní. Až v 15. století se začala výroba přesouvat do dílen, ze kterých postupně vznikaly první továrny. Tak se tato jediná výbušnina stávala dostupnější a dočkala se využití i v civilním sektoru. Roku 1627 byla Kašparem Weindlem poprvé užitá k trhacím pracím (Slovensko), a tento způsob těžby se brzy rozšířil na naše území a odtud do celé Evropy. Problémem však i nadále zůstávalo získávání a purifikace ledku. Ten se získával například extrakcí z půd bohatých na organický materiál a následným odpařením vody. V 17. století byl v Anglii dokonce udělen patent na výrobu ledku z moče. Zlom přišel až koncem 18. století, kdy český botanik Tadeáš Haenke, na svých cestách po Jižní Americe, objevil vydatný zdroj dusičnanů v tzv. chilském ledku a ve Francii byla zavedena nová výroba kyseliny dusičné, oxidací amoniaku na oxidu manganičitém. /1, 3, 4, 5/



**Obrázek 2:** První vyobrazení děla, Anglie, 1326.

Výroba černého střelného prachu tak stoupala přibližně až do poloviny 19. století. Roku 1832 totiž učinil francouzský chemik Henri Braconnot objev, který určil nový směr ve vývoji výbušnin. V tomto roce připravil nitrocelulózu (xyloidin). Tato látka postupně nahradila černý střelný prach jednak díky vyšší brizanci, ale hlavně díky tomu, že při explozi neuvolňovala hustý černý dým, který znesnadňoval orientaci na bojišti. O 15 let později připravil italský chemik Ascanio Sobrero nitroglycerin (1,2,3-trinitroxypropan), který pro svou výraznou citlivost na náraz nenašel širší uplatnění. V roce 1866 však jeho spolužák Alfred Nobel smísil nitroglycerin s křemelinou, vzniklou plastickou hmotu ještě doplnil o vůbec první rozbušku z třaskavé rtuti, a dal tak vzniknout dynamitu. Později nahradil křemelinu nitrocelulózou, aby se zvýšila jeho stabilita. /1, 3, 4, 6/

Rozmach na poli nitroaromatických látek souvisí s rozvojem průmyslu organických barviv. Roku 1834 byl právě v rámci vývoje syntetických barviv izolován z kamenouhelného dehtu anilin, který se stal základní látkou jak pro výrobu barviv, tak i výbušnin. V roce 1873 byly objeveny explozivní vlastnosti kyseliny pikrové, která byla pro svou nižší stabilitu postupně nahrazena trinitrotoluenem. Důležitým milníkem bylo zavedení Haber-Boschovy metody syntézy amoniaku (1913), která umožnila využít prakticky nevyčerpatelný zdroj dusíku a vodíku pro výrobu amoniaku, a tedy i kyseliny dusičné. /1, 7/

Význam výbušnin vedl k jejich intenzivnímu studiu i ve 20. století. Objasnění detonačních jevů rozšířilo oblast jejich praktického využití. Byl objeven nespočet dalších látek, jako je např. pentrit, hexogen nebo tetryl, které si našly své uplatnění. Dnes se používají především směsi, jejichž výhodou je možnost upravovat jejich kvalitativní a kvantitativní složení, a tak dosáhnout požadovaných vlastností výbušnin.

## **2.2 Výbušnina a výbuch**

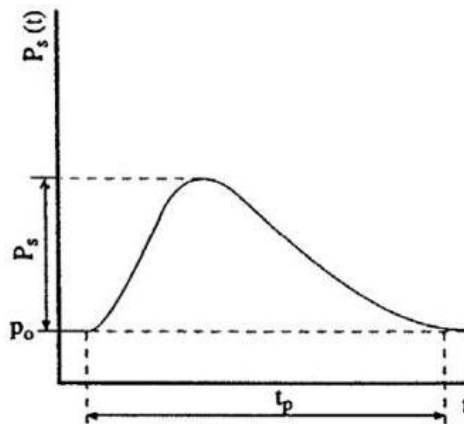
Výbuch je nevratný, fyzikální nebo fyzikálně-chemický děj spojený s uvolněním značného množství energie ve velmi krátkém čase. K fyzikálnímu (mechanickému) výbuchu dochází, pokud tenze plynů uvnitř dané nádoby překročí pevnost v tlaku pro materiál, ze kterého je nádoba vyrobena. Expandující plyny obal nádoby protrhnou a dochází k jejich prudkému přechodu do oblasti s nižším tlakem, tedy do okolí. Vzniká tlaková vlna, která je příčinou hlasitého zvukového efektu. Pro představu lze uvést přetlakování pneumatiky nebo zahřívání vody v tlakovém hrnci s ucpaným ventilem. Příčinou fyzikálního výbuchu je tedy tlaková potenciální energie. /8, 9, 10/

Příčinou fyzikálně-chemického výbuchu je však energie uvolněná chemickou reakcí systému, energie chemických vazeb. Při této exotermické reakci dochází v krátkém časovém intervalu k uvolnění velkého objemu plynů, které, stejně jako u fyzikálního výbuchu, stlačí okolní prostředí a vytvoří tlakovou vlnu se všemi doprovodnými atributy. Kromě plynů se uvolňuje také podstatné množství energie ve formě tepla. Důsledkem vysoké teploty je nárůst objemu plynných zplodin, které tímto mohou vyvinout na okolní prostředí ještě větší tlak, než jakým by mohly působit při teplotách nižších. /9, 10/

Jelikož se vlastně jedná o velice rychlý spalovací proces, je potřeba, aby se reakce účastnila oxidační složka (nemusí se jednat vždy o kyslík). Reakce je ale natolik prudká, že by pouhý kontakt z okolím, které oxidační složku obsahuje, nemohl postačovat k dostatečně rychlému rozkladu. Proto musí všechny výbušniny ve svých příměsích takovou složku již obsahovat, případně molekuly samotné musí být této redoxní konverze schopny. Tak lze vysvětlit, že k výbuchu dochází nezávisle na chemickém složení okolního prostředí. Typicky bez přímého kontaktu reakčního systému s okolní atmosférou, například pod vodní hladinou nebo ve vakuu. Výbušniny lze definovat právě jako ty látky nebo směsi, které jsou po vhodné iniciaci schopné, nezávisle na chemickém složení svého okolí, fyzikálně-chemického výbuchu za současné přeměny na stabilnější produkty, uvolnění tepla a vykonání práce. Proto bude dále pracováno jen s tímto druhem výbuchu. /8, 9, 10/

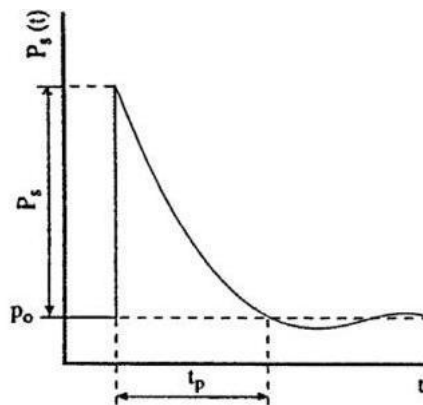
### **2.2.1 Typy výbušné přeměny**

Rozeznáváme dva základní typy výbušné přeměny – *explozivní hoření* a *detonaci*. Při explozivním hoření se reakce šíří postupně, od vrstvy k vrstvě, přičemž teplo uvolněné reakcí v předchozí vrstvě iniciuje reakci ve vrstvě následující. Rychlost zvuku je ve vznikajících zplodinách vždy vyšší, než rychlost reakce, která nepřesahuje hranici 1000 m/s. Tato rychlost podstatně závisí na tom, jestli k reakci dochází v otevřeném nebo uzavřeném prostoru. Tlak dosahuje řádu maximálně několika MPa a jeho nárůst je vždy pozvolný (Obrázek 3). Zejména v otevřených prostorech, tzn. při použití výbušniny bez obalu, má tlaková vlna jen minimální destruktivní účinky. /9, 10/



**Obrázek 3:** Graf závislosti tlaku na čase pro explozivní hoření ( $P_o$  – tlak okolního prostředí,  $P_s$  – rozdíl mezi maximálním tlakem a  $P_o$ ,  $t_p$  – doba trvání pozitivní tlakové fáze).

Detonace se šíří rázovou (detonační) vlnou, jejíž rychlost je vyšší než rychlost zvuku ve vznikajících zplodinách za daných stavových podmínek. Řádově se jedná o 1000 m/s až 10000 m/s. Rázová vlna postupně ztrácí energii a přechází ve vlnu akustickou. Nárůst tlaku, který může dosáhnout až několika GPa, je okamžitý, vzniká tzv. tlaková diskontinuita (Obrázek 4). Rychlost detonace prakticky nezávisí na tlaku okolí jako je tomu u explozivního hoření. /8, 9, 10/



**Obrázek 4:** Graf závislosti tlaku na čase pro detonaci ( $P_o$  – tlak okolního prostředí,  $P_s$  – rozdíl mezi maximálním tlakem a  $P_o$ ,  $t_p$  – doba trvání pozitivní tlakové fáze).



## 2.2.2 Účinky exploze

Účinky exploze můžeme dělit na účinky primární a sekundární. Mezi primární účinky řadíme obvykle tlakovou vlnu, vysokou teplotu a fragmentaci, mezi sekundární můžeme zařadit zvukový efekt, seismický a kumulativní účinek nebo vznik požáru. /11/

*Tlaková vlna* (Obrázek 5) vzniká v ohnisku výbuchu a šíří se přibližně v kulových, respektive polokulových (při limitaci prostředím – pozemní výbuch) vlnoplochách. Princip šíření spočívá v tom, že svrchní vrstva silně stlačených plynů (čelo tlakové vlny) prudce narazí do sousedních molekul, tím je stlačí, a sama tak může expandovat. Celý proces se opakuje tak dlouho, dokud je k dispozici dostatek energie pro další kompresi. Tato fáze se nazývá pozitivní tlaková fáze. Rozpínáním plynů od ohniska výbuchu vzniká v epicentru částečné vakuum. Po ukončení pozitivní tlakové fáze se okolní prostředí snaží toto vakuum zaplnit a dochází k tzv. negativní tlakové fázi. Tato fáze trvá cca 3x déle, a nemá tak zničující účinky jako fáze pozitivní. Pod vodní hladinou se v důsledku vyšší hustoty prostředí šíří tlaková vlna na větší vzdálenosti. /8, 11/



**Obrázek 5:** Simulace jaderného výbuchu, detonace 500 tun TNT. Na obloze se vytvořil mrak kondenzovaných plynů, šíření tlakové vlny je viditelné na vodní hladině. Operace Sailor Hat, Havaj, 1965.

*Teplota zplodin* může u některých výbušnin dosáhnout až 5000 °C. Obecně platí, že při vyšší rychlosti reakce je generována také vyšší teplota. Například Semtex 1H má detonační

rychlost 7400 m/s a teplotu výbuchu 3800 °C, zatímco Semtex 10-SE má detonační rychlost 7000 m/s a výbuchovou teplotu 2600 °C. Toto pravidlo má však mnoho výjimek a nemusí platit zdaleka vždy. /11, 12/

Dalším účinkem exploze může být *fragmentace*. Výbušnina uložená v pevném obalu tento obal při explozi roztrhne a umožní rozptyl jednotlivých fragmentů. Na roztržení obalu je, v závislosti na materiálu obalu, spotřebována značná část celkové energie (až polovina). Tato nevýhoda je potlačena zvolením vhodného rýhování obalu, což sníží jeho pevnost v místech zářezů. Výsledné úlomky navíc mají lepší balistické parametry. Toho je využíváno například u vojenských granátů. Fragmentace má společně s tlakovou vlnou nejničivější účinek. /11/

### 2.2.3 Vlastnosti výbušnin

Klíčovými vlastnostmi výbušnin jsou citlivost, stabilita, detonační rychlost, brizance, výkonnost, pracovní schopnost, kyslíková bilance, dolní a horní kritický průměr a další.

*Citlivost* ukazuje na schopnost výbušniny reagovat na vnější podněty. Mechanismus roznětu se však pro různé druhy iniciace liší, proto je poměrně časté, že výbušnina citlivá například k nápichu nebude citlivá k plameni nebo tření. Experimentálně se zjišťuje nejčastěji citlivost k nárazu pomocí tzv. Kastova kladiva. Pro teoretické výpočty je hlavním kritériem zejména kyslíková bilance (platí, že kladná bilance znamená vyšší citlivost a obráceně). Obecně se dá říci, že čím více energie se může při explozi uvolnit, tím vyšší vykazuje výbušnina citlivost. Rovněž přítomnost některých funkčních skupin může mnohé napovědět (přítomnost peroxidické skupiny). Zvyšuje se například přidáním mletého skla, snižuje se přidáním flegmatizátoru, jako je parafín nebo vosk, který krystalky výbušniny obalí. Citlivost se také zvyšuje s rostoucí teplotou, změnou fáze (z pevné na kapalnou), s klesající hustotou nebo stárnutím. Nejvyšší citlivost obecně vykazují třaskaviny. /8, 9, 13/

*Stabilita* výbušniny ukazuje na její schopnost odolávat chemickým změnám v čase. Rozlišujeme chemickou stabilitu, například chování v kyselém nebo bazickém prostředí, odolnost vůči změnám teplot, u směsí snášenlivost složek, a stabilitu fyzikální, jako rozpustnost nebo změny objemu. Pro zvýšení stability se používají stabilizátory, které potlačují samovolný rozklad nebo reagují s produkty rozkladu a tím jej zpomalují. Na



vojenské výbušniny jsou ohledně stability kladeny vyšší nároky, než na výbušniny průmyslové. /8, 9, 13/

*Detonační rychlost* je rychlost rázové vlny šířící se výbušninou. /4, 12/ U výbušnin, jejichž přeměna probíhá explozivním hořením mluvíme o rychlosti hoření. Je snad nejdůležitějším parametrem vojenských trhavin. /6, 9/

*Brizance* je schopnost výbušniny tříštit tělesa nacházející se v blízkosti epicentra výbuchu. Nejvyšší brizanci vykazují třaskaviny. /4, 10/

Ve *výkonnosti* tkví síla výbušnin. Pro představu, v jednom kilogramu benzínu je přibližně tolik energie, jako v deseti kilogramech TNT. Energie TNT se ale uvolní v několika mikrosekundách. Proto například výkon standardní 200 g nálože TNT dosahuje hodnoty 5 GW. Pro srovnání, výkon parní turbíny jaderné elektrárny Temelín činí 1 GW. /6, 14/

*Pracovní schopnost* je dána objemem a tlakem uvolněných plynů. Měření se provádí v tzv. Trauzlově olověném válci, do kterého se umístí malé množství zkoumané výbušniny. Po explozi se měří objem vzniklé dutiny, který se přepočte na pracovní schopnost. Pracovní schopnost je důležitým parametrem průmyslových trhavin. /4, 6/

*Kyslíková bilance* je vyjádření obsahu kyslíku nutného k oxidaci veškerého uhlíku a vodíku ve výbušnině na stabilní produkty ( $\text{CO}_2$  a  $\text{H}_2\text{O}$ ). Existují výbušniny se zápornou, neutrální nebo kladnou kyslíkovou bilancí. Například estery kyseliny dusičné mají obecně vyšší kyslíkovou bilanci než nitrosloučeniny. Z hlediska životního prostředí jsou upřednostňovány výbušniny s neutrální kyslíkovou bilancí. Zpravidla se vyjadřuje pouze pro trhaviny. Obvykle se udává v procentech. /4, 9/

*Dolní kritický průměr* udává minimální průměr nálože, při kterém už je výbušnina (trhavina) schopná detonace bez toho, aniž by hrozilo přerušení šíření detonační vlny a tedy i přerušení výbušné přeměny. Tato přeměna však není při detonaci nálože o dolním kritickém průměru ideální, protože při ní není dosaženo maximální detonační rychlosti. Zvýšení detonační rychlosti je možno dosáhnout dalším zvyšováním průměru nálože. Toto pravidlo však platí jen do určitého bodu. Zvýšením průměru nad určitou mez se už totiž detonační rychlost nemění. Průměr, při jehož překročení již nedochází ke zvyšování detonační rychlosti, nazýváme *horní kritický průměr*. Kritický průměr, jak dolní, tak horní, roste se zvyšující se velikostí částic nebo se zvyšující se hustotou. /15/

*Teplota vzbuchu* je minimální teplota, při níž dochází ke vzbuchu (rychlému exotermickému rozkladu) výbušniny. V praxi se stanovuje tak, že se výbušnina umístěná ve zkumavce zahřívá gradientem 5 °C/min tak dlouho, dokud nevzbuchne, maximálně však do teploty 400 °C. Experiment probíhá v elektrické peci. /16/

K dalším vlastnostem patří například *výbuchová teplota* nebo *výbuchové teplo*.

## **2.3 Klasifikace výbušnin**

Výbušniny můžeme dělit na základě různých kritérií. Pro přehlednost bylo zvoleno dělení do čtyř hlavních skupin podle způsobu použití na třaskaviny, střeliviny, pyrotechnické složky a trhaviny. Klasifikace v těchto skupinách byla přizpůsobena chemické povaze sloučenin nebo způsobu užití.

### **2.3.1 Třaskaviny**

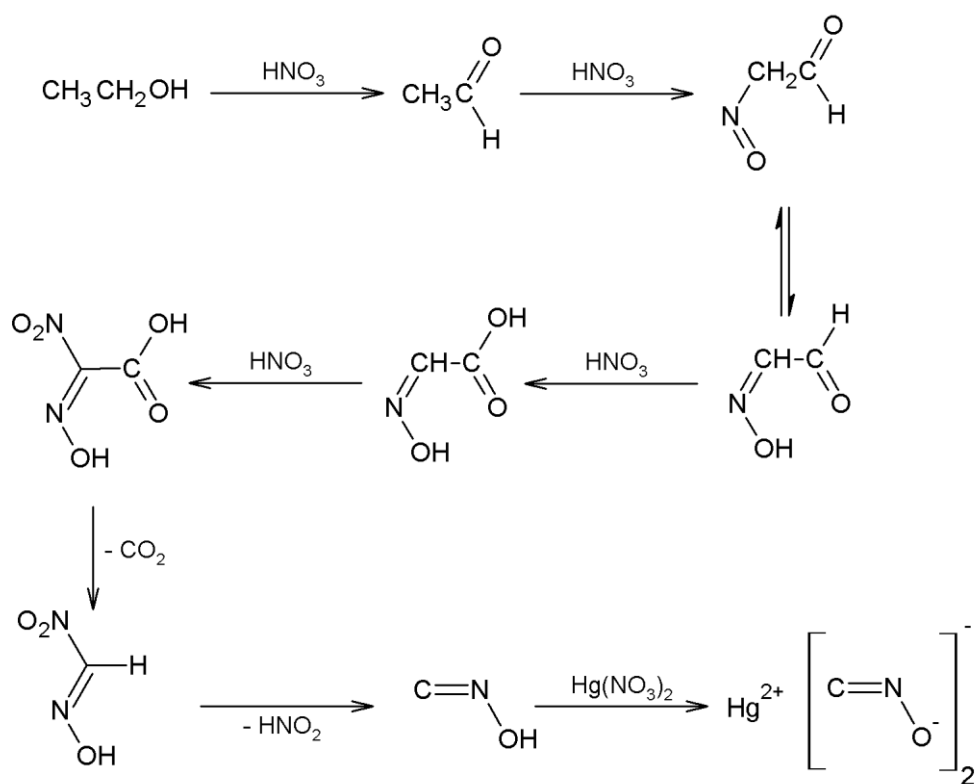
Třaskaviny jsou velice citlivé na jednoduché podněty, ať už mechanické (nápich, tření, náraz) nebo tepelné (elektrický výboj, plamen, jiskra). S tím souvisí i jejich využití. Řadíme je mezi primární výbušniny, protože v naprosté většině případů zahajují proces výbušné přeměny ostatních výbušnin. Jak velké množství třaskaviny je k odpálení dané výbušnině potřeba charakterizuje veličina nazývaná iniciační mohutnost. Třaskaviny mají schopnost ve velmi krátkém čase přejít od výbušného hoření k detonaci. Rychlost tohoto přechodu, tzv. akcelerace výbušné přeměny, předurčuje třaskavinu k jejímu použití. Třaskaviny o nízké akceleraci se používají k zážehu střelivin a pyrotechnických složek (zápalky, roznětky), naopak třaskaviny s vysokou akcelerací se využívají k iniciaci trhavin (rozbušky). Průmyslová výroba je z důvodu jejich citlivosti relativně nebezpečná. Aby se minimalizovalo riziko výbuchu, je nutné dodržovat řadu specifických bezpečnostních opatření, jako je například dokonalé uzemnění výrobních zařízení nebo zvýšení vlhkosti vzduchu (suchý vzduch kumuluje statickou elektřinu) a mnoho dalších. /3, 9/

### ***Fulmináty kovů***

Kyselina fulminová, též třaskavá, sumárním vzorcem HONC, je plynná, silně toxická látka, zápachem připomínající kyanovodík. Praktický význam má jen sůl rtuťnatá. Fulminát stříbrný, kadernatý a měďnatý mají sice silnější iniciační schopnost, ale z důvodu nižší stability se nepoužívají. Připravují se přímým působením příslušného kovu nebo lépe

působením amalgámu kovu na suspenzi fulminátu rtuťnatého ve vodě. Výjimkou je fulminát stříbrný, který se připravuje stejně jako třaskavá rtuť. /17/

*Fulminát rtuťnatý* (TR, třaskavá rtuť) je nejstarší (1832) a nejuniverzálnější třaskavinou. Lze ji použít prakticky do všech typů iniciátorů. Nejčastěji se však používá jako náplň roznětek a zápalek. Vykazuje vysokou citlivost ke tření, nárazu i zážehu. S hliníkem reaguje za vlhka prudce exotermicky, proto se nesmí laborovat do hliníkových pouzder. Vznikající teplo by mohlo vzhledem k nízké teplotě vzbuchu (160 – 190 °C) vyvolat nežádoucí výbuch. Přípravuje se ve dvou krocích. Nejprve se kovová rtuť rozpustí v nadbytku kyseliny dusičné (cca 1:10), poté se přidá menší nadbytek ethanolu a reakce probíhá podle níže uvedeného schématu (Obrázek 6). Mimo ethanolu se dá použít také acetaldehyd, který je jedním z mnoha meziproduktů reakce. Krystalky se vyloučí vlitím reakční směsi do studené vody. Podle použitých surovin, jejich poměrů a reakční teploty vzniká produkt různé barvy (bílá, hnědá, šedá), ale jinak srovnatelných vlastností. Kvůli neblahému dopadu na životní prostředí, korozivním účinkům na hlaveň zbraně a vyšší ceně rtuťi se od jeho použití v současné době ustupuje. /6, 9, 10, 17, 18/

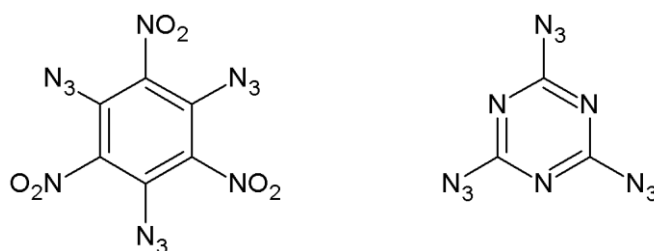


**Obrázek 6:** Reakční schéma druhého kroku přípravy fulminátu rtuťnatého.

## Azidy těžkých kovů

Kyselina azidovodíková  $\text{HN}_3$  je bezbarvá, silně toxická kapalina ostrého zápachu. Připravuje se působením kyseliny dusité nebo jejích esterů na hydrazin či působením kyseliny sírové na azid sodný. Praktický význam má pouze *azid olovnatý*. Ještě lepší vlastnosti vykazuje *azid stříbrný*, který se ale z ekonomických důvodů již v praxi nepoužívá (vysoká cena dusičnanu stříbrného). Obecně vzato, s rostoucím iontovým poloměrem kovu vzrůstá i citlivost těchto solí vůči mechanickým i tepelným podnětům. Připravují se srážecí reakcí dusičnanu příslušného kovu s azidem sodným. /15, 17/

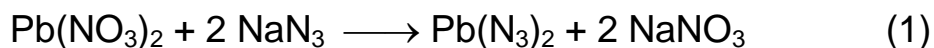
Naprostá většina organických derivátů kyseliny azidovodíkové má rovněž výbušný charakter, ale není termostabilní a je také mimořádně citlivá k mechanickým podnětům. Poněkud nižší citlivost vykazují pouze *trinitrotriazidobenzen* a *kyanurtriazid* (Obrázek 7), ale ani tyto se nehodí k praktickému použití. /17, 19/



**Obrázek 7:** Strukturní vzorce 1,3,5-triazido-2,4,6-trinitrobenzenu a 2,4,6-triazido-1,3,5-triazinu (kyanurtriazid).

*Azid olovnatý* je patrně nejpoužívanější třaskavinou současnosti. Vykazuje ještě vyšší iniciační mohutnost než třaskavá rtuť, čehož se s výhodou využívá pro konstrukci relativně malých, ale výkonných rozbušek. Příčinou vysoké iniciační mohutnosti je vysoká akcelerace výbušné přeměny, která je nejvyšší ze všech používaných třaskavin. Azid olovnatý je výrazně méně citlivý k mechanickým podnětům než třaskavá rtuť, což je vzhledem k povaze většiny třaskavin vlastnost vítaná. Jeho jedinou nevýhodou je nižší citlivost k plameni. Tento nedostatek se řeší nalisováním vrstvičky trinitroresorcinátu olovnatého, který po iniciaci generuje intenzivní plamen. Vyrábí se srážením octanu nebo častěji dusičnanu olovnatého

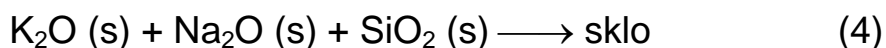
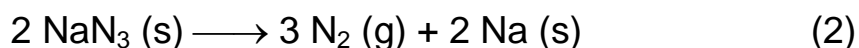
s azidem sodným (Rovnice 1) za přídavku dextransu, který zpomaluje krystalizaci a zajišťuje tvorbu malých krystalků. /6, 9, 10/



Za zmínku stojí i *azid sodný*, i když se v žádném případě nejedná o třaskavinu (není citlivý na slabé podněty), jehož rozkladné reakce se využívá k aktivaci airbagů. Pokud senzory (akcelerometry) zachytí prudkou změnu pohybu, dojde k elektrickému výboji, který iniciuje jeho rozklad. Dusík přechází v plynnou fázi (Rovnice 2) a dochází tak k nárůstu objemu (Obrázek 8). Celý proces trvá cca 40 ms. Sodík se z bezpečnostních důvodů převádí reakcí s dusičnanem draselným a oxidem křemičitým na silikátové sklo (Rovnice 3 a 4) /20, 21/



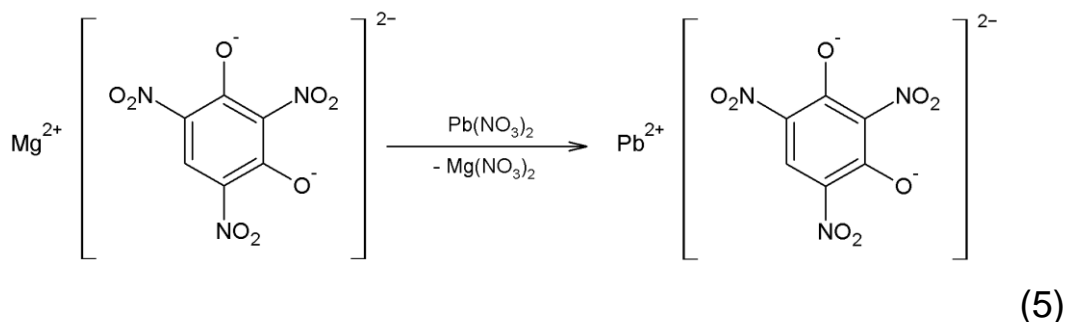
**Obrázek 8:** Exploze azidu sodného.



