



Projekt CZ.04.3.07/3.2.01.3/3323

## **Protivýbuchová ochrana staveb**

*Projekt je podporovaný Evropským sociálním fondem,  
rozpočtem Hlavního města Prahy a státním rozpočtem České republiky*

# **PŘÍRUČKA PROTIVÝBUCHOVÉ OCHRANY STAVEB**

**Editoři: D. Makovička & B. Janovský**

Autoři:

*Ing. Milan Černín, CSc., doc. Ing. Jaroslav Damec, CSc.,  
doc. Ing. Jiří Dohnálek, CSc., Ing. Pavel Dohnálek, MSCE,  
doc. Ing. Břetislav Janovský, Dr., Ing. Jaroslav Javůrek,  
Ing. Jaromír Král, CSc., doc. Ing. Daniel Makovička, DrSc.,  
Ing. Daniel Makovička, Ing. Tadeáš Podstawka, Ph.D.,  
pplk. Ing. Vlastimil Prokop, Ing. Marie Studničková, CSc.,  
Ing. Petr. Šelešovský, Ing. Jan Zigmund, Dr.*



České vysoké učení technické v Praze, Kloknerův ústav  
Univerzita Pardubice, Fakulta chemicko-technologická

## **PŘÍRUČKA PROTIVÝBUCHOVÉ OCHRANY STAVEB**

Autoři: doc. Ing. D. Makovička, DrSc. & doc. Ing. B. Janovský, Dr. a kol.

Lektorovali: prof. Ing. O. Fischer, DrSc. & doc. Ing. P. Vávra, CSc.

Vydavatel: Česká technika – nakladatelství ČVUT v Praze, Thákurova 1, Praha 6

Počet výtisků: 150

Rok vydání: 2008

Tématika příručky je zařazena do celoživotního vzdělávání členů ČKAIT.

ISBN 978-80-01-04090-4

# Obsah

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b> .....	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>VÝBUCHY A ODHAD PARAMETRŮ VYGENEROVANÝCH TLAKOVÝCH VLN</b> .....	<b>11</b>
2.1	ÚVOD .....	11
2.2	RÁZOVÉ VLNY V OTEVŘENÉM PROSTORU .....	12
2.2.1	<i>Výbuch kondenzované výbušiny</i> .....	15
2.2.2	<i>Výbuch neohraničeného oblaku par/plynu</i> .....	20
2.3	FYZIKÁLNÍ VÝBUCH .....	31
2.4	VÝBUCHY V (ČÁSTEČNĚ) UZAVŘENÉM PROSTORU .....	32
2.4.1	<i>Výbuch kondenzované výbušiny ve vnitřním prostoru objektů</i> .....	32
2.4.2	<i>Ventilovaný výbuch plynu</i> .....	38
2.4.3	<i>Výbuch prachové disperze</i> .....	42
2.5	ŠÍŘENÍ TLAKOVÉ VLNY A JEJÍ INTERAKCE S PŘEKÁŽKOU .....	45
2.5.1	<i>Odraz vlny</i> .....	47
2.5.2	<i>Dynamický tlak</i> .....	48
2.5.3	<i>Zatížení odrazného povrchu</i> .....	49
2.5.4	<i>Zatížení objektu</i> .....	51
2.5.5	<i>Zatížení zadní stěny objektů</i> .....	52
2.5.6	<i>Zatížení malých nebo otevřených objektů</i> .....	52
2.5.7	<i>Válcové nebo kulové objekty</i> .....	52
<b>3</b>	<b>EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘOVÁNÍ VÝBUŠNOSTI LÁTEK A VÝBUCHOVÉHO POLE</b> .....	<b>54</b>
3.1	KONDENZOVANÉ LÁTKY .....	54
3.1.1	<i>Požadavky ČSN EN 13631-1 (2005)</i> .....	54
3.1.2	<i>Hodnocení výkonových schopností výbušin</i> .....	57
3.2	STANOVENÍ POŽÁRNĚ TECHNICKÝCH CHARAKTERISTIK A TECHNICKO-BEZPEČNOSTNÍCH PARAMETRŮ PRACHŮ, PLYNŮ A PAR KAPALIN V SOUVISLOSTI S APLIKACÍ NAŘÍZENÍ VLÁDY Č. 406/2004 SB. ....	57
3.2.1	<i>Základní pojmy z oblasti výbušnosti plynů, par a prachů</i> .....	58
3.2.2	<i>Zdroje fyzikálně-chemických dat</i> .....	59
3.3	TECHNICKO-BEZPEČNOSTNÍ PARAMETRY PLYNŮ A KAPALIN .....	59
3.4	POŽÁRNĚ-TECHNICKÁ CHARAKTERISTIKA TUHÝCH LÁTEK .....	61
3.4.1	<i>Výbuchové parametry</i> .....	63
3.4.2	<i>Podstata výbušnosti hořlavých prachů</i> .....	65
3.4.3	<i>Výbušnost hořlavého prachu ovlivňují zejména tyto faktory</i> .....	66
3.4.4	<i>Nebezpečné zóny výbušné koncentrace v návaznosti na ČSN EN 61241-10</i> .....	67
3.4.5	<i>Základní povinnosti provozovatele prašných technologií</i> .....	68

3.5	ZJIŠŤOVÁNÍ VÝBUCHOVÉ ODOLNOSTI KONSTRUKČNÍCH PRVKŮ VÝBUchem.....	70
3.5.1	<i>Zkoušky zařízení.....</i>	70
<b>4</b>	<b>ANALÝZA ODEZVY STAVEBNÍ KONSTRUKCE.....</b>	<b>78</b>
4.1	POHYBOVÉ ROVNICE .....	78
4.1.1	<i>Hmotnost konstrukce.....</i>	79
4.1.2	<i>Tlumení.....</i>	79
4.1.3	<i>Tuhost konstrukce .....</i>	83
4.1.4	<i>Výpočet pohybových rovnic .....</i>	83
4.2	PRUŽNÉ A NEPRUŽNÉ REZERVY NAMÁHÁNÍ KONSTRUKCE .....	84
4.3	ZJEDNODUŠOVÁNÍ KONSTRUKCE A JEJÍHO ZATÍŽENÍ.....	87
4.3.1	<i>Posuzování porušení při kombinaci zatížení .....</i>	94
4.4	NEJISTOTY PŘI STANOVENÍ ODEZVY KONSTRUKCE .....	95
4.5	NORMOVÉ POŽADAVKY PRO VÝPOČET .....	96
4.5.1	<i>ČSN EN 1991-1-7 .....</i>	97
4.6	POSUZOVÁNÍ ÚČINKŮ VÝBUCHU PODLE KRITÉRIÍ .....	104
<b>5</b>	<b>VLASTNOSTI STAVEBNÍCH MATERIÁLŮ PŘI DYNAMICKÉM ZATÍŽENÍ .....</b>	<b>106</b>
5.1	ÚVOD .....	106
5.2	POSOUZENÍ STAVU MATERIÁLŮ PO PŘESTÁLÉM VÝBUCHU.....	108
5.3	ODBĚR A ZKOUŠKY JÁDROVÝCH VÝVRTŮ.....	108
5.3.1	<i>Laboratorní zpracování jádrových vývrtů .....</i>	110
5.3.2	<i>Stanovení pevnosti v tlaku.....</i>	111
5.3.3	<i>Stanovení pevnosti v tahu.....</i>	112
5.3.4	<i>Stanovení modulu pružnosti .....</i>	113
5.4	ODTRHOVÉ ZKOUŠKY .....	114
5.5	VODOTĚSNOST A NASÁKAVOST .....	116
5.6	ULTRAZVUKOVÁ IMPULSOVÁ METODA.....	117
5.7	PŘÍMÉ POZOROVÁNÍ MIKROSTRUKTURY MATERIÁLŮ.....	118
5.8	POSUZOVÁNÍ STAVU KONSTRUKCE PO VÝBUCHU JAKO CELKU .....	119
5.8.1	<i>Mapování trhlin .....</i>	119
5.8.2	<i>Geodetické metody.....</i>	120
5.9	ZATĚŽOVACÍ ZKOUŠKY .....	121
5.10	CELKOVÉ ZÁVĚRY A DOPORUČENÍ.....	122
<b>6</b>	<b>MĚŘENÍ ODEZVY KONSTRUKCE PŘI VÝBUCHU .....</b>	<b>124</b>
6.1	ÚVOD .....	124
6.2	DRUHY VÝBUCHŮ.....	125
6.2.1	<i>Výbuchy podle způsobu provedení.....</i>	125
6.3	MĚŘICÍ LINKY A JEJICH VLASTNOSTI .....	125
6.3.1	<i>Rozdělení snímačů .....</i>	127
6.3.2	<i>Specifické vlastnosti signálů a měřicích linek .....</i>	128

6.3.3	<i>Rozmístění snímačů na měřené konstrukci</i> .....	130
6.3.4	<i>Nejistota měření</i> .....	131
6.4	PŘÍKLAD - ODOLNOST ZDĚNÉ PŘEPÁŽKY .....	132
6.5	ZÁVĚR.....	135
<b>7</b>	<b>ZJIŠŤOVÁNÍ STOP PO VÝBUCHU</b> .....	<b>136</b>
7.1	KLASIFIKACE POŠKOZENÍ .....	136
7.2	PŘEDHAVARIJNÍ PORUCHY.....	138
7.3	PORUCHY ZPŮSOBENÉ VÝBUchem .....	138
7.4	HODNOCENÍ ÚČINKŮ VÝBUCHU .....	139
<b>8</b>	<b>ZAŘÍZENÍ PRO OCHRANU KONSTRUKCÍ</b> .....	<b>141</b>
8.1	VSTUPNÍ PODMÍNKY .....	141
8.2	PROTIVÝBUCHOVÉ OCHRANNÉ SYSTÉMY .....	145
8.2.1	<i>Odlehčení výbuchu</i> .....	145
8.2.2	<i>Potlačení výbuchového tlaku</i> .....	147
8.2.3	<i>Systémy pro oddělení výbuchu</i> .....	148
8.2.4	<i>Konstrukce odolné výbuchovému tlaku</i> .....	151
8.3	PŘEHLED NEJDŮLEŽITĚJŠÍCH NOREM SOUVISEJÍCÍCH S DANOU PROBLEMATIKOU .....	152
8.4	AKREDITOVANÉ ZKUŠEBNÍ LABORATOŘE.....	152
<b>9</b>	<b>METODY REKONSTRUKCE A ZTUŽOVÁNÍ KONSTRUKCÍ...</b>	<b>154</b>
9.1	ÚVOD .....	154
9.2	KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ REKONSTRUKČNÍCH ZÁSAHŮ .....	155
9.2.1	<i>Zesilování desek</i> .....	156
9.2.2	<i>Zesilování nosníků</i> .....	161
9.2.3	<i>Zesilování sloupů</i> .....	166
9.2.4	<i>Souvislé zesilování konstrukce</i> .....	171
9.3	TECHNOLOGIE SANACE VÝBUchem POŠKOZENÝCH STAVEB POMOCÍ KOMPOZITNÍCH TKANIN A UHLÍKOVÝCH PÁSKŮ .....	172
9.3.1	<i>Úvod</i> .....	172
9.3.2	<i>Kompozitní materiály</i> .....	173
9.3.3	<i>Využití kompozitních materiálů</i> .....	173
9.3.4	<i>Postup aplikace</i> .....	174
9.3.5	<i>Výzkum a normalizace</i> .....	175
9.3.6	<i>Hodnocení použití kompozitních materiálů</i> .....	176
9.3.7	<i>Závěry</i> .....	176
<b>10</b>	<b>LITERATURA</b> .....	<b>177</b>
10.1	NORMOVÉ PODKLADY .....	177
10.1.1	<i>Eurokódy</i> .....	177
10.1.2	<i>České národní normy, ISO normy a předpisy</i> .....	180
10.1.3	<i>Ostatní normy a předpisy</i> .....	181

10.2	PUBLIKACE.....	181
10.2.1	<i>Sborníky za seminářů projektu</i> .....	181
10.2.2	<i>Ostatní publikace</i> .....	182

# 1 ÚVOD

Posuzování bezpečnosti a spolehlivosti stavebních konstrukcí, zejména podle zkušeností ze světa, vyžaduje navrhovat některé konstrukce na mimořádná zatížení, způsobená externími vlivy. Jedním z těchto vnějších vlivů je i výbuchové zatížení, způsobené výbuchem kondenzovaných výbušnin nebo oblaků směsí plynů a par se vzduchem, případně prachových disperzí nebo oblaků aerosolu v bytech, v průmyslových konstrukcích a ve venkovním prostředí. Zpravidla se v takovýchto případech jedná o havarijní nebo ve vybraných případech i teroristické výbuchy.

Při všech druzích výbuchu se vytváří tlaková vlna. Její intenzita a časový průběh je dána chemickými vlastnostmi výbušiny, výbušné (hořlavé) látky nebo fyzikálním stavem látky a/nebo jejími reakcemi s okolním prostředím. Tento základní projev výbuchu je především závislý na chemických reakcích nebo fyzikálních podmínkách při výbuchu a tedy relativně nezávislý na stavební konstrukci (s výjimkou objemu vnitřních prostor stavebních konstrukcí, pokud je výbuch v těchto prostorách předpokládán).

Z místa výbuchu se tedy začne šířit tlaková vlna v přibližně kulových vlnoplochách a při nárazu na povrch stavební konstrukce (stěn, stropů, podlah, zařízení ap.) nebo terénu se odrazí a modifikuje. Působení tlaku v šířící se vlně spolu s odraženou tlakovou vlnou od povrchu konstrukce nebo terénu formuje velikost zatížení konstrukce a jeho časový průběh. Zvláště pak v uzavřených prostorách místností, průmyslových hal ap., ve kterých může dojít k vícenásobným odrazům, je pro velikost zatížení konstrukce dominantní velikost právě tohoto uzavřeného prostoru.

Pro stanovení parametrů výbuchu (především časového průběhu tlaku, doby jeho trvání a to jak přetlakové, tak podtlakové fáze, eventuálně impulzu při relativně krátké době působení tlakové složky a dalších veličin existují různé přibližné metodiky odhadu, nicméně pro přesnější stanovení se vychází zpravidla z experimentálně zjištěných hodnot pro dané charakteristiky výbuchu, konkrétní geometrii prostředí, ve kterém k výbuchu došlo apod.

Při posuzování reakce stavební konstrukce na účinky výbuchu je nutné uvážit konkrétní podmínky dané lokality a stavební konstrukce, podle nichž lze odhadovat odezvu konstrukce na výbuchové zatížení, ať již přesněji výpočtem, nebo přibližně podle empirických kritérií. Jedná se zejména o typ a umístění zdroje tlakové vlny ve srovnání s posuzovanou konstrukcí, charakteristiky tlakové vlny ve zdroji a zejména časový průběh výbuchového tlaku, který je závislý jak na množství vybuchující látky, tak na množství a rychlosti uvolněné výbuchové energie a geometrii prostředí v místě uvolnění výbuchové energie.

Účinek výbuchu na konstrukci je závislý na dráze, po které se výbuchová vlna šíří ke konstrukci, případně u vnitřních výbuchů na velikosti prostor, ve kterých došlo k výbuchu, možnostech otevření odlehčovacích otvorů (oken, dveří, lehkých příček apod.) a na rozmístění a velikosti překážek šířící se tlakové vlny na cestě k zatížené konstrukci a na vlivu zemního prostředí na modifikaci výbuchem indukovaného seismického vlnění. o velikosti a charakteru odezvy výbuchem zatížené konstrukce rozhodují vlastnosti konstrukce jako celku nebo jejích částí a jejich materiálu. Jedná se zejména o mechanické charakteristiky materiálu (především jeho pevnost, způsob porušování, diagram závislosti napětí na deformaci, chování za mezí pružnosti, způsobu porušování ap.) a rozložení hmot a tuhosti konstrukce a tomu odpovídající frekvenční naladění konstrukce, charakter povrchů, které rázová vlna zatěžuje, geometrii konstrukce ve srovnání s charakteristikami výbuchové vlny, předchozí poruchy v konstrukci, včetně změn vlastností materiálu konstrukce s časem u stávajících konstrukcí apod.

Účinky výbuchů a jimi generovaných tlakových vln, pádů nejrůznějších trosek výbuchem porušené konstrukce, nesených větrem nebo tlakovou vlnou, patří z hlediska navrhování stavebních konstrukcí mezi mimořádná zatížení. Kombinace statických a dynamických projevů návrhových zatížení spolu s účinky výbuchu je významná při posuzování konstrukcí v případě významných staveb typu elektráren, mostů, výškových staveb nebo průmyslových provozů, ale i staveb bytových, při nichž únik a následná exploze hořlavých a výbušných látek, případně havarijní, teroristické nebo vandalské útoky mohou vyvolat ohrožení obyvatelstva nebo velké ekonomické ztráty.

Cílem příručky je seznámit odbornou veřejnost s problematikou výbuchového zatížení, analýzou chování konstrukce při tomto zatížení, včetně posuzování jeho účinků, sledování poruch konstrukce a poskytnout podklady pro ztužování a opravy konstrukce po výbuchu.

Členění příručky pak vychází z logické posloupnosti řešení problému výbuchu, odezvy konstrukce a její ochrany. v zásadě je možné se setkat se dvěma typy problémů:

- a) Je potřeba analyzovat odolnost konstrukce vůči účinkům potenciálního výbuchu, tedy ještě před výbuchem, nebo
- b) k výbuchu již došlo a je potřeba zjistit jeho příčiny, posoudit míru poškození a rozhodnout, zda konstrukci zrekonstruovat či nahradit jinou tak, aby případné další takovéto zatížení vydržela.

Naštěstí je častějším problémem analýza odolnosti konstrukce vůči účinkům potenciálního výbuchu. v tomto případě je potřeba začít analýzu identifikací zdroje rizika, tedy identifikovat podmínku nebo situaci, která má potenciál



způsobit nežádoucí následek. v daném případě tedy identifikovat, zda může dojít k výbuchu kondenzované výbušiny, výbuchu oblaku plynu, prachové disperze nebo výbuchu (prudké expanzi) stlačeného plynu. Následně pak odhadnout sílu výbuchu a parametry vygenerované tlakové vlny. Znalosti a prostředky k vyřešení tohoto problému lze nalézt v kapitole 2. Tato kapitola dále popisuje chování tlakové vlny při jejím šíření okolním prostředím a její interakci s překážkami.

Pro odhady parametrů tlakových vln je často potřeba získat data týkající se výbušných vlastností vybuchující látky. Některé z těchto vlastností nelze získat jinak než experimentálně. Přehled experimentálních metod umožňujících ověřovat výbušnost látek a jejich výbušných vlastností je uveden v kapitole 3. Dále jsou zde popsány experimenty pro zjištění odolnosti konstrukčních prvků výbuchu.

Po odhadnutí parametrů vygenerované tlakové vlny přichází na řadu analýza odezvy stavební konstrukce. v kapitole 4 pak lze nalézt metodiky stanovení této odezvy.

Hodnocení odezvy stavebních konstrukcí je nemyslitelné bez znalostí vlastností stavebních materiálů při dynamickém zatížení. Základní pevnostní charakteristiky a jejich ověřování na skutečné konstrukci pro základní konstrukční materiály jsou obsaženy v kapitole 5.

Použitelnost jednotlivých metod stejně jako platnosti výpočetních vztahů by měly být ve složitějších případech prověřeny praktickými měřeními. Kapitola 6 se problematikou měření odezvy konstrukce při výbuchu zabývá. Je zde popsáno měření základních parametrů, jako jsou tlaky, zrychlení, rychlosti a výchylky spolu s nejistotou těchto měření.

Proces analýzy je završen návrhem zařízení pro ochranu konstrukcí a omezení následků výbuchů. Prostředky, které lze pro ochranu konstrukcí a zařízení použít, jsou uvedeny v kapitole 7.

Druhým problémem, který vyžaduje analýzu výbuchu a odezvy konstrukce, je vyšetřování již nastalých výbuchů. v tomto případě se začíná se zjišťováním stop po výbuchu, které pak umožňují odhadnout jak sílu výbuchu a potenciální příčinu výbuchu, tak navrhnout metody rekonstrukce a případného ztužení konstrukce po výbuchu. Kapitola 8 se zabývá obecnými zásadami při navrhování protivýbuchových opatření a konstrukčních systémů k omezení a potlačení výbuchových přeměn. Metody rekonstrukce a ztužování konstrukcí po výbuchu obsahuje kapitola 9.

V rámci grantového projektu, podporovaného Evropským sociálním fondem, se podařilo shromáždit kolektiv autorů jak z oblasti stavebního, tak chemického inženýrství, kteří se podíleli na řešení projektu, na jehož základě byla příručka zpracována. v rámci řešení projektu proběhly čtyři semináře a byly vydány odborné publikace – sborníky z těchto akcí, které spolu s diskusí mezi odborníky byly podnětem pro zpřesnění obsahu příručky. Příručka je tedy určena všem, kteří se výbuchy zabývají z hlediska navrhování konstrukcí a jejich ochrany před výbuchy. Jejím cílem je formulování základních pojmů jak z teorie výbuchu, tak stanovení odezvy konstrukcí na tento typ zatížení, včetně zásad zjišťování stop po výbuchu a navrhování rekonstrukcí poškozených částí.

Na vypracování příručky spolupracovali specialisté z nejrůznějších ústavů a institucí, kteří jsou dále uvedeni bez akademických, pedagogických a vědeckých titulů. Jedná se o pracovníky ČVUT v Praze, Kloknerova ústavu: J. Dohnálka (kap. 5), J. Krále (kap. 6), D. Makovičku (část kap. 1, část kap. 4, část kap. 7, kap. 10) a M. Studničkovou (část kap. 4). z Univerzity Pardubice pak o B. Janovského (část kap. 1, část kap. 2). z TU VŠB v Ostravě spolupracoval J. Damec (část kap. 2, část kap. 3, část kap. 8). z VVUÚ v Ostravě - Radvanicích se účastnili M. Černín (část kap. 3, část kap. 8) a P. Šelešovský (část kap. 3, část kap. 8). z ostatních výrobních, projekčních a konzultačních pracovišť se na přípravě příručky podíleli: P. Dohnálek z firmy Betosan s.r.o., Praha 4 (kap. 9), J. Javůrek z firmy Plynostav, a. s., Pardubice (část kap. 3), D. Makovička, ml. z konzultační firmy Statika a dynamika konstrukcí, Kutná Hora (část kap. 4, část kap. 7), T. Podstawka z firmy IHAS, s.r.o., Ostrava (část kap. 8), V. Prokop z Vyšší policejní školy MV, Pardubice (část kap. 7) a J. Zigmund z vlastní firmy Ing. Jan Zigmund, Pardubice (část kap. 2).

## 2 VÝBUCHY A ODHAD PARAMETRŮ VYGENEROVANÝCH TLAKOVÝCH VLN

### 2.1 ÚVOD

Za výbuch je obvykle považován velmi rychlý děj, spojený s velkým vzrůstem uvolněné energie, tlaku, tepla, zvuku, případně světla s následnými účinky (práce, destrukce atd.). v principu se výbuchy dělí na

- a) jaderné, kde k uvolnění energie dochází přestavbou atomových jader;
- b) fyzikální, při kterých se podstata látky nemění, ale uvolněná energie se obvykle získá ze změny skupenství dané látky nebo hybnosti (součin hmotnosti a rychlosti pohybu);
- c) chemické, kde je energie získána chemickou reakcí (tedy odpovídající změnou vazeb mezi atomy).

Výbuchy se tedy dělí podle druhu a původu uvolněné energie a dále podle geometrie, ve které k výbuchu dochází. Pokud bude vynechán výbuch jaderný, pak se jedná o uvolnění chemické energie při reakci výbušné látky nebo o expanzi stlačeného plynného nebo kapalného média. Jak již bylo uvedeno výše, na parametry vygenerovaných tlakových vln má velký vliv i prostředí, ve kterém k výbuchu dojde. Rozdělení pak vypadá následovně:

1. Výbuch kondenzované výbušiny:
  - a) volné prostranství – 3-D geometrie,
  - b) uzavřené objekty,
  - c) potrubí a tunely – 1-D geometrie.
2. Výbuch plynu:
  - a) volné prostranství – 3-D geometrie,
  - b) uzavřené objekty,
  - c) potrubí a tunely – 1-D geometrie.
3. Výbuchy prachových disperzí:
  - a) uzavřené objekty,
  - b) potrubí a tunely – 1-D geometrie.
4. Fyzikální výbuch:
  - a) volné prostranství – 3-D geometrie,
  - b) uzavřené objekty,
  - c) potrubí a tunely – 1-D geometrie.

Podrobnější výklad bude v souladu s tímto rozdělením navazovat v dalších kapitolách. Dříve je však nutné v krátkosti vysvětlit základní mechanismy výbušné přeměny spojené s uvolněním chemické energie, protože tyto

mechanismy jsou v zásadě společné pro výbuchy kondenzovaných výbušin, plynných oblaků i prachových disperzí.

Rozdělení těchto mechanismů se provádí v závislosti na rychlosti děje a jeho tlakového projevu. Jedná se o

- a) explozivní hoření (deflagraci),
- b) přechod od hoření (deflagrace) do detonace a
- c) detonaci.

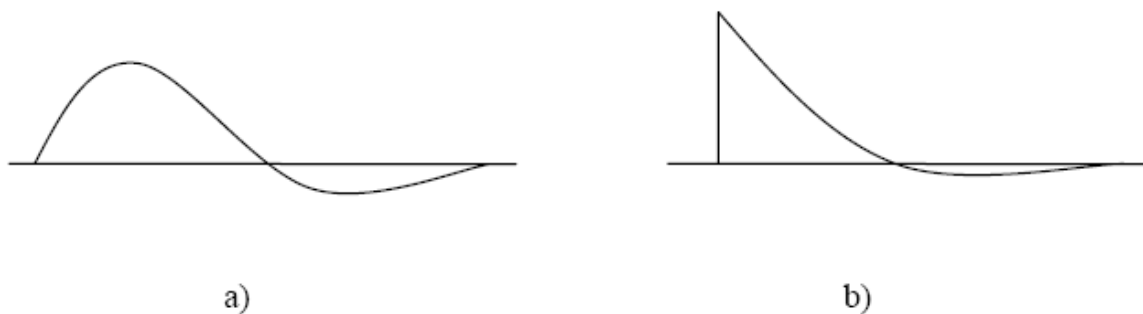
**Explozivní hoření (deflagrace)** se vyznačuje rychlostmi hoření řádově od  $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$  až do desítek  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  a nízkými tlaky (od nepatrného přetlaku až do několika MPa). Vzhledem k hodnotám rychlosti hoření dochází k tomu, že tlaková vlna předbíhá reakční pásmo.

**Přechod od hoření (deflagrace) do detonace** je děj, probíhající rychlostí až několika stovek  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  a dosahující tlaků až stovek MPa. Jedná se o proces velmi komplikovaný, na jehož vysvětlení zatím nebyla vytvořena ucelená teorie.

**Detonace** probíhá rychlostí vyšší než  $1000 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  a v čele tlakového pole je rázová vlna; znamená to okamžitý nárůst tlaku na hodnotu jednotek až desítek GPa (detonace má diskontinuitu). v tomto případě dochází k iniciaci reakce prudkým stlačením reakční směsi nebo látky rázovou vlnou. Reakční pásmo tak bezprostředně následuje rázovou vlnu.

## 2.2 RÁZOVÉ VLNY V OTEVŘENÉM PROSTORU

Při výbuchu dochází k vzrůstu tlaku, tedy k vytvoření tlakové vlny. Je možné rozlišit dva základní typy tlakových vln: vlny spojitě a vlny nespojitě - rázové (obr. 2-1).



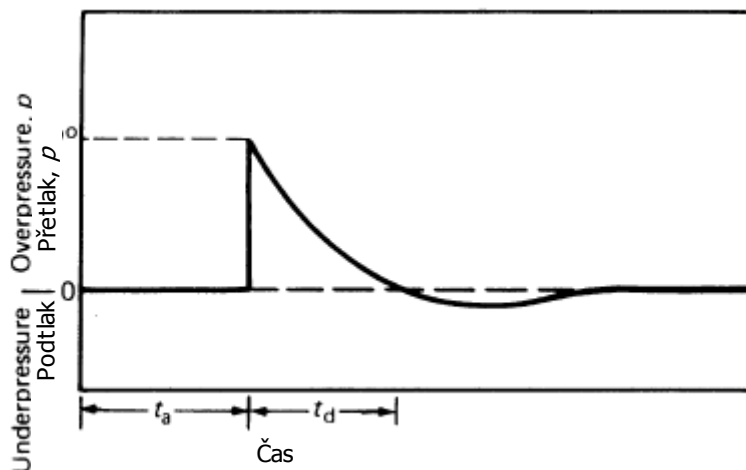
**Obrázek 2-1: Průběhy tlaků při roztržení tlakové nádoby; a) spojitá vlna; b) rázová vlna**

V případě detonace nálože ve tvaru koule se středovou iniciací, detonující ve vzduchu (dostatečně vzdálenou od povrchu země), se rázová vlna, následovaná produkty detonace, šíří do okolního vzduchu v kuloplochách, jejichž povrch se stále zvětšuje. Ve vzdálenosti asi  $8 \div 15$  průměrů původní nálože se čelní rázová vlna oddělí od zplodin (ty jsou hmotné a částice vzduchu je zastaví) a pokračuje jako vzdušná rázová vlna. s postupující vzdáleností její energie značně klesá se zvyšujícím se objemem a povrchem a rovněž ztrátami (odpor vzduchu, turbulence, ohřev atd.).

Obecné vlastnosti rázové vlny v plynech mohou být popsány následovně:

- a) Rázovou kompresí roste teplota rychleji než při adiabatické isoentropické kompresi, kde z tlaku 0,1 MPa na 3 MPa (např. ve válci) stoupne teplota plynu asi o 450 °C, při stejném tlaku v rázové vlně teplota vzroste asi o 1300 °C. Je to způsobeno tím, že v rázové vlně se značná část mechanické energie nevratně mění na teplo a současně roste entropie.
- d) Hustota plynného prostředí (vzduchu) působením rázové vlny roste pomaleji než při adiabatické isoentropické kompresi a při průchodu velmi silné rázové vlny limituje k určité hodnotě (asi dvacetinásobku počáteční hustoty).
- e) Rychlost šíření rázové vlny v plynech je tím vyšší, čím je vyšší tlak na čele vlny a je vždy větší než rychlost zvuku v původním prostředí.
- f) Relativní rychlost částic (plynu) za čelem rázové vlny je vůči čelu menší než rychlost zvuku ve stlačeném plynu.
- g) V plynném prostředí existuje expanzní vlna s podtlakovým skokem pouze omezenou dobu a rychle přechází do expanzní vlny se spojitým průběhem.
- h) V plynném prostředí přechází spojitá vlna vyvolaná deflagrací za určitou dobu ve vlnu rázovou.
- i) Při velmi malých tlacích se rychlost rázové vlny blíží rychlosti zvuku v plynném prostředí.

Průběh přetlaku (pozitivní tlaková část nad tlakem okolí) v závislosti na čase u rázové vlny je uveden na obr. 2-2. Jsou zde uvedeny následující důležité parametry této vlny: maximální přetlak v čele dopadající vlny  $\Delta p_+$  (na obrázku  $p^0$ ), čas příchodu rázové vlny (přetlaku)  $t_a$  (čas detonace  $t = 0$ ) a doba trvání pozitivní přetlakové fáze  $t_+$  (na obrázku  $t_d$ ).



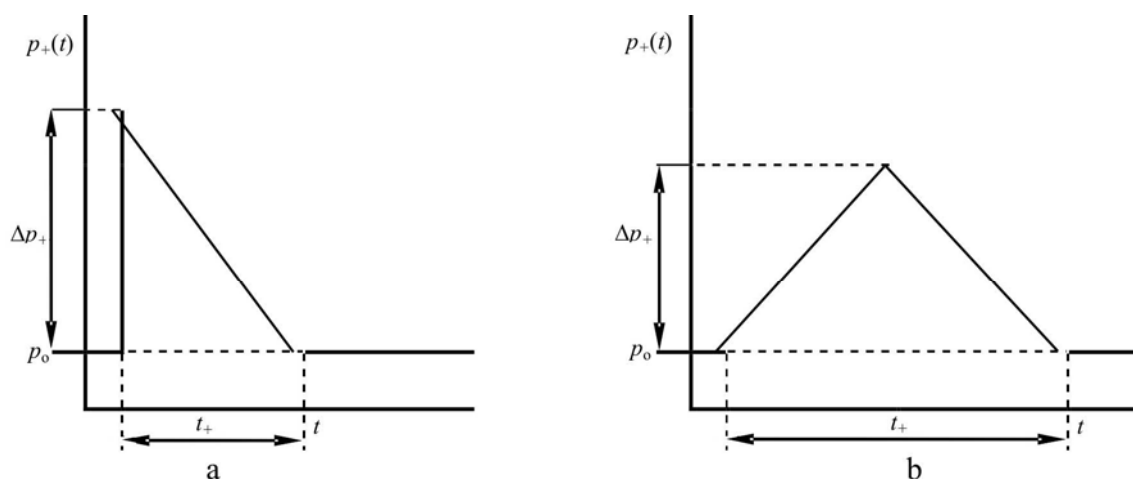
**Obrázek 2-2: Ideální tvar vzdušné rázové vlny (Lees, 1996)**

Pro snadnější představu je možné průběh tlaku v závislosti na čase zjednodušit na trojúhelníkový tvar (obr. 2-3).

Rychlost rázové vlny  $u$  (m/s) je vyjádřena rovnicí

$$U = c_0 \cdot \left(1 + \frac{6 \cdot \Delta p_+}{7 \cdot p_0}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (2-1)$$

kde  $c_0$  je rychlost zvuku ve vzduchu ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) a  $p_0$  je absolutní tlak vzduchu před rázovou vlnou (Pa).



**Obrázek 2-3: Charakteristický tvar a časová závislost:  
a) rázové vlny  
b) spojitě vlny**

Rychlost částic  $u$  je vyjádřena rovnicí

$$u = \frac{5 \cdot c_0 \cdot \Delta p_+}{7 \cdot p_0} \cdot \left( 1 + \frac{6 \cdot \Delta p_+}{7 \cdot p_0} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2-2)$$

Dalším významným parametrem tlakových vln je maximum dynamického tlaku  $q$  (kPa), které je popsáno rovnicí

$$q = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot u^2 \quad (2-3)$$

kde  $\rho$  je hustota vzduchu za čelem rázové vlny ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ).

Hodnotu maxima dynamického tlaku  $q$  lze rovněž vypočítat z rovnice

$$q = \frac{5}{2} \cdot \frac{\Delta p_+^2}{7 \cdot p_0 + \Delta p_+} \quad (2-4)$$

Jak je z rovnic patrné, jsou jednotlivé parametry rázových vln závislé na hodnotě maximálního přetlaku  $\Delta p_+$ . Při zjednodušených postupech hodnocení potenciálních škod způsobených výbuchem je to základní parametr posuzování. Výpočet této hodnoty se liší podle typu výbuchu. v následujících podkapitolách je uvedeno, jak se tento parametr počítá pro výbuchy kondenzovaných výbušin, výbuchy neohrazeného oblaku par a fyzikální výbuch. Nepředpokládá se, že by výbušná oblaka rozptýleného prachu na otevřených prostranstvích mohla mít takové rozměry, aby mohlo dojít k vygenerování tlakových vln. u jednotlivých výbuchů jsou vysvětleny základní principy a následně uvedeny vztahy pro jejich výpočtové stanovení.

### 2.2.1 Výbuch kondenzované výbušiny

Výbušinou se rozumí látka schopná nezávisle na okolí uvolnit velké množství energie velmi rychlou chemickou reakcí za definovaných podmínek. Termínem “nezávisle na okolí” je současně určeno, že složení výbušiny zaručuje nepotřebnost reakcí s okolím (např. s kyslíkem ze vzduchu) a dále schopnost vybuchovat v jakémkoli prostředí (voda, hornina atd.). Podobně výraz „velmi rychlá chemická reakce” znamená velkou hodnotu rovnovážné konstanty nevratné reakce a velmi krátké trvání této reakce (až pikosekundy či ještě kratší).

V případě kondenzovaných výbušin dochází k vygenerování tlakové vlny následkem uvolnění chemické energie při chemické reakci výbušiny. Ve většině případů se jedná o rozklad pevné látky se složitější strukturou na látky (produkty) se strukturou jednodušší (zejména plynné skupenství) za uvolnění tepelné energie. Tato tepelná energie pak ohřívá okolní atmosféru, která se rozpíná a spolu s expandujícími zplodinami se podílí na generování tlakové vlny, šířící se od výbuchu. Kromě rozkladných reakcí se může jednat také o reakce oxidační, kdy spolu reagují dvě látky a jedna slouží jako palivo a druhá jako okysličovadlo. v obou případech však k uvolnění energie není potřeba okolní vzduch (kyslík).

K tomu, aby byla vygenerována tlaková vlna, je nutné, aby k uvolnění energie došlo co nejrychleji. Podle mechanismu šíření reakčního pásma je zapotřebí zlomků sekund – desítek milisekund až pikosekund. Každá výbušina nebo výbušný systém je charakterizován množstvím chemické energie, která se při výbuchu může uvolnit – toto množství je označované jako spalné nebo výbuchové teplo látky. To je prvním z vlivů formujícím parametry vygenerované tlakové vlny. Další vlivy už lze zařadit mezi vlivy okolí a jeho geometrie.

Pokud jsou sledovány parametry směrem od výbušiny, pak je nutné začít od toho, zda se jedná o tzv. volnou nálož nebo o nálož v obalu. Obal pak přímo ovlivňuje proces výbušné přeměny a mění parametry generované tlakové vlny. Takto vygenerovaná tlaková vlna se pak šíří do okolí. Její parametry jsou však dále tímto okolím ovlivňovány. Geometrie šíření tlakových vln rozhoduje o tom, jaký díl uvolněné energie se podílí na tlakové vlně šířící se určitým směrem a dále jak rychle se bude tato vlna rozkládat.

Postupy výpočtů jsou založeny na tzv. redukovaných a bezrozměrných charakteristikách. Důvodem pro převod různých jednotek a parametrů na bezrozměrné a redukované je praxe. Pomocí známých a ověřených vztahů mezi parametry lze hodnotit různé rázové vlny bez pracných a náročných měření. Základem se stal „zákon třetí odmocniny“ (Hopkinson, 1915), který říká: že když dvě náložte téže výbušiny a geometrie, ale různé hmotnosti, detonují v téže atmosféře, produkují velmi podobné rázové vlny ve stejných redukovaných vzdálenostech.

Redukovaná vzdálenost  $Z$  nebo také s označením  $\bar{R}$  se vyjadřuje vztahem

$$Z = \frac{R}{W^{\frac{1}{3}}}, \quad (2-5)$$



kde  $R$  je vzdálenost od centra výbuchu (m) a  $W$  je hmotnost ekvivalentní nálože TNT (kg).

Předpokládá se, že energie uvolněná výbuchem je úměrná hmotnosti výbušiny a řešení spočívá v zavedení referenční výbušiny, za kterou byl zvolen tritol (trinitrotoluen, TNT). Proto se vyjadřuje hmotnost různých trhavin s pomocí tzv. tritolového ekvivalentu ( $k_{TNT}$ ). Pokud tento ekvivalent nelze nalézt v odborné literatuře, může být s dostatečnou přesností vypočítán například ze vztahu (Vávra, 2002)

$$k_{TNT-p} = 0,3 \cdot Q_v - 0,2, \quad (2-6)$$

kde  $k_{TNT-p}$  je tlakový tritolový ekvivalent výbušiny (pro TNT se rovná 1) a  $Q_v$  je výbuchové teplo ( $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ). Rovnice platí pro výbušiny s výbuchovým teplem z intervalu od 2 do 5  $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ .

Potom je celková ekvivalentní hmotnost TNT  $W$ , která se dosazuje do dalších rovnic, určena ze vztahu

$$W = W_N \cdot k_{TNT-p} \cdot k_E \cdot k_G, \quad (2-7)$$

kde  $W$  je hmotnost ekvivalentní nálože TNT (kg),  $W_N$  je hmotnost nálože použité (reálné) trhavin (kg),  $k_{TNT-p}$  je tlakový tritolový ekvivalent,  $k_E$  je koeficient těsnění nálože a  $k_G$  je koeficient geometrie šíření rázové vlny v prostoru.

Koeficient těsnění se určí ze vztahu

$$k_E = 0,2 + \frac{0,8}{1 + k_B}, \quad (2-8)$$

kde  $k_B$  je tzv. balistický poměr

$$k_B = \frac{\text{hmotnost obalu [kg]}}{\text{hmotnost trhavin [kg]}} \quad (2-9)$$

Pro koeficient geometrie šíření  $k_G$  platí, že:

- pro detonaci ve volném vzdušném prostoru je  $k_G = 0,5$ ;
- pro detonaci na povrchu (země) je  $k_G = 1$  (vychází se z předpokladu, že energie se šíří ve tvaru polokoule s totálním odrazem od země).

Maximální přetlak v čele rázové vlny  $\Delta p_+$  lze vypočítat podle vztahu (Denkstein, 1995)

$$\Delta p_+ = \frac{93}{Z} + \frac{383}{Z^2} + \frac{1275}{Z^3}, \quad [2 \leq Z \leq 200] \quad (2-10)$$

kde  $\Delta p_+$  je v kPa.

Poznámka: vždy je nutné respektovat, pro jaký rozsah je rovnice platná (uvedeno v hranatých závorkách).

Pro oblast nízkých přetlaků je možné použít zjednodušený vztah (Denkstein, 1995)

$$\Delta p_+ = 150,2 \cdot Z^{-1,1} \quad [10 \leq Z \leq 200] \quad (2-11)$$

Pro nálož detonující na povrchu země lze  $\Delta p_+$  vypočítat pomocí rovnice (Korenev, 1971)

$$\Delta p_+ = \frac{0,106}{Z} + \frac{0,43}{Z^2} + \frac{0,14}{Z^3} \quad (2-12)$$

kde  $\Delta p_+$  je v MPa.

Další důležitou charakteristikou vzdušné rázové vlny je impulz přetlaku  $I_+$ . Je to integrál

$$I_+ = \int_0^{t_+} p \cdot dt \quad (2-13)$$

Předpokládá-li se zjednodušený tvar křivek, tedy že výsledná plocha (pod křivkou) je trojúhelník, může být impulz vyjádřen jednoduchým výrazem

$$I_+ \approx \frac{1}{2} \cdot \Delta p_+ \cdot t_+, \quad (2-14)$$

kde  $t_+$  je doba působení přetlaku.

Pomocí redukovaných charakteristik může být  $I_+$  (Pa.s) vypočítán následovně (Denkstein, 1995):

$$I_+ = 300 \cdot W^{\frac{1}{3}} \cdot Z^{-1} = \frac{300 \cdot W^{\frac{2}{3}}}{R} \quad [2 \leq Z \leq 20] \quad (2-15)$$

Pro nízké hodnoty přetlaku mohou být použity následující vztahy (Denkstein, 1995)

$$I_+ = 367,13 \cdot W^{\frac{1}{3}} \cdot Z^{(-1,08+0,0072 \cdot \ln Z)} \quad (\text{Pa}\cdot\text{s}) \quad (2-16)$$

$$t_+ = 1,653 \cdot W^{\frac{1}{3}} \cdot Z^{(0,547-0,0422 \cdot \ln Z)} \quad (\text{ms}) \quad (2-17)$$

$$[10 \leq Z \leq 200]$$

V případě velkých náloží může dojít ke vzniku podtlakové (negativní) fáze tlakové vlny. Orientačně mohou být její hlavní charakteristiky (v kPa, Pa.s, ms) vypočítány ze vztahů (Denkstein, 1995)

$$\Delta p_- = 46,48 \cdot Z^{-1,054} \quad (\text{kPa}) \quad (2-18)$$

$$I_- = 240,057 \cdot W^{\frac{1}{3}} \cdot Z^{(-0,8252-0,0172 \cdot \ln Z)} \quad (\text{Pa}\cdot\text{s}) \quad (2-19)$$

$$t_- = 18,56 \cdot W^{\frac{1}{3}} \quad (\text{ms}) \quad (2-20)$$

Pro výpočet tlakového ekvivalentu lze alternativně použít poměr výbuchového tepla dané trhavinu  $Q_v$  k výbuchovému teple TNT  $Q_{TNT} = 4680 \text{ kJ/kg}$ . Hodnoty tlakového ekvivalentu pro některé trhaviny jsou v tab. 2-1.

**Tabulka 2-1: Tritolové ekvivalenty některých trhavin**

Výbušina	Výbuchové teplo [kJ/kg]	tlakový ekvivalent $k_{TNT-p}$
Nitroglycerin	6152,69	1,468
Nitroglykol	7073,50	1,687
Střelná bavlna	3390,26	0,809
Hexogen	6278,25	1,499
Pentrit	5901,56	1,408
Tetryl	4511,97	1,076
Dinitronaftalen	2908,92	0,695
Kyselina pikrová	3850,66	0,919

Výbušina	Výbuchové teplo [kJ/kg]	tlakový ekvivalent $k_{TNT-p}$
Černý prach	2456,89	0,587
Azid olova	1594,68	0,382
Třaskavá rtuť	1540,26	0,368
Dynamit	5022,60	1,198
Amonit 6	3926,00	0,938
Amonit 7	4436,63	1,060
Amonit 1	5190,02	1,239
Amonit 9	4185,50	1,000
Amonit 10	3829,73	0,914
Perunit 40	2197,39	0,525
Perunit 28	2050,90	0,489
Perunit 22	1875,10	0,449
Perunit 20	1745,35	0,418
Permonal v 10	2142,98	0,511
Permonex v 19	1736,98	0,415
Permonex 12	1728,61	0,413
Perunal Extra A40	2615,94	0,625
Perunit 44	2050,90	0,489
Infernit PN 40	1912,77	0,456

## 2.2.2 Výbuch neohraničeného oblaku par/plynu

V případě plyných směsí se vzduchem musí dojít nejprve k výronu výbušného média, poté je nutné, aby došlo ke smíšení plyné směsi se vzduchem (vytvoření oblaku plynu), a aby byl iniciován výbuch této směsi. Výbuch plynu, par nebo kapaliny je tedy definován jako proces, kdy hoření promíseného oblaku plynu (palivo-vzduch, palivo-okysličovadlo) způsobuje rychlý nárůst tlaku. Hoření plynu nebo kapaliny, při kterém je palivo oxidováno, zahrnuje uvolnění tepla a často záření. Hlavními složkami zplodin hoření jsou za kompletního hoření hlavně CO<sub>2</sub> a vodní páry. Proces hoření způsobuje vzrůst teploty transformací energie chemické vazby na teplo. Následky výbuchu oblaku plynu závisí na prostředí, které je oblakem obklopeno.

Jak již bylo uvedeno výše, po iniciaci oblaku se plamen šíří hořlavou oblastí dvěma základními mechanismy:

- a) deflagrací a
- b) detonací.

V případě výbuchů plynů je proces deflagrace nejběžnější. Deflagrace (reakční zóna) se vzhledem k nevyhořelému plynu šíří podzvukovou rychlostí, typické

rychlosti plamene (vztaženo k stojícímu pozorovateli) jsou řádově od 1 do  $1000 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Vygenerované přetlaky mohou v závislosti na rychlosti plamene dosáhnout hodnot několika stovek kPa.

Detonační vlna je nadzvukovou vlnou hoření (vztaženo k rychlosti zvuku v nevyhořelém plynu před vlnou). Rázová vlna je vlnou hoření bezprostředně následována. Detonační vlna se v oblaku palivo-vzduch se oproti výbušinám šíří rychlostí pouze z intervalu  $1500 - 2000 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Rychlost plamene a tlak je silně závislý na velikosti oblaku plynu a geometrických podmínkách uvnitř oblaku (procesní zařízení, potrubí apod.) nebo geometrii ohraničující oblak (budovy apod.). Predikce rychlosti plamene a výbuchového tlaku při deflagraci není jednoduchou záležitostí ani v případě, že je známa velikost oblaku, koncentrace paliva a místo iniciace. Fenomén urychlování plamene je matematicky náročný problém. Výsledek je velmi citlivý na variace specifických parametrů.

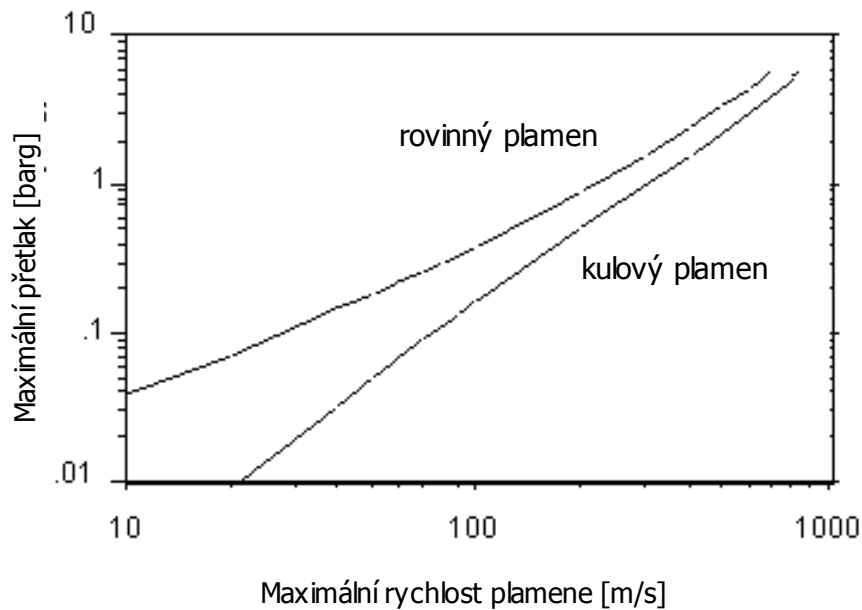
Přechod pomalého laminárního hoření do intenzivního procesu produkujícího tlakovou vlnu je ovlivněn především turbulencí a sekundárně nestabilitami hoření. Turbulence nízké intenzity pouze srašťují zónu plamene a zvětšují plochu plamene. Se zvýšením intenzity turbulence zóna plamene ztrácí svůj více či méně hladký laminární charakter. Ve vysoce turbulentní směsi probíhá hoření v rozšířené zóně, ve které jsou intenzivně míchány produkty hoření s nezreagovanou směsí. Může být proto dosaženo vysokých rychlostí hoření, protože se vytváří rozhraní mezi produkty hoření a nezreagovanou směsí o velmi velké ploše.

Interakce mezi turbulencemi a hořením hraje klíčovou úlohu v procesu rozvoje výbuchu plynů. v počátku výbuchu plynů je šíření plamene okamžitě po iniciaci laminární. Skutečné rychlosti hoření nejsou o mnoho větší než laminární rychlosti hoření a generované přetlaky jsou řádově stovky Pa. Při laminárním hoření dochází k expanzi horkých zplodin hoření, což vytváří tokové pole. Jestliže jsou okrajové podmínky expanzního tokového pole takové, že jsou generovány turbulence, pak bude docházet k interakci zóny plamene vedené expanzním tokem s turbulencemi. Turbulence zvyšují rychlost hoření.

Jestliže se plamen šíří promíchaným oblakem, pak existují dva základní mechanismy způsobující nárůst tlaku. Jsou to:

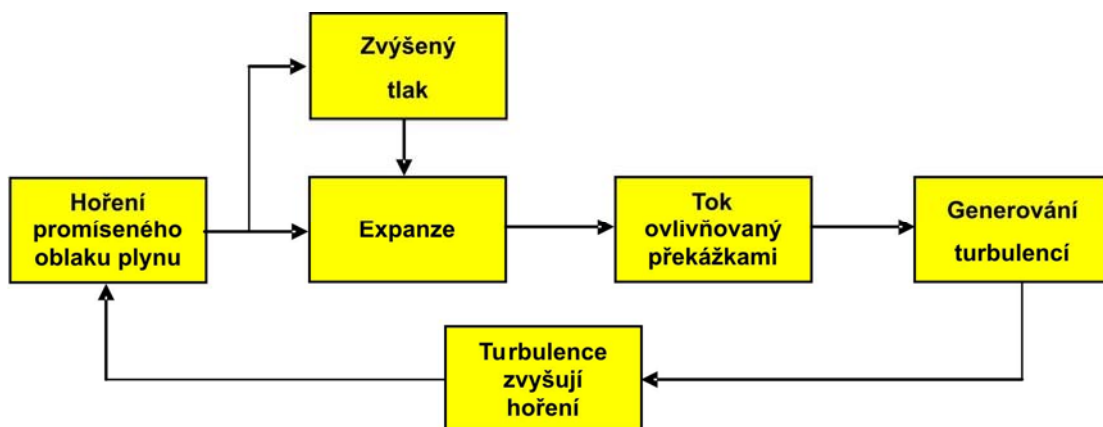
- a) rychlé šíření plamene a
- b) hoření v uzavřeném objemu.

Obr. 2-4 znázorňuje závislost maximálního přetlaku na rychlosti plamene ve dvou geometriích; (i) rovinný plamen – šíření plamene v potrubí a (ii) kulový plamen – šíření plamene v neohrazeném oblaku.



**Obrázek 2-4: Maximální přetlak [1 barg = 100 kPa přetlaku] versus rychlost plamene pro rovinný a kulový tvar plamene (Moen, 1985)**

Pro dosažení stejného přetlaku potřebuje plamen kulového tvaru vyšších rychlostí než rovinný. To lze vysvětlit tím, že plyn může při kulovém tvaru plamene expandovat snadněji než při rovinném. Jestliže dojde k výbuchu v uzavřené nádobě, pak k vygenerování vysokých tlaků není potřeba rychlé šíření plamene. Nádobu brání expanzi plynu při hoření, a tak dochází k zvýšení tlaku. Stechiometrická směs v uzavřené nádobě produkuje při výbuchu tlak 800 až 900 kPa.



**Obrázek 2-5: Pozitivní zpětná vazba způsobující urychlování plamene (Bjerketvedt, 1997)**

Mechanismus urychlování plamene na překážkách vytváří silnou pozitivní zpětnou vazbu, která je znázorněna na obr. 2-5.

Expanzní tok se zvyšuje s tím, jak se zvyšuje množství hořlaviny převedené do zplodin hoření v jednotce objemu a za jednotku času. Vyšší rychlosti toku jdou ruku v ruce s intenzivnějšími turbulencemi. Intenzivnější turbulence zrychlují hoření. Vyšší rychlosti hoření intenzifikují expanzi, což opět vede k zvýšení rychlosti toku a tím opět k intenzivnějším turbulencím, které opět zvýší rychlost hoření atd. atd. Tento proces je tedy samo se urychlující.

Jestliže pokračuje zrychlování tohoto procesu, může dojít k náhlé drastické změně způsobu hoření. Reakční směs přímo před zónou turbulentního hoření je předpřipravována pro reakci kombinací komprese a zahřívání turbulentním mícháním s produkty hoření. Jestliže se turbulentní míchání stává příliš intenzivní, může dojít k lokálnímu uhašení reakce. Výsledkem je velmi lokální, nereagující, ale velmi reaktivní směs výchozích látek a horkých produktů.

Teploty částí směsi mohou při intenzivním zahřívání kompresí vzrůst nad teplotu samovznícení. Tyto vysoce reaktivní „horké body“ reagují velmi rychle a výsledkem jsou místní pod-výbuchy při konstantním objemu (Lee, 1980). Jestliže je teplota okolní směsi dostatečně blízko teplotě samovznícení, pak je výsledkem stlačení jednoho z pod-výbuchů detonační vlna. Tato vlna pak zcela pohltí proces šíření plamene.

Pro výpočet parametrů tlakových vln vygenerovaných výbuchem neohrazeného oblaku par byla vytvořena řada metod. Nejpřesnější výsledky jsou dosahovány numerickými výpočty s využitím výpočetní fluidní dynamiky, které umožňují věrně do výpočtu zadat geometrické uspořádání prostoru v oblaku i okolí. Tyto metody však přesahují rámec této publikace. Jednodušší metody se pak dělí na dvě skupiny:

- a) Parametry tlakové vlny jsou vztahovány k energetickému obsahu oblaku – metoda TNT-ekvivalentu.
- b) Metody předpokládající, že parametry tlakové vlny jsou primárně určeny velikostí a povahou částečně ohraničených a zahrazených oblastí uvnitř oblaku – např. metoda Multi-Energy.

### **2.2.2.1 Metoda TNT ekvivalentu**

Vzhledem k tomu, že armády po mnoho let sledovaly destrukční účinky trhavin, je pochopitelné, že i síla výbuchu oblaku plynu (i havarijního) je vztahována k ekvivalentní náloži TNT. Také škody vzniklé během výbuchu oblaku plynu byly vztahovány k ekvivalentní hmotě nálože TNT.

Protože potřeba kvantifikovat potenciální výbušnou sílu hořlavin vzrostla dlouho před tím, než byl pochopen mechanismus generování tlakové vlny při výbuchu oblaku plynu, byl koncept TNT-ekvivalentu přizpůsoben k použití pro predikci škod, to znamená k odhadu, jaké potenciální škody je možné očekávat od daného množství hořlaviny. Použití metod TNT-ekvivalentu při odhadu působení tlakové vlny je velmi jednoduché. Dostupné množství výbuchové energie v oblaku je převáděno na ekvivalentní hmotu nálože TNT pomocí následující rovnice:

$$W = \alpha_e \cdot \frac{W_f \cdot H_f}{H_{TNT}} = \alpha_m \cdot W_f \quad (2-21)$$

kde  $W_f$  je hmotnost dostupné hořlaviny (kg),  $W$  je hmotnost ekvivalentní nálože TNT (kg),  $H_f$  je spalné teplo uvažované hořlaviny ( $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),  $H_{TNT}$  je výbuchová energie TNT ( $4680 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),  $\alpha_e$  je TNT-ekvivalent založený na energii (-),  $\alpha_m$  je TNT-ekvivalent založený na hmotě (-) a index  $f$  označuje parametry vztažené k použité hořlavině.

V literatuře je pro TNT-ekvivalent možné nalézt i výrazy jako stupeň konverze, účinnost nebo účinnostní faktor.

Jestliže je známa ekvivalentní nálož TNT, pak je možné určit výbuchové charakteristiky, zastoupené především přetlakem v čele dopadající tlakové vlny, pro různé vzdálenosti od výbuchu. To je možné s použitím grafů nebo rovnic vyjadřujících redukované grafické znázornění experimentálních dat.

TNT-ekvivalent lze považovat za konverzní faktor, který vyjadřuje, jaký díl dostupného spalného tepla je převeden do energie tlakové vlny. TNT-ekvivalent vyjadřuje účinnost procesu konverze chemické energie (spalné teplo) na mechanickou energii (působení tlakové vlny).

Pro detonaci směsi uhlovodíku se vzduchem (při stechiometrické koncentraci) je teoretické maximum účinnosti tohoto konverzního procesu přibližně 40 %. Těchto 40 % je považováno za teoretickou horní hranici pro výbuchy plynů za atmosférických podmínek. Havarijní výbuchy oblaků par jsou však cokoliv jiného, ale detonace celého množství dostupné hořlaviny rozhodně ne. Proto praktické hodnoty TNT-ekvivalentů jsou mnohem menší než teoretická horní hranice. Publikované hodnoty TNT-ekvivalentů, odvozené ze škod sledovaných při mnoha haváriích, se pohybují v oblasti od 1 % do několika desítek procent (Gugan, 1978). Nicméně pro většinu výbuchů oblaku par byla odvozena hodnota TNT-ekvivalentu v intervalu od 1 % do 10 %, odvozeno ze spalného tepla celého uniklého množství hořlaviny.



Metody pro odhad následků výbuchu oblaku par založené na TNT-ekvivalenci jsou velmi rozšířené. Mnoho autorů, společností a státních institucí vyvinulo své vlastní postupy a doporučení. Základní rozdíly v těchto postupech lze shrnout do následujících čtyř bodů:

- a) *Díl hořlaviny, který má být zahrnut do výpočtu*: Celkové množství uniklé; množství mžikově odpařené; množství mžikově odpařené vynásobené atomizačním faktorem, který zahrnuje podíl aerosolu vstupujícího do oblaku; nebo hořlavý díl oblaku zahrnující rozptýl látky.
- b) *Hodnota TNT-ekvivalentu (konverzního faktoru)*: Střední hodnoty odvozené z rozborů havárií; nebo bezpečnostní konzervativní hodnoty (ať už závislé nebo nezávislé na přítomnosti částečného uzavření nebo překážek a povaze hořlaviny).
- c) *Použitá data pro působení tlakových vln při detonaci TNT*: Vzhledem k rozdílnostem v uspořádání experimentů dochází i k částečným odlišnostem v experimentálních hodnotách.
- d) *Výbuchová energie TNT*: Běžně používané hodnoty leží v intervalu od 4190 do 4680 kJ.kg<sup>-1</sup>.

Nejdůležitějším rozdílem mezi jednotlivými publikovanými metodami je způsob určení množství látky účastníci se výbušné přeměny, tedy hodnoty stupně konverze. Tento údaj (TNT-ekvivalent a množství látky) je možné získat následujícími způsoby:

- a) *Brasie a Simpson* (Brasie, 1968): 2 - 5 % spalného tepla celkově uniklé hořlaviny.
- b) *The UK Health & Safety Executive* (HSE, 1979, 1986): 3 % spalného tepla hořlaviny v oblaku.
- c) *Exxon*: 3 - 10 % spalného tepla hořlaviny v oblaku.
- d) *Industrial Risk Insurers* (Industrial Risk Insurers, 1990): 2 % spalného tepla celkem uniklé hořlaviny.
- e) *Factory Mutual Research Corporation*: 5, 10 a 15 % spalného tepla hořlaviny v oblaku.

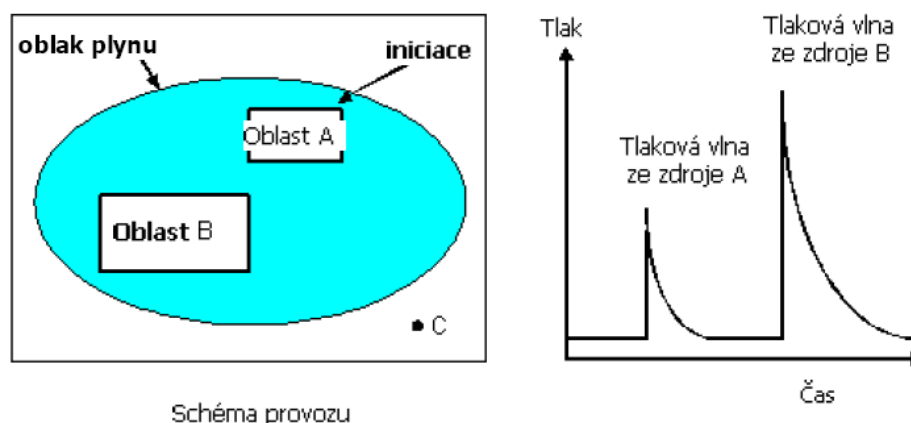
Model TNT-ekvivalentu však není nejvhodnějším modelem pro řešení problematiky výbuchů plynů. Výbuch TNT je z hlediska tvaru a doby trvání pozitivní fáze tlakové vlny špatným představitelem těchto charakteristik výbuchu plyných směsí. Metoda TNT-ekvivalentu je s mnoha výhradami použitelná pro výbuchy plynů silnější než 100 kPa a ve vzdálené oblasti.

