

## **Diference projevů deflagračního hoření hnědouhelného prachu v prostředích pokusné štolý a nadzemním technologickém objektu**

### **Abstakt**

Článek představuje stručné výstupy z provedených experimentálních pokusů výbušnosti hnědouhelného hořlavého prachu v různých podmínkách. Jednak v podmínkách 300 m dlouhé pokusné štolý ve Štramberku, a poté v nadzemním technologickém objektu. Příspěvek poskytuje výsledky sledování rozdílných projevů a účinků při deflagraci hnědouhelného prachu v různých prostorových uspořádáních. Pozornost je věnována zejména tlakovým projevům, rychlosti šíření výbuchového tlaku i plamene, teplotním účinkům při deflagraci apod.

**Klíčová slova:** Deflagrace, hořlavý prach, výbuchový tlak, rychlost šíření plamene

### **Abstract**

The item deal with brief outputs from carried out experimental explosion tests of combustible brown-coal dust under different conditions. For one thing under conditions 300m long testing gallery in Štramberk and for another in technological above-ground building. The paper provides outcomes of observation of different effects and consequences during deflagration of brown-coal dust under various spatial arrangements. The attention is devoted especially pressure effects, velocity of pressure wave and flame spread, thermal effects during deflagration and the like.

**Key words:** Deflagration, combustible dust, explosion pressure, flame spread

### **Deflagrační hoření prachovzdušných směsí**

V rámci projektu MV VG20102015059 řešeného společností VVUÚ, a.s., bylo provedeno experimentální ověřování a stanovování výbuchových parametrů různých druhů hořlavých prachů, zjištění koncentrací jejich výbušností, závažnost následků pro dané technologie při dokonalém výbuchu a následky pro nejbližší zasažené okolí tlakovou vlnou a vzniklými fragmenty. Tyto testy byly prováděny s hořlavými prachy

reprezentující odlišné průmyslové odvětví (dřevařský, potravinářský, úpravárenský průmysl atd.) a mimo jiné byly ověřovány parametry hnědouhelného prachu (multiprachu), kterému se tento příspěvek věnuje.

Hnědouhelný prach byl nejprve podroben zkouškám v laboratorních podmínkách pro stanovení základních požárně technických parametrů.

Pro stanovení obsahu vlhkosti, popela a hořlaviny, jenž je možno považovat za první informaci o kvalitě látky z hlediska její hořlavosti, byl proveden základní chemický rozbor multiprachu ve spalovací peci MAC-500.

**Tabulka 1**

Druh prachu	Vlhkost W <sup>a</sup> v hmot. %	Popel A <sup>a</sup> v hmot. %	Prchavá hořlavina V <sup>a</sup> v hmot. %	Fixní uhlík C <sup>a</sup> v hmot. %
Hnědouhelný multiprach	4,3	19,8	39,2	36,7

Vlhkost a popel jsou z pohledu hořlavosti, látkami, které se nepodílí na hoření. Po odečtení jejich obsahu obdržíme množství hořlaviny obsažené v hořlavé látce. Při zahřívání za nepřístupu vzduchu se část hořlaviny rozloží na těkavé produkty, označované prchavá hořlavina a zbylá část se přemění na uhlíkatý zbytek, označovaný neprchavou hořlavinou. Při procesu hoření plamen vzniká spalováním prchavé části, naproti tomu neprchavá část hoří žhnutím.

Další důležité technicko-bezpečnostní parametry, potřebné pro hodnocení nebezpečí materiálu z hlediska jeho hořlavosti a výbušnosti jsou uvedeny v následující tabulce.

Zkoušky byly prováděny ve výbuchovém autoklávu o objemu 20 litrů:

**Tabulka 2**

Druh prachu	DMV [g/m <sup>3</sup> ]	P <sub>max</sub> [Bar]	K <sub>st</sub> [Bar.m.s <sup>-1</sup> ]	Střední velikost zrna [μm]
Hnědouhelný multiprach	64	7,8	195	< 40

Legenda: DMV - dolní mez výbušnosti  
P<sub>max</sub> - maximální výbuchový tlak  
K<sub>st</sub> - kubická konstanta prachu

