

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí



Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Integrovaná bezpečnost staveb

Diplomová práce

STUDIE ODRAZNÉ DESKY PRO ODLEHČENÍ VÝBUCHU

DESIGN OF A BLAST DEFLECTOR

autor: Bc. Patrik Král

vedoucí práce: Ing. Zdeněk Sokol, Ph.D.

2019





ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE


Příjmení: Král	Jméno: Patrik	Osobní číslo: 424411
Zadávací katedra: K134 - Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí		
Studijní program: Stavební inženýrství		
Studijní obor: Integrovaná bezpečnost staveb		

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Studie odrazné desky pro odlehčení výbuchu	
Název diplomové práce anglicky: A design of a blast deflector	
Pokyny pro vypracování: Zkoumat základní parametry odrazné desky pro odlehčení výbuchu dřevěného prachu ve filtru, vypracování numerického modelu, určení sil působících na deflektor, porovnání výsledků s doporučením podle ČSN EN 14 994.	
Seznam doporučené literatury:	
Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Zdeněk Sokol, Ph.D.	
Datum zadání diplomové práce: 12.10.2018	Termín odevzdání diplomové práce: 06.01.2019 <small>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</small>
 Podpis vedoucího práce	 Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

 Podpis studenta(ky)	12.10.2018 Datum převzetí zadání
---	-------------------------------------

Bibliografická citace VŠKP:

KRÁL, Patrik. *Studie odrazné desky pro odlehčení výbuchu*. Praha, 2019. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje. Nemám námitek proti použití tohoto školního díla ve smyslu §60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 6. ledna 2019

A solid black rectangular box used to redact the author's signature.

.....
Bc. Patrik Král

Poděkování:

Velmi rád bych poděkoval kolegům z firmy ELSA Consulting s.r.o., kteří mi pomohli s výběrem tématu a zasvětili mě do problematiky tohoto tématu. Mé poděkování patří zejména pánům Ing. Adamu Podstawkovi a Ing. Martinu Kovářovi, Ph.D. Další poděkování za odbornou pomoc v oblasti protivýbuchové prevence patří soudnímu znalci v oboru chemie – chemického výbuchu, panu Ing. Tadeáši Podstawkovi, Ph.D.

Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Zdeňku Sokolovi, Ph.D. za vedení mé diplomové práce a odbornou pomoc v oblasti chování konstrukcí a v oblasti numerického modelování.

Obsah

Abstrakt	III
Abstract	III
Seznam použitých symbolů a zkratk	IV
1 Úvod	1
2 Revize protivýbuchových opatření a možnosti modelování výbuchu	2
2.1 Výbuch a jeho účinky	2
2.1.1 Základní dělení výbuchů	2
2.1.2 Chemický výbuch	2
2.1.3 Požárně technické charakteristiky	3
2.1.4 Účinky výbuchu na člověka	5
2.1.5 Účinky výbuchu na konstrukce	6
2.2 Současná protivýbuchová opatření	9
2.2.1 Primární protivýbuchová ochrana	10
2.2.2 Sekundární protivýbuchová ochrana	11
2.2.3 Terciální (konstrukční) protivýbuchová ochrana	12
2.3 Legislativní požadavky	15
2.3.1 Směrnice Evropského parlamentu a Rady 99/92/ES (ATEX 153)	15
2.3.2 Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2014/34/EU (ATEX 114)	16
2.4 Normové požadavky	18
2.5 Metody modelování výbuchů	18
2.5.1 Semi-empirické / prvoprincipiální metody	19
2.5.2 Implicitní / explicitní metody	19
2.5.3 CFD modely	20
2.5.4 Analytický - ruční výpočet výbuchového tlaku	21
2.5.5 MKP / MKD model – LS-Dyna	24
3 Studie protivýbuchového deflektoru	27
3.1 Parametry výbuchu dřevěného prachu ve filtru	27
3.2 Parametry geometrie filtru a deflektoru	27
3.2.1 Výpočet velikosti otvoru pro uvolnění tlaku při výbuchu	28
3.2.2 Stanovení rozměrů protivýbuchového deflektoru	30
3.3 Numerický model	30
3.3.1 Numerický model v řešiči LS-Dyna	31
3.3.2 Numerický model v řešiči SCIA Engineer	33
3.4 Studie deflektoru v závislosti na náklonu	35
3.4.1 Prostorové uspořádání	35
3.4.2 Napěťový posudek konstrukce deflektoru	36
3.4.3 Reakce v podporách a návrh přípoje deflektoru	39
3.5 Validace a verifikace numerických modelů	40
3.5.1 Verifikace modelu LS-Dyna	41
3.5.2 Verifikace modelu SCIA Engineer	43
4 Závěr a doporučení pro další výzkum	44

Seznam obrázků	47
Seznam tabulek	51
Zdroje	52
Seznam příloh.....	56

Abstrakt

První část této práce hodnotí současnou praxi zavádění prvků pro minimalizaci škod při vzniku výbuchu a porovnává ji s legislativními požadavky. Dále práce popisuje možnosti návrhu a posouzení jednoduchého konstrukčního prvku, deflektoru, který by vzniklý výbuch odklonil a zabránil tak ztrátám na životech a škodám na majetku. V druhé části práce se nachází studie protivýbuchového deflektoru při konkrétní situaci. Jsou zde zkoumány síly působící na deflektor a je posouzena celistvost konstrukce v závislosti na náklonu deflektoru dle doporučení norem ČSN EN 14994 [1] a ČSN EN 14491 [2] a mimo tato doporučení. Dále se zde nachází jednoduchý návrh možného přípoje deflektoru. K těmto účelům bylo využito analýzy metodou konečných prvků (MKP) v programech SCIA Engineer a LS-Dyna. Cílem práce je zhodnocení současné praxe při zavádění protivýbuchových opatření v souvislosti s protivýbuchovým deflektorem, vytvoření použitelného numerického modelu pro návrh a posouzení takového deflektoru před prachovým filtrem, návrh deflektoru a zhodnocení limitů návrhu podle norem ČSN EN 14994 [1] a ČSN EN 14491 [2].

Klíčová slova

protivýbuchová opatření, protivýbuchový deflektor, výbuch, ATEX, MKP, metoda konečných prvků, LS-Dyna, SCIA Engineer

Abstract

The first part of this thesis evaluates the current practice of using elements for minimalizing the damage caused by an explosion and attempts to compare it with legislative requirements. Further the thesis describes the possibilities of the design of a construction element, a deflector, which would deflect blast and which would prevent loss of human lives and damaging other structures. In the second part of the thesis there is a study of the deflector in a specific situation. The forces acting on the deflector are examined and the integrity of the structure is assessed in accordance to the inclination of the deflector according to the recommendations of standards ČSN EN 14994 [1] and ČSN EN 14491 [2] and beyond these recommendations. There is also a simple design of a possible deflector connection. For these purposes a finite element method (FEM) analysis in SCIA Engineer and LS-Dyna was made. The aim of the thesis is to evaluate the current practise of using blast prevention systems especially in relation to the blast deflector, to create a usable numerical model for the design and assessment of such deflector in front of a dust filter, to design the deflector and to evaluate the design limits according to standards ČSN EN 14994 [1] and ČSN EN 14491 [2].

Keywords

blast prevention; blast deflector; blast; ATEX; FEM; Finite Element Method; LS-Dyna, SCIA Engineer

Seznam použitých symbolů a zkratk

Znaky a veličiny

A	Plocha otvoru pro uvolnění tlaku	m^2
A	Parametr JWL funkce	Pa
A_{eff}	Efektivní průřez filtru	m^2
A_d	Návrhová hodnota mimořádného zatížení	kN
B	Parametr pro výpočet plochy otvoru pro uvolnění tlaku	-
B	Parametr JWL funkce	Pa
C	Parametr pro výpočet plochy otvoru pro uvolnění tlaku	-
C	Parametr Cowper-Symondsovy rovnice	s^{-1}
$C_0 - C_6$	Parametr stavové rovnice LINEAR_POLYNOMIAL	-
c	Měrná tepelná kapacita	$J/(kg \cdot K)$
c	Tlumení	s^{-1}
D	Šířka plamene ve filtru	m
D_{eff}	Efektivní průměr průřezu filtru	m
e_0, E_0	Vnitřní energie	Pa
F	Síla	kN
$F_{celk,dyn,max}$	Maximální výslednice sil v přípoji z modelu LS-Dyna	kN
$F_{celk,stat}$	Výslednice sil v přípoji z modelu SCIA Engineer	kN
$F_{v,ED}$	Smyková síla ve šroubovém přípoji	kN
$F_{x,dyn,max}$	Maximální síla v přípoji ve směru x z modelu LS-Dyna	kN
$F_{x,stat}$	Síla v přípoji ve směru x z modelu SCIA Engineer	kN
$F_{z,dyn,max}$	Maximální svislá síla v přípoji z modelu LS-Dyna	kN
$F_{z,stat}$	Svislá síla v přípoji z modelu SCIA Engineer	kN
G_{kj}	Charakteristická hodnota j-tého stálého zatížení	kN
H	Výška filtru od spodní hrany otvoru pro uvolnění tlaku	m
K_{St}	Kubická konstanta	$(bar \cdot m)/s$
k	Tuhost	kN/m
k_B	Balistický poměr	-