## Polynitrofenoláty kovů

Řadíme mezi ně všechny soli kovů kyseliny pikrové (trinitrofenol), kromě soli cínu, která se netvoří, a kyseliny styfnové (trinitroresorcin). Jedná se o poměrně nevýkonné třaskaviny. Pikráty se dají připravit klasickou neutralizací nejčastěji z uhličitanů nebo bazických oxidů. Styfnáty se připravují, působením dusičnanu kovu na slabě bazickou hořečnatou sůl trinitroresorcinátu, která je snadno rozpustná, při definované teplotě a pH (Rovnice 5). Komerční využití našel jen *trinitroresorcinát olovnatý*. /17/

*Trinitroresorcinát olovnatý* (TNRO, tricínát, styfnát) se používá výhradně v kombinaci s jinými třaskavinami. Samotný má příliš nízkou akceleraci a proto není vhodný k iniciaci trhavin. Je velice citlivý k elektrické jiskře a plameni. V kombinaci s azidem se používá pro konstrukci rozbušek, v kombinaci s tetrazenem se používá do zápalek a roznětek. Někdy býval nahrazován *dinitroresorcinátem olovnatým*, který je při manipulaci bezpečnější. /9, 10, 17/

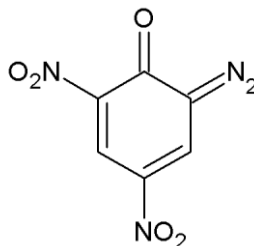


## Diazosloučeniny

Připravují se působením roztoku dusitanu, obvykle sodného, v nadbytku anorganické kyseliny, zpravidla chlorovodíkové, na aromatické primární aminy. Tyto sloučeniny mají větší či menší explozivní charakter. Například *benzediazonium nitrát* je málo výkonný a navíc citlivý. V praxi se uplatnil pouze diazodinitrofenol. /17/

*Diazodinitrofenol* (DDNP, dinol; Obrázek 9) je zajímavý hned z několika důvodů. Je to první diazosloučenina, která kdy byla připravena (1858), a byla také první třaskavinou, která neobsahovala ve své struktuře atom těžkého kovu. Ze všech třaskavin má nejvyšší detonační rychlost až 7100 m/s a vysokou výkonnost, která je dána velkým objemem plynů, vysokým

záporným slučovacíím teplem a výbuchovou teplotou. Je méně citlivý k nárazu než azid olovnatý a stabilnější než třaskavá rtuť, s níž má srovnatelnou iniciační schopnost. Nereaguje s kovy. Používá se jako primární náplň do ekologicky šetrných roznětek a rozbušek. /9, 17/

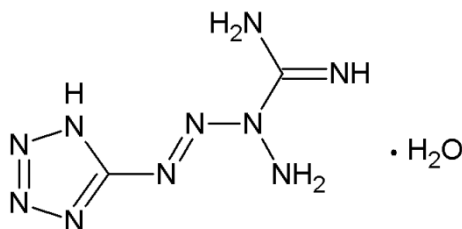


**Obrázek 9:** Strukturální vzorec 6-diazo-2,4-dinitrocyclohexa-2,4-dien-1-onu (dinol).

### ***Deriváty aminoguanidinu***

Vyznačují se nízkým výbuchovým teplem, což je specifické pro všechny sloučeniny, které ve své molekule obsahují guanyl. Patří mezi ně například nitraminoguanidin nebo nitrosoguanidin. Jako stabilní a použitelný se ukázal být pouze *tetrazen*. /17, 19/

*Tetrazen* (GNGT; Obrázek 10) se z podobného důvodu jako trinitroresorcinát samotný nepoužívá. Je citlivý v podstatě ke všem druhům podnětů, takže se přidává jako senzibilizující látka k různým typům roznětek či rozbušek. Jeho citlivost se zvyšuje ještě přidávkem sulfidu antimonitého nebo mletého skla. Přidává se také do zápalek (např. azid + tricinát + tetrazen nebo dusičnan barnatý + tricinát + tetrazen), kde výrazně zvyšuje citlivost k nápichu (mechanická iniciace jehlou) a navíc neutralizuje kyselý zplodiny, tzn. že slože s přidávkem malého množství tetrazenu nezpůsobují korozi hlavně. /9, 10/

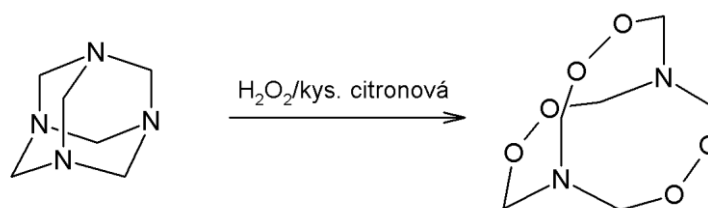


**Obrázek 10:** Strukturální vzorec 4-(1H-tetrazol-5-yl)-3-tetrazen-2-karboximidamid monohydrátu (tetrazen).

## Organické peroxidy

Explozivní vlastnosti organických peroxidů jsou často skloňovány v souvislosti s peroxidy odvozených od karbonylových sloučenin, nejčastěji se jedná o *peroxyd acetonu*. Známy je rovněž *hexamethylentriperoxodiamin*. V otevřeném prostoru mohou volně shořet. Žádný z organických peroxidů nenašel z důvodu nízké termické a chemické stability praktické využití. /19/

*Hexamethylentriperoxodiamin* (HMTD) byl poprvé připraven roku 1885. Vzniká smísením peroxidu vodíku, urotropinu a slabé kyseliny, například kyseliny citronové (Obrázek 11), přičemž je nutné intenzivní chlazení reakční směsi. Svou brizancí převyšuje všechny v praxi používané třaskaviny, přesto se, jak již bylo řečeno, v praxi nepoužívá. Důvodem není ani tak jeho citlivost (citlivost třaskavé rtuti je dokonce vyšší), jako jeho nestabilita, a tedy neskladovatelnost. Čistý HMTD je sice v porovnání s ostatními organickými peroxidy relativně stabilní a nemá takový sklon k rozkladu a sublimaci, v porovnání s konvenčními třaskavinami však zaostává. Při delším skladování vznikají produkty, které výrazně zvyšují citlivost směsi. Současně se uvolňuje teplo, které může způsobit samovolné shoření až detonaci (podle množství směsi a přítomnosti či nepřítomnosti obalu). Rozklad katalyzují zbytky kyselin a zásad (nedostatečné promytí) a kontakt produktu s kovy. Čistota surovin použitých k přípravě má rovněž zásadní vliv na výsledné vlastnosti produktu. Náhraza urotropinu za tuhý líh (technický urotropin) může mít fatální následky. HMTD je pro dostupnost výchozích látek často používán k výrobě amatérských rozbušek. /6, 17, 19, 22/

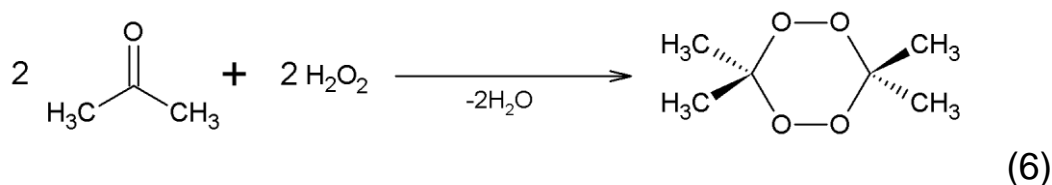


**Obrázek 11:** Reakční schéma přípravy 3,4,8,9,12,13-hexaoxa-1,6-diazabicyclo[4.4.4]tetradekanu (HMTD).

*Peroxid acetonu* (TATP, TCAP) existuje v dimerní, trimerní a tetramerní podobě, přičemž v tomto pořadí klesá citlivost a těkavost. Vyrábí se reakcí peroxidu vodíku



s acetonem (Rovnice 6). Izolovány byly i hydroperoxy acetonu. Má podobné vlastnosti jako HMTD, riziko spojené s jeho přípravou a uchováváním je však znatelně vyšší. Navíc, oproti HMTD, zde ještě jedno přibývá. Peroxidy acetonu velice snadno sublimují, a proto hrozí nebezpečí detonace už při přiblížení iniciačního impulsu (jiskra, plamen). Na rozdíl od výbušnin, které ve svých molekulách obsahují atomy dusíku, se při výbušné přeměně TATP uvolňuje jen zanedbatelné kvantum tepelné energie. Peroxid acetonu tak podléhá tzv. entropické explozi, která je spojená pouze se změnou fáze a nárůstem objemu. Uvolněná energie ve formě teploty je zanedbatelná. Je nezjistitelný pro bezpečnostní skenery, které obvykle fungují na principu detekce atomů dusíku v kontrolovaném vzorku. Obtížná detekce, velká výbušná síla (83 % TNT) a snadná výroba jsou důvody, proč je TATP („Mother of Satan“) často zneužíván sebevražednými atentátníky. V praxi použitelná metoda na odhalování TATP byla vyvinuta teprve v roce 2004 izraelskými vědci. Je založena na enzymatické oxidaci organických substrátů, která je specifická právě pro TATP (Obrázek 12). /6, 19, 23/

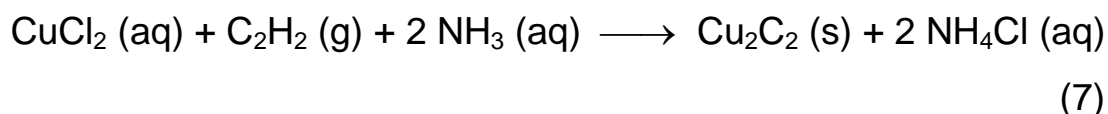


**Obrázek 12:** Zařízení na detekci peroxidů acetonu.

### ***Acetylidy těžkých kovů***

Při explozivním rozkladu neposkytují plynné produkty. Přesto při tomto rozkladu můžeme slyšet silný zvukový efekt. Jak je to možné? Při dekompozici acetylidu se uvolní velké množství tepla, což se projeví zvýšením teploty okolního prostředí, které se začne rozpínat. Při tom prudce stlačí sousední molekuly, což se projeví v lokálním nárůstu tlaku. Ten je příčinou akustického vlnění. Tedy samotné teplo je jediným faktorem, který vede ke stavovým změnám, které můžeme díky jejich dynamice slyšet jako ohlušující ránu. Opačným extrémem je výbušná přeměna peroxidů acetonu, která je naopak jen minimálně exotermická, a proto prakticky jediným faktorem vyvolávajícím kompresi prostředí jsou plynné produkty uvolněné při rozkladu. Zajímavé je to z toho důvodu, že se běžně u výbušnin setkáváme s oběma těmito činiteli působícími synergicky. /17, 18, 23/

*Acetylid měďný* se dříve používal jako součást zápalných složí v elektrických rozněcovačích, pro svou citlivost k elektrické jiskře a intenzivní plamen, který dává díky vysokému zápornému slučovacímu teplu. Přípravu popisuje rovnice 7. /17/



*Acetylid stříbrný* je ještě výkonnější třaskavinou než acetylid měďný (vyšší záporné slučovací teplo). Stejně jako on dnes nenachází praktické využití. Přípravu popisuje rovnice 8. /17/

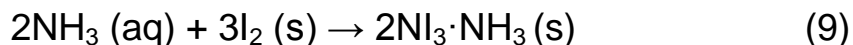


### ***Halogenidy dusíku***

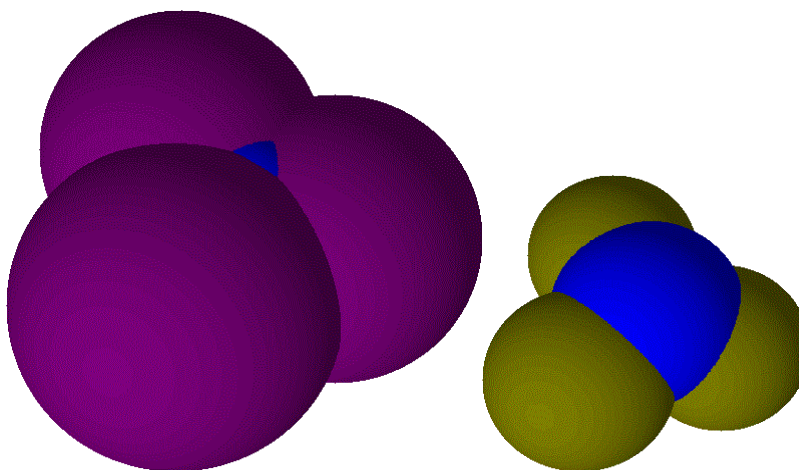
Všechny halogenidy dusíku, kromě fluoridu (Obrázek 13), vykazují explozivní charakter. Pro svou citlivost nenašly praktické využití. /24/

*Jododusík* je extrémně citlivou třaskavinou. Explozivní rozklad lze v suchém stavu vyvolat pouhým akustickým vlněním. Díky relativně malé velikosti centrálního atomu, jsou

objemné atomy jódu nuceny setrávat v těsné vzájemné blízkosti, což vede k silné elektronové repulzi. Dalším faktorem je vysoká stabilita molekulárního dusíku, který se, společně s parami jódu, vytváří při jeho rozkladu. Připravuje se reakcí jódu a vodného roztoku amoniaku (Rovnice 9). Při této reakci však nevzniká čistý jododusík, ale jeho adukt s amoniakem  $\text{NI}_3 \cdot \text{NH}_3$ . /15, 24/



*Chlorodusík* se dá připravit v čisté podobě a díky tomu je, i přes slabší elektronovou repulzi, dokonce citlivější než amoniakát jododusíku. Připravuje se zaváděním chlóru do roztoku  $\text{NH}_4\text{Cl}$  (Rovnice 10). Na rozdíl od jododusíku se jedná o kapalinu. /15, 25/



**Obrázek 13:** Kalotový model jodidu (je třaskavinou) a fluoridu dusitého (není třaskavinou).

Mezi třaskaviny se řadí také mnoho dalších typů sloučenin. Některé byly přesunuty do kapitoly „Pyrotechnické slože“, protože se jedná o směsi a za účelem iniciace trhavin nebo střelivin se dnes již nepoužívají. Jiné nebyly podrobněji rozebírány, protože nenacházejí uplatnění ve vojenském ani průmyslovém sektoru a nejsou zajímavé ani z didaktického hlediska, například pro nedostupnost výchozích surovin nebo časovou náročnost přípravy. Pro představu o jaké látce se jedná lze uvést například *sulfid* a *selenid dusíku* ( $\text{S}_4\text{N}_4$  a  $\text{Se}_4\text{N}_4$ ), *sol*

*nitrosolenolů, isonitraminů, kyseliny methazonové, štavelové a thiokyanaté (rhodanidy), koordinační sloučeniny těžkých kovů (např. platiny) zejména s ligandy amoniaku, chlorečnanu a chloristanu. /17/*

### 2.3.2 Střeliviny

Řadíme je mezi primární výbušniny, protože k jejich iniciaci je třeba pouze jednoduchého podnětu. Charakteristickou výbušnou přeměnou střelivin je explozivní hoření. Energie střeliviny musí být uvolňována rovnoměrně, bez toho, aniž by hrozilo její náhlé uvolnění (nesmí dojít k detonaci). Pravidelného hoření se dosahuje použitím prachových zrn stejného tvaru a stejné velikosti, které navíc musí být uloženy v dostatečně nalisovaných souběžných vrstvách. Takto upravené nacházejí hlavní využití mezi hlavnovými zbraněmi, kde zajišťují transport střel (odtud název „střeliviny“). Často se s nimi můžeme setkat i v zábavní pyrotechnice. Obvykle se dělí na černý střelný prach a bezdýmne prachy. /9/

**Černý střelný prach** je směsí dusičnanu draselného, práškové síry a dřevěného uhlí. Vzhledem k tomu, že se jedná o směs, mohl by být řazen mezi pyrotechnické složky. V minulosti se také hojně používal k trhacím pracím v lomech, tedy jako trhavina. Černý prach je však v odborné literatuře, patrně z historických důvodů, většinou řazen mezi střeliviny. Dnes se nejčastěji používá v zábavní pyrotechnice pro výrobu zápalnic a stopin (plní funkci zpozdovače), jako výmetná náplň pro historické, některé lovecké zbraně a signální municie, nebo jako zážehová slož (pro velké množství pevných zplodin a citlivost k plameni). /9, 10/

Přestože jednotlivé složky nemají samy o sobě explozivní charakter, považuje se průmyslová výroba černého prachu za jednu z nejnebezpečnějších. Všechny složky je nutno důkladně promísit a při této operaci, díky citlivosti černého prachu k mechanickým i tepelným podnětům, také nejčastěji dochází k neočekávaným explozím. /10, 17/

Jeho vlastnosti jsou ovlivněny zejména typem uhlí, které slouží jako palivo. Je-li použito uhlí, které bylo karbonizováno při vysoké teplotě, bude zápalná teplota a výkonnost černého prachu vyšší. Dokonce závisí i na druhu dřeva, které bylo k výrobě dřevěného uhlí použito. Síra snižuje zápalnou teplotu černého prachu a slouží jako pojivo. Při obsahu nad 10 % také zabraňuje vzniku jedovatého oxidu uhelnatého (důležité při použití v dolech). Dusičnan

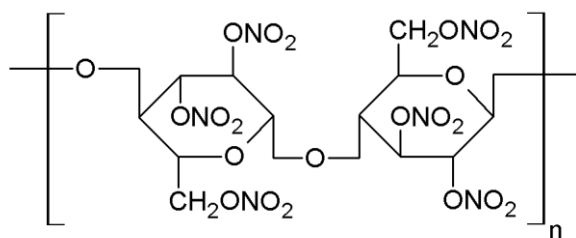
draselný slouží jako oxidovadlo. Místo dusičnanu draselného lze použít rovněž dusičnan sodný, který sice zvyšuje výkonnost prachu, na druhou stranu je více hygroskopický, což činí takový prach při nevhodném uchovávání méně spolehlivým. Průmyslově vyráběný černý prach se často grafituje (potahování zrn grafitem), což odvádí elektrostatický náboj a zároveň snižuje jeho navlhavost. /6, 9, 17/

To jak se černý prach projeví závisí nejen na jeho chemickém složení, ale také na fyzikálních okolnostech výbušné přeměny. Je třeba vědět, že volně sypaný prach v menším množství energicky shoří. Pokud by ale byl znemožněn odchod zplodin, pak by došlo k explozi (400-900 m/s). Rychlost závisí na velikosti zrn, způsobu iniciace, intenzitě podnětu, odolnosti obalu a na lisovacím tlaku (hustotě) černého prachu. /9, 17/

I když byly, zejména v 19. století, vyvíjeny snahy o zdokonalení černého prachu, jeho kvalitativní složení se od starověku do dnešních dnů prakticky nezměnilo. Náhrady jednotlivých složek za jiné (například  $\text{KNO}_3$  za  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  nebo  $\text{KClO}_3$ ) skončily neúspěchem. Co se týče kvantitativního složení, lze se nejčastěji setkat se složením 75 %  $\text{KNO}_3$ , 15 % dřevěného uhlí a 10 % síry. /17/

**Bezdýmné prachy** mají oproti černému prachu řadu výhod jako je větší bezpečnost (nižší citlivost) a několikanásobně vyšší výkonnost. Díky široké možnosti volby přísad a výroby uniformních zrn je možné dosáhnout definovaných parametrů hoření, což je velice důležitá vlastnost pro využití v balistice. Navíc se bezdýmné prachy v podstatě beze zbytku přemění na produkty plynného stavu, takže se netvoří, jako u černého prachu, nežádoucí dým. Patrně jedinou nevýhodou je náročnější výroba a tedy i vyšší cena. /9/

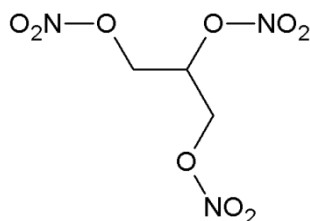
Hlavní komponentou je *trinitrát celulózy* (nitrocelulóza; Obrázek 14), která se připravuje esterifikací dřevné nebo bavlněné celulózy směsí kyseliny dusičné a kyseliny sírové. Obsah dusíku se podle reakčních podmínek pohybuje v rozmezí 11 – 13,5 %. Nitrocelulóza chudší na dusík se nazývá nízká nitrocelulóza (koloxylin), nitrocelulóza s vyšším obsahem dusíku se nazývá vysoká nitrocelulóza (pyroxylin). Nitrocelulóza ve formě střeliviny musí být upravená, jelikož samotná může po vhodné iniciaci přejít dokonce v detonaci. Bezdýmné prachy dále dělíme na nitrocelulózové, nitroglycerinové, diglykolové a gudolové prachy. /9, 10/



**Obrázek 14:** Strukturní vzorec nitrátu celulózy (nitrocelulózy).

**Nitrocelulózové prachy** řadíme mezi jednosložkové prachy, které jsou tvořeny pouze nitrocelulózą. Nitrocelulóza se odvodní alkoholem a dále je rozpuštěna v roztoku alkoholu a éteru. Takto upravená se lisuje, nařezává na potřebná zrna a následně je zbavena těkavých rozpouštědel. Odpařením rozpouštědel získávají zrna větší povrch, a to činí nitrocelulózové prachy poněkud hygroskopičtější než prachy diglykolové nebo nitroglycerinové. Stále však nedosahuje navlhavost takové míry jako u černého prachu. /9, 10/