### 2.2.2.2 Metoda Multi-energy

Gugan (1978) podal obsáhlý souhrn vyhodnocení TNT-ekvivalentů odvozených ze souborů škod sledovaných při havarijních výbuších oblaků par. z těchto vyhodnocení je možné vyvodit, že je zde pouze malá, jestli vůbec jaká, závislost mezi množstvím výbuchové energie přítomné při výbuchu oblaku par a hmotností ekvivalentní nálože TNT nezbytné k modelování jeho tlakových projevů. Některé z odlišností jsou způsobeny rozdíly při definování množství látky obsažené v oblaku.

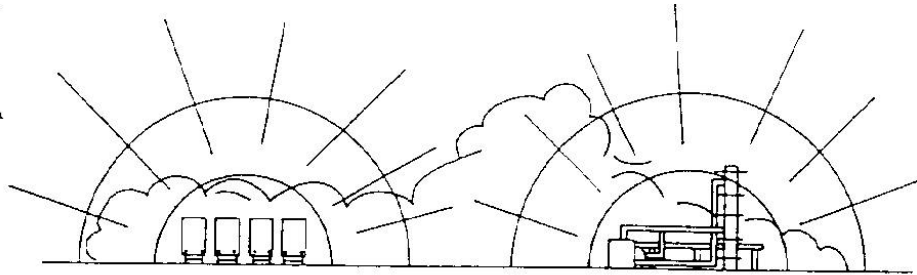
Experimentální data ukazují, že pro oblaka v klidu nejsou parametry tlakového působení vztaženy k množství hořlaviny v oblaku. Tyto parametry jsou primárně určeny velikostí a povahou částečně ohraničených a zahrazených oblastí uvnitř oblaku. Reaktivita palivo-vzdušných směsí má až sekundární vliv. Výzkum v této oblasti jasně ukázal, že deflagrativní hoření vytváří významnou tlakovou vlnu pouze v těch oblastech klidného oblaku, kde se vyskytuje dostatečný počet překážek (potrubí, vagóny, nádoby, zařízení apod.) a/nebo částečné ohraničení pevnými plochami (stěna, strop, podlaha apod.).

K tomuto hoření může dojít také v částech oblaku, které jsou v době iniciace v turbulentním pohybu. Turbulentní tryskání o vysokých rychlostech uvnitř hořlavého oblaku par je tedy potřeba považovat za možné zdroje silných tlakových vln. Příkladem mohou být úniky hořlavých plynů z vysokotlakých potrubí. Zbývající části oblaku obsahující hořlavé směsi par se vzduchem hoří pomalu bez vytváření významných tlakových projevů. Na rozdíl od jiných metod, které považují výbuch oblaku par za jediný proces, metoda Multi-Energy definuje výbuch oblaku par jako množství pod-výbuchů odpovídajících různým zdrojům v oblaku (obr. 2-6).



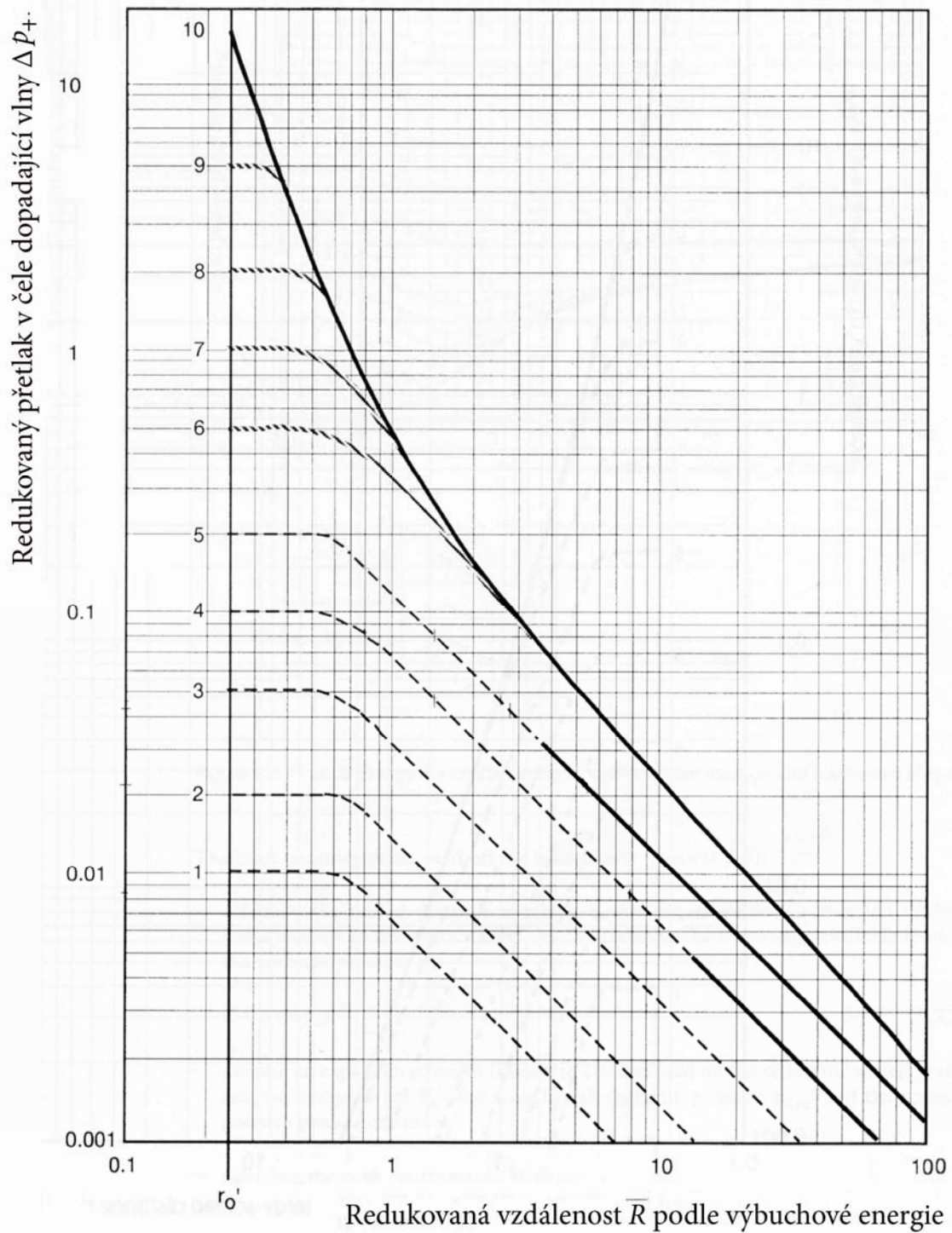
**Obrázek 2-6: Jeden oblak plynu může způsobovat více než jednu tlakovou vlnu (Bjerketvedt, 1997)**

Obr. 2-7 znázorňuje dva běžné typy generátorů tlakových projevů: chemické provozy a posunovací vlakové nádraží, každý je přikryt velkým oblakem par. Tlakové projevy vytvořené každým z nich je třeba uvažovat odděleně.

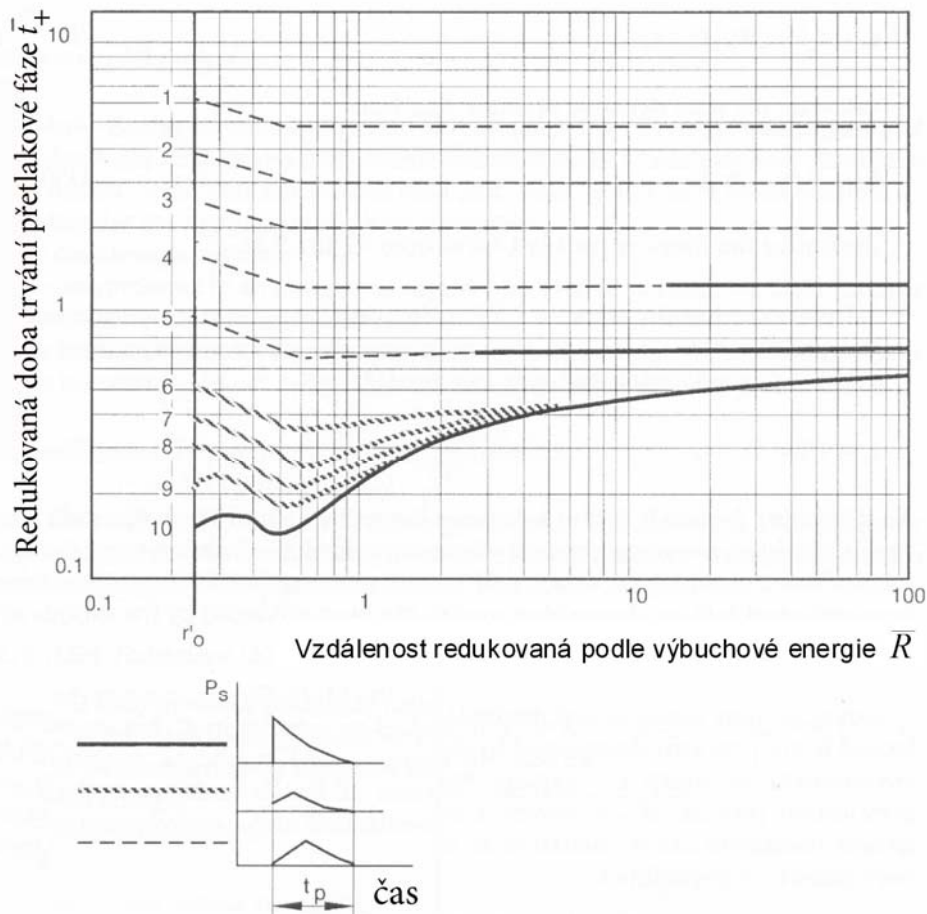


**Obrázek 2-7: Oblak par obsahující dva běžné typy generátorů tlakových projevů (Baker, 1983)**

Obecně lze říci, že následky tlakových vln generovaných výbuchy oblaků par jsou přímé. Tyto následky je však velmi obtížné modelovat bez detailní numerické simulace fenoménu. v případě, že jsou provedeny zjednodušující předpoklady, to znamená symetrické znázornění těchto následků, je výpočetní břímě lehčí. Znázornění výsledků takového idealizovaného modelu výbuchu plynu je uvedeno na obr. 2-8. Jsou zde výsledky numerické simulace výbuchu plynů se stálou rychlostí plamene programem BLAST popsaném v publikaci (Van den Berg, 1980).



**Obrázek 2-8: Model výbuchu plynů založený na energii směsi hořlaviny se vzduchem; redukovaný přetlak versus redukovaná vzdálenost**



**Obrázek 2-9: Model výbuchu plynů založený na energii směsi hořlaviny se vzduchem; redukovaná doba trvání přetlaku versus redukovaná vzdálenost**

Obr. 2-8 a obr. 2-9 znázorňují výbuchové charakteristiky polokulové nálože směsi hořlaviny se vzduchem o poloměru  $r_0$  na povrchu země, odvozené pro směs se spalným teplem  $3,5 \cdot 10^6 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3}$ . Grafy představují pouze nejvýznamnější výbuchové parametry: redukovaný přetlak v čele dopadající vlny  $\Delta \bar{p}_+$  a redukovanou dobu trvání kladné fáze tlakové vlny  $\bar{t}_+$  jako funkci redukované vzdálenosti od centra výbuchu  $\bar{R}$ . Hodnoty jsou plně bezrozměrné podle výbuchové energie  $E$  a parametrů charakterizujících stav okolní atmosféry: tlak  $p_0$  a rychlost zvuku  $c_0$ . Tento způsob změny měřítka zahrnuje vliv atmosférických podmínek a umožňuje odečítat výbuchové parametry v různých soustavách jednotek. Redukované parametry lze pak vypočítat podle následujících vztahů:

$$\bar{R} = \frac{R}{(E / p_0)^{1/3}} \tag{2-22}$$

$$\bar{t}_+ = \frac{t_+ \cdot c_0}{(E/p_0)^{1/3}} \quad (2-23)$$

Počáteční síla tlakové vlny je charakterizována hodnotami od 1 (velmi malá síla) do 10 (síla detonace). Navíc obr. 2-9 poskytuje hrubou představu o tvaru tlakové vlny, která odpovídá charakteristickému chování tlakových projevů při výbuchu plynu. Tlakové vlny, vytvořené náložemi směsí hořlavin se vzduchem o malé síle, ukazují akustický pokles přetlaku a konstantní dobu trvání pozitivní fáze. Naproti tomu rázové vlny v blízkosti nálože s vysokou počáteční silou vykazují rychlejší pokles přetlaku a značný nárůst doby trvání pozitivní fáze. Ve velkých vzdálenostech pak může taková vlna přejít až do akustického průběhu. Dalším významným rysem je větší či menší nezávislost výbuchových parametrů na počáteční síle zdroje pro silné deflagrace o hodnotách 6 a více ve vzdálenostech větších než asi desetinásobek poloměru nálože.

Při aplikaci této metody je třeba vyřešit jeden základní problém, kterým je určení počáteční síly výbuchu (počáteční přetlak). To lze provést na základě simulace, experimentálních údajů nebo odhadem (konzervativním). Tento odhad lze provést podle příručky (TNO, 1997), ve které je zohledněno především množství překážek uvnitř oblaku, iniciační energie a ohraničenost oblaku paralelními stěnami, viz tab. 2-2.

V případě aplikace Multi-Energy metody není ohrožení výbuchem oblaku primárně určováno samotnou palivo-vzdušnou směsí, ale prostředím, do kterého se rozptyluje. Prostředí tvoří hraniční podmínky pro proces hoření. Jestliže je někde očekáván únik hořlaviny, pak se odhad nebezpečí výbuchu může omezit na zjišťování potenciálu prostředí ke generování tlakových projevů.

**Tabulka 2-2: Index počáteční síly zdroje**

Kategorie	Iniciační energie		Zahrazení prostoru			Ohraničení paralelními plochami	Bez ohraničení	Síla zdroje
	nízká	vysoká	vysoké	nízké	žádné			
	(N)	(V)	(V)	(N)	(Z)	(O)	(U)	
1		V	V			O		7-10
2		V	V				U	7-10
3	N		V			O		5-7
4		V		N		O		5-7
5		V		N			U	4-6
6		V			Z	O		4-6
7	N		V				U	4-5
8		V			Z	O		4-5
9	N			N		O		3-5
10	N			N			U	2-3
11	N				Z	O		1-2
12	N				Z		U	1

### **2.3 FYZIKÁLNÍ VÝBUCH**

Posledním základním typem výbuchů jsou výbuchy, při nichž se tlaková vlna generuje pouze změnou fyzikálního stavu média. Zpravidla se jedná o expanzi plynu z prostředí o vyšším tlaku do prostředí o tlaku nižším. Tento proces však musí být tak rychlý, že dojde k vygenerování tlakové vlny a nikoliv pouze k odventilování natlakovaného zařízení. Zpravidla dochází k roztržení zařízení na dva a více kusů. v těchto případech se mluví o tzv. fyzikálním výbuchu. k tomuto výbuchu může vést prostě přetlakování zařízení. Fyzikálním výbuchem je například roztržení nafouknuté pneumatiky.

Speciálním případem je fyzikální projev označovaný zkratkou BLEVE, což je převzato z anglického „Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion“, tedy výbuch expandujících par vroucí kapaliny. Princip je podobný jako v případě fyzikálního výbuchu. v nádobě nebo zařízení se nachází kapalina, která má teplotu vyšší, než je její teplota varu. Jedná se tedy buď o přehřátou kapalinu, nebo zkapalněný plyn. Za takové teploty lze udržet médium kapalně pouze za zvýšeného tlaku. Pokud dojde k roztržení zařízení obsahujícího materiál v tomto stavu, dojde k okamžitému varu kapaliny a expandující páry nebo plyn generují tlakovou vlnu.

O BLEVE efektu se mluví zejména v souvislosti se zkapalněnými plyny, jako je například propan. Nebývá časté, aby došlo k roztržení tlakové láhve bez

vnějšího podnětu. v zásadě lze odlišit dva hlavní mechanismy poškození nádoby vedoucí k uvolnění jejího obsahu a energie:

- a) Zvyšování tlaku, který může nastat následkem přehřátí v důsledku vnějšího tepelného zdroje (například při požáru) nebo v důsledku přeplnění z jiného tlakového systému.
- b) Snížení pevnosti nádoby, které může být způsobeno korozí, erozí, přehřátím, únavou materiálu nebo vnějším mechanickým poškozením (například při dopravní nehodě).

Podobně jako v případě výbuchu kondenzované výbušiny i zde může dojít k fyzikálnímu výbuchu ve třech prostředích:

- a) na volném prostranství,
- b) ve vnitřním prostoru budov a
- c) v 1-D geometrii – tunely.

Vliv těchto prostředí je také stejný jako v případě výbušin. Charakter prostředí neovlivní množství a rychlost uvolnění energie, ale určuje, jaký díl této energie bude obsažen v tlakové vlně šířící se určitým směrem a jak rychle se bude tato energie rozptylovat.

## **2.4 VÝBUCHY V (ČÁSTEČNĚ) UZAVŘENÉM PROSTORU**

### **2.4.1 Výbuch kondenzované výbušiny ve vnitřním prostoru objektů**

#### **2.4.1.1 Popis děje**

Při detonaci kondenzovaných výbušin (a do jisté míry i při rychlé deflagraci hnacích hmot či pyrotechnických složí) uvnitř stavebních objektů či různých konstrukcí je celkový průběh tlakového zatěžování vnitřních stěn objektu složitější, než při vnějším zatěžování vzdušnou rázovou vlnou. Zatížení objektu detonací nálože trhaviny uvnitř se skládá ze dvou téměř oddělených fází.

- a) Detonace nálože vyvolá v první fázi šíření vzdušné rázové vlny ve vnitřním vzdušném prostoru. Po dopadu na vnitřní stěny dochází k jejich odrazu a v navazující části k jejich interferenci. Výsledkem je časově složitý  $p(t)$ -průběh celkové křivky zatěžování, sestávající jak z primární vlny, tak ze série vln druhotných.



Vzhledem ke zcela obvyklé obecně asymetrické konfiguraci systému nálož-objekt odpovídá konkrétní časový průběh  $p(t)$  vzdušné rázové vlně složeného tvaru (obr. 2-10), která v každém praktickém uspořádání je zcela unikátní funkcí polohy na vnitřním povrchu objektu. Na každém místě vnitřního povrchu je proto časový průběh tlakového zatěžování rozdílný a vyjma zcela symetrických případů (v praxi ovšem zcela výjimečných) je s výjimkou možnosti poměrně přesné predikce první (primární) odražené vzdušné rázové vlny jinak v detailech těžko předvídatelný.

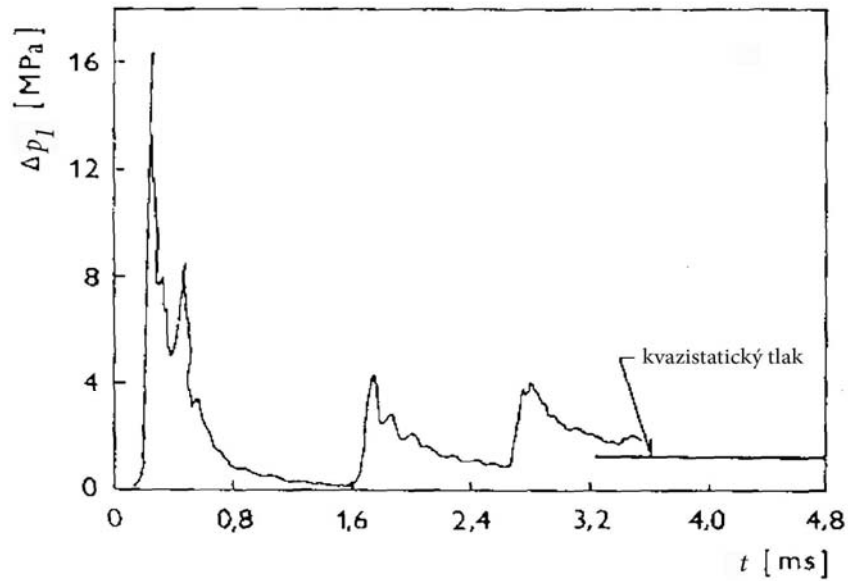
- b) Komplex primárních a následných vzdušných rázových vln ve vnitřním prostoru postupně slábne, povýbuchové zplodiny detonace však vedou k vytvoření tzv. kvazistatického (komorového) tlaku  $p_k$ , resp. přetlaku  $\Delta p_k$ . k úrovni komorového přetlaku přispívají i následné reakce mezi zplodinami detonace a vnitřní atmosférou objektu (v případě detonace trhaviny s negativní kyslíkovou bilancí).

Pokud je vnitřní prostor zcela uzavřen, je hodnota komorového přetlaku  $\Delta p_k$  dlouhodobá a v časovém průběhu dochází k jeho pozvolnému poklesu pouze výměnou tepla mezi zplodinami výbuchu a stěnami objektu.

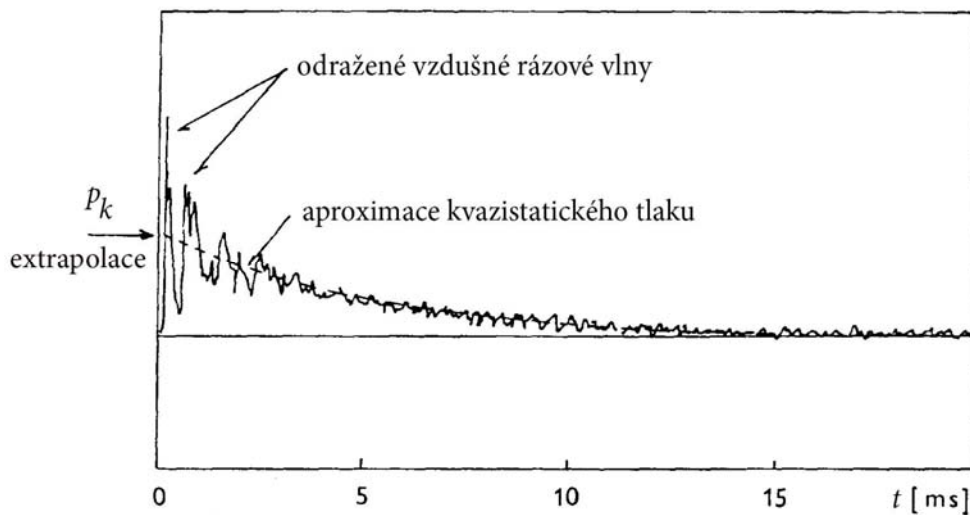
Je-li vnitřní prostor opatřen otvory, umožňujícími expanzi přetlaku do vnějšího vzdušného prostoru, hovoří se o tzv. ventilaci objektu. Objekt je označován jako polo-uzavřený a jeho základní charakteristikou je tzv. ventilační neboli výfukový poměr  $A_v/A_s$  (tj. poměr volné plochy výfukového otvoru, resp. všech otvorů k celkovému vnitřnímu povrchu objektu), alternativně  $A_v/V$  ( $\text{m}^{-1}$ ). Reálný a teoretický  $p(t)$ -průběh tlaku ve ventilovaných komorách je na obr. 2-11. Průběh postupné expanze komorového přetlaku je závislý především na výfukovém poměru, a pouze v menší míře i na hodnotě  $p_k$ , resp. přetlaku  $\Delta p_k$ .

Ke vzniku a změně profilu expanzních otvorů však dochází často až v průběhu zatížení objektu komplexem primárních a následných vzdušných rázových vln. Funkci výbuchových otvorů v tomto případě přejímají tzv. výfukové nebo fragmentující stěny.

Následkem souběhů těchto dějů je však celkové impulsní zatížení objektu vnitřní detonací vždy výrazně vyšší, než při zatížení dopadem vnější vlny.



**Obrázek 2-10: Reálný a teoretický průběh tlaku v neventilovaných komorách (Denkstein, 1995)**



**Obrázek 2-11: Reálný a teoretický průběh tlaku ve ventilovaných komorách (Denkstein, 1995)**

#### 2.4.1.2 První fáze zatížení objektů - odraz vzdušné rázové vlny

Ke stanovení odrazných přetlaků  $\Delta p_R^f$  a odrazných impulsů  $I_R^f$  je nutné odečítat jejich hodnoty v pásmu  $z < 2$  ( $\text{m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ ) buď z publikovaných grafických závislostí (Baker, 1983), nebo stanovit jejich přibližné hodnoty z odvozených exponenciálních vztahů:

a) odrazný přetlak:

$$\Delta p_R^f = 14,554 \cdot Z^{-1,4587} \quad \text{MPa, pro } Z \quad 0,05 - 0,5 \text{ m.kg}^{-1/3} \quad (2-24)$$

$$\Delta p_R^f = 5,76 \cdot Z^{-2,762} \quad \text{MPa, pro } Z \quad 0,5 - 5 \text{ m.kg}^{-1/3} \quad (2-25)$$

b) odrazný impuls:

$$I_R^f = 0,345 \cdot W_f^{1/3} \cdot Z^{-1,857} \quad \text{kPa.s, pro } Z \quad 0,05 - 0,5 \text{ m.kg}^{-1/3} \quad (2-26)$$

$$I_R^f = 0,5823 \cdot W_f^{1/3} \cdot Z^{-1,0976} \quad \text{kPa.s, pro } Z \quad 0,5 - 5 \text{ m.kg}^{-1/3} \quad (2-27)$$

Při dosazování vstupních hodnot  $W$  do uvedených vztahů 2-24 až 2-27 je nutné respektovat dvě odlišnosti od výpočtů  $\Delta P$  a  $I_+$ :

Indexy „ $f^c$ “ zde označují podmínky detonace ve volném vzdušném prostoru („free air“), takže  $W_f = m_N \cdot k'_{TNT}$  ( $k_g = 1$ , nikoliv 0,5).

Aplikace hodnot  $k_{TNT}$  podle klasických tabulek např. (Denkstein, 1995), by zřejmě vedla k velmi nepřesným výsledkům, protože uvedené tabelované hodnoty  $k_{TNT}$  platí spíše pro vzdálenou oblast (podstatně vyšší hodnoty  $Z$ , než jaké vymezují platnost rovnic 2-24 až 2-27). v „blízké zóně“ jsou tritolové ekvivalenty výrazně závislé na konkrétní hodnotě  $Z$ . Nepřevládá zde však jejich závislost na celkové energii výbuchu, ale spíše na detonačním tlaku  $P_{CJ}$ . Za přijatelnou aproximaci lze považovat výpočet  $k'_{TNT}$  pro blízké pásmo podle vztahu:

$$k'_{TNT} = \frac{(\rho_0 \cdot D^2)_N}{(\rho_0 \cdot D^2)_{TNT}} \approx \frac{(\rho_0 \cdot D^2)_N}{75} \quad (2-28)$$

kde  $\rho_0$  je hustota ( $\text{g.cm}^{-3}$ ),  $D$  je detonační rychlost ( $\text{km.s}^{-1}$ ), index  $N$  označuje veličiny vztahující se k trhavině dané nálože a index  $TNT$  označuje veličiny vztahující se k standardní trhavině TNT.

Analýza reálných  $p(t)$  záznamů z vnitřních detonací realizovaných ve výbuchové komorách různé geometrie a konstrukce však ukazuje, že v určitých konfiguracích a na omezených plochách vnitřního povrchu může odražená vlna „implodovat“ nebo se zesílit. Obecně jsou odražené vlny výrazně oslabeny dříve, než znovu narazí na stěny, podlahu nebo strop. Pro přibližné určení velikosti těchto odražených vln lze využít předpokladu, že druhá vlna má poloviční amplitudu a impuls primární odražené vlny, třetí vlna je poloviční proti druhé vlně a všechny pozdější odrazy jsou nevýznamné. Doba trvání odražených pulzů je stejná jako doba trvání počátečního pulzu.

Přesnější odhad skutečně maximální tlakové amplitudy bývá v těchto případech velmi obtížný a přesnější výpočetní řešení je zpravidla nemožné. Vzhledem k zjednodušení uvedenému výše lze sečíst zatížení třemi prvními vlnami a celkový impuls je pak 1,75 násobkem počátečního.

Reálný (součtový) zatěžovací impuls  $\Sigma I_R$  je závislý na  $A_v/V$  a hmotnosti materiálu výfukové stěny a bývá zpravidla v mezích  $1,5 - 1,75 \cdot I_R^f$ .

Podobně i součtový přetlak je pak přibližně 1,5 - 1,75 násobek primárního  $\Delta p_R$ .

### 2.4.1.3 Druhá fáze zatížení objektů - kvazistatický přetlak

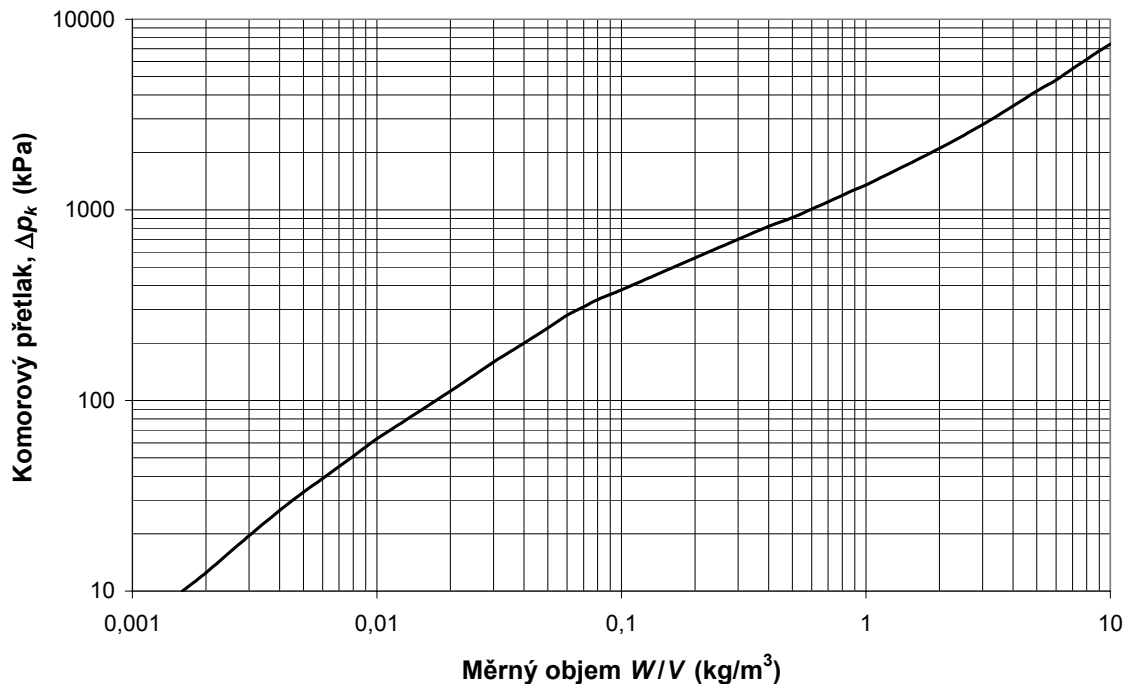
Hodnotu kvazistatického („komorového“) přetlaku  $\Delta p_k$  lze vypočítat na základě znalosti množství a objemu horkých zplodin. Tento výpočet však není jednoduchý. Proto byly vytvořeny grafy pro odečet hodnot nebo z nich odvozené jednoduché empirické vztahy.

Pro detonaci výbušin s vyrovnanou (nulovou) kyslíkovou bilancí byla regresi z přesných termochemických dat odvozena pro rozmezí měrných náloží  $W/V$  0,05 - 5,0  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$  zjednodušená přibližná rovnice:

$$\Delta p_k = 1,60 \cdot \left( \frac{Q_v}{Q_{v-EGDN}} \right) \cdot \left( \frac{W}{V} \right)^{0,826} \quad (2-29)$$

kde  $Q_v$  je výbuchové teplo ( $\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) předmětné výbušiny,  $Q_{v-EGDN}$  je výbuchové teplo ethylenglykol dinitrátu a má hodnotu  $6,7 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,  $\Delta p_k$  je komorový přetlak (MPa),  $W$  je hmotnost nálože (kg) a  $v$  je objem uzavřeného prostoru ( $\text{m}^3$ ).

Pro výbušiny s výraznou negativní kyslíkovou bilancí (například TNT) lze hodnoty komorového přetlaku odečíst například z grafu na obr. 2-12



**Obrázek 2-12: Experimentální funkce  $\Delta p_k (W/V)$  pro TNT (Baker, 1983)**

#### 2.4.1.4 Ventilování komorových výbuchů

Absolutní hodnota komorových přetlaků  $\Delta p_k$  je v případě ventilovaných výbuchů prakticky nezávislá na velikosti ventilačního poměru  $A_v/V$  (kde  $A_v$  je plocha ventilačního otvoru v  $\text{m}^2$ ). v případě výbuchu neventilovaného jde o veličinu kvazistatickou a v případě výbuchu ventilovaného má význam tlaku (extrapolovaného) počátečního.

Expanzní křivka  $p(t)$  má obecně povahu prakticky exponenciálního poklesu vnitřního přetlaku  $\Delta p$  s časem. Protože doba trvání přetlaku pro exaktní exponenciální průběh by byla teoreticky nekonečná, je pro praktické výpočty nutno přijmout určité aproximace.

Vztahy pro odhad doby trvání komorového přetlaku  $t_k$  (ms) vycházejí z funkční závislosti na výfukovém poměru  $A_v/V$  a hodnoty komorového tlaku  $p_k$ . Pro  $a_0 = 340 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  pak platí

$$t_k = 3,162 \cdot \left( \frac{V}{A_v} \right) \cdot \log \left( \frac{p_k}{P_0} \right) \quad (\text{ms}) \quad (2-30)$$

Pro stanovení komorového impulzu  $I_k$  lze použít vztah

$$I_k = 28,4 \cdot \left( \frac{V}{A_v} \right) \cdot \left( \frac{P_k}{P_0} \right)^{1,351} \quad (\text{Pa.s}) \quad (2-31)$$

## 2.4.2 Ventilovaný výbuch plynu

Průběh ventilovaného výbuchu plynu lze zjednodušeně rozdělit čtyř etap. Popis těchto etap je uveden v následujících podkapitolách.

### 2.4.2.1 Etapa ohraničeného výbuchu

Nárůst tlaku je určován rychlostí tvorby produktů hoření, které závisí na rychlosti plamene (viz obr. 2-4). Nárůst tlaku závisí exponenciálně na rychlosti plamene a času. Tedy vyšší rychlost plamene, vyšší rychlost nárůstu tlaku a kratší čas k dosažení daného přetlaku. z toho vyplývá, že trvání této etapy by mělo být minimalizováno. Pro účinné ventilování tedy musí být ventilační otvor vytvořen v počátečním stadiu výbuchového procesu, je žádoucí nejnižší možný přetlak na vyražení ventilu.

### 2.4.2.2 Etapa odstranění ventilu

Ideálem je mít ventilační plochu neustále otevřenou, takže by byla etapa ohraničeného výbuchu úplně eliminována. To je bohužel ve většině průmyslových situací nepraktické. Proto ventily utěsňují nádobu, ale jsou konstruovány tak, aby selhaly při nízkém přetlaku a umožnily výtok plynů vzniklých v raných stadiích. Hmota ventilu také ovlivňuje průběh výbuchu. Po dosažení přetlaku nezbytného na odstranění ventilu je potřeba určitého času k přemístění ventilu dostatečně daleko, aby byl umožněn plný výtok plynu z obalu. Než k tomu dojde, tlak pořád narůstá, i když s klesající rychlostí. z tohoto důvodu musí být ventil co nejlehčí.

Přetlak na vyražení ventilu má také výrazný vliv na tvar průběhu  $p(t)$ . Jestliže je tento přetlak nízký, a tedy ventilace funguje v počátečních stadiích výbuchu, pak plocha plamene, která určuje rychlost vytváření zplodin, bude malá. Přetlak pak poklesne uspokojivě po dosažení svého maxima  $\Delta p_1$ . Pokud je však přetlak na vyražení vysoký, pak pokles může být malý nebo vůbec žádný.

### 2.4.2.3 Etapa ventilování

Generovaný vnitřní přetlak je určován objemem plynů produkovaných hořením a výtokem plynů otvorem. Rychlost ventilování je velmi závislá na ploše ventilačního otvoru  $A_v$ . z obalu je odvedena i část plynu, nicméně rychlost produkce zplodin stále vzrůstá jako následek vzrůstu plochy expandujícího

plamene. Ve chvíli, kdy produkce zplodin dosáhne rychlosti odvádění plynu z obalu, začne opět tlak vzrůstat. Přetlak bude vzrůstat do té doby, než plamen dosáhne maximální plochy. v tento okamžik se vytvoří druhé maximum  $\Delta p_2$ .

Z hodnoty  $\Delta p_2$  už přetlak pouze klesá. Pokud je ventilační plocha tak velká, že množství odváděného plynu je vždy větší než množství vznikajících zplodin, nedojde k vytvoření maxima  $\Delta p_2$ .

#### **2.4.2.4 Faktory ovlivňující ventilovaný výbuch plynu**

V předcházející kapitole byl podán idealizovaný model ventilovaného výbuchu, který předpokládal iniciaci ve středu a stechiometrickou koncentraci uvnitř krychlové nádoby. Dále předpokládal, že směs kompletně vyplnila prostor nádoby. Nyní budou uvažovány některé odchylky od ideálních podmínek.

##### ***Rozložení směsi***

Pro dosažení maximálního přetlaku není potřeba, aby směs vyplnila celý objem. Musí vyplnit takový objem, aby bylo dosaženo maximální plochy plamene. k dosažení maximální plochy plamene je podle Cubbage (1973) potřeba vyplnit  $1/e$  objemu ( $e$  je Eulerovo číslo, 2,71828). v případě, že jsou projektovány výbuchové odlehčující ventily nebo panely, předpokládá se vždy nejhorší situace - celý objem je vyplněn výbušnou směsí.

##### ***Geometrie obalu a zdroj iniciace***

Jestliže je maximální plocha plamene dosažena dříve, než dojde k vytékání zplodin hoření, pak nedojde k ovlivnění maximálního přetlaku, ale pouze k jeho rychlejšímu poklesu. v praxi je zdroj iniciace pouze zřídka uprostřed a čas unikání zplodin může často určit vygenerovaný přetlak. Čím blíže je zdroj iniciace k ventilu, tím dříve budou unikat zplodiny a tím nižší bude nárůst tlaku. Necentrální iniciace také ovlivní maximální plochu plamene.

Jiným případem je situace, kdy je zdroj iniciace daleko od ventilačního otvoru, který je buď otevřený, nebo je uzavřen panelem s velmi nízkým přetlakem na protržení. Jak se čelo plamene pohybuje k otvoru, je vytlačeno velké množství nezreagované směsi. Když dojde k ventilování zplodin, plamen prošlehně do nezreagované směsi mimo obal. Solberg (1981) uvedl, že v určitých případech vnější hoření produkuje přetlaky dostatečné k ovlivnění tvaru  $p(t)$ -průběhu uvnitř obalu po začátku unikání zplodin.

Vyšších přetlaků může být dosaženo, pokud je přítomno více zdrojů iniciace.

### ***Vliv počáteční teploty a tlaku***

Rychlost nárůstu tlaku závisí na rychlosti tvorby zplodin, která je úměrná třetí mocnině rychlosti plamene. Rychlost plamene je vztažena k rychlosti hoření a expanznímu faktoru. Počáteční teplota ovlivňuje oba parametry. Expanzní faktor je určen poměrem teploty plamene  $T_f$  (v K) a počáteční teploty  $T_i$  (v K). i když vyšší  $T_i$  způsobuje vzrůst  $T_f$ , poměr  $T_f/T_i$  se sníží. Následkem toho se u kompletně ohraničeného výbuchu maximální přetlak sníží, ale rychlost nárůstu se zvýší. Vzhledem k tomu, že u ventilovaných výbuchů maximální přetlak závisí na rychlosti nárůstu tlaku, vyšší počáteční teplota bude ve svém důsledku maximální tlak zvyšovat.

Malé změny počátečního tlaku mají malý vliv na přetlaky generované při ventilovaných výbuších.

### **2.4.2.5 Mechanismus urychlování plamene**

Jedním z možných mechanismů je zpětná vazba způsobující nestability plamene. Například tlakové vlny generované při šíření plamene se mohou odrážet od stěn nádoby a zvyšovat tak rychlost hoření.

#### *Turbulence*

Zpravidla všechny obaly, uvnitř kterých může dojít k výbuchu plynu, obsahují překážky jako stroje, regály, ochozy apod. Tyto překážky způsobují turbulence v nezreagovaném plynu a zrychlují hoření. Malé turbulence zvyšují lokální teplo a převod hmoty, což vede k zvýšení rychlosti hoření a tedy k zvýšení rychlosti nárůstu tlaku. Velké turbulence, vznikající na překážkách, mohou vést ke změnám plochy plamene, která také zvyšuje rychlost hoření a tedy nárůst tlaku.

### **2.4.2.6 Odhad přetlaků generovaných při ventilovaných vnitřních výbuších**

Velmi používané vztahy pro odhad přetlaků generovaných při ventilovaných vnitřních výbuších publikovali Cubbage a Simmonds (1955, 1957). Rovnice byly odvozeny na základě mnoha testů s různými plyny a párami. Hodnoty prvního a druhého přetlaku  $\Delta p_1$  a  $\Delta p_2$  dobře vyhovují následujícím experimentálním vztahům:

$$\Delta p_1 = S_0 \cdot \frac{(4,3 \cdot K \cdot W + 28)}{V^{1/3}} \quad (2-32)$$



$$\Delta p_2 = 58 \cdot S_0 \cdot K \quad (2-33)$$

kde  $\Delta p_1$  a  $\Delta p_2$  jsou přetlaky (mbar),  $S_0$  je laminární rychlost hoření ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ),  $v$  je objem ventilovaného prostoru ( $\text{m}^3$ ) a  $W$  je hmotnost  $1 \text{ m}^2$  plochy ventilu ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ).

Koeficient  $k$  je bezrozměrný a je definován jako poměr plochy stěny, ve které je ventil a plochy otvoru ventilu:

$$K = \frac{A_s}{A_v} \quad (2-34)$$

Rovnice podle Cabbage a Simmondse zohledňují vliv jak palivo-vzdušné směsi, tak obalu. Zkušenosti ukazují, že vzorce jsou aplikovatelné v situacích, které vyhovují následujícím omezením:

- Maximální a minimální rozměr obalu mají poměr menší než 3: 1.
- Koeficient  $k$  je menší než 5.
- Hmotnost ventilu na jednotku plochy nepřesahuje  $24 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ .
- K udržení ventilu v pozici není použito žádné opory.

Rasbash uvádí ve své publikaci (Rasbash, 1976), že pro zahrnutí turbulencí do vztahu je vhodné zavést tzv. „Turbulent burning velocity“  $S_T$  ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )

$$S_T = f \cdot S_0 \quad (2-35)$$

Pro faktor  $f$  uvádí hodnoty 1,5 pro místnost podobnou laboratoři a turbulence generované nábytkem a jinými překážkami a faktor 5 pro ventilování velkými otvory a pro turbulence generované překážkami rozmístěnými v celém prostoru. Pokud dojde k iniciaci směsi, která je turbulentní již před iniciací (například úniky vysokotlakého nebo zkapalněného plynu), jeví se podle autorů vhodné použití faktoru  $f$  až o hodnotě 8 a vyšší.

**Tabulka 2-3: Typické vlastnosti hoření některých vybraných uhlovodíků (Harris, 1983)**

Látka	Meze výbušnosti (obj. %)		Stechiometrický poměr (obj. %)	% plynu při max. rychlosti hoření	Max. laminár. rychlost hoření $S_0$ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	Adiabat. teplota plamene $T_f$ (K)	Expanzní poměr $T_f/T_1$ ( $T_1=288 \text{ K}$ )	Max. lam. rychlost plamene ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	Auto-iničiač. teplota (K)
	dolní	horní							
vodík	4	75	30	54	3,5	2318	8,0	28,0	847
methan	5	15	9,5	10	0,45	2148	7,4	3,5	813

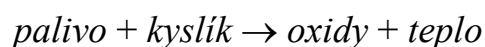
	Meze výbušnosti (obj. %)		Stechiometrický poměr	% plynu při max. rychlosti hoření	Max. laminár. rychlost hoření	Adiabat. teplota plamene	Expanzní poměr $T_f/T_1$	Max. lam. rychlost plamene	Auto-iniciač. teplota
ethan	3	12,5	5,6	6,3	0,53	2168	7,5	4,0	788
propan	2,2	9,5	4,0	4,5	0,52	2198	7,6	4,0	723
butan	1,9	8,5	3,1	3,5	0,50	2168	7,5	3,7	678
pentan	1,5	7,8	2,6	2,9	0,52	2232	7,7	4,0	533
hexan	1,2	7,5	2,2	2,5	0,52	2221	7,7	4,0	498
heptan	1,2	6,7	1,9	2,3	0,52	2196	7,6	4,0	488
acetylen	2,5	80	7,7	9,3	1,58	2598	9,0	14,2	578
ethylen	3,1	32	6,5	7,4	0,83	2248	7,8	6,5	763
propylen	2,4	10,3	4,4	5,0	0,66	2208	7,7	5,1	733
butylen	1,7	9,5	3,4	3,9	0,57	2203	7,6	4,3	658
benzen	1,4	7,1	2,7	3,3	0,62	2287	7,9	4,9	833
cyklohexan	1,3	8,0	2,3	2,7	0,52	2232	7,8	4,1	518

### 2.4.3 Výbuch prachové disperze

Výbuch prachu je definován jako exotermický chemický proces, ke kterému když dojde v uzavřeném objemu, způsobí náhlý a významný nárůst tlaku. Každý pevný hořlavý materiál bude hořet silně a rychle s rostoucím stupněm rozdělení materiálu. Jako příklad lze použít dřevo. Na první pohled je patrný rozdíl v rychlosti hoření kmene stromu, polínka, třísek a nakonec prachu v disperzi. Hlavní rozdíl je v tom, jak velký povrch může najednou hořet v konstantním objemu. Je patrné, že k výbuchu prachu může dojít pouze v případě, že má pevný hořlavý materiál určitou maximální velikost. Zjednodušeně se dá říct, že prachy s velikostí částic menší než 0,5 mm mohou vybuchovat. Nato, aby byl proces dostatečně rychlý, musí mít každá z částic dostatek prostoru k hoření. Pokud bude vzdálenost jednotlivých částic příliš malá, pak se hoření bude rychlostí blížit hoření polínek, pokud bude naopak příliš velká, vyhoří pouze jedna částice, nedojde k přenosu plamene na další částici a plamen zhasne. k výbuchům prachových disperzí nedochází na volných prostranstvích. Nevytvoří se totiž dostatečně velký oblak prachové disperze na to, aby došlo k tak velkému urychlení procesu hoření, že bude vygenerována tlaková vlna. Proto se v případě prachových disperzí uvažují pouze dvě základní geometrie výbuchu:

- a) ve vnitřním prostoru průmyslových objektů nebo zařízení a
- b) v 1-D geometrii – tunely, potrubí.

Výbuch prachových disperzí probíhá podle následující základní reakce



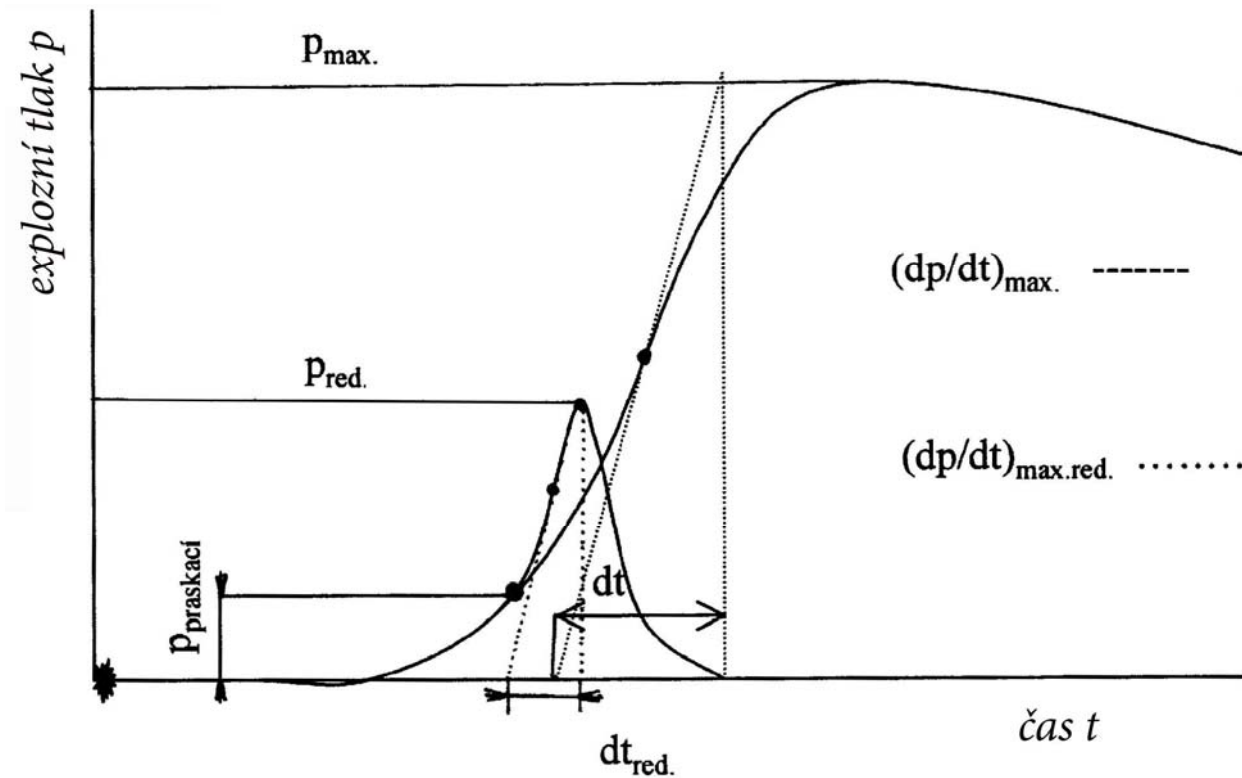
Výbuch prachu se předpokládá u následujících materiálů:

- a) přírodních organických materiálů – obilí, len, cukr, čaj, atd.,
- b) syntetických organických materiálů – plasty, organické pigmenty, pesticidy, atd.,
- c) uhlí a rašeliny,
- d) kovů – hliník, hořčík, zinek, železo, atd.

K výbuchu prachu může dojít pouze u materiálů, které nejsou stabilními oxidy. To vylučuje následující látky: křemičitany, sírany, dusičnany, uhličitany a fosforečnany, tedy cement, písek, vápenec apod.

Výbuch prachových disperzí je možný pouze uvnitř koncentračních mezí vyjadřovaných v  $\text{g.m}^{-3}$ . Oblaka, která je možné primárně iniciovat, jsou běžná v následujících provozech: mlýny, mixéry, síta, sušárny, cyklóny, filtry, korečkový (kapsový) výtah, násypky, síla, sací potrubí a potrubí pro pneumatickou přepravu prachů.

O formování tlakového pole od výbuchu rozhoduje velikost otvorů, které buď při výbuchu vně konstrukce zprostředkují přenos tlakové vlny do nitra konstrukce, nebo při výbuchu uvnitř konstrukce tvoří rozbitá okna nebo dveře, tedy výfukové otvory, mající vliv na snížení výbuchového tlaku uvnitř konstrukce. Výsledný tlak je nižší než maximální explozní přetlak (obr. 2-13).



Obrázek 2-13: Průběh exploze bez a s odlehčením výbuchu

Toto se s úspěchem využívá k ochraně zařízení. Pro dimenzování únikových ploch a následných aplikací explozních uvolňovacích prvků lze využít níže uvedené matematické vztahy. Jejich pomocí lze poměrně snadno a rychle stanovit celkovou odlehčovací plochu chráněného zařízení pro aplikaci uvolňovacích prvků.

Při výbuchu uvnitř zařízení s tlakovým odlehčením je nutné vždy počítat s výstupem hořících a nespálených prachů, plameny a účinky tlaku. Expanze plamenů může dosahovat délek jednotek metrů až desítek metrů.

Pro stanovení maximálního redukovaného přetlaku lze nepřímo využít vztahů pro stanovení velikosti odlehčovací plochy  $A$  (Damec, 1998). Rozdíl je pouze v tom, že velikost odlehčovací plochy je známá. Vztahy se odlišují pro dva druhy nádob

- a) Kubická nádoba  $H/D < 2$
- b) Nekubická nádoba  $H/D \geq 2$

Kde  $H$  je výška nádoby a  $D$  je průměr nádoby.  
Kubické nádoby:

$$A = [3,264 \cdot 10^{-5} \cdot p_{max} \cdot K_{St} \cdot p_{red,max}^{-0,569} + 0,27 \cdot (p_{stat} - 0,1) \cdot p_{red,max}^{-0,5}] \cdot V^{0,753} \quad (2-36)$$

Rovnice je platná pro:

- a) velikost nádoby  $0,1 \text{ m}^3 \leq v \leq 10\,000 \text{ m}^3$
- b) statický otevírací přetlak  $0,1 \text{ bar} \leq p_{stat.} \leq 1 \text{ bar} (= 10^5 \text{ Pa})$
- c) maximální redukovaný výbuchový přetlak  $0,1 \text{ bar} \leq p_{red,max} \leq 2 \text{ bar}$
- d) maximální výbuchový přetlak  $5 \text{ bar} \leq p_{max} \leq 12 \text{ bar}$  pro prach specifických parametrů  $10 \text{ bar} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1} \leq K_{St} \leq 800 \text{ bar} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

Nekubické nádoby:

$$A_L = A + \Delta A \quad (2-37)$$

$$\Delta A = A (-4,305 \cdot \log p_{red,max} + 0,758) \cdot \log H/D \quad (\text{m}^2) \quad (2-38)$$

Kde  $A_L$  je odlehčovací plocha u nekubické (podlouhlé, resp. protáhlé) nádoby,  $A$  je odlehčovací plocha kubické nádoby vypočtena podle (2-36) a  $\Delta A$  je přídavek plochy vypočtený podle vztahu (2-38).

Podle ČSN EN 14491 článku 5.5.2 „Výpočet odlehčovací plochy“ se uvádí pro odlehčení budov vztah

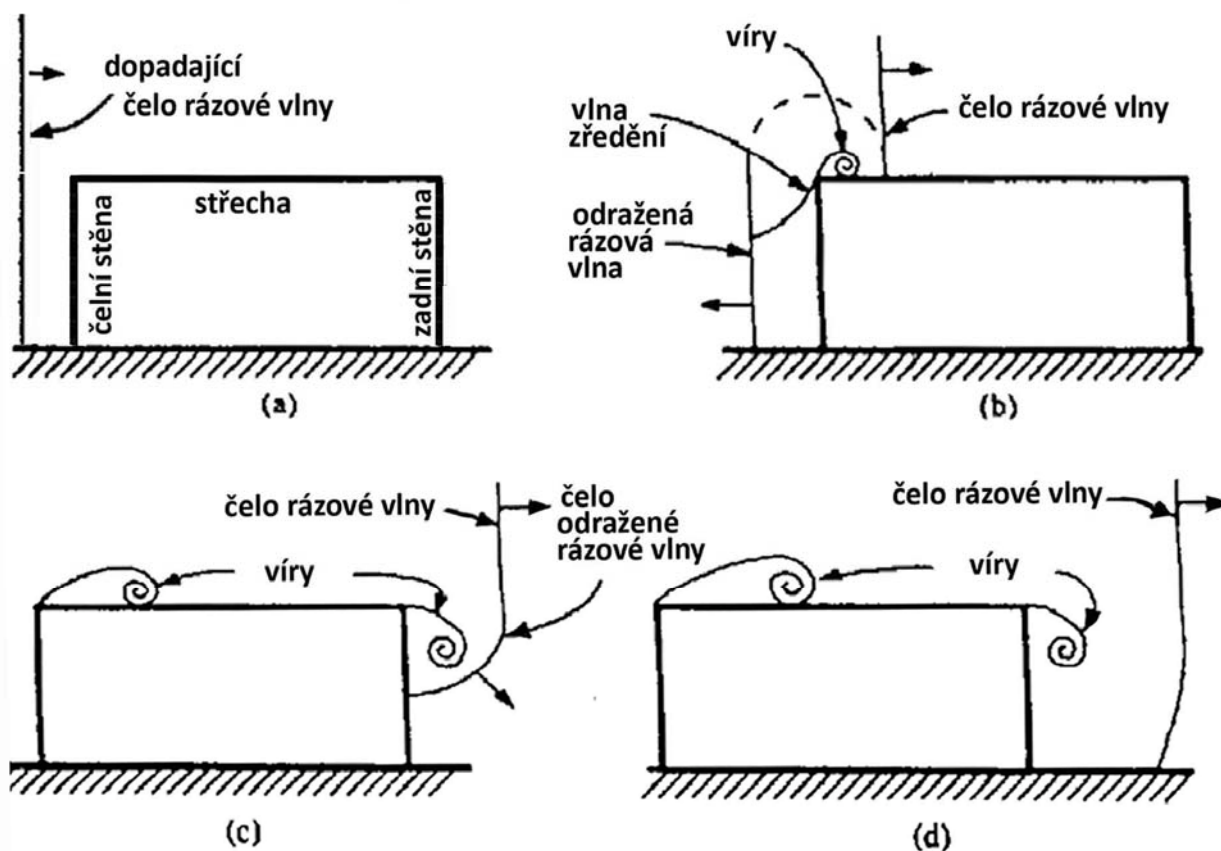
$$A = C \cdot A_s \cdot p_{red,max}^{-0,5} \quad (2-39)$$

kde  $A$  je odlehčovací plocha v  $m^2$ ,  $A_s$  je vnitřní povrchová plocha chráněného prostoru v  $m^2$ ,  $A_v$  je požadovaná odlehčovací plocha  $A_v = A/E_f$  v  $m^2$ ,  $E_f$  je odlehčovací účinnost a  $C$  je odlehčovací konstanta rovnice:

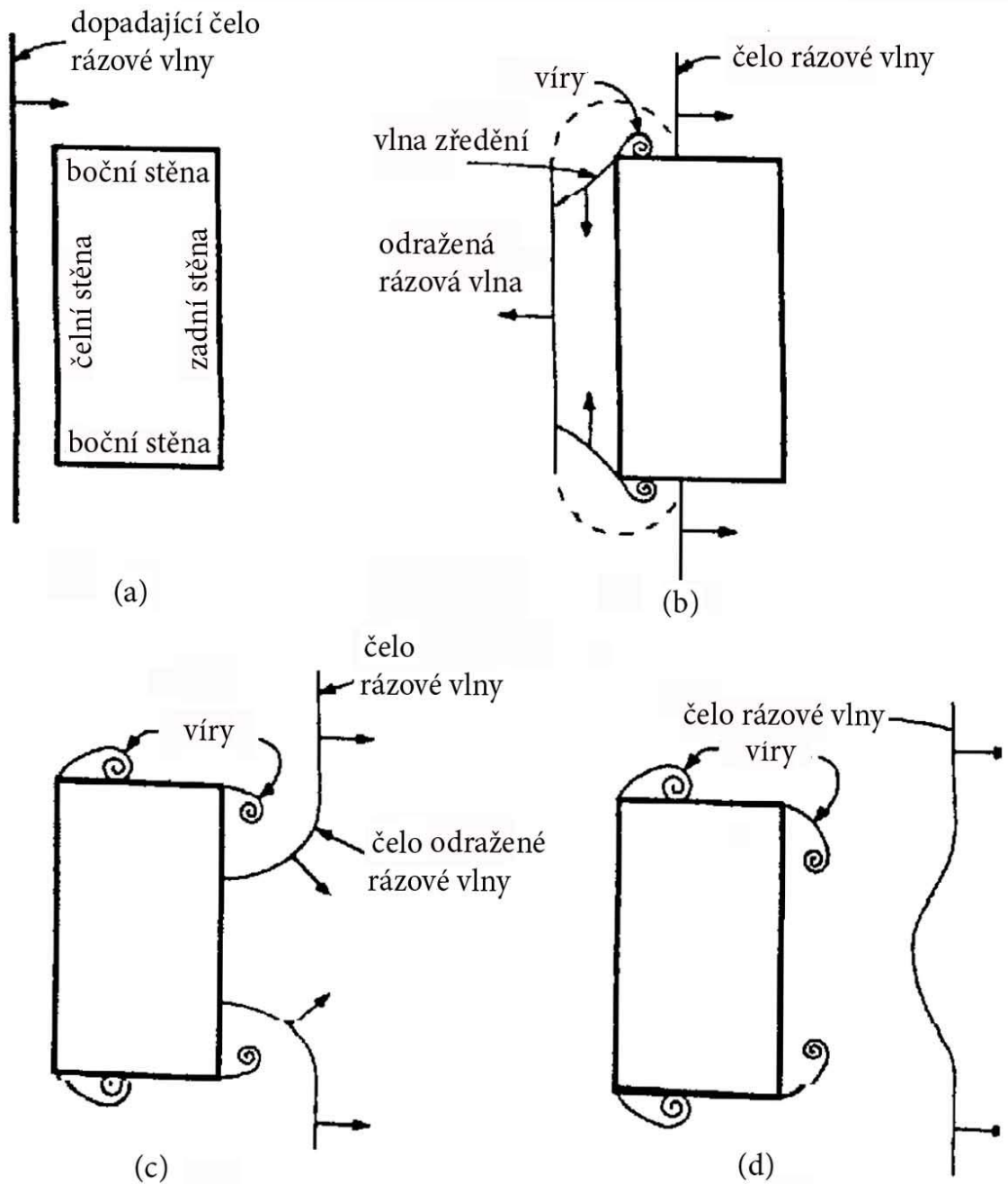
$$\begin{aligned} 0 < K_{St} \leq 100: & \quad C = 0,018^{0,5} \text{ bar} \\ 100 < K_{St} \leq 200: & \quad C = 0,026^{0,5} \text{ bar} \\ 200 < K_{St} \leq 300: & \quad C = 0,030^{0,5} \text{ bar} \end{aligned}$$

## 2.5 ŠÍŘENÍ TLAKOVÉ VLNY A JEJÍ INTERAKCE S PŘEKÁŽKOU

Když vzdušná rázová vlna narazí na překážku, dojde k jejímu lokálnímu narušení. z tohoto pohledu není tlakové zatížení objektu dáno časovým průběhem tlaku nenarušené vlny, ale závisí na velikosti a tvaru objektu.