k_E	Koeficient těsnění	-
k_G	Koeficient geometrie šíření nárazové vlny v prostoru	-
k_{TNT-p}	Tlakový tritolový ekvivalent	-
L	Délka plamene ve filtru	m
m	Hmotnost	kg
P	Příslušná reprezentativní hodnota předpjetí	kN
P	Parametr Cowper-Symondsovy rovnice	-
p	Tlak	bar, Pa
p_0	Počáteční tlak prostředí	bar, kPa, MPa
p_{max}	Maximální výbuchový přetlak	bar
$p_{red,max}$	Maximální redukováný výbuchový přetlak ve filtru	bar
p_{s0}	Maximální absolutní tlak (příp. okamžitý tlak)	bar, kPa, MPa
p_{stat}	Statický aktivační tlak na membránu	bar
Δp_+	Maximální přetlak v čele rázové vlny	kPa
Δp_-	Podtlak v negativní fázi výbuchu	kPa
$Q_{k,j}$	Charakteristická hodnota j-tého proměnného zatížení	kN
Q_v	Výbuchové teplo	kJ/kg
R	Vzdálenost od centra výbuchu	m
R_1	Parametr JWL funkce	-
R_2	Parametr JWL funkce	-
t	Čas	s
t_+	Doba působení přetlaku	s
t_-	Doba působení podtlaku	s
Δt	Časový krok	s
V	Objem	m ³
V_{eff}	Efektivní objem filtru	m ³
W	Hmotnostní ekvivalent TNT	kg
W_N	Hmotnost použité nálože trhaviny	kg
x	Uzlový posun v daném směru	m
\dot{x}	Uzlová rychlost v daném směru	m/s

\ddot{x}	Uzlové zrychlení v daném směru	m/s^2
Z	Redukovaná vzdálenost od centra výbuchu	$\text{m/kg}^{1/3}$

Řecké symboly

λ	Součinitel tepelné vodivosti	$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$
γ_f	Dílčí součinitel pro mimořádnou situaci	-
ε	Poměrná deformace	-
$\dot{\varepsilon}$	Změna poměrné deformace v čase	s^{-1}
ρ	Objemová hmotnost	kg/m^3
$\psi_{1,1}$	Součinitel pro častou hodnotu proměnného zatížení	-
$\psi_{2,1}, \psi_{2,i}$	Součinitel pro kvazistálou hodnotu proměnného zatížení	-
ω	Parametr JWL funkce	-

Zkratky

ALE	Arbitrary Lagrangian-Eulerian method Doplňující se Lagrange-Eulerova metoda
ATEX	Appareils destinés à être utilisés en atmosphères explosibles Prostředí s nebezpečím vzniku explosivní atmosféry
CAD	Computer-aided drafting Počítačem podporované kreslení
CFD	Computational Fluid Dynamics Výpočtová analýza dynamicky proudění tekutin
CFL	Courant-Friedrichs-Levyho podmínka pro časový krok
CE	Prohlášení o shodě
ČSN	Česká státní norma
DNS	Direct numerical simulation Přímá numerická simulace vírů
EN	Evropská norma
ES	Evropské společenství
EU	Evropská unie

FEM	Finite Element Method
FTZÚ	Fyzikálně technický zkušební ústav
HZS	Hasičský záchranný sbor
LES	Large eddy simulation Metoda velkých vírů
LSTC	Livermore Software Technology Corporation
MKP	Metoda konečných prvků
MM-ALE	Multi-material arbitrary Lagrangian-Eulerian method Multi-materiálová doplňující se Lagrange-Eulerova metoda
PTCH	Požárně technické charakteristiky
RANS	Reynolds-averaged Navier-Stokes Reynoldsova metoda časového středování Navier-Stokesových rovnic
SPH	Smoothed Particle Hydrodynamics „Metoda vyhlazených částic“ – částicová mesh-free Lagrangeovská metoda
TNT	Trinitrotoluen, tritol

1 Úvod

V posledních letech můžeme pozorovat stále větší tlak na požární prevenci staveb. V kontrastu s tím se ale mnohdy opomíjí prevence protivýbuchová, případně opatření snižující následky výbuchu. To možná souvisí i s daty ve Statistické ročence HZS 2015 [3], dle které v České republice v roce 2015 jen 0,07 % požárů (17 incidentů) vzniklo vlivem výbuchu. Požárů, které nevznikly vlivem výbuchu, je zkrátka mnohem více, a snáze se tak dostávají do povědomí veřejnosti, ať již laické, či odborné. Nesmíme však hledět pouze na absolutní počty požárů způsobených výbuchem. Porovnáme-li totiž podíl způsobené škody požáry vzniklými výbuchem, dostáváme se už na nezanedbatelných 26,39 % z celkových přímých škod způsobených požáry. Je tedy na místě zabývat se účinnější protivýbuchovou ochranou.

Dnes je na trhu velká spousta protivýbuchových opatření, ale stále jsou zde nedostatky v jejich aplikaci. Zejména v průmyslovém odvětví je často vidět, že investorův zájem o protivýbuchovou ochranu začíná a končí u splnění minimálních legislativních požadavků (často ani to ne, jak si ukážeme později) a dále nebere v potaz, zda použitá protivýbuchová opatření nezpůsobí další škody někde jinde. A právě ochranu před následky výbuchu při nevhodné aplikaci protivýbuchových opatření (ať již z důvodu nedostatku prostoru, či předchozího nevhodného návrhu) by mohl, a dle současné legislativy (viz kap. 2.3) i měl, tvořit protivýbuchový deflektor¹.

Již zmíněný deflektor by mohl v řadě případů zabránit nežádoucím následkům. Zejména tehdy, kdy prvky sloužící k uvolnění tlaku při výbuchu směřují na jiný objekt nebo se jen nacházejí v prostorech, kde se často vyskytují osoby. Některé normy [1] dokonce takový prvek zmiňují. Dosud se však protivýbuchový deflektor příliš nerozšířil, resp. v praxi se vyskytuje jen zcela výjimečně. Možnou příčinou takového stavu je složitost návrhu. Žádná česká či evropská norma totiž nepopisuje možný postup návrhu a posouzení deflektoru. Je tedy zapotřebí pevnostních výpočtů pomocí numerických modelů a ideálně i fyzikální zkoušky.

Tato práce se tedy snaží obhájit nutnost vývoje protivýbuchového deflektoru, nastiňuje možnosti jeho numerického modelování a ve své druhé části popisuje konkrétní numerický model včetně návrhu a posouzení deflektoru v návaznosti na normy ČSN EN 14994 [1] a ČSN EN 14491 [2].

¹ Zařízení pro odvrácení / přesměrování výbuchu (z anglického „deflection“ – přesměrování / odvrácení)

2 Revize protivýbuchových opatření a možnosti modelování výbuchu

2.1 Výbuch a jeho účinky

Pojem výbuch označuje několik různých dějů, jejichž společným znakem je rychlost, kterou dochází k velkému vzrůstu uvolňované energie, tlaku, tepla, zvuku, popřípadě světla s následnými účinky (práce, destrukce, atd.). V základu se výbuchy dělí na jaderné, fyzikální a chemické. [4]

2.1.1 Základní dělení výbuchů

Při jaderném výbuchu dochází k uvolnění energie vlivem přeměny atomových jader (ať již slučováním jader – fúzí, či rozpadem jader – štěpením). Proti tomuto typu výbuchu se dá jen stěží chránit klasickými protivýbuchovými opatřeními a riziko jeho vzniku je minimální.