S rostoucí velikostí zrna klesá velikost měrného povrchu a tím dochází k snižování maximálních výbuchových parametrů, ke zvyšování spodní meze výbušnosti a zkracuje se doba hoření. Obecně se dá konstatovat, že hořlavý prach o velikosti nad 0,4 mm nepřispívá ke zvyšování tlaku v uzavřeném prostoru a takový prach již obvykle nelze standardní velikostí energie iniciovat. Ovšem stačí, aby směs obsahovala 5-10 hmotnostních % jemných přísadků prachu menších než zhruba 40 μm a tato prachovzdušná směs může být opětně schopná výbuchu. Prachové podíly

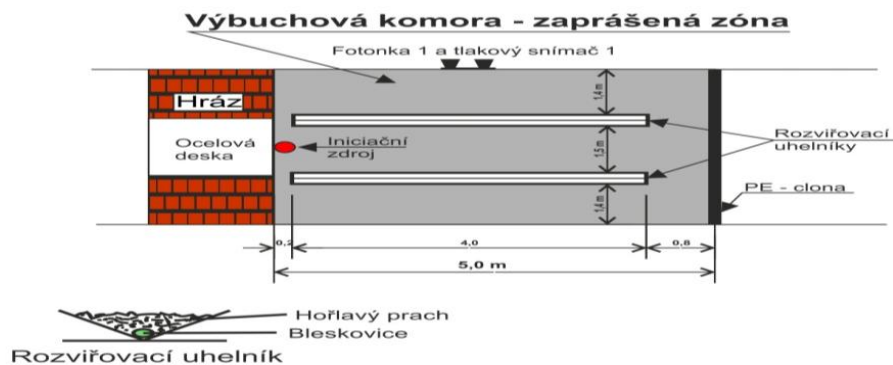
s velikostí zrna menší než 75  $\mu\text{m}$  jsou obecně považovány za nejnebezpečnější z hlediska výbuchu.

### **Experimentální pokusy deflagrace hnědouhelného prachu v podmínkách pokusné štoly**

Experimenty byly prováděny v prostorách pokusných štol VVUÚ, a.s. ve Štramberku. Štoly vyražené ve vápencovém masivu sloužící k řešení výzkumné, zkušební a zakázkové činnosti v oblasti protivýbuchové prevence a bezpečnosti a technologie trhacích prací.

Experimenty simulace výbušnosti hořlavých prachů v dlouhém důlním díle byly realizovány v tzv. velké pokusné štolě, kde byl využit prostor za hrázovým objektem dlouhý 255 m, světlý průřez chodby 8,8 až 11,9  $\text{m}^2$  byl na konci chodby propojený otevřenou lutnou průměru 800 mm s 300m měřicí štolou, což byl jediný prostor pro odventilování výbuchu. Pro měření základních výbuchových projevů, tedy výbuchový tlak, prudkost výbuchu charakterizovaná rychlostí pohybu čela plamene a rychlost výbuchové vlny, byla chodba osazena 4x tlakovými čidly a 11x snímači vyzařování plamene.

Rozvířovací a výbušný systém byl umístěn v 50  $\text{m}^3$  výbuchové komoře oddělené od následujícího prostoru chodby clonou z PE folie. K rozvíření prachu byly použity dva čtyřmetrové ocelové uhelníky. Do každého uhelníku se položila 4 m dlouhá bleskovice Starline 12 adjustovaná do série rozbuškami Dem-Zb-0, uhelník se následně zasypal danou navázkou hnědouhelného prachu. Tento, pro pokusné štoly, již standardní a osvědčený způsob rozvířování prachu nám po mnohaletých zkušenostech poskytuje poměrně stabilní rozptýlení prachu v daném objemu s nutností přihlídnutí k tomu, že zhruba 30% navážky prachu se, z důvodu částečného ulpívání prachu na stěně chodby, neúčastní mechanismu výbuchové přeměny. Takto rozvířený prach byl se zpožděním 750 ms iniciován ve středu profilu chodby u hrázového objektu, tedy od uzavřeného konce důlního díla. Schematické uspořádání zaprášené zóny ilustruje obr. 1.