**Nitroglycerinové prachy** řadíme mezi dvousložkové prachy, které vznikají přidáním želatinátorů, jako je nitroglycerin (Obrázek 15), méně často aceton, k vodní suspenzi nitrocelulózy. Želatinátory usnadňují jeho další zpracování. Podle druhu použité nitrocelulózy vznikají balistity (50 % nízká nitrocelulóza, 50 % nitroglycerin) nebo kordity, obvykle o složení 65 % vysoká nitrocelulóza, 35 % nitroglycerin. Díky želatinaci nemají zrna pórovitý povrch, což se příznivě projevuje ve vztahu nitroglycerinových prachů k vlhkosti, na druhou stranu se zrna díky menšímu povrchu obtížněji zažehují. Díky přítomnosti želatinátoru mají vyšší výbuchové teplo (energetický obsah). Vysoká teplota (až 3470 °C) neblaze působí na hlaveň zbraně, proto se musí tyto prachy upravovat přidáváním dalších látek, které tento nedostatek odstraňují. Obecně se dá říci, že tyto prachy mají lepší vlastnosti i nižší výrobní náklady. /9, 10, 17/



**Obrázek 15:** Strukturní vzorec 1,2,3-trinitroxypropanu (nitroglycerin).

**Diglykolové prachy** se získávají želatinací nízké nitrocelulózy diethylenglykoldinitrátem. Jejich vlastnosti se blíží vlastnostem chladných prachů. /9/

**Gudolové prachy** jsou tvořeny třemi složkami: nitrocelulózou, diethylenglykoldinitrátem a nitroguanidinem. Právě nitroguanidin výrazně snižuje jejich výbuchovou teplotu (chladné prachy). Dopad na životnost hlavně však není příliš velký a proto se dnes příliš nepoužívají. /9/

Kromě toho obsahují bezdýmne prachy řadu příměsí, které je mají za úkol stabilizovat nebo flegmatizovat, případně upravit proces hoření. /9/

### 2.3.3 Pyrotechnické složky

Jsou to směsi oxidovadel, hořlavin, pojiv a dalších pomocných látek. Slouží k vyvolání pyrotechnických efektů světelných, tepelných, zvukových, dýmových a pohybových. Charakteristickou výbušnou přeměnou je explozivní hoření. /9/

Jako oxidovadla se nejčastěji používají některé chloristany, chlorečnany, dusičnany, oxidy, případně (anorganické!) peroxidy. Od chlorečnanů se z důvodu nežádoucí vyšší citlivosti na mechanické podněty v poslední době upouští a přechází se ke stabilnějším chloristanům. /4, 6/

Hořlavin používaných v pyrotechnice je nepřehledné množství. Používají se kovy a jejich slitiny v práškové podobě, zejména hliník a hořčík, nekovy jako je síra, fosfor, uhlík (saze, uhlí, ...) a sulfidy železa a antimonu. Z organických látek to mohou být jednak cukry, například škrob, celulóza v různé podobě (dřevěné piliny, papír, ...), dále uhlovodíky (vazelína, benzín, ...) nebo acetaldehyd či metaldehyd. /4, 10/

Pojiva zvyšují mechanickou pevnost slože, snižují tlak nutný k nalisování a zamezují přístupu vlhkosti. Mezi nejvíce používaná pojiva patří kalafuna, fenolformaldehydové pryskyřice (iditol, bakelit), šelak, arabská guma a mnoho dalších. Všechna tato pojiva zároveň slouží jako hořlaviny. Snižují citlivost k nárazu, naopak mohou zvyšovat citlivost k plameni. Jejich obsah zpravidla nepřesahuje 12 %. /4, 10/

Mezi aditiva patří látky barvicí plamen, barviva pro dýmové slože, dýmotvorné látky, flegmatizátory, stabilizátory, rozpouštědla a látky zvýrazňující efekt slože. /4/

**Zážehové slože** vystupují jako prostředník mezi počátečním impulsem a další složí, kterou mají zažehnout. Sami musí mít přijatelně nízkou teplotu zážehu a zároveň musí uvolnit dostatečné množství tepla pro iniciaci i obtížně zažehovatelné slože. Dříve se k tomuto účelu používal černý střelný prach, dnes se nejčastěji používají slože o složení 75 %  $\text{KNO}_3$ , 15 % Mg, 10 % iditol nebo slože na bázi manganistanu (50%  $\text{KMnO}_4$ , 50% Fe), popřípadě chlorečnanu draselného (30%  $\text{KClO}_3$ , 70%  $\text{Pb}(\text{SCN})_2$ ). /4, 6/

**Osvětlovací slože** se používají ve světlicích (Obrázek 16), v zábavní pyrotechnice pro barevné efekty vyvolané použitím solí příslušných iontů, tzv. Bengálské ohně nebo ve stopkových složích, které mají za úkol zvýraznit dráhu letu střely. Ve světlicích se používá sodných solí (nejčastěji  $\text{NaNO}_3$ ), jelikož lidské oko je nejvíce citlivé právě na oblast žlutozeleného spektra (550 – 570 nm), práškového hořčíku, který má až 10 krát vyšší specifickou svítivost než hliník a fermeže (polymerizovaný lněný olej), který, stejně jako všechna pojiva, sám o sobě prodlužuje dobu hoření, navíc umožňuje slož nalisovat, což rovněž dobu hoření prodlouží. Směsi pro Bengálské ohně jsou obvykle tvořeny dusičnanem barnatým (zelená), sodným (žlutá), vápenatým (oranžová) nebo strontnatým (červená), hořčíkem a pojivem. Často se přidávají látky zvýrazňující barvu. K tomuto účelu slouží organické sloučeniny chlóru, například PVC. Stejně složení mají i stopkové slože, zde se však používají pouze soli strontnaté nebo barnaté. /4, 6, 10/





**Obrázek 16:** Světlice americké armády vystřelené během vojenského cvičení, Fort Lee, Virginie.

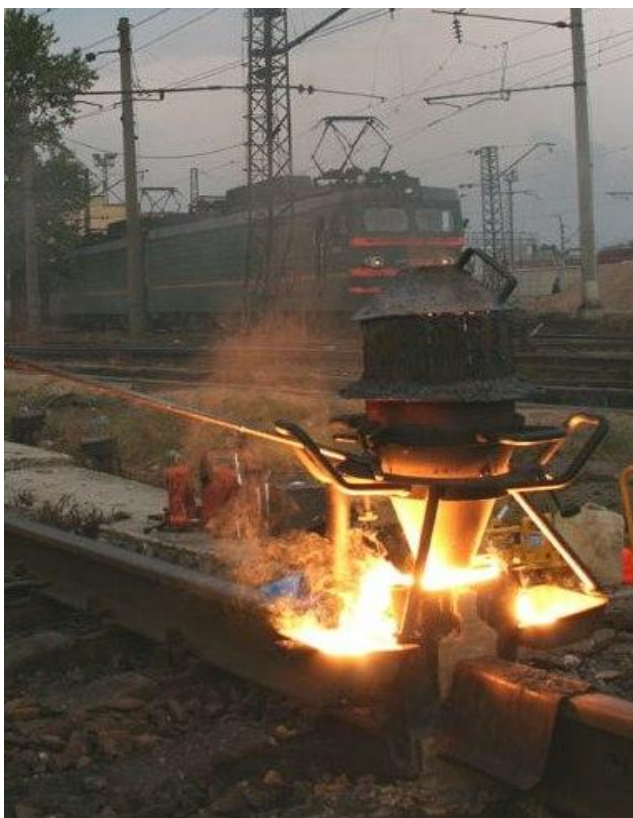
**Zábleskové a akustické slože** (flash směsi) mají v podstatě stejné složení jako slože osvětlovací. Jediným podstatným rozdílem je nepřítomnost pojiva, což umožňuje prudké uvolnění energie. Tyto slože se používají pro noční leteckou fotografii nebo jako náplně do dělobuchů (70%  $\text{KClO}_4$ , 30% Al prach). Podobný akustický efekt mají i slože chlorečnanů se sírou nebo fosforem. Tyto slože se však v praxi nepoužívají (směs chlorečnanu s fosforem je extrémně citlivá). Výjimku tvoří sirky, kde je tato směs přítomna jen ve velmi malém množství. Hlavní mechanismus vznícení tkví právě v reakci mezi chlorečnanem (hlavička sirky) a červeným fosforem (škrátka). /5, 6/

**Dýmotvorné slože**, jejichž hlavní funkcí je produkce dýmu pro účely signální nebo zastírací, můžeme dělit na ty, ve kterých jsou dýmotvorné látky již přítomny a na ty, ve kterých se tvoří až při jejich hoření. Slože prvního typu jsou tvořeny chlorečnany, které oxidují organické látky, nejčastěji cukry. Vznikající teplo zahřívá dýmotvornou složku, jako je salmiak, naftalen nebo antracen, na její sublimační teplotu. Zplodiny reakce kondenzují a podle dostatku či nedostatku kyslíku nutného pro úplnou oxidaci organické látky vytvářejí světlešedý nebo černý dým. Přidáním termostabilního organického barviva vznikají dýmy

barevné. Do druhého typu složí se používá hexachlorethan nejčastěji společně s práškovými kovy. Jako oxidovadlo slouží oxid zinečnatý. Dýmotvorné slože se nelisují. Laborují se do perforovaného obalu pro únik plynů, otvory však nesmí být velké nebo jich nesmí být příliš mnoho, aby nedošlo k hoření směsi. /6, 10/

Pozn. Všimněte si, že je směs tvořena chlorečnanem a organickou látkou. Proto musí být při přípravě nejdříve smísen chlorečnan s chloridem amonným a teprve poté může být přidán například cukr! Salmiak je přítomen vždy ve více jak polovičním hmotnostním množství, takže působí jako výrazný flegmatizátor. /6/

**Zápalné slože** mají za úkol zapálit rozličné předměty a zároveň mají být těžko uhasitelné. Řadíme mezi ně termity. Termity, jinak také aluminotermické směsi, jsou slože, které jsou tvořeny oxidem přechodného kovu a čistým kovem, ke kterému má kyslík vyšší afinitu, než ke kovu, se kterým je ve směsi dočasně přítomen v podobě oxidu, tzn. že práškový kov musí být elektropozitivnější, aby mohla reakce vůbec proběhnout. Asi nejznámější směsí je směs oxidu železitého a práškového hliníku (75/25 %), jsou však možné i jiné kombinace vhodného kovu a vhodné sloučeniny (většinou oxidu) kovu jiného smísené ve stechiometrickém poměru. Teplota hoření dosahuje až 3000 °C a jedná se tak o nejúčinnější zápalné prostředky vůbec. Při případném hašení nelze použít vodu, protože ta se při této teplotě termicky rozkládá a tvoří výbušnou směs vodíku a kyslíku, proto je nutné použít jiné prostředky, například písek. Iniclace je z důvodu vysoké zápalné teploty termitu (až 1300 °C) poměrně složitá. Pro její snížení se používá příměs dusičnanu barnatého nebo draselného. Lisováním se jako obvykle zápalná teplota zvyšuje, předchází se tak ale možnému, i když velmi nepravděpodobnému výbuchu. Proto je vhodné směs lehce nalisovat a zvolit i přiměřenou velikost částic slože. K samotné iniciaci se používá například hořčiková páska nebo ignit, což je směs manganistanu draselného a práškového železa v poměru 1:1. Využití nachází jako náplň leteckých zápalných pum, v civilním sektoru se využívá ke sváření kolejnic (Obrázek 17) nebo k výrobě čistých bezuhlíkatých kovů s vysokou teplotou varu (chrom, mangan, atd.). /4, 6, 26/



**Obrázek 17:** Svařování kolejnic pomocí aluminotermie.

Termitům podobné složení mají prskavky, které se pro svou teplotu hoření pohybující se v blízkosti zápalné teploty termitů a dostupnost mohou použít pro jejich iniciaci. /6/

Pozn. Mezi zápalné slože se řadí rovněž slože napalmové, fosforové a elektronové. Tyto slože však nemůžeme řadit mezi výbušniny, neboť se rozkládají klasickým hořením, tedy za účasti atmosférického kyslíku.

### **2.3.4 Trhaviny**

Typickou výbušnou přeměnou trhavin je detonace. Jedná se o sekundární výbušniny, tzn. že jsou necitlivé k jednoduchým podnětům, a proto ke své iniciaci potřebují detonaci třaskaviny nebo jiné citlivější trhaviny, která již může být třaskavinou iniciována. Někdy v souvislosti s druhým případem mluvíme o tzv. terciálních výbušninách. Detonační rychlost ovlivňuje zejména typ trhaviny a její hustota. Trhaviny můžeme dělit podle různých kritérií. Zde bylo zvoleno dělení na trhaviny průmyslové a vojenské. /4, 9/

**Průmyslové trhavy** mají kratší záruční dobu (maximálně 1 rok) a jsou až 10 krát levnější než trhavy vojenské. Používají se k trhacím pracím povrchovým (odstřel starých budov, stavba komunikací, prorážení tunelů, ...) nebo důlním. K důlním pracím se nepoužívají trhavy se zápornou kyslíkovou bilancí (TNT, kyselina pikrová, střelný prach, ..). Ve zplodinách by se tvořily produkty neúplné oxidace, z nichž vodík a methan dávají se vzduchem výbušnou směs. Ta ihned exploduje a vzniká tzv. sekundární plamen, který, na rozdíl od plamene primárního, trvá dostatečně dlouho na to, aby inicioval výbuch uhelného prachu, který se v podobě aerosolu v dolech běžně vyskytuje (v podstatě se jedná o pyrotechnickou slož). Uhlý prach je společně s methanem nejčastější příčinou důlních neštěstí. /4, 9, 17/

Dalším kritériem bezpečnosti je vhodná detonační rychlost. Příliš nízká rychlost znamená velkou investici energie do teploty primárního plamene, příliš vysoká zas prudkou adiabatickou kompresi hořlavých plynných směsí. Proto se volí trhavy s kladnou kyslíkovou bilancí a s detonační rychlostí okolo 2000 m/s. Nejčastěji jsou to plastické a poloplastické trhavy, které vyrábí i pardubická Explosia pod obchodními názvy Semtinit® 50 a Ostravit® C. Plastifikace průmyslových trhavin se dosahuje přidávkem nitroesterů, jako jsou nitroglycerin, nitroglykol nebo nitrocelulosa ve formě *trhací želatiny* (nitrocelulosa želatinovaná nitroglycerinem), která má sama o sobě detonační rychlost 7700 m/s a používá se jako referenční trhavina pro testování výkonu ostatních průmyslových trhavin. /12, 17, 27/.

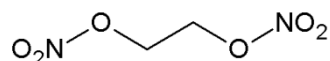
Průmyslové trhavy mohou sloužit i pro jiné, speciální účely, jako je například hašení nestandardních požárů, seismografický průzkum ropných polí nebo tváření kovů. Konkrétním příkladem tváření kovů je výroba kompozitních materiálů pomocí rázové vlny, tzv. plátování. Tímto způsobem lze spojit i kovy, které jsou jinak metalurgicky nespojitelné. Zde se z důvodu dobré tvárnosti využívají trhavy plastické, které se svým složením blíží trhavinám vojenským. /4, 17, 28/

Za zmínku stojí jistě i směsi, jejichž složky samy o sobě výbušné nejsou a explozivní charakter získávají, až jsou-li smíchány dohromady. Asi nejznámější je směs dusičnanu amonného a paliva (nafta, olej, ...) v poměru 19:1, tzv. *DAP* nebo *ANFO*. Vyznačuje se poměrně nízkou detonační rychlostí a značnou necitlivostí. K iniciaci je nutná počínová nálož, tzn. nálož jiné trhavy, která zvětšuje primární impuls daný rozbuškou. Z ekonomických důvodů je dnes hojně využívána zejména k povrchovým pracím. Dalším typem jsou směsné

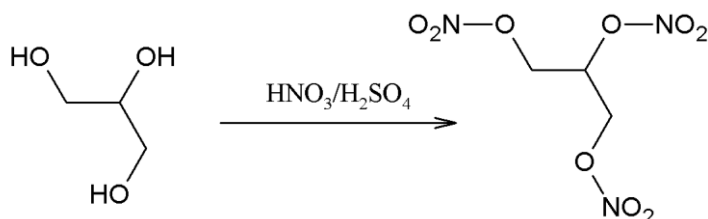
trhaviny obsahující výrazný podíl kapalné fáze, nejčastěji vody, tzv. *SLURRY EXPLOSIVES*. Výsledná směs má díky tomu kašovitou až tekutou konzistenci. Obsahují dusičnan amonný, vodu, hliník a další pomocné látky. Výhodou je možnost přípravy výbušniny na místě potřeby, a tím i bezpečný transport nevýbušných složek. Společně s DAP zde riziko výbuchu při výrobě prakticky neexistuje. Na rozdíl od nitrolátek nejsou toxické. Jedinou nevýhodou je vysoký minimální kritický průměr, který je daní za vysokou necitlivost, a tedy i nutnost použití počinové nálože. Ve všech ohledech nejpokročilejší jsou *trhaviny emulzního typu*, které obsahují fyzikální senzibilizátor v podobě dutých skleněných mikrokuliček. Oproti výbušninám na bázi dusičnanu amonného mají nižší spodní kritický průměr a k iniciaci některých z nich postačuje pouze rozbuška. /4, 12, 17/

**Vojenské trhaviny** můžeme dělit na chemická individua a směsi. Individuální trhaviny se dále dají dělit podle chemické povahy do tří skupin: estery kyseliny dusičné, nitraminy a nitrosloučeniny. Tyto skupiny budou společně s jejich hlavními představiteli blíže charakterizovány. Rovněž budou uvedeny názvy a složení některých významných směsných trhavin. /9/

**Estery kyseliny dusičné** jsou sloučeniny, ve kterých je nitroskupina vázána ke zbytku organické molekuly prostřednictvím atomu kyslíku. Vyrábí se esterifikací (exotermní vratná reakce), nejčastěji směsí kyseliny dusičné a sírové. Zástupci této skupiny se vyznačují velkou výkonností (vysoký poměr kyslíku k atomům uhlíku), na druhou stranu mají výrazný sklon k hydrolytickému rozkladu, zejména v alkalickém prostředí (asi 500 x vyšší než v prostředí kyselém) a jsou dosti citlivé k nárazu a tření. Radíme mezi ně estery alkoholů a sacharidů. Mezi nejvýznamnější patří estery vícesytných alkoholů glycerolu (nitroglycerin; Obrázek 19), ethylenglykolu (nitroglykol; Obrázek 18), pentaerythritu (pentrit; Obrázek 20) a sacharidu celulózy (nitrocelulóza; Obrázek 14). *Nitrocelulózy* se dnes v pyrotechnickém průmyslu používá výhradně jako střeliviny. *Nitroglycerin* se používá jako rozpouštědlo nitrocelulózy (bezdýmné prachy) a jako přísada do průmyslových trhavin. Je velice citlivý k nárazu a proto se musí do konečného produktu zpracovat na místě výroby. V minulosti se používal do *dynamitů*, kde byl absorbován v křemelině, která plnila funkci flegmatizátoru. *Nitroglykol* (ethylenglykoldinitrát) je také součástí bezdýmných prachů (nitrocelulózu rozpouští ještě lépe než nitroglycerin). Díky své nízké teplotě tuhnutí (- 22 °C) se používá jako želatinátor průmyslových trhavin, které je možno použít i při nižších teplotách. Z této skupiny látek se dnes jako trhaviny využívá už pouze *pentrit*. /6, 29/

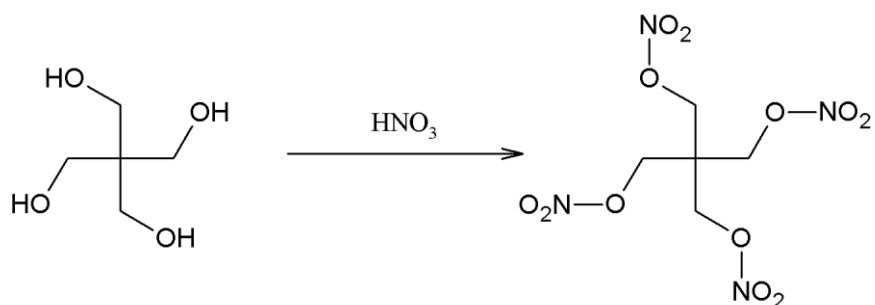


**Obrázek 18:** Strukturální vzorec 1,2-dinitroxyethanu (nitroglykol).



**Obrázek 19:** Reakční schéma výroby 1,2,3-trinitroxypropanu (nitroglycerin).

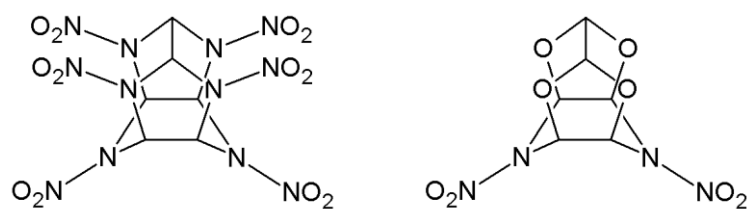
*Pentrit* (PETN) je bílý krystalický prášek, nerozpustný ve vodě. Připravuje se z pentaerythritu, který vzniká aldolizací a následnou Cannizzarovou reakcí formaldehydu a acetaldehydu v přítomnosti hydroxidu vápenatého. Získaný čtyřmocný alkohol se poté za snížené teploty esterifikuje kyselinou dusičnou za vzniku pentritu (Obrázek 20). Díky své symetrické struktuře je v porovnání s ostatními estery kyseliny dusičné chemicky relativně stabilní. Na mechanické podněty je citlivější než hexogen. Jeho detonační rychlost činí až 8300 m/s. Od druhé světové války jím jsou plněny rozbušky (sekundární náplň), používá se do bleskovic. Pro použití v počínové náloži nebo plastické trhavině musí být flegmatizován voskem, TNT (*pentritol*) nebo hexogenem (*Semtex*). *Semtex* byl vyvinut na konci padesátých let v Československu a díky svým vlastnostem se stal do jisté míry synonymem pro plastickou trhavinu. /4, 6, 9, 12, 29/



**Obrázek 20:** Reakční schéma výroby [3-Nitrooxy-2,2-bis(nitrooxymethyl)propyl] nitrátu (pentrit).

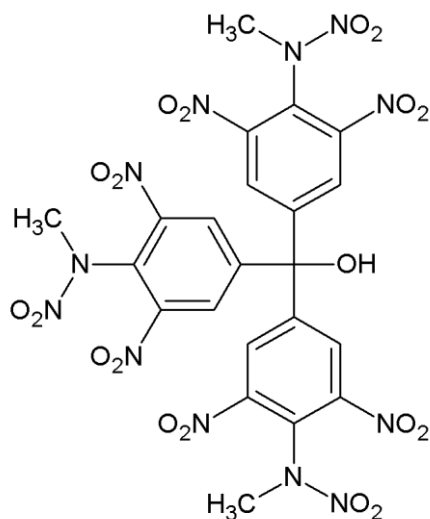
*Nitraminy* jsou sloučeniny, ve kterých je nitroskupina vázána ke zbytku organické molekuly přes aminický atom dusíku. Svými vlastnostmi, jako je stabilita nebo citlivost k nárazu a tření, se řadí někde doprostřed mezi nitrolátky a estery kyseliny dusičné. Připravují se, podle povahy substrátu a požadované struktury produktu, různým způsobem, ať už přímou či nepřímou nitrací, nitrolýzou nebo oxidací diazoniových solí. /17/

Již nejjednodušší anorganický nitramin  $\text{NH}_2\text{NO}_2$  je výbušninou. Stejně tak jeho alifatické deriváty jako *methylnitramin*, *methylendinitramin* nebo *ethylendinitramin*. Používán byl pouze poslední jmenovaný, a to Spojenými státy v období druhé světové války. Další jednoduchou sloučeninou je *nitroguanidin*, který patří k silným, ale těžko detonujícím trhavinám. Dnes se přidává do tříložkových (gudolových) bezdýmných prachů. Z novodobějších je možno uvést například vysoce výkonné *HNIW* nebo *TEX* (Obrázek 21). Schopnost detonace mají také alifatické nitramidy. Nitramidy jsou sloučeniny, které mají na aminický dusík navázán kyselý zbytek, nejčastěji acylový nebo sulfonylový. /15, 17/



**Obrázek 21:** Zleva: Strukturní vzorce Octahydro-1,3,4,7,8,10-hexanitro-5,2,6-(iminomethenimino)-1*H*-imidazo[4,5-*b*]pyrazinu (HNIW) a 4,10-dinitro-2,6,8,12-tetraoxa-4,10-diazatetracyklo[5.5.0.0<sup>5,9</sup>0<sup>3,11</sup>]dodekanu (TEX).