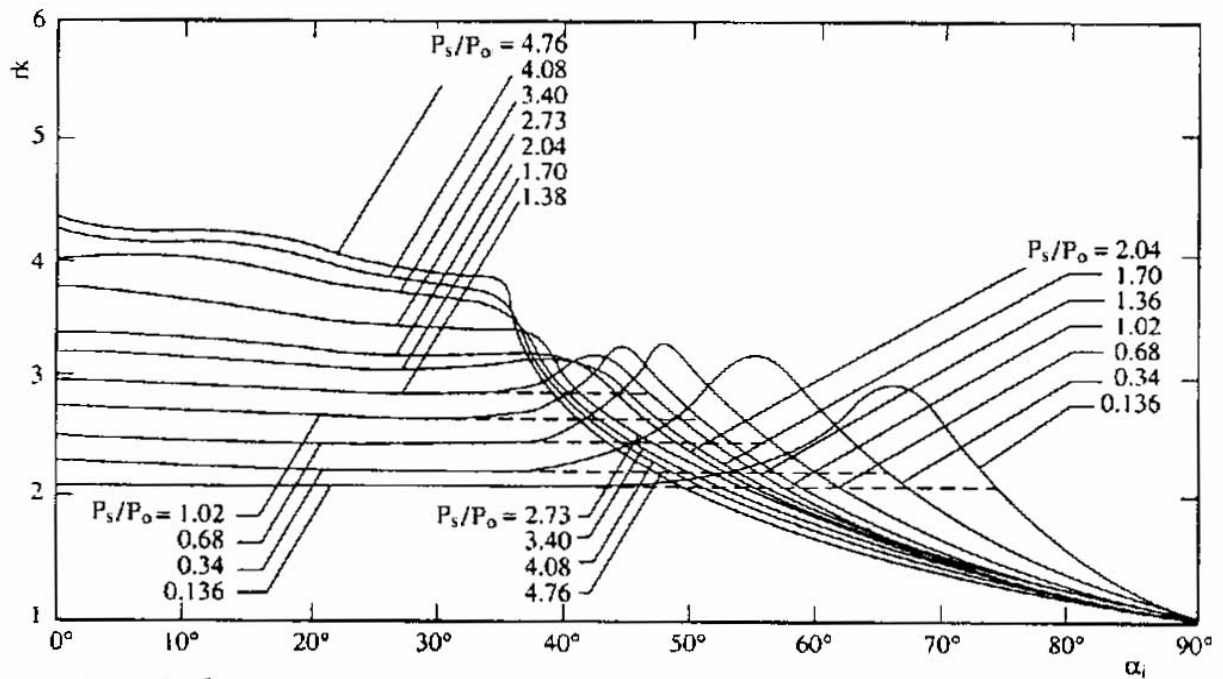
Obrázek 2-14a: Schematické znázornění narušení vlny překážkou; pohled z boku (Norris, 1959)



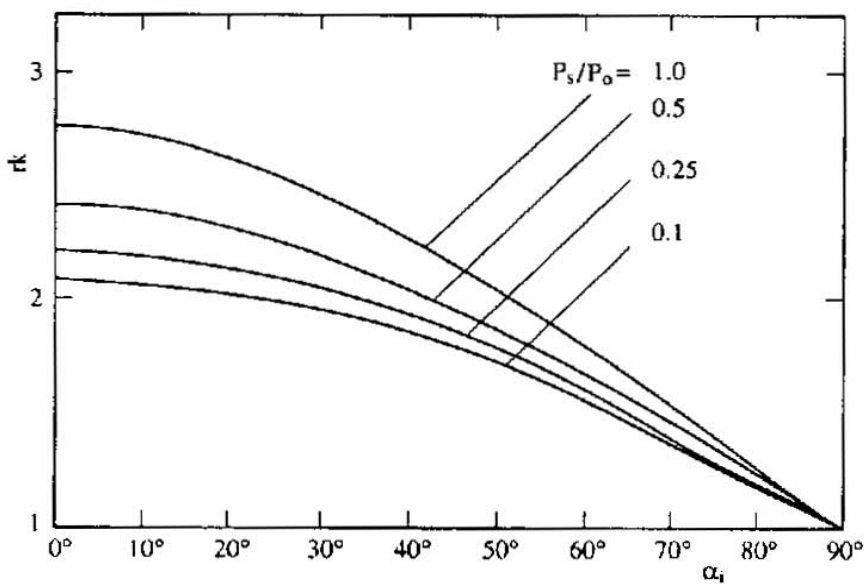
**Obrázek 2-14b: Schematické znázornění narušení vlny překážkou; pohled shora (Norris, 1959)**

Na obr. 2-14 je schematicky znázorněn průběh tlakového zatížení objektu. Průběh lze rozdělit do 4 fází.

- a) Čelo vlny je stále ještě před objektem a není narušeno.
- b) Čelo vlny dosáhlo objektu. Dochází k odrazu a vzniku vlny zředění.
- c) Vlna pokrývá objekt.
- d) Situace, kdy čelo vlny je za objektem.



a: Rázová vlna



b: Tlaková vlna

**Obrázek 2-15: Odrazné koeficienty, jako funkce úhlu dopadu  $\alpha_i$ , pro různé hodnoty  $\Delta p_+$  ( $P_s$ ) (Baker, 1983)**

### 2.5.1 Odraz vlny

Dopadající vlna se odráží od objektu a začíná se pohybovat ve směru opačném vlně dopadající. Povrch, od kterého se vlna odráží je zatěžován přetlakem  $\Delta p_r$  odražené vlny, který je vyšší než přetlak  $\Delta p_+$  dopadající vlny.

Poměr mezi odraženým a dopadajícím přetlakem se nazývá odrazný koeficient:

$$r_k = \frac{\Delta p_r}{\Delta p_+} \quad (2-40)$$

Hodnota tohoto koeficientu závisí na:

- a) úhlu dopadu  $\alpha_i$ , pod kterým dopadá čelo vlny na odrážející povrch. Pro kolmý odraz je to  $0^\circ$  a  $90^\circ$  pro paralelní vlnu.
- b) přetlaku. Jestliže je přetlak v porovnání s atmosférickým tlakem  $p_0$  malý, pak koeficient závisí na hodnotě tohoto přetlaku. s růstem přetlaku roste i odrazný koeficient.
- c) typu vlny. Rázová vlna se z pohledu odrazu chová jinak než vlna spojitá.

Hodnoty odrazných koeficientů pro různé hodnoty přetlaků, jako funkce úhlu dopadu, jsou uvedeny v obr. 2-15.

Kolmý odrazný přetlak vzdušné rázové vlny lze vyjádřit následující rovnicí (Baker, 1983):

$$\Delta p_r = 2 \cdot \Delta p_+ + \frac{(\gamma + 1) \cdot \Delta p_+^2}{(\gamma - 1) \cdot \Delta p_+ + 2 \cdot \gamma \cdot p_0} \quad (2-41)$$

Kde  $\gamma$  je poměr specifických tepel  $C_p$  a  $C_v$ .

Podle publikace (Glasstone, 1967) je maximální hodnota odrazného koeficientu zhruba 20.

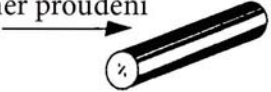




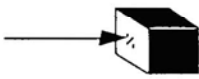
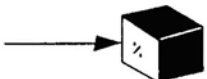
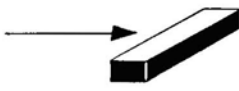

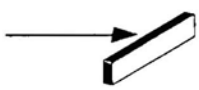
## 2.5.2 Dynamický tlak

Nárůst tlaku je také doprovázen vytěsněním vzduchu. Toto vytěsnění, někdy nazývané „explosion wind“, způsobuje další zatížení odrazné plochy. Dynamický tlak  $q$  vyvolaný vytěsněním vzduchu je definován vztahem (2-3). Pro jeho výpočet použít vztah, který vyjadřuje jeho závislost na přetlaku  $\Delta p_+$  (Baker, 1983) popsanou vztahem (2-4). Pro snadnější používání je tento vztah veden i na tomto místě textu:

$$q = \frac{5}{2} \cdot \frac{\Delta p_+^2}{7 \cdot p_0 + \Delta p_+} \quad (2-42)$$



**Tabulka 2-4: Koeficienty odporu  $C_D$ , převzato (Glasstone, 1967)**

Tvar	Obrázek konstrukce	$C_D$
Dlouhý rovný válec	Směr proudění 	1.20
Koule		0.47
Válec		0.82
Disky	 nebo 	1.17
Krychle		1.05
Krychle		0.80
Dlouhý kvádr		2.05
Dlouhý kvádr		1.55
Pás		1.98

Dynamický tlak na objektu  $q_D$  je roven:

$$q_D = C_D \cdot q \quad (2-43)$$

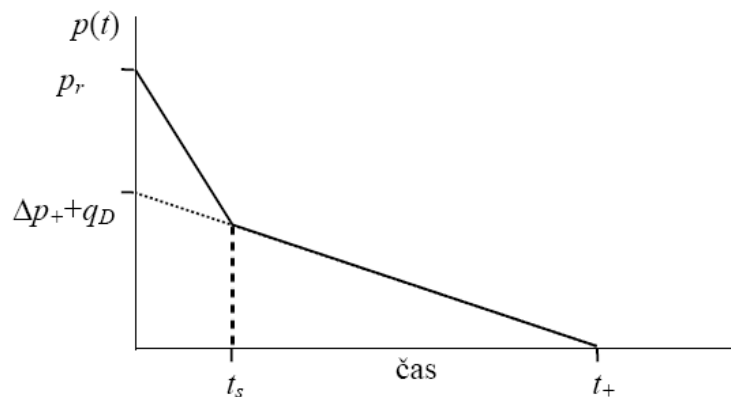
Kde  $C_D$  je koeficient odporu, který je závislý na tvaru objektu. v tab. 2-4 jsou uvedeny hodnoty  $C_D$  pro různé tvary objektů.

### 2.5.3 Zatížení odrazného povrchu

Vlivem narušení dopadající vlny, způsobeného překážkou na hranách odrazného povrchu, dojde k vytvoření tlakových rozdílů – na čelní stěně má přetlak

hodnotu odrazného přetlaku a na boční stěně hodnotu dopadajícího přetlaku. Následkem toho se začíná vytvářet vlna zředění šířící se od okraje čelní stěny směrem ke středu čelní stěny (obr. 2-14 fáze (b)). Podle tohoto zředění přetlak na čele odražené vlny klesá na hodnotu rovnu přetlaku v tomto okamžiku dopadajícímu na dané místo plus dynamický tlak.

Konečné zatížení odrazného povrchu může být určeno s pomocí hodnot odrazného a dynamického tlaku. Příklad zatížení odrazného povrchu vzdušnou rázovou vlnou je uveden na obr. 2-16.



**Obrázek 2-16: Schematické znázornění závislosti tlaku na čase pro konečný odrazný povrch**

Čas  $t_s$ , během kterého klesne odrazný přetlak na hodnotu přetlaku dopadajícího plus dynamický tlak, lze spočítat následovně.

$$t_s = \frac{3 \cdot S}{U} \quad (\text{převzato z (Baker, 1983)}), \quad (2-44)$$

kde  $u$  je rychlost čela vlny ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) a  $s$  je charakteristický rozměr povrchu (m). Pro čelo budovy s výškou  $h$  a šířkou  $B$ , musí být pro hodnotu  $s$  dosazena menší z hodnot  $h$  a  $1/2B$ .

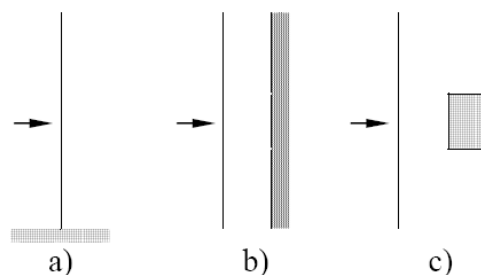
Rychlost  $u$  lze vypočítat podle rovnice (2-1). Pro snadnější používání je tento vztah veden i na tomto místě textu:

$$U = c_0 \cdot \left( 1 + \frac{6 \cdot \Delta p_+}{7 \cdot p_0} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2-45)$$

kde,  $c_0$  je rychlost zvuku ve vzduchu ( $340 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) a  $p_0$  je absolutní tlak vzduchu před rázovou vlnou (Pa).

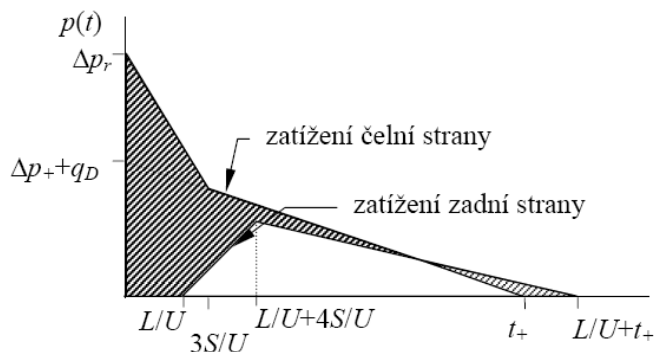
## 2.5.4 Zatížení objektu

Interakce mezi vzdušnou rázovou vlnou a určitým typem objektu vymezuje tři hraniční situace (obr. 2-17).



**Obrázek 2-17: Hraniční podmínky zatížení**

Zatížení čela je určováno v souladu s procedurou popsanou v 2.5.1.3. Zatížení ostatních stran (střechy, boků a zadní stěny) není pouze funkcí času, ale také místa. Při zjednodušení vlna obejde objekt o délce  $L$  (m) tak rychle, že tuto závislost lze zanedbat. Pro zatížení těchto povrchů však může být vytvořen graf závislosti tlaku na čase pro dopadající vzdušnou rázovou vlnu.

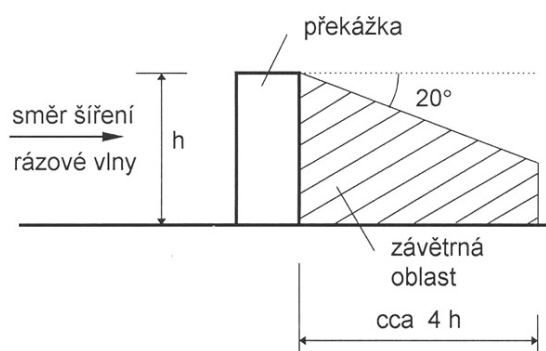


**Obrázek 2-18: Schematické znázornění horizontálního zatížení strukturní konstrukce uzavřené budovy**

Během časového intervalu  $t = L/U$ , nezbytného pro dosažení zadní stěny, je horizontální zatížení kostry vysoké. Poté dojde k slabému zatížení zadní stěny. Předpokládá se, že časový interval nezbytný k dosažení maximální hodnoty je roven  $t = 4\cdot S/U$ . Horizontální zatížení konstrukce je schematicky znázorněno na obr. 2-18.

### 2.5.5 Zatížení zadní stěny objektů

Stín v závětrné oblasti za překážkou je závislý především na velikosti přetlaku v rázové vlně a rychlosti šíření této rázové vlny v daném prostředí. Pokud nejsou známy údaje z experimentálního ověřování na modelovém nebo skutečném případě, uvažuje se závětrná oblast podle obr. 2-19. Jestliže přetlak na čele rázové vlny před překážkou má hodnotu  $\Delta p_+$ , pak tato překážka vytváří tlakový stín ve své závětrné oblasti, ve kterém je tlak redukován na hodnotu cca 0,7 až 0,8 hodnoty  $\Delta p_+$ . Vliv překážky na velikost stínu za překážkou vymizí přibližně ve vzdálenosti  $4h$ , kde  $h$  je výška překážky nad terénem.



Obrázek 2-19: Stín za překážkou

### 2.5.6 Zatížení malých nebo otevřených objektů

Jako příklad lze uvést věže nebo mosty. Nárůst tlaku na zadní stěně začíná téměř v čase nula. k zatížení zadní stěny dochází ve stejné době jako přední stěny, ale působí proti zatížení čela. Zatížení struktury je pak dáno pouze dynamickým tlakem  $q_D$  a počátečním „hrotem“ odrazu.

### 2.5.7 Válcové nebo kulové objekty

Válcové objekty, tak jako komíny nebo potrubí, reagují na rázovou vlnu odlišně, což je dáno zakřivením čela, zatížení tedy začíná od nuly, nikoliv od maximální hodnoty. Maximální hodnota je dosažena, až čelo vlny přejde k maximální šířce objektu, nebo v čase  $L/(2U)$ , kde  $L$  je průměr objektu. Celkové zatížení v tomto čase je průměrná hodnota z celého zakřiveného čela, a lze ji považovat za  $7/8$  uvažovaného odrazného tlaku v tomto čase. Zatížení odpovídající  $\Delta p_+ + q_D$  (stagnační tlak) je dosaženo v čase  $L/U$ . Okamžitě začíná působení na zadní stěně a trvá další interval  $L/U$ , po kterém je objekt vystaven pouze dynamické zátěži  $q_D$ .

Kulové objekty se při působení rázové vlny chovají podobně jako válcové, pouze koeficient odporu je nižší.

## **3 EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘOVÁNÍ VÝBUŠNOSTI LÁTEK A VÝBUCHOVÉHO POLE**

### **3.1 KONDENZOVANÉ LÁTKY**

Kondenzované látky představují energetické materiály, obecně výbušiny, vyvíjené a vyráběné k různým účelům. v povědomí veřejnosti jsou jejich výbuchové přeměny chápány jednoznačně jako nebezpečné, na rozdíl od hořlavých plynů a prachů, kde je nebezpečí výbušných přeměn často podceňováno.

Technicko bezpečnostní parametry a vlastnosti výbušin pro civilní použití jsou ověřovány podle evropských norem pro *Výbušiny pro civilní použití – Brizantní trhavinny*.

#### **3.1.1 Požadavky ČSN EN 13631-1 (2005)**

##### ***Teplotní stabilita***

Při zkoušení podle EN 13631-2 (2003), musí být výsledek „bez reakce“.

##### ***Citlivost ke tření***

Při zkoušení podle EN 13631-3 (2005), nesmí být citlivost ke tření menší než 80 N.

Rozsah platnosti výsledků je uvažován v rozsahu od 10 °C do 40 °C.

##### ***Citlivost k nárazu***

Při zkoušení podle EN 13631-4 (2003), musí být citlivost k nárazu větší než 2 J. Rozsah platnosti výsledků je uvažován v rozsahu od 10 °C do 40 °C.

##### ***Vodovzdornost***

Jestliže je uvedeno, že výbušina je voděodolná, musí být třikrát zkoušena podle EN 13631-5 (2003). Detonace musí být pozorována ve všech třech odpalech.

Rozsah platnosti výsledků je uvažován při:

- teplotě: od 0 °C do 40 °C.
- tlaku: od 0 MPa do 0,3 MPa nad atmosférickým tlakem.

### ***Odolnost hydrostatickému tlaku***

Jestliže je uvedeno, že výbušina může být používána při hydrostatickém tlaku až do 0,3 MPa, musí odpovídat EN 13631-5 (2003).

Jestliže je uvedeno, že výbušina může být používána při hydrostatickém tlaku větším než 0,3 MPa, musí být zkoušena podle EN 13631-6 (2003) při maximálním tlaku stanoveném výrobcem. Detonace musí být pozorována ve všech třech odpalech.

Rozsah platnosti výsledků je uvažován při:

- teplotě: od 0 °C do 40 °C.
- tlaku: až do zkušební tlaku.

### ***Bezpečnost při extrémních teplotách***

Všechny zkoušky uvedeny v této normě, tam, kde je to použitelné, musí být provedeny při okolní teplotě a tlaku. Výsledky zkoušek musí být považovány za platné v rozsazích definovaných pro každou metodu zkoušení uvedenou v této normě.

Pokud jedna nebo druhá teplota (a, kde je to použitelné, tlak) vymezující oblast použití uváděnou výrobcem leží vně rozsahů platnosti výsledků zkoušek pro některou zkoušku, musí být tyto zkoušky také provedeny v krajních mezích uváděného rozsahu použití. Požadavky uváděné pro každou jednotlivou zkoušku musí být také splněny při takových podmínkách.

Pokud zkušební metoda není použitelná při extrémních podmínkách používání uváděných výrobcem, musí následovat postup popsany v EN 13631-7 (2004).

### ***Bezpečnost při nabíjení***

Pokud je výbušina uváděna jako vhodná pro nabíjení mechanickými prostředky, musí při zkoušení podle EN 13631-3 (2005) a 13631-4 (2003) splňovat následující hodnoty citlivostí:

- a) Tření: větší než 160 N.
- b) Náraz: větší než 30 J.

Skutečné prostředky nabíjení by měly být samostatně hodnoceny uvedením specifických podmínek a použitým skutečným zařízením.

Mohou být také použity národní předpisy pro používání výbušin.

### ***Ověření iniciačních prostředků***

Výbušina musí být zkoušena podle EN 13631-10 (2004). Pokud je výrobcem uváděno několik iniciačních prostředků (např. rozbuška a bleskovice), musí být každý z těchto prostředků zkoušen.

Detonační rychlost při všech třech odstřelech musí být nejméně 90 % hodnoty uváděné výrobcem pro každý uváděný typ iniciace.

Rozsah platnosti výsledků je uvažován v rozsahu od 5 °C do 50 °C.

### ***Přenos detonace***

Při zkoušení podle EN 13631-11(2004), nesmí být vzdálenost pro přenos detonace menší než 20 mm.

Rozsah platnosti výsledků je uvažován v rozsahu od 5 °C do 50 °C.

### ***Hustota***

Hustota výbušiny musí být stanovena podle EN 13631-13 (2003). Zkouška musí být provedena třikrát na třech samostatných zkušebních vzorcích. Všechny hodnoty hustoty musí být uvnitř mezí uváděných výrobcem.

### ***Detonační rychlost***

Detonační rychlost musí být stanovena podle EN 13631-14 (2003) při minimálním průměru uváděném na trh, nebo minimálním průměru vývrtu doporučeném výrobcem. Zkouška musí být provedena třikrát na třech samostatných vzorcích. Všechny hodnoty detonační rychlosti musí být nejméně 90 % hodnoty uváděné výrobcem.

### ***Termodynamické vlastnosti***

Termodynamické výpočty musí být provedeny podle EN 13631-15 (2005). Vypočtené výbuchové teplo, objem plynů a specifická síla musí být v rozmezí  $\pm 3$  % hodnot uváděných výrobcem.

### ***Toxické plyny***

Obsahy oxidu uhelnatého a oxidů dusíku ve výbuchových zplodinách musí být stanoveny podle EN 13631-16 (2005).



Národní orgány mohou z důvodu ochrany zdraví používat údaje o množství těchto plynů pro kontrolu používání výbušin v různých podmínkách podzemních pracovišť.

### ***Výbušiny pro používání v nebezpečných prostředích***

Pokud je uvedeno, že výbušina je vhodná pro použití v uhelných dolech nebo za podmínek, kde se mohou vyskytovat hořlavé plyny nebo hořlavé prachy, musí být hodnocena schopnost výbušiny vznítit důlní plyn nebo uhlý prach pomocí laboratorních zkoušek simulujících praktické podmínky odpálení v dole.

Národní orgány mohou použít výsledky těchto zkoušek pro účely klasifikace výbušin do kategorií tak, že jejich používání v různých pracovních podmínkách uhelného dolu je buď povoleno, nebo zakázáno.

### **3.1.2 Hodnocení výkonových schopností výbušin**

Pro hodnocení výkonových schopností výbušin existuje celá řada zkoušek (např. brizance, relativní pracovní schopnost výbušiny apod.). Pro praxi je nejjednodušším ukazatelem detonační rychlost a tzv. tritolový ekvivalent (vztahený na poměr k TNT).

Vlastní aplikaci zatížení konstrukce výbuchem konkrétní výbušiny doporučujeme konzultovat s odborníky na výbušiny.

## ***3.2 STANOVENÍ POŽÁRNĚ TECHNICKÝCH CHARAKTERISTIK A TECHNICKO-BEZPEČNOSTNÍCH PARAMETRŮ PRACHŮ, PLYNŮ A PAR KAPALIN V SOUVISLOSTI S APLIKACÍ NAŘÍZENÍ VLÁDY Č. 406/2004 SB.***

Látky z hlediska chování při úniku a nebezpečí vzniku požáru i výbuchu jsou charakterizovány fyzikálně chemickými vlastnostmi a tzv. technicko-bezpečnostními parametry (TBP), u tuhých látek požárně technickými charakteristikami (PTCH). Nejspolehlivější způsob, jak získat co nejpřesnější informace o výbušnosti a hořlavosti dané hořlavé látky je experimentální ověření a následné popsání zkoušek pomocí *požárně-technické charakteristiky* v souladu s Vyhláškou MV č. 246/2001 Sb.

### **3.2.1 Základní pojmy z oblasti výbušnosti plynů, par a prachů**

Základní technické pojmy z oblasti výbušnosti plynů, par a prachů definuje norma ČSN EN 1127-1 (2008) Výbušná prostředí – Prevence a ochrana proti výbuchu – Část 1: Základní pojmy a metodologie.

#### ***Hořlavá látka***

Látka ve formě plynu, páry, kapaliny, pevné látky nebo jejich směsi, která, pokud dojde k iniciaci, může vyvolat exotermickou reakci s oxidačním prostředkem (nejčastěji se vzduchem).

#### ***Plyny***

Plyny se považují za hořlavé, mají-li definovanou teplotu vznícení, resp. vytvářejí se vzduchem v určitém koncentračním rozmezí výbušné směsi. ČSN 65 0205 (1996) limituje teplotu vznícení hodnotou 650 °C. Za plyny jsou považovány látky, jejichž tlak nasycených par je při teplotě 50 °C vyšší než 294 kPa nebo jejichž kritická teplota je nižší než 50 °C.

#### ***Kapaliny***

Kapalné látky se považují za hořlavé, mají-li definovanou teplotu vzplanutí nebo teplotu vznícení. Ve smyslu ČSN 65 0201 (2003) se za hořlavé kapaliny považují kapaliny, suspenze a emulze, které při atmosférického tlaku splňují tyto podmínky:

- a) nejsou při teplotě +35 °C tuhé ani pastovité,
- b) mají při teplotě 50 °C tlak nasycených par nejvýše 294 kPa,
- c) mají teplotu vzplanutí nejvýše 250 °C,
- d) lze u nich stanovit teplotu hoření.

#### ***Výbuch***

Náhlá oxidace nebo rozkladná reakce vyznačující se vzrůstem teploty, tlaku nebo vzrůstem obou těchto veličin současně.

#### ***Deflagrace***

Výbuch šířící se podzvukovou rychlostí.

### ***Meze výbušnosti***

Dolní mez rozsahu výbušnosti  
Horní mez rozsahu výbušnosti  
Dolní bod výbušnosti  
Horní bod výbušnosti

### ***Rozsah výbušnosti***

Rozsah koncentrace hořlavé látky ve vzduchu, při které může nastat výbuch.

### ***Výbušná atmosféra***

Směs vzduchu a hořlavých látek ve formě plynů, par, mlh nebo prachů při atmosférických podmínkách, ve které se po vzniku iniciace rozšíří hoření do celé nespálené směsi.

## **3.2.2 Zdroje fyzikálně-chemických dat**

Technické údaje je možné vyhledat ve:

- a) specializovaných tabulkách,
- b) specializovaných databázích na internetu,
- c) bezpečnostních listech.

Toto většinou platí pro čisté složky (kapaliny, plyny a páry, reálné vzorky prachu z technologie se musí experimentálně ověřit).

## **3.3 TECHNICKO-BEZPEČNOSTNÍ PARAMETRY PLYNŮ A KAPALIN**

**Teplota vzplanutí** hořlavé kapaliny je nejnižší teplota, při které se při přesně definovaných podmínkách zkoušky vytvoří nad hladinou takové množství par, že jejich směs se vzduchem přiblížením plamene vzplane a ihned uhasne.

### ***Účel stanovení***

je kritériem pro zařazení hořlavých kapalin do tříd nebezpečnosti podle ČSN 65 0201 (2003), z nichž vyplývají příslušná preventivní opatření.

**Tabulka 3-1: Třídění hořlavých kapalin**

Třída nebezpečnosti	Teplota vzplanutí [°C]
I	do 21 včetně
II	od 21 do 55 včetně
III	od 55 do 100 včetně
IV	více než 100 °C

**Ve smyslu tohoto třídění mohou výbušné směsi tvořit:**

- páry hořlavé kapaliny I. a II. třídy nebezpečnosti při normálních podmínkách,
- hořlavé kapaliny I. až IV. třídy nebezpečnosti jako disperze a mlhy při teplotách nižších než je jejich teplota vzplanutí,
- hořlavé kapaliny III. a IV. třídy při zahřátí na teplotu vzplanutí v uzavřených prostorách nebo jako disperze ve vzduchu i při normální teplotě.

**Teplota vznícení kapaliny** je nejnižší teplota horkého povrchu, při které se optimální směs par nebo plynů dané látky se vzduchem na předepsaném zařízení a při předepsaném pracovním postupu vznítí.

#### *Účel stanovení*

Kriterium pro zařazení látky do teplotních tříd podle ČSN 33 0371 (1983), za účelem správného provedení elektrických rozvodů v prostředí s nebezpečím výbuchu.

**Tabulka 3-2: Teplotní třídy podle ČSN 33 0371 (1983)**

Teplotní třída	Teplota vznícení [°C]	Příklady s uvedením teploty vznícení [°C]
T1	nad 450	acetón (535)
T2	nad 300 do 450	butanol (408)
T3	nad 200 do 300	n-heptan (215)
T4	nad 135 do 200	acetaldehyd (140)
T5	nad 100 do 135	sirouhlík (102)
T6	nad 85 do 100	ethylnitrit (90)

Teplota vznícení je významnou teplotou, která je nebezpečná pro vznícení směsí hořlavých plynů nebo par i od jiných zdrojů než jsou elektrické, např. zahřáté části strojů, tepelné výměníky a rozvody.

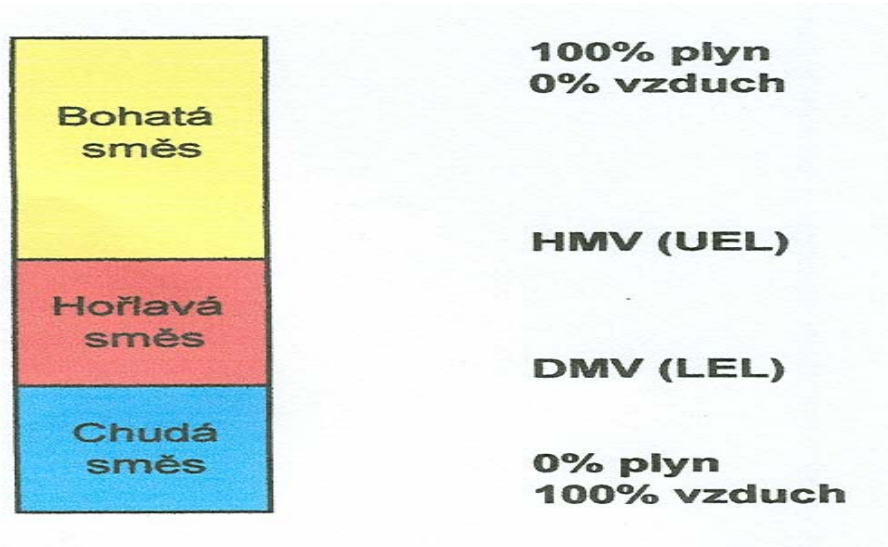
V literatuře uváděné hodnoty teploty vznícení se dosti často liší, je to způsobeno rozdílnou metodikou jejich stanovení.

Pro bezpečnostní účely je nejvhodnější použít nejnižší uváděné hodnoty.

### ***Meze výbušnosti plynů***

Z hlediska výbušnosti je důležitá jejich koncentrace ve směsi se vzduchem. Toto pásmo je pro každou látku specifické a je omezeno horní mezí, známou jako Horní mez výbušnosti (HMV, anglicky UEL) a spodní mezí, známou jako Dolní mez výbušnosti (DMV, anglicky LEL). Uvnitř tohoto pásma tvoří látka se vzduchem hořlavou (výbušnou) směs.

Meze výbušnosti a pásmo, ve kterém tvoří látka hořlavou směs, jsou naznačeny na obrázku.



**Obrázek 3-1: Příklad mezí výbušnosti**

### ***Uzavřené technologie***

V uzavřených objektech nebo neventilovaných prostorech může nastat situace, kdy koncentrace hořlavého plynu je trvale vyšší než horní mez výbušnosti. Při vstupu do takovýchto prostor (nádrže, zásobníky, atd.) dochází při otevření ke zředění této vysoké koncentrace okolním vzduchem a vzniká hořlavá směs.

## ***3.4 POŽÁRNĚ-TECHNICKÁ CHARAKTERISTIKA TUHÝCH LÁTEK***

Požárně-technická charakteristika tuhých látek obsahuje například tyto parametry:

- a) obsah popelu, vody, prchavé hořlaviny, fixního uhlíku,
- b) střední velikost zrna,
- c) sypná hustota,
- d) výhřevnost,
- e) teplota vznícení,
- f) spodní mez výbušnosti,
- g) max. výbuchový tlak,
- h) max. rychlost nárůstu tlaků,
- i) třída výbušnosti.

Jednotlivé technicko bezpečnostní parametry potřebuje znát uživatel jak z hlediska technologického procesu - např. výhřevnost, tak i z hlediska bezpečnosti - výbušnost, vzplanutí a vznícení a s tím souvisejících rizik při používání těchto paliv.

### ***Spodní mez výbušnosti***

- je definovaná jako nejnižší koncentrace směsi hořlavého prachu se vzduchem, při které je tato směs již výbušná.

#### *Účel stanovení*

Tato hodnota je velmi důležitá pro stanovení prostředí dle ČSN 33 2000-3 (1995) a ČSN EN 61241-17 (2006) a pro ochranu zařízení před nebezpečím výbuchu tím, že koncentrace hořlavého prachu ve vzduchu bude pod nebezpečnou koncentrací.

### ***Teplota vznícení rozvířeného prachu***

- je definována jako nejnižší teplota prostředí, při které dojde k samovolnému zapálení směsi plynných produktů rozkladu bez přítomnosti vnějšího zápalného zdroje.

#### *Účel stanovení*

Tato hodnota umožňuje posoudit možnost vznícení prachovzdušné směsi od horkých těles atd.

### ***Teplota vznícení usazeného prachu***

- je definována jako nejnižší teplota prostředí, při které dojde k samovolnému zapálení směsi plynných produktů rozkladu bez přítomnosti vnějšího zápalného zdroje.

### *Účel stanovení*

Tato hodnota umožňuje posoudit možnost vznícení usazené vrstvy prachu od horkých povrchů. Někdy je tato hodnota využívána pro stanovení teplotní třídy pro nevýbušná elektrická zařízení.

### ***Teplota žhnutí usazeného prachu***

- je definována jako nejnižší teplota prostředí, při které dojde k trvalému žhnutí prachu.

### *Účel stanovení*

Tato hodnota umožňuje určit nejnižší teplotu horkého povrchu, při kterém dojde k trvalému žhnutí prachu a tím i ke vzniku iniciačního zdroje případné prachovzdušné směsi. Tato hodnota rovněž umožňuje porovnání s teplotní třídou zařízení v nevýbušném provedení do prostředí s nebezpečím výbuchu hořlavých prachů.

### ***Teplota vzplanutí usazeného prachu***

- je definována jako nejnižší teplota prostředí, při které dojde působením vnějšího zápalného zdroje k zapálení směsi plyných produktů rozkladu.

### *Účel stanovení:*

Tato hodnota umožňuje určit nejnižší teplotu horkého povrchu, při které dojde přiblížením např. plamene k povrchu prachu k jeho vzplanutí.

## **3.4.1 Výbuchové parametry**

**Ukazatel výbuchu  $p_{max}$**  je maximální tlak pro velký rozsah koncentrací reagujících složek.

**Ukazatel výbuchu  $(dp/dt)_{max}$**  je maximální rychlost nárůstu tlaku v závislosti na čase určená zkouškami.

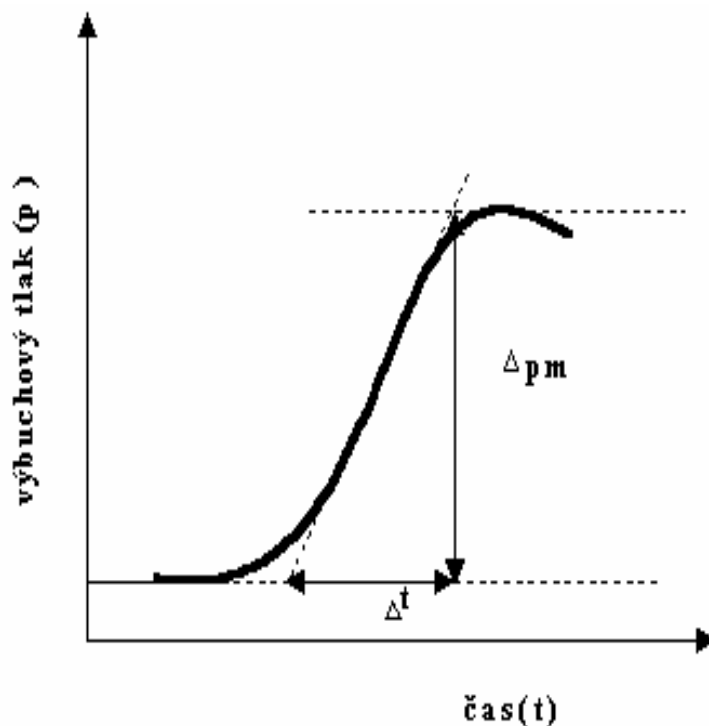
**Konstanta výbušnosti  $k$**  je konstanta určující maximální rychlost nárůstu tlaku v závislosti na čase při výbuchu v objemu  $V$ , určená podle rovnice (Kubický zákon)

$$K = \left( \frac{dp}{dt} \right)_{max} \times V^{\frac{1}{3}} \quad (3-1)$$

**Hodnota výbušnosti  $K_{max}$**  je maximální hodnota konstanty výbušnosti k určená zkouškami provedenými u velkého rozsahu koncentrací reagujících složek. Intenzita výbuchu se určí z hodnoty  $K_{max}$ .

*Účel stanovení:*

Hodnoty ukazatelů výbuchu (výbuchových parametrů) jsou nezbytné pro kvalifikovaný výpočet a návrh prvků protiexplozní ochrany (membrány, ventily).



**Obrázek 3-2: Časový průběh tlaku při explozi výbušné směsi v uzavřeném prostoru**

### ***Limitní obsah kyslíku***

- je nejvyšší koncentrace kyslíku, při které již není prachovzdušná směs schopna explozivní reakce.

*Účel stanovení*

Znalost tohoto parametru má velký význam pro ochranu zařízení, technologie před nebezpečím výbuchu pomocí inertního plynu ( $N_2$ ,  $CO_2$ , atd.).



### ***Minimální iniciační energie $E_{min}$***

- je energie jiskry, která je nutná pro zapálení prachovzdušné směsi. Stanovuje se pro celou řadu koncentrací prachu ve vzduchu.

#### *Účel stanovení*

Znalost této veličiny umožňuje vyloučit případný zdroj iniciace. Tento údaj je v praxi využíván zejména pro ochranu zařízení před elektrostatickými výboji. Pro prachovzdušné systémy se  $E_{min}$  pohybuje řádově v joulech.

### ***Stanovení náchylnosti k samovznícení***

Tato zkouška vypovídá o sklonech práškových materiálů se samovzněcovat při skladování.

#### *Účel stanovení*

Stanovení indukční doby, kdy dojde za určitých podmínek k samovznícení práškové hmoty. Zařazení materiálů do tříd pro dopravu dle předpisů RID/ADR.

## **3.4.2 Podstata výbušnosti hořlavých prachů**

Stupeň rozmělnění pevné látky má podstatný vliv na požární nebezpečí látky. Snižuje teplotu vznícení, a tak se může stát, že látka v kompaktním stavu, za normálních podmínek nehořlavá, ve formě prachu velice dobře hoří a vybuchuje. Lze říci, že ve formě prachu hoří téměř všechny látky s výjimkou čistě anorganických, jako je dolomit, vápenec a oxidy a soli kovů.

Ze samostatných prvků jsou nebezpečné prachy kovů jako hliník, který má největší rychlost narůstání tlaku a jednu z nejvyšších hodnot maximálního výbuchového tlaku, dále hořčík, případně titan, zirkon, železo a další.

Z nekovových prachů je nebezpečný prach síry, který má nízkou teplotu vznícení a sklon k tvorbě elektrostatických nábojů. Uhelny prach je nebezpečný výbuchem hlavně v dolech, výbušnost závisí na kvalitě uhlí a výbuch uhelného prachu bývá většinou následný po výbuchu metanu, který rozvíří uhelný prach a iniciuje ho. Samozřejmě rozvířený uhelný prach je výbušný i v jiných uzavřených technologiích.

Řada přírodních výbušných prachů je skoro neomezená. Veškeré organické prachy jsou výbušné, ať už vznikají jako nežádoucí produkt při zpracování nebo jsou hlavním produktem výroby. Je to senný a obilní prach, škroby a mouky,

cukr, kakao, čaj, koření, tabák, kávoviny, sušené mléko, dřevěný a korkový prach, prachy vláknitých látek – lnu, bavlny, buničiny, koudelce, konopí, juty. Jsou velmi náchylné k tvorbě elektrostatického náboje a mají nízké dolní meze výbušnosti. Patří sem i prachy vyráběných látek jako jsou mýdlové prášky, barviva, léčiva, výbušiny, tuhé uhlovodíky, plasty aj.

Výbuchy prachů jsou známy více než 200 let. Jejich výskyt je spojen s mletím obilí. Od samého počátku mletí obilí na mouku ve větrných mlýnech docházelo k výbuchům přímo v mlecích stolicích, dopravnících a silech. Dále pak v továrnách na výrobu škrobu, v rafineriích cukru a v zařízeních, v nichž se zpracovával hliník, čokoláda, papír, guma nebo koření.

Mylný dojem, že zařízení zpracovávající prach není nebezpečné, pokud mnoho let nedošlo k výbuchu, byl už mnohokrát vyvrácen. Skutečnost, že asi jedna třetina výbuchů prachů je spojena s lidským selháním, lehkovážností, nedbalostí nebo lhostejností, předurčuje odbornou veřejnost ke stálému vysvětlování této problematiky.

### 3.4.3 Výbušnost hořlavého prachu ovlivňují zejména tyto faktory

- a) **Jemnost prachu** se udává velikostí prachových zrn. Čím je prach jemnější, tím vyšší je maximální výbuchový tlak a maximální rychlost narůstání výbuchového tlaku (brizance), a tím menší iniciační energie stačí k iniciaci prachovzdušné směsi. Částice o průměru větším než 0,5 mm již obecně nereagují výbušně.
- b) **Množství rozvířeného prachu** – dolní mez výbušnosti ( $\text{g/cm}^3$ ), se zvyšující se koncentrací prachu roste výbuchový tlak a brizance výbuchu.
- c) **Koncentrace kyslíku v prostoru** – větší koncentrace kyslíku znamená větší prudkost výbuchu. Při poklesu obsahu kyslíku pod “limitní obsah” již nemůže k výbuchu dojít.
- d) **Tlak v okamžiku iniciace (pracovní tlak)** – s rostoucím tlakem se zvyšuje výbuchový tlak a brizance výbuchu.
- e) **Teplota směsi v okamžiku iniciace (pracovní teplota)** – výbuchový tlak s teplotou klesá (zředění vzduchu). Rychlost narůstání výbuchového tlaku se mění jenom nepatrně. Snižuje se však spodní mez výbušnosti, minimální iniciační energie a limitní obsah kyslíku.
- f) **Vlhkost prachu** – významné snížení výbušnosti nastává až při poměrně vysokém obsahu vody.
- g) **Příměsí inertních tuhých látek** – významné snížení výbušnosti nastává až při poměrně vysokém obsahu inertních příměsí. k dosažení nevýbušnosti je někdy třeba až 80 hmotnostních procent příměsí inertních prachů.
- h) **Stav pohybu směsi (turbulence)** – s rostoucí turbulencí se výbušnost zvyšuje, zejména podstatně roste brizance.

- i) **Velikost objemu nádoby (kubický zákon)** – kubická nádoba je taková, kdy délka (výška) nádoby je menší než dvojnásobek jejího průměru. u kubických nádob platí, že s rostoucím objemem se rychlost narůstání výbuchového tlaku snižuje.
- j) **Tvar nádoby (výrobního zařízení)** – v kubických nádobách je dosahováno tlaků až 1,3 MPa a rychlostí šíření plamene do 500 m/s. v podlouhlých nádobách a v potrubí se může rychlost šíření čela plamene zvýšit až na detonační rychlost 2 000 m/s s radiálními tlaky až 3 MPa a osovými tlaky až 10 MPa.
- k) **Uspořádání nádob** – výbuch v jednotlivé nádobě se chová jinak, než v případě, kdy jsou dvě nádoby spojeny potrubím (což se v praxi často vyskytuje). Při spojení se podstatně zvyšují výbuchové parametry.
- l) **Vytvoření hybridní směsi** – prašná koncentrace za současného výskytu hořlavého plynu nebo páry hořlavé kapaliny. Hybridní směsi se mohou vyskytnout například při zvýšení teploty prachu a tím vývinu rozkladných plynů nebo při vývinu vodíku z vlhkých kovových prachů. Hybridní směsi zvyšují výbušnost prachů (pod dolní mez výbušnosti jednotlivých komponentů směsi).
- m) **Větrání** – větráním je možno ovlivnit množství plynů a par v prostoru a tím zabránit vytváření hybridní směsi.

### 3.4.4 Nebezpečné zóny výbušné koncentrace v návaznosti na ČSN EN 61241-10

**Zóna 20** – zahrnuje místa, kde se nebezpečné množství výbušné směsi prachu se vzduchem vyskytuje často nebo dlouhodobě (nejvíce nebezpečná zóna). Jedná se obvykle o vnitřní prostory zařízení (mlýnské stolice, míchací zařízení, sušárny, dopravní vedení, odlučovače, odsávací zařízení, sila atd.) v nichž se mohou často nebo dlouhodobě vytvářet výbušné směsi.

**Zóna 21** – zahrnuje místa (uvnitř nebo vně zařízení), kde je nutno počítat s tím, že se při normálním provozu rozvířením usazeného prachu krátkodobě vytváří nebezpečné množství výbušné směsi. Sem patří obvykle prostory v okolí zařízení, v němž se pracuje s prachem. Prach uniká netěsnostmi nebo nedokonalou manipulací.

**Zóna 22** – zahrnuje místa uvnitř nebo vně zařízení, kde je nepravděpodobné, že se při normálním provozu vytvoří výbušná směs. Vytvoří-li se výjimečně při normálním provozu výbušná směs, pak jen po krátkou dobu. Sem patří prostory, kde usazené vrstvy mohou způsobit vznik výbušné koncentrace při jejich náhodném rozvíření nebo prostory, které nejsou zařazeny do zóny 21 nebo prostory, které navazují na zónu 21.

Lze-li zařízení nebo okolí zařízení označit jako zónu 20, 21 nebo 22, je nutno navrhnout vhodná preventivní opatření.

***Opatření, která omezí vytváření nebezpečných množství výbušné směsi:***

- a) Odstranění nebo náhrada hořlavých látek méně hořlavými – náhrada hořlavých práškových plniv nehořlavými plnivými,
- b) Částečná nebo úplná inertizace – vyplnění prostoru inertními plyny (N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, vzácné plyny), vodní párou, inertními prachy,
- c) Omezení vytváření výbušného prostředí v okolí zařízení – odsávací zařízení zabezpečené proti výbuchu.

***Opatření, která omezí iniciaci:***

Zcela vyloučit iniciační zdroje zapálení rozvířeného prachu v zóně 20, v zóně 21 vyloučit iniciační zdroje vzniklé v důsledku zřídka se vyskytujících provozních poruch a v zóně 22 vyloučit iniciační zdroje, které se mohou vyskytnout za normálních pracovních podmínek.

Příklady iniciačních zdrojů výbušnosti prachů: horké povrchy, horké prostředí, samovznícení, elektrostatický náboj.

***Konstrukční opatření, která omezí účinky výbuchu na únosnou míru:***

- a) Konstrukce odolné výbuchovému tlaku (konstruované na tlak při výbuchu).
- b) Konstrukce odolné výbuchovému rázu (jsou přípustné plastické deformace při výbuchu).
- c) Odlehčení výbuchu (při výbuchu se otevře původně uzavřený prostor – membrány, klapky, ventily, odlehčovací komíny).
- d) Potlačení výbuchu (detekce výbuchu v počátku a uhašení hasivem, samozhášecí zařízení).
- e) Protiprůšlehová zařízení (k zabránění šíření výbuchu – ventily, šoupátka, klapky, rotační podavače a automatické rychlouzavírací ventily).

### **3.4.5 Základní povinnosti provozovatele prašných technologií**

- a) Provozovatel je povinen znát vlastnosti prachů vyskytujících se v provozovaných technologiích a mít protokol o zkouškách vlastností prachů provedených a potvrzených státem autorizovanou zkušebnou.
- b) V prostředí s nebezpečím požáru a výbuchu musí být vypracována a realizována vhodná požární a protivýbuchová preventivní opatření.

- c) Provozovatel je povinen mít určeno prostředí (zóny) u všech provozovaných technologií.
- d) Provozovatel je povinen písemně vypracovat pro pracoviště ohrožená výbuchem prachu provozně bezpečnostní předpisy pro zařízení a prostory, kde musí být zahrnuty mj. také požadavky technických podmínek výrobce protivýbuchových ochranných prvků.
- e) Provozovatel je povinen zajistit poučení zaměstnanců o možném nebezpečí výbuchu a o zvolených ochranných opatřeních. Poučení je nutno opakovat každým rokem.
- f) Provozovatel je povinen mít doklady ke všem ochranným prvkům protivýbuchové ochrany a o tom, že tyto prvky byly schváleny příslušnou státem autorizovanou zkušebnou.
- g) Provozovatel je povinen znát bezpečné lhůty skladování práškových materiálů.

Výbušnost hořlavých prachů nehrozí (dle statistiky) v takovém měřítku, přesto však jsou provozy, kde hrozí především možnost vzniku a rychlého šíření požáru z důvodů vyššího výskytu usazeného prachu, a potom se jedná zejména o uzavřené prašné technologie s možností výbuchu.

Základní prašnou technologií je odsávání dřevěných pilin a prachu z truhláren a jim podobným provozům (modelárny apod.). Mnohdy od celé řady strojů a zařízení je instalováno centrální odsávání poměrně dlouhým potrubím do cyklonu, případně sila. v podstatě nikde se nesetkáváme se zařízením, ale ani s povědomím managementu k protivýbuchové ochraně – až na několik výjimek, a to vždy tam, kde k výbuchu již v minulosti došlo.

Další rozšířenou prašnou technologií jsou mlýny a zpracování moučných a práškovitých surovin a výrobků v potravinářství a zemědělství. Zde je technologie obdobná, hrozí nebezpečí výbuchu jak uvnitř zařízení, tak v celém systému odsávání. Zde je však povědomí rizika výbuchu známější a výskyt protivýbuchových opatření a zařízení je rozšířenější (odhaduji na 10 % těchto provozů).

Obdobnou problematikou s možností výbuchu jsou textilní podniky a výroby plastů, kde opět protivýbuchová zařízení najdeme jen ojediněle.

Lepší situace je v podnicích pracujících s technologií uhelného prachu. Zde se setkáváme s řešením od nejjednodušších skrápěcích zařízení až po protivýbuchové automatické zhašecí zařízení. Rovněž tak některé strojírenské podniky zpracovávající lehké kovy, kde prachy kovů jsou též výbušné, s možností výbuchu počítají a jsou vesměs zabezpečeny.

### 3.5 ZJIŠŤOVÁNÍ VÝBUCHOVÉ ODOLNOSTI KONSTRUKČNÍCH PRVKŮ VÝBUchem

Současný rozvoj techniky a zrychlující se růst průmyslové výroby vyvolává stále vyšší požadavky na úroveň bezpečnosti nejen u nových zařízení, ale také na zlepšení stavu bezpečnosti stávajících zařízení. Mimo jiné je rovněž významné zabývat se otázkou případného snížení škod a ztrát ve výrobě, ekonomikou nákladů na vybavení konstrukčních a stavebních detailů vyšších pevnostních parametrů v prostorech ohrožených výbuchem.

V případě, že aktivní prevenci (vyloučení vzniku výbuchových přeměn) není možné nebo je technicky obtížné realizovat, je nutno zvolit účinnou pasivní prevenci použitím vhodných protivýbuchových a protipožárních prvků navržených pro konkrétní danou stavbu či technologii vždy na základě návrhu specializované instituce v oblasti řešení problematik protivýbuchové prevence.

U technologií nebo zařízení s výskytem nebezpečí výbuchu, kde jsou aplikovány prvky protivýbuchové ochrany, musí být tyto ověřeny na požadovanou odolnost proti výbuchovému tlaku nebo tlakovému rázu. Rozumíme tím, že zařízení jsou konstrukčně řešena tak, že v případě výbuchu nedojde k jejich destrukci. Již při zpracování projektové dokumentace je nutno se rozhodnout, zda zařízení či konstrukční systémy budou dimenzovány na odolnost proti působení maximálního výbuchového tlaku ( $p_{max}$ ) nebo redukovaného tlaku ( $p_{red}$ ).

Pro aplikaci pasivní prevence je proto nutno řešit komplexní návrh protivýbuchového zabezpečení s ohledem na platnou legislativu, normy, předpisy a poslední stav techniky. Nutno zdůraznit, že lze v praxi použít jen takové ochranné prvky a komplexní zařízení, která byla odzkoušena a schválena v akreditovaných zkušebních laboratořích.

#### 3.5.1 Zkoušky zařízení

Zkouška může být prováděna jako hydrostatická nebo pneumatická tlaková zkouška nebo alternativně jako zkouška výbuchem. Zařízení musí být zkoušeno tlakem definovaným dle níže uvedené rovnice s použitím jedné z hodnot  $F$  dle tab. 3-3.

Zkušební tlak se stanoví:

$$p_t = F \cdot \frac{R_{p0,2}(20^\circ\text{C})}{R_{p0,2}(\delta)} \cdot p, \quad (3-2)$$

kde

$\delta$  je konstrukční teplota ve  $^\circ\text{C}$ ,

$p_t$  je zkušební tlak v kPa,  
 $F$  je koeficient definovaný dle tab. 3-3,  
 $R_{p0,2}$  je minimální garantovaná mez kluzu v  $\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$  dle EN 10002-1,  
 $p$  je konstrukční tlak v kPa.

Poměr  $R_{p0,2}(20^\circ\text{C})$  a  $R_{p0,2}(\delta)$  se může brát roven 1, pokud není rozdíl mezi zkušební teplotou a konstrukční teplotou větší než 100 K pro ocel nebo 50 K pro hliník.

Je-li použita zkouška výbuchem, musí být dosažený výbuchový tlak roven alespoň požadovanému zkušebnímu tlaku.

Tlaková zkouška konstrukcí odolných výbuchovému rázu při výbuchu musí být prováděna při zkušebním tlaku vypočteném dle rovnice (3-1) s dosažením hodnot dle tabulky 1 po dobu nejméně 3 minut.

Zkouška výbuchem musí být prováděna s výbušnou atmosférou, pro kterou má být zařízení použito nebo se zkušební atmosférou, která má podobné vlastnosti ve vztahu k bezpečnosti (maximální výbuchový tlak, maximální rychlost nárůstu výbuchového tlaku). Výbuchový tlak musí být zaznamenán systémem pro měření tlaku (mezní frekvence  $\geq 100$  kHz). Výsledný maximální výbuchový tlak musí dosáhnout alespoň hodnoty definované v tab. 3, sloupci C. Po zkoušce může dojít k trvalým deformacím, nesmí však dojít k žádnému roztržení.

**Tabulka 3-3: Hodnoty koeficientu F**

	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>
	<b>Tlaková zkouška (kusová zkouška) Nejsou dovoleny žádné trvalé deformace</b>	<b>Tlaková zkouška (typová zkouška) Trvalé deformace jsou dovoleny</b>	<b>Zkouška výbuchem (typová zkouška)</b>
Materiály definované v poznámce 1	0,9	1,1	1,1 (deformace povoleny)
Křehké materiály (litina, slitiny hliníku)	2,0	nepoužitelné	2,0 (deformace nepovoleny)
Ocelolitina	1,3	nepoužitelné	1,3 (deformace nepovoleny)

Poznámka 1: Jmenovité konstrukční zatížení pro konstrukční podmínky dle EN 13445-3 může být u materiálů s dostatečnou tažností násobeno koeficientem 1,5. Těmito materiály jsou:

ocel, ocelolitina, litina s kuličkovým grafitem s protažením při přetržení  $\geq 14\%$  a energií při rázové vrubové zkoušce  $\geq 27\text{ J}$ , hliník s protažením při přetržení  $\geq 20\%$ .

Poznámka 2: Smí být použity pouze materiály dovolené podle EN 13455-2, které splňují mechanické, tepelné a chemické požadavky na konstrukci a provoz zařízení.

### **3.5.1.1 Odolnost oken a dveří proti výbuchu zkoušená na rázové trubici**

Pro možnost klasifikace odolnosti oken a dveří společně s jejich výplněmi proti výbuchu byly vypracovány zkušební postupy, které přesně definují způsoby hodnocení experimentálních měření. Detonací nálože TNT jsou generovány vzdušné rázové vlny v rázové trubici či v obdobném zařízení (pokusná štola), které při 1-D šíření mají charakter rovinné vlny a působí na zkoušené konstrukční prvky s odstupem 35 – 50 m.

Zkušební metodika je zaměřena pouze na sledování zkoušených prvků včetně výplní, rámu a upevnění a nevztahuje se na sledování okolních zdí nebo konstrukce budovy a dále odolat přímým nebo přeneseným silám.

Pro dosažení objektivních a reprodukovatelných výsledků musí být zkušební prvek upevněn v pevném rámu nebo konstrukci upevněné k rázové trubici. Dále musí:

- a) být dostatečně odolný rám, aby jeho případné deformace nebyly přenášeny na zkušební vzorek,
- b) být zkušební vzorek upevněn tak, aby představoval jeho stavební podmínky bez vynucení přídavných napětí,
- c) být zabráněno průchodu výbuchového tlaku na odvrácenou stranu zkušebního vzorku jinak než jeho případnou deformací,
- d) být zajištěna registrace dopadajícího výbuchového tlaku nejméně dvěma snímači.

Na základě vyhodnocení experimentálních měření dle EN 13123-1 (2002) lze zařadit zkoušené prvky do klasifikační úrovně odolnosti proti výbuchovému tlaku dle tab. 3-4.



**Tabulka 3-4: Intenzitní parametry výbuchové vlny**

Klasifikační kód	Maximální tlak $p_{max}$ [bar]	Kladný specifický impuls $i_+$ [bar.ms]
EPR1	0,5	3,7
EPR2	1,0	9
EPR3	1,5	15
EPR4	2,0	22
Nad limitem pro EPR4		
	2,5	32

Ve všech případech experimentálních měření nesmí být doba trvání kladné fáze ( $i_+$ ) menší než 20 ms.

V praxi se setkáváme s celou řadou případů, kdy různé typy speciálních dveří (průlezů) odolných proti výbuchu s ohledem na jejich užití nelze zařadit dle tabulky 3-4 do patřičných klasifikačních kódů. Vyskytují se totiž požadavky, aby tyto zvláštní typy dveří odolaly nejen vyšším výbuchovým tlakům, ale také aby kladný specifický impuls byl zvětšen prodloužením působení přetlakové fáze výbuchu. v těchto případech je nutno zatěžovat zkoušené prvky plynnými výbušnými systémy, u nichž lze změnou koncentrace, množstvím plynného média, variabilitou a mohutností iniciačního systému dosáhnout výbušné přeměny v požadovaných intenzitních parametrech.

Výjimečné nároky na výbuchuvzdornost dveří jsou požadovány v hlubinných uhelných dolech, kde vzniká nebezpečí výbuchu metanu a uhelného prachu. Proto všechny typy dveří a hrázových těles, v nichž jsou dveře zakotveny, jsou zkoušeny v pokusné štole VVUÚ, a.s. ve Štramberku dle metodik schválených Českým báňským úřadem v Praze. Přesně definovaný a situovaný výbušný systém metanovzdušné směsi a uhelného prachu je tzv. plošnou iniciační bleskovice uveden do výbušné přeměny a takto vygenerovaná rázová vlna dosahuje hodnotu 1,0 - 1,15 MPa na zkoušeném zařízení.

Obecně lze konstatovat, že je možno namodelovat jakýkoliv výbušný systém požadovaných intenzivních výbuchových parametrů pro odzkoušení různých typů a konstrukčních prvků protivýbuchových ochran.

### **3.5.1.2 Odolnost oken a dveří proti výbuchu zkoušených na volném prostranství**

Navržený zkušební postup umožňuje klasifikaci odolnosti proti výbuchu u dveří a oken společně s jejich výplněmi. Pro dosažení jednotlivých tříd odolnosti musí zkušební vzorek:

- a) být podroben působení výbuchové vlně generované detonací konkrétní nálože a v definovaném odstupu,
- b) nevykazovat poškození uzamykacích mechanismů a perforaci či vyražení části rámu.

Zařazení zkoušeného vzorku do tříd se řídí parametry dle tab. 3-5.