Obr. 1: Schéma uspořádání výbuchové komory

Hodnoty naměřené v laboratorních podmínkách jsou prováděny v uzavřených nádobách o poměrně malém objemu, kde je hoření relativně pomalé. V dlouhých chodbách je naopak předpoklad, že výbuch bude probíhat velice prudce. V dlouhých chodbách dochází po iniciaci disperzní prachovzdušné směsi k vytvoření čela plamene, které pokryje celý profil chodby a tím dochází ke stlačení nezreagované směsi před touto plamennou frontou, čímž zároveň dochází k turbulizaci směsi a tedy ke zvyšování rychlosti hoření. Zároveň předbíhající tlaková vlna rozvířuje usazený prach a při styku s plamennou frontou dochází k hoření tohoto prachu. Tento proces trvá do té doby, dokud je k dispozici usazený prach a oxidační prostředek. Takto „přiživovaný“ výbuch může postupně přejít až do detonace.

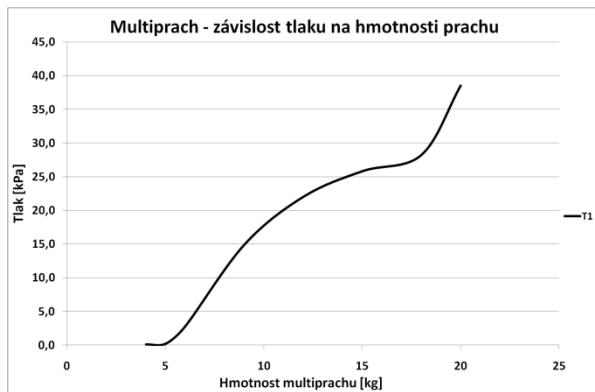
Při experimentálních pokusech bylo provedeno celkem 19 velkorozměrových pokusů s hnědouhelným multiprachem o různých navázkách. Výsledky jsou uvedeny v následující tabulce a grafech:

Tabulka 3

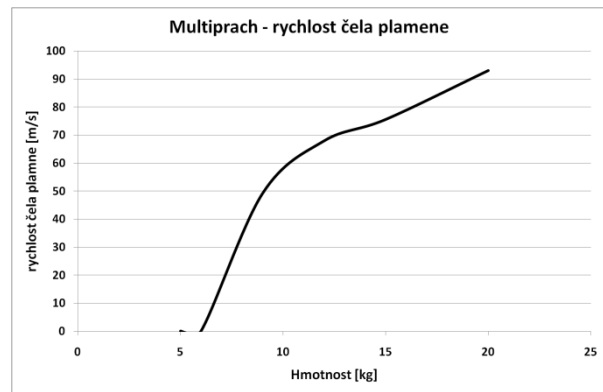
Navážka [kg]	Koncentrace rozvířeného prachu* [g/m <sup>3</sup> ]	Průměrné maximální výbuchové tlaky [kPa]				Průměrná rychlost šíření plamene** [m/s]
		T1 2,2 m	T2 17,2 m	T3 76,2 m	T4 122,2 m	
4	56	0,1	0,3	0,6	0,7	0
5	70	0,2	0,9	1,5	1,7	0
6	84	2,8	3,0	4,9	4,8	0
9	126	14,9	13,4	17,0	14,7	49
12	168	22,0	19,6	22,9	18,7	68
15	210	25,8	22,6	26,3	20,7	76
20	280	38,5	35,1	35,5	25,8	93

\*Koncentrace rozvířeného prachu v zaprášené zóně snižena o 30 %, z důvodu reálného ulpívání prachu na stěnách chodby, které se neúčastní výbušné přeměny.

\*\* Průměrná hodnota rychlosti šíření čela plamene dosažená od počátku iniciace po snímač plamene F4 ve vzdálenosti 17,5m od hrázového objektu.