Z aromatických nitraminů je nejdůležitějším představitelem *tetryl*. Výbušné vlastnosti mají také jeho homology lišící se pouze přítomností dalších funkčních skupin, které jsou zavedeny do aromatického jádra. Zajímavou strukturu a vlastnosti mají také vícejaderné analogy tetrylu, ve kterých je nitroskupina tetrylu nahrazena atomem uhlíku, přes který se vážou dvě nebo tři takto modifikované molekuly (Obrázek 22). /17/

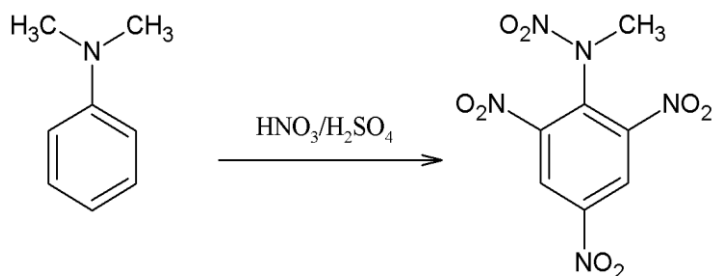


**Obrázek 22:** Strukturní vzorec tris{4-[methyl(nitro)amino]-3,5-dinitrofenyl}methanolu.

*Tetryl* (CE, pyronite) je krystalická látka žluté barvy, prakticky nerozpustná ve vodě. Vyrábí se nitrací *N,N*-dimethylanilinu při cca 70 °C (Obrázek 23). Při nižších teplotách neproběhne nitrace úplně a vzniklé odpadní produkty spolu mohou zreagovat za tvorby tepla,

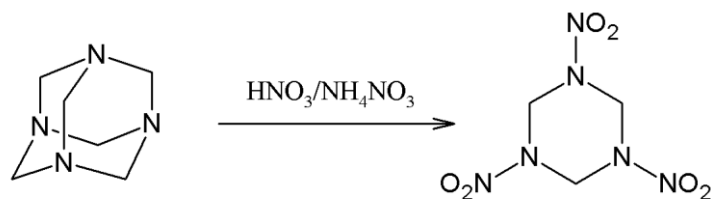


což představuje jisté riziko. Je vysoce chemicky stabilní, na trhavinu dosti citlivý k iniciaci, a proto se ho dříve používalo jako sekundární náplně do rozbušek nebo počínových náloží. Pro tyto účely se dnes ale častěji využívá hexogenu nebo pentritu. /4, 17/



**Obrázek 23:** Reakční schéma výroby *N*-methyl-*N*-2,4,6-tetranitroanilinu (tetryl).

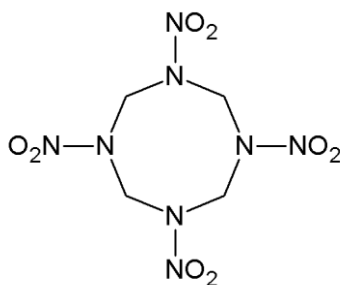
Z heterocyklických nitraminů jsou nejvýznamnějšími hexogen a oktogen. *Hexogen* (RDX, cyklonite, T-4) je bílá krystalická látka, nerozpustná ve vodě, dobře rozpustná v acetonu, s teplotou vzbuchu 230 °C. Vyrábí se více postupy, které jsou nejčastěji založeny na nitrolýze urotropinu (hexaminu) kyselinou dusičnou (Obrázek 24). Při výrobě vzniká vždy i menší množství oktogenu, což není na závadu. Poprvé byl připraven na konci 19. století a navržen pro použití v lékařství. K objevení jeho skvělých výbušinářských vlastností došlo až o několik let později. Je chemicky stabilní a nepodléhá rozkladu ani při vyšších teplotách. Má vysokou detonační rychlost (až 8630 m/s) a velmi vysokou brizanci. Proto dnes hexogen představuje základní trhavinu, vhodnou jak pro vojenské, tak průmyslové účely. Jeho jedinou „nevýhodou“ je v rámci trhavin poněkud vyšší citlivost vůči mechanickým podnětům (při průrazu střelou z ruční zbraně detonuje). Proto bývá flegmatizován voskem, někdy se používá ve směsi s jinými trhavinami, například s TNT (*hexolyt*). Je hlavní složkou americké trhaviny C-4. V těchto podobách se používá na výrobu počínových (citlivost), kumulativních (detonační rychlost) a tříštivých (brizance) náloží. Na druhou stranu, vyšší citlivosti se využívá pro sekundární náplně rozbušek nebo výrobu bleskovic (bleskovice slouží k přenosu detonačního impulsu na různé vzdálenosti), kde je přítomen právě hexogen neflegmatizovaný. /4, 6, 9, 10, 17/



**Obrázek 24:** Reakční schéma výroby 1,3,5-trinitro-1,3,5-triazinanu (hexogen).

Pozn. Kumulativní nálože umožňují soustředěný účinek detonace. Používají se v protipancéřových a průbojných hlavicích. Kumulačního efektu mohou dosáhnout trhaviny s detonační rychlostí 6000 m/s a vyšší. /6, 10/

*Oktožen* (HMX; Obrázek 25) je bílá krystalická látka obdobných chemických a pyrotechnických vlastností jako hexogen. Vyrábí se například nitrolýzou urotropinu kyselinou dusičnou za přítomnosti dusičnanu amonného při teplotě 73 – 78 °C. Právě dusičnan amonný dovoluje reakční směs na tyto teploty bez rizika zahřát. Po ochlazení a filtraci vzniká směs 10 % oktogenu a 90 % hexogenu, která se dále rozděluje na základě odlišné rozpustnosti v některých rozpouštědlech nebo reakcí s hydroxidem sodným, který při vhodné teplotě rozkládá pouze hexogen. Lisovaný má ze všech používaných trhavin nejvyšší hustotu, a také proto vyniká jednou z nejvyšších detonačních rychlostí (až 9100 m/s). Poměrně nákladná výroba omezila jeho využití pouze na speciální účely, například na výrobu protipancéřových střel nebo termostabilních rozbušek. /4, 10, 17/

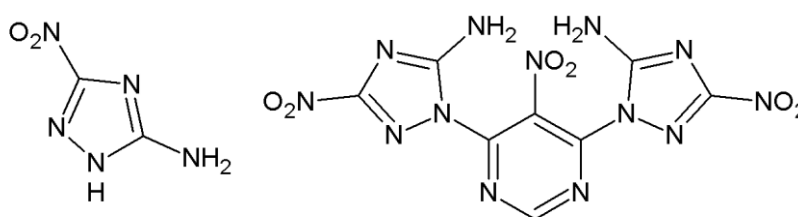


**Obrázek 25:** Strukturální vzorec oktahydro-1,3,5,7-tetranitro-1,3,5,7-tetrazocinu (oktožen).

*Nitrosloučeniny* jsou organické sloučeniny, ve kterých je na atom uhlíku vázána skupina  $-\text{NO}_2$ . Coby trhaviny se používají zejména nitrosloučeniny aromatické. Aromatická sloučenina musí mít na benzenovém jádře zavedeny alespoň tři nitroskupiny (většinou však

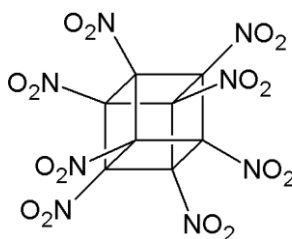
ne víc jak tři). Jedná se o nitroderiváty naftalenu, benzenu, toluenu, xylenu, fenolu, anilinu a dalších jim podobných. Výjimku tvoří pouze dinitrobenzen, který se ještě k trhavinám řadí. Pomyslnou hranicí je dinitrotoluen, který už se za trhavinu nepovažuje (dvě nitroskupiny na sedm atomů uhlíku je již málo). Vyznačují se vysokou stabilitou a nízkou citlivostí k mechanickým i tepelným podnětům. Většinou se připravují klasickou nitrací. /30/

K trhavinám se řadí také heterocyklické aromatické nitrosloučeniny jako je například ANTA nebo DANTNP (Obrázek 26). Ty charakterizuje velmi nízká citlivost, termostabilita a poměrně slušná výkonnost. Jejich příprava vyžaduje speciální postupy. /15, 31/



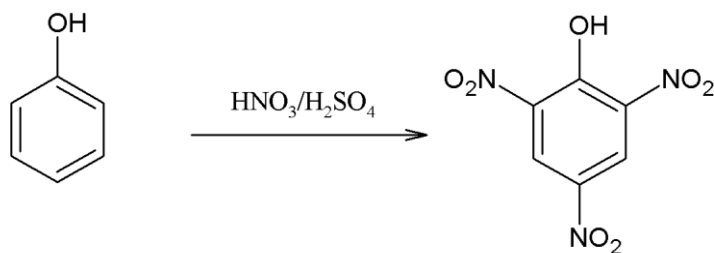
**Obrázek 26:** Zleva: Strukturální vzorce 5-amino-3-nitro-1*H*-1,2,4-triazolu (ANTA) a 5-nitro-4,6-bis(5-amino-3-nitro-1*H*-1,2,4-triazol-1-yl)pyrimidinu (DANTNP).

Vlastnosti výbušnin mají také alifatické sloučeniny, například tetranitromethan, které se používají jako příměsi trhavin nebo pro jiné než pyrotechnické účely. Naopak velice nadějnými mohou být polynitrosloučeniny kubanu, zejména *oktanitrokuban* (Obrázek 27). Detonační rychlost oktanitrokubanu je neuvěřitelných 10200 m/s (vysoká krystalová hustota kubanu 1,29 g/cm<sup>3</sup>). Syntéza podobných sloučenin je však velmi složitá a nákladná. /6, 15, 30/



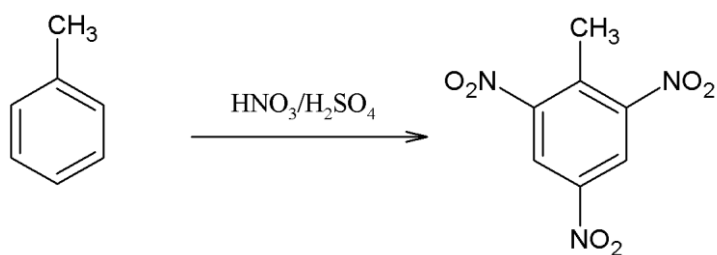
**Obrázek 27:** Strukturální vzorec oktanitrokubanu.

*Kyselina pikrová* (ekrasit) byla první používanou vojenskou trhavinou na bázi nitrolátek (1873). Je to jasně žlutá krystalická látka, hořké chuti, toxická, špatně rozpustná ve vodě. Vyrábí se nitrací fenolu (Obrázek 28). Při pozření v nepatrném množství vyvolává v organismu příznaky infekční žloutenky a proto byla v minulosti vyhledávaným artiklem simulantů. Při pozření větší dávky však hrozilo riziko trvalého poškození jater. Je o něco výkonnější než TNT, ale k praktickému užití se příliš nehodí, neboť díky své kyselé povaze reaguje s kovy za tvorby třaskavých pikrátů. Její význam je tak spíše historický. /4, 6, 9/



**Obrázek 28:** Reakční schéma výroby 2,4,6-trinitrofenolu (kyselina pikrová).

*Trinitrotoluen* (TNT, tritol) je stále nejuniverzálnější a nejrozšířenější vojenskou trhavinou. Je to světle žlutá, mírně toxická krystalická látka, s teplotou tání cca 81 °C, což usnadňuje laboraci litím. Je termicky i chemicky stabilní, odolný vůči mechanickým podnětům. Pro iniciaci je nutná nejsilnější vyráběná rozbuška nebo počínová nálož (pro litý TNT). Zapálený v otevřeném prostoru shoří, v uzavřeném může přejít v detonaci. Jeho detonační rychlost je oproti nitraminům nebo pentritu poněkud nižší (maximálně 6800 m/s). Průmyslově se vyrábí postupnou nitrací toluenu (Obrázek 29) ve třech stupních. Plní se jím široká škála vojenské munice. Používá se také ve směsi s výše uvedenými, brizantnějšími trhavinami nebo ve směsi s dusičnanem amonným (tzv. amatol) v různých poměrech. Po studené válce byla výroba TNT z důvodu jeho vysokých zásob omezena, nebo úplně zastavena. Odhaduje se, že by trvalo přibližně sto let, než by byly tyto zásoby civilním sektorem vyčerpány. Slouží jako referenční trhavina pro ostatní výbušniny. Bezrozměrný koeficient, tzv. tritolový ekvivalent, představuje poměr výbuchového tepla dané výbušniny a TNT. Pro jaderné zbraně se tato energie vyjadřuje v kilotunách nebo megatunách TNT. Nejsilnější termonukleární exploze v dějinách byla uskutečněna roku 1961 Sovětským svazem a dosahovala mohutnosti 50 Mt („bomba Car“). /6, 9, 10, 32/



**Obrázek 29:** Reakční schéma výroby 2-methyl-1,3,5-trinitrobenzenu (TNT).

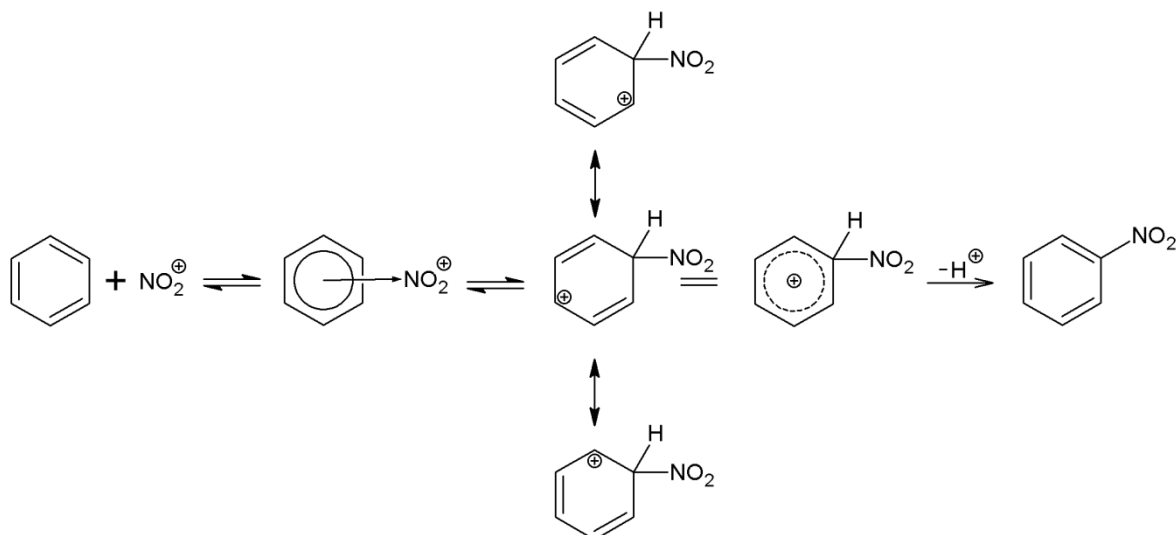
## 2.4 Výroba výbušnin

Již z výše uvedeného přehledu je zřejmé, že se metody na přípravu výbušnin značně liší. V případě pyrotechnických složí a černého střelného prachu jde v podstatě jen o smísení správných surovin vhodné konzistence ve správném poměru. Někdy je důležité také pořadí, ve kterém se jednotlivé složky mísí. Třaskaviny se připravují různými způsoby, z nichž mnohé jsou založeny na srážecích reakcích. Příprava bezdýmných prachů a trhavin ze skupiny esterů kyseliny dusičné probíhá mechanismem esterifikace. K přípravě trhavin zbylých skupin, které jsou bezpochyby co do množství a významu hlavními produkty výbušinářského průmyslu, však nejčastěji vede nitrace.

### 2.4.1 Nitrace

Jedná se o exotermickou reakci, při které se do organického substrátu zavádí  $\text{NO}_2$  skupina (nitroskupina) za vzniku nitrosloučeny. Nitrace alifatických sloučenin probíhá mechanismem radikálové reakce. Pro přípravu výbušnin je však významná nitrace aromatických sloučenin, kde tento proces probíhá mechanismem *aromatické elektrofilní substituce*. /33/

V první fázi je elektrofil, v tomto případě nitroniový ion, přitahován  $\pi$  elektrony aromatického cyklu za vzniku tzv.  *$\pi$ -komplexu*. Následuje atrakce jedním elektronem aromátu za vzniku  *$\sigma$ -komplexu*. Důsledkem je přesun kladného náboje z elektrofilu na cyklus a dočasná ztráta aromaticity. Tento stav je do jisté míry stabilizován delokalizací elektronového deficitu v rámci struktury  $\sigma$ -komplexu. V poslední fázi dojde k odštěpení protonu, čímž se obnoví aromaticita (Obrázek 30).



**Obrázek 30:** Mechanismus nitrace jako aromatické substituce elektrofilní.

Nitrace může probíhat buď přímo, náhradou nitroskupiny za atom vodíku, nebo nepřímo, substitucí nitroskupiny za jinou lehce nahraditelnou funkční skupinu, typicky sulfoskupinu.

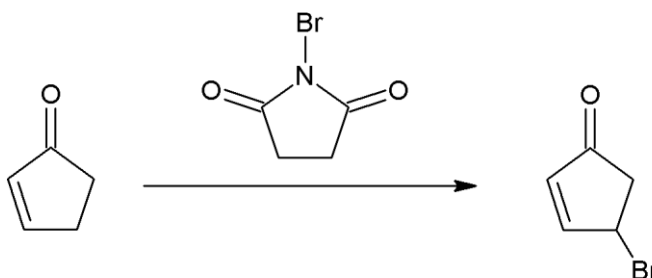
Zdrojem nitroniového iontu je obvykle kyselina dusičná, která má schopnost autoprotace. Často se používá ve směsi s kyselinou sírovou nebo oleem. Kyselina sírová jednak protonizuje kyselinu dusičnou a podporuje tak vznik nitroniového kationtu, dále pak na sebe váže při nitraci vznikající vodu, a tak zabraňuje ředění nitrační směsi. Existují i další typy nitračních směsí, například směs kyseliny dusičné s acetanhydridem, dusičnanu s kyselinou sírovou a některé další. Volba nitračního činidla závisí na povaze substrátu, počtu nitroskupin, které mají být do této sloučeniny zavedeny a poloze, do které mají být zavedeny. Obecně platí, že čím více nitroskupin chceme zavést a čím je substrát méně reaktivní, tím by měla být nitrační směs koncentrovanější. Nutno poznamenat, že současně s nitrací probíhají i vedlejší reakce. Intenzita těchto reakcí závisí zejména na teplotě. Pro udržování vhodné teploty je kromě chlazení nebo zahřívání nutné i dokonalé a nepřetržité promíchávání reakční směsi, aby se udržoval přibližně konstantní vztyčný povrch obou fází (organické a kyselinové). V současné době jsou k dispozici i silná nitrační činidla jako je například nitronium – tetrafluoroborát nebo nitronium – hexafluorofosfát, která umožňují nitraci provádět i za velmi mírných podmínek. /30, 33/

Orientace zaváděné nitroskupiny závisí zejména na povaze substituentů, které jsou přítomny na aromatickém jádře. Přítomnost nitroskupiny, karbonylové, nitrilové, sulfonové a karboxylové skupiny a jejich funkčních derivátů diriguje nově zaváděnou nitroskupinu do pozice meta, zatímco hydroxylová, alkylová, amino a alkoxy skupina a všechny halogeny do pozice ortho a para. Je to dáno indukčními a mezomerními efekty příslušných skupin. Všechny meta řídící substituenty působí jako více či méně silné deaktivátory a proto je pro nitraci substrátů, které tyto skupiny obsahují, nutné volit tvrdší reakční podmínky. /33, 34/

## 2.4.2 Pokročilejší metody syntézy výbušnin

Pro syntézu výbušnin nové generace však mnohdy samotná nitrace nestačí. Jako příklad těchto rozličných metod byla vybrána syntéza oktanitrokubanu.

Syntéza vychází z cyklopent-2-en-1-onu, který v reakci s N-bromsukcinimidem (NBS) v prostředí tetrachlormethanu podléhá radikálové substituci na allylové pozici. Vazba uhlík – vodík je zde z důvodu přítomnosti sousední dvojné vazby nejslabší, proto dochází k její homolytickému štěpení. Navíc je v tranzitním stavu v této poloze možná stabilizace radikálu dvěma mezomerními strukturami. Z těchto dvou mezomerních struktur je díky konjugaci favorizována ta, z níž vzniká 4-bromcyklopent-2-en-1-on (Obrázek 31).



**Obrázek 31:** Reakční schéma 1. kroku syntézy oktanitrokubanu.

Následnou bromací 4-bromcyklopent-2-en-1-onu v prostředí pentanu a dichlormethanu vzniká 2,3,4-tribromcyklopentan-1-on. Tentokrát probíhá reakce přes bromoniový kation mechanismem elektrofilní adice. Nově vázané atomy bromu díky tomu směřují opačným směrem – vznikají dva (poloha 2, 3) trans – stereoizomery 2,3,4-tribromcyklopentan-1-onu (v reakčním schématu nejsou vyjádřeny; Obrázek 32).



**Obrázek 32:** Reakční schéma 2. kroku syntézy oktanitrokubanu.

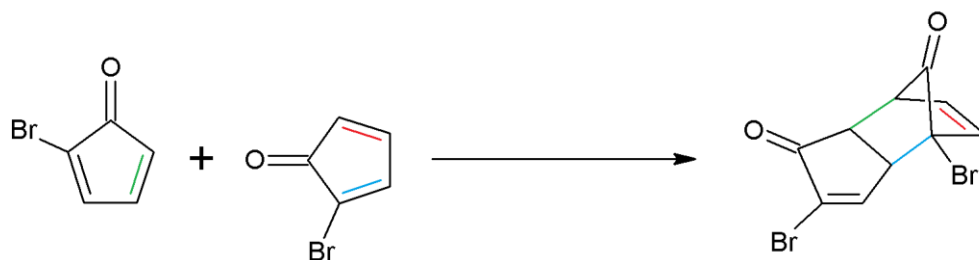
2,3,4-tribromcyclopentan-1-on podléhá reakci diethylaminu v prostředí diethyletheru dvojnásobné dehydrohalogenací za vzniku 2-bromcyclopenta-2,4-dien-1-onu. Dehydrohalogenace na pozici 2, 3 musí probíhat mechanismem syn – eliminace, protože orientace odstupujícího atomu bromu a protonu je díky předchozí reakci vždy syn – periplanární, zatímco dehydrohalogenace na pozici 4, 5 může probíhat mechanismem syn – eliminace i anti – eliminace (Obrázek 33).



**Obrázek 33:** Reakční schéma 3. kroku syntézy oktanitrokubanu.

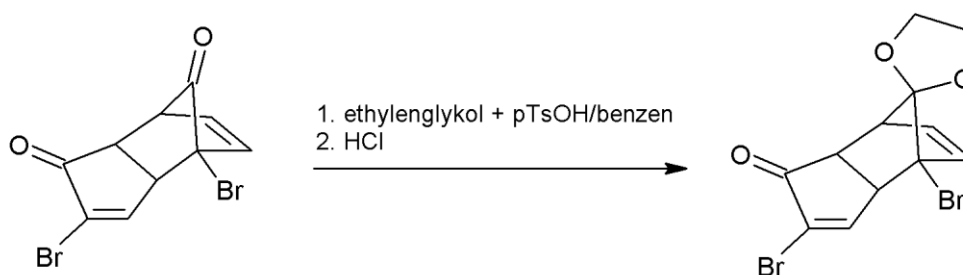
Dvě molekuly 2-bromcyclopenta-2,4-dien-1-onu samovolně podléhají intermolekulární adiční reakci (Diels – Alderova reakce) za tvorby tricyklického produktu. Jedna molekula vystupuje jako dien, druhá jako dienofil. Ze sterických důvodů vzniká pouze endoizomer, což je klíčové pro další kroky (Obrázek 34).





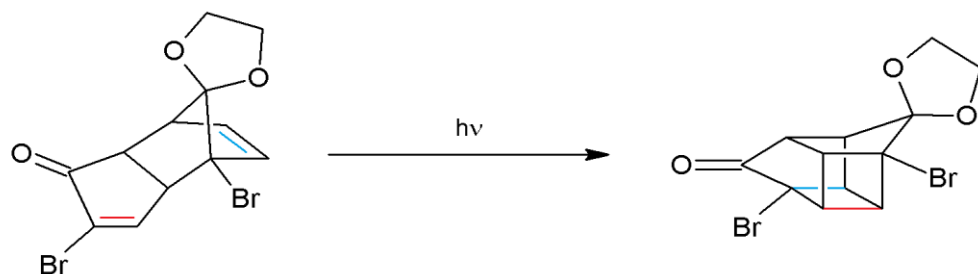
**Obrázek 34:** Reakční schéma 4. kroku syntézy oktanitrokubanu.