**Tabulka 3-5: Třídy odolnosti zkoušených vzorků**

<b>Třída</b>	<b>Maximální tlak <math>p_{max}</math> [bar]</b>	<b>Kladný specifický impuls <math>i_+</math> [bar.ms]</b>
EXR1	0,75	1,05
EXR2	2,30	1,65
EXR3	1,70	2,25
EXR4	3,60	3,00
EXR5	6,30	4,20

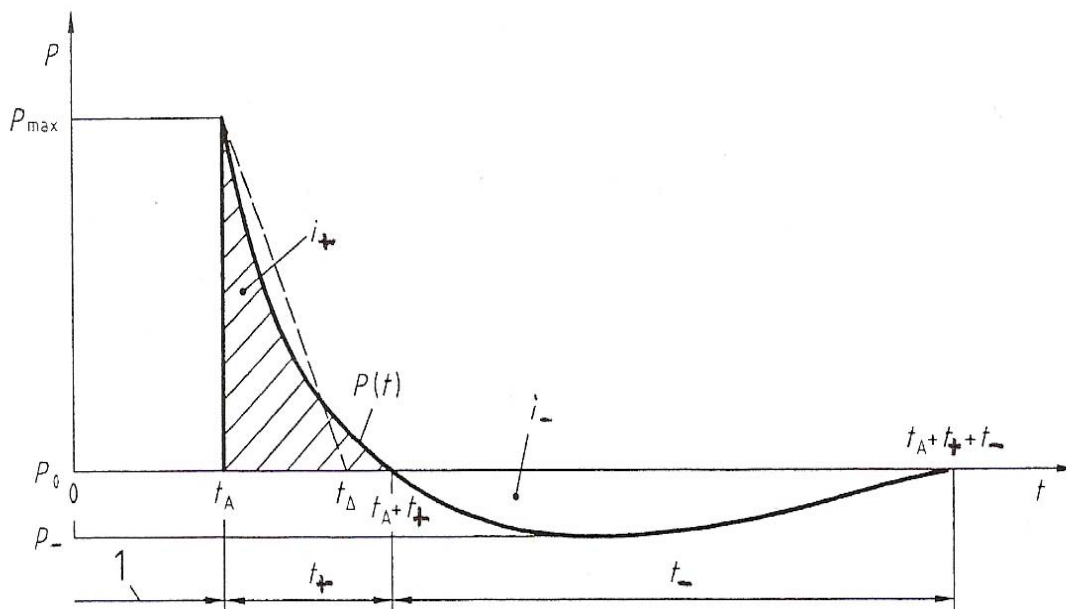
Na základě rozsáhlých experimentálních měření byly stanoveny hmotnosti náloží a jejich vzdálenosti od zkoušeného prvku, aby bylo dosaženo časového průběhu tlaku, jak je idealizovaně znázorněno na následujícím obr. 3-3 dle EN 13124-2 (2004).

Požadovaný výbuchový tlak dopadající na zkoušený předmět je vyvolán detonací TNT nálože přesně definované hmotnosti a stanoveného odstupu. Nálože proměnlivých hmotností (3, 12, 20 kg) jsou tvarovány do tvaru koule

**Tabulka 3-6: Klasifikace, hmotnost nálože, odstup a výška nálože**

<b>Třída</b>	<b>Hmotnost nálože [kg]</b>	<b>Odstup [m]</b>	<b>Výška nálože nad povrchem [mm]</b>
EXR1	3	5	500±50
EXR2	3	3	500±50
EXR3	12	5,5	800±50
EXR4	12	4	800±50
EXR5	20	4	800±50

Třídy EXR1 až EXR5 jsou v pořadí vzrůstající odolnosti proti výbuchu. Splňuje-li okno nebo dveře konkrétní třídu, automaticky splňuje všechny nižší třídy.



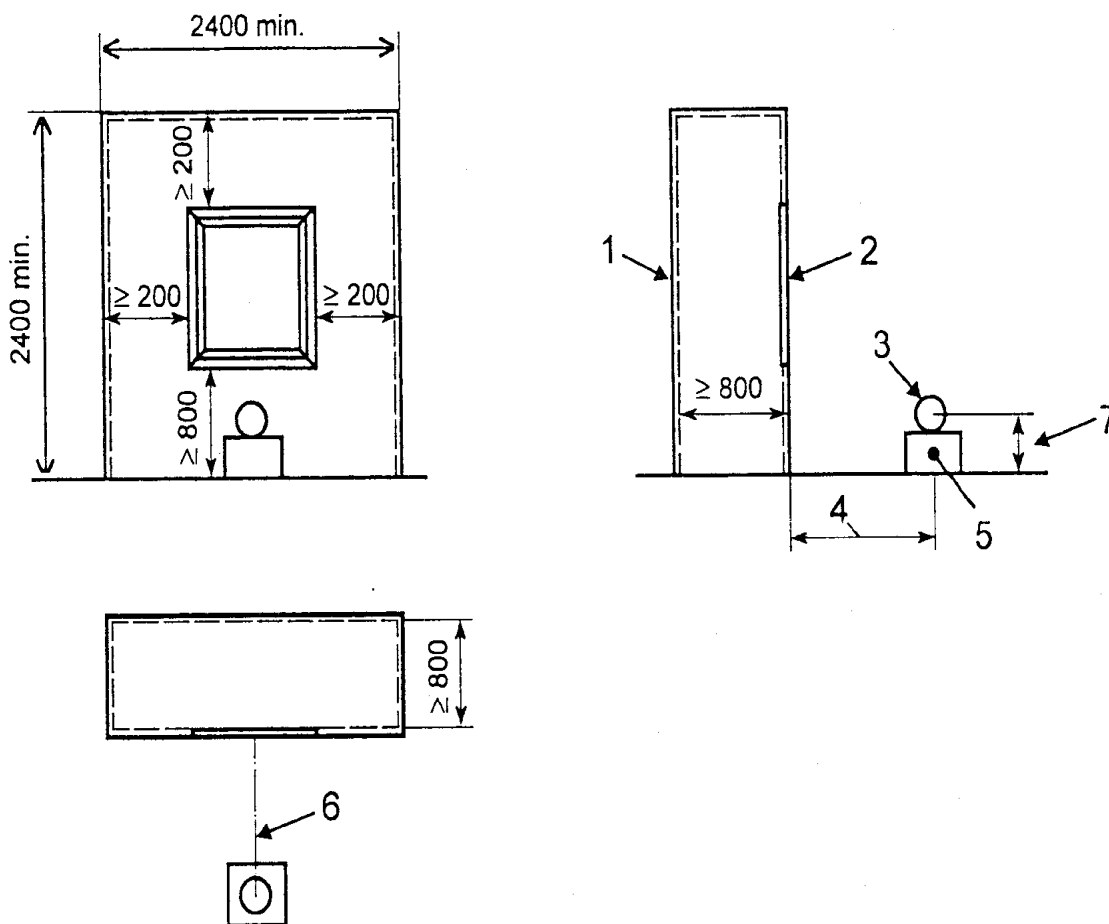
#### Legenda

- $P$  Tlak
- $P_0$  Okolní tlak
- $i_+$  Kladný specifický impuls
- $i_-$  Záporný specifický impuls
- 1 Čas periody dosažení
- $t_+$  Kladná fáze doby trvání
- $t_-$  Záporná fáze doby trvání
- $t$  Čas
- $t_A$  Doba dosažení

### Obrázek 3-3: Idealizovaný časový průběh tlaku pro tlakovou vlnu

Podpěra nálože musí být taková, aby nevytvářela úlomky, které by mohly nepříznivě narážet na zkušební vzorek. Nálože mohou být umístěny na bloku pěnového materiálu nebo zavěšené z visuté podpěry (obr. 3-4).

Konstrukční prvky, odzkoušené podle výše popsaných norem, jsou zařazeny do příslušných tříd odolnosti proti výbuchu.



#### Legenda

- 1 Podpření zkušební vzorku s uzavřenou zadní stranou
- 2 Zkušební vzorek okna
- 3 Specifikovaná nálož
- 4 Odstup
- 5 Podpěra nálože
- 6 Osa zkušební vzorku
- 7 Výška středu nálože

Rozměry jsou udávány v mm.

**Obrázek 3-4: Okenní prvek – zkušební uspořádání**

**Tabulka 3-7: Normy související s danou problematikou**

ČSN EN 13673-1	Stanovení maximálního výbuchového tlaku a maximální rychlosti nárůstu výbuchového tlaku plynů a par – Část 1: Stanovení maximálního výbuchového tlaku. ČNI Praha 2004
ČSN EN 13673-2	Stanovení maximálního výbuchového tlaku a maximální rychlosti nárůstu výbuchového tlaku plynů a par – Část 2: Stanovení maximální rychlosti nárůstu výbuchového tlaku. ČNI Praha 2006
ČSN EN 14756	Stanovení mezní koncentrace kyslíku (LOC) pro hořlavé plyny a páry. ČNI Praha 2007
ČSN EN 14034-1	Stanovení výbuchových charakteristik rozvířeného prachu – Část 1: Stanovení maximálního výbuchového tlaku $p_{max}$ rozvířeného prachu. ČNI Praha 2005
ČSN EN 14034-2	Stanovení výbuchových charakteristik rozvířeného prachu – Část 2: Stanovení maximální rychlosti nárůstu výbuchového tlaku $(dp/dt)_{max}$ rozvířeného prachu. ČNI Praha 2007
ČSN EN 14034-3	Stanovení výbuchových charakteristik rozvířeného prachu – Část 3: Stanovení dolní meze výbušnosti LEL rozvířeného prachu. ČNI Praha 2007
ČSN EN 13237	Prostředí s nebezpečím výbuchu – Termíny a definice pro zařízení a ochranné systémy určené pro použití v prostředí s nebezpečím výbuchu. ČNI Praha 2004
ČSN EN 13123-1	Okna, dveře a okenice – Odolnost proti výbuchu – Požadavky a klasifikace – část 1: Rázová trubice. ČNI Praha 2002
ČSN EN 13123-2	Okna, dveře a okenice – Odolnost proti výbuchu – Požadavky a klasifikace – Část 2: Zkouška na volném prostranství. ČNI Praha 2004
ČSN EN 13124-1	Okna, dveře a okenice – Odolnost proti výbuchu – Zkušební metoda – Část 1: Rázová trubice. ČNI Praha 2002
ČSN EN 13124-2	Okna, dveře a okenice – Odolnost proti výbuchu – Zkušební metoda – Část 2: Zkouška na volném prostranství. ČNI Praha 2004
ČSN EN 13541	Sklo ve stavebnictví – Bezpečnost zasklení – Zkoušení a klasifikace odolnosti proti výbuchovému tlaku. ČNI Praha 2001
ČSN EN 1063	Sklo ve stavebnictví – Bezpečnost zasklení – Zkoušení a klasifikace odolnosti proti střelám. ČNI Praha 2000
ČSN EN 13463-1	Neelektrická zařízení pro prostředí s nebezpečím výbuchu – Část 1: Základní metody a požadavky. ČNI Praha 2002
ČSN ISO 6184-1	Systémy ochrany proti výbuchu. Část 1: Určování ukazatelů výbuchu hořlavých prachů ve vzduchu. ČNI Praha 1993
ČSN ISO 6184-2	Systémy ochrany proti výbuchu. Část 2: Určování ukazatelů výbuchu hořlavých plynů ve vzduchu. ČNI Praha 1993
ČSN ISO 6184-3	Systémy ochrany proti výbuchu. Část 3: Určování ukazatelů výbuchu směsí palivo/vzduch, jiných než jsou směsi prach/vzduch a plyn/vzduch. ČNI Praha 1993
ČSN ISO 6184-4	Systémy ochrany proti výbuchu. Část 4: Určování účinnosti systémů na potlačování výbuchu. ČNI Praha 1993

## 4 ANALÝZA ODEZVY STAVEBNÍ KONSTRUKCE

### 4.1 POHYBOVÉ ROVNICE

Předpokládejme, že konstrukce je dynamicky zatížena, v našem případě výbuchem. Dynamickým zatížením rozumíme v čase proměnný průběh zatížení  $F(t)$ , při němž časová změna zatížení je zpravidla v řádu sekund nebo zlomků sekund (Koloušek, 1967). Jiná definice časové proměny zatížení vychází z porovnání časové změny zatížení  $F(t)$  s vlastními periodami konstrukce  $T_{(i)}$  (pro nejnižší vlastní frekvence  $f_{(i)} = 1 / T_{(i)}$ ) - jedná se tedy o srovnatelné proměny zatížení s velikostí zpravidla nejnižší vlastní periody  $T_{(1)}$ , nebo jejích zlomků.

Řídící rovnice problému jsou odvozeny z rovnic rovnováhy v příslušném možném směru pohybu (výchyly nebo natočení), označovaném jako stupeň volnosti:

$$F_I(t) + F_D(t) + F_E(t) = F(t) \quad (4-1)$$

Jestliže řešením této rovnice rovnováhy je časová změna výchylky  $y(t)$ , pak

setrvačné síly  $F_I(t) = m \cdot y''(t)$  tedy součin hmoty  $m$  a zrychlení kmitání  $y''(t)$  - z 2. Newtonova zákona,

síly tlumení  $F_D(t) = C \cdot y'(t)$  zpravidla formulované jako součin konstanty tlumení  $C$  a rychlosti kmitání  $y'(t)$ ,

pružné síly  $F_E(t) = k \cdot y(t)$  jako součin tuhosti konstrukce  $k$  a výchylky kmitání  $y(t)$ .

Přepsané rovnice rovnováhy pro jednotlivé možné pohyby (a pootočení) v jednotlivých směrech nebo okolo souřadných os (natočení) se nazývají pohybové rovnice soustavy:

$$\mathbf{M} \cdot y'' + \mathbf{C} \cdot y' + \mathbf{k} \cdot y = \mathbf{F} \quad (4-2)$$

Kde  $\mathbf{M}$ ,  $\mathbf{C}$  a  $\mathbf{k}$  jsou matice hmotnosti, tlumení a tuhosti soustavy,  $y''$ ,  $y'$ ,  $y$  jsou vektory zrychlení, rychlosti a výchylky kmitání a  $\mathbf{F}$  je vektor pravých stran (zatížení jednotlivých částí - bodů konstrukce).

### 4.1.1 Hmotnost konstrukce

Členy matice hmotnosti  $\mathbf{M}$  po diskretizaci soustavy jsou tvořeny hmotnostmi posouvajících se hmotných bodů a hmotnými momenty setrvačnosti otáčejících se hmotných 1-D, 2-D nebo 3-D prvků konstrukce. Jednotlivé členy  $m_{ij}$  matice hmotnosti lze stanovit jako síly, momenty v bodě  $i$ , odpovídající jednotkovému zrychlení  $y''$  v bodě  $j$ .

Sestavení matice hmotnosti výpočtovými programy je zpravidla bezproblémové a při numerických řešeních při využití programových vybavení se používá zpravidla konzistentní (plná) matice hmotnosti; jedná se tedy o matici hmotnosti, která má obecně nenulové členy i na mimodiagonálních pozicích. Jistým zjednodušením, zpravidla pro provádění výpočtů „ručně“ nebo malých soustav nebo s omezeným počtem stupňů volnosti, se používá pouze diagonální matice s nulovými členy na mimodiagonálních pozicích. To znamená, že setrvačné síly v  $i$ -tém bodě soustavy od zatížení působícího na tento bod nevyvolávají setrvačnou odezvu ostatních bodů. Použití pouze diagonální matice je významné zjednodušení problému, které vlastně vylučuje setrvačné vazby mezi jednotlivými možnými pohyby hmotných bodů diskretizované soustavy.

Pokud se na diagonále matice hmotnosti  $\mathbf{M}$  vyskytnou nulové členy, soustava se rozpadá do dvou nebo více soustav (podle počtu nulových diagonálních členů). i zde se tedy nabízí možnost zjednodušení celé soustavy do několika soustav, pokud členy na diagonále matice jsou malé (blíží se nule). Typickým případem může být rozložení kmitání konstrukce na podloží do dvou úloh a to úloha 1: kmitání samotné vlastní konstrukce na nepoddajném podloží a úloha 2: kmitání tuhé konstrukce na poddajném podloží.

### 4.1.2 Tlumení

Velikost tlumení, kterou zavádíme do výpočtového modelu konstrukce je velmi významná veličina, která může vypočtené veličiny odezvy (výchylku, rychlost a zrychlení vynuceného kmitání) ovlivnit i řádově, zejména v případě, že odezva konstrukce je v blízkosti rezonanční frekvence. Obvykle předpokládáme, že tlumení je úměrné rychlosti kmitání, toto tlumení označujeme jako viskózní. Zpravidla většina výpočtových programů umožňuje zavést do výpočtu viskózní tlumení, které je také vhodným přiblížením jiných předpokladů o tlumení (např. hysteretického tlumení, které je úměrné výchylce kmitání).

Pro stanovení úrovně viskózního tlumení je výhodné vycházet z charakteristik naměřených na konkrétní konstrukci a to např. metodami podle následujících kapitol. Útlum konstrukce je frekvenčně závislý. Zpravidla na nejnižších vlastních frekvencích je konstrukční útlum nejnižší a s rostoucí frekvencí útlum

roste. Nelze stanovit obecně předem dostatečně přesně, jak bude vypadat změna velikosti tlumení s rostoucí frekvencí. v případě, že nejsou k dispozici experimentálně stanovená data, lze vyjít pro stanovení tlumení na nízkých frekvencích z doporučení norem nebo z literárních podkladů, popisujících podobné konstrukce. Např. ČSN 73 0032 (1980) udává pro velikost logaritmického dekrementu tlumení  $\theta$  následující doporučené hodnoty, uvedené v tab. 4-1.

Častěji, zejména v anglické literatuře, bývá pro hodnotu tlumení používán součinitel poměrného útlumu (damping ratio)  $D$ , který udává tlumení ve tvaru desetinného čísla nebo v procentech kritického útlumu. Vztah mezi poměrným útlumem a logaritmickým dekrementem tlumení je

$$D = \theta \cdot \frac{f'_{(i)}}{\omega_{(i)}} \approx \frac{\theta}{(2 \cdot \pi)} \quad (4-3)$$

kde  $f'_{(i)}$  je vlastní frekvence tlumeného kmitání  $i$ -tého tvaru a  $\omega_{(i)}$  je  $i$ -tá kruhová vlastní frekvence. Tento vzorec je velmi přesný pro malý útlum. Pokud  $D \leq 0,20$ , je chyba způsobená zanedbáním vlivu tlumení na velikost frekvence menší než 2%. Pro většinu běžných stavebních konstrukcí bývá útlum  $D$  v rozmezí 0,03 až 0,05 (nebo v procentech 3 až 5%), případně ještě nižší.

Ze zkušenosti bývá pro obytné a průmyslové stavby (železobetonové skeletové) a pro železobetonové základy strojů (rámové konstrukce) nejčastěji používán útlum  $D = 3\%$ , pro ocelové skeletové konstrukce 1,5% a pro masivní cihelné konstrukce nebo železobetonové s cihelnou vyzdívkou, případně blokové základy, až 5%. Pro kmitání na zemině bývá použit útlum  $D$  ještě vyšší.

**Tabulka 4-1: Vybrané hodnoty logaritmického dekrementu tlumení  $\theta$  (podle ČSN 73 0032)**

<b>Materiál</b>	<b>Konstrukční systém, prvek</b>	<b><math>\theta</math></b>	<b><math>D</math> [%]</b>
Ocel	pozemní stavby (budovy, haly)	0,08 - 0,10	1,27 - 1,59
	věže, komíny, vysoké konstrukce	0,10	1,27
	jednotlivé prvky - sloupy, nosníky	0,08 - 0,15	1,59 - 2,39
	pružiny (vinuté)	0,05	0,80
Zdivo	svislé cihelné zdivo (stěny a příčky)	0,12	1,91
	klenby do ocelových nosníků	0,34	5,41
	kamenné na maltu vápennou	0,17	2,71
	vápenno-cementovou	0,11	1,75
Dřevo	lepené nosníky	0,06	0,95
	sbíjené nosníky	0,15	2,39
	Krovny	0,16 - 0,20	2,55 - 3,19

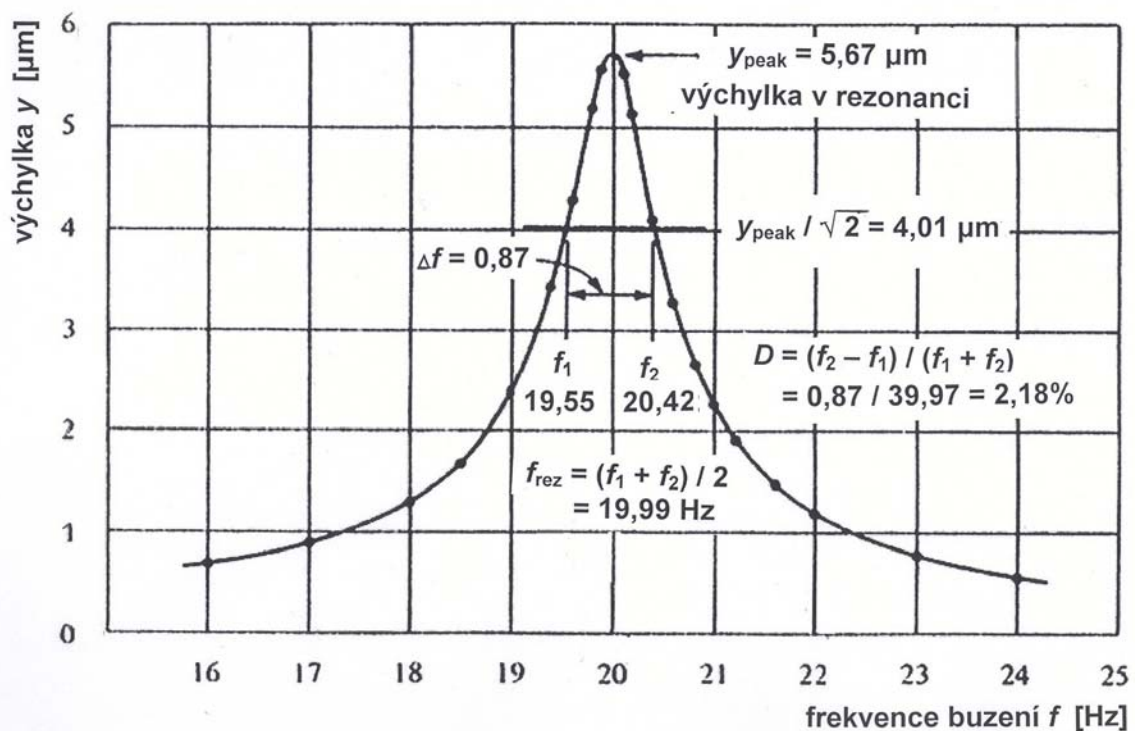


Materiál	Konstrukční systém, prvek	$\theta$	$D$ [%]
	věžové stavby	0,15	2,39
Beton	tlačené prvky bez trhlin	0,10	1,59
	prvky v nichž vzniká tah (bez trhlin)	0,15	2,39
	prvky s trhlinami	0,25	3,98
	stropy deskové, žebrové	0,28	4,46
	jeřábové nosníky a sloupy	0,16	2,55
	vysoké panelové budovy	0,11	1,75

Nejčastěji používaný způsob stanovení tlumení vychází z časového průběhu tlumeného vlastního kmitání na příslušné frekvenci (soustavy s jedním stupněm volnosti) a z měření výchylek po  $n$ -cyklech obdržíme logaritmický dekrement tlumení  $\theta$ :

$$\theta = \ln\left(\frac{y_n}{y_{n+1}}\right) = \frac{1}{m} \cdot \ln\left(\frac{y_n}{y_{n+m}}\right) \quad (4-4)$$

kde  $y_n, y_{n+1}$  jsou výchylky dvou kmitů  $y_n, y_{n+m}$  po sobě následujících, s rozestupem  $m$  cyklů.



**Obrázek 4-1: Odečet poměrného tlumení z šířky rezonanční křivky pro zvolenou frekvenci  $f_{\text{rez}} = f_{(i)}$**

Jestliže je známa pro soustavu s jedním stupněm volnosti rezonanční křivka, pak z úrovně odezvy ve výchylkách  $y_{peak}$  ve vrcholu rezonanční křivky a z výchylky při nulové frekvenci  $y_0$  (jedná se o výchylku při statickém působení budicí síly  $y_0 = y_{st}$ ) lze stanovit rovněž součinitel poměrného tlumení

$$D = \frac{y_{st}}{2 \cdot y_{peak}} \quad (4-5)$$

Útlum lze s výhodou stanovit ze šířky rezonanční křivky. Tato metoda je obecně vhodná pro stanovení útlumu pro jakoukoli vlastní frekvenci soustavy s více stupni volnosti z rezonanční špičky příslušné frekvence. Její použití včetně příkladu je zřejmé z popisu na obr. 4-1.

Pro sestavení matice tlumení  $\mathbf{C}$  se obvykle předpokládá, že tlumení je úměrné rychlosti pohybu (viz formulace tlumících sil pohybové rovnice) - toto tlumení je označováno jako viskózní tlumení. s výhodou se v počítačových programech využívá zavedení tlumení do pohybové rovnice pomocí součinitelů  $\alpha$  a  $\beta$ . v tomto případě považujeme zjednodušeně matici tlumení  $\mathbf{C}$  za lineární kombinaci matic hmotnosti a tuhosti

$$\mathbf{C} = \alpha \mathbf{M} + \beta \mathbf{k} \quad (4-6)$$

Zjednodušení tedy spočívá především v tom, že velikost tlumení stanovujeme pouze dvěma parametry  $\alpha$  a  $\beta$ , které platí pro všechny frekvenční složky kmitání. Ve skutečnosti je útlum kmitání zpravidla na vyšších frekvencích vyšší - to znamená, že vypočtená dynamická odezva konstrukce může být ve skutečnosti nižší.

Při výpočtu soustav s více dominantními frekvenčními složkami buzení nebo při buzení s obecným časovým průběhem zatížení je nutné se rozhodnout, pro jakou frekvenční složku jakou velikost útlumu použijeme - na ostatních frekvenčních složkách, pro něž útlum přesněji neznáme, je velikost odezvy zatížena větší či menší chybou. Pokud je dominantních frekvenčních složek buzení málo, lze úlohu řešit postupně a pak výsledky superponovat. Při obecném časovém průběhu zatížení a obecně i plném frekvenčním spektru vlastních frekvencí konstrukce však tato metodika selhává.

Známe-li poměrný útlum  $D$  konstrukce pro libovolnou (zpravidla nejnížší) vlastní kruhovou frekvenci  $\omega_{(1)}$ , můžeme stanovit přibližnou velikost obou součinitelů pro soustavu s jedním stupněm volnosti (odvození viz Makovička, D. a kol., 2008/1); obdobně lze odvodit vzorce i pro více stupňů volnosti

$$\alpha \approx D \cdot \omega_{(1)}, \quad \beta \approx \frac{D}{\omega_{(1)}} \quad (4-7)$$

### 4.1.3 Tuhost konstrukce

Sestavení matice tuhosti soustavy  $k$  je zpravidla bezproblémové. Jednotlivé členy této matice odpovídají statickým tuhostem jednotlivých uzlových bodů prostorové diskretizované soustavy při jednotkových posuvech (a rozumí se i pootočeních) těchto příslušných uzlových bodů. Stejně jako v případech matice hmotnosti i matice tlumení, jednotlivé členy matice tuhosti  $k_{ij}$  odpovídají síle (momentu) v uzlu  $i$  při působení jednotkového posuvu (pootočení)  $y$  v bodě  $j$ .

### 4.1.4 Výpočet pohybových rovnic

Výpočet pohybových rovnic se rozpadá na dva případy:

- a) rovnice bez pravé strany (nezatížená konstrukce) - výpočet vlastního kmitání (naladění konstrukce),
- b) rovnice s nenulovou pravou stranou - výpočet vynuceného kmitání.

Existuje řada metod pro řešení vlastního i vynuceného kmitání. Není cílem této publikace se zabývat specifiky jednotlivých metod - podrobnější rozbor je uveden v učebnicích dynamiky konstrukcí. Nicméně uživatel konkrétního výpočetního programu by měl znát v něm použitou metodiku řešení, jejímž prostřednictvím získá výsledky odezvy. Měl by tedy znát možnosti v programu použité metodiky alespoň do té míry, aby mohl odhadnout, jaké přibližnosti použitý postup do výsledků výpočtu odezvy vnáší.

Například pro řešení vlastního kmitání bývá používána zpětná iterace (subspace iteration), která je vhodná pro rozsáhlé soustavy s velkým počtem stupňů volnosti. Předpokladem pro její použití je, že obě matice, jak hmotnosti  $\mathbf{M}$ , tak tuhosti  $\mathbf{K}$ , musí být pozitivně definitní. v případě, že tomu tak není - důvodem může být nestabilní konstrukce v důsledku nedostatečného podepření nebo nesprávně definované konečné prvky (v případě MKP) nebo nepropojené (nesvázané prvky tuhými nebo poddajnými vazbami), pak výpočtové programy zpravidla nabízejí nápravu použitím posuvu (shiftu) v matici pro výpočet vlastních párů (vlastních frekvencí a jim odpovídajících vlastních tvarů) a při této „nápravě“ může dojít k přeskočení nebo vynechání některých vlastních párů - pokud se jedná o nízké frekvence nebo frekvence v okolí frekvenčních složek buzení - a může se jednat o fatální chybu. Ze zkušenosti se okamžité použití shiftu bez detailnějšího rozmyšlení možných dopadů na výsledek výpočtu nedoporučuje - vhodnější a správnější je nejprve podrobně zkontrolovat výpočtový model. i při splnění podmínky pozitivní definity obou matic mohou

být při této iterační metodě některé vlastní frekvence přeskočeny - vynechány – a to je důvod, proč některé výpočtové programy nabízí Sturmovu kontrolu úplnosti vypočtených vlastních párů pomocí Sturmovy posloupnosti (Sturm Sequence). Používání této kontroly by mělo být pravidlem při všech výpočtech vlastních frekvencí a vlastních tvarů.

Další častou metodou pro výpočet vlastního kmitání je metoda determinantů (Determinant Search Method), která je vhodná pro menší úlohy a vychází z řešení charakteristického polynomu, respektive jeho průchodů nulou. Problémy mohou nastat při ztrátě dostatečné šířky pásma nevhodnou transformací (shiftem), nebo obdobně jako u iterační metody při nedostatečných okrajových podmínkách (nedostatečném podepření).

Obdobně řešení vynuceného kmitání bývá prováděno přímou integrací pohybové rovnice (pohybových rovnic). Při tomto způsobu velmi záleží na zvolené metodice integrace a zejména pak na použití nejrůznějších akceleratorů, které výpočet urychlují.

V případě výpočtu vynuceného kmitání rozvojem do vlastních tvarů kmitání velmi záleží na počtu vlastních tvarů, které pro výpočet použijeme. Při malém počtu vlastních tvarů v řádu do 5 až 10 tvarů se můžeme dostat i jen na 50 až 60% intenzity skutečné odezvy. Proto některé normy - např. ČSN EN 1998-1 (2003) uvádějí pro seismiku minimální počet vlastních tvarů, které je nutno při výpočtu uvažovat. Pro účinky výbuchu je uvedený požadavek na počet vlastních tvarů, do kterých se rozkládá výbuchové zatížení, obdobný. v čl. 4.3.3.3.1 ČSN EN 1998-1 (2003) je předepsán minimální počet uvažovaných k globálních vlastních tvarů podmínkou:

$$k \geq 3 \cdot \sqrt{n} \quad \text{nebo} \quad T_k \leq 0,2s \quad (4-8)$$

kde  $k$  je minimální počet uvažovaných vlastních tvarů,  $T_k$  je vlastní perioda  $k$  tého vlastního tvaru a  $n$  je počet podlaží nad základem nebo tuhým podložím.

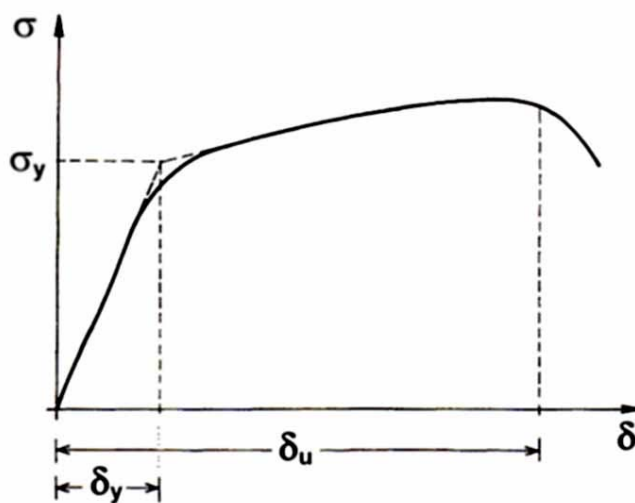
## **4.2 PRUŽNÉ A NEPRUŽNÉ REZERVY NAMÁHÁNÍ KONSTRUKCE**

Zatížení, která vyvodí kromě pružné odezvy konstrukce i trvalá nepružná přetvoření, má smysl uvažovat při navrhování konstrukce v celém rozsahu pružných i nepružných deformací, jen pokud se tato zatížení v průběhu života konstrukce mohou vyskytovat pouze ojediněle - mimořádně. Takový případ tedy výbuchové zatížení zpravidla splňuje. Pokud konstrukce prožije takovéto zatížení, je obvykle nutné konstrukci prohlédnout a opravit. To znamená, že je

vhodné při navrhování konstrukce připustit zatížení, která vyvolávají odezvu i v nepružné oblasti přetváření jen např. pro zatížení havarijního typu od účinků velkých výbuchů, rázových vln, pádu velkých předmětů.

Není cílem tohoto pojednání popis nelineárních postupů výpočtu odezvy, ale upozornění na chyby, které se mohou při aplikaci mimořádného zatížení s odezvou konstrukce za mezí pružnosti vyskytnout.

Dynamicky zatížené konstrukce při mimořádném zatížení je vhodné navrhnout tak, aby byly schopné přenést zatížení i za mezí pružnosti materiálu a aby zároveň při jejich plastickém přetváření nevznikaly křehké poruchy, vedoucí k náhlým lomům konstrukce. v tomto smyslu uvádí podmínky pro navrhování konstrukcí s využitím jejich plasticity příslušné Eurokódy – pro oblast betonu je to ČSN EN 1992-1 (2006), samozřejmě ve spojení s ČSN EN 1991-1 (2007) a ČSN EN 1998-1 až 6 (2006 až 2007). Jestliže je konstrukce navržena tak, aby bezpečně přenesla deformace v pružné i plastické oblasti, s vytvořením plastických kloubů, ale bez křehkých poruch, pak takovéto chování konstrukce označujeme jako duktilní. Místa na konstrukci, ve kterých mohou vzniknout plastické klouby, označujeme jako disipativní zóny (oblasti).



**Obrázek 4-1 Definice duktility v závislosti na pracovním diagramu napětí / přetvoření**

V normách pro navrhování jsou duktilní vlastnosti konstrukce stanoveny součinitelem duktility  $\mu$ . Součinitel je definován následujícím poměrem:

$$\mu = \frac{\delta_u}{\delta_y} \quad (4-9)$$

kde  $\delta_u$  je mezní přípustná deformace konstrukce při jejím porušení a  $\delta_y$  je deformace konstrukce na mezi kluzu (obr. 4-1).

Mezní deformace  $\delta_u$  je vzhledem k bezpečnosti navrhovaných konstrukcí zpravidla definována nikoliv jako deformace na mezi pevnosti, ale deformace, při které je napětí v materiálu konstrukce nižší o 15% ve srovnání s mezí pevnosti. Tato přípustná mezní deformace je tedy závislá jak na požadované bezpečnosti konstrukce podle její významnosti, tak také na způsobu namáhání konstrukce, na vlastnostech materiálu a prostorovém uspořádání konstrukce. v případě železobetonu záleží rovněž na způsobu vyztužení ohybovou a smykovou výztuží, pevnostní třídě betonu apod. Čím větší je schopnost přetváření konstrukce za mezí pružnosti bez vzniku křehkého porušení, tím větší je bezpečnost přenesení mimořádného dynamického zatížení. Normy v tomto případě předpokládají, že se v konstrukci vytvoří plastické klouby, které konstrukci umožní přenést předem definovanou mezní deformaci.

Velký součinitel duktility lze očekávat u konstrukcí, jejichž dominantní namáhání je způsobeno ohybem; např. při vodorovném zatížení sloupů rámových konstrukcí nebo při svislém zatížení stropních konstrukcí. Při tahových, tlakových a smykových namáháních zpravidla nedochází k vytvoření plastického kloubu; při zplastizování průřezu dojde rychle k jeho přetržení, vybočení nebo usmyknutí, bez významnějšího nárůstu přetvoření konstrukce od pružné do plastické fáze přetvoření, ukončené porušením konstrukce. Proto duktilita takovýchto typů konstrukcí je velmi nízká, typickým představitelem jsou sloupy s dominantním osovým zatížením. Při nepříznivých kombinacích namáhání, zejména v tlaku a ve smyku, velmi záleží na vyztužení železobetonových průřezů třmínkovou smykovou výztuží, která zabraňuje vybočení tlačené podélné výztuže prvku.

Duktilní vlastnosti stejné konstrukce jsou tedy jiné při namáhání konstrukce ohybem než při namáhání tahem, tlakem nebo smykem. Jestliže lze předpokládat, že konstrukce bude především namáhána ohybem, pak bude duktilita takové konstrukce značně větší než při pouze osově zatížených sloupech, jejichž duktilita je malá ( $\mu \approx 1$ ).

Materiály typu ocel, dřevo mají obecně dobré duktilní vlastnosti, tedy mohou se plasticky přetvářet při velkých deformacích za mezí pružnosti. Křehké materiály typu zdíva, keramiky ap. mají nízké duktilní vlastnosti. Pro jednotlivé třídy konstrukcí jsou uvedeny přípustné součinitelé duktility např. v ČSN EN 1998-1 (2003). v našem případě lze součinitel duktility  $\mu$  pro rázové jevy (velmi rychlé) uvažovat v rozmezí pro zdívo od 1,5 do 2,0, pro železobeton, ocel a dřevo od 2,5 do 5,0 – při dominantním ohybovém namáhání konstrukce. v každém případě je

nutno zvážit velikost součinitele duktility s ohledem na skutečné disipativní vlastnosti konstrukce.

Při posuzování účinků mimořádných dynamických zatížení bývá nutno zodpovědět otázku, jaká je skutečná mezní únosnost objektu, kterou lze využít pro pokrytí odezvy objektu na tato zatížení. Je samozřejmé, že mezní únosnost je objektivně závislá na konfiguraci posuzované konstrukce a jejích dynamických vlastnostech, vyjádřených především spektrem vlastních frekvencí a tvarů kmitání, jež jsou funkcí skutečné tuhosti konstrukce a rozdělení jejích hmot po konstrukci. Předpokládáme, že tuhost konstrukce v sobě rovněž zahrnuje vliv případných poruch v konstrukci, tedy např. běžných trhlin v betonu, zdivu ap., zjistitelných např. pomocí zatěžovacích zkoušek, statických či dynamických, atd. Ovšem do posuzování mezní únosnosti konstrukce vstupují další subjektivní faktory. Především se jedná o nepřesnosti, plynoucí z provedených zjednodušení konstrukce do výpočetního modelu, dále pak možné odchylky bezpečnosti ve stanovení mezních hodnot podle norem pro navrhování. Filozofie využití duktility konstrukce vychází z podmínky, že běžná zatížení (vlastní tíha, užitná zatížení ap.), která se běžně v konstrukci vyskytují, musí konstrukce přenést v lineární oblasti se všemi součiniteli zatížení, danými v našich podmínkách požadavky ČSN 73 0035 (1986), případně ČSN EN 1990 (2005). A teprve rezervu, která zbývá do meze pevnosti materiálu lze využít pro mimořádná zatížení. Jestliže uvážíme zákon pravděpodobnosti rozdělení výskytu jednotlivých zatížení, pak je nepravděpodobné, že by k zatížení výbuchem došlo při působení všech stálých a nahodilých zatížení v plné výpočtové výši. v tomto smyslu můžeme využít např. ČSN 73 0032 (1978) a (Makovička a kol., 1980), která umožňuje uvažovat pro dynamická zatížení: stálá zatížení v plné výši + 60% nahodilých, které by se pravděpodobně vyskytovaly v konstrukci v době výbuchové události, takže rezerva do meze pevnosti je pak již vyšší.

### **4.3 ZJEDNODUŠOVÁNÍ KONSTRUKCE A JEJÍHO ZATÍŽENÍ**

Při posuzování odezvy stavební konstrukce na účinky výbuchu je nutné uvážit konkrétní místní podmínky podle lokality a charakteru stavební konstrukce:

typ a situování zdroje tlakové vlny ve srovnání s posuzovanou konstrukcí, charakteristiky tlakové vlny ve zdroji, zvláště časový průběh výbuchového tlaku, v závislosti na množství látky, intenzitě a rychlosti uvolněné výbuchové energie, dráhu, po které se výbuchová vlna šíří ke konstrukci, případně u vnitřních výbuchů velikost prostor, ve kterých došlo k výbuchu, možnost otevření odlehčovacích otvorů (oken, dveří, lehkých příček apod.). Vliv překážek na

cestě k zatížené konstrukci, vlivy zemního prostředí na modifikaci seismické vlny, vlastnosti konstrukce nebo částí konstrukce a jejich materiálu. Jedná se zejména o mechanické charakteristiky materiálu (především jeho pevnost, způsob porušování, diagram závislosti napětí na deformaci, přípustnost využití plastických rezerv při porušování, hmotnost apod.) rozložení hmot a tuhosti konstrukce a tomu odpovídající frekvenční naladění konstrukce, charakter povrchů, které rázová vlna zatěžuje, geometrii konstrukce ve srovnání s charakteristikami výbuchové vlny, předchozí poruchy v konstrukci včetně změn vlastností materiálu konstrukce s časem u stávajících konstrukcí apod.

Na základě výše uvedených charakteristik (vstupních informací) lze odhadovat odezvu konstrukce ať již přesněji výpočtem, nebo přibližně podle empirických kritérií. Vždy by však součástí odezvy mělo být stanovení nejistot v určení odezvy konstrukce a jejího porušení v návaznosti na provedených zjednodušeních a předpokladech o chování konstrukce a jejím zatížení a dalších nepřesnostech vstupních dat.

Velmi často bývá výbuchové zatížení zjednodušeně nahrazováno:

v čase trojúhelníkovým průběhem zatížení s maximální intenzitou, odpovídající součtu tlaku v dopadající a odražené vlně a délkou působení, odpovídající obvykle pouze době působení přetlakové fáze tlakové vlny, tlakovou vlnu lze uvažovat s rovinným čelem, to znamená, že je zanedbána doba náběhu do maximální intenzity a dále, že zatížení na celou konstrukci začíná působit v jediný okamžik, je tedy zanedbán fázový posun v počátku působení zatížení v jednotlivých bodech konstrukce, obvykle se předpokládá, že zatížení zatěžuje stavební konstrukci (zdi, strop, okna ap.) spojitě rovnoměrně (není uvažován lokální efekt soustředěného zatížení), odezva konstrukce bývá uvažována na základě superpozice dvou trojúhelníkových zatížení, odpovídající nejprve přetlakové a následně podtlakové fázi tlakové vlny.

O porušování běžných konstrukcí rozhoduje pevnost materiálu konstrukce v tahu za ohybu podle příslušných norem pro navrhování. s ohledem na rázový charakter vlastního výbuchu lze navýšit pevnostní charakteristiky z norem pro navrhování součinitelem, odpovídajícím rychlosti deformace. Tento součinitel  $k_1$  může nabývat velikost i v řádu jednotek (2,0 a více) pro velmi krátké výbuchové jevy. Jeho konzervativní hodnoty jsou uvedeny v tab. 4-2.



**Tabulka 4-2 Odhad součinitele  $k_1$  v závislosti na době působení zatížení  $t$**

$t$ [s]	$\geq 1.0$	$10^{-1}$	$10^{-2}$	$10^{-3}$
$k_1$	1,0	1,05	1,10	1,20

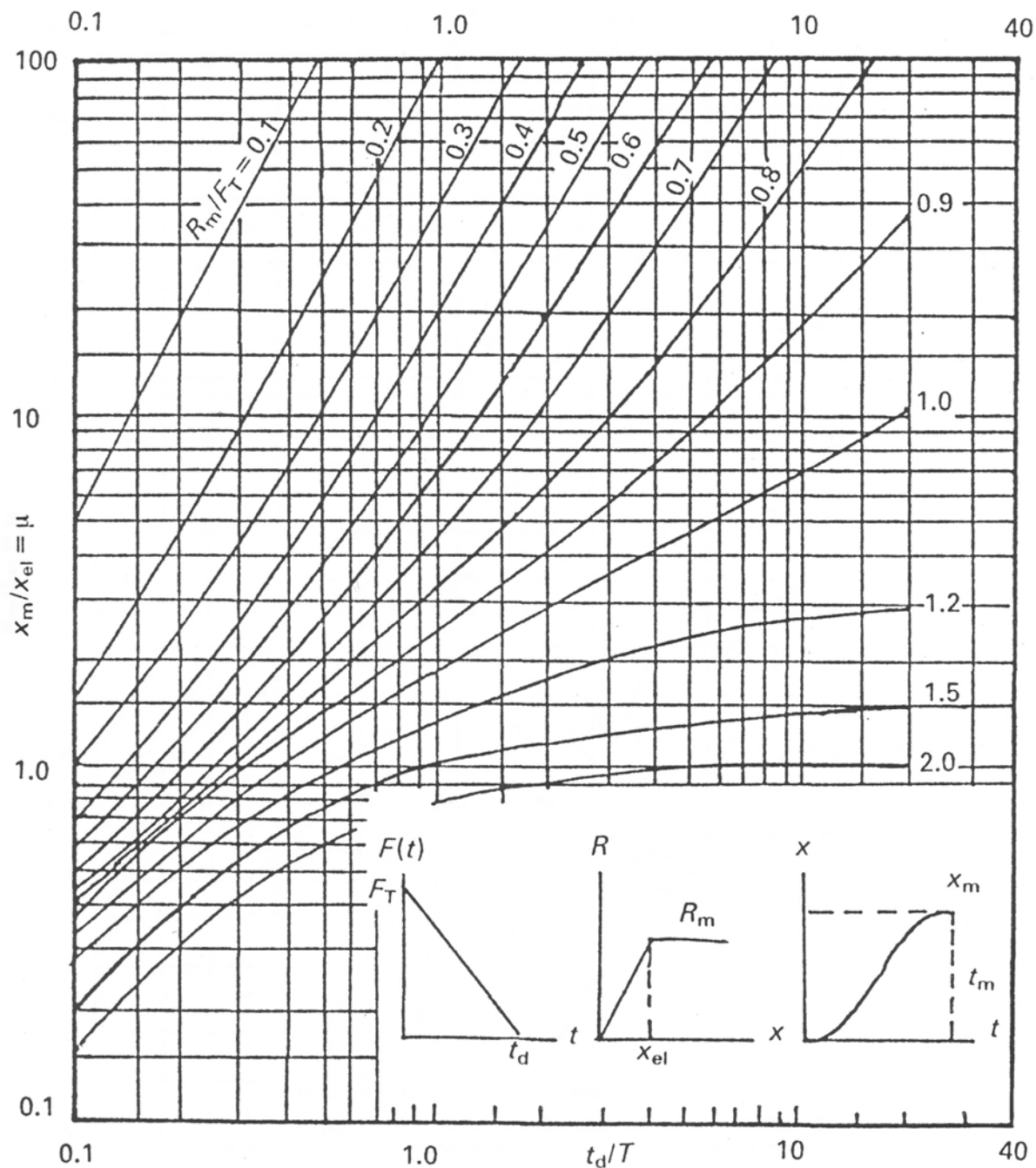
Konstrukce lze při sestavování výpočetního modelu zjednodušit tak, že je rozdělujeme na samostatné prvky vystavené bezprostředně výbuchu; pro dostatečně vysokou a štíhlou konstrukci zatíženou venkovním výbuchem lze použít konzolový model obdobně jako při seizmickém zatížení, při vnitřním výbuchu lze analyzovat samostatně stropní desky, zdivo na výšku podlaží ap. Případně lze provést redukci konstrukce na soustavu s konečným počtem stupňů volnosti, obvykle jen jedním, a pak dynamický charakter celého jevu a dynamické zvětšení namáhání a přetvoření konstrukce vyjadřujeme dynamickým součinitelem. To znamená, že problematika odezvy je zjednodušeně vyjádřena časovou funkcí  $T(t)$ , která je funkcí poměru frekvenčních charakteristik budicího impulzu a té vlastní frekvence, zpravidla nejnižší, při níž kmitání konstrukce z energetického hlediska přenese největší podíl buzení. Za tohoto předpokladu pak např. dynamický průhyb konstrukce  $x(t)$  lze zapsat ve tvaru

$$x(t) = x_0 T(t) \quad (4-10)$$

kde  $x_0$  je statický průhyb od staticky působícího zatížení rázovou vlnou. Funkci  $T(t)$ , respektive její maximální velikost, většinou i v absolutní hodnotě, nazýváme dynamickým součinitelem  $\delta$ . Dynamický součinitel  $\delta$  je tedy funkcí zjednodušeného časového průběhu zatížení a součinu délky trvání rázového zatížení  $\tau$  a příslušné, zpravidla první vlastní kruhové frekvence konstrukce  $\omega_{(1)}$ . Jeho hodnoty pro soustavy s jedním stupněm volnosti lze nalézt např. v (Koloušek, 1967). Při stanovování dynamického součinitele můžeme s výhodou uvažovat i ideálně pružně plastické chování konstrukce, ale pouze u těch konstrukcí, jež jsou schopny se plasticky přetvářet. Dynamický součinitel  $\delta$  pro převod dynamického zatížení od účinků výbuchu na ekvivalentní statické zatížení je závislý na poměru doby působení rázové vlny  $\tau$  na vlastní periodě kmitání konstrukce  $T_{(i)}$  a na přetvárnosti (duktilitě) konstrukce:

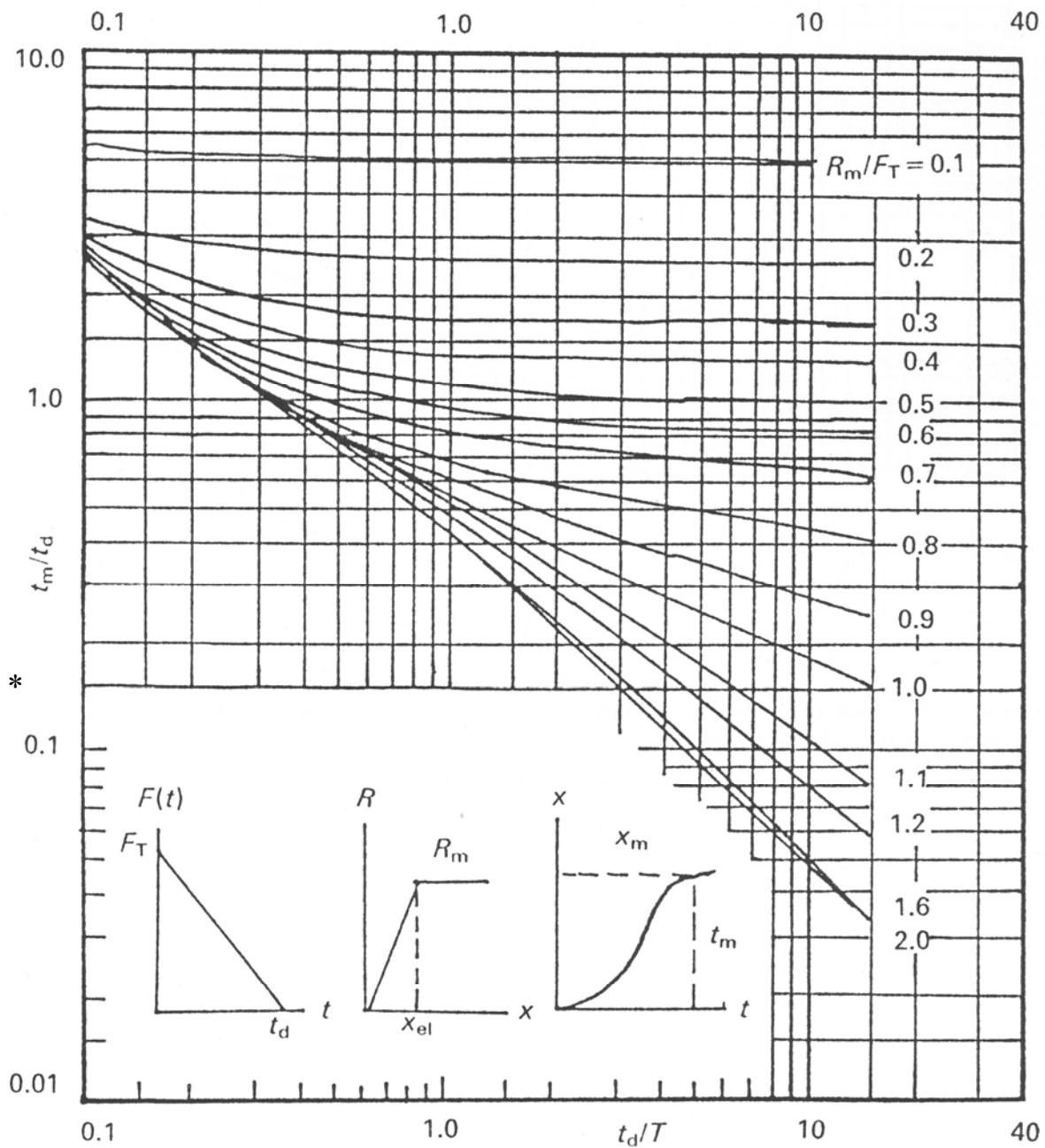
$$\mu = x_m / x_{el} \quad (4-11)$$

kde  $x_m$  je celkový pružný + plastický průhyb (posunutí) konstrukce,  
 $x_{el}$  je pružná část průhybu (posunutí).

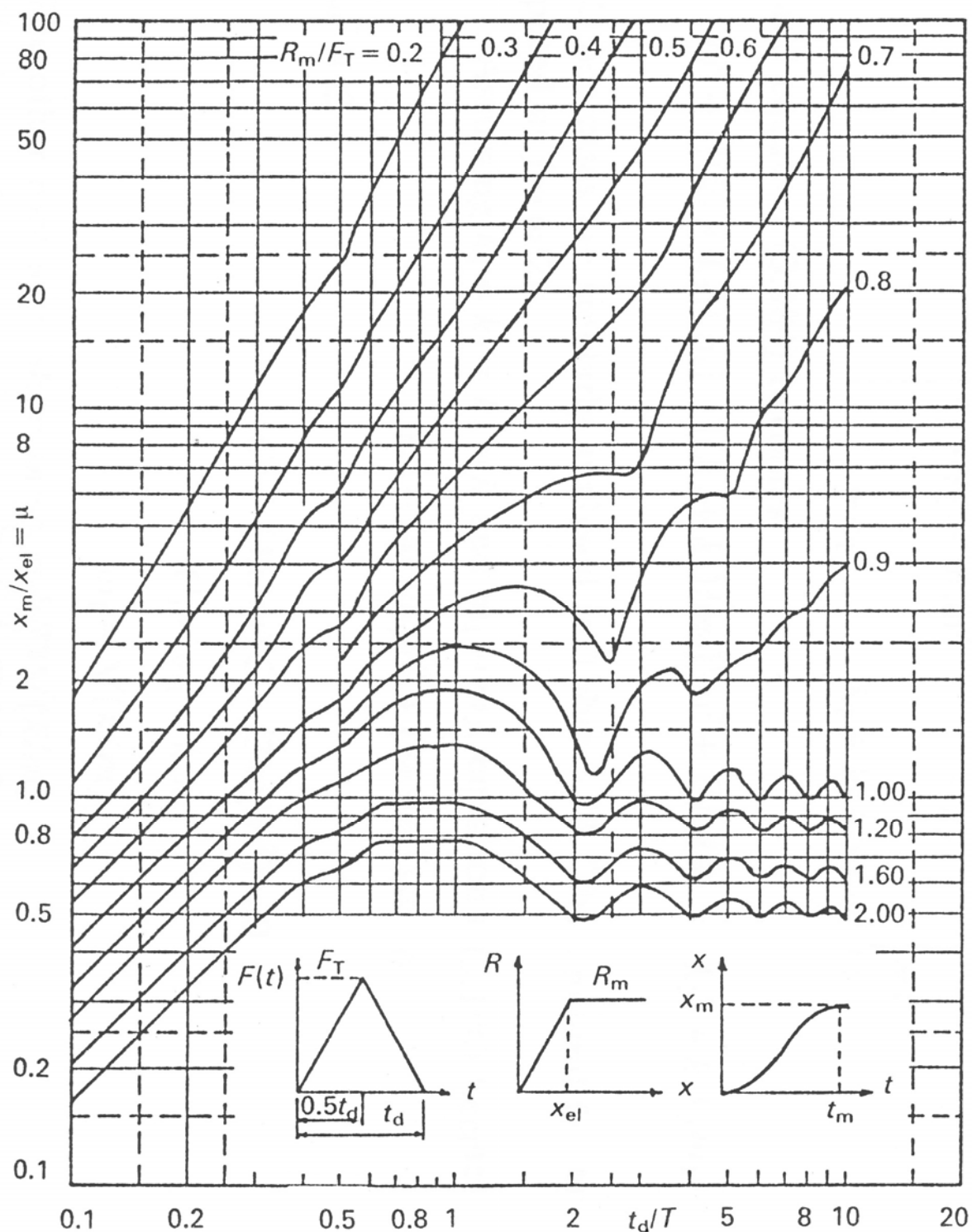


**Obrázek 4-3: Závislost přetvoření pro trojúhelníkové zatížení a přetvárnost konstrukce pro ideálně pružnoplastickou soustavu s jedním stupněm volnosti (podle Bangash, 1993)**

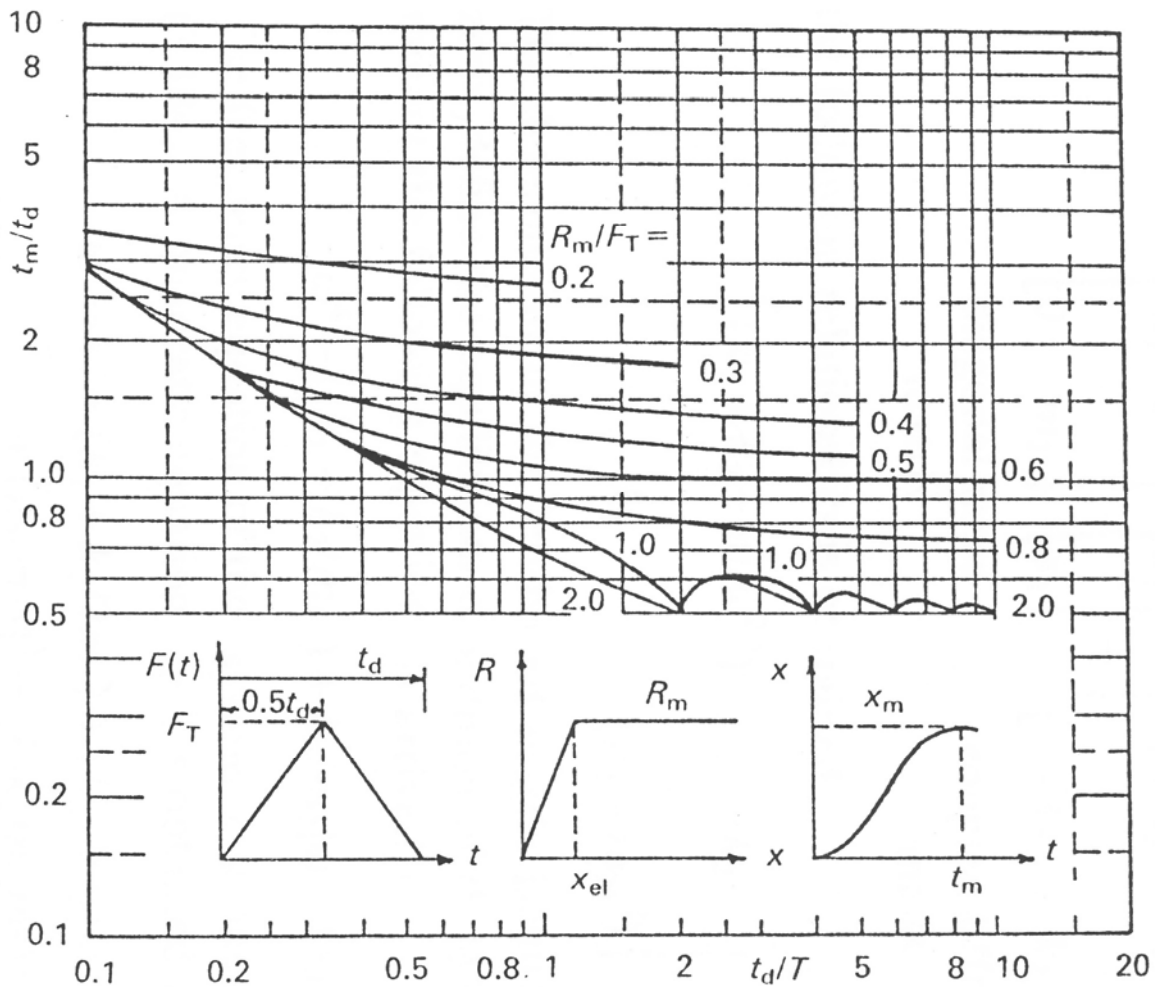
Mezní přetvoření pro různé zjednodušení časových funkcí zatížení v závislosti na součiniteli  $\mu$  vyjadřují grafy na obr. 4-3 a obr. 4-4. Na uvedených obrázcích je  $x$  velikost průhybu,  $F_T$  je maximální dynamické zatížení,  $R_m$  je namáhání konstrukce na mezi kluzu,  $t$  je čas,  $t_D$  je doba působení dynamického zatížení.



**Obrázek 4-3 (pokračování): Závislost přetvoření pro trojúhelníkové zatížení a přetvárnost konstrukce pro ideálně pružnoplastickou soustavu s jedním stupněm volnosti (podle Bangash, 1993)**



**Obrázek 4-4: Závislost přetvoření pro trojúhelníkové zatížení s náběhem a přetvárnost konstrukce pro ideálně pružnoplastickou soustavu s jedním stupněm volnosti (podle Bangash, 1993)**



**Obrázek 4-4 (pokračování): Závislost přetvoření pro trojúhelníkové zatížení s náběhem a přetvárnost konstrukce pro ideálně pružnoplastickou soustavu s jedním stupněm volnosti (podle Bangash, 1993)**

Pro zatížení rázovou vlnou je velikost dynamického součinitele s uvažováním duktilního chování konstrukce v mezích  $\delta = 1 \sim 2$ . Jeho velikost odvodil N. M. Newmark (Koloušek, 1967) pro zjednodušenou soustavu s jedním stupněm volnosti ve tvaru:

$$\frac{1}{\delta} = \frac{T_{(i)} \sqrt{2\mu - 1}}{\pi \cdot \tau_+} + \frac{1 - \frac{1}{2\mu}}{1 + 0,7 \frac{T_{(i)}}{\tau_+}} \quad (4-12)$$

kde za vlastní periodu  $T_{(i)}$  se zpravidla dosazuje nejnižší vlastní perioda ohybového kmitání (tedy  $i = 1$ ) a doba působení přetlakové fáze  $\tau_+ = t_D$ .