Graf 1



Graf 2

Na základě analýzy záznamů z experimentálních měření v pokusné štolě VVUÚ, a.s., ve Štramberku, lze definovat tyto poznatky:

- Při zvyšování množství prachu se zároveň zvyšuje výbuchový tlak
- Koncentrace DMV v podmínkách 50 m<sup>3</sup> výbuchové komory na Štramberku se blížila k hodnotám stanovených v laboratorních podmínkách 20 litrového autoklávu
- Přetlaky v čele výbuchové vlny vyvolané výbuchem prachovzdušných směsí si v dlouhé chodbě udržují stále vysokou hodnotu i několik desítek až stovek metrů od místa iniciace. Tento jev byl nejzřetelnější u menších navážek prachu.
- Průměrné rychlosti výbuchové vlny na měřené 120 m dráze se pohybovaly okolo hodnoty 350 m/s
- Dosah plamenné fronty schopné ještě zapálit případný usazený prach ležící ve směru působení výbuchu, po iniciaci prachu v zaprášené 5 metrové zóně přesahoval při nejvyšších navážkách prachu 32 m hranici.
- Se zvyšováním množství navážky prachu se téměř úměrně zvyšuje rychlost šíření plamene
- Čím vyšší je rychlost šíření plamene hořlavého prachu, tím vyšší jsou výbuchové parametry (výbuchový tlak a rychlost narůstání výbuchového tlaku)

### **Experimentální pokusy deflagrace hnědouhelného prachu v podmínkách nadzemního stavebního objektu**

Cílem druhé experimentální části v oblasti studie výbuchovéch přeměn bylo provedení série pokusů v nadzemním technologickém objektu. Důraz byl kladen na

sledování tlakových projevů při deflagraci rozvířených prachovzdušných směsí v dispozičně ohraničeném technologickém celku.

K těmto cílům nakonec posloužila již nepoužívaná budova dříve využívaná k ohřevu důlních větrů v prostoru bývalého rudného dolu v areálu GEAM Dolní Rožínka provoz Zlaté Hory. Zmíněnou budovu tvořilo 10 místností bez vestavby, ohraničených cihlovými zdmi o celkové půdorysné zastavěné ploše cca 320 m<sup>2</sup> viz. obr. 2 a 3.



Obr. 2: Budova bývalého ohřevu vtažných větrů



Obr. 3: Vnitřní prostor místnosti VI.

Byly zde provedeny celkem tři velkorozměrové experimentální pokusy spočívající v rozvíření hnědouhelného multiprachu a jeho následné iniciaci. Každý pokus byl proveden v geometricky rozdílných místnostech označených II., V., a VI. Základní geometrické parametry a také množství a odpovídající koncentrace rozvířeného prachu v místnosti jsou uvedeny v následující tabulce:

