


# Ověření modelu šíření projevů a účinků ohrožujících událostí - projekt SPREAD

 25.09.2008

## Část 1: Příprava terénních testů

### Verification of the spread model of LIFE-endangering events effects and impacts - SPREAD project

#### Part 1: Preparing of field tests

**Michaela Havlová<sup>1</sup>, Petr Skřehot<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>T - SOFT spol. s r.o., [havlova@tsoft.cz](mailto:havlova@tsoft.cz)

<sup>2</sup>Výzkumný ústav bezpečnosti práce, v.v.i., [skrehot@vubp-praha.cz](mailto:skrehot@vubp-praha.cz)

atmosféra

modelování

rozptyl

terénní testy

## Abstrakt

K ohrožení obyvatelstva a životního prostředí nebezpečnými látkami může v současné době dojít nejen při havarijních únicích z technologických a výrobních zařízení nebo při dopravních nehodách, ale také při teroristickém útoku. Aby mohly být tyto události věrohodně numericky modelovány, je nutné vyvinout a ověřit příslušný model šíření a účinků. Již nyní je k dispozici celá řada softwarových nástrojů, avšak není mnoho těch, které dokáží modelovat rozptyl oblaků aerosolů. Přihlédneme-li ke skutečnosti, že aerosoly mohou představovat vážné ohrožení obyvatelstva, protože mohou sloužit jako nosiče nebezpečných látek, je vývoj příslušného rozptylového modelu aktuální potřebou. Žádný skutečně kvalitní model se však neobejde bez praktického ověření v reálných podmínkách. Pro tento účel je potřeba provést za předem definovaných podmínek terénní testy a za využití nejmodernějších metod detekce a vyhodnocení naměřených dat pak získat informace nutné pro zpřesnění navrženého modelu i určení okrajových podmínek jeho možného použití. Výše uvedená problematika je v uvedeném rozsahu a kvalitě v současnosti řešena jen několika málo výzkumnými institucemi na světě. V České republice se tomuto problému věnuje v rámci řešení projektu „1H-PK2/35: Ověření modelu šíření a účinků ohrožujících událostí“ společnosti T - SOFT, s.r.o., Výzkumný ústav bezpečnosti práce, v.v.i., ISATech, s.r.o. a Spolek pro chemickou a hutní výrobu, a.s. Projekt je spolufinancován Ministerstvem průmyslu a obchodu ČR.

**Klíčová slova:** modelování, rozptyl, terénní testy, atmosféra

## Abstract

Nowadays, the inhabitants and environment can be endangered by dangerous substance not only when they escape from processing and manufacturing facilities, but also in case of a terrorist attack. To be able to provide credible numerical models of the events, it is necessary to develop and verify a relevant model of spread and impacts. Although there is a wide range of software tools already available, very few of them are capable of modelling the spread of aerosol clouds. Regarding the fact that aerosols can pose a serious threat to inhabitants, as they can serve as carriers of dangerous substances, the development of an adequate spread model is necessary. However, no high-quality model can do without being tested and verified in real conditions. For this reason it is necessary to carry out field tests under pre-defined conditions and using the latest detection methods, and to evaluate the measured data in order to gain information necessary for the improvement of the model and specification of boundary conditions for its future use. The above described issue is – in the defined scope and quality – resolved by only a few research institutions in the world. In the Czech Republic this issue is covered by the project of “1H-PK2/35: Verification of the model of spread and impacts of life-threatening events” carried out by T – SOFT Company, Occupational Safety Research Institute, ISATech Company and the Association for Chemical and Metallurgical Production. The project is financially supported by the Ministry of Industry and Trade of the Czech Republic.

**Key words:** modelling, dispersion, field tests, atmosphere

## Úvod

Výzkumný projekt 1H-PK2/35 „Ověření modelu šíření a účinků ohrožujících událostí“, pracovně označovaný jako SPREAD, má za cíl ověřit model šíření prachových částic, resp. aerosolů, které mohou v případě mimořádné události plnit také roli nosičů toxických, radioaktivních či biologických informací. Většina modelovacích programů pracuje převážně s událostmi typu průmyslových havárií, ale v dnešním světě nelze vyloučit ani použití „špinavé bomby“ při teroristickém útoku. Cílem projektu je proto vytvořit matematický model pro rozptyl oblaku pevného aerosolu uvedeného do vznosu jednorázovou iniciací. Unikátní součástí projektu SPREAD je ověřování navrženého modelu za reálných podmínek v terénu.