### 4.3.1 Posuzování porušení při kombinaci zatížení

Jestliže dojde k překročení meze únosnosti  $R_{tfd}$ , objeví se v materiálu konstrukce trhlinka. Pro bezpečnou konstrukci musí pak platit nejnepříznivější podmínka, a to na základě porovnání napět'ového stavu:

$$\min(\sigma_g \pm \sigma_{expl}) \geq -R_{tfd} \quad \text{nebo po úpravě} \quad \sigma_{expl} - \sigma_g \leq R_{tfd} \quad (4-13)$$

kde  $\sigma_{expl}$  je napětí od účinků tlakové vlny výbuchu,  
 $\sigma_g$  je normálové napětí v daném místě (spáře) od ostatních zatížení (zpravidla pouze stálých)

nebo podmínka přípustného mezního pootočení  $\psi$ . Jeho hodnota na mezi porušení je přibližně v rozmezí  $2,3^\circ$  až  $5,7^\circ$  pro zdivo (Makovička, 2002), minimálně  $6,5^\circ$  pro železobeton a minimálně  $10,5^\circ$  pro ocel (Koloušek, 1967):

$$\psi = 2 \arctg(2y/l) \quad (4-14)$$

kde  $y$  je maximální dosažený průhyb nosníkových prvků, desek a stěn (ve středu rozpětí),

$l$  je rozpětí konstrukce nebo rozpětí v kratším směru deskostěnové konstrukce.

Při navrhování konstrukcí podle teorie mezních stavů bývá vhodnější zejména pro železobetonové konstrukce uvažovat místo meze únosnosti  $R_{tfd}$  moment na mezi únosnosti, případně i v kombinaci s normálovou silou. v případě programu pro zjednodušený výpočet únosnosti konstrukce je výstupem programu buď napětí v nejvíce namáhaném průřezu nebo moment na mezi únosnosti od účinků výbuchu. Kombinaci s ostatními statickými zatěžovacími stavy pak již uživatel programu provede samostatně. Pro běžné rozměry deskostěnových i nosníkových konstrukcí můžeme zjednodušeně předpokládat, že výbuchové zatížení od odražené vlny zatěžuje tyto konstrukce rovnoměrně spojitě. Odezvu konstrukce lze pak zjednodušeně stanovit z jejího zatížení ekvivalentním statickým zatížením  $p_{ekv}$ , které je pro dominantní vlastní frekvenci (zpravidla první) součinem dynamického součinitele  $\delta$  a staticky uvažovaného zatížení, odpovídajícího přetlaku v odražené vlně  $p_{ref}$

$$p_{ekv} = \delta \cdot p_{ref} \quad (4-15)$$

#### **4.4 NEJISTOTY PŘI STANOVENÍ ODEZVY KONSTRUKCE**

Materiálové charakteristiky základních stavebních materiálů, a to jak stavebních, tak strojních konstrukcí, jsou uváděny v normách pro navrhování. Při přebírání těchto charakteristik do výpočtů je však třeba si uvědomit, že byly odvozeny pro normy založené na mezních stavech, ze statistických charakteristik těchto veličin - v lepším případě jejich středních hodnot. Přibližný odhad nepřesnosti velikosti materiálových charakteristik (např. modulů pružnosti, pevností ap.), převzatých z norem pro navrhování, si lze učinit např. podle ČSN 73 2030 (1994), která stanovuje možné odchylky v přetvoření konstrukce podle materiálu: kovové konstrukce 15%, předpjatý beton 20%, zdivo, spřažené kovové a železobetonové 25%, dřevo 30 %, plasty 40%.

Protože se při dynamickém zatížení jedná o kladné i záporné hodnoty, je nejistota v určení odezvy konstrukce dosti významná. Při prvním zatěžování, a tím výbuch svou velikostí vzhledem k běžnému zatížení konstrukce může být, jsou tyto přípustné diference pro přetvoření (to je např. lineárně úměrné modulu pružnosti  $E$ ) ještě větší: kovové konstrukce 40%, železobeton, předpjatý beton a zdivo 50%, dřevo a plasty 60%. u zemních konstrukcí může tato odchylka z norem převzatých charakteristik být i řádová - podle zkušenosti.

To znamená, že pokud vycházíme při stanovení odezvy konstrukce z údajů o materiálech, převzatých z norem pro navrhování, materiálových listů a jim podobných dokumentů, pak lze této nejistotě přizpůsobit zjednodušující předpoklady o průběhu celého děje. Při přebírání údajů o materiálu z literatury, např. technických průvodců a nejrůznějších příruček (Handbooky, správočníky ap.), je nejistota zpravidla ještě větší, díky nejrůznějším koeficientům bezpečnosti, zprůměrováním ap. Je tedy zřejmé, že pro přesnější výpočty je nezbytné materiálové charakteristiky stanovit měřením na konstrukci nebo z odběru vzorků.

Zatížení vyvozená výbuchem by měla být udávána vždy alespoň dvěma parametry a to parametrem intenzity (např. velikost tlaku) a údajem o časovém průběhu zatížení (např. tvar průběhu zatížení, doba působení přetlaku ap.). Jestliže chybí např. časový parametr, a tak se to v literatuře často vyskytuje, pak intenzitní parametr může být zatížen i řádově velikou chybou. Obdobně nedostatečný údaj je např. impuls zatížení, aniž by byl udán i tvar nebo doba trvání impulsu ap.

Významný vliv při posuzování konstrukce na účinek výbuchu má doba působení přetlakové nebo podtlakové fáze rázové vlny od výbuchu. Zvláště pokud tato doba působení leží v oblasti desetin až setin sekundy, může být odezva konstrukce zesílena rezonancí mezi touto dobou trvání přetlaku nebo podtlaku a

zpravidla dominantní vlastní periodou konstrukce nebo její části, která je rovněž přibližně ve stejných mezích, tedy desetin až setin sekundy. i při velmi krátkých jevech v řádu milisekund pro malé výbuchy může v důsledku odrazů výbuchové vlny od okolních stěn, terénu a jiných dalších překážek a interference hlavní dopadající vlny s odraženými vlnami znamenat prodloužení trvání rázového zatížení konstrukce a tím rezonanční zesílení celého jevu obdobně jako v předchozím případě mohutnějšího výbuchu s delším průběhem trvání přetlaku nebo podtlaku rázové vlny.

Při stanovování odezvy konstrukce obvykle vycházíme z neporušené konstrukce a stanovujeme její poškození. Je dobré si uvědomit, že na konstrukci objektů se vyskytují nejrůznější předhavarijní poškození, trhliny a praskliny, po jejichž drahách může probíhat při výbuchem zatížení pohyb částí konstrukce. To znamená, že může dojít snadněji k vysunutí části zdiva, pokud v důsledku oprav a rekonstrukcí objektu v období před výbuchovým zatížením nebyla tato část zdiva s okolní konstrukcí dostatečně spolehlivě propojena - provázána. Obdobně mohou působit i pracovní spáry např. mezi železobetonem stěn a železobetonovými stropy, pokud propojení v pracovní spáře mezi oběma částmi konstrukce nebylo dobře zajištěno, např. výztuží a ošetřenou pracovní spárou. i když by byla v tomto případě pracovní spára mezi stěnami a stropem dobře ošetřena a zajištěna konstrukční výztuží, je pevnost betonových průřezů v tahu přes tuto spáru nižší než pevnost monolitických průřezů. Takže při výbuchu v místnosti pod takovými stropem může dojít k nadzdvížení stropu a jeho poruše dříve, než dojde k poškození železobetonových stěn. Obdobný případ jsou prefabrikované stropní konstrukce z panelů, stropních trámů se stropnicemi ap. případně i ještě s nedostatečným podlitím na obvodových stěnách, u kterých může rovněž dojít k nadzdvížení těchto stropních konstrukcí na okolních stěnách.

#### ***4.5 NORMOVÉ POŽADAVKY PRO VÝPOČET***

Normy zpravidla nepředepisují postup výpočtu a zvolenou metodiku. Přesto je nutné se zabývat otázkou, na jakých principech - na jakých modelových zjednodušeních - jsou příslušné články normativních dokumentů založeny. Tak např. normy (ať již ČSN 73 0036 (1973) nebo ČSN EN 1998-1 (2003), nebo americká UBC (1997) atd.) umožňují zjednodušený (seizmický - tento postup lze aplikovat i pro účinky výbuchu) výpočet jednodušších konstrukcí při použití konzolového modelu (objekt je nahrazen prutovým modelem - konzolou s hmotami soustředěnými na úrovni jednotlivých podlaží). Tento model je vhodný pro vysoké štíhlé konstrukce, ale naopak nevhodný pro půdorysně rozsáhlé konstrukce, typu průmyslových hal, podzemní konstrukce, členité objekty, objekty, kde dominantní účinek je ve vertikálním směru (např. mosty, velká konzolová vyložení stropů budov) nebo ve více směrech - vertikálním



i obou horizontálních. v takovýchto případech je správné přistoupit k prostorovému (3-D) modelu, nebo alespoň k rovinnému (2-D) modelu, a provést na těchto modelech dynamický výpočet. Je otázkou, jaká vstupní data o zatížení použijeme pro výpočet. Nikoliv vždy je např. k dispozici časový průběh zatížení od rázové vlny. Proto jej nahrazujeme nejrůznějšími trojúhelníkovými průběhy přetlaku či podtlaku, případně spojitými křivkami z experimentů na podobných konstrukcích apod. Samozřejmě pro dynamické výpočty odezvy „nevhodných“ konstrukcí (ve smyslu nesplňujících podmínky konzolového modelu) lze přesto zjednodušeně tento konzolový model, zejména s ohledem na odhad velikosti odezvy, použít. Je však třeba si uvědomit, že výsledná chyba tohoto výpočtu může být i řádová podle míry zjednodušení konstrukce. Při interpretaci výsledků je nutné pak zvažovat jejich pravdivost - přibližnost vůči realitě.

S ohledem na navrhování nových nebo posuzování stávajících staveb lze odolnost konstrukce na účinky výbuchu uvažovat:

- 1) konstrukce by měla přenést účinky výbuchu:
  - a) bez poškození nosné způsobilosti a bez ztráty funkčnosti, tak aby tato konstrukce při opakovaném výbuchu byla dostatečně odolná,
  - b) s přípustným poškozením nosných a nenosných prvků konstrukce, které ovšem nezpůsobí její celkovou havárii, ale pouze ztrátu funkčnosti. Takováto konstrukce splní při výbuchu svůj účel, ochrání chráněnou oblast, ale po výbuchu je potřeba ji odstranit nebo provést její opravu (podle požadavků na tuto konstrukci - velkou nebo generální opravu nebo provést výstavbu konstrukce nové);
- 2) konstrukce by měla při havárii být destruována a umožnit tak výfuk do vnějšího prostoru.

V souladu s celosvětovou praxí se rozlišují při navrhování nebo posuzování konstrukcí dvě návrhové úrovně pro výpočet zatížení příslušné konstrukce:

MVZ: maximální výpočtové zatížení,  
PZ: projektové zatížení.

#### 4.5.1 ČSN EN 1991-1-7

ČSN EN 1991-1-7 Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 1-7: Obecná zatížení – Mimořádná zatížení (2007) se používá pro navrhování pozemních a inženýrských staveb společně s ostatními eurokódami, tj. s ČSN EN 1990 (2003) až ČSN EN 1999 (2007). v soustavě eurokódů je zatížení výbuchem považováno za mimořádné zatížení a toto zatížení se uvažuje v mimořádných návrhových situacích. Pro mimořádné situace se dílčí součinitele  $\gamma_f$  uvažují zpravidla rovny

jedné. Pro posouzení na mezní stav únosnosti se v mimořádné návrhové situaci uvažují kombinace zatížení podle vztahu

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} P A_d (\psi_{1,1} \text{ nebo } \psi_{2,1}) Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (4-16)$$

kde  $G_{k,j}$  značí charakteristickou hodnotu  $j$ -tého stálého zatížení,  
 $P$  příslušnou reprezentativní hodnotu předpětí,  
 $A_d$  návrhovou hodnotu mimořádného zatížení,  
 $\psi_{1,1}$  součinitele pro tzv. častou hodnotu proměnného zatížení,  
 $\psi_{2,1}, \psi_{2,i}$  součinitele pro tzv. kvazistálou hodnotu proměnného zatížení,  
 $Q_{k,1}$  charakteristickou hodnotu hlavního proměnného zatížení,  
 $Q_{k,i}$  charakteristickou hodnotu vedlejšího  $i$ -tého proměnného zatížení,  
 $+$  “kombinovaný s dalšími zatíženími”,  
 $\Sigma$  kombinovaný účinek.

V příslušném vztahu je hlavní proměnné zatížení to zatížení, které dává největší účinek. Pokud není zřejmé, které z proměnných zatížení to je, musí se do vztahu jako hlavní zatížení dosadit každé proměnné zatížení. Ve čtvrtém členu kombinačního vztahu se uvažuje kombinační součinitel  $\psi$  pro častou nebo kvazistálou hodnotu zatížení podle typu mimořádného zatížení.

Citovaná norma stanoví zatížení od vnitřních výbuchů v budovách. Nezabývá se mimořádnými zatíženími vyvolanými vnějšími výbuchy, válečnými událostmi ani teroristickými činy. Výbuchy se musí uvažovat při navrhování všech částí pozemních a inženýrských staveb, ve kterých se používá plyn nebo se plyn reguluje, kde se skladují výbušné látky, jako jsou výbušné plyny nebo kapaliny tvořící výbušné páry, kde se plyn skladuje nebo přepravuje (např. chemická zařízení, kontejnery, zásobníky, stavby pro odpadní vody, obytné budovy s instalacemi plynu, energovody, tunely pozemních a drážních komunikací). Účinky způsobené výbušninami norma nestanoví. Stejně tak i vliv velikosti výbuchu od kaskádovitého účinku z několika spojených prostor naplněných výbušným prachem, plynem nebo párami je mimo rozsah uvedené normy.

Posuzování nebezpečnosti mimořádné návrhové situace (výbuchu) může podle ČSN EN 1991-1-7 (2007) vycházet z následujících tříd následků výbuchu, tak jak jsou uvedeny v ČSN EN 1990 (2003). Tab. 4-3 uvádí kategorizaci pozemních staveb do tříd následků podle typů staveb a charakteru užívání. Tato kategorizace se vztahuje k malé, střední a velké třídě následků (CC1 až CC3).

**Tabulka 4-3: Kategorizace staveb podle tříd následků (ČSN EN 1991-1-7, tab. A.1)**

Třída následků	Příklady kategorizace a jejich používání
CC1 malá	Samostatné obytné domy do 4 podlaží. Zemědělské stavby. Stavby s občasným výskytem osob za předpokladu, že každá část takové stavby je vzdálena od další obytné budovy nebo oblasti navštěvované lidmi alespoň o 1,5 násobek výšky stavby.
CC2a střední – skupina menšího rizika	Samostatné 5 podlažní obytné domy. Hotely do 4 podlaží. Budovy s byty, apartmány a další rezidenční budovy do 4 podlaží. Administrativní budovy do 4 podlaží. Průmyslové stavby do 3 podlaží. Obchodní plochy do 3 podlaží, s plochou každého podlaží max. 1000 m <sup>2</sup> . Školní zařízení o 1 podlaží. Veškeré budovy nepřesahující 2 podlaží, kde je povolen vstup veřejnosti a plocha jednotlivých podlaží je nanejvýš 2 000 m <sup>2</sup> .
CC2b střední – skupina většího rizika	Hotely, budovy s byty, apartmány a další obytné budovy vyšší než 4 podlaží, avšak nanejvýš 15 podlažní. Školská zařízení vyšší než 1 podlaží, avšak nanejvýš 15 podlažní. Obchodní plochy vyšší než 3 podlaží, avšak nanejvýš 15 podlažní. Nemocnice do 3 podlaží. Administrativní budovy vyšší než 4 podlaží, avšak nanejvýš 15 podlažní. Všechny budovy s přístupem veřejnosti a s plochou podlaží větší než 2 000 m <sup>2</sup> , avšak na každém podlaží nanejvýš 5 000 m <sup>2</sup> . Parkoviště nanejvýš 6 podlažní.
CC3 velká	Všechny stavby, které přesahují omezení ploch jednotlivých podlaží a jejich počtu ve třídách následků CC2a a CC2b. Všechny stavby, kde se shromažďuje značný počet osob. Stadióny s více než 5 000 diváky. Stavby s nebezpečnými látkami nebo technologickými procesy.

Poznámka: Pro budovy, které jsou plánovány pro víceúčelové využití, má být třída následků vztažena k nejzávažnější třídě.

U staveb třídy CC1 se nemusí účinky výbuchu uvažovat. Pouze je nutné prověřit spoje a spolupůsobení prvků, aby se při výbuchu konstrukce „nerozpadla“. Pro stavby třídy CC2 až CC3 se doporučuje navrhnout klíčové prvky na příslušná zatížení. Je možné použít analýzu založenou na ekvivalentních statických modelech zatížení nebo aplikovat normativní návrhová/konstrukční pravidla. u konstrukcí třídy CC3 se má kromě toho použít dynamická analýza. Eurokód (ČSN EN 1991-1-7, čl.5.3, odst. 8) doporučuje se obrátit na odborníky.

Při analýze odolnosti konstrukce se doporučuje uvažovat výfukové otvory. Tyto otvory a jejich uzávěry se mají uvolnit při nízkém tlaku a mají být co možná

nejlehčí. Pokud se jako výfukové prvky uvažují okna, doporučuje se, aby se bralo v úvahu nebezpečí zranění osob úlomky skla nebo jejich rámy. Při stanovení odolnosti výfukového prvku se musí brát v úvahu rozměry a stavba nosné konstrukce výfukového prvku. Výfukové prvky se mají umisťovat v blízkosti možného zdroje vzplanutí, jestliže je tento zdroj znám, nebo v místech vysokých tlaků. Při aktivaci výfukových prvků nesmí dojít k ohrožení osob nebo ke vzplanutí jiného materiálu. Výfukové prvky mají být zabezpečeny tak, aby se v případě exploze nestaly letícími předměty, pokud je to možné. Návrh velikosti výfukového otvoru pro místnosti do 10000 m<sup>3</sup> je řešen v příloze D ČSN EN 1991-1-7 (2007) v závislosti na maximálním tlaku, statickém aktivačním tlaku a charakteristikách prachů.

#### 4.5.1.1 Příklady navrhování prvků konstrukce

Klíčové prvky konstrukce se navrhnou na účinky vnitřního výbuchu zemního plynu prostřednictvím vztahu pro nominální ekvivalentní statický tlak na větší z hodnot:

$$p_{Ed} = 3 + p_v, \quad (4-17)$$

$$\text{popř. } p_{Ed} = 3 + 0,5 p_v + 0,04/(A_v/V)^2 \quad (4-18)$$

Tlak  $p_v$  je rovnoměrně rozložený statický tlak v kN/m<sup>2</sup> (kPa), při kterém se výfukové prvky poruší,  $A_v$  je plocha výfukových prvků v m<sup>2</sup> a  $v$  je objem prostoru v m<sup>3</sup>. Tlak od výbuchu současně účinně působí na všechny plochy ohraničující prostor. Vztahy platí pro prostor až do objemu 1000 m<sup>3</sup> a pro poměr výfukových prvků a objemu prostoru v rozmezí  $0,05 \text{ (m}^{-1}\text{)} \leq A_v/v \leq 0,15 \text{ (m}^{-1}\text{)}$ .

Norma ČSN EN 1991-1-7 (2007), příloha D uvádí, že lze dobu trvání maximální hodnoty tlaku uvažovat hodnotou 0,2 sekundy. Maximální hodnota tlaku je ve skutečnosti větší, avšak doba jeho trvání kratší. Rozumným přiblížením je tedy uvážit účinky většího tlaku z obou výše uvedených vztahů (4-17), (4-18).

Příloha A k ČSN EN 1991-1-7 (2007) poskytuje zcela nově pravidla a metody pro navrhování budov s ohledem na omezení poruchy v případě nehodové situace. Konstrukce se třídí podle účelu a možných rizik do tří kategorií (CC1 – CC3), jak bylo uvedeno výše.

#### *Posouzení sloupu v budově*

Uvažuje se obytný úsek v mnohopodlažním domě. Rozměry úseku jsou 8 × 14 m a světlá výška podlaží 3 m. Dvě krátké stěny v průčelí jsou provedeny ze skla a dalších lehkých materiálů, mohou se tedy uvažovat jako výfukové oblasti; tyto

stěny nejsou nosné. Dvě kolmé stěny jsou betonové, tyto stěny jsou namáhané účinky svislých zatížení a zajišťují boční stabilitu konstrukce. Objem prostoru v a plochu výfukových prvků  $A_v$  lze v tomto případě stanovit:

$$A_v = 2 \times 8 \times 3 = 48 \text{ m}^2, \quad v = 3 \times 8 \times 14 = 336 \text{ m}^3$$

Součinitel  $A_v/v$  se vypočítá ze vztahu:

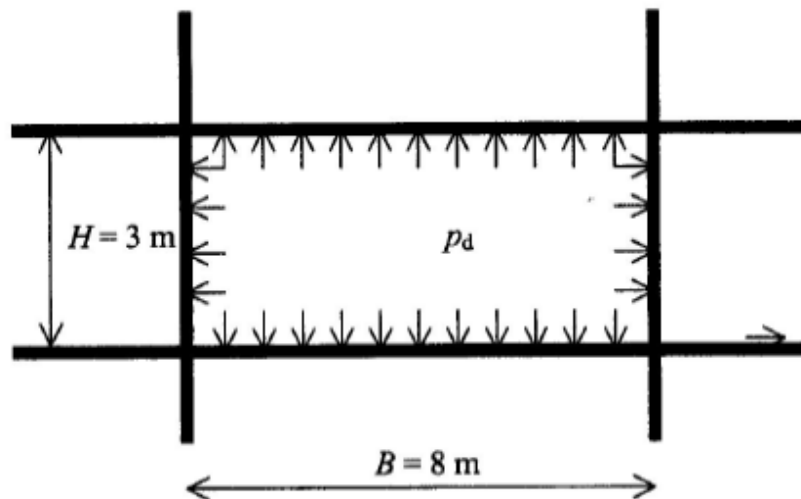
$$A_v/v = 48 / 336 = 0,144 \text{ m}^{-1}$$

Protože  $v < 1000 \text{ m}^3$  a  $A_v/v$  je v rozmezí (0,05 až 0,15)  $\text{m}^{-1}$ , je dovoleno použít zatížení podle normy ČSN EN 1991-1-7 (2007). Tlak, při kterém se výfukové prvky poruší, se odhaduje na  $3 \text{ kN/m}^2$ . Je třeba zdůraznit, že tyto prvky jinak odolávají návrhovému zatížení větrem  $1,5 \text{ kN/m}^2$ . Ekvivalentní statický tlak pro vnitřní explozi zemního plynu je daný vztahy (4-17) a (4-18). Uvažuje se vyšší hodnotou:

$$p_{Ed} = 3 + p_v = 3 + 3 = 6 \text{ kN/m}^2, \text{ popř.}$$

$$p_{Ed} = 3 + p_v/2 + 0,04 / (A_v/V)^2 = 3 + 1,5 + 0,04 / 0,144^2 = 6,5 \text{ kN/m}^2$$

Uspořádání zatížení pro tlak od výbuchu znázorňuje obr. 4-5. v souladu s ČSN EN 1990 (2003) se vypočtené tlaky kombinují s vlastní tíhou konstrukce a s kvazistálými hodnotami proměnných zatížení.



**Obrázek 4-5: Uspořádání zatížení v místnosti pro případ výbuchu plynu**

### ***Konstrukce podlahy***

Vlastní tíha  $p_G = 3 \text{ kN/m}^2$  podle skladby podlahy a užité zatížení  $q = 2 \text{ kN/m}^2$ . To znamená, že návrhové zatížení (4-16) od výbuchu lze stanovit:

$$p_{da} = p_G + p_E + \psi_2 q = 3,00 + 6,50 + 0,5 \times 2,00 = 10,50 \text{ kN/m}^2$$

Pro trvalou návrhovou situaci (za normálních podmínek) platí:

$$p_d = \gamma_G \xi p_G + \gamma_Q q = 0,85 \times 1,35 \times 3,00 + 1,5 \times 2,00 = 6,4 \text{ kN/m}^2$$

Pro mimořádná zatížení není třeba používat dílčích součinitelů při výpočtu odolnosti (součinitele se uvažují rovné 1). z hlediska porovnání bychom tedy mohli za normálních podmínek zvýšit návrhové hodnoty zatížení součinitelem 1,2. Tento výsledek se může pokládat za odolnost konstrukce vůči mimořádným zatížením, jestliže je konstrukce navrhována jen pro běžná zatížení:

$$p_{Rd} = 1,2 \times 6,4 = 7,7 \text{ kN/m}^2$$

Konstrukce podlahy navržená pro normální podmínky může být asi o 30 % lehčí. Jestliže se ve výpočtu uváží, že přírůstek zatížení je krátkodobý, lze zvýšit únosnost součinitelem  $\varphi_d$  (Vrouwenvelder, 2005)

$$\varphi_d = 1 + \sqrt{\frac{p_G}{p_{Rd}}} \sqrt{\frac{2u_{max}}{g\Delta t^2}} \quad (4-19)$$

kde  $\Delta t = 0,2$  s je doba trvání zatížení, tíhové zrychlení  $g = 10 \text{ m/s}^2$  a  $u_{max}$  je návrhová hodnota průhybu uprostřed rozpětí při porušení prvku. Tato hodnota samozřejmě závisí na duktilních vlastnostech desky podlahy a zejména na vzájemném spojení se zbytkem konstrukce. Podrobnější popis způsobu odhadu průhybu přesahuje rámec rozsahu této kapitoly, ale lze považovat  $u_{max} = 0,20$  m za věrohodnou návrhovou hodnotu. Odolnost proti zatížení výbuchem může být v tomto případě určena:

$$p_{REd} = \varphi_d p_{Rd} = \left[ 1 + \sqrt{\frac{3}{7,7}} \sqrt{\frac{2 \times 0,20}{10 \times 0,2^2}} \right] \times 7,7 = 12,5 \text{ kN/m}^2 \quad (4-20)$$

V uvedeném případě konstrukce podlahy vyhovuje a není nutné ji zesílit s ohledem na zatížení výbuchem.

### ***Stropní konstrukce***

Tato konstrukce může být zároveň konstrukcí podlahy pro následující patro. Návrhové zatížení od výbuchu je v tomto případě dáno (působení tlaku vzhůru má směr kladný):

$$p_{da} = p_G + p_E + \gamma_Q \psi q = -3,00 + 6,50 + 0 = 3,50 \text{ kN/m}^2$$

Zatížení je tedy poloviční ve srovnání se zatížením konstrukce podlahy, avšak způsobí větší problémy. Zatížení totiž působí v opačném směru než vlastní tíha a užitná zatížení. Tady se odolnost může blížit nule. v mezipodporové části je potřebná horní výztuž, v oblasti podepření spodní výztuž. Požadovanou odolnost lze nalézt ze vztahu (4-19) pro tlak  $p_{Rd}$

$$\varphi_d p_{Rd} = \left[ 1 + \sqrt{\frac{p_G}{p_{Rd}}} \sqrt{\frac{2u_{\max}}{g\Delta t^2}} \right] p_{Rd} = 3,50 \text{ kN/m}^2$$

Jestliže se bude opět předpokládat  $p_G = 3 \text{ kN/m}^2$ ,  $\Delta t = 0,2 \text{ s}$ ,  $g = 10 \text{ m/s}^2$ , pak tlak  $p_{Rd} = 1,5 \text{ kN/m}^2$ . Nutná plocha výztuže je asi 25 % výztuže vypočtené za normální podmínky na opačné straně.

Další důležitou skutečností je uvážit velikost reakce v podpoře. Konstrukce podlahy by totiž mohla být nadzvednuta ze svých podpor, zvláště v posledních dvou horních podlažích budovy, kde jsou normálové síly ve stěnách malé. Krajní stěny jsou z tohoto hlediska ještě více zranitelné. Nadzvednutím se může změnit statický systém, který může vést k rozdílným účinkům zatížení, ale také k možnému uvolnění stěn. Jestliže spojení podlahy se stěnou odolá účinkům zvedajících sil, je třeba ověřit, že také stěna je na tyto účinky navržena.

### **Stěny**

Předpokládají se stěny oboustranně vetknuté tloušťky 0,2 m. Ohybový moment na délce  $b = 1 \text{ m}$  lze vypočítat na základě vztahu:

$$M = 1/16 p_E H^2 b = 1/16 \times 6,5 \times 3^2 \times 1 = 4 \text{ kNm}$$

Jestliže se neuváží působení normálové síly ve stěně, potřebné oboustranné vyztužení bude asi 0,1 procenta. Odpovídající ohybová únosnost se odhadne:

$$M_p = 0,8 d \frac{\omega b d f_y}{2} = 0,8 \times 0,2 \frac{0,001 \times 1 \times 0,20 \times 300000}{2} = 5 \text{ kNm}$$

Jestliže exploze nastane v horním podlaží budovy a je zajištěno vhodné spojení mezi střešní konstrukcí a horními stěnami, ve stěnách budou působit tahové síly vyžadující přídatnou výztuž.

V uvažovaném případě budou tahové síly

$$(p_E - 2 p_G) B/2 = (6,5 - 2 \times 3) \times 4 = 2 \text{ kN/m pro střední stěnu a}$$

$$(p_E - p_G) B/2 = (6,5 - 3) \times 4 = 14 \text{ kN/m pro krajní stěnu.}$$

Jestliže k výbuchu dojde na jednom, a to na horním podlaží, obvykle nejsou k dispozici dostatečné normálové síly od vlastní tíhy a účinky těchto normálových sil je nutné přenést vloženou výztuží. v případě spodního podlaží lze uvážit osovou sílu, která působí v tlaku.

#### 4.6 POSUZOVÁNÍ ÚČINKŮ VÝBUCHU PODLE KRITÉRIÍ

Je-li znám přetlak od výbuchu, lze odhadnout pravděpodobné škody na konstrukci. Tyto odhady dávají do souvislosti typ konstrukce, její rozměry, případně osazení poškozených prvků v konstrukci, včetně vlivu materiálových vlastností konstrukce a tlakových účinků výbuchu.

**Tabulka 4-4: Poškození objektů a osob přetlakem  $p_+$  ve vzdušné rázové vlně od účinků výbuchu**

$p_+$ [kPa]	Účinek	Příklady objektů
do 0,5	Žádné poškození	Obytné a kancelářské budovy
0,5 ~ 1	Malé poškození okenních výplní (pouze část, praskliny skel bez vysypání trosek ap.)	
1 ~ 2	Větší poškození okenních výplní, dílčí vysypání trosek skel	
3,5	Většina zasklení rozbita, vážná poškození lehkých příček, odtržení střech přístřešků	
2 ~ 5	Částečné poškození rámu dveří a oken; porušení omítky a vnitřních dřevěných příček	
7,5	Úplné rozbití zasklení, poškození dveří a oken, trhliny ve zděných příčkách	
5 ~ 20	Zničení oken; poškození lehkých staveb	Běžné zděné konstrukce a lehké halové konstrukce
10 ~ 30	Částečné rozrušení staveb	Menší průmyslové haly; vesnické stavby
20 ~ 30	Značné rozrušení městských staveb	Osamělé obytné budovy, stavby a zařízení
30	Těžká zranění osob, zhroucení nenosných příček, vážné poruchy nosných prvků zděných konstrukcí, propadnutí nebo zřícení střech, převrácení lehkých nákladních automobilů	Stavby obytné a průmyslové, vozidla



$p_+$ [kPa]	Účinek	Příklady objektů
50	Poboření částí nosných prvků zděných konstrukcí, převrácení tanků a těžkých nákladních vozidel	
100 a více	Smrtelná zranění osob na otevřeném prostranství, totální havárie zděných konstrukcí	Destrukce zděných staveb

Pro starší okna s poškozeným dřevem rámců nebo okenních či dveřních zámků může dojít k vylomení dřeva při mnohem menších přetlacích výbuchu. Okna v místě okenních závěrů (zadlabané otvory pro jazýčky, okenní tyče ap.) mívají plechové kování. Toto kování zvyšuje únosnost spoje.

Možným vlivem na porušení skla je také deformace okenního křídla ohybem. Pokud je ohybová únosnost měkkého dřeva překročena, může dojít k lámání rámu okenního křídla. Při velkých deformacích rámu, které mohou nastat u tenkých dřevěných profilů okenních křídel nebo i u ocelových či plastových rámců, zpravidla dojde i k překročení ohybové únosnosti skla, jejímž důsledkem jsou vodorovné praskliny skla v místě největšího napětí (tedy ve výše uvedeném případě ve středu rozpětí) a tím i k poklesu únosnosti celé okenní tabule. Dalším stavem porušení může být vytržení celého okna z obvodové zdi. v tomto případě záleží na způsobu kotvení okna ve zdi pomocí lavičníků, ozubů ve zdi ap.

Na základě těchto poznámek je zřejmé, že tab. 4-4 udává pouze pravděpodobný odhad účinků výbuchu na konstrukce tohoto typu. u nových konstrukcí může být únosnost oken a dveří i o 50% vyšší než výše uvedená. Naopak při starších oknech nebo dveřích, v závislosti na míře jejich opotřebení, může být jejich únosnost výrazně nižší, někdy i pouze 10% až 20% únosnosti uvedené výše.

## 5 VLASTNOSTI STAVEBNÍCH MATERIÁLŮ PŘI DYNAMICKÉM ZATÍŽENÍ

### 5.1 ÚVOD

Stavební materiály, ať již uměle vyrobené (kovy, beton) nebo přírodní (kámen, dřevo) jsou dlouhodobě hodnoceny především z hlediska základních fyzikálně mechanických vlastností, a to pevnosti v tlaku, pevnosti v tahu a v tahu za ohybu. s menší četností je již hodnocen modul pružnosti nebo koeficient příčného přetvoření. Zkoumají se vlivy typu a skladby materiálu na tyto parametry a jejich statistický rozptyl.

Studium chování a vlastností materiálů při dynamickém zatížení je nepoměrně experimentálně i časově náročnější a proto i rozsah experimentálních prací je významně menší. Je to dáno i tím, že chování materiálů při dynamickém zatížení je ovlivněno celou řadou okrajových podmínek, a to zejména skladbou a charakterem mikrostruktury materiálu. Získané výsledky lze proto obtížně extrapolovat na betony či kovy jako celek. Přesto zejména v oblasti ocelových, ale i železobetonových konstrukcí byly vytvořeny v posledních padesáti letech jak teoretické modely, tak i praktické návody, jak dimenzovat konstrukce vystavené dynamickému zatížení.

Je zřejmé, že dynamické zatížení vyvolává únavu materiálu, kterou můžeme charakterizovat jako proces degradačních změn v jeho mikrostrukturu. v betonu se tyto změny připisují především růstu mikrotrhlin, které vedou k nárůstu nevratných deformací. Na makro úrovni se pak únava projevuje změnou mechanických vlastností betonu.

Dynamické – únavové zatížení se obvykle dělí do dvou oblastí, a to na nízko a vysokocyklické. Nízkocyklické zatížení se vyznačuje obvykle menším počtem zatěžovacích cyklů při vysokých úrovních napětí, naproti tomu pro vysokocyklické zatížení je typický velký počet zatěžovacích cyklů spíše při malých úrovních napětí. Ne všechna dynamická namáhání lze kvalifikovat jako únavová. o vysokocyklové únavě se mluví od cca  $10^4$  cyklů výše, pro nízkocyklovou únavu je charakteristické velké namáhání, přesahující mírně mez kluzu, s počtem cyklů kolem 1000. Pro namáhání opakovanými výbuchy nebo zemětřesením (opakované velké a střídavé plastické deformace řádu desítek cyklů) zatím není terminologie ustálená.

U konstrukcí zatížených výbuchem je situace zcela specifická. Jedná se většinou o jednorázové namáhání a i když jeho charakter je dynamický, k únavovým jevům nemůže docházet. Přesto i tento zatěžovací scénář úzce souvisí s šířením

trhlin v mikrostruktuře materiálu. Schopnost materiálu odolávat ve větší či menší míře dynamickému účinku výbuchu bude tedy především záviset na jeho schopnosti blokovat šíření trhlin, které při impulsním všesměrném silovém účinku bude mít tendenci vznikat.

Vlastní šíření trhlin se řídí poměrem dvou významných veličin, a to hnací síly trhliny a odporu proti šíření trhliny. Otázkou u každého materiálu zůstává, jaké faktory ovlivňují odpor proti šíření trhliny. Obecně hovoříme o houževnatosti materiálu, v případě oceli udávanou např. jako odolnost proti křehkému lomu. s rozvojem ocelových, zejména svařovaných, konstrukcí se ukázalo, že únosnost není v řadě případů určována jen mezí kluzu, ale zejména odolností proti iniciaci lomu z defektní či vrubové oblasti. Vznikla tak nová vědní disciplína lomová mechanika a paralelně s jejím vývojem i nový materiálový parametr lomová houževnatost.

Podnětem ke studiu těchto jevů byly především velké havárie ocelových konstrukcí i lodí před i po druhé světové válce. Měření lomové houževnatosti umožňuje nový pohled na hodnocení použitelnosti stavebních materiálů a v současnosti jsou tato měření prováděna prakticky na všech typech stavebních hmot, které jsou vystaveny dynamickému zatížení.

Současně s tím se hledají všechny možnosti, jak u jednotlivých stavebních materiálů zvýšit lomovou houževnatost, tedy odolnost vůči vzniku a šíření trhlin. i u relativně křehkých silikátových materiálů, jako je např. keramika, toho lze dosáhnout například zásahy do mikrostruktury, které zvýší drsnost lomových ploch, případně vedou k jejich větvení. Jinou možností je zvýšení houževnatosti křehkého materiálu přemostěním trhlin disperzní vláknovou výztuží. v případě vyšší pevnosti a modulu pružnosti vláken v porovnání s matricí se zatížení přeneso z matrice na vlákna a ta brzdí rozevření i další šíření trhlin. k porušení vláken dochází, ale významně později. Energie se spotřebovává i na vytahování vláken z matrice. Např. použitím karbidových vláken ve skle lze zvýšit houževnatost materiálu až 40krát.

Naopak odolnost materiálů vůči šíření trhlin snižují strukturní defekty, v jejichž okolí se koncentruje napětí. To je typické např. pro beton, který je silně heterogenní. Rozdíly mezi moduly pružnosti matrice, hrubých frakcí kameniva i vzduchových pórů jsou řádové. v oblasti kontaktu těchto fází tak vznikají koncentrace napětí, které převyšují mez pevnosti matrice, i když vnější nominální napětí působící na konstrukční prvek je hluboko pod mezí pevnosti.

Z uvedených skutečností je zřejmé, že pro rizikové konstrukce potenciálně vystavené účinkům výbuchů je nezbytné volit materiály s vysokou rázovou houževnatostí, materiály bez mikrostrukturních vad, vrubů a defektů a provést

taková konstrukční opatření, která mohou šíření trhlin účinně blokovat (např. použití uhlíkových kompozitních tkanin). Samozřejmostí u takovýchto konstrukcí by měla být i průběžná defektoskopická kontrola. Jakékoliv defekty totiž snižují rázovou houževnatost materiálu i odolnost konstrukce vůči rázovému dynamickému zatížení jako celku.

Vzhledem k tomu, že však zatížení konstrukce výbuchem je jak z hlediska intenzity, tak směru působení prakticky nepředvídatelné, je efektivní navržení konstrukce na takového účinky možné jen ve zcela výjimečných případech.

Předpokládaným scénářem je naopak situace, že navržená konstrukce je vystavena obtížně kvantitativně specifikovatelnému výbuchu a je dodatečně nezbytné posoudit porušení konstrukce a jeho vliv na další bezpečnost a funkčnost objektu. v dalším textu jsou proto uvedena základní doporučení pro identifikaci fyzikálně mechanických parametrů materiálů postižených výbuchem i konstrukce jako celku. Vhodné použití těchto postupů by mělo umožnit nejen posouzení další využitelnosti konstrukce, ale i identifikaci oblasti, kde k výbuchu došlo, a případně i míry jeho intenzity.

## ***5.2 POSOUZENÍ STAVU MATERIÁLŮ PO PŘESTÁLÉM VÝBUCHU***

Silový účinek, který je obvykle s výbuchem spojen a který vyvolá napětové stavy, na které není konstrukce nebo konstrukční prvek dimenzován, vyvolá vznik především různě četných a velikých trhlin. Základním úkolem při stavebně technickém průzkumu konstrukce po výbuchu je tedy právě identifikace těchto trhlin, a to buď přímo, což je velmi obtížné, nebo nepřímo na základě nejrůznějších fyzikálně mechanických parametrů. Při této identifikaci je třeba pokud možno porovnávat materiál z oblasti postižené silovým účinkem a z oblasti, která byla vystavena pouze standardnímu namáhání. Pokud není možné provést toto paralelní porovnání, budou zjištěné výsledky vždy zatíženy větší chybou.

## ***5.3 ODBĚR A ZKOUŠKY JÁDROVÝCH VÝVRTŮ***

Pro studium stavu materiálu v konstrukci je nezbytné, aby z vybraných konstrukčních prvků byly odebrány vzorky materiálu, a to vždy co nejcitlivějším způsobem. Nepřipadají proto v úvahu destruktivní procesy jako je příklepové sekání, ať již elektrickými nebo pneumatickými bouracími kladivy. v tomto případě by mohly ve vzorcích materiálů vzniknout poruchy právě v důsledku tohoto postupu.

Použitelnějším způsobem je řezání betonu nebo zdiva diamantovými řeznými kotouči osazenými na úhlové brusce. Tento postup je však spojen s vývinem značného množství prachu a je jen omezeně použitelný pro odběr vzorků z hlubších podvrchových vrstev. Nejběžnější technicky i finančně dobře dostupnou technologií je proto v současnosti tzv. jádrové vrtání.

Pro odběr vzorků se využívají především lehké přenosné jádrové soupravy osazené elektromotory s výkonem 2 až 3 kW, které umožňují standardní používání jádrových vrtáků o průměru do 100 mm, výjimečně do 150 mm. Jádrová vrtačka těchto parametrů potřebuje přípojku proudu o napětí 220 V. Vrtání se provádí s tzv. vodním výplachem a spotřeba vody na odvrtání jádrového vývrtu u průměru 50 mm a délky 30 cm se pohybuje na úrovni 10 až 20 l. Při tomto vrtání nevzniká tedy prach, ale je potřeba počítat s ovlivněním oblasti vodním výplachem. Problém může nastat v situaci, kdy jádrové vrtání je prováděno v oblasti, kde jsou v dosahu rozvody elektrického proudu nebo aparatury trvale pod napětím.



**Obrázek 5-1: Vrtačky pro odběr jádrových vzorků**

Při odběru vzorků z železobetonových konstrukcí se postupuje tak, že se nejprve magnetickým indikátorem výztuže vyhledá poloha výztužných prutů a místo odběru se zvolí tak, aby výztuž nebyla zbytečně porušena. s tím také souvisí použitý průměr jádrové korunky. Při stavebně technickém průzkumu se nejčastěji volí průměr v intervalu od 50 do 80 mm. v případě, že prioritním cílem odvrtů je získat jádrové vývrty pro objektivní stanovení pevnosti betonu v tlaku (zatřídění betonu), je nezbytné volit průměru v intervalu 100 až 150 mm.

Jádrový vývrt se ihned po vyjmutí z konstrukce přesně popíše (název akce, číslo vzorku, datum odběru) a současně se zkušební místo zaznamená do terénního

náčrtu nebo jiné dostupné dokumentace. Vzhledem k tomu, že plášť jádrového vývrtní poskytuje možnost studia skladby a struktury betonu, není ideální přímý popis pláště jádrového vývrtní např. lihovými fixy. Vhodnější je balení jednotlivých vývrtní do PE obalů s tím, že do obalů jsou vloženy výše uvedené informace.

Po ukončení odběru se všechny jádrové vývrty, pokud není dohodnuto jinak, zaplní rychle tuhnoucí správkovou maltou tak, aby místa odběru nebyla v budoucnu zdrojem poruch nebo korozní degradace materiálu.

Místa pro odběr jádrového vývrtní musí být volena se znalostí statiky posuzované konstrukce a o jejich poloze a četnosti by tedy měla rozhodovat osoba se znalostmi v této oblasti nebo by měl být konzultován projektant statik, který je s objektem podrobněji seznámen.

Cílem je, aby nebyla jádrovými vývrty zbytečně narušována staticky citlivá místa a zeslabovány zejména tenkostěnné prvky. Velká opatrnost je nezbytná zejména u subtilnějších tlačných prvků. v případě ohýbaných prvků je vhodné vzorky odebírat z oblasti kolem neutrální osy v partiích, kde se nevyskytují ani maximální momenty či posouvající síly.

### **5.3.1 Laboratorní zpracování jádrových vývrtní**

Jádrové vývrty se v laboratoři nejprve omyjí a fotograficky zdokumentují s příslušnými popisky tak, aby nemohlo dojít k záměně jednotlivých vzorků. Jádrové vývrty se v této souvislosti očíslovají pokud možno tak, aby tím nebylo znemožněno následné pozorování mikrostruktury materiálu. Kromě fotografické dokumentace je třeba provést popis struktury pláště jádrových vývrtní, který se musí zaměřit na:

- a) charakterizaci skladby betonu,
- b) charakterizaci petrografického typu použitého hrubého kameniva,
- c) charakterizaci maximálního zrna kameniva,
- d) charakterizaci četnosti a velikosti vzduchových pórů,
- e) charakterizaci výskytu trhlin v cementovém tmelu, případně zrnech kameniva,
- f) charakterizaci tloušťky a míry degradace povrchových oblastí.

Po provedení tohoto popisu se čela jádrových vývrtní odříznou na okružní pile osazené diamantovým řezným kotoučem. Odřezky se popíší a uschovají. Získané válcové těleso se pak změří a zváží tak, aby mohla být stanovena objemová hmotnost materiálu. Takto připravený jádrový vývrt je tak připraven

k provedení dalších zkoušek, kterým může být v závislosti na jeho délce (štíhlostním poměru):

- stanovení pevnosti betonu v tlaku,
- stanovení pevnosti v tahu,
- stanovení modulu pružnosti,
- stanovení vodotěsnosti,
- stanovení mrazuvzdornosti.

### 5.3.2 Stanovení pevnosti v tlaku

Ke stanovení pevnosti v tlaku je nezbytné zaříznutý jádrový vývrt okoncovat nebo jeho tlačné plochy upravit takovým způsobem, aby byla zajištěna dostatečná rovinnost tlačných ploch a byly splněny podmínky ČSN EN 12 504-1 (2001), ČSN EN 12 390-1 (2001), ČSN EN 12 390-3 (2002) a ČSN EN 12 390-4 (2001). Nejefektivnějším postupem u materiálu s pevností do 60 MPa je použití tzv. koncování rychletuhnoucí síropopílkovou směsí podle ČSN 73 1329 (1989). Síropopílková směs připravená podle této normy se při nahřátí na teplotu cca 120 až 130 °C promění v kapalinu, která se v přiměřeném množství nalije do speciálního duralového koncovacího přípravku (viz obr.5-2), do kterého se vzápětí vloží zaříznutý jádrový vývrt. Rychlý odvod tepla způsobí, že tato směs velmi rychle zchladne a prakticky okamžitě nabude konečných mechanických vlastností, tj. pevnosti v tlaku 50 až 60 MPa. Vznikne tak prakticky ideální rovná a hutná tlačná plocha, která je zárukou dobrého přenosu vnější síly z tlačné desky zkušebního stroje do vzorku.



**Obrázek 5-2: Fotografie koncovacích přípravků**

Vlastní provádění tlakové zkoušky se řídí výše citovanými normami. Informace o provádění tlakové zkoušky lze nalézt i ve starší ČSN 73 1317 (1897). Při interpretaci získaných výsledků je třeba vzít v úvahu řadu faktorů, které objektivnost a reprodukovatelnost získaných výsledků ovlivňují. Jedná se zejména o dodržení těchto požadavků:

- geometrii zkušebního tělesa, jeho velikost a štíhlost,
- poměr velikosti maximálního zrna kameniva v betonu k velikosti zkušebního tělesa,
- vztah směru působící síly při zkoušce pevnosti v tlaku a směru hutnění,
- rovinnost tlačných ploch,
- vlhkost zkušebních těles.

Porovnáme-li statisticky vyhodnocené soubory pevností v tlaku s oblastí postižených atypickými silovými účinky a porovnáme je se souborem vzorků z oblastí, které nebyly dotčeny, je možné posoudit míru vlivu těchto účinků na stav materiálů. Je třeba zdůraznit, že pevnost v tlaku však je na výskyt trhlin v mikrostruktuře materiálu výrazně méně citlivá než pevnost tahová. Proto je nezbytné prakticky vždy při stanovování pevnosti v tlaku stanovovat i pevnosti tahové.

Pokud by získané výsledky měly být použity pro statický přepočít i další kvantitativní hodnocení únosnosti a funkčnosti konstrukce, je nezbytné, aby byly dále přiměřeně statisticky jištěny. Ve statickém výpočtu nelze v žádném případě pracovat s hodnotami získanými přímým měřením. Následně je nezbytné odvození tzv. garantované pevnosti, tedy pevnosti, která garantuje, že její hodnota bude v důsledku statistického rozptylu podkročena jen s nízkou, přesně definovanou pravděpodobností.

### **5.3.3 Stanovení pevnosti v tahu**

V pevnosti tahové rozeznáváme tzv. pevnost v tahu za ohybu, kterou však můžeme stanovovat jen na trámcích přiměřené délky, tedy štíhlosti optimálně  $\lambda = 4$ . u jádrových vývrtů je stanovení ohybové pevnosti vyloučeno. Na jádrových vývrtech se proto prioritně stanovuje pevnosti betonu v prostém tahu, případně tzv. pevnost v příčném tahu.

Stanovení pevnosti v prostém tahu vyžaduje, aby na čela válcových těles byly nalepeny kovové odtrhové terče a jejich prostřednictvím pak vzorek upnut do tahového zkušebního stroje. Tahový zkušební stroj musí mít přiměřený rozsah a citlivost, odpovídající skutečnosti, že tahové pevnosti betonu jsou na úrovni 5 % až 10 % pevnosti tlakové.



S ohledem na vyšší pracnost takovýchto zkoušek se u jádrových vývrtů velmi často stanovuje pevnost v příčném tahu. Její uspořádání je výrazně jednodušší. Jádrový vývrt se vloží do tlakového zkušebního stroje ve vodorovné poloze a mezi tlačné desky a plášť jádrového vývrtu se umístí přímkové dřevěné nebo kovové mezivložky. Postupným zatěžováním těchto mezivložek dojde následně k „přeštípnutí“ jádrového vývrtu. Výhodou zkoušky je především, že může být provedena v jednoduchém tlakovém zkušebním stroji. Vzhledem k tomu, že však lomová plocha je však jednoznačně definována polohou mezivložek, probíhá i zrny hrubého kameniva. Tahové porušení proto neprobíhá pouze maltovým tmelem nebo ve styčné oblasti mezi maltovým tmelem a hrubými zrny kameniva, jak je tomu většinou v případě pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tahu.

Pevnost v tahu za ohybu je přibližně 1,5 krát větší než pevnost v příčném tahu a pevnost v prostém tahu je přibližně na úrovni 75% pevnosti v tahu příčném. Tyto poměry se však výrazně mění v závislosti na pevnosti betonu. u tahových pevností platí, že mají i u nepoškozených těles výrazně větší směrodatnou odchylku a variační koeficient než pevnosti tlakové. Hodnoty variačního koeficientu se u těles odebraných z konstrukce mohou u tahových pevností pohybovat v intervalu obvykle 20 až 30 %. Zároveň však jsou tahové pevnosti mimořádně citlivé k jakýmkoliv poruchám i mikroporuchám ve struktuře betonu. Pokud je tedy cílem odhalit narušení struktury betonu mikrotrhlinami, je provedení tahových zkoušek zcela nezbytné!

### **5.3.4 Stanovení modulu pružnosti**

Experimentální stanovení modulu pružnosti statickou zkouškou, a to ať v tlaku nebo tahu, vychází z elementární definice modulu pružnosti. v průběhu zkoušky se na jednotlivých zatěžovacích stupních zjišťuje kromě působící síly (napětí) délková deformace zkušebního tělesa, která se převádí na bezrozměrnou poměrnou deformaci ( $\varepsilon$ ). z definice modulu pružnosti vyplývá, že se jedná o tangentu úhlu, kde protilehlou odvěsnou je hodnota napětí, přílehlou odvěsnou pak poměrná deformace. Čím strmější je tzv. pracovní diagram, tím větší je tangenta úhlu, resp. modulu pružnosti a naopak.

Použijeme-li ke stanovení modulu pružnosti dostatečně citlivý elektronicky řízený zkušební stroj, můžeme velmi dobře popsat i tzv. sestupnou část pracovního diagramu, tedy oblast za mezí pevnosti.

Pro identifikování strukturních poruch (trhlin) může dobře posloužit i vyhodnocení jednotlivých zatěžovacích stupňů, na kterých se zjišťuje trvalá a pružná část deformace. Porovnáním pracovních diagramů materiálu, narušeného

strukturními poruchami, a téhož materiálu bez strukturních poruch lze jednoznačně charakterizovat míru poškození betonu.

Tato zkouška může být doplněna i o měření příčných deformací, které následně umožňují vyčíslit objemové změny betonu ve vztahu k úrovni vnějšího napětí. Tento „pracovní diagram“ tak umožňuje sledovat v průběhu zatěžování vývoj trhlin právě prostřednictvím změn objemu zkušebního tělesa. Po počáteční, obvykle registrované, kompresi (zmenšení objemu) nastává v okamžiku tzv. spodní hranice rozvoje mikrotrhlin nárůst objemu, který lze interpretovat pouze jako důsledek zvětšování objemu tělesa jako součtu objemu pevné fáze a postupně se rozvíjejících se trhlin.

Metodicky se přitom jedná o relativně jednoduchý zkušební postup, který v případě stanovení modulu pružnosti materiálu vyžaduje pouze tlakový zkušební stroj a deformetry na jakémkoliv principu. s ohledem na velikost těles se nejčastěji používají lepené tenzometry, které lze dobře umístit i na tělesa menších rozměrů či tělesa nenormová.

#### **5.4 ODTRHOVÉ ZKOUŠKY**

Odběr jádrových vývrtů, popsáný v kapitole 5.3 je poměrně značným zásahem do konstrukce. Vzhledem k tomu, že při identifikaci strukturních poruch mají zásadní význam především tahové pevnosti, je v tomto případě velmi účinným nástrojem stanovení tzv. pevnosti v tahu povrchových vrstev odtrhovými zkouškami. Jedná se o postup, který sice postihuje pouze povrchové oblasti konstrukce, ale jeho vypovídací schopnosti v tomto ohledu jsou velmi dobré.



**Obrázek 5-3: Fotografie odtrhové aparatury DYNA a odebrané vzorky**

Zkouška se provádí tak, že se na náhodně vybraných zkušebních místech odstraní tenká povrchově znečištěná a zdegradovaná vrstva (obvykle lehkým obroušením) a na takto připravený podklad se přilepí dvousložkovým rychletuhnoucím lepidlem duralový odtrhový terč. Jeho půdorys je obvykle kruhový o průměru 50 mm, případně čtvercový s půdorysnými rozměry 50 × 50 mm. Po vytvrzení lepidla se k odtrhovému terči připojí malým táhlem přenosná odtrhová aparatura, např. DYNA z 15 (viz obr. 5-3), která umožňuje plynule vyvozovat tahovou dílu kolmou k podkladu a registrovat mezní sílu na mezi porušení. z mezní síly a plochy zkušebního terče lze pak vyčíslit tahovou pevnost. Relativní jednoduchost této metody umožňuje provádět tahové zkoušky s vysokou četností a získat tak statisticky výrazně reprezentativnější informace než v případě vždy omezenějšího odběru jádrových vývrtů.

Provádění odtrhových zkoušek se velmi osvědčilo při identifikaci tzv. alkalické reakce kameniva v betonu. Jedná se o skrytý destruktivní proces, jehož příčinou je postupná reakce alkálií přirozeně obsažených v cementu a některých petrografických typů kameniva (zejména tzv. amorfni křemen). Výsledkem této reakce je vznik alkalicko-křemičitých gelů, které mají větší objem než fáze vstupující do reakce. Tento zvětšený objem vyvolává postupné předpětí mikrostruktury betonu, které po překonání jeho tahové pevnosti vede ke vzniku trhlin a nevratného poškození struktury betonu.



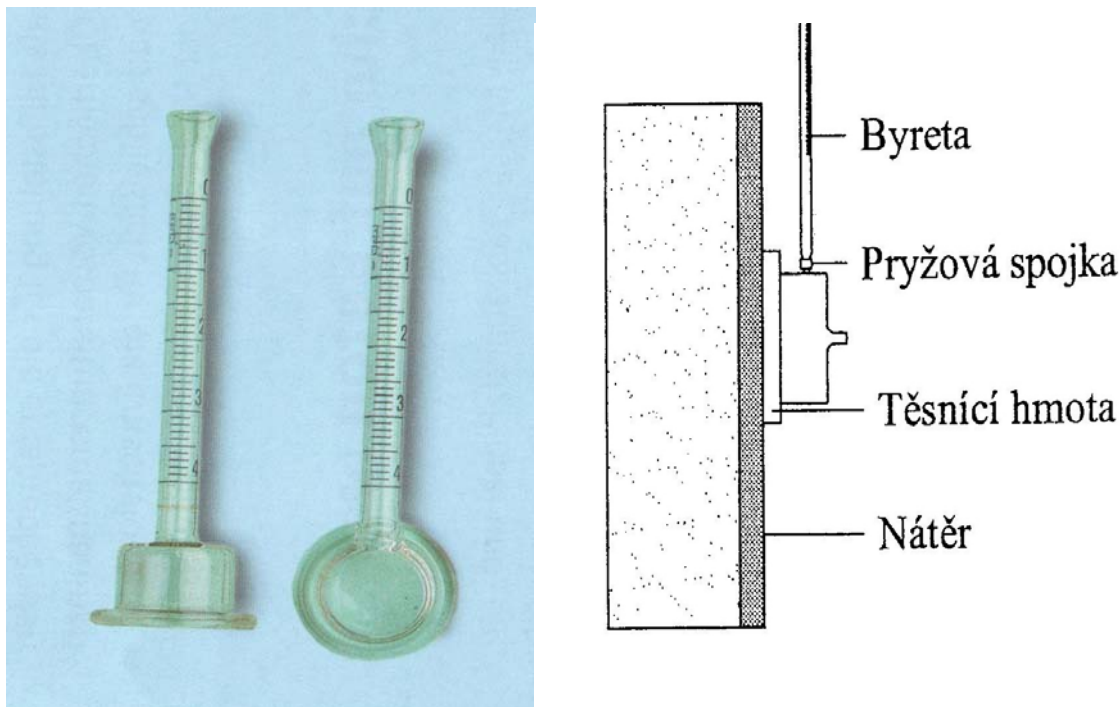
**Obrázek 5-4: Odebrané vozky betonu**

Jedná se tedy o důsledek podobný, který by mohl vyvolat ve struktuře materiálu nepředvídatelný explozivní silový impuls. Vzhledem k tomu, že s identifikací alkalické reakce kameniva v betonu jsou dlouholeté zkušenosti, víme, že stanovování pevnosti betonu v tlaku je i při relativně těžkém poškození mikrostruktury betonu jen omezeně účinné. Naopak stanovování pevnosti v tahu existenci mikrostrukturních poruch prakticky okamžitě odhalí. Za velmi významný indikační faktor lze v tomto případě považovat především poměr tahové a tlakové pevnosti betonu. u běžných konstrukčních betonů se pohybuje

tento poměr v intervalu 1:10 až 1:15. Za situace, kdy tento poměr přestoupí úroveň 1:20 (vyšší jmenovatel), lze důvodně předpokládat, že beton je narušen mikrostrukturními poruchami.

## 5.5 VODOTĚSNOST A NASÁKAVOST

Při studiu mikrostrukturních poruch betonu lze případně využít i některé metodiky, které mají k mikrostrukturním poruchám zcela nepřímý vztah. Jednou z nich je vodotěsnost betonu, tedy metodika, při které se do povrchu zkušebního tělesa (obvykle krychle o hraně 150 mm nebo vývrtu o průměru 150 mm) vtlačuje po dobu 3 dnů definovaným tlakem (5 barů) voda. Po ukončení zkoušky se těleso poruší příčným tahem a hloubka průniku vody pod povrch tělesa se zaměří. Mírou vodotěsnosti je právě tato hloubka.



**Obrázek 5-5: Zkouška vodotěsnosti povrchových vrstev**

Je pravděpodobné, že při poškození struktury betonu trhlinami bude schopnost betonu zamezovat průniku vody zhoršena, a tedy parametr vodotěsnosti může míru poškození mikrostruktury betonu indikovat. Starší experimentální práce však prokázaly, že schopnost vody pronikat trhlinami s menší šířkou než 0,1 mm je při tlacích do 5 barů jen velmi omezená. Proto také i u tzv. vodotěsných konstrukcí se připouštějí trhliny až šířky 0,15 mm. Měření vodotěsnosti by proto mohlo mít při hodnocení mikrostruktury betonu jen okrajový doplňující význam, a to v těch případech, kdy právě vodotěsnost betonu by byla jedním z významných funkčních parametrů (nádrže, přehrad, zásobníky kapalin a plynů apod.). Podobně lze využít i zkoušku vodotěsnosti povrchových vrstev,

kteřá se provádí např. podle ČSN 73 2578 (1981). Vyjadřuje se jako hodnota  $V_{30}$ , tedy jako množství vody prošlé zkoušeným povrchem (povrchovou úpravou) do podkladního betonu v průběhu prvních 30 minut měření. Dobu expozice je možné libovolně prodloužit s ohledem na konkrétní situaci. Zkouška se realizuje tak, že na náhodně vybrané zkušební místo se vodotěsně přitmelí měřicí cela (nádobka), která může být skleněná či plastová a k ní pak následně cejchovaná byreta (obr. 5-5). Po zaplnění tohoto systému vodou je možné na měřítku byrety sledovat průnik vody do pórového systému. Na procesu vsakování se výrazně podílí kapilární pórový systém, resp. jeho kapilární elevace. Možnost identifikace mikrotrhlin v povrchových oblastech tímto způsobem by tedy vyžadovala vysokou četnost provedených dílčích měření.