Tabulka 4

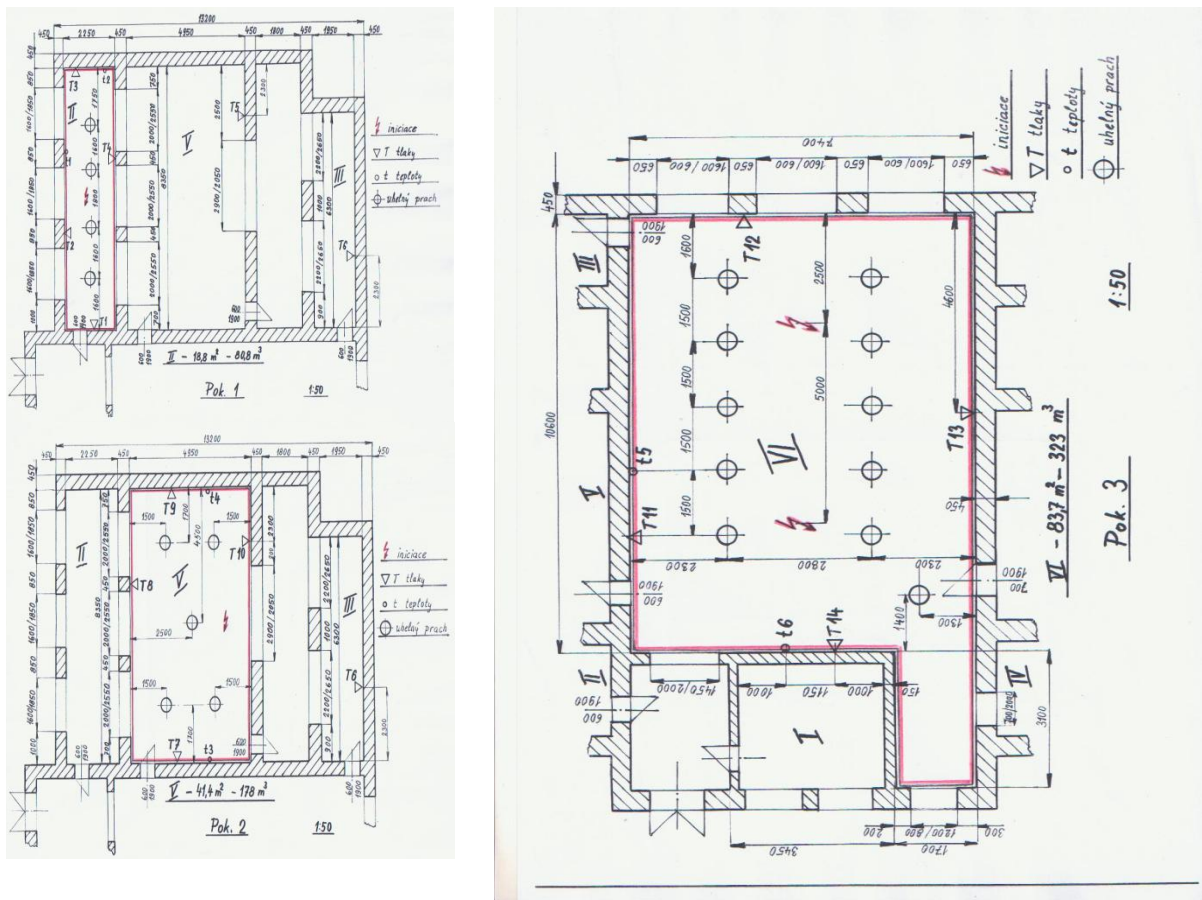
Místnost	Výška místnosti [m]	Půdorys [m <sup>2</sup> ]	Objem [m <sup>3</sup> ]	Množství uhelného prachu [kg]	Koncentrace uhelného prachu [g.m <sup>-3</sup> ]	Plocha výfukových otvorů [m <sup>2</sup> ]
II.	4,3	18,8	80,8	4x4,7 =18,8	233	8,9 +15,0
V.	4,3	41,4	178	4x7,8+1x10 =41,2	231	21,0
VI.	3,9	83,7	3223	11x6,8 =74,8	231	X*

\*Z důvodu nestandardních podmínek popsáno dále v textu.

Technická data, podklady a podmínky experimentálního měření:

- pro vytvoření výbušné směsi byly v místnosti zavěšeny papírové pytle s hořlavým prachem, kde v těžišti každého z pytlů byla umístěna náložka trhaviny, která pytel s prachem rozstřelila a dostala do vznosu
- místnosti byly bez jakékoli vestavby
- k iniciaci byla použita usměrněná nálož 300 g černého prachu uložená na zemi uprostřed místnosti
- ventilační otvory byly zakryty PE-folií a všechny netěsnosti ve zdivu a pod stropem byly zatěsněny montážní pěnou
- tlaky v místnosti byly měřeny převodníky tlaku v 6 místech (4 v zaprášené místnosti + 2 mimo zaprášené místnosti)
- koncentrace rozptýleného prachu dosahovala 3 až 4 násobek stechiometrické směsi, z důvodu navození optimálních podmínek kdy je dosahováno nejvyšších hodnot výbušového tlaku a rychlosti narůstání výbušového tlaku

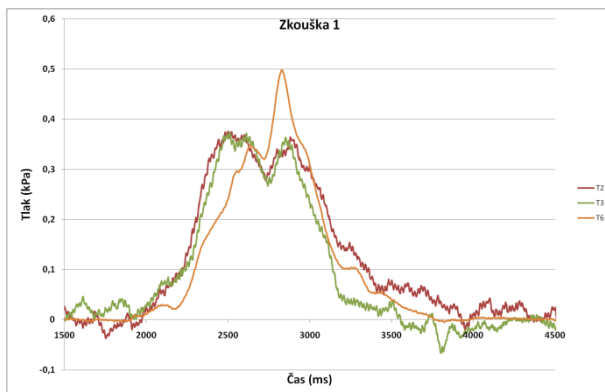
Schéma osazení místností jednotlivými tlakovými čidly jsou patrné z obr. 4