V dalším kroku jsou pomocí ethylenglykolu a p-toluensulfonové kyseliny v prostředí benzenu ochráněny karbonylové skupiny za vzniku ketalů. Jeden z ketalů se selektivně působením kyseliny chlorovodíkové vrací do původní formy (Obrázek 35).



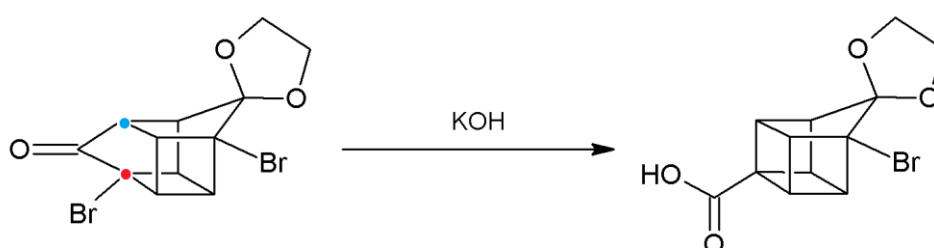
**Obrázek 35:** Reakční schéma 5. kroku syntézy oktanitrokubanu.

Ketal působením záření podléhá intramolekulární cykloadiční reakci (Obrázek 36).



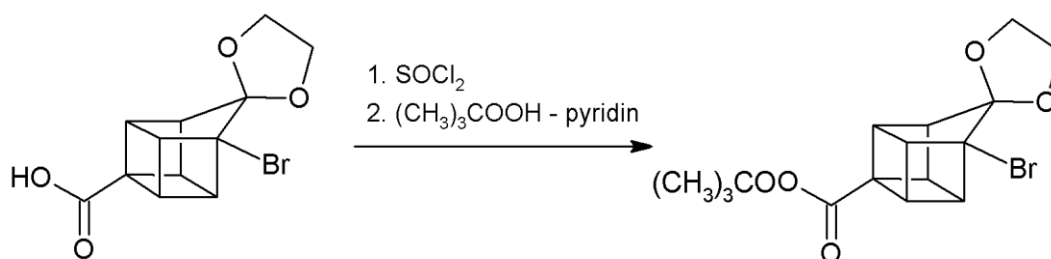
**Obrázek 36:** Reakční schéma 6. kroku syntézy oktanitrokubanu.

Působením vodného roztoku hydroxidu draselného podléhá molekula Favorského přesmyku. Hydroxid napadá proton, který je díky hyperkonjugaci elektronů C-H vazby s  $\pi$  elektrony karbonylové skupiny mírně kyselý (modrý uhlík), čímž vzniká enolát. Záporný indukční efekt bromu vytváří na atomu uhlíku, k němuž je vázáný, kladný parciální náboj, který je kompenzován elektrony enolátu za vzniku tricyklické struktury (nová vazba vzniká mezi modrým a červeným uhlíkem) a současného odstoupení atomu bromu. Následně hydroxid napadá karbonylovou skupinu (adice nukleofilní) a elektrony vstupují na atom sousedního uhlíku, přičemž se rozpadá nestabilní tříčlenný cyklus. Reakcí s molekulou rozpouštědla vzniká elektroneutrální molekula (Obrázek 37).



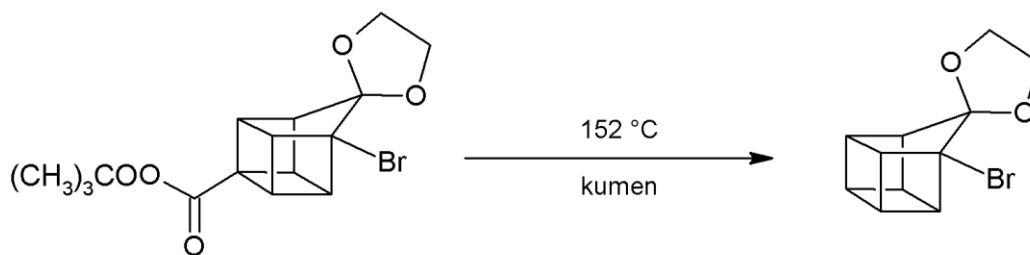
**Obrázek 37:** Reakční schéma 7. kroku syntézy oktanitrokubanu.

Karbonylová kyselina je nejprve působením thionylchloridu převedena na chlorid kyseliny, poté působením soli pyridinu na peroxyester kyseliny (Obrázek 38).



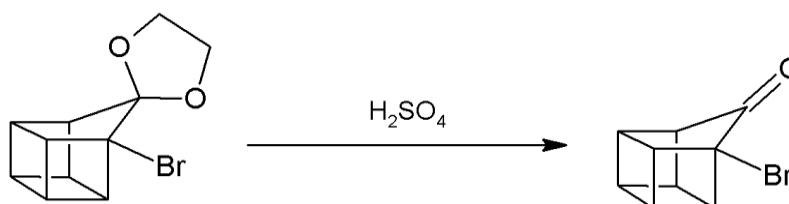
**Obrázek 38:** Reakční schéma 8. kroku syntézy oktanitrokubanu.

Peroxyester je dekarboxylován při 152 °C v prostředí kumenu (Obrázek 39).



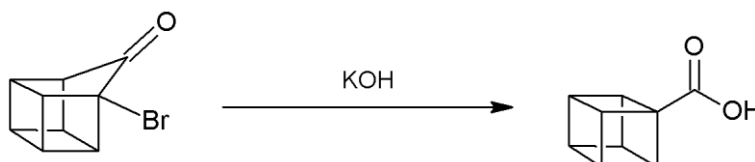
**Obrázek 39:** Reakční schéma 9. kroku syntézy oktanitrokubanu.

Ketal je převeden zpět na karbonylovou skupinu působením kyseliny sírové (Obrázek 40). Všimněte si, že od formace ketalu byly všechny meziprodukty udržovány v neutrálním nebo bazickém prostředí, aby nedošlo k jeho rozkladu.



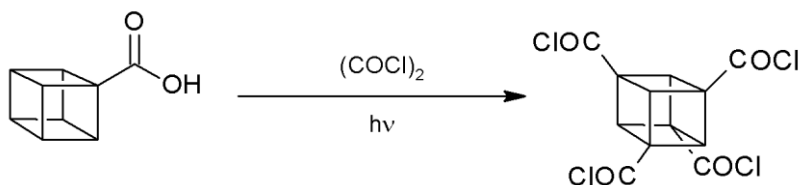
**Obrázek 40:** Reakční schéma 10. kroku syntézy oktanitrokubanu.

Působením hydroxidu draselného dochází opět k Favorského přesmyku a formaci karboxylové skupiny (Obrázek 41).



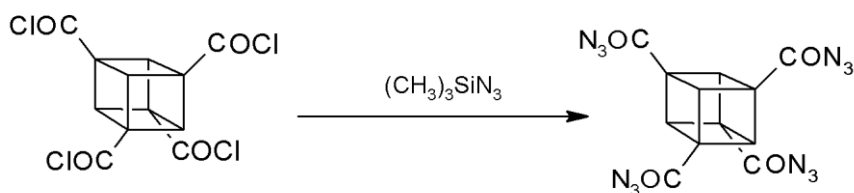
**Obrázek 41:** Reakční schéma 11. kroku syntézy oktanitrokubanu.

Účinkem ultrafialového záření na směs kubankarboxylové kyseliny a oxalylchloridu vzniká funkční chloroderivát kubantetrakarboxylové kyseliny (Obrázek 42).



**Obrázek 42:** Reakční schéma 12. kroku syntézy oktanitrokubanu.

Trimethylsilylazid vytěsňuje atomy chloru za vzniku acylazidu (obrázek 43).



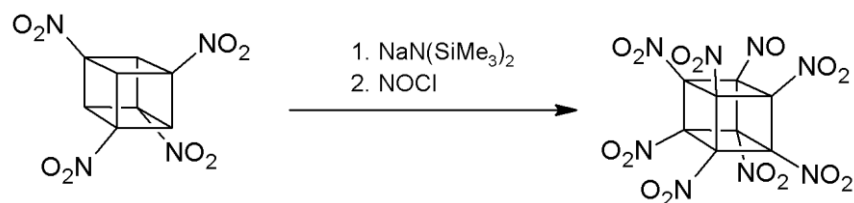
**Obrázek 43:** Reakční schéma 13. kroku syntézy oktanitrokubanu.

Působením dimethyldioxiranu vzniká tetranitroderivát kubanu (Obrázek 44).



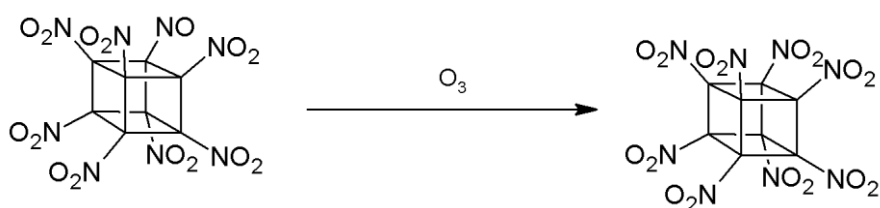
**Obrázek 44:** Reakční schéma 14. kroku syntézy oktanitrokubanu.

Reakcí bis(trimethylsilyl)amidu sodného a následným působením nitrosylu chloridu na tetranitrokuban dochází ke vzniku heptanitroderivátu kubanu. Na zbývající osmý uhlík je vázána nitrososkupina (Obrázek 45).



**Obrázek 45:** Reakční schéma 15. kroku syntézy oktanitrokubanu.

Ozon oxiduje nitrososkupinu a vzniká oktanitrokuban (Obrázek 46).



**Obrázek 46:** Reakční schéma 16. kroku syntézy oktanitrokubanu.

Tímto a jemu podobnými postupy bylo zatím syntetizováno jen pár miligramů oktanitrokubanu. Pro průmyslovou výrobu by bylo potřeba vyvinout novou, jednodušší metodu. Jako kineticky a termodynamicky schůdná se jeví být tetramerizace dinitroacetylenu, který je však nestabilní a nebyl ještě nikdy izolován (Obrázek 47).



**Obrázek 47:** Reakční schéma možné syntézy oktanitrokubanu. /5, 15, 35/

### 3. Praktická část

Praktická část je rozdělena do dvou hlavních částí. První část je věnována dotazníkovému šetření a analýze středoškolských učebnic. Druhá část je zaměřena na tvorbu výukového modulu, který se skládá z powerpointové prezentace a návrhů zařazení některých experimentů do výuky chemie na středních školách. Výsledkům získaných při řešení první části byl přizpůsoben výukový modul, který je tak do jisté míry odpovědí na reakce učitelů a postavení tématu výbušnin ve středoškolských učebnicích chemie.

#### 3.1 Analýza středoškolských učebnic chemie

Bylo analyzováno celkem 19 středoškolských učebnic chemie, z toho 15 českojazyčných a 4 cizojazyčné (v anglickém jazyce). Učebnice byly vybrány na základě několika kritérií. Hlavním kritériem bylo to, zda se konkrétní učebnice ve výuce chemie na středních školách používá či nikoliv. Dále pak bylo přihlíženo k názvu a popisu publikace. Pokud název a popis vypovídal o tom, že by kniha mohla obsahovat informace týkající se výbušnin, ať už informace související s teorií (výroba, vlastnosti, užití) nebo s praxí (návody na přípravu těchto sloučenin), byla taková publikace do analýzy rovněž zařazena. Posledním kritériem byl rok vydání. Nejstarší učebnice, která byla podrobena analýze, byla vydána roku 1995, většina je však mladších roku 2000. Cílem analýzy bylo zjistit, v jaké frekvenci a v jaké podobě jsou informace týkající se výbušnin ve středoškolské literatuře přítomny.

##### 3.1.1 Českojazyčná literatura

Hranoš, Přemysl. **Anorganická technologie: studijní text pro SPŠCH**. 1. vydání. Ostrava: Pavel Klouda, 2000. ISBN 80-86369-01-3

Učebnice je určena pro studenty středních průmyslových škol chemických. Lze ji také použít pro střední odborná učiliště a vysoké školy chemického zaměření. Zabývá se zpracováním základních anorganických surovin, výrobou meziproductů a finálních produktů. Autor zmiňuje roli kyseliny dusičné v průmyslu výbušnin, roli kyseliny dusičné v nitrační směsi, červený fosfor, jako součást třecí plochy krabičky zápalek a dýmovnic, chlorečnan draselný ve výrobě výbušnin, ohňostrojů a zápalek, chloristany a jejich užití v pyrotechnice, termický rozklad dusičnanu amonného, který může přejít v detonaci a použití hliníku při aluminotermii, výrobě prskavek a v zábavní pyrotechnice. /36/

Janeczková, Anna – Fialová, Anna – Šima, Marek. **Chemická laboratorní cvičení II: pro 2. ročník SPŠCH**. 1. vydání. Ostrava: Pavel Klouda, 2004. ISBN 80-86369-09-9

Jedná se o učebnici laboratorních cvičení pro druhé ročníky SPŠ nebo odborná učiliště. Úkoly jsou zaměřeny na organickou chemii. Jedna z úloh se věnuje nitraci benzenu na nitrobenzen a obsahuje zmínku o nitrační směsi, avšak ne v přímé souvislosti s výbušninami. /37/

Čtrnáctová, Hana – et al. **Chemické pokusy pro školu a zájmovou činnost**. 1. vydání. Praha: Prospektum, 2000. ISBN 80-7175-057-3

Jedná se o soubor celkem 365 pokusů z oblasti obecné, anorganické, organické, analytické chemie a biochemie, které jsou vhodné jak pro výuku chemie na základních i středních školách. V pokusu nazvaném „Příprava kyslíku rozkladem kyslíkatých látek“ je zmínka o tom, že chlorečnan draselný znečištěný organickou látkou při zahřátí vybuchuje. V pokusu nazvaném „Reakce ethynu se solemi kovů (acetylidy)“ je uveden podrobný návod na přípravu acetylidu stříbrného i se všemi možnými riziky spojenými s jeho přípravou a uchováváním. Rovněž je zde uveden návod na přípravu acetylidu měďného. Pokus nazvaný „Bromace a nitrace fenolu“ popisuje vznik kyseliny pikrové působením nitrační směsi na fenol a upozorňuje na to, že se jedná o výbušninu. Nitrace samotná je popsána jako substituce elektrofilní, ovšem bez vysvětlení mechanismu, u přípravy nitronaftalenu. Experiment označený jako „Tepelný rozklad dusičnanu draselného“ popisuje pokus známý jako „peklo ve zkumavce“. Všechny chemické děje jsou popsány chemickou rovnicí. /38/

Mareček, Aleš – Honza, Jaroslav. **Chemie pro čtyřletá gymnázia. 1. díl**. 1. vydání. Olomouc: Nakladatelství Olomouc, 1998. ISBN 80-7182-055-5

Knihy je určena pro studenty prvních ročníků čtyřletých gymnázií a odpovídajících ročníků gymnázií víceletých. Je zaměřena na chemii obecnou, chemii nepřechodných prvků a anorganické názvosloví. Zmiňuje dusičnan draselný jako součást střelného prachu, výbušnost kovalentních azidů, roli kyseliny dusičné a sírové při výrobě výbušnin a aluminotermickou reakci. /39/

Mareček, Aleš – Honza, Jaroslav. **Chemie pro čtyřletá gymnázia. 2. díl**. 1. vydání. Brno: DaTaPrint, 1996. ISBN 80-902200-4-5

Kniha rozšiřuje poznatky z obecné chemie z prvního dílu, zabývá se kovy přechodnými a vnitřně přechodnými, analytickou chemií, najdeme zde úvod do studia organické chemie a názvosloví komplexních sloučenin. Učebnice zmiňuje pouze výbušnost acetylidů těžkých kovů. /40/

Mareček, Aleš – Honza, Jaroslav. **Chemie pro čtyřletá gymnázia. 3. díl.** 1. vydání. Olomouc: Nakladatelství Olomouc, 2000. ISBN 80-7182-057-1

Učebnice navazuje na druhý díl a je zaměřena na deriváty uhlovodíků a biochemii. Najdeme zde popis výroby nitroglycerinu a jeho souvislost s dynamitem a Alfredem Nobellem, označuje kyselinu pikrovou a trinitrotoluen za trhaviny, vysvětluje pojem nitrační směs, podrobný mechanismus nitrace jako substituce elektrofilní i jako reakce radikálové. /41/

Fleml, Vratislav – Dušek, Bohuslav. **Chemie I pro gymnázia: obecná a anorganická.** 1. vydání. Praha: SPN – pedagogické nakladatelství, 2001. ISBN 80-7235-147-8

Učebnice je určena pro výuku chemie v prvních a druhých ročnících čtyřletých gymnázií nebo vyšších ročnících gymnázií víceletých. Zahrnuje kapitoly z obecné a anorganické chemie. Zmiňuje chlorečnan draselný jako součást hlaviček zápalek, světlic, ohňostrojů a teroristických výbušnin, aluminotermii, syntézu amoniaku v kontextu první světové války, vysvětluje pojem nitrace, nitrační směs a střelný prach, uvádí názvy a vzorce nitroglycerinu, trinitrotolueny a hexogenu, u něhož zmiňuje, že se jedná o složku semtexu. Rovněž upozorňuje, že se jedná o výbušniny. /42/

Kolář, Karel – Kodíček, Milan – Pospíšil, Jiří. **Chemie II pro gymnázia: organická a biochemie.** 1. vydání. Praha: SPN – pedagogické nakladatelství, 2000. ISBN 80-85937-49-2

Učebnice je určena pro výuku chemie na čtyřletých gymnáziích nebo ve vyšších ročnících gymnázií víceletých. Navazuje na první díl této dvoudílné řady. Zaměřuje se na kapitoly z organické chemie a biochemie. Autor zmiňuje nitrací a nitrační směs, avšak ne v přímé souvislosti s výbušninami, dále pak nitroglycerin, jeho výrobu a souvislost s dynamitem, výbušné vlastnosti kyseliny pikrové a acetylidu stříbrného a měďného. Jedna z otázek se žáků ptá, co vše vědí o trinitrotolueny. /43/

Banýr, Jiří – et al. **Chemie pro střední školy.** 2. Vydání. Praha: SPN – pedagogické nakladatelství, 1999. ISBN 80-85937-46-8



Publikace je určena žákům a učňům středních škol, odborných škol a učilišť nechemického zaměření. Nabízí základní kapitoly z obecné, anorganické, organické, analytické chemie a biochemie. Autoři zmiňují roli kyseliny dusičné a sírové ve výrobě výbušnin, dále termit a aluminotermickou reakci, nitraci, trinitrotoluen, kyselinu pikrovou, nitroglycerin v souvislosti s dynamitem a Alfredem Nobelem, acetylidy těžkých kovů, konkrétně acetylidu stříbrného a měďného. Vysvětlují princip vznícení zápalek. /44/

Blažek, Jaroslav – Fabini, Ján. **Chemie: pro studijní obory SOŠ a SOU nechemického zaměření**. 5. vydání. Praha: SPN-pedagogické nakladatelství, 1999. ISBN 80-7235-104-4

Učebnice je určena pro střední odborné školy a střední odborná učiliště nechemického zaměření. Zaměřuje se na obecnou, anorganickou a organickou chemii. Je zmíněna aluminotermická výroba kovů, role kyseliny dusičné a sírové při výrobě výbušnin, nitrace ve smyslu substituce elektrofilní, nitrační směs, výbušné vlastnosti trinitrotoluen, fosfor v souvislosti se zápalkami, výroba výbušnin z ethylenglykolu a glycerolu. /45/

Růžičková, Květoslava – Kotlík, Bohumír. **Chemie I. v kostce: pro střední školy: (obecná a anorganická chemie, výpočty v oboru chemie)**. 4. vydání. Havlíčkův Brod: Fragment, 2005. ISBN 80-253-0031-5

Učebnice vychází z osnov pro gymnázia. Je zaměřena na chemii obecnou a anorganickou. Zmiňuje síru jako součást střelného prachu, červený fosfor jako složku zápalek a aluminotermickou reakci. /46/

Bárta, Milan. **Jak (ne)vyhodit školu do povětří: (Horákova chemická kuchařka pro malé i velké experimentátory: chemické pokusy pro žáky 8. a 9. tříd, studenty středních škol a jejich nadšené učitele)**. 1. vydání. Brno: Didaktis, 2004. ISBN 80-86285-99-5

Publikace, ve které nalezneme 48 časově většinou nenáročných a jednoduchých pokusů, je určena pro výuku chemie na základních a středních školách. Je zde uveden návod na přípravu pyrotechnické slože používané k výrobě prskavek, bengálského ohně z pudinku, střelného prachu ve formě pekla ve zkumavce a jododusíku. Jeden z efektních pokusů názorně vysvětluje princip, na kterém fungují dýmovnice. Většinu pokusů také popisují chemické rovnice. /47/

Marvánová, Hana – Čtrnáctová, Hana – Vasilešská, Marie. **Nebezpečné látky ve školní laboratoři**. Praha: Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta, 2007. ISBN 978-80-86561-88-2

Publikace pojednává o chemických látkách a jejich nebezpečných vlastnostech pro člověka a životní prostředí. Uvádí přehled zákonných norem, které tuto problematiku upravují. Je zde zmínka o nitroglycerinu v souvislosti s dynamitem a Alfredem Nobelem, výbušnosti chlorečnanů ve směsi s organickou látkou. Jsou zde zmíněny výbušné vlastnosti kyseliny pikrové a využití trinitrotoluenu jako součásti vojenských a průmyslových trhavin. /48/

Janeczková, Anna – Klouda, Pavel. **Organická chemie: studijní text pro SPŠCH**. 2. vydání. Ostrava: Pavel Klouda, 2001. 80-86369-04-8

Tato učebnice je určena pro obor Aplikovaná chemie středních průmyslových škol chemických, případně pro ostatní střední školy. Podrobně popisuje reakční mechanismus nitrace, vysvětluje pojem nitrační směs, z výbušnin uvádí pouze trinitrotoluen. /49/

Vacík, Jiří – et al. **Přehled středoškolské chemie**. 4. vydání. Praha: Pedagogické nakladatelství, 1999. ISBN 80-7235-108-7

Publikace shrnuje poznatky z obecné, anorganické, organické chemie a biochemie. Je určena pro výuku na střední škole, jako zdroj informací pedagogům a studujícím chemii. Je zde zmínka o explozivních vlastnostech chlorečnanů ve směsi s organickými látkami a jejich použitím k výrobě třaskavin, střelivin a zápalek. Chloristany jsou zde zmíněny v souvislosti s pyrotechnikou jako bezpečnější náhrada za chlorečnany, červený fosfor jako součást škrtačí plochy krabičky zápalek. Zmiňuje aluminotermickou reakci při výrobě některých kovů, roli kyseliny dusičné při výrobě výbušnin, výbušné vlastnosti acetylidů těžkých kovů, nitroglycerinu, trinitrotoluenu a kyseliny pikrové. Je zde podrobně popsán mechanismus nitrace. Jako jediná z analyzovaných českých učebnic obsahuje samostatnou kapitolu „Výbušniny“, ve které jsou výbušniny definovány, rozděleny do tří skupin na střeliviny, trhaviny a třaskaviny (pyrotechnické slože nejsou zahrnuty). U každé skupiny je uvedeno její hlavní poslání. Jako zástupce střelivin je uveden střelný prach společně s jeho složením a střelná bavlna. Trhaviny reprezentuje nitroglycerin a trinitrotoluen. Jsou uvedeny jejich

strukturní vzorce a základní popis. Jako nejpoužívanější třaskavina je představen fulminát rtuťnatý. /50/

### 3.1.2 Cizojazyčná literatura

Clugston, Michael – Flemming, Rosalind. **Advanced chemistry**. Oxford University Press, 2011. ISBN 978-0-19-914633-8

Učebnice byla napsána pro studenty středních škol. Obsahuje kapitoly z fyzikální, anorganické, organické chemie a biochemie. Zmiňuje se o Haber-Boschově syntéze amoniaku v souvislosti z výrobou výbušnin a první světovou válkou, nitrační směsi, trinitrotoluenu, kyselině pikrové a nitroglycerinu (všechny tři pouze označuje za výbušniny) a podrobně popisuje mechanismus nitrace. /51/

Atkinson, John – Hibbert, Carol. **AS Chemistry for AQA**. 1. vydání. Heinemann, 2000. ISBN 978-0435581343

Učebnice slouží primárně jako doplňkový text pro výuku chemie na středních školách. Zabývá se obecnou a anorganickou chemií a úvodem do organické chemie. Učebnice nepředkládá žádné informace o výbušninách. /52/

Hill, Graham C. – Holman, John S. **Chemistry in Context**. 3. vydání. Nelson Thornes Ltd., 1995. ISBN 0-17-448163-2