## **5.6 ULTRAZVUKOVÁ IMPULSOVÁ METODA**

Použití ultrazvuku se zdá logickým nástrojem pro identifikaci mikrostrukturních poruch. u kovových materiálů je tato metoda běžně používána, a to jak ve formě průchozího měření, tak i ve formě tzv. echo metody, tedy identifikace signálu odraženého od poruchy. Tyto metodiky pak byly relativně mechanicky přeneseny do oblasti zkoušení betonu, který je však nesrovnatelně heterogennějším materiálem. Obsahuje jednak obrovské množství různorodých pórů, jejichž velikost se pohybuje od několika nanometrů až do několika mm (vzduchové póry). Tyto póry jsou obsažené v cementové matici s modulem na úrovni cca 10 GPa. Tato fáze pak obsahuje zrna drobného a zejména hrubého kameniva, které podle petrografického typu může mít modul pružnosti v intervalu 60 až 100 GPa. Beton je tedy směsí minimálně tří fází, jejichž modul pružnosti se významně liší (vzduch 0 GPa, maltová matrice – 10 GPa, hrubé kamenivo – 60 až 100 GPa). z toho vyplývá, že na rozhraní těchto fází existuje řada rozhraní, které šíření ultrazvukového signálu značně modifikují.

Kromě toho pórový systém betonu může být v různé míře zaplněn vodou, což šíření ultrazvukového signálu významně ovlivňuje. Starší experimenty, prováděné na modelových betonových vzorcích s různě modelovanými defekty neprokázaly významnější schopnost ultrazvuku identifikovat strukturní poruchy. Významnější výsledky nepřinesla ani podrobnější analýzy spekter prošlých UZ signálů. Změny v mikrostruktuře byly vždy významně překryty vlivem vlhkosti betonu a zejména kvalitou kontaktu mezi budícími sondami a zkušebním tělesem nebo konstrukčním prvkem. v praktických podmínkách proto nelze u betonových a zděných konstrukcí UZ impulsovou metodu k reálnému posuzování stavu narušení struktury materiálu doporučit.

## 5.7 PŘÍMÉ POZOROVÁNÍ MIKROSTRUKTURY MATERIÁLŮ

Velmi efektivním postupem k identifikaci defektů ve struktuře materiálů je přímé pozorování struktury na řezných plochách, získaných např. z odebraných jádrových vývrtů. k tomuto účelu jsou použitelné jednoduché měřicí lupy nebo přenosné mikroskopy (přímé pozorování in situ – obr. 5-6). Pro laboratorní hodnocení struktury betonu je optimální použití tzv. makroskopů, pracujících v odraženém světle. Ideální je varianta s možností proměnlivé změny zvětšení (zoom). Ideální rozsah zvětšení je 10krát až 150krát. v případě požadavku na menší zvětšení vystačíme s klasickými měřicími lupami, v případě většího zvětšení se již jedná o studium mikrostruktury materiálu, kdy informace získané z měřeného místa nepatrné velikosti lze jen obtížně extrapolovat na celý vzorek či konstrukční prvek.



**Obrázek 5-6: Mikroskop pro laboratorní hodnocení struktury betonu**

Efektivitu identifikace trhlin lze zvýšit tak, že se testovaný vzorek proinjektuje speciální hmotou, která se projevuje vysokým kontrastem či pozorováním v UV světle.

Samozřejmostí je možnost elektronického přenosu obrazu na počítačovou obrazovku a případné další softwarové vyhodnocování obrazu, tedy i počtu a orientace trhlin.

Logickým problémem je však extrapolace zjištěných závěrů. Opět je nezbytné k výsledkům přistupovat statisticky a pokud možno porovnávat výsledky zjištěné na materiálu z oblasti dotčené extrémním silovým účinkem a oblastí, která byla vystavena pouze standardnímu namáhání. Porovnáním pak lze dospět k objektivním a dostatečně průkazným závěrům, které umožní charakterizovat intenzitu poškození betonu způsobenou atypickým zatížením. Je třeba vzít v úvahu, že strukturní trhliny jsou přirozenou součástí betonu a vznikají nejen jako důsledek statického či dynamického zatížení, ale i jako důsledek objemových změn cementové matrice i chemických procesů souvisejících s hydratací (tzv. chemické, resp. hydratační smrštění).

## **5.8 POSUZOVÁNÍ STAVU KONSTRUKCE PO VÝBUCHU JAKO CELKU**

Pro charakterizaci stavební konstrukce po výbuchu je kromě identifikace stavu jednotlivých konstrukčních materiálů důležitá charakterizace konstrukce (objektu) jako celku.

Je pravděpodobné, že výbuch části objektu zcela poškodí a možnost dalšího využití těchto partií je prakticky zcela nulová. v okolí výbuchu však budou existovat další části objektu, které vykazují jisté poruchy, ale míra poškození není zásadní. Právě těchto oblastí se stavebně technický průzkum bude týkat především.

S vysokou pravděpodobností se extrémní silové účinky projeví deformacemi konstrukce, částečnou změnou tvaru konstrukce a vznikem trhlin.

Základní okolností, která indikuje atypické deformace objektu, je možnost bezproblémového otevírání dveří a oken. Pokud tyto prvky nefungují zcela bezproblémově, je zřejmé, že daná oblast je více či méně deformovaná. Dalším nepřímým indikačním parametrem jsou poruchy vodovodních, plynových, kanalizačních, případně elektrických rozvodů.

Detailnější informace lze však zjistit jen realizací následujících metod.

### **5.8.1 Mapování trhlin**

Základní metodickou pomůckou je pečlivé systematické ohledání jednotlivých partií objektu a grafický záznam polohy trhlin. Samozřejmostí je fotografická dokumentace, i když fotografování trhlin je v nepříznivých světelných podmínkách velmi obtížné. Součástí tohoto mapování je i zjišťování šířky trhlin, a to buď příložným měřítkem, které je často k dispozici ve formě propagačního předmětu (vizitky), nebo přesnější měřicí lupou se setinovým dělením.

v některých případech je možné trhliny účinně zviditelnit přiměřeným ovlhčením povrchu sprejem nebo citlivým postřikem. v oblasti trhliny se voda díky kapilární elevaci vsakuje do podkladu výrazně intenzivněji a její vysychání trvá následně déle. v důsledku toho zůstanou trhliny déle tmavší ve srovnání se světlejším rychleji vysychajícím okolím.

Získané záznamy je nezbytné systematicky zpracovat a jejich vyhodnocením určit kritické oblasti, případně i pravděpodobné centrum exploze.

Na základě těchto záznamů lze také dodatečně rozhodnout o případném zjištění hloubky trhlin. To je možné efektivně provést pouze provedením jádrového vývrtu v dané oblasti. Jak již bylo zdůrazněno, identifikace polohy nebo hloubky trhlin ultrazvukovou impulsovou metodou je jen problematicky použitelná.



**Obrázek 5-7: Pravítko a lupa pro odečet šířky trhlin**

## 5.8.2 Geodetické metody

Měření vodorovných či svislých deformací a posunů částí konstrukcí se provádí podle ČSN 73 0405 (1997). Měření mohla být krátkodobá jako např. při zatěžovacích zkouškách nebo dlouhodobá.



Svislé posuny a deformace lze měřit:

- geometrickou nivelací,
- fotogrammetrií,
- trigonometrickou nivelací,
- hydrostatickou nivelací.

Podobně vodorovné posuny lze zjišťovat:

- metodou laserové záměrné přímky,
- trigonometrickou metodou,
- fotogrammetrickou metodou,
- přesným polygonovým pořadem.

Kromě svislých a vodorovných posunů je často účelné zjistit i náklon konstrukce. Pro jednoduché stanovení lze použít jednoduchá kyvadla nebo olovnici. Při přesnějším měření se využívá:

- optického provažování,
- teodolitu,
- elektronické libely.

Geodetické metody, resp. sledování přetvoření objektů provádějí většinou specializované organizace nebo geodetické firmy s přiměřenými referencemi v dané oblasti.

## **5.9 ZATĚŽOVACÍ ZKOUŠKY**

Jednou z možností, jak prověřit statickou bezpečnost konstrukce, je provedení zatěžovací zkoušky. Jedná se sice o poměrně náročnou a nákladnou operaci, která však může vyloučit nejistoty vyvolané mnohdy nemožností dostatečně úplně a podrobně popsat poruchy struktury materiálu i konstrukce jako celku. Zatěžovací zkouška může být i efektivní náhradou často spekulativního statického přepočtu konstrukce. Zatěžovací zkoušky se provádějí podle ČSN 73 2030 (1993).

Podle účelu se zatěžovací zkoušky dělí na:

- a) zkoušky, jimiž se prokazuje spolehlivost konstrukce (prototypové, průkazní),
- b) zkoušky, jimiž se periodicky ověřuje spolehlivost konstrukce nebo zkoušky rozhodčí,
- c) zkoušky, kterými se podle ustanovení norem nahrazuje výpočet,
- d) zkoušky studijní a výzkumné.

Hodnocením spolehlivosti konstrukce se zatěžovací zkoušky provádějí:

- a) zatěžováním do dosažení únosnosti konstrukce,
- b) bez dosažení únosnosti konstrukce, přičemž se výsledky zkoušky hodnotí z hlediska:
- c) mezních stavů únosnosti,
- d) mezních stavů použitelnosti (přetvoření, vznik a šířka trhlin).

Před každou zatěžovací zkouškou se provede nejprve předběžný rozbor. Ten musí přesvědčivě potvrdit nezbytnost a účelnost provedené zkoušky. Jsou-li v konstrukci viditelné trhliny nebo jiné viditelné závady, označí se zřetelně na konstrukci a zanesou se do náčrtku i s uvedením rozměru.

Zkouška se nesmí provádět při teplotách nižších než 0 °C. Při zkoušce se průběžně zaznamenává průběh teploty okolního prostředí i teploty přímo osluněných částí zkoušené konstrukce. Při zkouškách betonových, zděných a dřevěných konstrukcí se zaznamenává i průběh relativní vlhkosti okolního prostředí. Pro uspořádání zatěžovací zkoušky má zásadní význam volba druhu zatížení, jeho velikost a doba působení. Všechny tyto parametry musí být přesně specifikovány v projektu zatěžovací zkoušky. o průběhu zkoušky se vede podrobný zápis, který obsahuje všechny získané údaje o prvky nebo konstrukci před zkouškou, plán postupu práce a jeho plnění. Kritéria pro vyhodnocení zatěžovací zkoušky, resp. pro posouzení spolehlivosti konstrukce z hlediska mezního stavu únosnosti i přetvoření a výskytu trhlin jsou obsažena jednak v citované normě, jednak mohou být předmětem specificky formulovaných kritérií. o zatěžovací zkoušce se vypracovává výsledná zpráva, která obsahuje všechny podstatné údaje o přípravě, průběhu i vyhodnocení zkoušky, eventuálně návrh na rekonstrukci nebo sanaci konstrukce.

## ***5.10 CELKOVÉ ZÁVĚRY A DOPORUČENÍ***

Posuzování stavebních konstrukcí, které jsou poškozeny výbuchem, je naštěstí relativně výjimečnou událostí. Proto lze jen obtížně čerpat z dlouhodobých zkušeností či analogií. Jak poškozená konstrukce, tak i charakter výbuchu jsou obvykle v dané situaci obtížně s čímkoliv porovnatelné. Nezbytný je proto tvůrčí přístup jak k vytvoření koncepce stavebně technického průzkumu, tak i k interpretaci zjištěných výsledků. Nezbytná je víceoborová spolupráce, a to jak z hlediska posouzení intenzity a účinků výbuchu, tak i z hlediska jeho dopadu na stavební konstrukci.

Stavebně technický průzkum takto poškozeného objektu by měl proběhnout v několika etapách. Předběžné ohledání objektu by mělo orientačně vymezit rozsah i stupeň poškození v jednotlivých oblastech. Podrobný průzkum s využitím výše popsaných metod pak umožňuje již relativně přesně

charakterizovat poškození objektu. Na základě podrobného vyhodnocení všech získaných informací je pak možné případně navrhnout doplňující zkoušky, případně zkoušky zatěžovací tak, jak je naznačeno v kapitole 3.

Výsledkem by měly být především návrhy na okamžité zabezpečení konstrukce tak, aby nebylo bezprostředně ohroženo zdraví a život osob pohybujících se v objektu, v konečné fázi by pak měl vzniknout projekt sanace, resp. rekonstrukce objektu.

## 6 MĚŘENÍ ODEZVY KONSTRUKCE PŘI VÝBUCHU

### 6.1 ÚVOD

Zatěžovací zkoušky slouží k ověřování spolehlivosti konstrukce v rámci systému k zajištění spolehlivosti konstrukcí, ověření výpočtových modelů, posouzení shody provedení konstrukce s požadavky návrhu a posouzení spolehlivosti stávající konstrukce tam, kde není možné bezpečně zjistit potřebné parametry pro výpočet. Přípravu, provádění a vyhodnocování zatěžovacích zkoušek stavebních konstrukcí upravuje ČSN 73 2030 (1993). Provádění dynamických zatěžovacích zkoušek upravuje ČSN 73 2044 (1984). Tyto normy předepisují zkoušky nezbytné pro ověření nebo přímé stanovení vlastností posuzovaných konstrukcí.

Experimentální vyšetřování odezvy konstrukce na výbuchové zatížení je druhem zatěžovací zkoušky, při kterém je zatížením obvykle silový (např. tlakový) nebo kinematický účinek výbuchu. Po dobu působení zatížení má odezva konstrukce charakter přechodového děje, který podle dominantního projevu může mít podobu spíše kvazistatické deformace nebo dynamické odezvy. Konstrukce je zatížena po určitou dobu, která závisí na druhu výbuchu, vzdálenosti od místa výbuchu a způsobu přenosu jeho účinků. Na konci této fáze je konstrukce v nerovnovážném stavu, který může být popsán např. vektorem výchylek z rovnovážné polohy a vektorem okamžitých rychlostí. Přechod do rovnovážného stavu se realizuje tlumeným kmitáním ve vlastních tvarech.

Cílem experimentálního vyšetřování je popis odezvy konstrukce na zatížení vyvolané výbuchem. Tato úloha má dvě části – popis působícího zatížení a popis odezvy konstrukce na toto zatížení. Tlaková vlna postupující na konstrukci od místa výbuchu se transformuje na zatížení konstrukce. Je to komplikovaný proces, který závisí mimo jiné na tvaru konstrukce, velikosti konstrukce, orientaci konstrukce vzhledem k pohybu tlakové vlny, typu tlakové vlny apod. Výsledkem jsou obecně silové impulsy, které způsobí odezvu konstrukce. Pokud lze odhadnout nebo změřit parametry tlakové vlny, lze z odezvy usuzovat na „efektivnost“ její transformace na zatížení nebo na vlastnosti prostředí, kterým se výbuchem vyvolané vlny šíří směrem ke konstrukci. Druhá část této úlohy se týká účinku transformovaného zatížení na posuzovanou konstrukci. Pokud je zatížení relativně malé (vzdálené výbuchy), jde o lineární úlohu a cílem experimentálních prací je popis odezvy – obvykle maximální rychlost kmitání. Pro velká zatížení je vhodnější pružně plastický přístup k řešení odezvy a cílem experimentálního vyšetřování odezvy je ověřování použitých parametrů a modelů.

## **6.2 DRUHY VÝBUCHŮ**

### **6.2.1 Výbuchy podle způsobu provedení**

Výbuchy v blízkosti konstrukcí lze v prvním přiblížení rozdělit na:

1. Kontrolované odstřely (průmyslové využití výbuchů):

- a) trhací práce (lomy, tunely, doly, zemní práce apod.);
- e) plánované destrukce stavebních objektů.

2. Nekontrolované výbuchy nebo havárie:

ve výrobních provozech nebo skladech (chemičky, speciální výroba);  
při dopravě;  
v obytných domech (např. po úniku plynu).

Pro kontrolované odstřely je charakteristické, že jejich použití upravují příslušné předpisy, jsou evidovány Báňským úřadem a ve většině případů jsou také monitorovány. Za normálních podmínek by účinky odstřelů neměly blízké stavební konstrukce ohrozit.

Příčin nekontrolovaných výbuchů může být mnoho. Například technické závady, mimořádná kombinace náhodných poruch nebo lidský faktor (chyba, porušení předpisů nebo úmysl). Charakteristickými znaky mohou být:

velký účinek výbuchu (množství vybuchující látky nebo narušení statiky objektu);  
závažné doprovodné jevy (požár, zamoření místa výbuchu a jeho okolí);  
špatná předvídatelnost okamžiku výbuchu.

Tyto výbuchy jsou mimořádně nebezpečné jak pro konstrukce, tak pro osoby uvnitř konstrukcí a v jejich okolí. Jedinou ochranou před nimi je důkladné vyhodnocení rizik, preventivní opatření již ve fázi projektu a nepřetržité monitorování nebezpečných provozů. Součástí prevence je i experimentální činnost.

## **6.3 MĚŘICÍ LINKY A JEJICH VLASTNOSTI**

Univerzální měřicí linku na obr. 6-1 tvoří:

snímač (převodník změny měřené veličiny na změnu elektrické veličiny);  
měřicí zesilovač (vyhodnotí velikost změny elektrické veličiny a zesílí ji);  
zařízení pro úpravu signálu (např. frekvenční propust);

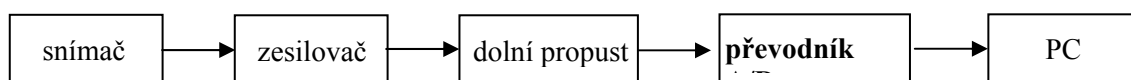
zapisovač měřené veličiny (např. digitalizace záznamu převodníkem A/D a jeho uložení do paměti počítače).

Poznámka 1: Univerzálností měřicí linky je míněna možnost záměny snímačů (různé druhy měřených veličin, různé jmenovité hodnoty apod.), možnost snadné změny zesílení, úpravy amplitudového a frekvenčního rozsahu záznamu, kalibrace záznamového zařízení apod.

Poznámka 2: Převodník A/D je zařízení, které v definovaném časovém okamžiku změří velikost analogového napětí, naměřenou hodnotu vyjádří číslem a odešle ji na sběrnici počítače.

Podle měřené elektrické veličiny lze rozlišit několik typů univerzálních měřicích linek. Např. měřicí linky se:

stejnoseměrným zesilovačem napětí nebo proudu (potenciometrické, tenzometrické, polovodičové nebo piezoelektrické snímače);  
zesilovačem s nosnou frekvencí (tenzometrické a indukční snímače);  
zesilovačem náboje (piezoelektrické snímače);  
korekčním zesilovačem napětí (termočlánky).



**Obrázek 6-1: Univerzální měřicí linka**

Konstrukční provedení měřicích linek mají řadu variant, optimalizovaných pro různé aplikace. Lze nalézt tři základní přístupy:

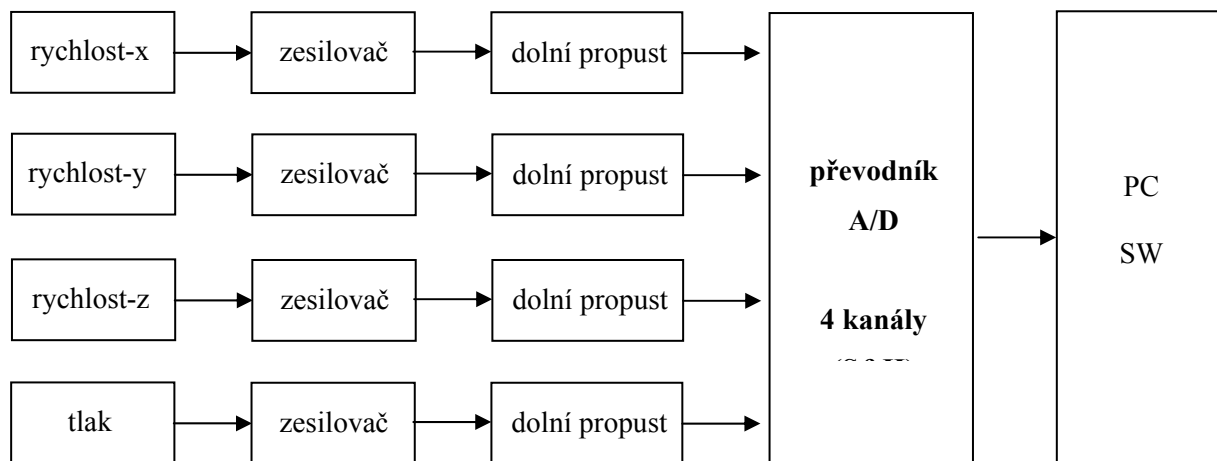
Využití počítače k řízení měřicí linky – umožňuje pružné řízení sběru dat, přesnější kalibraci, optimalizaci měřicího rozsahu, automatické spouštění záznamu měřenou veličinou apod.

Zavádění tzv. „chytrých snímačů“ – do snímače se postupně integruje zesilovač, dolní propust, převodník A/D a rozhraní síťové sběrnice nebo obvody pro bezdrátový přenos dat.

Decentralizace měřicího systému. Systém tvoří samostatné vícekanálové měřicí jednotky s autonomním řídicím systémem a centrální počítač, který jejich práci organizuje a přebírá naměřená data pro další zpracování. Vzájemná komunikace je řešena po vhodné sběrnici nebo bezdrátově.

Měřicí systémy jsou obvykle vícekanálové. Příklad 4kanálového systému pro měření účinků odstřelů ukazuje obr. 6-2. Umožňuje připojení třísluškového snímače rychlosti kmitání a snímače akustického tlaku (dynamický mikrofon). Počet kanálů závisí na vlastnostech převodníku A/D. Vhodné jsou např.

8kanálové převodníky s rozlišením minimálně 16 bitů typu Sample&Hold (paralelní vzorkování všech kanálů) se vzorkovací frekvencí až do 100 kHz/kanál. Možnosti výběru převodníků jsou v současné době velmi široké. Měřicí systém je řízen pomocí vhodných programů, zajišťujících automatické spouštění měřicího systému měřeným signálem, záznam naměřených dat, vyhodnocení záznamů v časové a frekvenční oblasti. Standardní jsou programy pro komunikaci s externím počítačem.



**Obrázek 6-2: Příklad univerzální 4 kanálové měřicí linky**

### 6.3.1 Rozdělení snímačů

Rozdělení nejčastěji používaných snímačů podle měřené fyzikální veličiny:

- času nebo rychlosti pohybu těles nebo vln (mechanické nebo optické brány);
- tlaku (piezoelektrické, piezorezistivní a odporové tenzometry);
- relativních posunutí (tenzometrické, induktivní a optické);
- přemístění (induktivní snímač);
- rychlostí kmitání (snímače s pohyblivou cívkou, interferometrické, využívající Dopplerův princip);
- zrychlení (piezoelektrické, induktivní, tenzometrické, kapacitní);
- teploty (termistory, PT teploměry, termočlánky);
- poměrné deformace (odporové tenzometry, optovláknové tenzometry).

Použitý měřicí princip snímače určuje dále typ měřicího zesilovače, požadavky na vlastnosti kabelů a jejich mezní délky apod.

Zachycení maximální hodnoty zatížení vyžaduje velkou šířku frekvenčního pásma snímače a minimální zkreslení časového průběhu signálu. Zkreslení signálu bude minimální, pokud fázové zpoždění výstupního elektrického signálu je nezávislé na frekvenci (např. u piezoelektrických snímačů) nebo lineárně

závislé na frekvenci (snímače s mechanickými systémy na bázi soustavy s jedním stupněm volnosti a vhodným tlumením). Tyto vlastnosti jsou důležité zejména při měření sil, tlaků, zrychlení a deformací částí konstrukce v blízkém okolí výbuchu.

Při měření dynamické odezvy konstrukce ve větší vzdálenosti od místa výbuchu obvykle postačí standardní vybavení pro dynamická měření.

### **6.3.2 Specifické vlastnosti signálů a měřicích linek**

Pokud je část měřicí linky (snímače, kabely apod.) ve výbušném prostředí, musí být použito jejich nevýbušné provedení.

Při některých měřeních je nutné počítat s možností destrukce měřeného objektu nebo prvků měřicí linky při výbuchu. Tomu je nutné podřídit výběr snímačů, vedení kabelů, způsoby jejich fixace a bezpečnostní opatření.

Měřicí zařízení mohou být rozmístěna ve velkých vzdálenostech (distribuované měřicí systémy), přičemž jejich propojení je technicky neefektivní. Synchronizaci měření lze v těchto případech řešit pomocí přesné synchronizace časové základny všech měřicích zařízení před měřením a vztažením časových průběhů k této základně.

Běžné je použití měřicích linek automaticky spouštěných vybraným řídicím signálem. Obvykle se zadává smysl změny (např. kladná derivace) a hladina (velikosti měřené veličiny). Po uvedení zařízení do pohotovostního stavu probíhá měření odezvy nepřetržitě. Naměřená data se ukládají do vyhrazené části paměti tak, že v ní stále zůstává poslední úsek záznamu všech měřených veličin (např. 1s dlouhý). Po „spuštění záznamu“ měřeným signálem se tento úsek záznamu uloží současně s další částí záznamu všech měřených veličin.

Pro tento typ měření jsou charakteristické problémy s odhadem velikosti zatížení nebo odezvy konstrukce při prvních měřeních – tedy problém optimálního nastavení měřicí linky. Je to způsobeno mimo jiné tím, že zkoušky jsou obvykle unikátní a není možné je opakovat. v podstatě jsou možné dvě filozofie nastavení měřicí linky:

- spolehlivý záznam maximální hodnoty veličiny (obvykle doprovázené větší chybou měření);
- použití dvou snímačů s různě nastavenou citlivostí (vyžaduje velký počet snímačů).

Měřené signály jsou širokopásmové. Časový průběh tlaku vzdušné rázové vlny (VRV) má charakteristický tvar, který lze Fourierovou transformací rozložit na



jednotlivé frekvenční složky. Aby měřicí linka přenesla všechny složky měřeného signálu, musí být propustné pásmo dostatečně široké. Obvykle je nutné použít piezoelektrické snímače se zesilovači náboje nebo tenzometrické snímače se stejnosměrnými zesilovači. Alternativně lze pro tenzometrické snímače použít zesilovače s nosnou frekvencí 50 kHz. Kromě zmíněného případu VRV se podobné požadavky mohou objevit při měření účinku výbuchu kondenzovaných trhavin uvnitř měřené konstrukce.

Velmi opatrně je nutné přistupovat k použití analogových zařízení pro úpravu nebo analýzu signálu (např. frekvenčních propustí, integrátorů nebo korekčních zesilovačů) nebo jejich digitálních ekvivalentů. Skoková změna měřené veličiny může vyvolat jejich odezvu na jednotkový skok (přechodová charakteristika). Na výstupu měřicí linky je pak signál, který nemá s měřenou veličinou nic společného. Stejně může reagovat mechanický systém snímače. Protože snímač obvykle tvoří mechanický systém a minimálně dolní propust (mechanická nebo elektrická) musí být v měřicím řetězci z důvodu digitalizace signálu, je nutné volit mezní frekvenci propusti nebo vlastní frekvenci mechanického systému snímače co nejvyšší, aby případné přechodové jevy byly frekvenčně dostatečně odděleny a bylo možné je při dalším zpracování signálu potlačit nebo zanedbat.

Skokové změny zatížení se obvykle nevyskytují v případě, že mezi místem výbuchu a měřeným objektem je prostředí, které je schopné účinky výbuchu efektivně tlumit. Např. u výbuchů směsí plynu, aerosolů kapalin nebo prachů se vzduchem, při běžných případech spojitě tlakové vlny a přenosu deformace podloží za předpokladu, že měřená konstrukce je dostatečně vzdálena od místa výbuchu. Spektrum měřených pohybů podloží nebo tlaků je v těchto případech obvykle ve stejné frekvenční oblasti jako odezva konstrukce (obvykle 1 až 100 Hz).

Doporučuje se použití převodníků s paralelním vzorkováním jednotlivých kanálů (převodníky A/D typu Sample&Hold). v řadě případů lze tento požadavek přibližně splnit použitím relativně levnějších A/D převodníků s vysokou vzorkovací frekvencí a s možností vzorkování v režimu „burst mode“. Časové posuny mezi kanály je třeba uvážit při interpretaci výsledků měření.

Snímače tlaku musí mít minimální mrtvý prostor (dutinu na vstupu). Dutina snímače se chová jako rezonátor, který je schopen změnit časový průběh měřeného tlaku. Některé typy piezoelektrických snímačů mohou při proudění vzduchu rovnoběžně s povrchem stěny vyvolávat také vysokofrekvenční hvizdy, které znehodnocují měřený signál. Výběrem vhodného snímače a optimální volbou jeho umístění lze tyto jevy potlačit.

### 6.3.3 Rozmístění snímačů na měřené konstrukci

Zatížení vzdušnou rázovou vlnou lze interpretovat jako zatížení silovými impulsy. Po skončení impulsu má odezva konstrukce charakter tlumeného kmitání ve vlastních tvarech. Jak bylo ukázáno dříve (Makovička, D. a kol., 2008/1), velikost odezvy jednotlivých tvarů kmitání lze při výpočtu ohodnotit rozvojem zatížení podle tvarů kmitání. v případě spojitě vlny nebo při buzení povrchovými nebo objemovými vlnami v podloží (pohybem podloží) lze odezvu konstrukce po dobu buzení stanovit numerickou integrací pohybových rovnic pro naměřené časové průběhy pohybů podloží. Po skončení fáze buzení konstrukce přechází odezva do stadia tlumeného kmitání ve vlastních tvarech, zejména ve tvarech s nejnižšími vlastními frekvencemi.

Kinematické buzení a odezva konstrukce se obvykle popisují pomocí rychlosti kmitání, která se měří buď přímo absolutními snímači rychlosti kmitání, nebo snímači zrychlení, jejichž signál se analogově nebo numericky integruje. Vzájemné převody záznamů zrychlení a rychlostí kmitání jsou vesměs bezproblémové. Při integraci lze předpokládat nulové počáteční podmínky. Za stejného předpokladu lze stanovit i průběh dynamické výchylky. Výpočet kvazistatické složky přemístění ze záznamu rychlosti nebo zrychlení má dvě omezení. Za prvé musí být k dispozici záznam ze snímačů, které mohou měřit rychlost kmitání nebo zrychlení i při velmi malých frekvencích. Druhým omezením je frekvenční složení odezvy. Pokud jsou v záznamu odezvy významné složky s frekvencí nad cca 4 Hz při měření zrychlení, resp. 80 Hz při měření rychlosti kmitání, bude kvazistatická složka s frekvencí 0,2 Hz překryta šumem měřicí linky. Jinak je nutné počítat s velkou chybou měření. Použití mechanických filtrů je vhodné pouze v některých případech – viz výše. Někdy je možné převést měření absolutní výchylky na měření relativních přemístění.

Pro popis kmitání konstrukce je nutné absolutní snímače zrychlení nebo rychlosti kmitání rozmístit tak, aby bylo možné tvary kmitání identifikovat.

Tenzometry se umísťují tak, aby bylo možné určitému tvaru kmitání přisoudit velikost vnitřních sil v charakteristických nebo požadovaných místech. Lze je použít i v případech, kde je třeba popsat kvazistatické složky odezvy v průběhu přechodového děje (průhyb desky, náklon stěny apod.) při časově proměnných zatíženích od výbuchů (např. směsi hořlavých plynů a vzduchu). s výhodou se použijí u ocelových konstrukcí. u zděných nebo betonových konstrukcí dochází ke vzniku trhlin, které mohou tenzometr zničit nebo významně ovlivnit pole napětí v okolí tenzometru. Měření pak ztrácí smysl. Pokud v místě měření nepůsobí velké setrvačné síly, lze tenzometr s velkou základnou vytvořit ze snímače relativního přemístění. Kvalitativně podobnou informací lze získat měřením relativního přemístění zatíženého objektu (např. průhybu desky).

Měření průhybu je vhodné i pro betonové nebo cihlové objekty (pokud nedojde k porušení samotného snímače nebo prvků pro jeho upevnění).

Snímače tlaku měří velikost a časový průběh tlakových vln – tedy charakterizují působící zatížení a při použití více snímačů i jeho rozložení po povrchu konstrukce. Stejnou funkci má použití více snímačů pohybu (absolutní rychlosti nebo zrychlení), rozmístěných na různých podporách rozměrné horizontální konstrukce v případě kinematického buzení pohybem podloží.

### 6.3.4 Nejistota měření

Výsledkem měření je odhad měřené veličiny  $y$ . Skutečná hodnota měřené veličiny  $Y$  leží s vysokou pravděpodobností v intervalu

$$(y - U) \leq Y \leq (y + U) \quad (6-1)$$

za předpokladu, že  $u$  je rozšířená nejistota měření, stanovená podle dále uvedeného postupu.

Obecný postup při stanovení nejistoty sestává z těchto kroků:

identifikace všech vlivů, které významně ovlivňují výsledek měření;

pokud je možné některý vliv předvídat, jde o systematickou chybu, kterou lze odstranit korekcí (např. vliv délky kabelů);

každá složka nejistoty se vyjadřuje směrodatnou odchylkou  $u(x_i)$ , která je rovna druhé odmocnině rozptylu  $u^2(x_i)$ ;

velikost  $u(x_i)$  se pro každý uvažovaný vliv stanoví výpočtem nebo kvalifikovaným odhadem na základě dostupných informací o vhodném statistickém rozdělení chybové složky (rovnoměrné, normální apod.);

kombinovaná směrodatná nejistota se určí podle vztahu

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j)}, \quad (6-2)$$

kde  $x_i$  jsou odhady vstupních veličin a  $f$  je funkční vztah pro  $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n)$ . Parciální derivace v (6-2) se nazývají koeficienty citlivosti a  $u(x_i, x_j)$  je odhad kovariance. Pokud nejsou významné vzájemné korelace, druhý člen vypadne.

Zavedeme-li relativní nejistotu  $w(x_i) = u(x_i)/x_i$ , lze vztah (6-2) při zanedbání korelace upravit na tvar

$$\frac{u_c(y)}{y} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left( \frac{u(x_i)}{x_i} \right)^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^N w(x_i)^2} \quad (6-3)$$

Rozšířená nejistota se určí podle vztahu

$$U = ku_c \quad (6-4)$$

Používá se hodnota  $k = 2$ , která u normálního rozdělení odpovídá pravděpodobnosti přibližně 95%.

Používané měřicí linky musí být metrologicky navázány na etalony Českého metrologického institutu a pravidelně kalibrovány. Oblast měření je kvantitativně vymezena jednak minimální a maximální frekvencí propustného pásma měřicí linky (-3 dB nebo -10%), jednak dynamikou měřicí linky, což je poměr absolutních velikostí maximální měřené veličiny (odpovídající jmenovité hodnotě výstupního signálu měřicí linky) a minimální absolutní velikosti měřené veličiny (odpovídá obvykle dvojnásobku šumu měřicí linky). Tato část celkové nejistoty měření bude nejmenší, pokud propustné pásmo bude co nejlépe frekvenčně i amplitudově přizpůsobeno velikosti a frekvenčnímu složení měřené odezvy.

V případě odstřelů nebo výbuchů velikosti měřených veličin musíme odhadnout předem. Podle toho, jaké máme k dispozici informace, skutečná odezva může být až 3x větší nebo menší než prvotní odhad. Vysoká dynamika současných měřicích linek to umožňuje zvládnout, ale pouze za cenu zvýšení nejistoty měření. Jistým kompromisem může být zdvojování klíčových měřicích linek. Důsledkem je zvětšení rozsahu měření a nákladů na jeho provedení.

Významným zdrojem nejistot je volba míst měření, způsob upevnění snímačů, délka přívodních kabelů a jejich fixace, vliv teploty, vlhkosti, vnějšího hluku (u piezoelektrických snímačů), mechanické namáhání základny snímače apod. Specificky pro tento typ měření je třeba uvážit také změny funkčních vlastností snímačů a kabelů při opakovaných odstřelech. Dalším zdrojem nejistot je způsob vyhodnocení naměřených signálů. Specifickým znakem této skupiny měření je omezená délka záznamu daná přechodovým dějem.

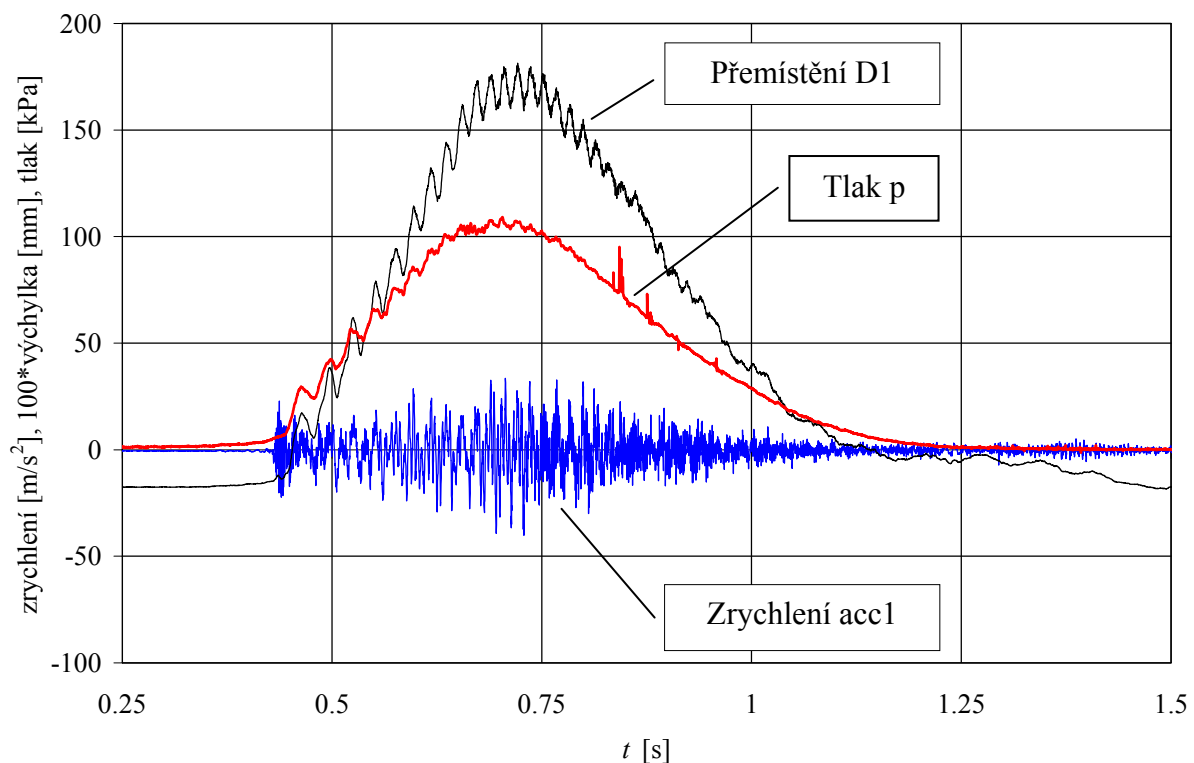
## **6.4 PŘÍKLAD - ODOLNOST ZDĚNÉ PŘEPÁŽKY**

Ve spolupráci s pracovníky VVÚU, a.s. Ostrava-Radvanice byla v rámci řešení projektu GA ČR provedena série zkoušek se zděnými přepážkami z různého materiálu a různé síly ve zkušební štolě ve Štramberku. Přepážky byly zatěžovány výbuchem směsi metanu a vzduchu v komoře za přepážkou.

Velikost tlaku byla regulována velikostí průřezu dvou výfukových otvorů, kterými byly zplodiny výbuchu přepouštěny do prostoru před přepážkou. Měřili jsme průhyb ve středu zděné přepážky relativním snímačem přemístění MTB50 a dynamické složky odezvy přepážky v dalších místech třemi snímači zrychlení BWH 201 a BWH 401. Všechny snímače používají převodníky měřené veličiny na změnu indukčnosti a vyžadují použití zesilovačů s nosnou frekvencí. Místa měření byla volena tak, aby bylo možné identifikovat tvary kmitání. Současně jsme zaznamenávali i časový průběh tlaku, jehož měření zajišťovali pracovníci VVÚU, a.s.

Základní informaci poskytuje záznam časového průběhu měřených veličin. Na obr. 6-3 je časový průběh tlaku  $p$  za přepážkou, přemístění  $D$  a zrychlení ve středu přepážky  $acc1$ . Pro úplnost by bylo vhodné měřit také tlak před překážkou nebo diferenci obou tlaků. Na záznamu průběhu přemístění je dobře vidět kvazistatická i dynamická složka odezvy. Více informací o dynamické složce odezvy lze získat ze záznamu zrychlení. Záznam na obr. 6-3 je ze zkoušky 29 cm silné cihelné příčky.

Štrambek 5.8 - přepážka: cihlová zeď 29 cm -  $p_{max} = 109,1$  kPa



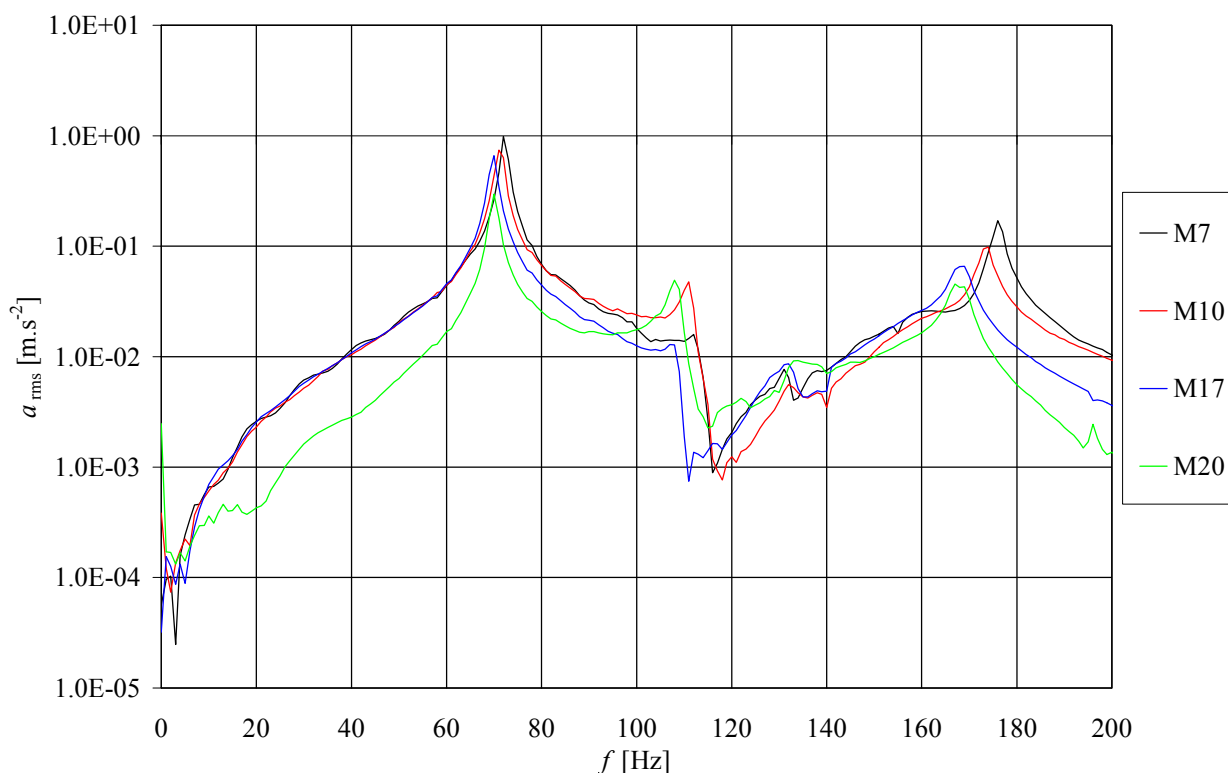
**Obrázek 6-3: Průběh tlaku v komoře ( $p$ ), přemístění středu přepážky ( $D$ ) a zrychlení ve středu přepážky ( $acc1$ ).**

Obr. 6-4 ukazuje frekvenční spektra zrychlení ve středu přepážky 14 cm silné z cihel při měření odezvy na poklepy mezi jednotlivými odstřely. Výrazné vrcholy v okolí 70 Hz, 110 Hz a 170 - 180 Hz odpovídají vlastním frekvencím přepážky a dělicí stěny, ve které byla přepážka postavena. Tuhost přepážky se po každém odstřelu snižuje v závislosti na skutečné velikosti a časovém průběhu tlaku. Projevuje se to snižováním vlastních frekvencí. Záznam M7 byl proveden před prvním odpálením, záznam M20 po posledním měřeném odpálení (nedošlo k destrukci přepážky).

Z průběhu zrychlení při poklepech na přepážku je možné standardním způsobem odhadnout okamžité a střední hodnoty logaritmického dekrementu útlumu.

Průběh rychlosti kmitání přepážky je možné získat derivací průběhu přemístění nebo integrací průběhu zrychlení. Zobrazením děje ve fázové rovině získáme další informace o dynamických charakteristikách přepážky. Pokud by byl měřen rozdíl tlaků před a za přepážkou, bylo by možné provést energetickou bilanci celého děje.

Štramberk 2 - přehled spekter mezi odstřely - poklepy



**Obrázek 6-4: Změny spekter zrychlení ve středu přepážky (acc1) po jednotlivých odstřelech**

Při použití „kladívka“ se snímačem síly lze provést modální analýzu přepážky jak před prvním odpalem, tak mezi odpaly. z frekvenční analýzy odezvy přepážky se stanoví amplitudy a fáze složek odezvy, odpovídajících vlastním frekvencím přepážky. z nich lze identifikovat příslušné tvary kmitání a přiřadit je vypočteným tvarům kmitání.

## **6.5 ZÁVĚR**

Experimentální výzkum zatížení výbuchem a odezvy konstrukcí je jednou ze základních metod poznání. Při výběru prvků měřicí linky je třeba přihlídnout ke specifickým vlastnostem měření tohoto jevu. Týká se to zejména výběru snímačů, instalace kabelů v bezprostředním okolí místa výbuchu a bezpečnostních opatření. Často jde o unikátní měření, která nelze opakovat a při kterých je velmi obtížné odhadnout velikost zatížení a odezvy.

Důsledkem výbuchu je zpravidla destrukce části nebo celé stavební konstrukce. Pokud nedojde k destrukci, lze podle materiálu konstrukce, velikosti výbuchu a vzdálenosti konstrukce od místa výbuchu očekávat větší či menší změny vlastností konstrukce, zejména její tuhosti. Lze je indikovat na základě změny vlastních frekvencí. Další informace mohou poskytnout změny spekter odezvy, časových průběhů nebo průběh odezvy ve fázové rovině.

## **7 ZJIŠŤOVÁNÍ STOP PO VÝBUCHU**

Při havarijním nebo teroristickém výbuchu jsou obvykle přivoláni na místo výbuchu jako první orgány policie. Jejich prvořadou povinností je zajistit předpokládané místo činu a vhodnou formou provést evakuaci nezúčastněných osob do bezpečí. Následuje prověřování rozsahu výbuchu a škod, které výbuch způsobil, případně se ještě dohledá skryté nebezpečí v podobě nevybuchlých výbušnin nebo částí konstrukce, kde hrozí pokračování výbuchu.

Po výbuchu je povinností policie zajistit místo události a jeho bezprostřední okolí tak, aby nedošlo ke zbytečnému poškození stop. Zároveň se zajišťují příjezdové komunikace pro záchrannou službu, hasiče a policejní specialisty. Pokud místo činu hoří, je nutné zahájit hasební práce a zabránit tak dalším škodám na okolních objektech. Pyrotechnik, který se dostaví na místo, musí vyloučit eventuelní nebezpečí, které by hrozilo v případě rozmístění dalších výbušných systémů nebo selhání některého z instalovaných výbušných systémů. Následuje dokumentace místa činu spojená s vyhledáváním stop, které mají pravděpodobnou souvislost se spácháním trestného činu. Takový procesní úkon se nazývá „Ohledání místa činu“. Na ohledání místa činu a zajišťování stop je vypracována metodika, která je začleněna do interní právní normy. Všechny zajištěné stopy se podrobují zkoumání na specializovaných policejních nebo expertních pracovištích. Výsledky zkoumání mají objasnit mechanismus spáchání trestného činu, použité materiály, a pokud to je možné, také individuální stopy, které pomohou ztotožnit osobu pachatele.

### **7.1 KLASIFIKACE POŠKOZENÍ**

Základní filozofie vypracování dokumentů o havarované konstrukci je taková, aby zahrnovala pokud možno objektivní informace o havárii a jejích důsledcích, ze kterých by bylo možné vycházet při podrobné analýze havárie nebo následných, v budoucnosti případných dalších poškození konstrukce. Zároveň i informace o konstrukci před havárií, u konstrukcí, kde toto nebezpečí hrozí, musí být takové, aby bylo možné uvážít historii zatěžování a rozvoje porušování konstrukce, a to jak před havárií nepoškozené konstrukce, tak eventuálně při opakující se havárii rozsah dřívějších poškození. Dalším kritériem je, aby dokumentace o havárii bylo stručná a jen v takovém rozsahu, který umožní seriózní analýzu situace před i po havárií.

Míra dokumentování havárie by měla být podřízena závažnosti havárie z hlediska rozsahu, obětí, významu ap. a předpokladům o likvidaci havárie, rozhodnutí o rekonstrukci (ano, ne) a vytvoření databanky pro případné budoucí využití u jiných havárií. Pro hodnocení rozsahu porušení konstrukce je nutné



zavést jeho klasifikaci. Stupeň poškození objektu a jeho konstrukce lze klasifikovat pěti stupni, podle míry jeho poškození zaříděním podle tab. 7-1.

**Tabulka 7-1: Stupně porušení objektů**

Stupeň poškození	Označení škody	Popis
0	Bez poškození	Nevznikají viditelná poškození; vodotěsnost nádrží, případně plynotěsnost u projektem požadovaných prostor, je zachována.
1	První známky poškození	Část skleněných výplní oken a dveří rozbita. Trhliny šířky cca 1 mm na styku stavebních prvků (mezi nosnou konstrukcí a příčkami, ve stropních fabionech, v blízkosti rohů zdí).
2	Malé škody	Rozbití či popraskání všech skleněných výplní. Trhliny šířky do 5 mm v omítce zdí a stropů zpravidla průběžné. Nerozevřené trhliny v rozích zdí v důsledku sedání. Nerozevřené trhliny v parapetním zdivu, uvolnění krytiny a oplechování střech ap.
3	Vážné škody	Rozevřené trhliny širší než 5 mm v příčkách a nosných zdech, neohrožující stabilitu konstrukce. Padání komínů na budovách. Opadávání části krytiny střech. Utržení přívodních vedení a částí potrubí. Uvolnění strojů v průmyslových provozech. Rozevřené trhliny ve vozovkách a zemních konstrukcích.
4	Nebezpečné poruchy	Trhliny v nosných zdech, překladech nebo poruchy ve skeletové nosné konstrukci, ohrožující jejich statickou funkci. Zřícení části příček, výplňového zdiva a komínů. Závažné trhliny v betonových prvcích z prostého betonu. Narušení stability konstrukce. Přetržené a zdeformované potrubní vedení a elektro přípojky. Utržené ocelové plošiny ve výrobních halách. Utržené kotvení strojů. Vykolejené mostní jeřáby. Převrácené nebo vážně porušené venkovní jeřáby. Ztráta těsnosti zásobníků ap.
5	Destrukce	Zřícení cihelných staveb nebo jejich částí s hlavními nosnými prvky. Propadnutí krovů nebo stropů. Průběžné trhliny v nebezpečných průřezích železobetonových konstrukcí. Vážné deformace sloupů elektrického vedení. Destrukce části venkovních kolon v chemickém průmyslu. Protržení zásobníků a jejich deformace ap.

Stupeň poškození (míra poruch) by měla být stanovována jak při pravidelných předhavarijních prohlídkách objektu, tak po výbuchu při rekognoskaci jeho účinků. Podle stupně poškození a serióznosti popisu škod před havárií a po havárii lze zpětně kvalifikovat rozsah výbuchu např. podle kritérií porušování nebo výpočtovou analýzou s tím, že výpočetní model lze přizpůsobit zjištěným

trhlinám před havárií a charakteristikám materiálu, zjištěným nedestruktivními zkouškami nebo laboratorními zkouškami na základě odběru vzorků z konstrukce.

## **7.2 PŘEDHAVARIJNÍ PORUCHY**

Každá konstrukce v důsledku svého provedení nebo používání má poruchy, trhliny v mikro i makrostruktuře. Při havárii pak zpravidla dochází i k posuvům v místech již dříve vzniklých předhavarijních trhlin. Jejich příčinou mohou být:

### **I. Konstrukční vlivy:**

Jedná se zejména o objemové změny v materiálu konstrukce a v jejím podzákladí. Typické jsou trhliny z dotvarování na rozhraní spojení nového a starého betonu, trhliny ve spárách v maltové výplni mezi panely a zálivkou spár, mezi maltou a zdicími elementy - cihlami, tvárnicemi, bloky ap., ve zmonolitněných stycích konstrukčních prvků, teplotní trhliny. Sedání základové půdy se může projevit utržením rohů staveb diagonálními trhlínami, diagonálními trhlínami v průvlacích nad nebo pod pilíři a sloupy, odklonem od vertikály celých konstrukcí budov, jednotlivých zdí, pilířů, sloupů, komínů ap., svislými trhlínami v rozích nosných zdí budov, trhlínami na rozhraní staveb s nestejnou hloubkou nebo různým způsobem založení, svislými trhlínami v meziokeních pilířích budov a v okolí parapetního zdiva ap.

### **II. Technologické vlivy od zařízení uvnitř nebo vně konstrukce:**

Jejich projevem jsou obvykle únavové trhliny od vibrací působených zařízeními budovy nebo šířící se do budovy zvenčí podloží. Dalším projevem může být překročení mezních stavů konstrukce v důsledku nadměrných zatížení, teplot, nadměrných pohybů a otřesů, např. rozvolnění krytiny při přeletech letadel, nadměrných zatíženích od větru, tlakových vln, otřesů od trhacích prací v blízkých lomech ap.

### **III. Vlivy stáří objektu:**

Projevují se trvalými deformacemi a trhlínami v konstrukci. Jsou způsobené stárnutím materiálu a tím změnou jeho fyzikálních vlastností, dále působením hub, plísní, mikroorganismů a koroze materiálu (chemickou i fyzikální). Významná poškození bývají způsobena rovněž nadměrnými statickými zatíženími např. usazenin popílku, cementu ap. v provozech hutí, cementáren, vápenek ap.

## **7.3 PORUCHY ZPŮSOBENÉ VÝBUCEM**

Při havarijním poškození stupně 3 (podle tab. 7-1) a větším se stanovuje charakter a stav poškození materiálu konstrukce (zda se jedná o zdivo, betonové

konstrukce, dřevěné, ocelové, hrázděné konstrukce, konstrukce z plastů a jiných typů materiálů, zemní konstrukce ap.). u zničeného zdiva nebo betonových úlomků je třeba stanovit, jestli při poškození došlo k rozdrčení zdiva, nebo jen k jeho rozpadnutí na jednotlivé elementy, tedy na celé, či půlky cihel, tvárnic, stěnových bloků ap. u zdiva, které zůstalo nepoškozeno v těsné blízkosti poškozené konstrukce, posoudit stav zvětrání zdiva, navlhnutí, uvolnění malty ve spárách, pravděpodobnou kvalitu omítek ap. Odhadnout narušení pevnosti materiálu nepoškozené konstrukce v blízkosti škod, případně odebrat vzorky pro další rozbor. u dřevěných a hrázděných konstrukcí se stanoví struktura dřeva (např. měkké dřevo, cca 80 let staré, navlhlé, ve spojích napadené plísní). u ocelových a litinových konstrukcí míra koroze konstrukce a zda byla ošetřována proti korozi (provádění nátěrů a jejich stav, protipožární úpravy a jejich stav ap.). u zemních konstrukcí odhad míry zhutnění, konzistence, vlhkost ap.

O charakteristikách výbuchu rozhodují zejména následující poškození, která je třeba fotograficky zdokumentovat, podrobněji popsat místa vzniku trhlin, jejich délku, rozevření, posuvy konstrukčních prvků ap. z těchto charakteristik lze pak usuzovat na základě podrobnějšího výpočtu a při srovnání s neporušenou konstrukcí (podle projektové dokumentace) usuzovat na intenzitu výbuchu.

vytržení celých konstrukčních prvků:

- vyrazení skleněných výplní oken, dveří, výkladů,
- otevření havarijních přetlakových uzávěrů,
- zhroucení lehkých, případně cihelných příček, výplní skeletů ap.,

posuvy konstrukčních prvků po možných spárách:

- posuvy bloků zdiva ve spárách,
- smykové ustřížení komínů, sloupů, průvlaků, příčlí skeletu ap.,
- trvalé posuny po dilatačních spárách a předhavarijních trhlinách,

trvalá vyboulení stěn, desek, skořepin,

odhalená výztuž železobetonových prvků,

lomy stropních panelů, nosníků, sloupů, desek,

utržení kotevních šroubů strojů, závěsů potrubí ap., utržení části strojů,

převrácení nebo vysunutí z jízdni dráhy kolejových i nekolejových vozidel,

krátery či trhliny v terénu, nebo v geologickém prostředí, u důlních děl při jeho zpevněných i nezpevněných površích, vozovkách, dvorech, štolách ap.

## **7.4 HODNOCENÍ ÚČINKŮ VÝBUCHU**

Po havárii konstrukce se doporučuje provést předběžné prohlídky stavu havarovaného objektu, které odhadnou stupeň jeho porušení, a to třeba i víceméně laicky pro rozhodnutí o dalším postupu. Následně může u významnějších konstrukcí, nebo po výraznějších škodách, být provedena

komisionální podrobná prohlídka, jež upřesní stupeň porušení a stanoví další potřebné nároky na další práce a jejich termíny (např. odběr vzorků, zakreslení trhlin ap.). Míra dokumentování havárie by měla být podřízena závažnosti havárie z hlediska rozsahu, obětí, významu ap., dále předpokladům o likvidaci havárie, rozhodnutí o rekonstrukci (ano, ne) a vytvoření databanky pro případné budoucí využití u jiných havárií.

Při rozhodování o zbytkové únosnosti havarované konstrukce pro zvážení rozsahu opravy, nebo již jen demolice, se při stupni poškození pro účely její rekonstrukce obvykle doporučuje provést na havarované konstrukci statickou či dynamickou zatěžovací zkoušku spolu s celkovou analýzou konstrukce.

Při výraznějším stupni poškození nebo pokud se jedná o velké materiální škody nebo oběti na lidských životech nebo, je-li podezření, že havárie by měla menší důsledky, kdyby konstrukce byla lépe navržena (vyprojektována) nebo provedena, je nutné odebrat z havarované konstrukce vzorky pro jejich další analýzu nebo provést orientační ověření na místě přibližnými nedestruktivními způsoby, zatěžovací zkouškou ap. Odběr vzorků z nosných částí konstrukce se řídí požadavky norem pro zkoušky materiálů. Velikost a počet odebraných vzorků je proto potřebí konzultovat se zkušebnou, jež analýzu vzorků bude provádět.

## 8 ZAŘÍZENÍ PRO OCHRANU KONSTRUKCÍ

### 8.1 VSTUPNÍ PODMÍNKY

Technicko-bezpečnostní parametry a požárně technické charakteristiky jsou jedny z nejdůležitějších podkladů pro posuzování bezpečnosti provozů v souvislosti s nařízením vlády č. 406/2004 Sb. o bližších požadavcích na zajištění bezpečnosti a ochrany zdraví zaměstnanců v prostředí s nebezpečím výbuchu. Bez těchto základních údajů nelze jednoznačně rozhodnout, zda daná technologie nebo daný provoz disponuje vhodným zařízením k omezení nebo potlačení exploze a zda její provozování je bezpečné.

Nařízení vlády stanoví způsob organizace práce, pracovních, technologických postupů a bližší požadavky na bezpečný provoz a používání strojů, technických zařízení, dopravních prostředků a přístrojů na pracovištích v prostředí s nebezpečím výbuchu.

Velmi výrazně vystupují do popředí požadavky na posuzování rizika výbuchu, klasifikace prostor s nebezpečím výbuchu a bez nebezpečí výbuchu a na zpracování provozní dokumentace.