Projekt, který byl zahájen v roce 2005 a který v roce 2008 končí, je spolufinancován Ministerstvem průmyslu a obchodu ČR. Řešiteli jsou společnosti T – SOFT, s.r.o., Výzkumný ústav bezpečnosti práce, v.v.i., ISATech, s.r.o. a Spolek pro chemickou a hutní výrobu, a.s. Dalšími spolupracujícími organizacemi jsou například Český hydrometeorologický ústav, Ústav pro životní prostředí University Karlovy, Výzkumný ústav pro hnědé uhlí, Ústav termomechaniky Akademie věd ČR, Pyrotechnický odbor Policejního Prezidia ČR, Policejní akademie ČR a Univerzita obrany v Brně. Na terénních testech se aktivně podíleli také vojáci z 31. brigády radiální, chemické a biologické ochrany Armády ČR.

## Terénní testy

Hlavním výstupem projektu je ověřený matematický model ve formě funkčního softwaru. Tento modul je postupně vyvíjen již od konce roku 2006, přičemž v letech 2007 a 2008 byl postupně ověřován a zpřesňován na základě výsledků získaných ze čtyř sérií terénních testů. Ověřování matematického modelu v terénu je poměrně významnou a nejnáročnější součástí vývoje modelovacích softwarů. Ovšem ne každý software, který je k dispozici na trhu, je takto ověřen, což jejich uživatelé většinou ani nevědí. Výsledky poskytované těmito programy lze proto z mnoha důvodů považovat na velmi nejisté a pro účely přesného modelování následků mimořádné události je nelze použít. Z tohoto ohledu je projekt SPREAD unikátní, protože v podobném rozsahu nebyly u nás během posledních let žádné modely ověřovány.

Prvním krokem při přípravě terénních testů je vždy výběr nejvhodnější lokality, která musí splňovat několik kritérií. Tento úkol byl jedním z nejdůležitějších ale i nejtěžších. Dalším krokem byl výběr stopovače, který by byl vhodný k provedení testů. Se stopovačem velmi úzce souvisí další krok, kterým je výběr trhaviny. Trhavina pro tento typ použití nesmí spékat vybraný stopovač a musí mít dostatečnou výbuchovou rychlost. Jelikož projekt uvažuje jako iniciační událost použití tzv. špinavé bomby, měla by být trhavina i relativně snadno dostupná. Všechny tyto aspekty byly při výběru zohledňovány.

## Výběr lokality

Již v roce 2006, rok před provedením hlavních testů, byly provedeny „předtesty“, které měly za cíl prověřit správnost navržené metodiky a identifikovat možné problémy, se kterými se lze při provádění hlavních testů setkat. Pro tento účel byla vybrána lokalita Tisá, kde se nachází vojenský výcvikový prostor 31. brigády chemické, biologické a radiační ochrany AČR v Liberci. Polygon v lokalitě Tisá (okres Ústí nad Labem) představuje travnatou plochu přibližně oválného tvaru uzavřenou po obvodu lesním porostem. Plocha polygonu byla pokryta travnatou vegetací, která byla v době terénních testů posekána. Odstraněna byla také většina náletových dřevin, které by mohly svou přítomností ovlivnit charakter proudění vzduchu nad plochou polygonu. Provedení testů však ukázalo, že je tato lokalita zcela nevhodná, protože proudění vzduchu zde bylo výrazně ovlivňováno místní topografií, terénními překážkami a také velikostí a tvarem otevřené plochy. Tyto testy ukázaly, že otevřená a rovná krajina s dostatečným volným prostorem pro rozmístění detekčních míst je pro tento typ terénních zkoušek naprosto nezbytná. Pro hlavní testy bylo tedy nutné vytipovat a zajistit jiný prostor, kde by bylo možné provádět báňskou činnost. Lokalitou pro hlavní testy se stalo polní letiště v Ústí nad Labem (viz obr. 1 a 2), kde bylo Českým báňským úřadem povoleno provádět řízené výbuchy.