Tato publikace je určena zejména studentům, kteří studují chemii na pokročilejší úrovni. Obsahuje kapitoly z obecné, anorganické a organické chemie. Zmiňuje použití kyseliny dusičné a sírové pro výrobu výbušnin, roli Haber-Boschovy syntézy amoniaku v širším historickém kontextu (1. Světová válka), důkladně popisuje mechanismus nitrace. Obsahuje také kapitolu výbušniny („explosives“), ve které jsou výbušniny popsány (jednoduchý popis výbušné přeměny, porovnání kyslíkové bilance nitroglycerinu oproti TNT a kyselině pikrové na základě rovnice rozkladu nitroglycerinu, upozornění na nebezpečí při výrobě výbušnin). Za příklady jsou dány nitroglycerin, trinitrotoluen, kyselina pikrová, nitrocelulóza. Rovněž jsou uvedeny vzorce těchto čtyř sloučenin. Je zde uveden popis stabilizace nitroglycerinu Alfredem Nobelem. Trinitrotoluen je v kapitole „Mechanismus substitučních reakcí probíhajících na benzenovém jádře“ („Mechanism of substitution reactions of benzene“)

popsán obšírněji. Je zde důkladný popis jeho výroby, zmínka o jeho nízké teplotě tání, což usnadňuje laboraci, a nízké citlivosti na mechanické podněty, například výstřel ze zbraně. /53/

Hill, Graham C. – Holman, John S. **Chemistry in Context**. 6. vydání. Nelson Thornes & Sons Ltd., 2011. ISBN 978-1-4085-1496-2

Tato publikace je určena zejména studentům, kteří studují chemii na pokročilejší úrovni. Obsahuje kapitoly z obecné, anorganické a organické chemie. Zmiňuje použití kyseliny dusičné a sírové pro výrobu výbušnin, důkladně popisuje mechanismus nitrace. Obsahuje také kapitolu Výbušniny („Explosives“), ve které jsou výbušniny popsány (jednoduchý popis výbušné přeměny, porovnání kyslíkové bilance nitroglycerinu oproti TNT a kyselině pikrové na základě rovnice rozkladu nitroglycerinu, upozornění na nebezpečí při výrobě výbušnin). Za příklady jsou dány nitroglycerin, trinitrotoluen, nitrocelulóza. Trinitrotoluen je v kapitole „Mechanismus substitučních reakcí probíhajících na benzenovém jádře“ („Mechanism of substitution reactions of benzene“) popsán obšírněji. Je zde základní popis jeho výroby, zmínka o jeho nízké teplotě tání, což usnadňuje laboraci a nízké citlivosti na mechanické podněty, například výstřel ze zbraně. Popisuje stabilizaci nitroglycerinu Alfredem Nobelem. /54/

### 3.2 Dotazníkové šetření

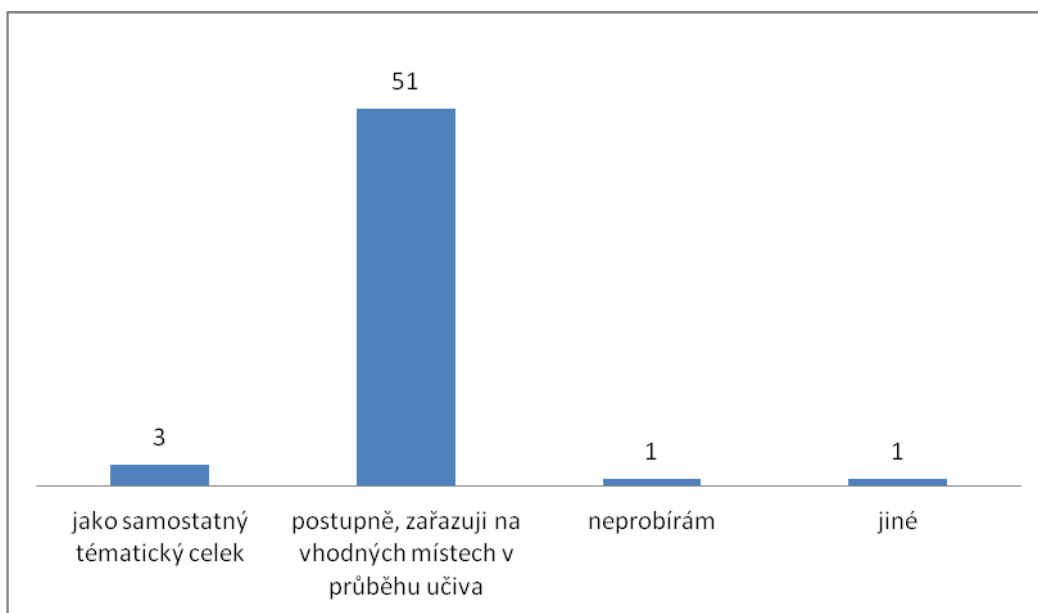
Cílem dotazníkového šetření byla snaha zmapovat současnou situaci týkající se postavení problematiky výbušnin ve výuce na čtyřletých gymnáziích. V neposlední řadě mělo také sloužit jako podklad k tvorbě teoretické části i výukového modulu.

Dotazníky byly vytvořeny prostřednictvím služby Google Docs a odeslány na 235 emailových adres středoškolských učitelů chemie. Každý dotazník sestával z osmi otázek, přičemž v závislosti na odpovědi na otázku č. 3 (filtrační otázka) byl respondent odkázán na otázku č. 4 a 5 nebo na otázku č. 6. Po zodpovězení těchto, všichni respondenti pokračovali otázkou č. 7, tzn. že každý respondent odpověděl minimálně na 6 otázek (maximálně pak na 7) z celkového počtu osmi. 4 otázky byly polouzavřené (č. 1, 2, 4 a 5), 3 uzavřené (č. 3, 6, a 7) a 1 otevřená (č. 4). U otázek č. 1, 3, 6, 7 a 8 bylo možné označit pouze jednu odpověď. V případě, že žádná z uvedených možností respondentovi nevyhovovala, měl u otázek č. 1, 2, 5 a 8 možnost označit pole „jiné“ a svou odpověď specifikovat blíže. Získaná data z 56 příchozích odpovědí (návratnost 24 %) byla zpracována ve formě grafů. O výukové materiály projevil zájem 49 z 56 respondentů. Kompletní dotazník je součástí příloh.

**První otázka** byla zaměřena na to, zda učitelé výbušniny ve výuce chemie vůbec probírají a pokud ano, tak jakým způsobem. Otázka byla položena proto, abych zjistil jakým stylem učitelé toto téma probírají, a mohl tak případně reagovat vhodnými úpravami v powerpointové prezentaci. Na výběr byly 3 předvolené odpovědi:

- a) jako samostatný tematický celek,
- b) postupně, zařazují na vhodných místech v průběhu učiva,
- c) neprobírám.

Možné bylo také zformulovat vlastní odpověď, přičemž respondent mohl zvolit pouze jednu ze čtyř možných odpovědí. Podle příchozích odpovědí 51 respondentů probírá výbušniny postupně a zařazuje je na vhodných místech v průběhu školního roku. 3 respondenti probírají výbušniny jako samostatný tematický celek, 1 respondent výbušniny neprobírá. Jeden respondent využil možnosti „jiné“ a odpověděl „probírám podle témat“. Odpovědi shrnuje Graf 1.

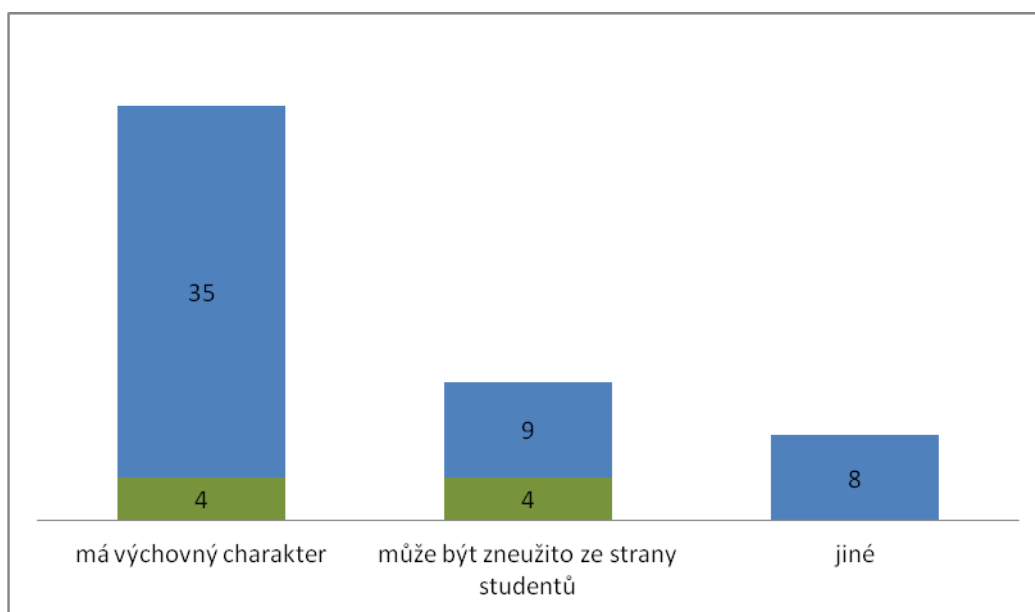


**Graf 1:** Grafické vyjádření odpovědí na otázku „Výbušniny probíráte:“

V odpovědích na **druhou otázku** se měli učitelé vyjádřit, jak pohlíží na zařazení tohoto tématu do výuky chemie na středních školách. Otázka byla položena z toho důvodu, abych zjistil, zda by nebylo vhodnější vynechat, či jen částečně uvést syntézy potenciálně nebezpečnějších látek. Na výběr byly dvě předvolené odpovědi:

- a) má výchovný charakter
- b) může být zneužito ze strany studentů

Možné bylo opět označit možnost „jiné“, u které mohl respondent na otázku odpovědět podle svého uvážení. U této otázky bylo možné současně označit odpověď a) i b). Zastoupení odpovědí bylo následující: 35 respondentů si myslí, že zařazení poznatků o výbušninách do středoškolské výuky má výchovný charakter, 9 respondentů zastává názor, že tyto poznatky mohou být zneužity ze strany studentů. 4 respondenti si myslí, že zařazení poznatků o výbušninách má výchovný charakter, ale na druhou stranu může být také ze strany studentů zneužito (v grafu 2 vyjádřeno zeleně). Dalších 8 respondentů odpovědělo na otázku následovně: je to téma, které studenty zajímá, takže spíš z motivačních důvodů; má běžný výukový a informační charakter; prevence; zatím jsem nezkoušela, bojím se zneužití; patří do učiva; má vzdělávací charakter; studenty zajímá; může zaujmout studenty a zlepšit jejich vztah k chemii a objasnit některé principy přeměny látek. Tyto výsledky shrnuje Graf 2.

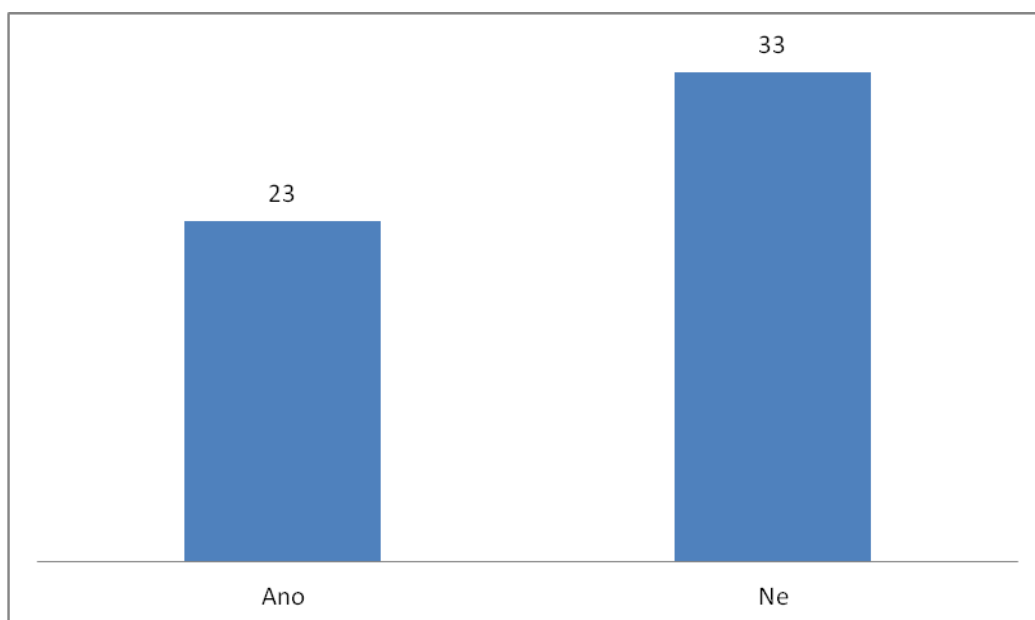


**Graf 2:** Grafické vyjádření odpovědí na otázku „Myslíte si, že zařazení poznatků o výbušninách do výuky:“

**Třetí otázka** měla ukázat, zda mají učitelé zkušenosti s přípravou výbušnin pro účely výuky. Pokud by se ukázalo, že by podstatná část tyto zkušenosti neměla, budou vypracovány návody k bezpečným a časově nenáročným experimentům a tyto budou také zaznamenány ve formě videozáznamu. Otázka byla uzavřená a možné odpovědi byly:

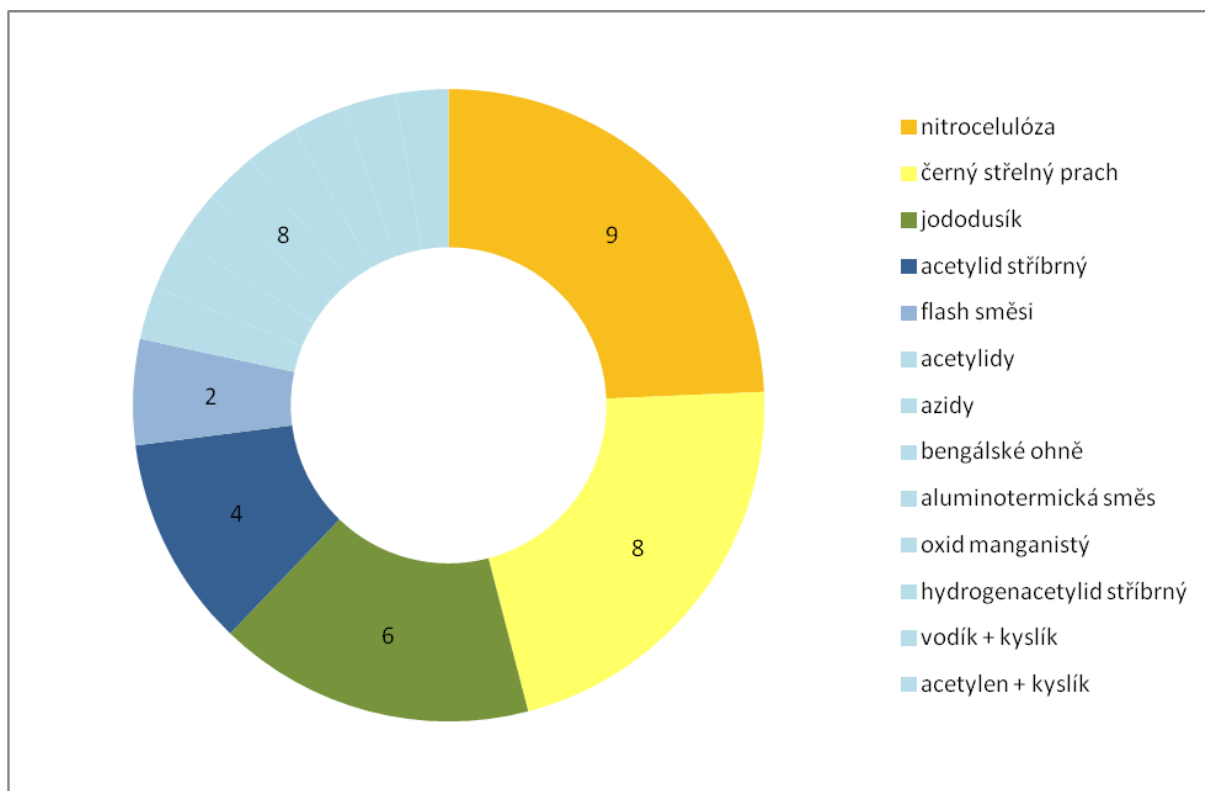
- a) Ano
- b) Ne

23 respondentů má zkušenost s přípravou některé z výbušnin pro účely výuky, 33 respondentů nemá zkušenost s přípravou některé z výbušnin pro účely výuky. Otázka byla filtrační, a proto první skupina odpovídala na následující otázku č. 4 a č. 5, druhá skupina odpovídala až na otázku č. 6. Výsledky ukazuje Graf 3.



**Graf 3:** Grafické vyjádření odpovědí na otázku „Máte zkušenost s přípravou některé z výbušnin pro účely výuky?“

**Čtvrtá otázka** měla ukázat, jaké sloučeniny učitelé na středních školách připravují. V případě, že by všichni nebo většina z respondentů opomněla zmínit nějakého didakticky významného zástupce, bude takový přednostně zařazen do výukového modulu. Otázka byla otevřená. Ze skupiny 23 respondentů, kteří již mají zkušenost s přípravou některé z výbušnin pro účely výuky, připravilo v minulosti 9 z nich nitrocelulózu, 8 černý střelný prach, 6 jododusík, 4 acetylid stříbrný, 2 z nich flash směsi a po jednom acetylidy, azidy, bengálské ohně, aluminotermickou směs, oxid manganistý, plynnou směs vodíku a kyslíku, acetylen a kyslíku a hydrogenacetylid stříbrný. Výsledky shrnuje Graf 4.



**Graf 4:** Grafické vyjádření odpovědí na otázku „Jakou výbušninu jste již připravovali za účelem demonstrace jejich vlastností?“

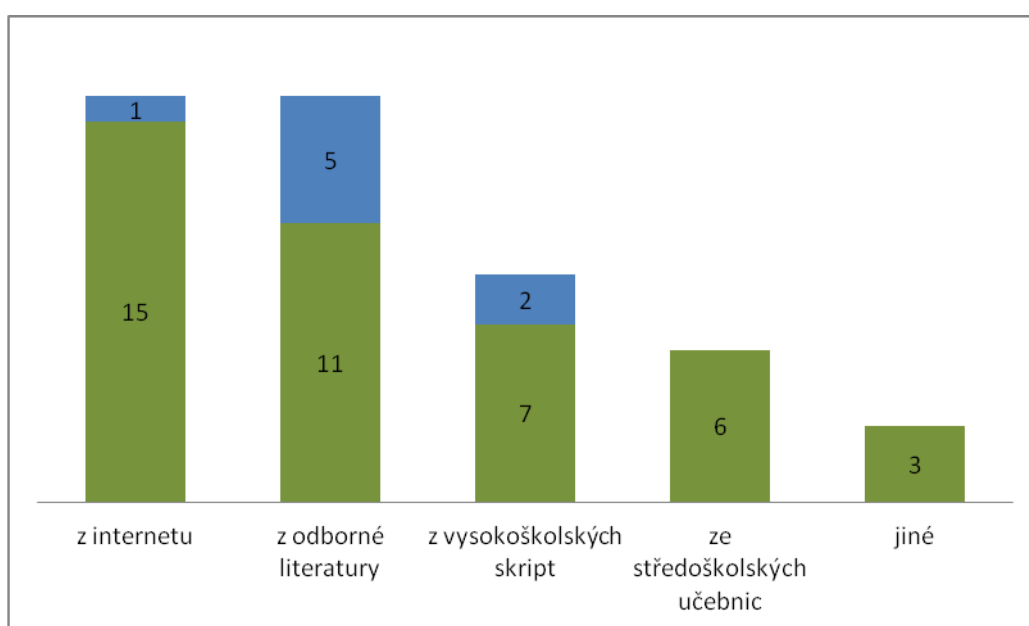
**Pátá otázka** měla objasnit, z jakých pramenů učitelé pro své experimenty čerpají inspiraci. Bylo možné označit čtyři předdefinované odpovědi:

- z internetu
- z odborné literatury
- z vysokoškolských skript
- ze středoškolských učebnic

Respondenti mohli zaškrtnout více hodících se odpovědí. Opět zde byla i možnost zvolit položku „jiné“ a dopsat alternativní zdroj či zdroje. Z šetření vyplynulo, že 15 respondentů získává podklady pro experimenty z internetu v kombinaci s jinými v grafu uvedenými zdroji, jeden respondent získává potřebné podklady pouze z internetu, celkem čerpá z internetu 16 respondentů. 11 respondentů získává podklady z odborné literatury v kombinaci s jinými zdroji, 5 respondentů získává podklady pouze z odborné literatury, celkem z odborné literatury čerpá 16 respondentů. Z vysokoškolských skript a dalších zdrojů čerpá 7 respondentů, vysokoškolská skripta jako jediný podklad pro experimenty používají 2 respondenti. Celkem z vysokoškolských skript čerpá 9 respondentů. Ze středoškolských



učebnic čerpá v kombinaci s jinými zdroji 6 respondentů. Jako jediný zdroj informací pro experimenty neslouží středoškolské učebnice žádnému z respondentů. 3 respondenti uvedly i jiné prameny, z nichž, krom jiných, také čerpají, a sice tyto: TV, semináře v DVPP, cokoliv ověřeného; od kolegů na střední i vysoké škole; ze školení. Výsledky shrnuje Graf 5. Zelená barva sloupce značí, že je tento zdroj využíván v kombinaci s jedním nebo s více dalšími zdroji, proto celkový součet respondentů nedává hodnotu 23, což je původní počet respondentů, který odpovídal na tuto otázku (jeden respondent může být v grafu přítomen u více položek – pak je označen zeleně).

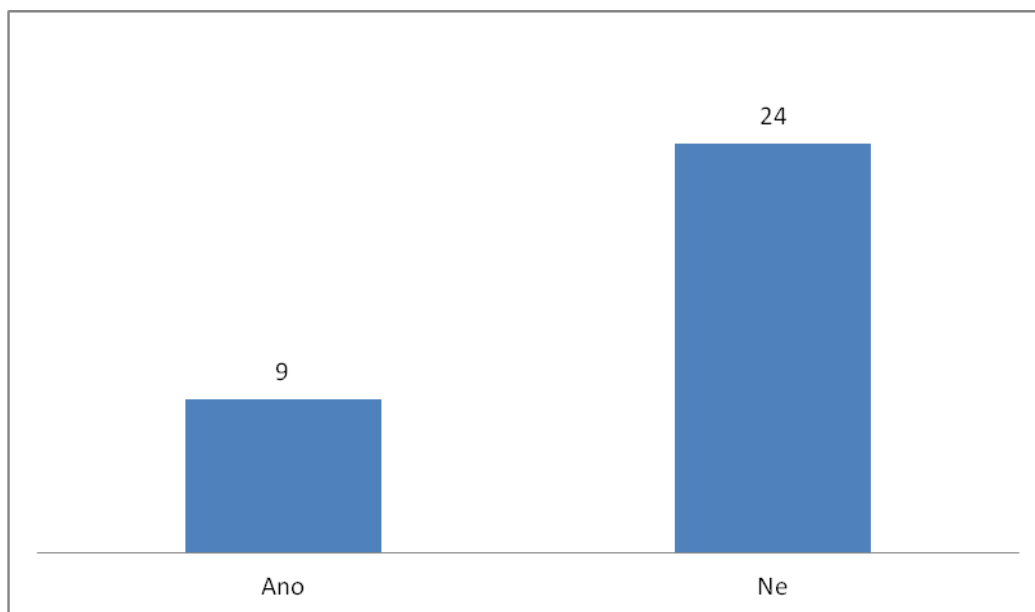


**Graf 5:** Grafické vyjádření odpovědí na otázku „Podklady pro experimenty získáváte:“

**Šestá otázka** byla položena skupině 33 respondentů, kteří podle otázky č. 3 dosud nemají zkušenost s přípravou některé z výbušnin pro účely výuky. Ptala se, zda by měli dostatek jistoty pro to, aby výbušninu pro účely výuky sami připravily. Případné negativních odpovědi by jen zvýraznily nutnost experimenty natočit. Možnosti odpovědi byly:

- a) Ano
- b) Ne

9 respondentů by si dovolilo pro účely výuky výbušninu připravit, 24 respondentů nikoliv. Odpovědi ukazuje Graf 6.