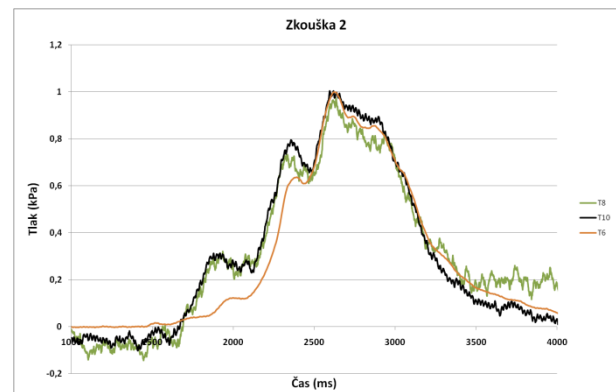
Obr. 4: Osazení místností pro pokusy 1,2,3

Je potřeba si uvědomit, že při těchto pokusech se jedná o vnitřní ventilované výbuchu prachu, což znamená, že při deflagračním procesu dochází při nízkých tlacích k proražení nejslabšího tzv. ventilačního prvku (okna, dveře), čímž se z těchto prvků stávají volné plochy výfukových otvorů a dochází k odvodu a snížení tlaku mimo vnitřní prostory. Nedochozí k dalšímu razantnímu růstu deflagračního tlaku, oproti uzavřeným prostorám, a tím se sníží tlaky působící na nosné části budovy. Dochází tedy k tzv. ventilaci objektu, která je z pohledu stability, pro objekt jako celek, rozhodně věc přínosná. Po počáteční fázi výbuchu s přetlakem následuje druhá fáze výbuchu s podtlakem. S tímto účinkem je rovněž nutno počítat.

Tlakové průběhy zkoušek 1 a 2, uvedené pro přehlednost pouze ze tří tlakových snímačů, dokumentují grafy 3, 4. Při obou pokusech došlo k velice snadnému uvolnění ventilačních prvků (PE-folií) a k výraznému odfuku a následnému zahoření prachovzdušné směsi mimo objekt okenními otvory. Výšleh plamene dosahoval až 10 m od stěn budovy (viz. obr. 5 a 6). Naměřené přetlaky byly vlivem včasné ventilace velice nízké, avšak při cirka dvojnásobném množství uhelného prachu při zkoušce 2 došlo k zdvojnásobení výbuchového tlaku oproti zkoušce 1. Za zmínku stojí, že nejvyšší dosažený tlak byl naměřen v místnosti III. mimo zaprášenou zónu. Při zkouškách nedošlo k vytvoření výraznějších trhlin nebo jinému poškození budovy.



Graf 3



Graf 4



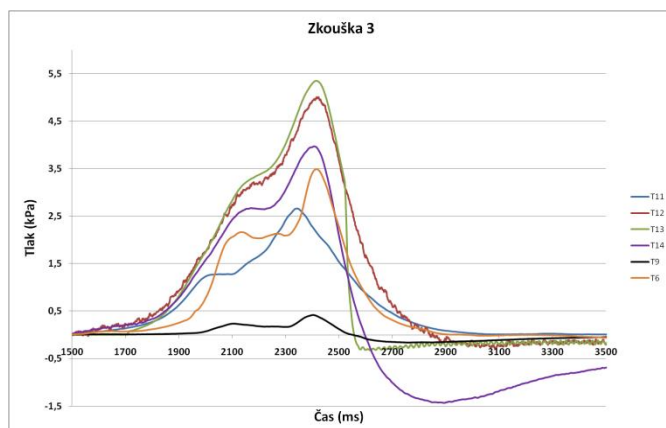


Obr. 5: Odfuk uhlého prachu po rozprášení a protržení folie v oknech



Obr. 6: Následný výšleh plamene

Zkouška č. 3 byla specifická v tom, že jednak probíhala v objemově největší místnosti, tím pádem s největším množstvím reagujícího hořlavého prachu, ale hlavně v této místnosti VI. nebyly ventilační otvory uzavřeny „lehkými“ PE-clonami, ale nesrovnatelně odolnějšími skleněnými tvárniciemi (luxfery) a plechovými dveřmi. Z tohoto důvodu nemohlo v počáteční fázi dojít k dostatečnému odventilování výbuchového tlaku včas a nárůst tlaku byl natolik veliký a prudký (viz. graf 3), že jedna z nosných zdí budovy tento přetlak nevydržela a vlivem tlaku došlo k její úplné destrukci, jak dokumentují obrázky 7, 8. Protilehlá stěna byla ve venkovních rozích posunuta o 10-20 cm (obr.9).