Testy byly provedeny v roce 2007 a to ve třech etapách - v dubnu, červnu a září. Kromě aspektů čistě odborných byly při výběru lokality zohledněny také její dostupnost, možnost zajištění technických a materiálních potřeb a finanční náročnost.



Obrázek 1: Letecký snímek lokality Ústí nad Labem a jejího nejbližšího okolí; Zdroj: [www.mapy.cz](http://www.mapy.cz)



Obrázek 2: Pohled na jihozápadní polovinu plochy letiště v Ústí nad Labem; Autor: Michaela Havlová.

### Výběr termínů a klimatologické charakteristiky lokality

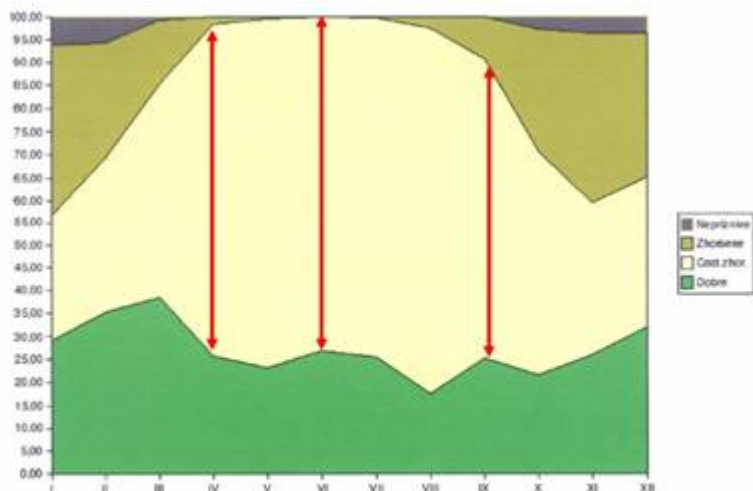
Výběr termínů vhodných pro provedení testů byl proveden na základě výsledků analýzy klimatických charakteristik lokality a analýzy rozptylových podmínek, které zpracoval Český hydrometeorologický ústav v Ústí nad Labem.