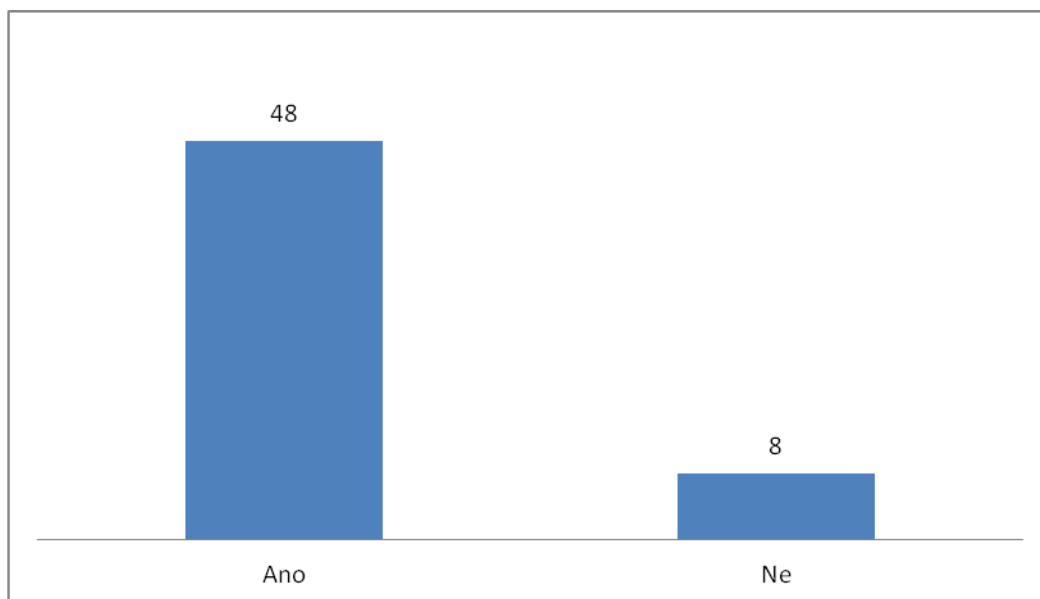


**Graf 6:** Grafické vyjádření odpovědí na otázku „Dovolili byste si výbušninu pro potřeby výuky sami připravit?“

Na *sedmou otázku* již odpovídalo všech 56 respondentů. Otázka měla ukázat, zda si učitelé myslí, že by zařazení video - experimentů s výbušninami do výuky mohlo zvýšit zájem žáků o chemii. Bylo na ni možno odpovědět:

- a) Ano
- b) Ne

Případné kladné odpovědi by jen podpořily nutnost experimenty zaznamenat na videokameru.. 48 respondentů souhlasí s názorem, že by zařazení video – experimentů s výbušninami do výuky mohlo zvýšit zájem studentů o chemii, 8 z nich se s tímto názorem neztotožňuje. Výsledky ukazuje Graf 7.

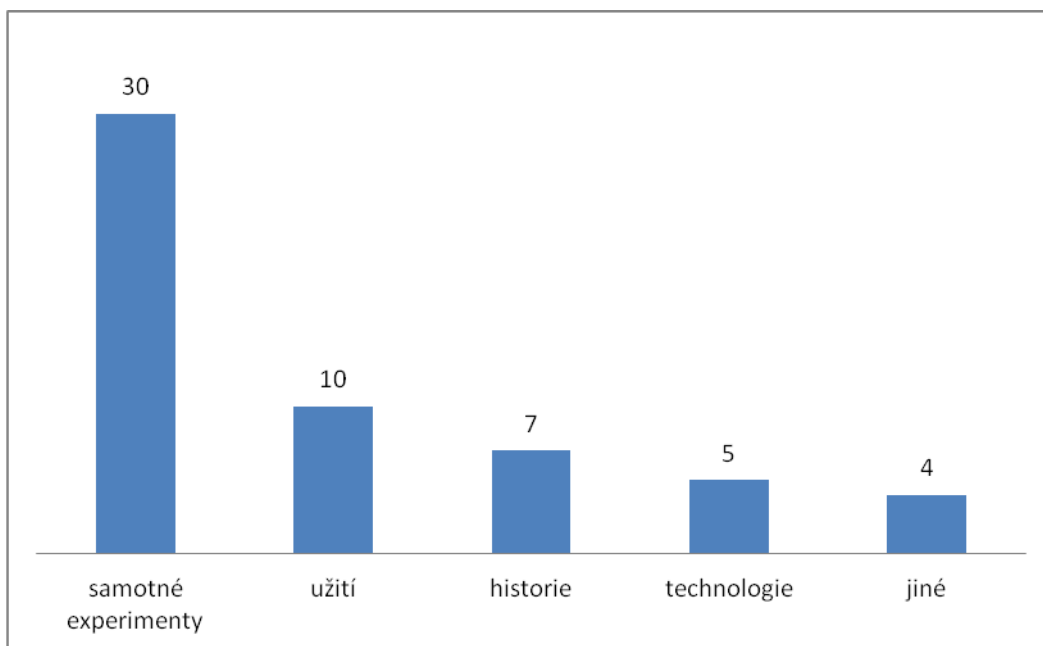


**Graf 7:** Grafické vyjádření odpovědí na otázku „Myslíte si, že by zařazení video - experimentů s výbušninami do výuky mohlo zvýšit zájem žáků o chemii?“

**Osmá otázka** byla směřována na to, jaká oblast problematiky výbušnin by učitele nejvíce zajímala. Počty odpovědí u jednotlivých položek ukáží na míru jejich důležitosti a ta bude promítnuta do výukového modulu. Na otázku bylo možné odpovědět v předdefinovaných odpovědích:

- a) samotné experimenty
- b) užití
- c) historie
- d) technologie

Respondenti měli možnost odpovědět i podle svého uvážení (možnost „jiné“). Bylo možno označit jen jednu odpověď. 30 respondentů by nejvíce zajímaly samotné experimenty, 10 respondentů užití, 7 historie, 5 technologie, 4 respondenty by nejvíce zajímalo vše výše uvedené. Výsledky shrnuje Graf 8.



**Graf 8:** Grafické vyjádření odpovědí na otázku „Jaká oblast této problematiky by Vás nejvíce zajímala?“

### 3.3 Shrnutí informací získaných analýzou učebnic a dotazníkovým šetřením

Rozložení informací týkajících se výbušnin napříč středoškolskými učebnicemi chemie je nerovnoměrné. Rozdíly mezi učebnicemi jsou dány jednak odlišným zaměřením a posláním učebnic a také tím, jakou důležitost autor tomuto tématu přikládá. Tři učebnice obsahují zvláště vyčleněnou kapitolku věnující se výbušninám, ostatní začleňují téma průběžně. Často se jedná pouze o strohé informace, které nemohou sloužit jako podklad k ucelenějšímu a hlubšímu výkladu. Právě proto byla vypracována teoretická část, která může posloužit jako vhodný zdroj informací z této oblasti.

Z dotazníkového šetření vyplynulo, že naprostá většina středoškolských učitelů chemie (51 z 56) zařazuje informace týkající se výbušnin do výuky postupně v průběhu celého školního roku, což také koresponduje se strukturou většiny analyzovaných středoškolských učebnic. Proto je prezentace, která je součástí výukového modulu, rozdělena do více souborů podle jednotlivých podtémat (historie, třaskaviny, střeliviny, ...) tak, aby se učitel mohl během výuky v prezentacích lépe orientovat a v případě potřeby rychleji přecházet z jednoho tématu na druhé. Někomu nemusí toto řešení vyhovovat, a proto je k dispozici také prezentace celá (nerozdělená do více souborů).

Většina učitelů (39) potvrdila výchovný charakter tématu, menší část (13) už si uvědomuje i nebezpečí nabytých poznatků v rukou studenta. Proto je u přípravy většiny sloučenin v prezentaci uvedena pouze rovnice, nikoliv podrobný popis přípravy. Většinou zde záměrně chybí reakční podmínky. U peroxidů není rovnice uvedena, vzhledem ke snadnosti přípravy a dostupnosti surovin, vůbec. Je na zvážení a odpovědnosti každého učitele, zda prezentaci těmito informacemi sám doplní.

Necelá polovina (24) má zkušenost s přípravou některé z výbušnin, ostatní (33) nikoliv. Proto jsou součástí prezentace/í také video – experimenty, které mohou první skupině učitelů ušetřit v hodinách chemie čas, studentům druhé skupiny umožní vidět názornou ukázkou chování výbušnin v praxi. Navíc, naprostá většina (48) dotazovaných učitelů si myslí, že by zařazení video – experimentů do výuky mohlo zvýšit zájem studentů o chemii, většina učitelů (30) rovněž označila experimenty jako nejzajímavější oblast z celé problematiky výbušnin, proto bylo realizaci a natočení experimentů věnováno také největší úsilí.

Ti, kteří mají s realizací experimentů zkušenosti, většinou čerpají informace potřebné k provedení experimentu z více pramenů (internet, odborná literatura, ...). Proto jsou součástí výukového modulu také jednoduché návody k vybraným ověřeným experimentům, které budou mít všichni zájemci k dispozici přehledně v jednom materiálu.

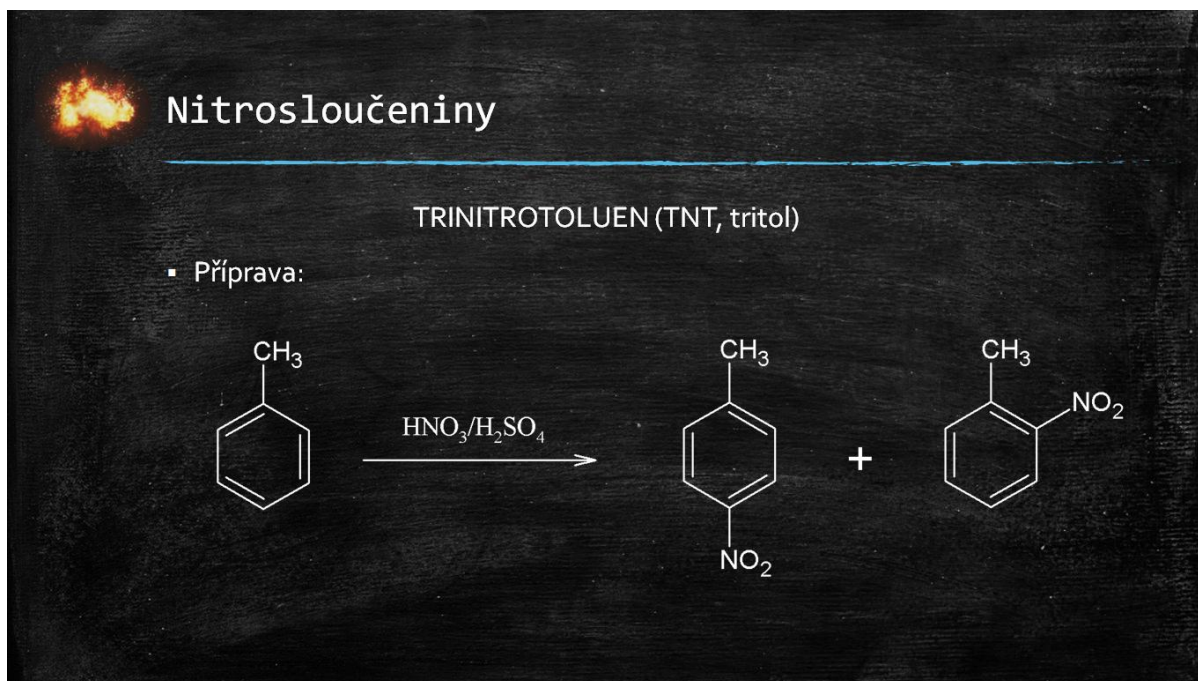
### **3.4 Výukový modul**

Výukový modul se skládá z prezentace, která je vhodná pro použití ve výuce chemie na všech typech středních škol. Dále obsahuje jednoduché a ověřené návody na přípravu vybraných výbušnin. K vypracování výukového modulu přispěla analýza středoškolských učebnic a dotazníkové šetření.

#### **3.4.1 Prezentace**

Prezentaci tvoří 181 obrázků. 30 je věnováno historii výbušnin a obecným pojmům, které je nutné znát pro správné pochopení celé problematiky, 48 je věnováno třaskavinám, 18 střelivinám, 24 pyrotechnickým složím, 38 trhavinám a 21 nitraci a syntéze oktanitrokubanu. Prezentace obsahuje vložená videa natočených experimentů, která jsou řazena vždy tématicky a také několik málo odkazů na různé video – portály, které mají rovněž přímou souvislost s probíraným učivem. Některé informace se mohou učiteli jevit jako nadbytečné, některé mu zde mohou naopak chybět. Proto je přiložená prezentace k dispozici také ve formátu PPT a

může být dle potřeby učitele upravena (prezentace je zapsána v elektronické podobě na příloženém DVD). Jako informační zdroj těm, kteří nejsou s problematikou výbušnin tolik seznámeni poslouží teoretická část. Z dalších pramenů je možno využít literaturu a webové stránky uvedené v seznamu použité literatury, případně jiné zdroje. Obrázek 48 a 49 ukazuje vzhled náhodně vybraných obrázků této prezentace.



**Obrázek 48:** Ukázka powerpointové prezentace č. 1.

**Nitraminy**

HEXOGEN (RDX, cyklonite, T-4)

- Příprava: Nitrolýza urotropinu (hexaminu). Vzniká také oktogen.

**Obrázek 49:** Ukázka powerpointové prezentace č. 2.

### 3.4.2 Návodů na přípravu experimentů

Návodů na přípravu jsou všechny převzaty z odborné literatury, ze skript nebo z webových stránek /6, 15, 55/. Většina návodů mnou byla upravena tak, aby množství připravené sloučeniny nebo směsi nepřekračovalo rozumnou mez a snížily se tak následky případného úrazu. Další změny byly provedeny v realizaci samotných pokusů. Hlavní snaha byla ta, aby všechny pomůcky potřebné k provedení experimentů byly snadno dostupné, což se bohužel nepodařilo vždy dodržet. Další snahou bylo vyzkoušet co nejvíce druhů iniciace, proto jsou výbušniny iniciovány buď mechanicky, tepelně nebo elektricky. K některým modifikacím jsem byl inspirován doc. RNDr. Michalem Čajanem, Ph.D., prof. RNDr. Jiřím Kameníčkem, CSc. a doc. RNDr. Martou Klečkovou, CSc. V průběhu všech experimentů pracujte prosím s ochrannými pomůckami a udržujte studenty v bezpečné vzdálenosti. Závěrem bych chtěl poznamenat, že nenesu žádnou odpovědnost za případné úrazy způsobené nedodržením přesného postupu nebo neopatrnou manipulací s výbušninami.

### 3.4.2.1 Acetylid stříbrný

Nejprve si ve větší zkumavce připravíme roztok Tollensova činidla. 1 g dusičnanu stříbrného rozpustíme v cca 15 ml destilované vody. K tomuto roztoku pak přidáváme po kapkách vodný roztok amoniaku. Po přidání prvních kapek vzniká hnědá sraženina, která po přidání několika dalších kapek zmizí. Roztok Tollensova činidla máme tedy hotový. Poté si sestavíme aparaturu na vyvíjení acetyleny. Na 0,5 g karbidu vápenatého umístěného v odsávací baňce nebo zkumavce se z přikapávací nebo dělicí nálevky, případně injekční stříkačky přikapává cca 5 ml nasyceného roztoku chloridu sodného. Vyvíjející se acetylen je veden do zkumavky, která obsahuje roztok Tollensova činidla. Začne se tvořit světle žlutá sraženina, kterou po ukončení reakce odfiltrujeme a promyjeme vodou a ethanolem. S filtračním papírem, na kterém je acetylid stříbrný, manipulujeme pouze tehdy, je-li sraženina zvlhčená (před manipulací můžeme zvlhčit ethanolem). Filtrační papír umístíme na síťku a zahříváme plynovým kahanem nebo jej můžeme odpálit mechanickým podnětem, například pomocí kladiva na vhodném povrchu. Teoretický výtěžek počítaný na dusičnan stříbrný je 0,78 g. Pokus provádíme v digestoři.

Pozn. Může se vám stát, že aparatura nebude dokonale utěsněna, proto můžete navážku karbidu vápenatého na začátku raději zvýšit. Acetylen je možno zavádět i do vodného roztoku dusičnanu stříbrného. Tento postup jsem však nezkoušel. Teoreticky by měla reakce lépe probíhat v zásaditém prostředí Tollensova činidla (kyselé vodíky acetyleny). Barva sraženiny se může značně lišit od narůžovělé nebo světle žluté, přes hnědou, po světle nebo tmavě šedou. Často se také mění v průběhu přípravy. Změna barvy ale nijak nemění výsledné vlastnosti acetylidu. Kahanem zahřívejte z větší vzdálenosti tak, aby se acetylid zahříval postupně. Docílíte tak toho, že acetylid detonuje najednou, což zajistí žádaný efekt. A poslední, asi nejdůležitější poznámka: reakci ukončete raději dříve, než Vám začne acetylid stříbrný zasychat na stěnách skleněné zkumavky! Acetylid, který případně ulpí na stěnách zkumavky nebo skleněné trubičky, rozložte působením kyseliny chlorovodíkové.

### 3.4.2.2 Azid olovnatý

Navážíme si 0,2 g azidu sodného a převedeme do 20 ml destilované vody v plastové kádince. V druhé plastové kádince rozpustíme 0,6 g dusičnanu olovnatého a 0,1 g dextrinu ve 40 ml vody. Oba roztoky pomalu, za současného míchání plastovou lžičkou, slijeme (je jedno



v jakém pořadí). Kvantitativně se vyloučí bílá mikroskopická sraženina. Sraženinu necháme klesnout ke dnu a roztok nad ní dekantujeme. Poté přidáme destilovanou vodu, zfiltrujeme na plastové nálevce a důkladně destilovanou vodou promyjeme. Filtrační papír s azidem olovnatým položíme na síťku, která je položena na železném kruhu připevněném ke stojanu, a necháme ho vysušit. Po vysušení zahříváme plynovým kahanem z dostatečné vzdálenosti, tak aby se sraženina zahřívala rovnoměrně a nedošlo ke vzplanutí filtračního papíru. Následuje explozivní rozklad. Síťka se často následkem exploze protrhne, a její úlomky by mohly někoho poranit, proto pokus provádíme za ochranným sklem. Vzhledem k množství použitého azidu sodného je teoretický výtěžek 0,38 g.

Pozn. Pokud by se z jakéhokoliv důvodu začala vylučovat sraženina, jejichž krystalky byste mohli vidět pouhým okem, pak přípravu ukončete a sraženinu ihned rozložte působením silné anorganické kyseliny. Dodržením výše uvedeného postupu by se to však nemělo stát.

### **3.4.2.3 Bengálské ohně**

Navážíme si 2,1 gramu dusičnanu nejlépe barnatého nebo strontnatého a 0,9 práškového hořčíku. Dusičnan rozetřeme v třecí misce a smícháme s práškovým hořčíkem. K výsledné směsi přikápneme 5-6 kapek stolního oleje a důkladně promícháme. Výsledná slož tím nabude hutné a lepkavé konzistence a poněkud ztmavne. Slož vsypeme na keramickou destičku, která je umístěna na misce s pískem, a špejlí ji zapálíme. Slož shoří barevným plamenem. Pokus provádíme nejlépe v digestoři.

Pozn. Samozřejmě je možné připravit i menší množství slož, důležité je ale zachovat poměr. Dále je nutné myslet na to, že se při hoření této směsi, podobně jako u termitu, uvolňuje i UV záření, proto není vhodné se do ohně dívat přímo nebo z bezprostřední blízkosti. Za zvážení proto stojí brýle s UV filtrem.

### **3.4.2.4 Černý prach**

Navážíme 2,25 g dusičnanu draselného, 0,45 g dřevěného uhlí a 0,3 g práškové síry. Všechny složky důkladně odděleně rozetřeme v třecí misce. Síra se rozetírat nemusí. Nejdříve smícháme dusičnan a dřevěné uhlí, poté k této směsi přimícháme i síru. Připravený černý prach vsypeme na nehořlavý materiál, například keramickou destičku umístěnou na misce s pískem, a špejlí zapálíme. Můžeme pozorovat vysoký energický plamen. Provádíme v digestoři.

Pozn. Někoho by možná napadlo použít aktivní uhlí místo uhlí dřevěného. Větší povrch přeci znamená, že by reakce měla probíhat rychleji. Při použití aktivního uhlí se nám však takový prach zapálit nepodařilo.

#### **3.4.2.5. Dýmovnice**

Navážíme si 1,8 g chlorečnanu draselného, 3 g chloridu amonného a 1,2 g moučkového cukru. Chlorečnan a chlorid rozetřeme v třecí misce. Poté tyto dvě složky smícháme dohromady. Cukr přidáváme vždy až nakonec. Výslednou složí naplníme například mucholapku předem zbavenou vnitřního lepivého obsahu. Otvorem, který ve víčku zůstal po připínáčku a provázku, kterým vytahujeme obsah mucholapky, protáhneme zápalnici (dá se koupit za pár korun v každém lepším obchodě s pyrotechnikou). Otvor je potřeba o něco zvětšit, aby jím zápalnice prošla. Zápalnici vedeme po celé délce slože, tedy až ke dnu mucholapky. Víčko důkladně přilepíme zpět k obalu mucholapky sekundovým lepidlem. Spoj musí být veden po celém obvodu tak, aby nárůst tlaku víčko od obalu neoddělil. Lepidlem také zafixujeme zápalnici v oblasti otvoru, kterým prochází, aby uvnitř dýmovnice držela. Druhý konec zápalnice zastříháme tak, abychom měli dostatek času pro vzdálení se do bezpečné vzdálenosti. Mělo by stačit 5 cm vyčnívajících z víčka do volného prostoru (zápalnice různého typu hoří různě rychle, proto si po koupi rychlost hoření vyzkoušíme). Nakonec vytvoříme v obalu několik (například 6) malých děr ostrým předmětem tak, aby měl vznikající dým kam unikat. Zapalujeme venku na otevřeném prostranství. Pozorujeme bílý až světle šedý dým.

Pozn. Této slože si můžeme připravit i více, vždy je však nutné dodržet postup mísení (organická látka až nakonec). Pokud začne dýmovnice po zapálení hořet, zmenšíme počet otvorů v obalu. Při použití potravinářských barev se potvrdilo, že jsou termicky nestabilní. Tíženého barevného efektu jsme dle očekávání nedosáhli. K obarvení dýmu je nutno použít termostabilní organická barviva, například Versálovou modř, Malachitovou zeleň a další.

#### **3.4.2.6 Flash směsi**

Navážíme 2,1 g chlorečnanu, lépe chloristanu a 0,9 g práškového hliníku. Chlorečnan (nebo chloristan) rozetřeme v třecí misce a poté důkladně promícháme s práškovým hliníkem. Připravíme si kousek papíru (nejlépe tenkého papíru, který se používá k balení květin) ve tvaru obdélníku. Papír dvakrát přeložíme tak, aby po rozložení vznikla uprostřed mírná

prohlubeň (jako bychom skládali filtrační papír pro filtraci). Slož vsypeme do středu rozloženého papíru a opatrně složíme. Po složení směs sklepeme do rohu vzniklé kapsičky a po stranách můžeme zajistit proti vysypání přeložením. Takto připravenou kapsu odpálíme kladivem s dostatečně dlouhou rukojetí (alespoň 30 cm) na vhodném povrchu (tvrdém a bez výrazných nerovností), například na betonové dlaždici. Odpálení provádíme mimo budovu školy. Zvukový efekt je totiž natolik výrazný, že by tato slož nikdy neměla být odpalována v uzavřeném prostoru.

Pozn. Je možné připravit i směs o složení 66% chloristanu (nebo chlorečnanu), 17 % práškového hliníku a 17 % sulfidu antimonitého. Rozklad této směsi doprovází ještě silnější zvukový efekt. Pro přípravu jsem používal vždy chlorečnan a všechny takto připravené směsi byly i přesto značně necitlivé. K iniciaci bylo potřeba silné rány kladivem. Při použití chloristanu (namísto chlorečnanu) by měla být slož ještě o něco necitlivější, a tedy i bezpečnější. Nikdy však nesmíme připravit více jak 5 g těchto slož. Takové množství by mohlo vzbuchnout pod tíhou své vlastní váhy. Hladina akustického tlaku je opravdu vysoká, proto doporučuji studenty odkázat do patřičné vzdálenosti, a slož odpalovat pouze se špunty v uších.

#### **3.4.2.7 Jododusík**

Do malé plastové kádinky nasypeme 0,2 g jódu a zalijeme 5 ml vodného roztoku (25 %) amoniaku. Vznikne tmavě zbarvená sraženina, kterou odsajeme na Büchnerově nálevce a promyjeme destilovanou vodou. Filtrační papír s ještě vlhkým jododusíkem vyjmeme a položíme na železný kruh, který je připevněn ke stojanu. Jododusík necháme vyschnout. Po vyschnutí se iniciuje například poklepaním špejlí. Pokus provádějte v digestoři. Částečně se tak dá předejít vnějším vlivům, které by mohly extrémně citlivý jododusík iniciovat (zvířený vzduch apod.). Dalším důvodem jsou páry jódu, které vznikají při explozi jododusíku, a které ulpívají na okolních předmětech.