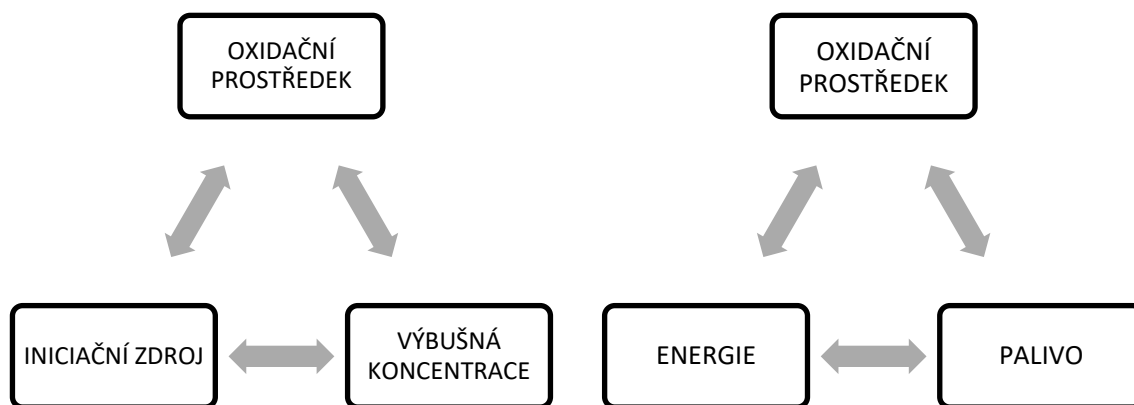
Fyzikální výbuch se projevuje uvolněním energie získané ze změny fáze (např. skupenství) nebo hybnosti. Při tomto typu výbuchu se nemění podstata látky. Příkladem takového výbuchu je pevnostní porušení tlakové lahve s následným uvolněním tlaku. Nejčastějším protivýbuchovým opatřením proti fyzikálnímu výbuchu je dostatečně robustní konstrukce.

Posledním typem výbuchu je výbuch chemický. V tomto případě se energie uvolňuje pomocí chemické reakce (tedy odpovídající změnou vazeb mezi atomy). Zejména tomuto typu výbuchu se věnuje tato práce.

2.1.2 Chemický výbuch

V závislosti na rychlosti děje se chemický výbuch dále dělí na explozivní hoření (deflagraci), přechod od hoření (deflagrace) k detonaci, na detonaci a na tepelný výbuch. Kromě rychlosti děje se takto dělí i podle tlakového projevu. [4]

Explosivní hoření (deflagrace) se vyznačuje rychlostmi řádově v $mm \cdot s^{-1}$ až do desítek $m \cdot s^{-1}$ a nízkými tlaky (od nepatrného přetlaku až do několika MPa). Toto je nejčastější typ chemického výbuchu v průmyslovém prostředí. Proto je pro náš záměr stěžejní právě tato reakce. Stejně jako při hoření je nejčastější příčinou tohoto projevu oxidační děj (viz obr. 1).



obr. 1: Trojúhelník výbuchu (vlevo) jako obdoba trojúhelníku hoření (vpravo)

Přechod od explosivního hoření (deflagrace) k detonaci probíhá v rychlostech až několik stovek $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ a dosahuje tlaků až desítek GPa . Jedná se o proces velmi komplikovaný, na jehož vysvětlení zatím nebyla vytvořena ucelená teorie. [5]

Detonace dosahuje rychlostí vyšších než $1000 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a v čele tlakového pole je rázová vlna. Znamená to, že dochází k okamžitému nárůstu tlaku na hodnoty jednotek až desítek GPa (detonace má diskontinuitu). Takový výbuch již nemá příčinu v klasickém oxidačním ději, kdy látka reaguje se vzdušným kyslíkem, ale dochází k prudké reakci v rámci chemického složení výbušniny. Výbušnina způsobující detonace se nazývá trhavinou.

Tepelný výbuch stojí mimo předešlé mechanismy. Může dosahovat rychlostí až nad $1000 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, nebo pokud dojde ke spontánnímu rozkladu, celá kondenzovaná fáze naráz zplyní. Tlaky mohou dosahovat až jednotek GPa , ale průběh tlakové funkce je spojitý (nemá diskontinuitu).

2.1.3 Požárně technické charakteristiky

Součástí protokolu o určení vnějších vlivů (viz kap. 2.3.1) je i popis nebezpečné látky (určuje Vyhláška MV č. 246/2001 Sb. [6]). V rámci popisu nebezpečné látky musejí být stanoveny také její požárně technické charakteristiky a bezpečnostně technické vlastnosti. Seznam posuzovaných vlastností se nachází níže (viz tab. 1).

tab. 1: Posuzované bezpečnostně technické vlastnosti [5]

<i>Vlastnost</i>	<i>Plyn</i>	<i>Mlha</i>	<i>Páry kapalin</i>	<i>Prach rozvířený</i>	<i>Prach usazený</i>
<i>Spodní mez výbušnosti [% V/V]</i>	<i>ano</i>	<i>ano</i>	<i>ano</i>	<i>ano</i>	<i>-</i>
<i>Horní mez výbušnosti [% V/V]</i>	<i>ano</i>	<i>ano</i>	<i>ano</i>	<i>-</i>	<i>-</i>
<i>Spodní bod výbušnosti [°C]</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	<i>ano</i>	<i>-</i>	<i>-</i>
<i>Horní bod výbušnosti [°C]</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	<i>ano</i>	<i>-</i>	<i>-</i>
<i>Bod vzplanutí [°C]</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	<i>ano</i>	<i>-</i>	<i>-</i>
<i>Minimální teplota vznícení/zapálení [°C]</i>	<i>ano</i>	<i>ano</i>	<i>ano</i>	<i>ano</i>	<i>ano</i>
<i>Skupina výbušnosti (viz kap. 2.3.2) (IIA, IIB, IIC)</i>	<i>ano</i>	<i>ano</i>	<i>ano</i>	<i>-</i>	<i>-</i>
<i>Max. výbuchový tlak [MPa]</i>	<i>ano</i>	<i>ano</i>	<i>ano</i>	<i>ano</i>	<i>-</i>
<i>Max. nárůst tlaku [MPa/s]</i>	<i>ano</i>	<i>ano</i>	<i>ano</i>	<i>ano</i>	<i>-</i>
<i>Hustota [g/cm³]</i>	<i>ano</i>	<i>-</i>	<i>ano</i>	<i>-</i>	<i>ano</i>
<i>Relativní hustota vzduchu [-]</i>	<i>ano</i>	<i>-</i>	<i>ano</i>	<i>-</i>	<i>-</i>
<i>Bod tání [°C]</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	<i>ano</i>
<i>Tlak nasycených par [kPa]</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	<i>ano</i>	<i>-</i>	<i>-</i>
<i>Minimální iniciační energie [mJ]</i>	<i>ano</i>	<i>ano</i>	<i>ano</i>	<i>ano</i>	<i>-</i>
<i>Max. esper. bezp. Spára [MESG]</i>	<i>ano</i>	<i>-</i>	<i>ano</i>	<i>-</i>	<i>-</i>
<i>Mezní koncentrace kyslíku [% V/V]</i>	<i>ano</i>	<i>ano</i>	<i>ano</i>	<i>ano</i>	<i>-</i>
<i>Koncentrace nasycení [g/m³]</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	<i>ano</i>	<i>-</i>	<i>-</i>
<i>Rychlost vypařování k etyléteru [-]</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	<i>ano</i>	<i>-</i>	<i>-</i>

<i>Vlastnost</i>	<i>Plyn</i>	<i>Mlha</i>	<i>Páry kapalin</i>	<i>Prach rozvířený</i>	<i>Prach usazený</i>
<i>Samovznícení prachu [mm]</i>	-	-	-	-	<i>ano</i>
<i>Zrnitost prachu [μm]</i>	-	-	-	<i>ano</i>	<i>ano</i>

Směs je výbušná tehdy, pokud se pohybuje mezi spodní a horní mezí výbušnosti. Při spodní mezí výbušnosti prachu již není vidět ani klasická 50W žárovka na 2 metry [7]. V takovémto prostředí už se téměř určitě nebudou pohybovat žádné osoby, protože by měly respirační problémy mnohem dříve, než by koncentrace prachu vystoupala až na spodní mez výbušnosti.

Požárně technické charakteristiky lze stanovit tabulkově nebo je možné je stanovit experimentálně certifikovaným zkušebním centrem. Druhá varianta se na první pohled zdá nákladnější, ale mnohdy je tomu naopak. Při tabulkovém popisu totiž uvažujeme absolutně čistou směs s určitou zrností². V prachových filtrech se však s absolutně čistou směsí téměř nesetkáme a skutečné požárně technické charakteristiky směsi mohou být mnohem příznivější. Při přidání inertu (viz kap. 2.2.1) je dokonce možné, že vzniklá směs bude nevýbušná. Také velikost zrna prachové částice hraje důležitou roli při stanovení požárně technických charakteristik. Se zvětšující se zrností jsou PTCH příznivější, až částice od určité velikosti nejsou výbušné vůbec. Tímto se dají enormním způsobem snížit náklady na protivýbuchová zařízení.