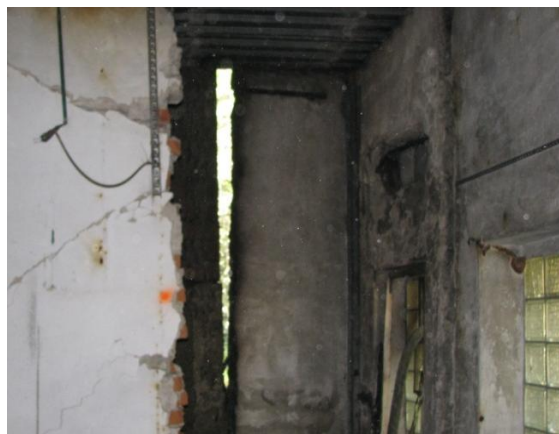
Graf 5



Obr. 7: Destrukce přední nosné stěny po zk. 3



Obr. 8: Vnitřní pohled destrukce přední stěny



Obr. 9: Posunutí protilehlé stěny

Srovnání jednotlivých tlakových maxim dosažených při pokusech v nadzemním objektu uvádí následující tabulka 5.

Tabulka 5

Hodnoty maximálních výbuchového tlaku při deflagraci prachovzdušné směsi v objektu							
ČZ	ZM	Navážka [kg]	Tlaková čidla/ tlaky [kPa]				
			T1	T2	T3	T4	T6*
1	II.	18,8	0,41	0,38	0,37	0,31	0,50
			T6*	T8	T9	T10	T12
2	V.	41,2	1,00	0,97	1,00	1,00	0,47
			T6*	T9*	T11	T13	T14
3	VI.	74,8	3,48	0,42	2,66	5,35	3,96

Legenda: ČZ – číslo zkoušky  
 ZM – zaprášená místnost  
 Poznámka: \* čidlo mimo zaprášenou místnost

### Shrnutí experimentálních výsledků

Každý průmyslový objekt nebo provoz by měl být předmětem zjišťování nebezpečí požáru, ale v neposlední řadě i odhadem nebezpečí výbuchu. Identifikace nebezpečí výbuch spočívá předně ve stanovení a vyhodnocení požárně technických charakteristik hořlavého materiálu vyskytující se v hodnoceném objektu. Je potřeba brát v úvahu že požárně technické charakteristiky jsou stanoveny v laboratorním (malém) měřítku za stanovených podmínek zkoušky, které né vždy odpovídají skutečným podmínkám na pracovišti. Proto je nutné vždy brát v úvahu reálné podmínky v daném provozu.

Při našich experimentálních měřeních byla přesně vidět odlišnost v procesu deflagrace prachovzdušné směsi v dlouhé chodbě (důlním díle) a v nadzemním technologickém objektu.

V dlouhé chodbě při iniciaci disperzní směsi se vytvoří čelo plamene, které před sebou tlačí jako píst nezreagovanou směs, tlak vytvořený z expanze plynů stále narůstá a posiluje se v závislosti na množství paliva, dochází k vytvoření vzdušné rázové vlny. Nemůže dojít k uvolnění tlaku do okolního prostředí, dynamika výbuchu roste a za určitých podmínek může přejít až do detonace.

Při výbuchu prachovzdušných směsí ve vnitřním prostoru stavebních objektů či různých konstrukcí, je celkový průběh zatěžování vnitřních stěn objektu značně složitější. Při iniciaci rozvířeného prachu s dostatečnou koncentrací dochází k vytvoření vzdušných rázových vln s určitým přetlakem. Po dopadu na vnitřní stěny dochází k jejich odrazu a v navazující části k jejich interferenci. Tento časově složitý průběh zatěžování výbuchovým tlakem se skládá jak z primární vlny, tak ze série druhotných vln. Na každém místě vnitřního povrchu je časový průběh tlakového zatěžování rozdílný a v detailech obtížně předvídatelný. Na průběh postupné expanze komorového přetlaku mají výrazný vliv tzv. volné plochy výfukových otvorů (okna, dveře, průduchy apod.) Poměr volné plochy výfukových otvorů ( $A_v - m^2$ ) k celkovému vnitřnímu prostoru objektu ( $V - m^3$ ), který výrazně ovlivňuje tlakové pole jehož důsledkem je vznik napěťového zatížení stavebního objektu. Při této ventilaci je výsledný tlak nižší než maximální výbuchový přetlak. Toto se s úspěchem využívá k ochraně různých zařízení v průmyslu.