#### Základními požadavky pro volbu termínů byly:

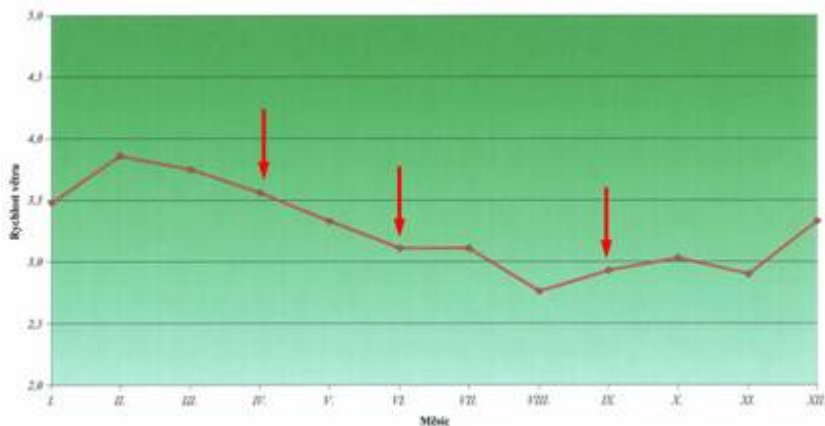
- ❖ **Různá roční období s absencí extrémních podmínek pro rozptyl aerosolu v ovzduší** – zcela vyloučena byla taková období, kdy se v lokalitě vyskytuje nejvíce dní s příliš dobrými rozptylovými podmínkami, resp. nepříznivými. Pro to, aby bylo možné ověřit rozptylový model pro tzv. nejpravděpodobnější scénář, bylo nutné testy provést nejlépe při částečně zhoršených podmínkách rozptylu, které statisticky nastávají nejčastěji (viz obr. 3).
- ❖ **Období s rozdílnou insolací** – tento požadavek je důležitý z hlediska zohlednění vlivu energie slunečního záření dopadajícího na povrch. Připravovaný softwarový modul bude totiž uživateli nabízet možnost volby ročního období.
- ❖ **Pokud možno období s nízkou mírou uplatnění termické konvekce** – výrazné zahřívání zemského povrchu vede ke vzniku výstupných proudů, které mohou výrazným způsobem negativně ovlivnit průběh měření. Z tohoto důvodu je nutné testy provádět mimo nejteplejší měsíce roku a v denních hodinách, kdy ještě není zemský povrch příliš prohřátý (nejlépe v dopoledních hodinách).
- ❖ **Období s malým počtem dnů s nárazovým větrem, větrem proměnlivého směru a s co nejnižší průměrnou rychlostí větru** – vítr je hlavní faktor, který se uplatňuje při rozptylu vzniklého oblaku v atmosféře (viz obr. 4). Kolísání rychlosti větru a proměnlivost směru proudění je však faktor, který výraznou měrou ovlivní průběh experimentu. Díky této skutečnosti může být trajektorie postupu oblaku komplikovaná, což výrazně ztěžuje jak vyhodnocení výsledků, tak i jejich využitelnost pro validaci matematického aparátu, který je postaven na Suttonově modelu, jež uvažuje neměnné podmínky v proudění vzduchu. Nízká průměrná rychlost (cca do 3,5 m/s) je pak vhodná pro to, že za takových podmínek se oblak příliš nerozšiřuje do prostoru a koncentrace částic

- ▣ proto se vzdáleností od epicentra výbuchu klesá pomaleji. Tato skutečnost je důležitá pro pasivní detekci částic záchytem na terčících. Při vyšších rychlostech větru jsou terčíky také výrazněji obtékány vzduchem, což snižuje účinnost záchytu částic na jejich povrchu.
- ▣ **Vysoká relativní četnost jihozápadního až západního proudění** – pro získání co možná nejlepších výsledků, je nutné, aby orientace sítě korelovala s převládajícím směrem větru v této lokalitě. Síť je proto orientována ve směru JZ-SV.
- ▣ **Období s nízkou pravděpodobností výskytu srážkové činnosti a mlh** – srážková činnost nebo zvýšená vlhkost vzduchu výraznou měrou ovlivní depozici částic, která však pro účely testů není zohledňována. Proto, aby nebyly výsledky zkreslovány výrazným úbytkem počtu částic tímto způsobem, je nutné provádět testy mimo období s největší četností srážek a výskytu mlh (viz obr. 5).
- ▣ **Terén, kde je možné zajistit požadovanou výšku rostlinného pokryvu** (požadovaná hodnota koeficientu drsnosti povrchu  $z_0$ ) pro všechny testy. Pro statistické vyhodnocení úspěšných testů je nutné, aby nebyly při žádném z nich výrazněji měněny podmínky, vyjma podmínek atmosférických. Tento požadavek se vztahuje také na drsnost povrchu, která se výrazně uplatňuje při šíření oblaků těžších než vzduch.
- ▣ **Minimální časový odstup mezi jednotlivými testy** – nejen z důvodu průběžného vyhodnocení, ale také pro zajištění pokrytí jednotlivých ročních období s různými atmosférickými podmínkami, je vhodné, aby minimální časový odstup mezi jednotlivými sériemi testů byl alespoň 2 měsíce.