Zajímavostí v kontextu s PTCH je fakt, že výbušné plyny mají mnohem vyšší bod vznícení než prachy. Např. bod vznícení vodíku je 580 °C, kdežto teplota vznícení černého uhelného prachu je kolem 400 °C [7]. Oproti tomu však vodík (plyny) snáz exploduje při kontaktu se statickou elektřinou (minimální iniciační energie). Lidské tělo v kontaktu s oblečením vytvoří až desetkrát větší náboj, než je potřeba pro zapálení vodíku (v řádu *mJ*) [7]. Oproti tomu prachovou disperzi elektřinou zapálíme jen stěží.

2.1.4 Účinky výbuchu na člověka

Lidská tolerance účinků výbuchu je relativně vysoká. Nicméně důležitými faktory ovlivňujícími závažnost následků výbuchu jsou:

- Orientace osoby vůči tlakové vlně (osoba stojící, sedící, ležící, čelem k vlně, bokem k vlně)
- Průběh tlakové vlny (rázová vlna, postupná spojitá vlna atd.)
- Maximální přetlak a doba jeho působení. Lidská tolerance je mnohem vyšší ke krátkodobému zatížení.

² Délka nejmenšího rozměru zrna

Přímým nebo primárním účinkem výbuchu na člověka je náhlý nárůst tlaku. To může způsobit poškození orgánů jako jsou uši a plíce, protože jsou citlivé na tlak. Uši reagují na každou malou změnu tlaku. Všeobecně přijímaná minimální hodnota přetlaku způsobující poškození ušního bubínku je 34 *kPa* [8], ale dočasná ztráta sluchu může nastat už při nižších hodnotách. Poškození ušního bubínku 50 % populace nastává při přetlaku 325 *kPa* a více [8].

V případě, že je vnější tlak na hrudní stěnu vyšší než tlak vnitřní, hrudní stěna se pohybuje dovnitř a způsobí zranění. Tkáně plic obsahující vzduch uvolní vzduchové bubliny z přerušovaných plicních sklípků do cévního řečiště, což způsobuje většinou úmrtí. Všeobecně přijímaná minimální hodnota přetlaku způsobující poškození plic je 210 až 280 *kPa* [8]. Poškození plic 50 % populace nastává při přetlaku 560 *kPa* a více [8]. Minimální smrtelný přetlak je 700 až 850 *kPa* [8], 50% úmrtnost nastává při přetlaku 900 až 1300 *kPa* [8] a téměř 100% úmrtnost při 1400 *kPa* [8]. Je však nutné poznamenat, že poškození plic může být způsobeno mnohem nižším přetlakem, pokud tlak působí déle.

Mezi sekundární efekty výbuchu patří odmrštění osoby a náraz. V takovém případě může dojít vážnému až středně těžkému zranění. Přijatelný přetlak působící na straně výbuchu je považován 16 *kPa* [8]. Bezpečná rychlost při nárazu jsou $m \cdot s^{-1}$ [8], pokud nedochází k nárazu hlavou.

Dalším sekundárním efektem je dopad fragmentů (např. poškozené konstrukce, skla apod.). Lidská tolerance vůči takovýmto fragmentům je velmi nízká a i v tomto případě by pomohl protivýbuchový deflektor.

Významným sekundárním efektem je také teplotní šok a popálení. Často se stává, že se člověk při výbuchu lekne a zhluboka nadechne. Takové jednání může mít fatální následky. Zejména pokud vdechne proud žhavých částic, dochází k popálení plic. Léčba takového zranění je velmi komplikovaná až nemožná a ve většině případů dochází k úmrtí.

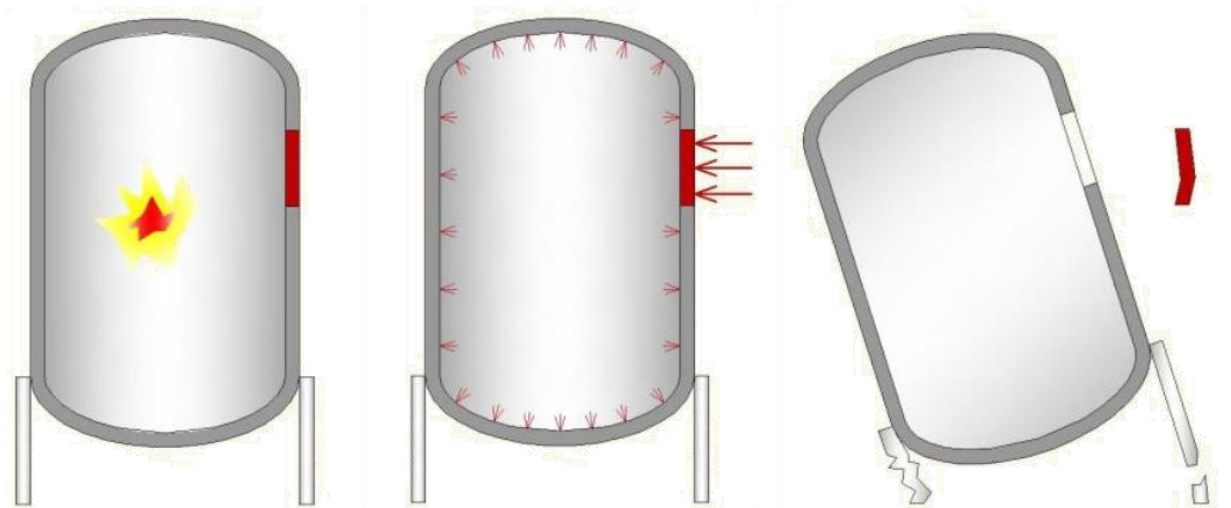
2.1.5 Účinky výbuchu na konstrukce

V případě tlakových projevů výbuchu jsou konstrukce zranitelnější než lidé. Kolaps může nastat již při přetlaku v řádu jednotek až desítek *kPa*. Pokud známe přetlak od výbuchu, můžeme 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. [5] Následující tabulka (tab. 2) popisuje účinek výbuchu v závislosti na přetlaku.

tab. 2: Poškození objektů a osob od účinků výbuchu [5]

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 apod.)	
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	Časté 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
50	Poboření části nosných prvků zděných konstrukcí, převrácení tanků a těžkých nákladních vozidel	
100 a více	Smrtelná zranění osob na otevřeném prostranství (viz kap. 2.1.4), totální havárie zděných konstrukcí	Destrukce zděných staveb

Pro ochranu konstrukcí při výbuchu slouží zejména terciální protivýbuchová ochrana (viz kap. 2.2.3). Častým problémem ale bývá, že např. projektant prachového filtru posuzuje filtr samotný, ale ne jeho odezvu na konstrukci v případě výbuchu. Pokud dojde k uvolnění tlaku při výbuchu, zařízení uvolňující tlak se tedy chová podobně jako raketový motor (zákon akce a reakce) a konstrukce musí stejné množství kinetické energie, které uvolní, přenést také do základů (viz obr. 2). Je tedy nutná spolupráce se statikem, který musí posoudit, jestli je možné takový filtr instalovat.



obr. 2: Chybný návrh konstrukce (princip akce a reakce) [7]

Eurokódy, konkrétně norma ČSN EN 1991-1-7 Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 1-7: Obecná zatížení – Mimořádná zatížení [9], řadí zatížení výbuchem mezi mimořádná zatížení. Používá se společně s ostatními eurokódy, tj. s ČSN EN 1990 až ČSN EN 1999. Mimořádné zatížení se uvažuje v mimořádných návrhových situacích. Pro mimořádné situace se dílčí součinitele γ_f uvažují zpravidla rovny jedné. Pro posouzení na mezní stav únosnosti se v mimořádné návrhové situaci uvažují kombinace zatížení podle vztahu (1).

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

Dalším nepříznivým účinkem výbuchu je účinek tepelný. Samotný děj je ale natolik rychlý (ms), že teplotní účinky nemají na statiku přílišný vliv (konstrukce se při výbuchu nestihne prohřát, k mírnému zvýšení teploty dochází hlavně vlivem náhlé změny tlaku) [10]. Může však iniciovat požár hořlavých materiálů a tento požár už může ohrožovat i samotnou statiku.