Postup při zpracování dokumentace o ochraně před výbuchem (DOPV) má logickou stavbu, která plyne z řešené problematiky:

- a) zjištění technicko-bezpečnostních dat nebezpečných látek,
- b) zjištění jejich koncentrací, v jakých se v technologii či prostoru vyskytují,
- c) popis technologických procesů a zjištění stavu, v němž se nebezpečné látky vyskytují ať už v průběhu výroby, či manipulace a skladování,
- d) určení možných zdrojů úniků nebezpečných látek, pravděpodobnosti výskytu jejich nebezpečných koncentrací
- e) vyhodnocení zón s nebezpečím výbuchu z hlediska typu a rozsahu a to ve vnějších i vnitřních prostorech,
- f) hodnocení možných zdrojů iniciace s pravděpodobností aktivace a účinnosti, a to ve vnějších i vnitřních prostorech,
- g) posouzení zařízení, vyskytujících se v prostředí s nebezpečím výbuchu, z hlediska možného působení jako iniciačního zdroje výbuchu – inspekce zařízení, zda odpovídá stanoveným podmínkám a zda jsou udržována a provozována tak, aby bylo riziko výbuchu minimální. Příslušné definice prostředí s nebezpečím výbuchu vychází přitom z nařízení vlády č. 23/2003 Sb., kterým se stanoví technické požadavky na zařízení a ochranné systémy určené pro použití v prostředí s nebezpečím výbuchu. Zde jsou, mimo jiné, definována kritéria pro zařazení zařízení do příslušných skupin a kategorií. v příloze č. 2 jsou citovány základní

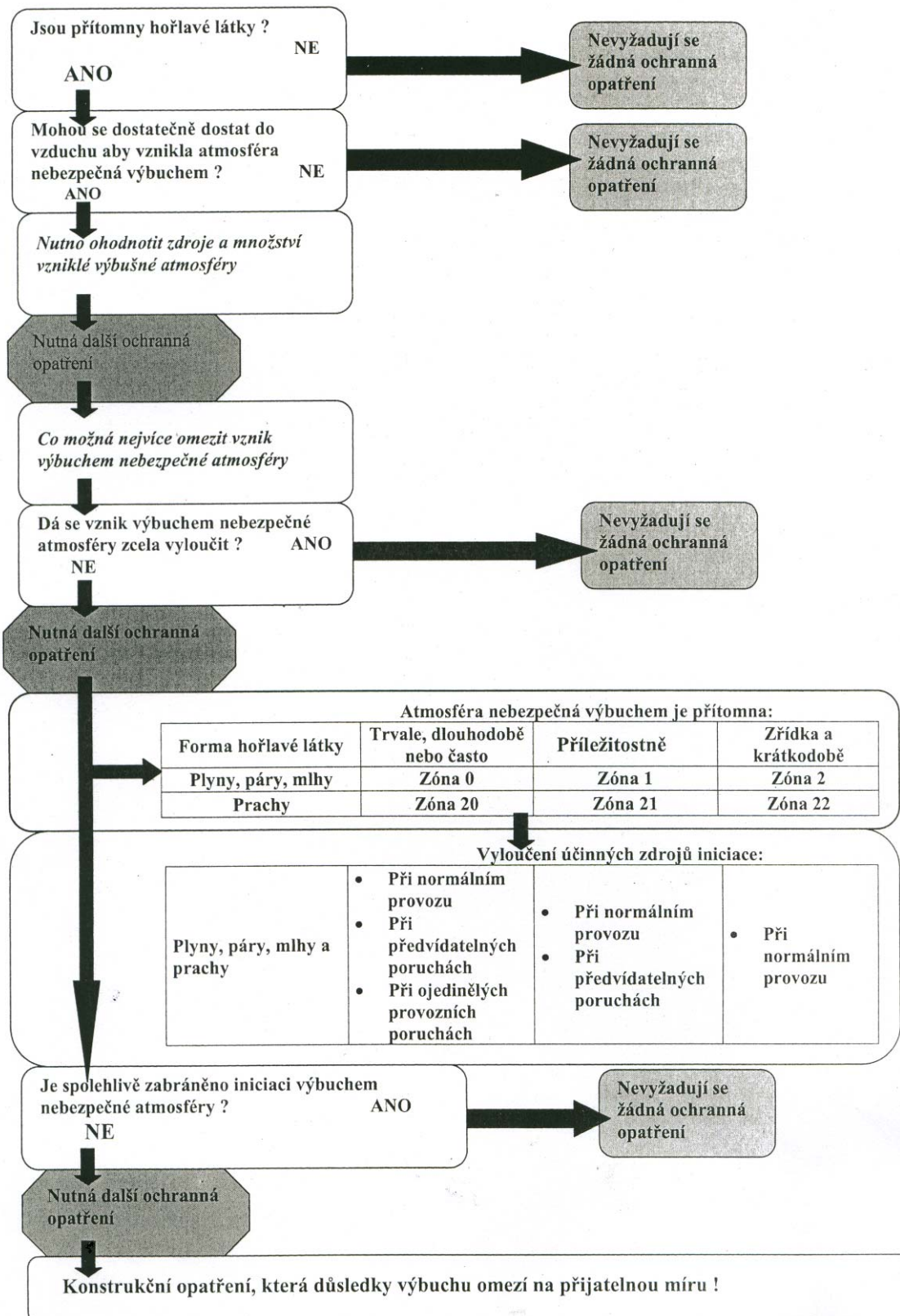
bezpečnostní a zdravotní požadavky pro návrh a konstrukci zařízení a ochranných systémů určených pro použití v prostředí s nebezpečím výbuchu.

V požadavcích pro zařízení a ochranné systémy je zaměřena pozornost na:

- a) výběr použitých materiálů pro konstrukci zařízení,
- b) návrhy a konstrukce zařízení a ochranných systémů,
- c) potenciální iniciační zdroje,
- d) nebezpečí způsobené vnějšími vlivy,
- e) bezpečnostní přístroje,
- f) bezpečnostní systémy,
- g) požadavky na zařízení zařazené do jednotlivých kategorií a skupin,
- h) projektování ochranných systémů včetně systémů pro uvolnění tlaku, potlačení výbuchu a oddělení výbuchu.

Velmi významným doplňkem dané problematiky je nařízení vlády č. 101/2005 Sb., o podrobnějších požadavcích na pracoviště a pracovní prostředí. Zde, mimo jiné, jsou citovány požadavky se zaměřením na tyto dílčí problematické oblasti:

- a) stabilita a mechanická odolnost staveb,
- b) elektrická instalace, průmyslové rozvody, potrubní systémy, vedení a sítě, únikové cesty a východy,
- c) střechy, příčky, stěny, stropy a podlahy,
- d) pracoviště s výskytem prachu a škodlivin v pracovním ovzduší,
- e) dopravní komunikace, nebezpečné prostory,
- f) nakládací a vykládací rampy,
- g) skladování pohonných hmot, hořlavých kapalin a tuhých maziv,
- h) nízkotlaké kotelny atd.



Obr. 8-1 Vývojový diagram rozhodovacího procesu

**Tabulka 8-1: Bezpečnostně technické vlastnosti hořlavých látek rozhodné pro posouzení nebezpečí výbuchu a stanovování ochranných opatření**

Vlastnost	Plyn	Mlha	Kapalina páry	Prach rozvířený	Prach usazený
Spodní mez výbušnosti [% V/V]	ano	ano	ano	ano	
Horní mez výbušnosti [% V/V]	ano	ano	ano		
Spodní bod výbušnosti [°C]			ano		
Horní bod výbušnosti [°C]			ano		
Bod vzplanutí [°C]			ano		
Minimální teplota vznícení/zápalná teplota [°C]	ano	ano	ano	ano	ano
Skupina výbušnosti (IIA, IIB, IIC)	ano	ano	ano		
Max. výbuchový tlak [MPa]	ano	ano	ano	ano	
Max. nárůst tlaku [MPa/s]	ano	ano	ano	ano	
Hustota [g/cm <sup>3</sup> ]	ano		ano		ano
Relativní hustota ke vzduchu [-]	ano		ano		
Bod tání [°C]					ano
Tlak nasycených par [kPa]			ano		
Minimální iniciační energie [mJ]	ano	ano	ano	ano	
Max. exper. bezp. spára [MESG] [mm]	ano		ano		
Mezní koncentrace kyslíku [%V/V]	ano	ano	ano	ano	
Koncentrace nasycení [g/m <sup>3</sup> ]			ano		
Rychlost vypařování k etyléteru [-]			ano		
Samovznícení prachu [mm]					ano
Zrnitost prachu [μm]				ano	ano

Nutno zdůraznit, že zmíněná nařízení vlády nemohou v plné šíři obsáhnout tuto obtížnou a složitou problematiku. Danou problematiku doplňuje proto celá řada norem, které upřesňují požadavky a kritéria na řešení protivýbuchových ochranných opatření. Všechny nové poznatky a doporučení je nutno chápat tak, že slouží pouze jako vodítko při posuzování nebezpečí výbuchu a volbě nezbytných bezpečnostních opatření.



opatření. Při jejich používání je třeba mít vždy na paměti vhodnost uváděných doporučení ve vztahu ke konkrétním místním provozním podmínkám.

Každý rozhodovací proces o existenci – neexistenci nebezpečí výbuchu by měl projít rozhodovacím procesem podle uvedeného logického vývojového diagramu (obr. 8-1). Ten ve formě jednoduchých otázek obsahuje posloupnost nezbytných postupových kroků. Rozhodovací proces se neobejde bez zapojení odborníků, kteří mají detailní znalosti jak o vlastnostech různých výbušných systémů, tak o technologických procesech, konstrukci technologických zařízení, existenci potenciálních zdrojů iniciace a v neposlední řadě i o způsobech ochrany proti výbuchu samotných zařízení.

Chceme-li úspěšně předcházet požárům a výbuchům plynů, par kapalin a prachů v technologiích a odpovídajícím způsobem identifikovat nebezpečí a vyhodnotit riziko v případě jejich úniku, musíme v první řadě znát vlastnosti a charakteristiky látek, které tyto havárie mohou způsobit. Ověřování vlastností látek a stanovení jejich technicko – bezpečnostních parametrů v akreditovaných laboratořích je obecně nutné a to zejména v případě nových chemických produktů, směsí látek, suspenzí apod.

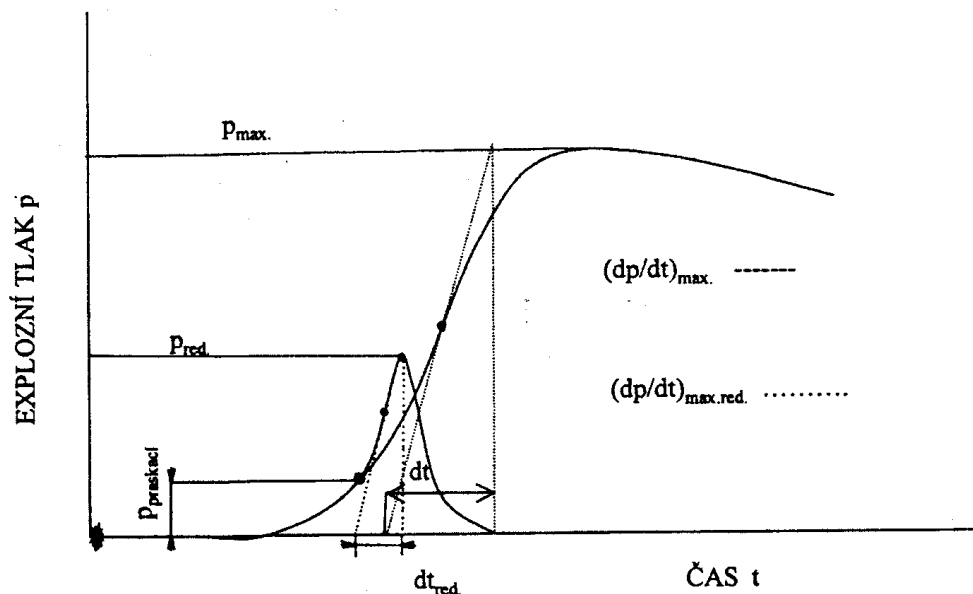
Rozsah zjišťování technicko-bezpečnostních vlastností hořlavých látek je uveden v tab. 8-1.

## **8.2 PROTIVÝBUCHOVÉ OCHRANNÉ SYSTÉMY**

Pokud v rámci preventivních opatření nelze zabránit či omezit vznik výbušného systému nebo vyloučit iniciační zdroje, musí být přijata taková opatření, která následky výbuchu omezí na přijatelnou míru.

### **8.2.1 Odlehčení výbuchu**

Pojem odlehčení výbuchu zahrnuje vše, co k tomu účelu slouží, od vzniku výbuchu, dalšího šíření v původně uzavřeném prostoru, ve kterém došlo k výbuchu, až po dosažení hodnoty otevíracího tlaku a krátkodobé nebo trvalé otevření odlehčovacího zařízení a odlehčení výbuchového tlaku ( $p_{red}$ ) do míst, kde nikoho neohrozí. (obr. 8-2). Odlehčovací zařízení musí zabezpečit, aby zařízení nebylo vystaveno zatížení nad úroveň své odolnosti proti výbuchu. Jako odlehčovací zařízení může být použita například tržná membrána, odlehčovací klapky nebo odlehčovací ventil [ČSN EN 14797 (2007)]. Použití pojistných ventilů není vhodné.



**Obrázek 8-2: Průběh exploze bez a s odlehčením výbuchu**

Hlavní význam pro dimenzování takového odlehčovacího zařízení má časová závislost mezi rozvíjejícím se výbuchem a okamžikem, kdy dojde k odlehčení tlaku. Čím je menší rychlost nárůstu tlaku výbušného systému v uzavřeném prostoru a čím dříve a účinněji dojde k odlehčení, tím rychleji produkty hoření uniknou, aniž by přispěly k nepřijatelnému navýšení tlaku v uzavřeném prostoru nebo zařízení.

Výpočet požadované velikosti odlehčovacího otvoru na zařízení či uzavřeném prostoru předpokládá znalost technicko – bezpečnostních parametrů výbušné směsi. Přesný způsob výpočtu je uveden v normách ČSN EN 14491 (2006) a ČSN EN 14994 (2007).

Při návrhu zařízení k odlehčení výbuchového tlaku je třeba mít na paměti tyto hlavní zásady:

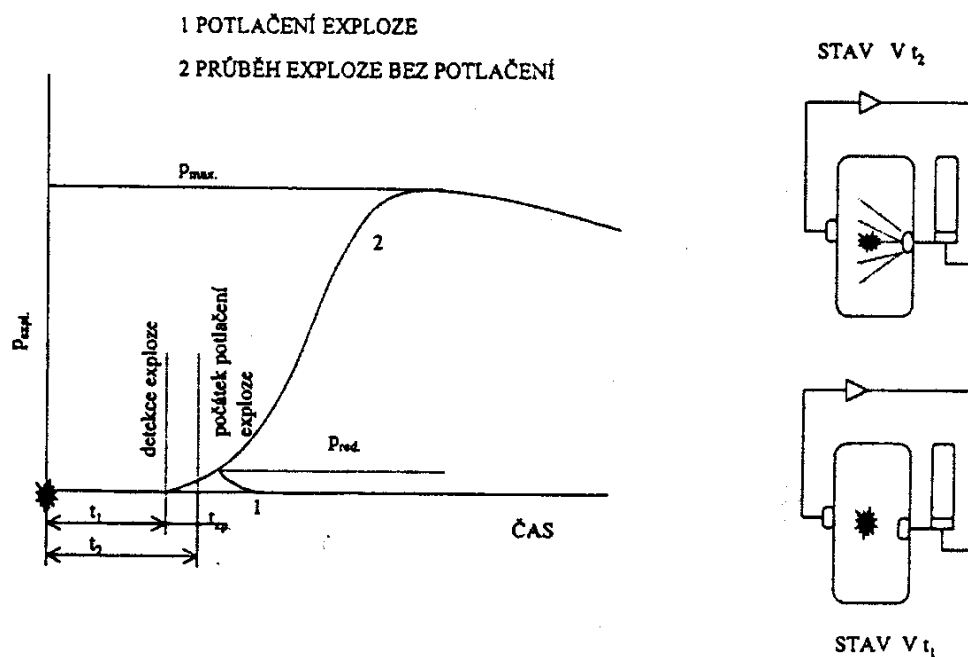
- výfukové potrubí pro odvedení produktů výbuchu musí mít minimálně stejně velký průřez jako velikost odlehčovací plochy,
- odlehčení tlaku musí probíhat co nejkratší a nejrovnější cestou,
- při odlehčení reakční síly proudícího média působí na zařízení tlaky, s kterými je nutno počítat,
- otvory pro odlehčení tlaku na uzavřeném prostoru (zařízení) musí být směřovány tak, aby nedošlo k ohrožení osob od tlakové vlny nebo plamene, případně od letící fragmentace,
- různá zařízení se nesmějí odlehčovat do společného odfukovacího potrubí,

zařízení pro odlehčení tlaků, jako jsou klapky nebo odlehčovací ventily, které se po zareagování mají opětně samy uzavřít, se smí používat jen tehdy, když byla jejich funkčnost ověřena zkouškami.

Při jejich použití je nutno mít na paměti, že po fázi odlehčení a jejich opětném uzavření vznikne v chráněném prostoru (zařízení) podtlak. Řádný stav zařízení na odlehčení výbuchu se musí pravidelně kontrolovat.

## 8.2.2 Potlačení výbuchového tlaku

Zařízení pro potlačení výbuchového tlaku zabrání dosažení maximálních hodnot výbuchového tlaku tím, že v případě výbuchu rychle vžene do definovaného prostoru nebo provozního zařízení hasicí prostředek. To znamená, že takto chráněná zařízení se mohou dimenzovat pouze na sníženou hodnotu výbuchového tlaku na tlak  $p_{red}$ .



**Obrázek 8-3: Průběh exploze bez potlačení (2) a s potlačením (1) exploze**

Oproti ochraně na odlehčení výbuchu se potlačením výbuchu omezí rozvinutí výbuchové přeměny.

Zařízení na potlačení výbuchového tlaku se skládá v podstatě z detekčního systému, reagujícího na rozbíhající se výbuch a z nádoby s hasivem, udržovaným pod tlakem, jehož výstup je uvolněn od povelu detektoru. Obsah nádoby hasiva je ve velmi krátkém čase vypuštěn do chráněného prostoru tak,

aby se co nejlépe rozptýlil. Dochází pak k uhašení plamene a zároveň k potlačení dalšího rozvoje výbuchové přeměny. Podle druhu provedení zařízení je možné snížit výbuchový tlak až na 0,2 bary. Základní požadavky pro navrhování a použití systémů pro potlačení výbuchu jsou obsaženy v normě ČSN EN 14373 (2006).

Spolehlivá funkce těchto zařízení je mimo jiné závislá na volbě vhodných detektorů. v praxi se volí často detektory tlaku, které jsou doplněny vyhodnocováním změn tlaku na čas. Pro některé aplikace se volí detektory založené na indikaci světelného efektu plamene a to jak ve viditelném, tak i v infračerveném spektru.

Účinnost systému pro potlačení výbuchu závisí na těchto parametrech:

- a) objem chráněného prostoru,
- b) tvar prostoru (povrchová plocha, poměr délky k průměru),
- c) technicko-bezpečnostní parametry výbušného systému (viz tab. 8-1),
- d) homogenita a vnitřní turbulence výbušné atmosféry,
- e) turbulence způsobená interakcí čela plamene s vnitřními překážkami a odraženými tlakovými vlnami,
- f) druh hasicí látky (hasiva ve formě prášků, vody,  $N_2$ ,  $CO_2$  ...),
- g) hmotnost rozprášené hasicí látky,
- h) detekce počátku výbuchového rozvoje – účinná aktivace systému,
- i) konstrukce HRD systému (High Rate Discharge).

Při technologických postupech zpracování méně stabilních látek, kdy exotermická reakce startuje pomaleji, se ochranné systémy pro potlačení výbuchového tlaku často doplňují inertizačními systémy.

Návod na inertizaci jako prevence proti výbuchu udává ČSN 389683 (2007).

### **8.2.3 Systémy pro oddělení výbuchu**

K zabránění přenosu plamene a výbuchu jsou pro praktické použití rozhodující tato hlediska:

Při výbuchu plynů, par a mlh ve směsi se vzduchem jsou, v závislostech na vysokých rychlostech šíření výbuchu, často aktivní uzavírací nebo hasicí systémy příliš pomalé, proto se upřednostňuje použití pasivních elementů, jako je např. neprůbojná šterbinová pojistka nebo ponorná pojistka.

Pro směsi prachu se vzduchem je u zařízení na zabránění výbuchu obsahující šterbiny nebezpečí jejich ucpání, proto se zde upřednostňují aktivní elementy, jako např. rychle uzavírající šoupátka nebo hasicí bariéry.

Požadavky na protiexplozní pojistky jsou stanoveny normou ČSN EN 12874 (2002).

### **8.2.3.1 Protiexplozní pojistky pro plyny a páry se vzduchem**

K zabránění průšlehu výbušné atmosféry se dají např. u potrubí, prostředků pro dýchání a odvětrání, u plnicích nebo vypouštěcích potrubí, které nejsou trvale zaplaveny, použít protiprůšlehové pojistné armatury.

Nádrže na hořlavé kapaliny, které nejsou odolné proti výbuchu, u nichž se nedá zabránit nebezpečí vzniku výbušné atmosféry, a kde se v případě výbuchu tento výbuch může přenést dovnitř nádrže, se vybavují protiexplozními pojistkami. Uvedené opatření je použitelné i pro opačný případ, to je zabránění průniku plamene ze zařízení do okolní výbušné atmosféry.

Protiexplozní pojistná zařízení jsou rozdělena v zásadě rozdělena do těchto konstrukčních provedení:

- a) pojistky odolné proti explozi (deflagraci),
- b) pojistky odolné proti trvalému hoření,
- c) pojistky odolné detonaci.

Pojistky musí být instalovány a voleny tak, aby odpovídaly konkrétním provozním podmínkám a zohledňovaly:

- a) prostorové uspořádání zařízení, které má být chráněno s možností vzniku odlišných forem výbuchu (deflagrace, detonace, krátkodobé hoření, dlouhodobé hoření),
- b) ochranu proti přenesení výbuchu ze zařízení ven nebo z vnějšku dovnitř zařízení, potrubí, odvětrání, nádrže s hořlavou kapalinou,
- c) vliv vlastností výbušné směsi (třída výbušnosti směsi, rychlost hoření, rychlost nárůstu tlaku, teplota vznícené směsi),
- d) stav, v jakém se výbušná směs nachází (rychlost proudění, zdroj tvorby výbušné směsi, množství směsi, která se může zúčastnit výbuchu).

V každém případě se musí vycházet z údajů o možnostech použití, včetně omezení uváděných výrobcem a prokazatelně ověřených zkouškami prováděnými v rámci prokazování shody dle příslušné legislativy.

### **8.2.3.2 Zařízení pro technické oddělení výbuchu pro prachy**

Protiexplozní zařízení vhodná pro plyny a páry jsou z důvodů nebezpečí ucpání pro prachy nepoužitelná. Pro zabránění šíření výbuchu prachu připojeným

potrubím nebo dopravníky, jakož i ze zařízení do okolí, se v praxi volí následující ochranné prvky.

Tyto prvky jsou v souladu s evropskou normou prEN 15089 (2007), která mimo jiné uvádí základní požadavky na komponenty pro oddělení výbuchu, na konstrukci a použití jednotlivých ochranných systémů. Rovněž jsou specifikovány způsoby pro hodnocení účinnosti systémů a definována kritéria třídění takových systémů v závislosti na určujících faktorech nebezpečí výbuchu.

### ***Hasicí uzávěry***

Výbuch je indikován detektory. Vypuštěné hasivo ze zásobníku do potrubí uhasí plamen. Intenzitní výbuchové parametry nejsou ovlivněny. Zařízení je nutno dimenzovat v závislosti na očekávaném tlaku.

### ***Rychlouzavírací šoupátka a klapky***

Probíhající výbuch je indikován detektory. Spouštěcí mechanismus v čase řádově milisekund uzavře šoupátko nebo klapku. Vhodnost uspořádání a umístění detektorů, uzavíracích mechanismů a druhu prachu musí být ověřena.

### ***Rychlouzavírací ventily***

Při překročení určité rychlosti proudění v potrubí vyvolaném explozí, dojde k uzavření ventilu. Účinnost a tlaková zatížitelnost musí být ověřena. Tyto ventily lze instalovat pouze ve vodorovné poloze.

### ***Rotační podavače***

Rotační podavač lze použít jako zábranu proti průšlehu plamene jen tehdy, pokud byla jeho funkce a tlaková odolnost ověřena. v případě výbuchu musí být podavač automaticky zastaven, aby nedošlo k vynesení hořícího materiálu.

### ***Odlehčovací komíny***

Probíhající výbuch se zastaví tím, že se změní směr jeho proudění o 180° při současném odlehčení výbuchového tlaku ven v místě změny směru proudění. Odlehčení musí být zásadně vyvedeno do bezpečného místa, v žádném případě do pracovních prostorů nebo prostoru komunikace. Odlehčovací komín ne vždy zabráni přenosu výbuchu. Sám o sobě neoddělí výbuch, ale podstatně jej zpomalí. Následné případné zdrojové ochrany lze dimenzovat na atmosférické podmínky.

Velmi výrazně zasahuje do řešené problematiky norma ČSN EN 13463 – 5 (2004), která stanovuje požadavky pro navrhování a konstrukci neelektrických zařízení pro použití v prostředích s nebezpečím výbuchu, která jsou chráněna typem ochrany – Běžná konstrukce „c“.

### ***Protivýbuchové uzávěry v hlubinných dolech***

K zabránění přenosu výbuchu uhelného prachu v důlních dílech se musí dle vyhlášky ČBÚ č. 10/1994 Sb. stavět v přesně definovaných odstupech a lokalitách protivýbuchové uzávěry. Tyto se skládají z řady tříštivých korýtek naplněných vodou, umístěných pod stropem důlních chodeb. Aby byla zajištěna jejich funkční hasicí účinnost, musí objem vody činit nejméně 200 litrů na každý čtvereční metr průměrného průřezu důlního díla. Při výbuchu uhelného prachu výbuchová vlna, šířící se důlními chodbami, roztříští korýtko naplněná vodou a vytvoří v celém profilu důlního díla vodní tříšť. Fronta plamenů postupující za výbuchovou vlnou je vodní tříšť následně uhašena a tím je zabráněno iniciaci rozvířeného uhelného prachu v dalších důlních dílech.

## **8.2.4 Konstrukce odolné výbuchovému tlaku**

Zařízení jako jsou zásobníky, konstrukční celky, potrubí apod., musí být konstruována tak, aby zadržela výbuch uvnitř zařízení, aniž by došlo k jejich destrukci. Bližší požadavky na konstrukce uvádí ČSN EN 14460 (2006).

Obecně se daná zařízení dělí na následující konstrukčně rozdílná provedení:  
provedení, které odolá maximálnímu výbuchovému tlaku,  
provedení, které odolá redukovanému výbuchovému tlaku ve spojení se zařízením pro odlehčení nebo potlačení výbuchu.

Části konstrukce odolné proti výbuchu mohou být navrženy jako:

odolné proti výbuchu, kdy se navrhují podle pravidel pro tlakové nádoby,  
odolné proti tlakovému rázu, kdy se navrhují na zatížení odpovídající úrovni meze kluzu materiálu.

Konstrukce odolné výbuchovému tlaku musí odolat očekávanému výbuchovému tlaku, aniž by došlo k jejich deformaci. Nádoby a zařízení se počítají a konstruují na očekávanou hodnotu maximálního výbuchového tlaku.

Konstrukce odolné výbuchovému rázu musí odolat očekávanému tlakovému rázu, který v nich vznikne v případě výbuchu. Připouštějí se trvalé deformace. Při výpočtech a konstrukcích vychází se z velikosti meze kluzu materiálu.

Při výbuchu v potrubí nebo dlouhých nádobách může dojít ke vzniku rázové vlny, kdy je přechod do detonace závislý na délce a členitosti dráhy, kterou čelo plamene při výbuchu proběhne. u plynů a par při poměru délky potrubí k jeho světlosti  $L/D < 5$  se vznik rázové vlny nepředpokládá. Při poměru  $L/D > \text{asi } 100$  je nutno počítat s přechodem výbuchu do detonace.

### **8.3 PŘEHLED NEJDŮLEŽITĚJŠÍCH NOREM SOUVISEJÍCÍCH S DANOU PROBLEMATIKOU**

ČSN EN 14460	Konstrukce odolné výbuchovému tlaku. ČNI Praha 2006
ČSN EN 14373	Systémy pro potlačování výbuchu. ČNI Praha 2006
ČSN EN 14797	Zařízení pro odlehčení výbuchu. ČNI Praha 2007
ČSN EN 14491	Ochranné systémy pro odlehčení výbuchu prachu. ČNI Praha 2006
ČSN EN 14994	Ochranné systémy pro odlehčení výbuchu plynu. ČNI Praha 2007
ČSN EN 13463-1	Neelektrická zařízení pro prostředí s nebezpečím výbuchu – část 1: Základní metody a požadavky. ČNI Praha 2002
ČSN EN 13463-5	Neelektrická zařízení pro prostředí s nebezpečím výbuchu – část 5: Ochrana bezpečnou konstrukcí „c“. ČNI Praha 2004
ČSN EN 13237	Prostředí s nebezpečím výbuchu – Termíny a definice pro zařízení a ochranné systémy určené pro použití v prostředí s nebezpečím výbuchu. ČNI Praha 2004
ČSN EN 12874	Protiexplozivní pojistky – Funkční požadavky, zkušební metody a vymezení použití. ČNI Praha 2002
ČSN 38 9683	Návod na inertizaci jako prevence proti výbuchu. ČNI Praha 2007
prEN 15089	Systémy pro oddělení výbuchu. CEN Brusel 2007

### **8.4 AKREDITOVANÉ ZKUŠEBNÍ LABORATOŘE**

**Kontakty: 1025 – VVUÚ, a.s., IČ: 45193380**  
**Akreditovaná zkušební laboratoř č. 1025**

Předmět akreditace: zkoušky důlních strojů, osobních ochranných prostředků, hořlavosti, výbušnosti materiálů, analyzátorů, hasicích prostředků, chemických látek, prašnosti, proudění, výbušnin, protivýbuchových ochran, defektoskopie



lan, výztuží, technické akustiky, měření složení hořlavých plynů a par, metanscreening.

Adresa: Pikartská 1337/7, 716 07 Ostrava – Radvanice  
Telefon: 596 252 232  
Kontakt: Ing. Petr Šelešovský

***1019 – Fyzikálně technický zkušební ústav, s.p., IČ: 00577880  
Akreditovaná zkušební laboratoř č. 1019***

Předmět akreditace: zkoušení zařízení a ochranných systémů pro prostory s nebezpečím výbuchu, zkoušení elektrických zařízení, analyzátorů plynů, kyslíkoměrů, elektrostatických vlastností materiálů, zkoušení elektromagnetické odolnosti elektrických zařízení.

Adresa: Pikartská 7, 716 07 Ostrava – Radvanice  
Telefon: 595 223 111  
Kontakt: Ing. Jaromír Hrubý

***2284 – Český hydrometeorologický ústav, IČ: 00020699  
Kalibrační laboratoř imisí***

Předmět akreditace: kalibrace pro měření oxidu siřičitého (SO<sub>2</sub>), oxidů dusíku (NO – NO<sub>x</sub>), oxidu uhelnatého (CO), ozónu (O<sub>3</sub>), benzenu, toluenu a xylenu (BTX) v ovzduší.

Adresa: Generála Šišky 942, 143 00 Praha 4  
Telefon: 241 727 935  
Kontakt: Ing. Jiří Novák

## 9 METODY REKONSTRUKCE A ZTUŽOVÁNÍ KONSTRUKCÍ

### 9.1 ÚVOD

Rekonstrukce objektů se provádí zcela standardně, a to z řady důvodů. Především se obvykle jedná o odstranění vad, které negativně ovlivňují funkčnost konstrukce, snižují jeho statickou bezpečnost nebo předpokládanou životnost. Příčinou těchto anomálií jsou jak vady související s projektem objektu, tak vady, které jsou důsledkem chybné realizace nebo absence údržby.

Specifickým typem vad jsou poruchy vzniklé anomálním zatížením, tj. takovým, se kterým nepočítal návrh objektu. Typickým příkladem je silné zemětřesení nebo extrémní vítr. Mezi tyto náhodné, obtížně předvídatelné silové účinky lze zařadit i vliv výbuchů na konstrukci. Typické pro tato zatížení je, že neznáme orientaci ani intenzitu napětí a jsme je schopni dodatečně jen orientačně odhadnout. Projektant statické je u takto porušené konstrukce ve svízelné situaci. Nezná přesný rozsah poruch a nemá prakticky žádnou oporu v normách nebo jiné technické dokumentaci. v úvahu tedy nepřipadá jakýkoliv standardizovaný, šablonovitý postup.

Statik, který navrhuje rekonstrukci výbuchem poškozeného objektu, by proto měl být zkušeným a tvůrčím technikem schopným na základě zkušeností a analogií provést analýzu stavu objektu i variantní návrh rekonstrukčních opatření. Jeho analýza a návrh by měly být vždy podrobeny odborné oponentuře. Konsiliární posuzování je třeba v těchto situacích považovat za nezbytné. Další okolností, kterou musí vzít všichni účastníci procesu rekonstrukce (investor, dodavatel) na vědomí, je okolnost, že statický projektant obvykle pracuje s informacemi, které jsou zatíženy značnou, někdy obtížně odhadnutelnou mírou nejistoty. z toho vyplývá, že navrhované řešení musí být výrazně nad obvyklou mírou bezpečnosti. Přiměřené předdimenzování rekonstruovaných prvků či uzlů nemůže být v tomto případě považováno za nedostatek, ale nezbytný předpoklad, aby rekonstruovaný objekt byl opět dlouhodobě spolehlivě funkční.

Škála opatření, která lze na záchranu objektu podniknout, je velmi široká. v dalším textu jsou naznačeny jednotlivé strategie, které jsou v současnosti běžně použitelné. v sekci 9.3 se pak podrobněji rozebírají možnosti moderní rekonstrukce objektu pomocí kompozitních pásků a tkanin. Tato technologie je vhodná i jako preventivní zesílení objektů, které jsou vystaveny vyššímu riziku výbuchu.

## 9.2 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ REKONSTRUKČNÍCH ZÁSAHŮ

Zesílení musí být vždy podloženo statickým výpočtem, výkresovou dokumentací a musí zohledňovat celkový stav zesilované konstrukce. Může se týkat celé konstrukce nebo jen její části.

Zesílení je možné provést:

- a) zvětšením průřezu,
- d) předpětím,
- e) změnou nosného systému.

Pro jednotlivé metody zesilování je možné použít různá technická řešení, jejichž návrh a realizace musí být v souladu s příslušnými normami a předpisy. Dále uvádíme některé způsoby zesilování, které podle našeho názoru představují reprezentativní výběr širokého spektra používaných řešení.

Zvětšení průřezu můžeme vytvořit:

- a) stříkaným betonem (s výztuží nebo bez výztuže)
- b) dobetonováním (s výztuží nebo bez výztuže)
- c) kompozitní výztuží lepenou na povrch nebo umístěnou do drážky.

Důležitým předpokladem fungování zvětšeného průřezu je zabezpečení spolupůsobení nového materiálu a původního betonu. Ve výpočtu se musí zohlednit i skutečnost, že původní část prvku je pod vlivem zatížení ve stavu napětí, zatímco nová část betonu pouze tvrdne a podléhá objemovým změnám (smršťování, hydratační pochody). Na dobetonování je výhodné použít samozhutňující beton. Tímto materiálem se dá dosáhnout hutný beton s kvalitním povrchem i v oblastech s hustou výztuží bez použití zhutňovacích prostředků.

Pomocí předpětí se vyvolá v betonovém prvku příznivý stav napětí – předpínací jednotka působí jako aktivní přídavná výztuž. i přes statické výhody předpětí se soudržností se při zesilování dává z konstrukčních důvodů přednost vnějším (externím) kabelům bez soudržnosti. Změna nosného systému se provádí většinou úpravou podmínek uložení prvku (vnější změnou nosného systému).

Většina betonových nosných konstrukcí se skládá z desky, trámy a sloupu. v následujících kapitolách jsou uvedené staticko-konstrukční možnosti zesílení těchto prvků. Pro konkrétní případ zesílení se doporučuje vypracovat několik variant a jejich vzájemným komplexním porovnáním dospět k optimálnímu řešení.

## 9.2.1 Zesilování desek

Zesilování železobetonové desky se může provést několika způsoby, přičemž volbu ovlivňují mnohé skutečnosti: ekonomické ukazatele, možnosti a zkušenosti dodavatele, vybavení strojním zařízením, časový faktor, prostorové možnosti apod. Železobetonové desky se zesilují:

- a) nadbetonováním,
- b) přidáním výztuže,
- c) zmenšením rozpětí,
- d) kombinací uvedených způsobů.

### 9.2.1.1 Zesilování nadbetonováním

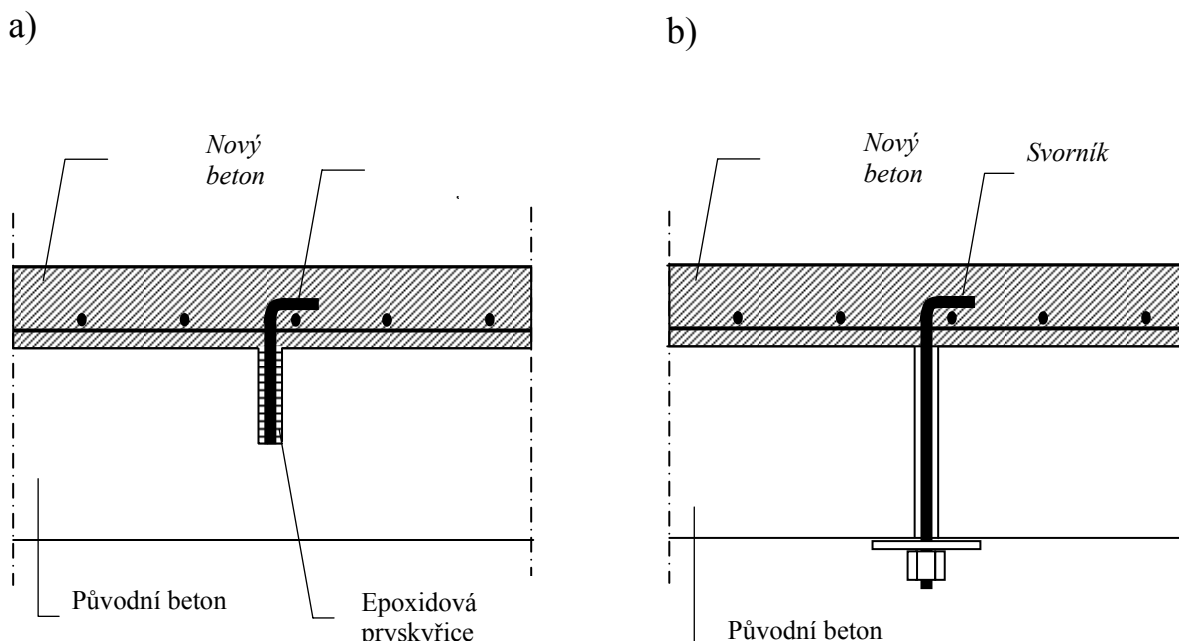
Pro nadbetonování se navrhuje alespoň taková třída betonu, jakou má původní deska, lépe však ještě o stupeň vyšší. Tloušťka nadbetonované vrstvy by měla být z mnoha důvodů nejméně 30, lépe 50 mm. Tlačená oblast v desce tuto hodnotu zpravidla nepřevyšuje.

Zesílení desky nadbetonováním může být provedeno

- a) spolupůsobením nového a původního betonu (spolupůsobící deska),
- b) bez spolupůsobení (odlehčovací deska).

Pokud je zabezpečeno spolupůsobení nového a původního betonu, tloušťka desky při výpočtu představuje součet původní a nové desky. Tahová síla ve výztuži přechází prostřednictvím vodorovných smykových sil do tlačeného betonu. Kritickým místem zesílení desky je spára na styku mezi novým a starým betonem. Jejich spolupůsobení se může zlepšit:

- a) Zdrsněním povrchu původního betonu v kombinaci s adhezním můstkem. Upřednostňují se mechanické způsoby zdrsnění před chemickými. Zdrsnění nemá být příliš hluboké, aby se mikrotrhlinami neporušila struktura původního betonu a nedocházelo k velkým místním napětím;
- b) Uložením ocelových trnů nebo svorníků do předem vyvrtaných otvorů v původním betonu. Trny resp. svorníky se vloží do otvorů a zalijí se epoxidovou pryskyřicí (obr. 9-1). Jsou rozmístěny po celé ploše desky ve vzdálenostech podle potřeby vykrytí smykových sil. Stáhnutím svorníky zvýšíme účinnost spojení.



**Obrázek 9-1: Spolupůsobení původního a nového betonu je zabezpečené:  
a) ocelovými trny, b) ocelovými svorníky**

Účinné přenesení smykových sil mezi původním a novým betonem se nejčastěji vytváří kombinací uvedených způsobů, přičemž se spoléhá zejména na spojení ocelovými trny nebo svorníky. Nadbetonovaná vrstva se obvykle vyztužuje svařovanými sítěmi. v místě podpory doplníme výztuž příložkami potřebnými na vykrytí podporového momentu. v případě vyztužení nadbetonované vrstvy je její minimální tloušťka 50 mm.

Častým případem zesílení desek je i nadbetonování samostatně působící desky (odlehčovací desky). Nový beton není se starým spojený, tj. obě desky působí samostatně, mají však společný průhyb. Poměr zatížení přenášený deskami je přímo úměrný poměru jejich ohybových tuhostí. z hlediska mezní únosnosti se odlehčovací deska navrhuje na zatížení

$$q_2 = q - q_1,$$

kde  $q$  je celkové zatížení,  
 $q_1$  zatížení přenášené původní deskou,  
 $q_2$  zatížení, které musí přenést odlehčovací deska.

Poměr únosnosti obou desek je ve skutečnosti mnohem složitější. Uplatňuje se vliv smršťování, změny modulu pružnosti nového betonu, dotvarování obou betonů a další okolnosti, které je v konkrétním případě třeba zohlednit. i když tloušťka desky a spotřeba výztuže je u odlehčovací desky větší, používá se tento typ zesílení, zejména z těchto důvodů:

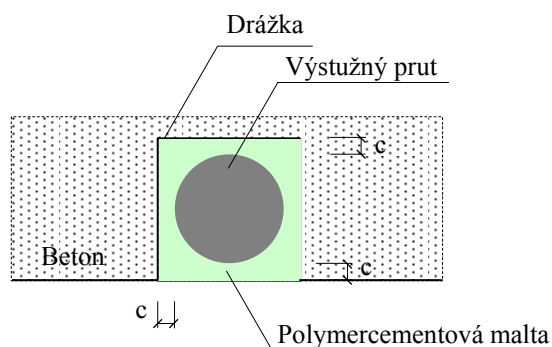
- a) odpadá problém spojení starého a nového betonu. Očištění povrchu starého betonu je často problematické, např. při silném znečištění oleji;
- b) není třeba odstraňovat betonovou mazaninu a osazovat trny nebo svorníky;
- c) urychlení prací.

### 9.2.1.2 Zesilování přidáním výztuže

Další způsob zesilování desky je přidání výztuže do tažených oblastí. u prostých desek přidáváme výztuž k dolnímu povrchu (podle průběhu ohybových momentů není nutné vést výztuž až do podpor), u spojitých desek nad podporou i k hornímu povrchu. Přidávaná výztuž musí spolupůsobit s betonem, proto musí mít potřebnou soudržnost s betonem.

Soudržnost se vytvoří:

- a) umístěním prutové výztuže do vyfrézované drážky a vyplněním drážky materiálem zabezpečujícím soudržnost betonu a výztuže (obr. 9-2). Kvůli minimalizaci zásahu do konstrukce se přidávaná výztuž umísťuje těsně pod povrch betonu. Aby nedošlo k její korozi, používají se nerezové pruty nebo polymerní pruty vyztužené vlákny. Vysoká pevnost materiálů a povrchová úprava výztuže umožňuje použití prutů s malým průměrem, resp. krátké kotevní délky.
- b) nalepením pásové výztuže (lamely) na beton dvousložkovým epoxidovým lepidlem. Lamela může být ocelová nebo uhlíková.



**Obrázek 9-2: Zesilování desky uložením výztuže do drážky**

V posledních letech se rozšířilo zesilování lepenými lamelami. Předpokladem účinného spolupůsobení betonového podkladu, lepidla a lamely je dostatečná pevnost jednotlivých materiálů a vysoká přilnavost na styčných plochách. Vlastnosti materiálů pro zesílení (lepidel a lamel) se volí tak, aby o únosnosti spřáhnutého průřezu rozhodovaly parametry podkladového betonu. Na podkladový beton se kladou požadavky:

- a) pevnost betonu v tlaku musí odpovídat minimálně třídě betonu B.15,
- b) průměrná pevnost v tahu povrchových vrstev podle ČSN 73 1318 (1986)
- c)  $R \geq 1,5 \text{ MPa}$ ,
- d) maximální obsah vody je 4 % hmotnosti betonu,
- e) teplota povrchu musí být v intervalu +15 až +35 °C,
- f) na lepené ploše betonu musí být obnažené vrcholky kameniva o velikosti 8 mm.

Spolupůsobení lamely s betonem zajišťuje velká kohezní pevnost lepidla, jako i přílnavost a mechanické zazubení lepidla na povrchu betonu a lamely. Přitlačením lamely je možné výrazně zvýšit únosnost lepeného spoje. Oddělení lamely od betonu (delaminace) před dosažením mezní únosnosti zabrání dodržení těchto pravidel:

tloušťka ocelové lamely  $t_i$  v závislosti na třídě betonu podkladu:

pro B 15:  $5 \text{ mm} \leq t_i \leq 10 \text{ mm}$ ,

pro B 25 a více:  $5 \text{ mm} \leq t_i \leq 15 \text{ mm}$ ,

max. šířka lamely  $b_i \leq 200 \text{ mm}$ ,

mezní poměrné přetvoření lamely  $\varepsilon_i \leq 2 \%$ ,

stupeň zesílení  $\eta = \frac{M_{uz}}{M_{uo}} \leq 2$

kde  $M_{uz}$  je momentová únosnost zesíleného průřezu,

$M_u$  je momentová únosnost původního průřezu.

Spolupůsobení lamely a železobetonového průřezu je podmíněno její účinnou aktivací. Té je dosaženo maximálním odlehčením nebo provizorním podepřením konstrukce nebo prvku (desky, nosníku) před lepením lamely. v poslední době se lamely aktivují i jejich předpínáním. v případě, že délka kotevní oblasti nepostačuje pro spolehlivé kotvení lamely, je možné provést tyto úpravy: přitlačením lamely zvýšit přídržnost, kotvení vytvořit kotevním přípravkem.

Lepený spoj je třeba chránit proti podkorodování ocelové lamely, resp. proti změknutí lepidla vlivem vysokých teplot (např. při požáru). Ochrana proti korozi je možná antikoročním nátěrem nebo použitím nerezavějící oceli. Ochrana proti vysokým teplotám spočívá ve vytvoření torkretové omítky nebo jiné tepelné izolace. Kotvení lamely kotevním přípravkem zajišťuje, že i po selhání lepidla bude lamela působit jako táhlo zesíleného prvku.

Na zesilování konstrukcí vystavených atmosférickým podmínkám umožňujícím korozi oceli je třeba použít jiný výztužný materiál. k tomuto účelu jsou

k dispozici lamely s vlákny z vyztuženého polymeru (Fiber Reinforced Polymer – FRP).

V posledních letech se nejvíce rozšířily lamely s uhlíkovými vlákny vyztuženého polymeru (Carbon Fiber Reinforced Polymer – CRP). Mají vysoký modul pružnosti a lineárně pružné chování až do porušení. Velké dodací délky, až 250 m (dodávají se ve svitcích), a malá tloušťka umožňují minimalizování počtu styků, resp. bezproblémové křížení lamel.

Pracovní diagramy uhlíkových lamel mají tvar přímky. Vysoká pevnost materiálu se dosahuje při poměrných přetvořeních  $\varepsilon_i > 1,5 \%$ , které nemůžeme připustit s ohledem na šířku trhlin v betonu a mezní poměrné přetvoření betonářské výztuže v tahu ( $\varepsilon_{sd} \leq 1,0 \%$ ). Pokud chceme při zesilování využít vysokou pevnost uhlíkových lamel, je výhodné použít materiál s nejvyšším modulem pružnosti nebo jejich předpětí.

Manipulace s poměrně těžkými, málo ohebnými ocelovými pásy a nebezpečí koroze jsou hlavními nevýhodami ocelových pásů. Nevýhodou uhlíkových lamel je jejich cena a přenos sil v jednom směru. Ostatní kritéria hovoří ve prospěch uhlíkových lamel.

Na lepení lamel se používá dvousložkové epoxidové lepidlo. Při teplotách +50 až +70 °C dochází ke zhoršování vlastností lepidla. To znamená, že lepená výztuž není vhodná pro použití na přímo osluněné plochy. Konstrukce ohrožené požárem vyžadují protipožární ochranu lepené výztuže. Vlastnosti kvalitních epoxidových lepidel umožňují spolehlivé spojení ocelových i uhlíkových lamel s betonem, ocelí a dřevem. Optimální tloušťka lepidla po přitlačení lamely je 2 mm. Minimální je 1 mm a maximální 5 mm.

Postup při návrhu zesílení obdélníkového průřezu na ohybový moment uhlíkovými lamelami musí být v souladu s platnou normou pro navrhování betonových konstrukcí.

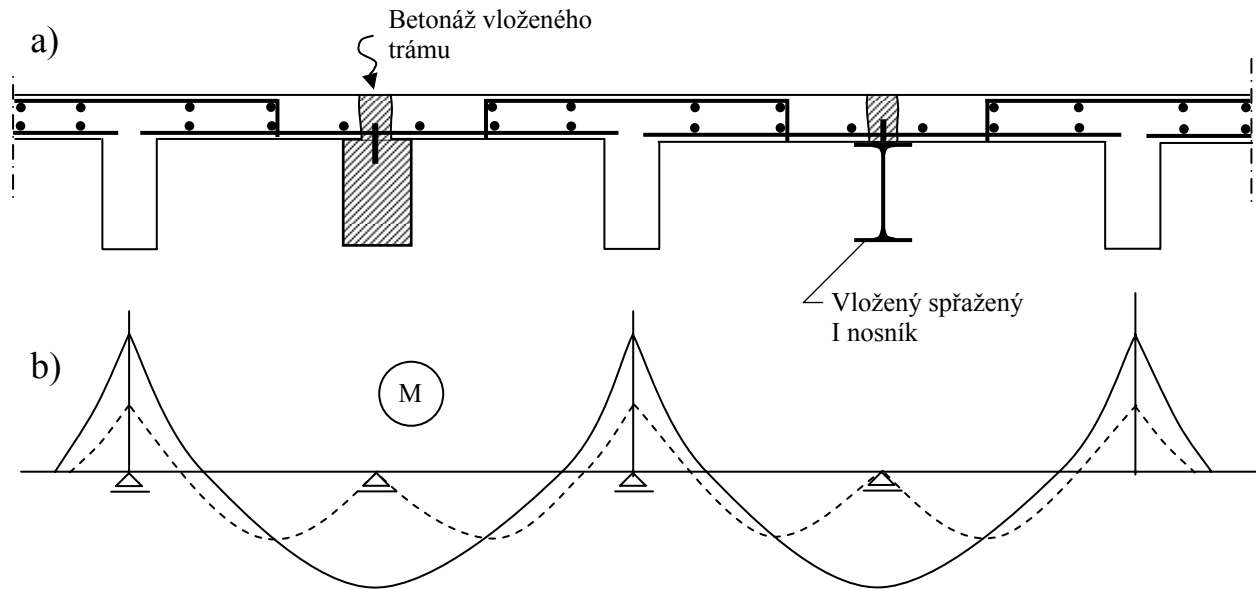
### **9.2.1.3 Zesilování zmenšením rozpětí**

Zmenšením rozpětí je možné dosáhnout poklesu průřezových sil v nosné konstrukci. v desce se zkrácení dosahuje vložením železobetonového nebo ocelového nosníku uprostřed rozpětí desky (obr. 9-3).

Betonáž vloženého železobetonového nosníku se provádí skrz otvory v desce do přiloženého bednění s výztuží. Do otvorů se vkládají i ocelové trny na zlepšení spolupůsobení desky s novým nosníkem. Trny se používají i při ukládání desky na ocelové nosníky (tuhé válcované profily, nejčastěji průřezu  $I$ ). Trny jsou přivařeny na horní pásnici profilu. Jak lze vidět na obr. 9-3a, nad vloženými



nosníky není výztuž při horním povrchu desky. Průřez není schopný přenést záporný ohybový moment a vznikne trhлина. Vložený nosník vytvoří kloubovou podporu, i přesto dojde ke zmenšení mezipodporových i podporových momentů (obr. 9-3b).



**Obrázek 9-3: a) zesílení desky trámového stropu vložením nosníků v středu rozpětí, b) průběh ohybových momentů před a po vložení nosníků**

### 9.2.2 Zesilování nosníků

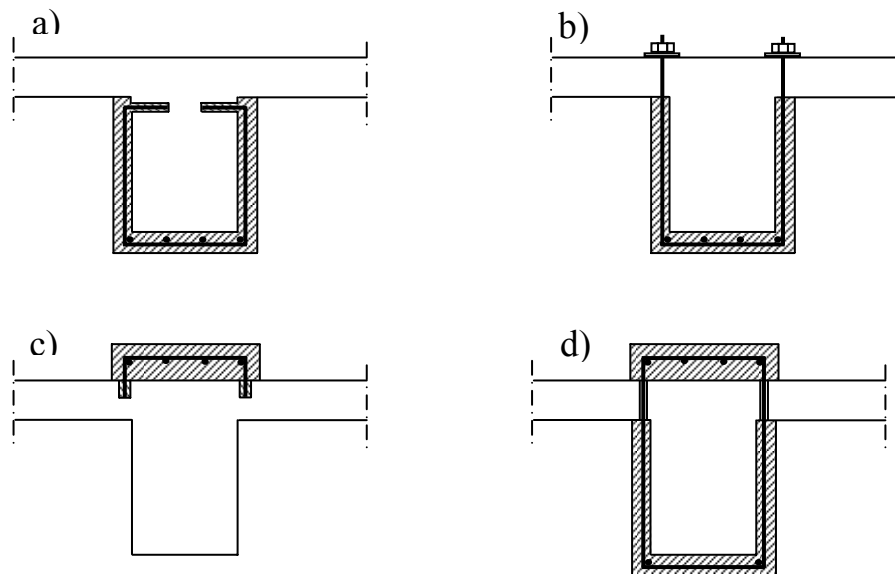
Nosníky (trámy, průvlaky) jsou vodorovné prutové nosné prvky přebírající zatížení od méně tuhých vodorovných prvků (např. desek), které jsou na nich uloženy. Jsou namáhané ohybem a smykem, případně kroucením a osovou silou. Zesilování nosníků je možné provést:

- zvětšením průřezu přibetonováním vrstvy betonu s podélnou a příčnou výztuží,
- vložení pomocných podpor,
- přidáním tuhých válcovaných profilů,
- lepením pásové výztuže,
- předpětím pomocí vnější předpínací výztuže.

První tři způsoby můžeme označit jako klasické. Při srovnání s lepením výztuže a vnějším předpětím jsou pracnější a časově náročnější.

### 9.2.2.1 Zesilování zvětšením průřezu

Nejběžnější způsoby zvětšení průřezu trámu nebo průvlaku přibetonováním a přidáním výztuže jsou znázorněny na obr. 9-4.

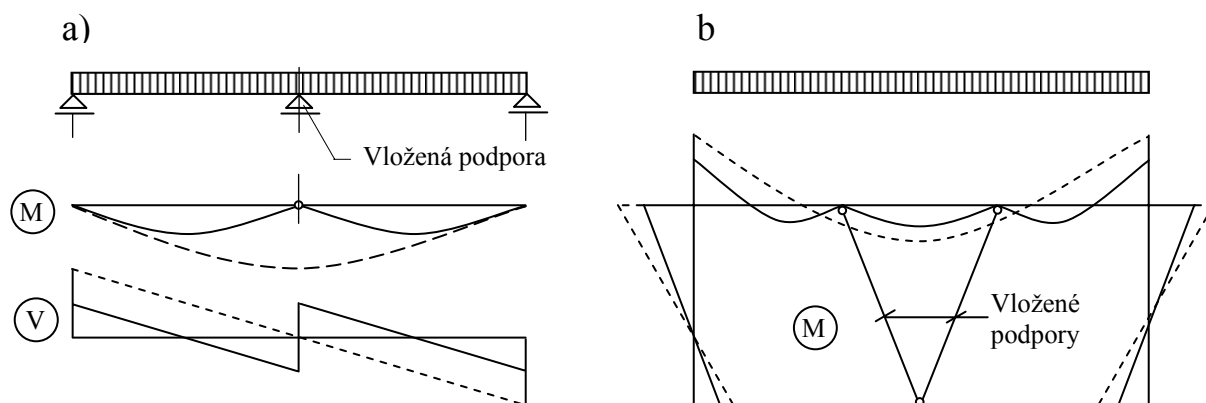


**Obrázek 9-4: Zesilování nosníků přibetonováním: a) zesilování na mezipodporový moment, b) zesilování na mezipodporový moment a smyk, c) zesilování na nadpodporový moment, d) zesilování na nadpodporový moment a smyk**

### 9.2.2.2 Zesilování zmenšením rozpětí

Často je vhodné zvětšit únosnost nosníků zmenšením rozpětí, dodatečným vložením jedné či několika podpor. Ze statického hlediska vložení podpor způsobuje změnu statického systému konstrukce. Podporové momenty a příčné síly, které vznikají nad vloženými podporami, nejsou vykryté výztuží, je tam pouze nedostatečná konstrukční výztuž. Vzniklé trhliny způsobují kloubové uložení. Změny statického schématu a průřezových sil jsou zřejmé z obr. 9-5.

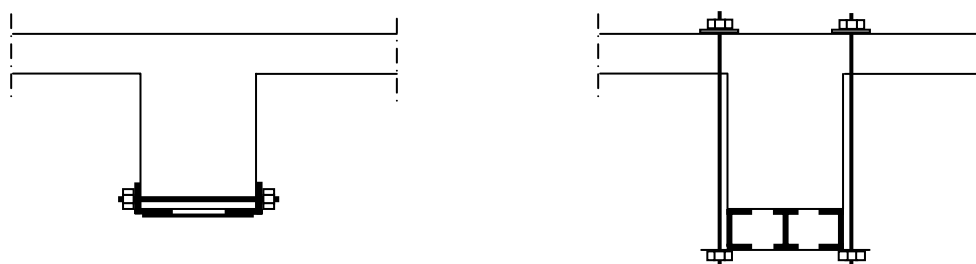
Nové podpory pro trámy a průvlaky mohou být pevné (sloupy, stěny) nebo poddajné (příčné nosníky, táhla). Podle toho je resp. není potřebné zvažovat vliv stlačení nebo prodloužení vložené podpory.



**Obrázek 9-5: Průběh ohybových momentů a příčných sil před a po vložení podpor a) vložení jedné podpory na nosníku b) vložení dvou podpor na rámové příčce**

### 9.2.2.3 Zesilování přidáním tuhé výztuže

Tuhé válcované profily spolupůsobící se železobetonovým nosníkem mohou vlastní ohybovou tuhostí výrazně zvětšit jeho únosnost (obr. 9-6). Podmínkou je spolehlivé spolupůsobení od okamžiku přetížení, které se zabezpečí svorníky. Pro zlepšení soudržnosti se zdrsní povrch betonu tak, že se na stykovou plochu nanese vrstva cementové malty a svorníky se přitáhne válcovaný profil k železobetonovému nosníku. Pro přidávané válcované profily se vytvářejí vlastní podpory, které mohou být součástí zesílení sloupu.



**Obrázek 9-6: Příčný řez trámem zesilným tuhými válcovanými profily**

### 9.2.2.4 Zesilování přidáním lepené výztuže

Zesílením nosníků lepenou pásovou výztuží se sleduje zvýšení jejich ohybové a smykové únosnosti. Technologický postup lepení pásů na zvýšení ohybové únosnosti je podobný jako při lepení lamel na desky (kap. 9.2.1.2). Na nosnicích se může využít i možnost lepení na boční stěny. Kvůli zvýšení soudržnosti se nalepené pásy v kotevní oblasti mohou stáhnout svorníky skrz navrtané otvory (to platí pro ocelové pásy).

Při zesilování nosníků na ohybový moment pomocí lepených pásů je často potřeba zvýšit i jejich smykovou únosnost. Kromě lamelových třmenů je možné k tomuto účelu použít i uhlíkovou tkaninu, která se laminuje pryskyřicí přímo na upravený betonový povrch nosníku. Tkanina se ukotvuje do tlačené části nosníku.

### 9.2.2.5 Zesilování vnějším předpětím

Přídavné předpětí vnější (externí) předpínací výztuží je účinný prostředek na zesilování betonových i zděných konstrukcí. Vnější předpínací výztuž (dále jen výztuž) tvoří lana, kabely nebo tyče, které jsou osazené přímo do betonového průřezu. Geometrické uspořádání výztuže závisí na konkrétních podmínkách zesilované konstrukce: statickém systému, uspořádání podélného řezu, tvaru příčného řezu apod. Důležitý je i charakter případných poruch, které se mají předpětím odstranit – ohybové, smykové trhliny, nadměrné deformace apod. Výztuž je přímá nebo zakřivená. Výhodou přímé výztuže je, že vyžaduje jen minimální zásah do původní nosné konstrukce. Zakřivená výztuž je uspořádaná nejčastěji ve tvaru polygonu. Při porovnání s přímou výztuží je účinnější, protože její dráha se může přizpůsobit průběhu průřezových sil v nosné konstrukci. Je však technologicky náročnější, protože v každém zlomu dráhy se musí vytvořit sedlo, tzv. deviátor. Ten musí bezpečně přenést příčné i podélné účinky vnějšího kabelu a přenést je do nosné konstrukce. Vychýlení z předepsané polohy zabraňují úchytky. Výztuž je kotvená v kotevních blocích. Jako kotevní bloky, sedla a úchytky mohou sloužit existující příčníky konstrukce nebo dobetonované či ocelové části přichycené ke konstrukci. Aby se zmenšila vzpěrná délka a omezilo kmitání výztuže, nesmějí být vzdálenosti mezi kotevními bloky, sedly a úchytkami větší než 16 m.

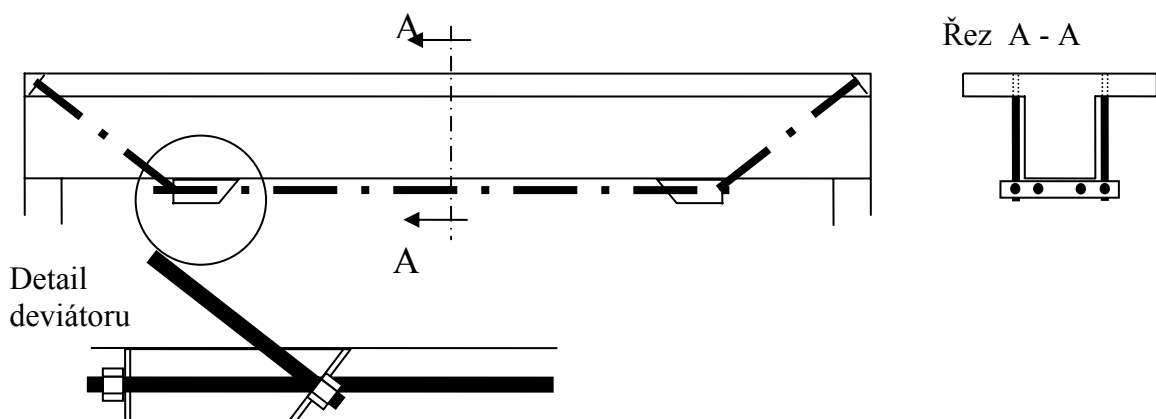
Při návrhu výztuže se vychází z předpokladu, že do konstrukce (výpočtového modulu) budou vneseny vnější síly předpětí. To znamená, že celá konstrukce se ve výpočtovém modulu zatíží vnějšími silami, a to v místě zakotvení silou a ohybovým momentem od excentrické polohy osazení kotev, s ohledem na těžišťovou osu, v místě deviátoru jen svislou silou.

S ohledem na množství kritérií a požadavků ovlivňujících rozhodovací proces při zesilování betonových konstrukcí, které jsou navíc často v kritickém stavu, zůstává vypracování optimálního řešení úkolem pro zkušeného statika. Na zvýraznění této skutečnosti by bylo možné uvést několik příkladů nevhodných způsobů zesilování, které vedly až ke zhroucení stavebního objektu. Mezi významné neúspěchy patří např. zesílení mostu spojujícího ostrovy Koror a Babeldaob v západní části Tichého oceánu. Předpjatý mostní objekt komůrkového průřezu s rozpětím 53,6 + 240,8 + 53,6 m byl dokončen v roce 1977. v letech 1995 a 1996 byl zesílený 8 vnějšími předpínacími kabely

o celkové síle 35,6 MN. 26. září 1996, tři měsíce po zesílení, se most zřítíl bez jakéhokoliv předcházejícího varování. Byly předloženy mnohé teorie o příčinách kolapsu, většina uváděla jako hlavní důvod změnu statického systému a její vliv na konstrukci.