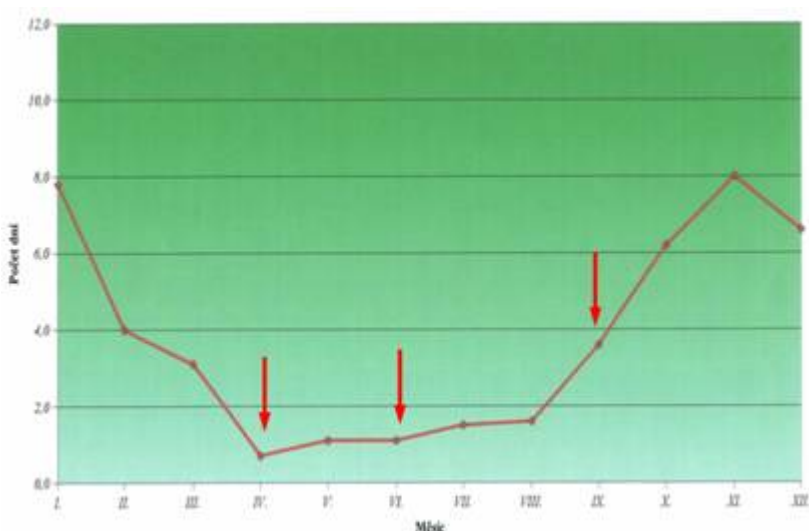
Tato výše uvedená kritéria jsou nejlépe splněna v měsících dubnu, červnu a září, což lze doložit i níže uvedenými výsledky analýz provedených Českým hydrometeorologickým ústavem. Ne všechny aspekty jsou sice splněny zcela, nicméně tyto termíny představují optimální kompromis.



Obrázek 3: Charakteristika rozptylových podmínek během roku v lokalitě letiště v Ústí nad Labem (šipky znázorňují vybrané termíny); Zdroj: studie ČHMÚ.



Obrázek 4: Průměrné rychlosti větru během roku v lokalitě letiště v Ústí nad Labem (šipky znázorňují vybrané termíny); Zdroj: studie ČHMÚ.



Obrázek 5: Počty dní s mlhou během roku v lokalitě letiště v Ústí nad Labem (šipky znázorňují vybrané termíny); Zdroj: studie ČHMÚ.

## Stopovač

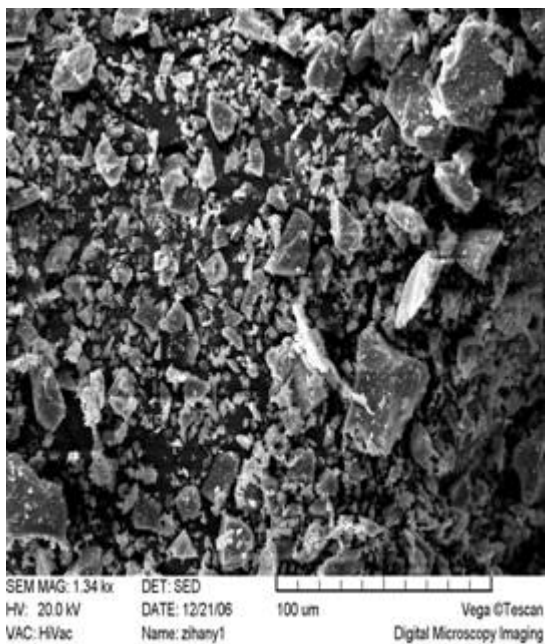
Výběr nosiče pro testy byl další velmi důležitou otázkou. Z analýz vyplynulo, že lidskému tělu bude působit nejzávažnější problémy nosič, který je velmi malý a může do těla pronikat. Ideální velikost frakce dle vlivu na lidský organismus, bez ohledu na to, jakou látku nosič bude obsahovat, je velikost od 2 do 10  $\mu\text{m}$ . Jedná se tedy o respirabilní frakci, kterou je člověk schopen vdechnout až do plicních sklípků. Tento nosič kromě toho, že musí být velmi malý, musí být navíc snadno dostupný, snadno detekovatelný a nesmí při výbuchu měnit frakci. Z tohoto důvodu byl pro testy vybrán mikromletý sklářský písek z lokality Střeleč nebo práškový, mikromletý grafit. Z ekologických i praktických důvodů, jako je např. opakování testů v krátkém sledu za sebou, byl zvolen mikromletý sklářský písek obsahujícího 99,9 %  $\text{SiO}_2$  (CAS: 14808-60-7). Z hlediska mineralogicko - petrografického se jedná o písek vyrobeného z pískovce o převažující frakci 0,1 až 0,6 mm.