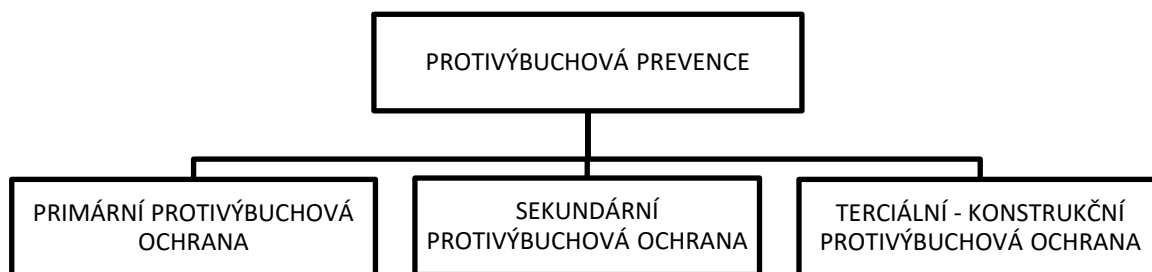
Podle rozsahu škod po výbuchu se stanovuje tzv. tritolový ekvivalent (příp. ekvivalent TNT). Ten vyjadřuje, kolik kilogramů TNT by mělo stejné energetické účinky jako popisovaný výbuch. Tritolový ekvivalent je možné vyjádřit v *kg* nebo v poměru k použité výbušnině, pokud popisujeme účinky daného typu výbušniny (pokud nepopisujeme účinky výbuchu) [-]. Následující tabulka (tab. 3) obsahuje tritolové ekvivalenty vybraných výbušnin.

tab. 3: Tlakové tritolové ekvivalenty některých výbušnin [5]

Výbušnina	Výbuchové teplo Q_v [kJ/kg]	Tlakový tritolový ekvivalent k_{TNT-P} [-]
Amonit 1	5190,02	1,239
Azid olova	1594,68	0,382
Černý prach	2456,89	0,587
Dinitronaftalen	2908,92	0,695
Dynamit	5022,60	1,198
Hexogen	6278,25	1,499
Infernit PN 40	1912,77	0,456
Kyselina pikrová	3850,66	0,919
Nitroglycerin	6152,69	1,468
Nitroglykol	7073,50	1,687
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
Střelná bavlna	3390,26	0,809
Tetryl	4511,97	1,076
Třaskavá rtuť	1540,26	0,368

2.2 Současná protivýbuchová opatření

Pokud provozovatel (zaměstnavatel) dojde při posuzování nebezpečí výbuchu k závěru, že jednotlivá zařízení nebo celá technologie představují nebezpečí výbuchu, je nutné, aby byla přijata adekvátní opatření vedoucí k minimalizaci tohoto rizika. Protivýbuchovou prevencí obecně dělíme do tří základních skupin (viz obr. 3).



obr. 3: Základní skupiny protivýbuchové prevence [5]

2.2.1 Primární protivýbuchová ochrana

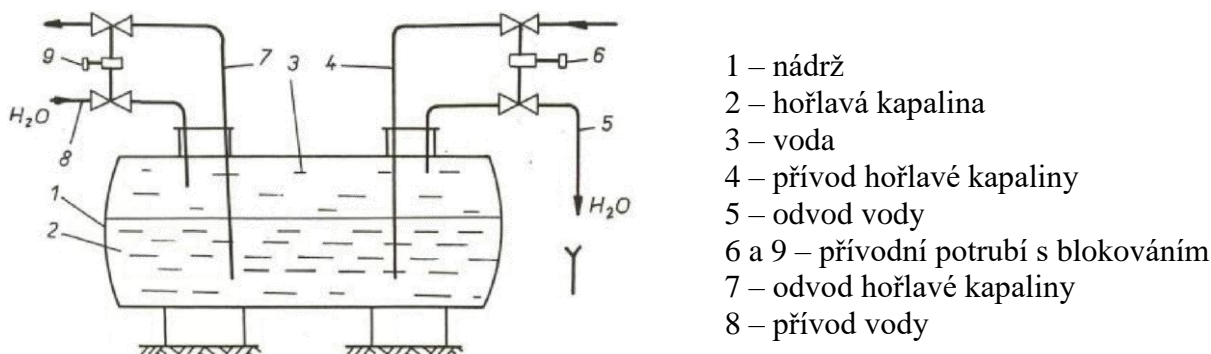
Cílem primární protivýbuchové ochrany je vyloučení vzniku výbušné atmosféry³. Výbušná atmosféra může vznikat všude tam, kde jsou splněny základní předpoklady výbuchu. Podmínky pro vznik výbuchu jsou následující:

- Je k dispozici hořlavá látka, která se může vyskytovat ve formě plynu, páry hořlavé kapaliny, aerosolu hořlavé kapaliny nebo prachu.
- V posuzovaném prostoru se vyskytuje oxidační prostředek.
- Poměr hořlavé látky a oxidačního prostředku je takový, že se může tvořit nebezpečná koncentrace (mezi dolní a horní mezí výbušnosti).

Pokud alespoň jedna z popsaných podmínek není splněna, potom je vyloučeno riziko vzniku výbušné atmosféry.

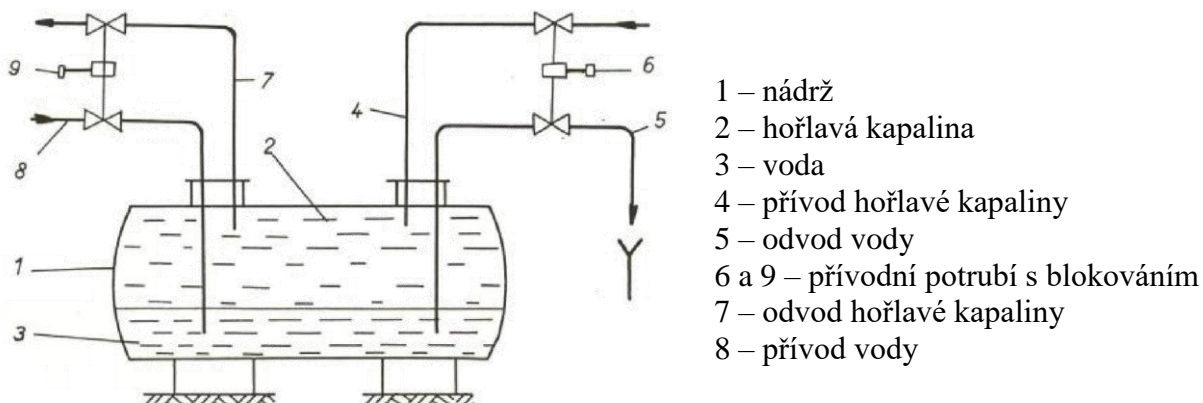
Nejčastější protivýbuchovou ochranou je inertizace atmosféry inertními plyny jako např. N_2 , CO_2 apod. Zvýšením podílu těchto plynů se zároveň sníží podíl kyslíku, který je však nezbytný pro vznik explosivní atmosféry (viz obr. 1). V prašném prostředí (např. prachové filtry) se využívá toho, že přidáním inertního prachu do prachu hořlavého se směs stává nehořlavou (nevýbušnou). Toto nastává již při 40% podílu inertu (nehořlavého prachu) [7].

Zejména v chemickém průmyslu se můžeme setkat s opatřením, které počítám s tím, že kde se nenachází prostor vyplněný vzduchem (plyny), tam nemůže vzniknout ani výbušná atmosféra. Proto se někdy nádrže s hořlavou kapalinou plní vodou a hořlavá kapalina se nachází nad nebo pod vodou či jinou (inertní) kapalinou. Je-li hořlavá kapalina těžší než voda (nižší hustota), potom stačí malá vrstva vody, která oddělí hořlavinu od vzduchu (viz obr. 4). Je-li hořlavá kapalina lehčí než voda, potom se musí celá nádrž doplnit vodou tak, aby nad hořlavou kapalinou nevznikala vzduchová dutina (viz obr. 5). Podmínkou pro takovéto skladování je, že obě kapaliny jsou vůči sobě naprosto netečné (inertní).



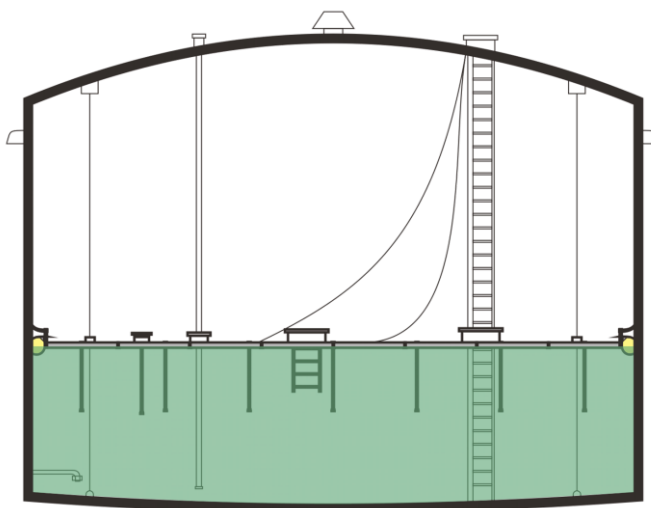
obr. 4: Skladování hořlavé kapaliny pod hladinou vody [11]

³ 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 [5]



obr. 5: Skladování hořlavé kapaliny nad hladinou vody [11]

V petrochemickém průmyslu se ještě často využívá stejného principu – omezení kontaktu hořlavé kapaliny se vzduchem (plyny) – při skladování např. ropy, nafty či benzínu. Nádrže hořlavých kapalin jsou konstruovány s plovoucím či pontonovým víkem (viz obr. 6), které se pohybuje nahoru a dolů podle úrovně hladiny hořlavé látky.



obr. 6: Nádrž s plovoucím víkem [11]

2.2.2 Sekundární protivýbuchová ochrana

Základem sekundární protivýbuchové prevence je zamezení možnosti iniciace výbušné směsi. Iničiačním zdrojem jsou předměty nebo látky, které jsou schopny odevzdat takové množství energie, které je potřeba k iniciaci výbuchu. Různé typy explosivní atmosféry mohou na různé zdroje reagovat jiným způsobem. Neplatí, že pokud jednu směs snáze iniciujeme např. elektrostatickým výbojem než druhou, že se snáze iniciuje i teplotou (horkým předmětem) (viz kapitola 2.1.3). Základní iničiační zdroje jsou definovány v ČSN EN 1127-1 Ed. 2 [12].