Pozn. Je možné připravit i více dávek a filtrační papíry s jododusíkem pak položit na železné kruhy, které jsou umístěny cca 10 cm nad sebou. Poté iniciujeme jododusík, který je umístěn nejnižší. Jeho výbušný rozklad iniciuje celou sestavu. Tyto dávky však vždy připravujeme odděleně, nikde ne najednou.

### 3.4.2.8 Nitrocelulóza

Do 250 ml kádinky nalijeme 25 ml koncentrované kyseliny dusičné a 55 ml kyseliny sírové. Po schladnutí směsi na laboratorní teplotu vneseme po částech 2,5 g obvazové vaty a mícháme po dobu jedné hodiny. Vata by měla být v nitrační směsi ponořena celá. Po uplynutí této doby nitrační směs odlijeme a nitrocelulózu vložíme do 500 ml studené vody. Po proprání (cca 10 min) vodu odlijeme a vyměníme za další. Opakujeme tak dlouho, dokud je pH vody jen mírně kyselé. Poté nitrocelulózu propereme ve 200 ml 2% roztoku uhličitanu sodného. Nakonec vymácháme nitrocelulózu v destilované vodě a necháme vysušit. Malý chomáček vysušené nitrocelulózy si položíme do dlaně a zapálíme rozžhavenou špejlí, případně můžeme využít dobrovolníky z řad studentů. Nestabilizovaná nitrocelulóza by se měla spotřebovat do jednoho týdne.

### 3.4.2.9. Peklo ve zkumavce

Zkumavku z tavitelného skla připevníme držákem do stojanu a umístíme pod ni misku s pískem. Připravíme si dusičnan draselný. Dále kousky dřevěného uhlí vhodné velikosti. Kousky uhlí by měly být takové velikosti, aby mohly zkumavkou pohodlně projít, na druhou stranu nemohou být moc malé. Malé kousky by mohly při jejich přihození k roztavenému dusičnanu ze zkumavky vyskočit ven. Poslední surovinou je síra, nejlépe plastická (prášková ulpívá na stěnách rozžhavené zkumavky). Do zkumavky vsypeme lžičku dusičnanu draselného (asi tolik, aby vyplňoval 2 cm dna zkumavky). Plynovým kahanem začneme zahřívat dokud se dusičnan úplně neroztaví. Do kleští uchopíme jeden kousek dřevěného uhlí, který necháme rozžhavit nad plamenem kahanu. Rozžhavené uhlí vhodíme do zkumavky, ve které již máme připravený roztavený dusičnan. Započne exotermická reakce. Ihned přidáme síru (asi půl malé laboratorní lžičky). Exotermická reakce zesílí a zkumavka se začne roztékat. Spodní část zkumavky by se měla oddělit od horní. Pokus provádějte v digestoři hlavně z důvodu uvolňujícího se oxidu siřičitého.

Pozn. Pokud jsme přidali málo dřevěného uhlí nebo síry, je možné tyto složky přidávat tak dlouho, dokud se z rozkládajícího se dusičnanu uvolňuje dostatek kyslíku. V prvním kroku přitom dáváme přednost síře (reakce je exotermičtější). Pokud si nejste jisti, zda je zkumavka skutečně z tavitelného skla, pokus neprovádějte.

### 3.4.2.10 Termit

Připravíme si 2 malé keramické květináče stejné velikosti a vsadíme je do sebe. Alobalem zakryjeme otvor, který je ve dnu květináče. Z alobalu vytvoříme ruličku o průměru cca 3 cm a umístíme ji doprostřed tohoto květináče. Kolem ruličky nasypeme písek. Do ruličky vsypeme směs o složení 7 g práškového hliníku a 21 g červeného práškového oxidu železitého. Vsypeme větší část, kterou lehce slisujeme. Zbytek této složky (cca 1/10) vsypeme na již slisovaný sloupec. Tento díl nelisujeme, abychom neměli problém s iniciací. Nakonec přisypeme ještě trochu (desetiny gramu) zápalné složky, která je tvořena manganistanem draselným a práškovým železem v poměru 1:1. Květináč uchytneme držákem do stojanu a umístíme pod něj misku s pískem. Po zapálení zápalné složky špejlí odstoupíme do bezpečné vzdálenosti. Pozorujeme hoření termitu a vytékání surového železa do misky s pískem. Charakter hoření se může lišit od velikosti částic výchozích surovin a od toho, jak moc jsme složku nalisovali. Pokus demonstrujeme venku. Musíme zajistit, aby se v okolí nevyskytovaly žádné hořlavé předměty. Pokud by byla potřeba přistoupit k hašení termitu, máme přichystanou nádobu s pískem.

## 4. Závěr

Hlavním cílem této bakalářské práce bylo vytvoření výukového modulu. Tento výukový modul je zaměřen na výukovou prezentaci a návody na přípravu vybraných experimentů. Výuková prezentace by studentům středních škol měla přinést nejen zajímavé informace z oblasti výbušnin, ale také studenty upoutat svou názorností a interaktivním pojetím. Proto jsou součástí prezentace nejen video – experimenty, obrázky, reakční schémata a odkazy na další zajímavá videa, ale i několik otázek na konci vybraných kapitol, které napomáhají k utvrzení právě nabytých poznatků a nutí studenty se nad daným tématem zamyslet. U některých experimentů byl dán přednost odkazu na již existující video, které je volně přístupné na internetu, před natočením videa vlastního. Tento postup byl většinou volen u experimentů, jejichž výbušná přeměna probíhá natolik prudce, že se jejich natočení na konvenční kameru ve výsledkujevilo jako neefektivní. Rovněž nebyly připravovány žádné trhavin, neboť množství, které je nutné vyrobit k tomu, aby došlo k jejich detonaci, mnohdy překračuje zákon a také zdravý úsudek. Výuková prezentace byla sestavena na základě poznatků obsažených v teoretické části. Text prezentace je oproti teoretické části značně redukován, některé méně důležité informace zde chybí zcela. Prezentace je k dispozici ve formátu PPT, a proto si ji každý pedagog může poupravit podle svých potřeb. Na základě výsledků dotazníkového šetření byla rozdělena do více souborů. Celistvá, nerozdělená prezentace, která má naprosto stejný obsah, ale je tvořena pouze jedním souborem, je rovněž součástí elektronických příloh.

Druhá část výukového modulu obsahuje návody na přípravu vybraných experimentů, které jsou navrženy tak, aby bylo riziko zranění minimalizováno (nízké teoretické výtěžky, vhodné pomůcky, doporučení, atd.) a zároveň byla zajištěna požadovaná efektivita. U každého experimentu je rovněž uvedeno krátké upozornění, které poukazuje na možná úskalí spojená s jeho realizací. Experimenty byly natočeny na videokameru a tato videa jsou součástí výukové prezentace.

Dílčím cílem bylo vytvoření komplexního a uceleného teoretického podkladu, který by shrnoval poznatky z oblasti výbušnin populárně – naučnou formou a mohl tak být snadno aplikovatelný na středoškolské poměry. Hlavním motivem pro vytvoření takto rozsáhlé teoretické části byla absence uceleného zdroje, který by srozumitelným způsobem sumarizoval základní informace a zároveň neopomíjel i méně známé, ale o to zajímavější

poznatky z oblasti výbušnin. Informace obsažené v odborné literatuře se často zabývají problematikou, která je pro studenty středních škol příliš náročná a je nad rámec znalostí, které by si měli z výuky chemie na střední škole odnést. Na druhou stranu středoškolské učebnice chemie většinou neposkytují o výbušninách takové informace, které by se z kvalitativního i kvantitativního hlediska dali označit za dostatečné. Analýza středoškolských učebnic chemie ukázala na strohost a roztroušenost těchto informací, a tedy v tomto směru na nepoužitelnost středoškolských učebnic chemie jako kvalitního zdroje pro ucelený výklad. Z tohoto důvodu byl na vytvoření teoretické části kladen velký důraz. Teoretická část by se tak měla stát pro ty učitele, kteří mají s touto problematikou jen malé zkušenosti, solidním teoretickým základem a měla by sloužit jako doprovodný text k výukové prezentaci.

Důležitým nástrojem, který přispěl k tvorbě powerpointové prezentace a teoretické části, byly výsledky získané dotazníkovým šetřením. Dotazník, který byl odeslán na 235 emailových adres středoškolských učitelů chemie, vyplnilo 56 respondentů (návratnost 24 %). Dotazník sestával z 8 otázek. Otázky byly zaměřené na získání informací ohledně výukové strategie praktikované v hodinách chemie na gymnáziích. V dotazníku dostali respondenti prostor vyjádřit se ke způsobu, jakým výbušniny probírají, zda téma chápou jako prevenci nebo spíše jako riziko a jestli pokládají za přínos zařazení video – experimentů do výuky chemie. Dalším cílem bylo zjistit, zda mají učitelé s přípravou sloučenin výbušného charakteru zkušenost a pokud ano, tak s jakými. Z jakých pramenů pro tyto experimenty čerpají inspiraci a jaká oblast této problematiky by je nejvíce zajímala. Hlavním závěrem dotazníkového šetření bylo, že by učitelé rádi uvítaly zařazení video – experimentů do výuky chemie a že právě tato oblast by je zajímala nejvíce. Právě proto byly vybrané experimenty natočeny a zahrnuty do výukové prezentace. Pro učitele, kterým by předložená videa nestačila a chtěli by si některé experimenty v rámci výuky chemie sami vyzkoušet, jsou připraveny jednoduché návody na jejich realizaci. Většina (49 z 56) z těchto učitelů, která odpověděla na tento kratičkový dotazník, navíc projevila o výukové materiály zájem, a ty se tak na školy, na nichž tito učitelé působí, dostanou již s příchodem školního roku 2014/2015, což pokládám za největší přínos této bakalářské práce. Dotazník je součástí příloh.

## 5. Seznam použité literatury

/1/ Pitschmann, Vladimír. **Šamani, alchymisté, chemici a válečníci: kapitoly z dějin chemických, toxinových a zápalných zbraní: období od prehistorie do roku 1914**. 1. české vydání. Praha: Naše vojsko, 2010. ISBN 978-80-206-1110-9. s. 159-160, 201, 274-276, 444-446, 462-463

/2/ Partington, James Riddick. **A History of Greek Fire and Gunpowder**. Baltimore: Johns Hopkins University Press, 1999. ISBN: ISBN 0-8018-5954-9. s. 287

/3/ Zeman, Svatopluk. **Technologie energetických materiálů I**. 2. vydání. Pardubice: Univerzita Pardubice Fakulta chemicko-technologická, 2007. ISBN 978-80-7194-939-8. s. 11, 116, 130

/4/ Hrazdíra, Ivo – Kollár, Milan. **Policejní pyrotechnika**. 1. vydání. Plzeň: Vydavatelství a nakladatelství Aleš Čeněk, 2006. ISBN 80-86898-87-3. s. 7-11, 30, 31, 44-48, 50, 52-54, 58-63

/5/ <http://en.wikipedia.org>

/6/ Válek, Leo. **Pyrotechnika tajemství zbavená: odpalte si svůj vlastní ohňostroj**. 1. vydání. Ledec nad Sázavou, 2009. ISBN 978-80-254-6106-8. s. 14, 15, 18, 25, 26, 28, 32 – 34, 36, 37, 39-41, 43, 45, 50, 51, 53, 54, 56, 57, 60, 61 – 63,

/7/ Stöhr, Ralf. **Chemické zbraně**. 1. vydání. Praha: Naše vojsko, 1963. 28-130-63. 02/33. s. 10-11

/8/ Makovička, Daniel – Janovský, Břetislav. **Vlastnosti výbušnin a analýza charakteru výbuchového zatížení a jeho modifikací**. Praha: České vysoké učení technické, 2006. ISBN 978-80-01-03640-2 přednáška 1, s. 3, 18,19. přednáška 2, s. 11, 16-18

/9/ Komenda, Jan – Jedlička, Luděk – Vitek, Roman. **Munice. 1. díl**. Brno: Univerzita obrany, 2010. ISBN 978-80-7231-727-1. s. 20, 21, 23-30, 34-40

/10/ Říha, Milan – Říha, Jan. **Základy pyrotechniky: pro vyšší odbornou školu: prozatimní texty přednášek**. 1. vydání. Praha: Námořní akademie České republiky, 2009. ISBN 978-80-87103-22-7. s. 3, 6, 9-11, 24, 25, 29, 30



- /11/ Cigánik, Lubomír – Hrazdíra, Ivo. **Policejní pyrotechnika I: výbušniny, výbušné systémy**. 1. vydání. Praha: Policejní akademie České republiky, 1998. ISBN 80-85981-94-7. s. 11-14, 16-19
- /12/ <http://www.explosia.cz/>
- /13/ Vávra, Pavel. **Teorie výbušnin**. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2008. ISBN 978-80-7395-116-0. s. 69, 71, 73, 75, 76
- /14/ <http://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/jaderna-energetika/jaderne-elektrarny-cez/ete/technologie-a-zabezpeceni/2.html>
- /15/ <http://detonator.kx.cz/PXD/cl/home.htm>
- /16/ **Český obranný standard 137601**, 3. Vydání. Praha: Úřad pro obrannou standardizaci, katalogizaci a státní ověřování jakosti, 2010. s. 63
- /17/ Urbaňski, Tadeusz, (překlad: Doležal, Zdeněk – Jakeš, Dušan). **Chemie a technologie výbušnin. 3. díl**. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1959.
- /18/ Davis, Tenney L. **Chemistry of Powder and Explosives**. Angriff Press, 1992. ISBN 978-0945001171. s. 1, 407
- /19/ Agrawal, J. P. – Hodgson, R. D. **Organic chemistry of explosives**. Chinchester: John Wiley & Sons Ltd., 2007. ISBN 978-047002967-1. s. 345
- /20/ <http://www.zazijchemii.cz/blog/jak-funguje-airbag>
- /21/ Masterton, William L. – Hurley, Cecile N. **Chemistry: Principles and Reactions**. 6. vydání. Belmont, CA: Brooks/Cole Cengage Learning, 2008. ISBN 978-049512671-3. s. 124
- /22/ [http://www.ccohs.ca/oshanswers/chemicals/organic/organic\\_peroxide.html](http://www.ccohs.ca/oshanswers/chemicals/organic/organic_peroxide.html)
- /23/ <http://thefutureofthings.com/3035-tatp-countering-the-mother-of-satan/>
- /24/ <http://www.chm.bris.ac.uk/motm/ni3/ni3j.htm>
- /25/ Kameníček, Jiří – Šindelář, Zdeněk – Pastorek, Richard – Kašpárek, František. **Anorganická chemie**. 4. vydání. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká Fakulta, 2009. ISBN 978-802442387-6. s. 104

- /26/ <http://www.chemickepokusy.cz/termity.php>
- /27/ <http://kattarit.vyrobce.cz/plast.htm>
- /28/ <http://www.345.vsb.cz/jiripetruzelka/Texty/NEKONVENCNI.pdf>
- /29/ Urbański, Tadeusz, (překlad: Doležal, Zdeněk – Jakeš, Dušan). **Chemie a technologie výbušin. 2. díl.** Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1958. s. 5-7, 9, 10, 13-15, 84, 102, 104
- /30/ Urbański, Tadeusz, (překlad: Doležal, Zdeněk – Jakeš, Dušan). **Chemie a technologie výbušin. 1. díl.** Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1958. s. 6-9, 17, 19-21, 28, 29, 40, 62, 70, 77, 82, 83
- /31/ Agrawal, J. P. **High Energy Materials: Propellants, Explosives and Pyrotechnics.** 1. vydání. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2010. ISBN 978-352732610-5 s. 114, 115
- /32/ Pitschmann, Vladimír. **Jaderné zbraně: nejvyšší forma zabíjení.** 1. vydání. Praha: Naše vojsko, 2005. ISBN 80-206-0784-6 s. 277
- /33/ Svoboda, Jiří. **Organická syntéza I.** 1. vydání. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2000. ISBN 80-7080-385-1 s. 131, 134-136
- /34/ Klein, David. **Organic chemistry.** 1. vydání. John Wiley & Sons, Inc., 2012. ISBN 978-047175614-9 s. 883
- /35/ Rappoport Z. – Liebmann J. F. **The chemistry of cyclobutanes.** 1. vydání. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd., 2005. ISBN 0-47086400-1 s. 876-878, 899-901
- /36/ Hranoš, Přemysl. **Anorganická technologie: studijní text pro SPŠCH.** 1. vydání. Ostrava: Pavel Klouda, 2000. ISBN 80-86369-01-3
- /37/ Janeczková, Anna – Fialová, Anna – Šima, Marek. **Chemická laboratorní cvičení II: pro 2. ročník SPŠCH.** 1. vydání. Ostrava: Pavel Klouda, 2004. ISBN 80-86369-09-9
- /38/ Čtrnáctová, Hana – et al. **Chemické pokusy pro školu a zájmovou činnost.** 1. vydání. Praha: Prospektum, 2000. ISBN 80-7175-057-3

- /39/ Mareček, Aleš – Honza, Jaroslav. **Chemie pro čtyřletá gymnázia. 1. díl.** 1. vydání. Olomouc: Nakladatelství Olomouc, 1998. ISBN 80-7182-055-5
- /40/ Mareček, Aleš – Honza, Jaroslav. **Chemie pro čtyřletá gymnázia. 2. díl.** 1. vydání. Brno: DaTaPrint, 1996. ISBN 80-902200-4-5
- /41/ Mareček, Aleš – Honza, Jaroslav. **Chemie pro čtyřletá gymnázia. 3. díl.** 1. vydání. Olomouc: Nakladatelství Olomouc, 2000. ISBN 80-7182-057-1
- /42/ Flemr, Vratislav – Dušek, Bohuslav. **Chemie I pro gymnázia: obecná a anorganická.** 1. vydání. Praha: SPN – pedagogické nakladatelství, 2001. ISBN 80-7235-147-8
- /43/ Kolář, Karel – Kodíček, Milan – Pospíšil, Jiří. **Chemie II pro gymnázia: organická a biochemie.** 1. vydání. Praha: SPN – pedagogické nakladatelství, 2000. ISBN 80-85937-49-2
- /44/ Banýr, Jiří – et al. **Chemie pro střední školy.** 2. Vydání. Praha: SPN – pedagogické nakladatelství, 1999. ISBN 80-85937-46-8
- /45/ Blažek, Jaroslav – Fabini, Ján. **Chemie: pro studijní obory SOŠ a SOU nechemického zaměření.** 5. vydání. Praha: SPN-pedagogické nakladatelství, 1999. ISBN 80-7235-104-4
- /46/ Růžičková, Květoslava – Kotlík, Bohumír. **Chemie I. v kostce: pro střední školy: (obecná a anorganická chemie, výpočty v oboru chemie).** 4. vydání. Havlíčkův Brod: Fragment, 2005. ISBN 80-253-0031-5
- /47/ Bárta, Milan. **Jak (ne)vyhodit školu do povětří: (Horáková chemická kuchařka pro malé i velké experimentátory: chemické pokusy pro žáky 8. a 9. tříd, studenty středních škol a jejich nadšené učitele).** 1. vydání. Brno: Didaktis, 2004. ISBN 80-86285-99-5
- /48/ Marvánová, Hana – Čtrnáctová, Hana – Vasilešská, Marie. **Nebezpečné látky ve školní laboratoři.** Praha: Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta, 2007. ISBN 978-80-86561-88-2
- /49/ Janeczková, Anna – Klouda, Pavel. **Organická chemie: studijní text pro SPŠCH.** 2. vydání. Ostrava: Pavel Klouda, 2001. ISBN 80-86369-04-8
- /50/ Vacík, Jiří – et al. **Přehled středoškolské chemie.** 4. vydání. Praha: Pedagogické nakladatelství, 1999. ISBN 80-7235-108-7

/51/ Clugston, Michael – Flemming, Rosalind. **Advanced chemistry**. Oxford University Press, 2011. ISBN 978-0-19-914633-8

/52/ Atkinson, John – Hibbert, Carol. **AS Chemistry for AQA**. 1. vydání. Heinemann, 2000. ISBN 978-0435581343

/53/ Hill, Graham C. – Holman, John S. **Chemistry in Context**. 3. vydání. Nelson Thornes Ltd., 1995. ISBN 0-17-448163-2

/54/ Hill, Graham C. – Holman, John S. **Chemistry in Context**. 6. vydání. Nelson Thornes & Sons Ltd., 2011. ISBN 978-1-4085-1496-2

/55/ Stýskala, Jakub – et al. **Cvičení z organické chemie**. 3. upravené vydání. Olomouc: Univerzita Palackého, Přírodovědecká fakulta, 2010. ISBN 978-80-244-2602-0 s. 70, 105

### **Zdroje obrázků**

/1/ <http://en.wikipedia.org/wiki/File:FireLanceAndGrenade10thCenturyDunhuang.jpg>

/2/ <http://en.wikipedia.org/wiki/File:EarlyCannonDeNobilitatibusSapientiiEtPrudentiisRegumManuscriptWalterdeMilemete1326.jpg>

/3/ [http://www.ika.rwth-aachen.de/r2h/index.php/Hydrogen\\_Accidents](http://www.ika.rwth-aachen.de/r2h/index.php/Hydrogen_Accidents)

/4/ [http://www.ika.rwth-aachen.de/r2h/index.php/Hydrogen\\_Accidents](http://www.ika.rwth-aachen.de/r2h/index.php/Hydrogen_Accidents)

/5/ [http://en.wikipedia.org/wiki/File:TNT\\_detonation\\_on\\_Kahoolawe\\_Island\\_during\\_Operation\\_Sailor\\_Hat,\\_Sjot\\_Bravo,\\_1965.jpg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:TNT_detonation_on_Kahoolawe_Island_during_Operation_Sailor_Hat,_Sjot_Bravo,_1965.jpg)

/8/ <http://www.verkehr.fraunhofer.de/en/automotive/services/airbag.html>

/12/ <http://thefutureofthings.com/3035-tatp-countering-the-mother-of-satan/>

/16/ <http://usarmy.vo.llnwd.net/e2/-images/2009/10/02/52253/army.mil-52253-2009-10-05-071048.jpg>

/17/ [http://www.pktilealer.ru/pic/04\\_big.jpg](http://www.pktilealer.ru/pic/04_big.jpg)

## **6. Přílohy**

Přílohy jsou dostupné na přiloženém DVD. Dotazník je přítomen také na konci tohoto dokumentu.

### **6.1 Výuková prezentace ve formátech PPT, PDF**

### **6.2 Dotazník ve formátu PDF**

# PřF UPOL Výbušniny ve výuce chemie na středních školách

Vážený učitelé chemie,

rád bych Vás požádal o vyplnění následujícího dotazníku, který obsahuje 8 otázek. Dotazník je anonymní a bude sloužit jako podklad k mé bakalářské práci, která se zabývá problematikou zařazení některých poznatků z oblasti přípravy, vlastností, aplikace, apod. výbušnin do výuky chemie. Budete-li mít zájem o výukové materiály, které budou obsahovat mimo jiné i videonahrávky problematiku doplňujících experimentů, vyplňte prosím kontaktní údaje v závěru dotazníku. Vaše podněty výrazným způsobem přispějí ke zkvalitnění těchto materiálů.

Mnohokrát děkuji za spolupráci.

Pavel Lasák

Univerzita Palackého v Olomouci  
Přírodovědecká fakulta  
Chemie pro víceoborové studium - Biologie, 3. ročník  
Email: [pavel.lasak01@upol.cz](mailto:pavel.lasak01@upol.cz)

\*Povinné pole

## 1. Výbušniny probíráte: \*

- jako samostatný tématický celek
- postupně, zařazují na vhodných místech v průběhu učiva
- neprobírám
- Jiné:

## 2. Myslíte si, že zařazení poznatků o výbušninách do výuky: \*

- má výchovný charakter
- může být zneužito ze strany studentů
- Jiné:

## 3. Máte zkušenost s přípravou některé z výbušnin pro účely výuky? \*

- Ano
- Ne

**4. Jakou výbušninu jste již připravovali za účelem demonstrace jejich vlastností? \***

**5. Podklady pro experimenty získáváte: \***

- z internetu
- ze středoškolských učebnic
- z vysokoškolských skript
- z odborné literatury

Jiné:

**7. Myslíte si, že by zařazení video - experimentů s výbušninami do výuky mohlo zvýšit zájem žáků o chemii? \***

- Ano
- Ne

**8. Jaká oblast této problematiky by Vás nejvíce zajímala? \***

- historie
- technologie
- užití
- samotné experimenty

Jiné:

**Děkuji za vyplnění dotazníku. Pokud máte zájem o výukové materiály, uveďte prosím Vaši emailovou adresu.**

Výukové materiály budou zpracovány do konce první poloviny roku 2014.