Pro praktické ověření spékavosti stopovače bylo za laboratorních podmínek provedeno žíhání pěti náhodně vybraných vzorků křemenného písku. Při stanovení podmínek žíhání bylo přihlédnuto ke skutečnosti, že při výbuchu by případně probíhalo suché slinování čistého křemene bez přítomnosti taveniny. Lze-li počítat s počáteční teplotou tání křemene

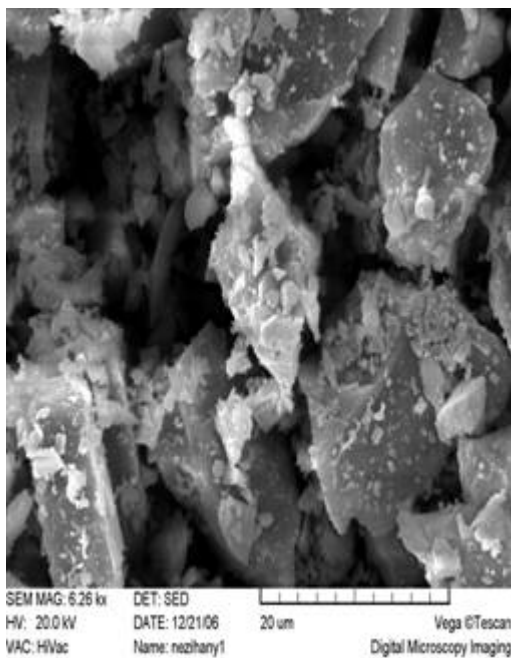


kolem 1500 °C a s tím, že slinování nastává přibližně při 0,8 absolutní teploty tání křemene, byla stanovena teplota žíhání na 1200 °C. Působení tlaků se při této zkoušce neuvažovalo.

Zkoumané vzorky byly volně nasypány na podložku a umístěny do žíhací pece. Vzorky byly žíhány při stanovené teplotě v časových intervalech 1 až 5 minut. Uvedený časový interval řádově převyšoval působení teplot při výbuchu. Při porovnání snímků před a po žíhání je zřejmé, že za atmosférického tlaku nemá teplota 1200 °C žádný vliv na změnu částic křemene. Nedošlo k žádným pevným srůstům mezi částicemi a ani k patrným deformacím na povrchu částic (viz obr. 6 a 7).



Obrázek 6: Detail jednotlivých zrn písku před žíháním; Autor: Petr Dvořák.



Obrázek 7: Detail jednotlivých zrn písku po žíhání; Autor: Petr Dvořák.

## Specifikace výbuchů

Prováděné testy měly kromě samotného uvádění jemně mletého křemene do vznosu a sledování jeho rozptylu v atmosféře také za cíl ověřit, zda má druh použité výbušné složky vliv na následný průběh rozptylu vzniklého oblaku. Pro tento účel byly proto specificky vybrány vhodné trhaviny, které se lišily ve sledovaných parametrech, především pak v detonační rychlosti. Tato veličina totiž určuje rychlost rozletu materiálu uváděného do vznosu, což může mít v konečném důsledku vliv na tvar vzniklého oblaku. Dalším parametrem, který bylo nutné při výběru vhodné trhaviny také zohlednit, bylo výbušné teplo. Pro minimalizaci vzniku aglomerátů je nutné, aby bylo co nejnižší, tj. aby nedocházelo ke spékání částic a vytváření tak větších celků. Tato skutečnost by totiž výraznou měrou ovlivnila průběh testů, protože by tak došlo ke znatelnému úbytku množství materiálu, který by se v podobě oblaku šířil přes polygon, na kterém byly rozmístěny detekční body. Jelikož není snadné určit množství, které by tímto nežádoucím procesem bylo vyloučeno z rozptylu v atmosféře, potažmo hmotnost materiálu tvořícího vzniklý oblak, je zjevné, že tento parametr je značně důležitý.