Mezi obecné zdroje iniciace patří následující:

- Horký povrch
- Plameny a horké plyny (včetně horkých částic)
- Mechanicky vznikající jiskry
- Elektrická zařízení
- Statická elektřina
- Samovznícení prachu
- Úder blesku
- Elektromagnetické vlny od 3,1011 Hz do 3,1015 Hz
- Ionizující záření
- Ultrazvuk
- Adiabatická komprese a rázové vlny
- Rozptylové elektrické proudy, katodová ochrana proti korozi

Tento stupeň protivýbuchové prevence má tedy za cíl eliminovat kontakt s iniciačními zdroji. V závislosti na typu zóny (viz kapitola 2.3.1) jsou stanoveny požadavky na vybavení prostor. Např. zóně 1 musejí být veškeré kovové prvky uzemněny (včetně např. kovového žebříku apod.) a nesmějí se zde vyskytovat hořlavé materiály (např. eurodesky s požárními dokumenty, dřevěné koště apod.).

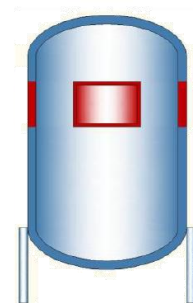
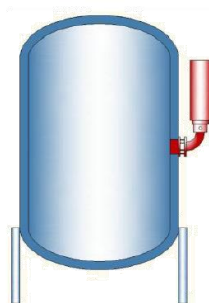
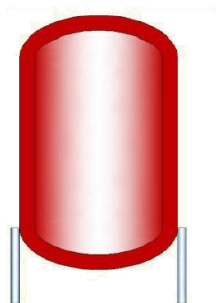
2.2.3 Terciální (konstrukční) protivýbuchová ochrana

Terciální a pro nás stěžejní protivýbuchová ochrana nastupuje v případě, že již došlo k výbuchu. Jedná se až o poslední možnost, kdy bylo v rámci posouzení primární protivýbuchové ochrany konstatováno, že může vznikat explosivní atmosféra. Přestože je třeba aplikována sekundární protivýbuchová ochrana, nelze postihnout všechny možné scénáře a spolu se sekundární protivýbuchovou ochranou se vždy aplikuje i terciální protivýbuchová ochrana. Principy terciální ochrany můžeme rozdělit na tři možné (viz obr. 7).

Tlakově odolná kce

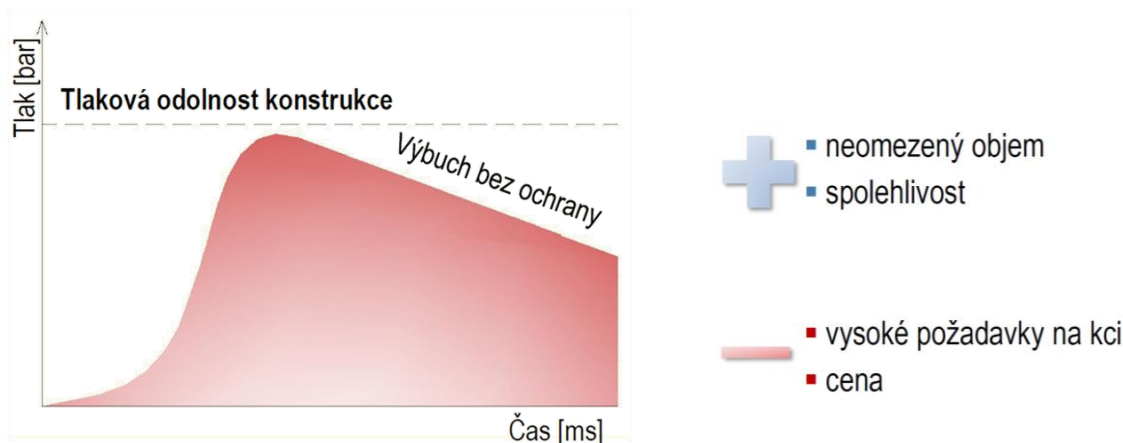
Potlačení výbuchu

Odlehčení výbuchu



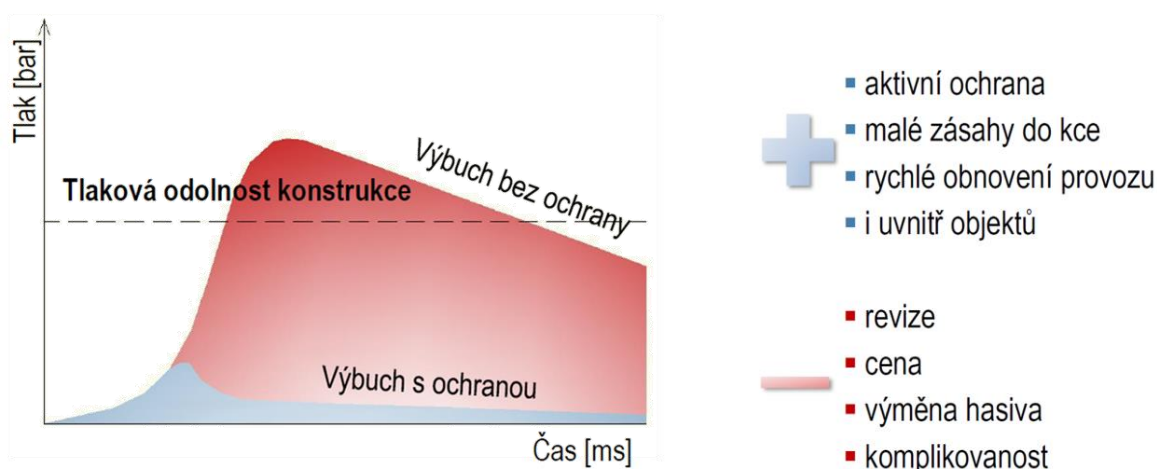
obr. 7: Principy terciální protivýbuchové ochrany [7]

Tlakově odolná konstrukce se využívá zejména u přetlakových systémů a fyzikálního výbuchu (viz kapitola 2.1.1). Pro chemický výbuch se využívá jen výjimečně. Výhodou takovéto konstrukce je, že se může aplikovat na prvek o prakticky jakémkoliv objemu (na rozdíl od potlačení výbuchu). V případě správného návrhu je také riziko selhání systému minimální. Nevýhodou jsou ale vysoké požadavky na materiály (množství i kvalitu) a s tím související vysoké pořizovací náklady (klady a zápory viz obr. 8).



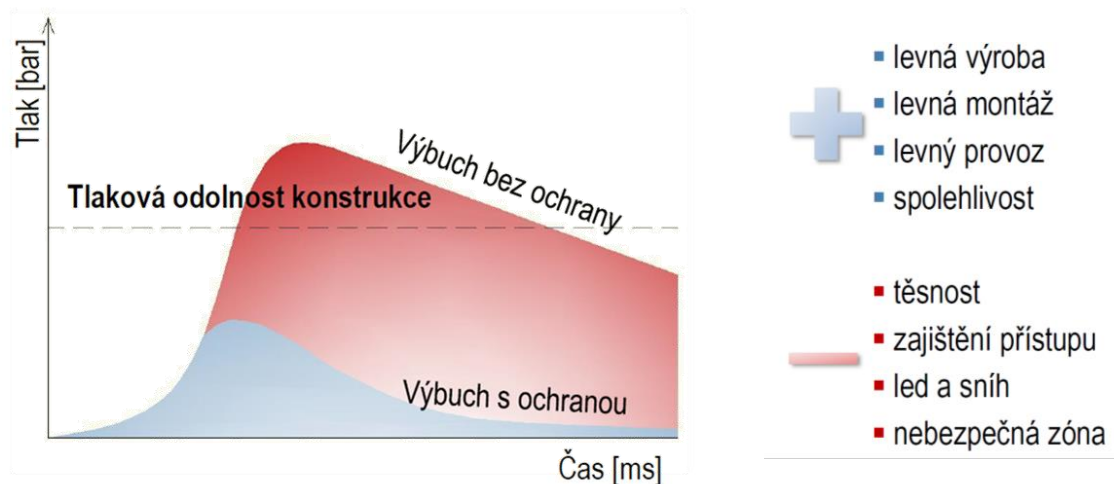
obr. 8: Výhody a nevýhody tlakově odolné konstrukce [7]