Jako předpínací výztuž na zesilování konstrukcí se používají tyto jednotky:

- lana bez soudržnosti, obchodní označení Monostrand. Jsou to speciálně upravená sedmipramenná lana s nízkou relaxací o průměru 12,5 resp. 15,5 mm. Ochranu výztuže proti korozi vytváří polyetylenový plášť vyplněný mazivem, čím se zároveň minimalizují ztráty vlivem tření. z takto upravených lan můžeme vytvářet i větší předpínací jednotky;
- vnější kabely představují větší jednotky. Jsou sestaveny zpravidla z předpínacích lan o průměru 15,5 mm. Lana se vkládají obvykle do ocelových rourek a injektují klasicky injektážní maltou nebo se použijí polyetylenové rourky a jejich antikorozi ochrana se vytvoří speciální injektážní vazelínou;
- tyče z vysoce kvalitní oceli 13 180.9 s dohodnutou mezí pružnosti  $R_{p0,2} = 835$  MPa, a to buď hladké, s válcovaným závitem na konci (HPT), nebo se závitem neválcovaným po celé délce (CPS). Základní provedení je do 6 m, resp. 12 m. Spojkami je možné tyče nadstavovat do libovolné délky. Tyče se obvykle napínají momentovým klíčem, je však možné použít i speciální hydraulické napínací zařízení. Příklad zesílení trámu předpínacími tyčemi je na obr. 9-7.



**Obrázek 9-7: Zesílení trámu předpínacími tyčemi s detailem deviátoru**

Velkou výhodou vnějšího předpětí je, že jeho části jsou snadno kontrolovatelné, opravitelné a vyměnitelné.

### 9.2.3 Zesilování sloupů

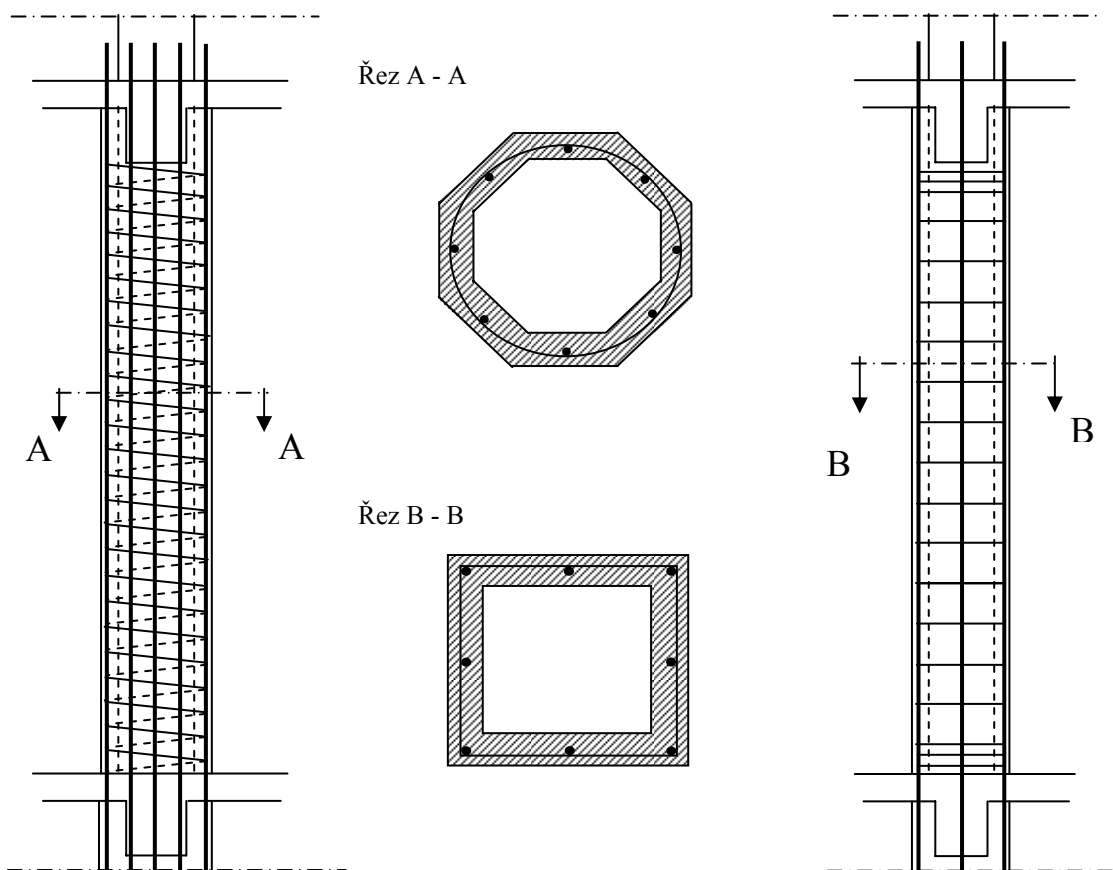
Požadavek na zesílení vodorovných nosných prvků je často spojen s potřebou zesilování sloupů. Ty jsou namáhány kombinací osově síly a ohybového momentu. v případě štíhlých sloupů je třeba zvážit i vliv vzpěru. Nejčastější způsoby zesilování sloupů jsou:

- přidání podélné a příčné výztuže a betonu,
- přidání tuhé výztuže,
- ovinutí tkaninou z uhlíkových vláken,
- uložení výztužných prutů v drážce

#### 9.2.3.1 Zesilování přidáním betonářské výztuže a betonu

Potřebné množství přidané výztuže a betonu vyplyne ze statického výpočtu. Při návrhu a posouzení sloupu je třeba brát v potaz smršťování a dotvarování starého a nového betonu. u kruhových a mnohoúhelníkových průřezů se přidává minimálně 6 ks podélné výztuže a příčná výztuž se vytváří ve tvaru spirály (obr. 9-8a). Sloupy čtvercového a obdélníkového průřezu se zesilují podélnou výztuží a třmínky (obr. 9-8b).

Svislá výztuž musí být zakotvená do stropní, příp. základové konstrukce pomocí předem vyvrtaných otvorů a epoxidové pryskyřice. Nová betonová vrstva o tloušťce 40 až 60 mm se vytváří stříkaným betonem, při větších tloušťkách se čerstvý beton ukládá do bednění. Někdy je třeba sloup zesílit jen na jedné straně nebo na koncích sloupu, kde jsou zpravidla největší ohybové momenty.



**Obrázek 9-8: Zesilování sloupů přidáním betonářské výztuže a betonu**

### 9.2.3.2 Zesilování přidáním tuhé výztuže

Zesilování sloupů pomocí tuhých ocelových profilů se provádí zpravidla přidáním válcovaných úhelníků a příčných pásů. Úhelníky se v rozích sloupů osazují do cementové malty. Po jejím zatvrdnutí se nahřáté pásy výztuže přivaří k úhelníkům. Osová vzdálenost pásů, které mají zabránit vybočení úhelníků, se volí okolo 500 mm. Ocelová bandáž omezuje přetvoření betonu v příčném směru, a tak zvyšuje pevnost betonu v tlaku. Tímto způsobem je možné výhodně zvýšit únosnost sloupů pouze v případě, když se síla v tlačném betonu podstatně podílí na přenášení zatížení. Účinnost bandáže klesá s narůstající výstředností normálové síly.

Z estetického hlediska, z důvodu antikorozi a protipožární ochrany se po zatížení konstrukce doporučuje omotat zesílený sloup sítí a nastříkat 30 až 50 mm vrstvou betonu.

V případě opravy silně porušeného sloupu nebo potřeby velkého zesílení se navrhuje ocelová objímka. Prostor mezi původním sloupem a objímkou se vyplní, v závislosti na tloušťce vrstvy, cementovou maltou nebo jemnozrnným betonem pod tlakem. Cementový kompozit se vtlačí skrz otvory v objímce.

Tloušťka plechu ocelové objímky a potřeba přidání betonářské výztuže vyplnou ze statického výpočtu.

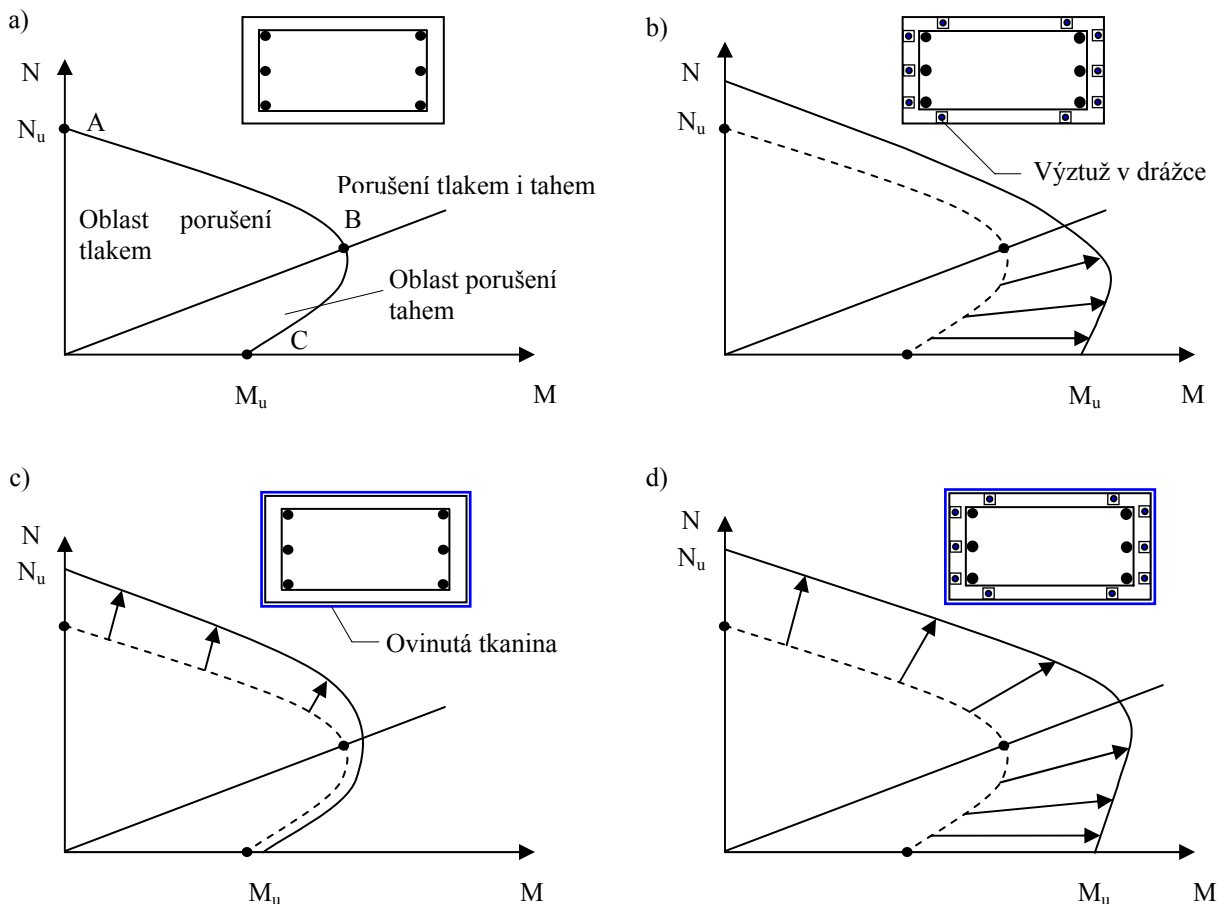
Spolupůsobení přidaného betonu, betonářské výztuže nebo válcované oceli na přenášení zatížení je podmíněné jejich účinným aktivováním, které se dosáhne:

- a) maximálním odlehčením části konstrukce, která zatěžuje sloup při zesilování,
- b) odstraněním nahodilého, příp. i části stálého zatížení,
- c) dočasným podepřením konstrukce pomocnými podporami,
- d) přitlačení tuhé výztuže, resp. ocelové objímky k vodorovným nosným prvkům v pohledu konstrukce pomocí lisů nebo ocelových klínů.

### **9.2.3.3 Zesilování ovinutím a výztuží v drážce**

Moderní koncepce zesilování sloupů se zakládají na použití tkaniny a výztužných prutů uložených do vyfrézované drážky. Podstata zvýšení únosnosti sloupů zesilovaných ovinutím tkaninou spočívá v tom, že ovinutí brání přetvoření betonu v příčném směru. Tak dochází k víceosému namáhání betonu, co zvyšuje jeho pevnost. Na zvýšení ohybové únosnosti sloupů je možné použít výztužné pruty (z oceli nebo FRP) ve směru osy sloupu uložené do vyfrézované drážky. Na jejich kotvení se v základech resp. nosnících vyvrtají otvory. Čára únosnosti původního obdélníkového průřezu sloupu namáhaného kombinací normálové síly a ohybového momentu je znázorněna na obr. 9-9a. v oblasti A – B je porušení vyvolané drcením betonu, zatímco v oblasti B – C je porušení způsobené překročením meze kluzu oceli. Po osazení výztužných prutů se čára únosnosti výrazněji rozšiřuje v oblasti B – C, úměrně zvýšenému stupni vyztužení podélnou výztuží (obr.9-9b). Naproti tomu použití ovinuté tkaniny vyvolá zvýšení únosnosti v oblasti A – B (obr. 9-9c). Kombinací výztužných prutů a ovíjené tkaniny se dosáhne zvýšení únosnosti sloupu v obou oblastech (obr. 9-9d). Přítomnost tkaniny navíc přispívá ke stabilitě vložených prutů.





**Obrázek 9-9: Čára únosnosti původního průřezu (a), zesíleného výztuží v drážce (b), ovinutého tkaninou (c), zesíleného výztuží v drážce i ovinutím tkaninou (d)**

Na zesilování ovinutím se nejčastěji používají tkaniny vyztužené uhlíkovými, skleněnými nebo aramidovými vlákny. v tkanině jsou, podobně jako v lamele, jednosměrná, přímá vlákna. Proto jsou vhodná na přenášení tahové síly ve směru vláken už při malých přetvořeních. k tomuto účelu se nejčastěji používají uhlíková vlákna. v rohožích jsou vlákna vedena ve dvou směrech (nejčastěji ortogonálně) a s ohledem na způsob tkaní jsou zvlňená. Tu se dobře osvědčila vlákna skleněná. Přenos tahové síly v rohožích se aktivuje při větších přetvořeních. Rohože jsou vhodné na zvýšení houževnatosti (duktility) nosných prvků, např. na zvýšení jejich seizmické odolnosti.

Tkaniny a rohože se při aplikaci na beton laminují, nejčastěji do epoxidové (kotvící) matrice nebo akrylátové pryskyřice (ochranné matrice umožňující přestup vodní páry). Protože vliv matrice při přenášení napětí je zanedbatelný, pro navrhování přicházejí v úvahu pouze vlastnosti a teoretický průřez vláken (ne kompozitu). Při ručním laminování není uspořádání vláken vždy ideální. Existuje také riziko, že při rozvíjení tkaniny, resp. rohože se poškodí vlákna.

z tohoto důvodu se doporučuje snížit charakteristické vlastnosti vlákna při navrhování o bezpečnostní koeficient  $s = 1,2$  pro tkaniny a  $s = 1,5$  pro rohože. Mezní poměrné přetvoření uhlíkových vláken, přípustné pro návrh, by nemělo překročit 50 % poměrného přetvoření při porušení vláken, případně se koriguje podle konkrétního stavu napětí (smyk, ovinutí, ohyb).

Postup při navrhování ovinutí tkaninou vychází ze sloupu kruhového průřezu. v dostředně tlačném sloupu vzniká normálové napětí  $\sigma_1$  ve směru působící síly  $N$  a napětí  $\sigma_2$  v příčném směru (obr. 9-9a).

Pracovní diagram (diagram  $\sigma/\varepsilon$ ) betonu ovinutého uhlíkovou tkaninou má přibližně bilineární průběh. v počáteční fázi se ovinutý beton chová podobně jako neovinutý – při malých přetvořeních se neprojevuje účinek omezení příčného přetvoření. s narůstajícím napětím narůstají podélná i příčná přetvoření. Když beton dosáhne mezní přetvoření v tlaku ( $\varepsilon_b = 0,0035$ ), dochází k zlomu diagramu a přímkovému průběhu. Sklon přímky odpovídá tuhostí FRP tkaniny. Ovinutí výrazně zvyšuje přetvořitelnost tlačných prvků.

V literatuře jsou uvedeny některé modely chování betonu s omezeným příčným přetvořením. Většina z nich analyzuje beton uložený v ocelových rourách. Zvýšená pevnost betonu v tlaku při trojosém napětí se stanoví ze vztahu:

$$f_{ck,c} = f_{ck} + 4,1 \cdot \sigma_2 \quad (9-1)$$

kde  $f_{ck,c}$  je pevnost v tlaku ovinutého betonu,  
 $f_{ck}$  je pevnost v tlaku neovinutého betonu,  
 $\sigma_2$  je napětí v příčném směru.

Výzkumné práce realizované v posledních letech dokázaly, že vztah je možné použít i pro betonové sloupy ovinuté uhlíkovou tkaninou. PrENV 1992-1 Design of concrete structures – Part 1: General rules and rules for building uvádí podobně vztahy:

$$f_{ck,c} = f_{ck} (1,0 + 5 \cdot \sigma_2 / f_{ck}) \quad \text{pro } \sigma_2 < 0,05 f_{ck} \quad (9-2)$$

$$f_{ck,c} = f_{ck} (1,125 + 2,5 \cdot \sigma_2 / f_{ck}) \quad \text{pro } \sigma_2 < 0,05 f_{ck} \quad (9-3)$$

Ovinutí obdélníkových průřezů sloupů je méně účinné než u kruhových průřezů. Tento poznatek je možné posoudit skutečností, že u čtvercových sloupů se omezení příčného přetvoření více koncentruje v rozích průřezu, než po celém obvodu. Zvýšení účinnosti ovinutí se dá dosáhnout zaoblením hran sloupu.

Technologický postup zesilování se skládá z těchto kroků:

- a) očištění povrchu betonu od porušených vrstev, nečistot resp. starých nátěrů (např. tlakovou vodou),
- b) zaoblení hran obdélníkového sloupu ( $r \geq 30$  mm), vyrovnaní nerovností na povrchu betonu polymercementovou maltou,
- c) ruční nebo strojové laminování uhlíkové tkaniny přímo na sloupu.

Při ovíjení a lepení tkaniny je třeba zohlednit možnost přestupu vodních par skrz laminovanou tkaninu z betonu do okolního prostředí. To je možné zabezpečit dvěma způsoby: při laminaci po částech (jako jednotlivé třmeny). Tento způsob je vhodný pro sloupy obdélníkového průřezu. Kotvící epoxidová pryskyřice (má velký difúzní odpor pro vodní páru) se použije jen na stěně s přesahem tkaniny a na protilehlé stěně. Na dvou ostatních stěnách se na laminaci použije akrylátová pryskyřice s malým difúzním odporem pro vodní páru. Použitím různých pryskyřic je 50 % povrchu sloupu otevřených pro difúzi vodní páry při ovíjení tkaniny po výšce (jako šroubovice). Tento způsob je vhodný pro sloupy s kruhovým průřezem. Tkanina se lepí pouze v úseku kotvení (v místě přesahu). v ostatní části je tkanina bez laminace.

Aplikace tkaniny je možná jen na nosné betonové podklady – pevnost v tahu povrchové vrstvy  $\geq 1,0$  MPa. Vlhkost podkladového betonu  $< 4$  % (hmotnostně). Při laminaci musí být teplota betonu o 3 °C vyšší než rosný bod. Před laminací se vyžaduje speciální penetrace betonu (doporučená dodavatelem tkaniny a kotevní pryskyřice).

#### **9.2.4 Souvislé zesilování konstrukce**

Poměrně novou metodou zesilování betonových konstrukcí je stříkání polymeru vyztuženého vlákny. Epoxidová nebo jiná (např. vinylesterová) pryskyřice vyztužená krátkými skleněnými nebo uhlíkovými vlákny se stříká na očištěný betonový povrch zesilované konstrukce. Po stříkání se nanese vrstva zarovná válečkem. Tímto způsobem je možné souvislé zesílení všech prvků nosné konstrukce (desky, nosníku, stěny a sloupu).

Krátká vlákna rozdílné délky se ve stříkací pistoli míchají s epoxidovou pryskyřicí a ukládají paralelně se zesilovaným povrchem. Ve dvou ostatních směrech jsou náhodně orientované. Takto uspořádaná vlákna mají sice menší pevnost než při jednosměrné orientaci, vykazují však mnohem větší přetvoření při porušení, a nelineární průběh v okolí mezního přetvoření. Zvýšená tažnost vyplývá ze skutečnosti, že porušení naneseného materiálu nastává kombinací trhání a vytahování vláken. Nelineární průběh a plastické přetváření umožňují odhalení odhlašující se poruchy a zvyšují kapacitu konstrukce absorbovat

energii. Uvedené skutečnosti vedou k závěru, že stříkání vláknů vyztuženého polymeru je zvláště vhodné na dodatečné zvýšení seizmické odolnosti nosných konstrukcí.

### ***9.3 TECHNOLOGIE SANACE VÝBUchem POŠKOZENÝCH STAVEB POMOCÍ KOMPOZITNÍCH TKANIN A UHLÍKOVÝCH PÁSKŮ***

#### **9.3.1 Úvod**

Technologie sanace výbuchem poškozených staveb pomocí kompozitních tkanin se začala rozvíjet ve Spojených Státech Amerických po pumovém atentátu v Oklahoma City v roce 1995, kde byla budova federálních úřadů zčásti srovnána se zemí pomocí podomácku vyrobené bomby uložené v dodávce před vchodem do budovy. v reakci na tuto tragickou událost americké úřady vytvořily Meziagenturní Komisi pro Bezpečnost (ISC), která měla za úkol urychleně řešit zavedení návrhových postupů pro stavby s přihlédnutím k zatížení výbuchem a tlakovými vlnami. Později katastrofické kolapsy Světového Obchodního Centra (WTC) 11. září 2001, ještě zvýšily úsilí amerických úřadů ve směru prevence následků teroristických výbuchů na nejrůznější typy občanských a průmyslových staveb.

Jako jedna z nejperspektivnějších metod preventivního zesílení železobetonových staveb proti účinkům výbuchu byla vybrána metoda aplikace kompozitních (především uhlíkových) tkanin, které americké úřady velice dobře znají jak z kosmického programu, tak z mnoha projektů vývoje nových systémů amerického ministerstva obrany. Kromě potenciálního ohrožení výbuchy z teroristických činů se tato technologie začíná uplatňovat také v průmyslových provozech pro snížení následků průmyslových havárií a nehod, kde se často uplatňuje na betonové zdivo řídicích a kontrolních stanišť.

Jak již bylo řečeno, vývoj a zkoušení technologie kompozitních tkanin pro zvýšení výbuchové odolnosti staveb byl převážně financován americkým ministerstvem obrany, z čehož bohužel vyplývá špatná dostupnost informací a výsledků těchto utajovaných projektů. z dostupných informací (Fyfe, 2001; Gram, 2006) můžeme říci, že technologie byla úspěšně odzkoušena testy v Nevadské poušti a dalších experimentálních zařízeních americké armády a v současné době probíhá aplikace především uhlíkových tkanin na budovy potenciálně ohrožené teroristickými činy jak přímo v USA (federální budovy, soudy, ministerstva, policejní stanice, ústředí velkých korporací atp.) tak na americké ambasády ve světě, které byly v roce 1998 také cílem pumových útoků.

V protivýbuchové ochraně staveb se uplatňují dva základní druhy kompozitních tkanin a to především tkaniny z uhlíkových vláken a tkaniny z vláken skelných, nejčastěji kombinované s epoxidovými, případně polyesterovými pryskyřicemi. Preferovanou volbou jsou tkaniny z uhlíkových vláken s epoxidovou pryskyřicí a to především díky svým mnohem lepším mechanickým vlastnostem, které mohou překonávat vlastnosti oceli. Naopak tkaniny ze skelných vláken se v průhledné formě úspěšně používají na velmi lehké ztužení rezného zdiva nebo různých atypických prvků historických staveb, které z estetických důvodů není možné zakrýt protivýbuchovými opatřeními.

V současné době je v USA už několik firem, které se specificky zaměřují na návrh a aplikaci zesílení staveb proti účinkům výbuchu a tlakových vln; jedná se o firmy dodávající a aplikující kompozitní tkaniny a uhlíkové pásy také pro jiné typy zesílení staveb, například Structural Group ([www.structural.net](http://www.structural.net)), Fyfe Company ([www.fyfec.com](http://www.fyfec.com)) nebo QuakeWrap ([www.quakewrap.com](http://www.quakewrap.com)).

### **9.3.2 Kompozitní materiály**

Jak již jejich název naznačuje, kompozitní materiály jsou tvořené dvěma nezávislými fázemi, a to vlákny a pojivem. Vlákna dodávají kompozitním materiálům jejich výborné mechanické vlastnosti. Ty jsou dány jejich vysoce orientovanou chemickou strukturou, jež má vynikající vlastnosti v tahu při velmi nízké váze. Naopak pojivo v tomto případě zajišťuje přenos napětí mezi jednotlivými vlákny a podkladem a zajišťuje jejich chemickou a mechanickou ochranu, propůjčující kompozitům dlouhodobou trvanlivost a odolnost vůči agresivním prostředím. Svoji stavbou jsou tyto materiály předurčeny k použití především v tahu, kdy je plně využito výborných mechanických vlastností vláken. Při ostatních zatíženích přebírá hlavní nosnou úlohu pojivo s mnohem horšími hodnotami mechanických vlastností.

V současné době jsou nejrozšířenější materiály kombinující uhlíková vlákna s epoxidovým pojivem, jejichž mechanické vlastnosti i trvanlivost jsou v mnoha ohledech nejlepší. Tyto vlastnosti jsou vyváženy relativně nejvyšší cenou mezi kompozitními materiály pro stavebnictví. Samozřejmě ne všechny aplikace vyžadují maximální hodnoty mechanických vlastností a trvanlivosti a mohou se tedy použít materiály cenově dostupnější, především na bázi skelných vláken.

### **9.3.3 Využití kompozitních materiálů**

Jak již bylo řečeno, kompozitní tkaniny lze využít pro zesilování konstrukcí železobetonových, zděných, ocelových nebo dřevěných. Kompozitní materiály lze použít pro zesilování železobetonových konstrukcí několika různými způsoby. Důležitá je vždy orientace hlavních nosných vláken kompozitu ve

směru nejvyššího tahového napětí tak, aby byl plně využit jejich potenciál. Vzhledem k tomu, že kompozitní materiály mají většinou vlákna orientovaná pouze v jednom nebo ve dvou na sebe kolmých směrech, je velmi důležitý detailní návrh zesílení s případným použitím více vrstev tkanin s vlákny orientovanými více směry.

Praktické použití kompozitních tkanin pro zesilování přibližují následující příklady. Například u železobetonových sloupů může být zvýšena osová pevnost i pevnost v ohybu tkaninami s vlákny jak v osovém, tak v příčném směru. Samozřejmostí je také zvýšení houževnatosti takto zesíleného sloupu. Železobetonové desky mohou být zesíleny aplikací tkanin v tahových zónách. Další aplikací je zesílení tlakových potrubí či nádrží. Průvlaky mohou být zesíleny v tahových zónách pro zvýšení ohybové pevnosti nebo ve smykových zónách pro zvýšení smykové pevnosti. u stěn pak lze zesílením dosáhnout zvýšení ohybové a smykové pevnosti. Ve všech těchto případech samozřejmě dojde také k účinnému ztužení betonové konstrukce pro případ exploze.

### 9.3.4 Postup aplikace

Kompozitní materiály se v praxi aplikují dvěma základními metodami podle typu a geometrie zesílení. Vzhledem k tomu, že mají obecně vysoké hodnoty modulu pružnosti a pevnosti v tahu, je nutné pro využití jejich plného potenciálu věnovat maximální pozornost přípravě povrchu betonu, dřeva či zdiva před vlastní aplikací, protože spoj mezi zesilovaným materiálem a kompozitem je nejdůležitějším bodem celého systému.

První metodou aplikace je kombinace kompozitní tkaniny a plnicí pryskyřice přímo na místě použití takzvanou metodou vlhkého nanášení (anglicky „wet-lay up“). Tato metoda umožňuje velkou variabilitu, co se týče tvarů zpevnované konstrukce, nebo výsledných vlastností zesílení, daných orientací vláken a počtem jejich vrstev. Touto variabilitou lze také v mnoha případech dosáhnout nižší ceny zesílení, než se standardním sortimentem kompozitních profilů. Nevýhodou jsou pak vyšší požadavky na zacvičení, kvalifikaci a kvalitu práce aplikačních pracovníků tak, aby se předešlo defektům a bylo docíleno vysoké kvality a trvanlivosti zesílení. Dalším faktorem je relativně vyšší pracnost.

V zásadě je postup aplikace pomocí této metody následující: příprava povrchu, penetrace, vyrovnání povrchu tmelem, nasycení tkaniny mimo konstrukci, nanesení tkaniny na konstrukci a uzavření souvrství nátěrem. Příprava povrchu betonu se provádí dle rozsahu pískováním, tryskáním vysokotlakým vodním paprskem nebo broušením. Poté je povrch penetrován nízkoviskózní epoxidovou pryskyřicí a póry či nerovnosti jsou vyhlazeny epoxidovým tmelem. Tkanina je pak naplněna mimo konstrukci pryskyřicí s použitím válečku a poté nanesena na

konstrukci samotnou a vyhlazena. Posledním krokem je převrstvení tkaniny ochrannou vrstvou epoxidového nátěru.

Druhá metoda používá kompozitu ve formě předem vytvrzených finálních lamel, desek, skruží nebo jiných profilů lepených na konstrukci pomocí dvousložkových epoxidových lepidel. Lamely či desky jsou tak vyrobeny ve své konečné podobě přímo na lince výrobce nebo předem v přípravně aplikační firmy, čímž je zajištěna jejich vysoká kvalita a rovnoměrnost. Nejběžnějším továrním výrobním procesem uhlíkových pásků a jiných profilů je pultruze (pultrusion). Tento kontinuální proces se sestává z protahování pramenů vláken tekutým pojivem, které je pak ve finálním průřezu vytvrzeno v tepelné matrici a proces končí zakrácením materiálu na požadovanou délku.

### 9.3.5 Výzkum a normalizace

Samozřejmým předpokladem širokého uplatnění kompozitních tkanin ve stavebnictví je výzkum, který je základem pro postupnou tvorbu norem pro výpočet a aplikaci těchto materiálů. To umožňuje nejenom rychlejší a kvalitnější navrhování, ale především přináší postupný nárůst důvěry odborné veřejnosti i investorů a tím možnost pro další rozšíření této metody.

Z hlediska výzkumu jsou nejlépe prostudované vlastnosti samotných kompozitních materiálů, které byly po řadu desetiletí používány v mnohem extrémnějších podmínkách v letectví a kosmonautice [Peters, 1998]. Také vlastnosti stavebních lepidel a dvousložkových epoxidových pryskyřic, používaných jako pojivo, jsou všeobecně známé. Mnohem důležitější je ale společné chování tohoto třífázového systému (dohromady s betonovým podkladem), jehož počáteční vlastnosti byly prostudovány velice zevrubně v mnoha experimentálních programech v posledních dvou desetiletích [USACE, 1997; NCHRP 10-59, 2004]. Na druhé straně dlouhodobá trvanlivost (v řádech desítek let) celého zesilovacího systému v různých extrémních klimatických podmínkách či chemicky agresivních prostředích nebyla dosud plně prostudována a výzkum v této oblasti stále pokračuje [Karbhari, 2003; Bonacci 2000; Myers, 2001]. Výzkum trvanlivosti zesílení pomocí kompozitních materiálů probíhá po celém světě v mnoha univerzitních a firemních laboratořích [Buyukoyturk, 1998; Buyukozturk, 1998; Buyukozturk, 2004].

Jak postupuje výzkum této zesilovací metody, pokračuje i vývoj v oblasti norem standardizujících tuto oblast. v Evropě je považována za hlavní směrnici pro navrhování tohoto typu zesílení technická zpráva FIB (Federation International du Béton) „bulletin 14 – Externally bonded FRP reinforcement for RC structures“ (Externí lepená kompozitní výztuž pro železobetonové konstrukce). v České Republice se například v současné době připravují technické podmínky

Ministerstva dopravy ČR pro přípravu, projektování a provádění zesílení nosných konstrukcí betonových mostů a lávek.

### **9.3.6 Hodnocení použití kompozitních materiálů**

Zesilování železobetonových konstrukcí pomocí kompozitních materiálů je v mnoha ohledech atraktivní metoda, která je jednou z praktických odpovědí na poškození staveb účinky výbuchů nebo pro jejich preventivní ochranu. Jejimi hlavními výhodami jsou výrazné zesílení, dlouhodobá trvanlivost, chemická odolnost, variabilita, rychlá aplikace a tudíž nízké náklady na aplikaci, které by měly vyvážit vyšší náklady na materiál. Za nevýhody lze v současné době považovat především malou zkušenost projektantů a odborné veřejnosti s touto metodou, danou také teprve se rozvíjejícími standardy a normami. s postupným rozšířením kvalitních standardů a norem a se současným nárůstem praktických zkušeností s touto metodou lze do budoucna očekávat velký nárůst používání kompozitních materiálů pro zesilování a opravy železobetonových, cihelných, ocelových či dřevěných konstrukcí.

### **9.3.7 Závěry**

Rekonstrukce silně poškozených konstrukcí je odborně mimořádně náročnou disciplínou. Současné technické možnosti však dovolují zachránit i silně zdevastované objekty, samozřejmě za cenu mimořádných finančních nákladů. Při čistě technickém posuzování rekonstrukční strategie nesmí proto chybět i ekonomická analýza jednotlivých variant. Zejména u starších, morálně zastaralých objektů může být nejvhodnější variantou jejich stržení a náhrada objektem novým.



## 10 LITERATURA

### 10.1 NORMOVÉ PODKLADY

#### 10.1.1 Eurokódy

- ČSN EN 1990 (2003), Eurokód: *Zásady navrhování konstrukcí*. ČNI, Praha 2003.
- ČSN EN 1991-1-1 (2004), Eurokód 1: *Zatížení konstrukcí – Část 1-1: Vlastní tíha*. ČNI, Praha 2004.
- ČSN EN 1991-1-5 (2007), Eurokód 1: *Zatížení konstrukcí – Část 1-5: Zatížení větrem*. ČNI, Praha 2007.
- ČSN EN 1991-1-7 (2007), Eurokód 1: *Zatížení konstrukcí – Část 1-7: Mimořádná zatížení*. ČNI, Praha 2007.
- ČSN EN 1992-1-1 (2006), Eurokód 2: *Navrhování betonových konstrukcí - Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. ČNI, Praha 2006.
- ČSN EN 1993 (2006), Eurokód 3: *Navrhování ocelových konstrukcí*, ČNI, Praha 2006.
- ČSN EN 1994 (2004), Eurokód 4: *Navrhování spřažených ocelobetonových konstrukcí*, ČNI, Praha 2004.
- ČSN EN 1995 (2006), Eurokód 5: *Navrhování dřevěných konstrukcí*, ČNI, Praha 2006
- ČSN EN 1996 (2007), Eurokód 6: *Navrhování zděných konstrukcí*, ČNI, Praha 2007
- ČSN EN 1998-1 (2006), Eurokód 8: *Navrhování konstrukcí odolných proti zemětřesení – Část 1: Obecná pravidla, seizmická zatížení a pravidla pro pozemní stavby*. ČNI, Praha 2006.
- ČSN EN 1998-2 (2007), Eurokód 8: *Navrhování konstrukcí odolných proti zemětřesení – Část 2: Mosty*, ČNI, Praha 2007.
- ČSN EN 1998-3 (2007), Eurokód 8: *Navrhování konstrukcí odolných proti zemětřesení – Část 3: Hodnocení a zesilování pozemních staveb*, ČNI, Praha 2007.
- ČSN EN 1998-4 (2007), Eurokód 8: *Navrhování konstrukcí odolných proti zemětřesení – Část 4: Zásobníky, nádrže a potrubí*, ČNI, Praha 2007.
- ČSN EN 1998-5 (2006), Eurokód 8: *Navrhování konstrukcí odolných proti zemětřesení – Část 5: Základy, opěrné a zárubní zdi a geotechnická hlediska*, ČNI, Praha 2006.
- ČSN EN 1998-6 (2006), Eurokód 8: *Navrhování konstrukcí odolných proti zemětřesení – Část 6: Věže, stožáry a komíny*, ČNI, Praha 2006.
- ČSN EN 1999 (2007), Eurokód 9: *Navrhování konstrukcí z hliníkových slitin*, ČNI, Praha 2007.

- ČSN EN 12 504-1 (2001): *Zkoušení betonu v konstrukcích - Část 1: Vývrty - Odběr, vyšetření a zkoušení v tlaku*, ČNI, Praha 2001.
- ČSN EN 12 390-1 (2001): *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 1: Tvar, rozměry a jiné požadavky na zkušební tělesa a formy*, ČNI, Praha 2001.
- ČSN EN 12 390-3 (2002): *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles*, ČNI, Praha 2002.
- ČSN EN 12 390-4 (2001): *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 4: Pevnost v tlaku - Požadavky na zkušební lisy*, ČNI, Praha 2001.
- ČSN EN 13631-1 (2005): *Výbušniny pro civilní použití – Brizantní trhavy – Část 1: Požadavky*. ČNI, Praha 2005.
- ČSN EN 13631-2 (2003): *Výbušniny pro civilní použití – Brizantní trhavy – Část 2: Stanovení tepelné stability výbušnin*. ČNI, Praha 2003.
- ČSN EN 13631-3 (2005): *Výbušniny pro civilní použití – Brizantní trhavy – Část 3: Stanovení citlivosti výbušnin ke tření*. ČNI, Praha 2005.
- ČSN EN 13631-4 (2003): *Výbušniny pro civilní použití – Brizantní trhavy – Část 4: Stanovení citlivosti výbušnin k nárazu*. ČNI, Praha 2003.
- ČSN EN 13631-5 (2003): *Výbušniny pro civilní použití – Brizantní trhavy – Část 5: Stanovení vodovzdornosti*. ČNI, Praha 2003.
- ČSN EN 13631-6 (2003): *Výbušniny pro civilní použití – Brizantní trhavy – Část 6: Stanovení odolnosti hydrostatickému tlaku*. ČNI, Praha 2003.
- ČSN EN 13631-7 (2004): *Výbušniny pro civilní použití – Brizantní trhavy – Část 7: Stanovení bezpečnosti a spolehlivosti v extrémních teplotách*. ČNI, Praha 2004.
- ČSN EN 13631-10 (2004): *Výbušniny pro civilní použití – Brizantní trhavy – Část 10: Metoda ověření iniciačních prostředků*. ČNI, Praha 2004.
- ČSN EN 13631-11 (2004): *Výbušniny pro civilní použití – Brizantní trhavy – Část 11: Stanovení přenosu detonace*. ČNI, Praha 2004.
- ČSN EN 13631-12 (2005): *Výbušniny pro civilní použití – Brizantní trhavy – Část 12: Specifikace počínových náloží s rozdílnou iniciační schopností*. ČNI, Praha 2005.
- ČSN EN 13631-13 (2003): *Výbušniny pro civilní použití – Brizantní trhavy – Část 13: Stanovení hustoty*. ČNI, Praha 2003.
- ČSN EN 13631-14 (2003): *Výbušniny pro civilní použití – Brizantní trhavy – Část 14: Stanovení detonační rychlosti*. ČNI, Praha 2003.
- ČSN EN 13631-15 (2005): *Výbušniny pro civilní použití – Brizantní trhavy – Část 15: Výpočet termodynamických vlastností*. ČNI, Praha 2005.
- ČSN EN 13631-16 (2005): *Výbušniny pro civilní použití – Brizantní trhavy – Část 16: Detekce a měření toxických plynů*. ČNI, Praha 2005.
- ČSN EN 13857-1 (2004): *Výbušniny pro civilní použití – Část 1: Názvosloví*. ČNI, Praha 2004.
- ČSN EN 13857-3 (2003): *Výbušniny pro civilní použití – Část 3: Informace poskytované uživateli výrobcem nebo jeho zplnomocněným zástupcem*. ČNI, Praha 2003.

- ČSN EN 1127-1 (2008) *Výbušná prostředí – Prevence a ochrana proti výbuchu – Část 1: Základní pojmy a metodologie*. ČNI, Praha 2008.
- ČSN EN, 14460 (2006): *Konstrukce odolné proti výbuchovému tlaku*. ČNI, Praha 2006.
- ČSN EN, 14373 (2006): *Systémy pro potlačování výbuchu*. ČNI, Praha 2006.
- ČSN EN, 14797 (2007): *Zařízení pro odlehčení výbuchu*. ČNI, Praha 2006.
- ČSN EN, 14491 (2006): *Ochranné systémy pro odlehčení výbuchu prachu*. ČNI, Praha 2006.
- ČSN EN, 14994 (2007): *Ochranné systémy pro odlehčení výbuchu plynu*. ČNI, Praha 2007.
- ČSN EN, 13463-1 (2002): *Neelektrická zařízení pro prostředí s nebezpečím výbuchu – část 1: Základní metody a požadavky*. ČNI, Praha 2002.
- ČSN EN, 13463-5 (2004): *Neelektrická zařízení pro prostředí s nebezpečím výbuchu – část 5: Ochrana bezpečnou konstrukcí „c“*. ČNI, Praha 2004.
- ČSN EN, 13237 (2004): *Prostředí s nebezpečím výbuchu – Termíny a definice pro zařízení a ochranné systémy určené pro použití v prostředí s nebezpečím výbuchu*. ČNI, Praha 2004.
- ČSN EN, 12874 (2002): *Protiexplozní pojistky – Funkční požadavky, zkušební metody a vymezení použití*. ČNI, Praha 2002.
- Pr EN 15089 (2007): *Systémy pro oddělení výbuchu*. CEN Brusel 2007.
- ČSN EN 13673-1 (2004): *Stanovení maximálního výbuchového tlaku a maximální rychlosti nárůstu výbuchového tlaku plynů a par – Část 1: Stanovení maximálního výbuchového tlaku*. ČNI, Praha 2004.
- ČSN EN 13676-2 (2006): *Stanovení maximálního výbuchového tlaku a maximální rychlosti nárůstu výbuchového tlaku plynů a par – Část 2: Stanovení maximální rychlosti nárůstu výbuchového tlaku*. ČNI, Praha 2006.
- ČSN EN 14756 (2007): *Stanovení mezní koncentrace kyslíku (LOC) pro hořlavé plyny a páry*. ČNI, Praha 2007.
- ČSN EN 14034-1 (2005): *Stanovení výbuchových charakteristik rozvířeného prachu – Část 1: Stanovení maximálního výbuchového tlaku  $p_{max}$  rozvířeného prachu*. ČNI, Praha 2005.
- ČSN EN 14034-2 (2007): *Stanovení výbuchových charakteristik rozvířeného prachu – Část 2: Stanovení maximální rychlosti nárůstu výbuchového tlaku  $(dp/dt)_{max}$  rozvířeného prachu*. ČNI, Praha 2007.
- ČSN EN 14034-3 (2007): *Stanovení výbuchových charakteristik rozvířeného prachu – Část 3: Stanovení dolní meze výbušnosti LEL rozvířeného prachu*. ČNI, Praha 2007.
- ČSN EN 13237 (2004): *Prostředí s nebezpečím výbuchu – Termíny a definice pro zařízení a ochranné systémy určené pro použití v prostředí s nebezpečím výbuchu*. ČNI, Praha 2004.
- ČSN EN 13123-1 (2002): *Okna, dveře a okenice – Odolnost proti výbuchu – Požadavky a klasifikace – Část 1: Rázová trubice*. ČNI, Praha 2002.

- ČSN EN 13123-2 (2004): *Okna, dveře a okenice – Odolnost proti výbuchu – Požadavky a klasifikace – Část 2: Zkouška na volném prostranství*. ČNI, Praha 2004.
- ČSN EN 13124-1 (2002): *Okna, dveře a okenice – Odolnost proti výbuchu – Zkušební metoda – Část 1: Rázová trubice*. ČNI, Praha 2002.
- ČSN EN 13124-2 (2004): *Okna, dveře a okenice – Odolnost proti výbuchu – Zkušební metoda – Část 2: Zkouška na volném prostranství*. ČNI, Praha 2004.
- ČSN EN 13541 (2001): *Sklo ve stavebnictví – Bezpečnost zasklení – Zkoušení a klasifikace odolnosti proti výbuchovému tlaku*. ČNI, Praha 2001.
- ČSN EN 1063 (2000): *Sklo ve stavebnictví – Bezpečnost zasklení – Zkoušení a klasifikace odolnosti proti střelám*. ČNI, Praha 2000.

### 10.1.2 České národní normy, ISO normy a předpisy

- ČSN 73 0032 (1978): *Výpočet stavebních konstrukcí zatížených dynamickými účinky strojů*, ÚNM, Praha 1978.
- ČSN 73 0035 (1986): *Zatížení stavebních konstrukcí*, ÚNM, Praha 1986.
- ČSN 73 0036 (1973): *Seismická zatížení staveb*. ÚNM, Praha 1973.
- ČSN 73 0040 (1996): *Zatížení stavebních objektů technickou seismicitou a jejich odezva*. ÚNM, Praha 1996.
- ČSN 73 2030 (1993): *Zatěžovací zkoušky stavebních konstrukcí. Společná ustanovení*, ÚNM, Praha 1993.
- ČSN 73 2044 (1984): *Dynamické zkoušky stavebních konstrukcí*, ÚNM, Praha 1984.
- ČSN 73 1101 (1980): *Navrhování zděných konstrukcí*, ÚNM, Praha 1980.
- ČSN 73 1317 (1987): *Stanovení pevnosti betonu v tlaku*, ÚNM, Praha 1987.
- ČSN 73 1318 (1986): *Stanovení pevnosti betonu v tahu*, ÚNM, Praha 1986.
- ČSN 73 1329 (1989): *Úprava tlačných ploch betonových zkušebních těles*, ÚNM, Praha 1989.
- ČSN 73 2578 (1981): *Zkouška vodotěsnosti povrchové úpravy stavebních konstrukcí*, ÚNM, Praha 1981.
- ČSN 73 0405 (1997): *Měření posunů stavebních objektů*, ÚNM, Praha 1997.
- ČSN 65 0201 (2003): *Hořlavé kapaliny – Prostory pro výrobu, skladování a manipulaci*. 2003
- ČSN 65 0205 (1996): *Hořlavé zkapalněné uhlovodíkové plyny. Výrobní a sklady*. 1996
- ČSN 33 0371 (1983): *Nevýbušná elektrická zařízení. Výbušné směsi. Klasifikace a metody zkoušek*. 1983
- ČSN 33 2000-3 (1995): *Elektrotechnické předpisy. Elektrická zařízení – Část 3: Stanovení základních charakteristik*. 1995
- ČSN 389683 (2007): *Návod na inertizaci jako prevence proti výbuchu*. ČNI, Praha 2007

- ČSN ISO 6184-1 (1993): *Systémy ochrany proti výbuchu – Část 1: Určování ukazatelů výbuchu hořlavých prachů ve vzduchu*. ČNI, Praha 1993.
- ČSN ISO 6184-2 (1993): *Systémy ochrany proti výbuchu – Část 2: Určování ukazatelů výbuchu hořlavých plynů ve vzduchu*. ČNI, Praha 1993.
- ČSN ISO 6184-3 (1993): *Systémy ochrany proti výbuchu – Část 3: Určování ukazatelů výbuchu směsí palivo/vzduch, jiných než jsou směsi prach/vzduch a plyn/vzduch*. ČNI, Praha 1993.
- ČSN ISO 6184-4 (1993): *Systémy ochrany proti výbuchu: Určování účinnosti systémů na potlačování výbuchu*. ČNI, Praha 1993.

### 10.1.3 Ostatní normy a předpisy

- ASCE Standard 4-86: *Seismic analysis of safety related nuclear structures*. ASCE, New York 1986.
- ISO/DIS 6258: *Nuclear power plants - Design against seismic hazards*. ISO, Brussels 1983.
- NCHRP 10-59 (2004): *Research Initiative: Construction Specifications for Bonded Repair and Retrofit of Concrete Structures Using FRP Composites*, National Cooperative Highway Research Program, USA, 2004.
- Safety Series No 50-SG-S5 (1981): *External Man-Induced Events in Relation to Nuclear Power Plant Siting*. IAEA, Vienna, 1981.
- Safety Series 35/G1 (1992): *Safety Guide on the Safety Assessment and Safety Analysis. Report of Research Reactors*. IAEA Vienna, March 1992.
- UBC 1997: *Uniform Building Code*, 1997.
- U.S. Army Corp of Engineers (1997), *Engineering and Design: Composite Materials for Civil Engineering Structures, ETL 1110-2-548*, March 1997.
- Vyhláška MV č. 246/2001 Sb., o stanovení podmínek požární bezpečnosti a výkonu státního požárního dozoru (vyhláška o požární prevenci).
- Nařízení vlády č. 406/2004 Sb., o bližších požadavcích na zajištění bezpečnosti a ochrany zdraví při práci v prostředí s nebezpečím výbuchu.

## 10.2 PUBLIKACE

### 10.2.1 Sborníky za seminářů projektu

- Janovský, B. a kol. (2007/1): *Vlastnosti výbušin a analýza charakteru výbuchového zatížení a jeho modifikací*. ČVUT - Kloknerův ústav, Praha 2007.
- Janovský, B. a kol. (2007/2): *Parametry tlakových vln, zatížení konstrukcí a jejich ochrana*. ČVUT - Kloknerův ústav, Praha 2007.
- Makovička, D. a kol. (2008/1): *Odezva stavebních konstrukcí při zatížení výbuchem a jejich ochrana*. ČVUT - Kloknerův ústav, Praha 2008.

Makovička, D. a kol. (2008/2): *Hodnocení bezpečnosti a spolehlivosti konstrukcí*. ČVUT - Kloknerův ústav, Praha 2008.

### 10.2.2 Ostatní publikace

- Baker W.E., Cox P.A., Westine P.S. et al. (1983): *Explosion hazards and evaluation*. Elseviers Scientific Publishing Company, 1983.
- Bangash, M. Y. H. (1993): *Impact and Explosion*, Blackwell Scientific Publications, Oxford 1993.
- Bjerketvedt, D., Bakke, J.R., van Wingerden, K. (1997): *Gas Explosion Handbook*; HTML Version 1.0, Bergen, 1997
- Bonacci, J.F., Maalej, M. (2000): Externally Bonded FRP for Service-Life Extension of RC Infrastructure, *Journal of Infrastructure Systems*, Ročník 6, Číslo 1, pp. 41-51.
- Brasie, W.C. and Simpson, D.W. (1968): *Guidelines for estimating damage explosion*; Proc. 63rd Nat. AIChE Meeting, AIChE, New York, 1968
- Buyukozturk, O., Hearing, B., (1998/1): Crack propagation in concrete composites influenced by interface fracture parameters, *International Journal of Solids and Structures*, Ročník 35, Číslo 31-32, pp. 4055-4066.
- Buyukozturk, O., Hearing, B., (1998/2): „Failure Behavior of Precracked Concrete Beams Retrofitted with FRP, *Journal of Composites for Construction*, Ročník 2, Číslo 3, pp. 138-144.
- Buyukozturk, O., Gunes, O., Karaca, E., (2004): Progress on understanding debonding problems in reinforced concrete and steel members strengthened using FRP composites, *Construction and Building Materials*, Ročník 18, Číslo 1, pp. 9-19.
- Cubbage, P.A., Simmonds, W.A. (1955): *An investigation of explosion reliefs for industrial drying ovens - I Top reliefs in box ovens*; Trans. Inst. Gas Eng., 105, 470, 1955
- Cubbage, P.A., Simmonds, W.A. (1957): *An investigation of explosion reliefs for industrial drying ovens - II Back reliefs in box ovens*; Trans. Inst. Gas Eng., 107, 1957
- Damec, J. (1998/1): *Protivýbuchová prevence*. Edice SPBI č. 8. Ostrava, 1998.
- Damec, J. (1998/2): Konstrukční protivýbuchová ochrana plnicího vozu. *Požární ochrana 98*. VŠB Ostrava, 1998.
- Damec, J. (1999/1): *Protivýbuchová prevence*. Učebnice pro studenty oboru TPO a BP. Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství – edice SPBI Spektrum č.8, Ostrava. 1999.
- Damec, J. a kol. (1999/2): *Protivýbuchová prevence v potravinářství a zemědělství*. Edice sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství spektrum č. 23, Ostrava, 1999.
- Damec, J. (1999/3): Konstrukční protivýbuchová ochrana. *TRANSFER 99*. VUT Brno, 1999.

- Damec, J. (1999/4): Výbuchy potravinářského prachu. *Červený kohout 99*, Dům techniky České Budějovice, 1999.
- Damec, J. (1999/5): Inertizace jako způsob protivýbuchové prevence prachů. *Požární ochrana 99*. VŠB Ostrava, 1999.
- Damec, J., Bártlová, I. (2002/1): *Prevence technologických procesů*. Učebnice. Edice sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství spektrum č. 30, Ostrava, 2002.
- Damec, J. (2002/2): Nebezpečí výbuchu acetonových lahví. *Požární ochrana 2000*. VŠB Ostrava, 2000.
- Damec, J., Šimandl, L. (2002): Posouzení nebezpečí iniciace elektrostatickou jiskrou při manipulaci s PHM. *Červený kohout 2002*, Dům techniky České Budějovice, 2002.
- Damec, J. (2007): *Protivýbuchová ochrana*. Distanční vzdělávání a e-learning v oblasti požární ochrany a bezpečnosti průmyslu. SPBI, VŠB-TU Ostrava a Moravskoslezský kraj za přispění Evropského sociálního fondu. Ostrava 2007.
- Denkstein J. (1995): *Ochrana objektů před účinky havarijních výbuchů*. Univerzita Pardubice, KTTV, texty licenčního studia, 1995
- Fastr (1984): Výbuchy plynů v průmyslu. *Záchranář 1984/4*.
- Fyfe, E.R., Donnelly, E., Milligan, P.B., Crawford, J., (2001): *Blast Mitigation of Existing Structures Using Fiber Reinforced Polymer Composite Systems*, 2001.
- Glasstone S. (1967): *The effects of nuclear weapons*. United states Atomic Energy Commission, 1967.
- Gram, M.M., Clark, A.J., Hegemier, G.A., Seible F., (2006): Laboratory simulation of blast loading on building and bridge structures, WIT Transactions on The Built Environment, Vol 87, 2006.
- Gugan, K. (1978): *Unconfined vapor cloud explosions*; IchemE, London, 1978.
- Harris, R.J. (1983): *The Investigation and Control of Gas Explosions in Buildings and Heating Plant*; E & F N Spoon Ltd, London, 1983.
- Henrych, J. (1973): *Dynamika výbuchu a jeho užití*, Academia, Praha 1973.
- Henrych, J. (1979): *The Dynamics of Explosion and Its Use*, Academia, Prague 1979.
- Hopkinson, B. (1915): *British Ordnance Board Minutes 13565*; 1915
- HSE (1979): *Second Report. Advisory Committee Major Hazards*; U.K. Health and Safety Commission, 1979
- HSE (1986): *The effect of explosions in the process industries*; Loss Prevention Bulletin, 68: 37-47, 1986
- Industrial Risk Insurers (1990): *Oil and Chemical Properties Loss Potential Estimation Guide*; IRI Information, 1990
- Karbhari, V.M., Chin, J.W., Huston, D. Benmokrane, B., Juska, T., Morgan, R., Lesko, J.J., Sorathia, U., Reynaud, D. (2003): Durability Gap Analysis for

- Fiber-Reinforced Polymer Composites in Civil Infrastructure, *Journal of Composites for Construction*, Vol. 7, No 3, pp. 238-246, 2003.
- Kennedy, R. P. et al.(1990): *Design and evakuacion guideliness for department of energy facilities subjected to natural phenomena hazards*. US Department of Energy, Report UCRL-15910, Washington, 1990.
- Kinney, G.F., Graham, K.J. (1985): *Explosive shocks in Air*. Springer-Verlag New York, 1985.
- Koloušek, V. a kol. (1967): *Stavebné konštrukcie namáhané dynamickými účinkami*. SVTL, Bratislava 1967.
- Korenev, B. G. a kol. (1981): *Spravochnik po dinamike sooruzhenij*, Vol.1,2,3, Strojizdat, Moskva 1971–1981.
- Král, J. (2004): Vliv okolní zástavby na odezvu budovy zatížené větrem. *Experimentální Analýza Napětí 2004*. Plzeň: Škoda Výzkum, s. 121-124, 2004.
- Král, J. (2005): Experimentální ověření dynamických vlastností klapkového uzávěru přelivu přehrady. *Proceedings of the 3rd International Conference on Dynamics of Civil Engineering and Transport Structures and Wind Engineering*. Žilina: Žilinská univerzita, s. 172-175, 2005
- Král, J. (2007): Dynamická odezva vysoké budovy při silném větru. *Engineering Mechanics 2007*. Praha: Ústav termomechaniky AV ČR, , díl 1, s. 127-128, 2007.
- Král, J. (2008): Dynamické vlastnosti vysoké budovy zatížené větrem, *DYN-WIND 2008*, s. 24-28, Papradno (SR), 2008.
- Lawrence, W.W. (1976): *Off Acceptable Risk*. W. Kaufmann Inc., Los Altos, California, 1976.
- Lee, J.H.S. and Moen, I.O. (1980): *The mechanism of transition from deflagration to detonation in vapor cloud explosions*; Prog. Energy Combust. Sci., 6: 359-389, 1980.
- Lees F.P. (1996): *Loss prevention in the process industries*. (2<sup>nd</sup> ed.), Butterworth, Oxford 1996.
- Norris C.H. et. al. (1959): *Structural design for dynamic loads*. McGraw-Hill,1959.
- Major, A. (1980): *Dynamics in Civil Engineering*, Akadémiai Kiadó, Budapest 1980.
- Makovička, D., Bohdanecký, V., Novák, P., Tůma, J. (1980): *Výpočet stavebních konstrukcí zatížených dynamickými účinky strojů*, Komentář k ČSN 73 0032, ÚNM, Praha 1980.
- Makovička, D. (1997): Prevence stavebních konstrukcí před ničivými účinky výbuchu. In: *150-hoří, Odborný časopis požární ochrany*. 7, č.5, příloha, 1997, s. 1 - 4.
- Makovička, D. (1998): Duktilitní rezervy v únosnosti stavebních konstrukcí při seismickém zatížení. *Stavební obzor*, 1998, č.7, roč.3 (1998), s. 90-95.



- Makovička, D. (2000): Failures of masonry structures by explosion effects, *CTU Reports, Theoretical and Experimental Research in Structural Engineering*, CTU Publishing House 2, 2000, Vol. 4, pp.83 - 87.
- Makovička, D., Makovička, D. (2002/1): Dynamická odezva a způsob porušování cihelných příček při výbuchu plynu uvnitř budovy, *Stavební obzor* 2002, č.2, roč.11 (2002), s. 37-41, ISSN 1210-4027.
- Makovička, D.(2002/2): Únosnost okenních konstrukcí při tlakových účincích výbuchu, *Stavební obzor* 2002, č.4, roč.11 (2002), s. 100-103.
- Makovička, D., Makovička, D. (2004/1): Dynamic response of a Building Loaded by a Terrorist Explosion Effect, *CTU Reports*, Czech Technical University in Prague, Vol. 8, 2004/3, pp. 103-108.
- Makovička, D., Makovička, D. (2004/2): Poškození konstrukcí při výbuchu uvnitř nebo vně objektu, *Betonové konstrukce v extrémních podmínkách*, Praha 13.09.2004, Česká betonářská společnost, s. 105-112.
- Makovička, D., Makovička, D. (2006/1): Dynamic response of an office building loaded by an explosion-generated air wave, Jones, N., Brebbia, C.A.: *Structures Under Shock and Impact IX*, WIT Press, Southampton, 2006, pp. 495-504
- Makovička, D., Makovička, D. (2006/2): Odezva konstrukce budovy a ohrožení jejích obyvatel výbuchem plynu, *Stavební obzor* 2006, č.7, roč.15 (2006), s. 197-202.
- Moen, I.O., Saber, A.J. (1985): *Explosion hazards of hydrogen sulphide phase II. Flame acceleration and transmission to detonation review*. Defense Research Establishment Suffield, RN 578, Canada, 1985
- Myers, J.J., Murthy, S., Micelli, F. (2001): Effect of Combined Environmental Cycles on the Bond of FRP Sheets to Concrete, *Composites In Construction, 2001 International Conference*, Porto, Portugal, 2001
- Norris C.H. et. al. (1959): *Structural design for dynamic loads*. McGraw - Hill, 1959
- Peters, S.T. (1998), *Handbook of Composites*, 2nd Edition, Chapman and Hall, 1998.
- Rasbash, D. J., Drysdale, D. D., Kemp, D. (1976): Symposium on Process Industry Hazards, I. Chem. E. Symposium Series No.47, str. 145, 1976.
- Rotter, T., Ryjáček, P., Král, J., Polák, M. (2003): Modální analýza mostů pozemních komunikací. *Sborník konference Mosty 2003*. Praha: Sekurkon, s. 191-196, 2003.
- Solberg, D.M., Skramstad, E., Pappas, J. (1979): *Experimental investigations on partly confined gas explosions*; Det Norske Veritas Report No. 79-043, 1979; také 18th Symposium (International) on Combustion, Combustion Institute p. 1607, 1981
- TNO (1997): *Methods for the calculation of physical effects Resulting from releases of hazardous materials (liquids and gases)*; CPR 14E, Yellow book; Committee for the Prevention of Disasters; 3rd Edition, 1997.

- Tichý, M. a kol. (1987): *Zatížení stavebních konstrukcí*, SNTL, Praha 1987.
- Van den Berg, A.C. (1980): *BLAST – a 1-D variable flame speed blast simulation code using a “Flux-Corrected Transport“ algorithm*. Prins Maurits Laboratory, TNO report No. PML 1980-162, 1980.
- Vávra, P., Vágenknecht, J. (2002): *Teorie působení výbuchu*. Univerzita Pardubice, KTTV, učební texty, Pardubice, 2002.
- Vrouwenvelder, T. (2005): Accidental actions on buildings. *Handbook 3: Action Effects for Buildings*. Aachen, 2005.