Výběr výbušniny by měl zohledňovat také požadavky na bezpečnost práce. Z tohoto ohledu jsou nevhodnější zejména trhaviny s nižší detonační rychlostí a nižším výbušným teplem. Vybrané charakteristiky nejpoužívanějších průmyslových trhavin jsou uvedeny v tabulce 1.

Tabulka 1: Vybrané charakteristiky nejpoužívanějších průmyslových trhavin.

NÁZEV TRHAVINY	DRUH TRHAVINY A JEJÍ KONZISTENCE	HUSTOTA NÁLOŽE (G/CM <sup>3</sup> )	DETONAČNÍ RYCHLOST (M/S)	VÝBUCHOVÉ TEPLO (KJ/KG)
DAP 1A	povrchová sypká	0,95	3 000	3 768
PERMONEX V 19	skalní sypká	1,0	4 800	4 086
PERMON EXTRA 18	skalní sypká	1,35	3 900	2 931
PERUNIT 20	skalní plastická	1,48	5 600	4 668
DANUBIT 1	skalní plastická	1,45	5 000	4 396
DANUBIT GEOFEX	speciální plastická	1,55	6 400	4 459
SEMTEX 1A	speciální plastická	1,4	7 300	4 980
SEMTEX P 30	speciální tvrdé desky	1,3	2 500	1 591



NÁZEV TRHAVINY	DRUH TRHAVINY A JEJÍ KONZISTENCE	HUSTOTA NÁLOŽE (G/CM <sup>3</sup> )	DETONAČNÍ RYCHLOST (M/S)	VÝBUCHOVÉ TEPLO (KJ/KG)
SEMTEX 10	speciální plastická	1,4	7 200	5 030
SYNTHESIT V 18	důlně bezpečná sypká	1,05	3 800	3 349
HARMONIT	důlně bezpečná poloplastická	1,1	1 900	2 093
VESUVIT TN	speciální sypká	1,7	2 050	3 050

Po provedené analýze výše uvedených vlastností byly pro provádění testů vybrány trhaviny: SEMTEX 1A, Semtex P 30, Ostravit C a Permon 10.

### Stanovení konstrukce výbušného systému

Pro základní pohled na sestavení nálože s ohledem na slinování je nutno zohlednit skutečnost s působením tlakového účinku na malých vzdálenostech (do 10 poloměrů nálože), který je způsoben hlavně zplodinami výbuchu, ve větších vzdálenostech od nálože pak rázovou vlnou. Nutnost snížení tlakového efektu výbuchu na křemenný písek lze alespoň z části řešit zamezením vlastního kontaktu trhaviny s pískem. Vzdálenost písku od trhaviny může být zajištěna různými obaly (papírová krabice, karton, měkký plast apod.) nebo i sypkou látkou jako je například chlorid sodný ve slabé vrstvě. Pro účely terénních testů byly využívány převážně kartony nebo polyethylen.

Celý výbušný systém byl tedy řešen jako vrstevnatá nálož, kdy trhavina byla oddělena od křemenného písku přepážkou s tím, že celý systém byl bez pevného obalu (viz obr. 8). Důležitou součástí systému je také dostatečně masivní, pevná podložka, která umožní využít maximum energie vzniklé při explozi pro uvedení písku do vznosu. Pro tento účel byla použita dvou až třívrstvá litinová podložka (viz obr. 9), která poměrně dobře odolávala výbuchu používaných náložek (podle typu trhaviny byly používány náložky o hmotnostech 0,5 kg až 3 kg), ačkoli se po výbuchu vždy zdeformovala středově centrovaným průhybem (viz obr. 10).



Obrázek 8: Výbušný systém připravený k explozi; Autor: Michaela Havlová.



Obrázek 9: Výbušný systém před umístěním křemenného písku; Autor: Michaela Havlová.



Obrázek 10: Epicentrum po provedeném výbuchu; Autor: Michaela Havlová.

Pokračování v příštím čísle časopisu JOSRA.

---

Autor článku:

[RNDr. et Mgr. Petr Skřehot](#)

[Ing. Michaela Havlová](#)