Systémy pro potlačení výbuchu se často používají společně s jinými systémy pro případ selhání. Jejich výhodou je, že se jedná o aktivní ochranu, která reálně omezuje destruktivní možnosti výbuchu. Díky tomu lze rychle obnovit provoz zařízení, ve kterém došlo k výbuchu, neboť nemusí dojít k tak vážným škodám uvnitř zařízení. Takovéto systémy je také možné využívat uvnitř objektů bez jakýchkoliv vývodů mimo objekt. Nevýhodou systémů pro potlačení výbuchu je pořizovací i provozní cena. Pro spolehlivou funkci jsou totiž nutné a jsou vyžadovány pravidelné revize, výměna hasiva a celý návrh bývá komplikovaný. Takový systém také není možné navrhnout pro velké objemy. Hasivo totiž nemusí být schopno potlačit výbuch ve velkém prostoru. Výhody a nevýhody shrnuje obr. 9.



obr. 9: Výhody a nevýhody systémů pro potlačení výbuchu [7]

Poslední možnou ochranou proti výbuchu je jeho odlehčení. Uvolněním tlaku zabráníme dalšímu nárůstu tlaku v samotném objektu. Pro tyto účely se využívají potrubí a membrány pro uvolnění tlaku při výbuchu. Tyto membrány jsou trvale uzavřené a zvýšením tlaku v objektu se při výbuchu protrhnou a uvolní žhavé (hořící či vyhořelé) částice ven z objektu. Výhodami takového systému jsou poměrně levná výroba i montáž a minimální náklady na provoz. Také je zde minimalizováno riziko selhání, pokud je systém správně navržen (např. dostatečné množství membrán nebo jejich celková plocha). Nevýhodou může být to, že membrány v klidovém stavu nejsou příliš těsné. Problémy narůstají zejména při sněžení nebo za deště. K prvku je také nutné zajistit přístup. To však koliduje s tím, že za membránami vzniká nebezpečná zóna, a prvky se tak často navrhuje např. několik metrů na zemi. V takovém případě by pomohl protivýbuchový deflektor, kdy by mohl být prvek pro odlehčení výbuchu instalován i do prostor, kde se normálně vyskytují osoby či jiný objekt (viz obr. 11). Takový deflektor by poté případný výbuch a žhavé částice odklonil jiným směrem. Výhody a nevýhody systémů pro odlehčení výbuchu shrnuje



obr. 10: Výhody a nevýhody systémů pro odlehčení výbuchu [7]



obr. 11: Prachový filtr s membránou pro uvolnění tlaku, vhodné místo pro umístění deflektoru [13]

2.3 Legislativní požadavky

Na rozdíl od požární ochrany, kterou zastřešuje Ministerstvo vnitra, zejména Hasičský záchranný sbor, protivýbuchovou ochranu zastřešuje Ministerstvo práce a sociálních věcí, jehož kontrolním úřadem je Inspektorát práce. Legislativní požadavky musí totiž zajistit zaměstnavatel. Primární je v tomto případě ochrana zaměstnanců.

Nejzásadnějšími právními předpisy v oblasti protivýbuchové ochrany jsou Směrnice Evropského parlamentu a Rady 99/92/ES (ATEX⁴ 153) [14], která je implementovaná do Nařízení vlády č. 406/2004 Sb., a Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2014/34/EU (ATEX 114) [15], která je implementovaná do Nařízení vlády č. 116/2016 Sb..

2.3.1 Směrnice Evropského parlamentu a Rady 99/92/ES (ATEX 153)

Nařízení vlády 406/2004 Sb. popisuje, co musí provozovatel nějakého zařízení (zaměstnavatel) z hlediska bezpečnosti splňovat. Mimo jiné udává povinnost vypracovat dokumentaci o ochraně před výbuchem vždy, když se pracuje s nebezpečnými látkami. V takovém případě se musí zároveň vypracovat i protokol o určení vnějších vlivů dle ČSN 33 2000-5-51 ED.3 [16].

Protokol o určení vnějších vlivů kategorizuje prostory na zóny (značení prostor s nebezpečím výbuchu viz obr. 12). Zóny určují, jaká je pravděpodobnost výskytu výbušné atmosféry a udávají požadavky na vybavení prostor a použitá protivýbuchová opatření. Zóny na sebe nemusejí přímo navazovat. Tzn. na zónu 0 může navazovat zóna 3 nebo také žádná zóna. Zóny se dělí následovně (viz tab. 4).

tab. 4: Dělení prostor podle pravděpodobnosti výskytu explozivní atmosféry

Hořlavina	Značení prostor	Pravděpodobnost výskytu nebezpečné koncentrace v zóně
Plyny a aerosoly	<i>zóna 0</i>	<i>Trvale nebo po dlouhé období (více než 1000 h/rok)</i>
	<i>zóna 1</i>	<i>Příležitostně v normálním provozu (10 až 1000 h/rok)</i>
	<i>zóna 2</i>	<i>Zřídka při neobvyklých provozních podmínkách (0,1 až 10 h/rok)</i>
Prachy	<i>zóna 20</i>	<i>Trvale nebo po dlouhé období (více než 1000 h/rok)</i>
	<i>zóna 21</i>	<i>Příležitostně v normálním provozu (10 až 1000 h/rok)</i>
	<i>zóna 22</i>	<i>Zřídka při neobvyklých provozních podmínkách (0,1 až 10 h/rok)</i>

⁴ Zkratka z francouzského „Appareils destinés à être utilisés en ATmosphères EXplosibles“, obecně norma či předpis zabývající se prostředím s nebezpečím výbuchu



obr. 12: Značení prostor s nebezpečím výbuchu

2.3.2 Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2014/34/EU (ATEX 114)

ATEX 114 se zabývá harmonizací právních předpisů týkajících se zařízení a ochranných systémů určených k použití v prostředí s nebezpečím výbuchu. V souvislosti s protivýbuchovým deflektorem lze citovat přílohu II. odstavec 1.2.7:

„Zařízení a ochranné systémy musí být navrženy a vyrobeny tak, aby

- bylo vyloučeno fyzické poranění nebo jiná újma, které by mohly být způsobeny přímým nebo nepřímým stykem;
- bylo zajištěno, že za předvídatelných podmínek přetížení nevzniknou nebezpečné situace“

Zařízení či prvek protivýbuchové ochrany, sloužící k uvolnění tlaku při výbuchu, tedy nesmí směřovat do prostor, kde se mohou vyskytovat osoby nebo kde se nachází jiný objekt, který by případný výbuch mohl poškodit a ohrozit tak další osoby. Návrhem a instalací protivýbuchového deflektoru v takovýchto prostorech by mohly být podmínky směrnice splněny.

Stejná směrnice v příloze II. odstavci 3.1.5 dále zmiňuje:

„Systémy pro uvolnění tlaku: Je-li pravděpodobné, že namáhání ochranných systémů překročí jejich konstrukční pevnost, musí být v návrhu použita vhodná zařízení pro uvolnění tlaku, která neohrozí osoby v nejbližším okolí.“

Protivýbuchový deflektor by v takovém případě mohl osoby ochránit, a systém pro uvolnění tlaku by tak vyhověl směrnici.