Při vnitřním ventilovaném výbuchu je třeba vždy počítat s výstupem hořících a nespálených prachů, plamenů a účinků tlaku. Expanze plamenů může dosahovat délek jednotek až desítek metrů. Je nezbytné brát v úvahu také tu skutečnost, že uvolňovací ventilační konstrukční prvky mohou být při výbuchu vážným nebezpečím pro okolí.

Průběh výbuchového tlaku a jeho účinky jsou závislé obzvláště na objemu výbušného systému, vnitřní vestavbě a s tím související turbulenci, geometrii ohraničení, rychlosti hoření, homogenizaci směsi a koncentračních poměrech výbušného systému.

Z našich měření je patrná diference deflagračního procesu již v hodnotách maximálního přetlaku výbuchové vlny. Při pokusech v pokusné štolě byly, při srovnatelné koncentraci rozvířeného prachu ve vzduchu ( $210 - 230 g.m^{-3}$ ) s pokusy v nadzemním objektu, dosahovány tlaky okolo 25 kPa. Oproti tomu při pokusech v objektu byly při ventilaci výbuchu dosaženy tlaky o řád nižší 0,3 – 1,0 kPa.

Při posledním výbuchu v objektu je patrný vliv pozdního a nedostačného zredukování tlaku vlivem těžkých ventilačních prvků, což způsobilo při maximálním tlaku 5,35 kPa absolutní destrukci jedné z nosných zdí objektu.

Naše experimenty poukázali na fakt, jak z hlediska protivýbuché prevence prachu a studia výbušnosti jako celku, vyvolávají různá prostředí, geometrie a výbušné systémy odlišné projevy a s tím související následky. Je zřejmé, že každou situaci je třeba hodnotit samostatně s ohledem na veškeré odlišnosti vyskytující se v potenciálním výbušném systému. S tím souvisí i odlišné řešení preventivních opatření k eliminaci všech nepřijatelných rizik, které výbušný jev doprovází.

#### **Literatura:**

- [1] BUSSENIUS, S. – překlad DAMEC, J.: *Protipožární a protivýbuchová ochrana průmyslu*. Praha 1985. Účelový náklad Svazu požární ochrany
- [2] MAKOVIČKA, D. – JANOVSÝ, P. a kolektiv: *Příručka protivýbuchové ochrany staveb*. Česká technika – nakladatelství ČVÚT v Praze, 2008. ISBN 978-80-01-04090-4
- [3] NOVOTNÝ, M. – SEDLÁČEK, S.: *Teorie hoření výbuchu a iniciace*. Pardubice 1981. Syllabus pro postgraduální studium
- [4] DAMEC, J., VĚŽNÍKOVÁ, H., FONIOK, R., FONIOKOVÁ, J.: *Protivýbuchová prevence v potravinářství a zemědělství*. Ostrava 1999. Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství. ISBN 80-86111-41-5
- [5] DAMEC, J.: *Protivýbuchová prevence*. SPBI 1998. ISBN: 80-86111-21-0
- [6] Kolektiv autorů.: *Protivýbuchová bezpečnost staveb a technologií*. Ostrava 1996. Projekt grantové agentury České republiky č. 101/95/1322
- [7] Kolektiv autorů.: *Báňské záchranářství I. – Kompendium pro báňské záchranáře*. Ostrava 2000. MONTANEX. ISBN 80-7225-43-4
- [8] ZDEBSKI, J.- ŠELEŠOVSKÝ, P. – PILAŘ, R.: *Projevy deflagračního hoření metanových vrstev a homogenizované metanovzdušné směsi*. 4. Mezinárodní konference Větrání, degazace, klimatizace a bezpečnost v hornictví, Sepetná, 2012
- [9] ECKHOFF, R.: *Dust explosions in the process industries*. Elsevier Science 2003. ISBN 0-7506-7602-7