Nařízení vlády č. 116/2016 Sb. také popisuje, jakým způsobem se mohou protivýbuchová zařízení a prvky protivýbuchové ochrany značit. Nově musí splňovat každé instalované zařízení prohlášení o shodě EU (dříve ES). Zařízení jsou dělena na skupinu zařízení I (zařízení pro podzemní doly s výskytem metanu) a skupinu zařízení II (zařízení pro prostory s nebezpečím výbuchu jiné než podzemní doly s výskytem metanu). Zařízení skupiny II se dále dělí kategorie (viz tab. 5).

tab. 5: Kategorizace zařízení do prostor s nebezpečím výbuchu

Kategorie		Označení zařízení ¹⁾	Lze použít v zónách
Plyny (Gas)	1	II 1G	zóna 0, zóna 1, zóna 2
	2	II 2G	zóna 1, zóna 2
	3	II 3G	zóna 2
Prachy (Dust)	1	II 1D	zóna 20, zóna 21, zóna 22
	2	II 2D	zóna 21, zóna 22
	3	II 3D	zóna 22 ²⁾

¹⁾ Zařízení vhodné pro plyny a prachy zároveň bývá označováno zkráceně II 2GD

²⁾ Zařízení kategorie 3 nelze použít v prostorech zóny 22 s přítomností vodivého typu prachu

Kromě kategorizace musí mít prvky a zařízení vhodná do prostředí s nebezpečím výbuchu ještě další značení (viz obr. 13). Jak již bylo zmíněno, musí obsahovat prohlášení o shodě (značka CE), číslo certifikované zkušebny (např. 1026 – FTZÚ⁵), značení zařízení pro použití do prostředí s nebezpečím výbuchu (Ex), skupinu zařízení (I nebo II), skupinu výbušnosti (IIA – metan, etan, benzen, propan, butan, aceton; IIB – etylen, sirovodík; IIC – vodík, acetylen, sirouhlík) a teplotní třídu (viz tab. 6). Maximální přípustná povrchová teplota pro trvale horké povrchy musí být vždy alespoň o 15 °C nižší, než je teplota vznícení dle PTCH dané směsi.

tab. 6: Teplotní třídy protivýbuchových zařízení

Teplotní třída	Maximální povrchová teplota	Max. přípustná povrchová teplota pro trvale horké povrchy
T1	≤ 450 °C	440 °C
T2	≤ 300 °C	290 °C
T3	≤ 200 °C	195 °C
T4	≤ 135 °C	130 °C
T5	≤ 100 °C	95 °C
T6	≤ 85 °C	80 °C

CE 0102  II 2 GD EEx demb IIC T6

obr. 13: Úplné značení protivýbuchového zařízení

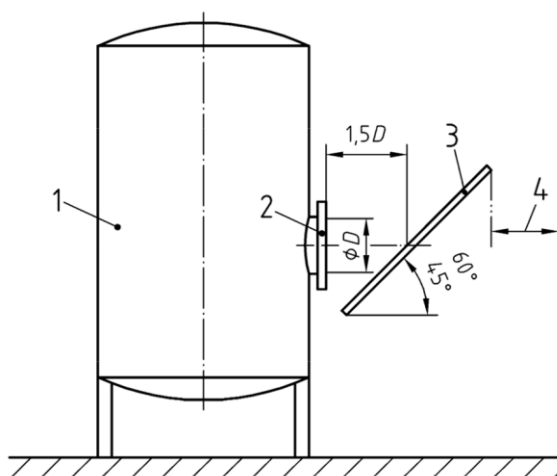
Protivýbuchový deflektor by se však v drtivé většině případů nenacházel v žádné z nebezpečných zón (0, 1, 2 nebo 20, 21, 22). Nemusí tedy obsahovat kompletní značení dle obr. 13. Je ale součástí protivýbuchového systému a musí vyhovovat směrnici ATEX (nařízením vlády). Proto je vyžadována zkouška v certifikované zkušebně a prohlášení o shodě, aby se předešlo případné újmě na zdraví nevhodným návrhem.

⁵ Fyzikálně technický zkušební ústav Ostrava – Radvanice, CZ

2.4 Normové požadavky

Prakticky jedinou evropskou či českou normou zabývající se protivýbuchovým deflektorem je norma ČSN EN 14994 [1], příp. norma ČSN EN 14491 [2], která se přílohou E odkazuje na již zmíněnou normu ČSN EN 14994 [1]. Obsah této přílohy je totožný.

Zmíněné normy popisují, jakým způsobem by měl být umístěn protivýbuchový deflektor vůči ventilu pro uvolnění tlaku při výbuchu. (viz obr. 14) Dále udávají, že tento návrh by měl být uplatněn na filtry či jiná zařízení o objemu pouze do 20 m^3 a uvádějí možnost návrhu deflektoru při statickém zatížení $p_{red,max}$ (viz kap. 3.2.1).



Legenda

- 1 chráněná nádoba
- 2 otvor pro uvolnění tlaku
- 3 odrazná deska (deflektor)
- 4 bezpečnostní vzdálenost

obr. 14: Doporučené umístění deflektoru [1, 2]

2.5 Metody modelování výbuchů

Nejjednodušší metodou modelování výbuchu a posouzení jeho účinků je fyzikální zkouška (reálný experiment v certifikované zkušebně). Zkoušky v certifikovaných zkušebnách jsou však poměrně finančně nákladné (náklady jdou až do milionů korun). Na rozdíl od numerických metod tedy nejsou příliš vhodné pro citlivostní analýzu⁶. Proto se k fyzikálním zkouškám přistupuje nejčastěji s již navrženým produktem, který je nutno certifikovat a posoudit při reálné situaci.

⁶ Posuzování vlivu změny vstupních parametrů na výsledek (opakování experimentu)

2.5.1 Semi-empirické / prvoprincipiální metody

Fyzikálním zkouškám předcházejí numerické metody. Tyto metody často vycházejí z empirických dat naměřených při jiných fyzikálních zkouškách či nehodách (např. analytické – „ruční“ metody). Takovéto metody se nazývají semi-empirické [17] či zjednodušené. Z části vycházejí z fundamentálních zákonů fyziky. Určité procesy jsou ale značně zjednodušeny, abychom se vyhnuli přílišným nákladům na výpočetní výkon.

Metody vycházející plně z fundamentálních zákonů fyziky se označují jako prvoprincipiální [17]. Vzhledem k jejich náročnosti na výpočetní výkon a citlivosti na správné vstupní parametry (např. atmosférické jevy, nehomogenity materiálů apod.) není jejich využití při navrhování protivýbuchových opatření příliš časté a uplatnění mají zejména ve vědecké a akademické sféře. Se správnými vstupními parametry jsou ale nejpřesnější.

2.5.2 Implicitní / explicitní metody

Dalším možným dělením numerických metod je dělení na implicitní a explicitní. V tomto kontextu ruční analytické metody stojí poněkud „bokem“, protože v drtivé většině případů nepočítají s časovým krokem, ale hodnotí celý průběh děje naráz. Obě metody (implicitní i explicitní) vycházejí ze stejné pohybové rovnice (2), jejíž řešení není možné najít v analytickém tvaru. Pro více stupňů volnosti je možné tyto rovnice zapsat maticově (3). [18, 19]

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t) \quad (2)$$

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{F\} \quad (3)$$

Veličina m představuje hmotnost, c je tlumení, k je tuhost a F je vnější síla. Dále x je uzlový posun, \dot{x} je uzlová rychlost a \ddot{x} je uzlové zrychlení. $[M]$, $[C]$, $[K]$ jsou jejich matice a $\{x\}$, $\{\dot{x}\}$, $\{\ddot{x}\}$ jsou jejich vektory.

Implicitní metody řeší tyto diferenciální rovnice přes několik časových kroků naráz a řeší rovnováhu sil. To znamená, že může být časový krok Δt větší, ale také se tímto přístupem zvyšuje náročnost výpočtu. Pro rychlé dynamické děje je tento přístup nevhodný a příliš se neaplikuje.

Explicitní metody využívají časovou integraci. Pohybové rovnice jsou řešeny v malých časových krocích Δt a při každém časovém kroku jsou explicitně vyjádřeny hodnoty jednotlivých veličin. Explicitní analýza tedy primárně neposuzuje rovnováhu sil, ale porovnává už výsledné energie. Vzhledem k tomu, že se neřeší složité diferenciální rovnice přes několik časových kroků naráz, matici hmotnosti lze rozložit na soustavu nezávislých rovnic a není nutné provádět inverzi matice tuhosti, je tato metoda pro jeden časový krok výpočetně mnohem méně náročná. Navíc s počtem elementů roste časová náročnost výpočtu pouze lineárně (oproti implicitní metodě, kde roste kvadraticky). [20] Časový krok je však v tomto případě mnohem menší než u metody implicitní, protože je nutné zajistit dostatečnou přesnost a omezit

odchyly způsobené zaokrouhlováním výsledků z předchozího časového kroku. Zároveň musí být splněna podmínka CFL.

CFL norm nebo také Courant-Friedrichs-Levyho podmínka udává, aby během jednoho časového kroku Δt např. tlaková vlna nebo částice nepřešla přes více výpočetních buněk (vzdálenost nepřekročí tzv. charakteristický rozměr elementu). Pokud byly podmínky porušeny, řešič (solver / processor) upraví časový krok a výpočet provádí znovu (iteruje), dokud nejsou podmínky splněny nebo dokud výpočet neskončí numerickou nestabilitou překročením maximálního počtu iterací. Pokud byly podmínky splněny, výpočet pokračuje v dalším časovém kroku s výsledky z kroku předchozího. Explicitní algoritmus obecně vyjadřuje rovnice (4) [19].

$$\{x\}_{t+\Delta t} = f(\{x\}_t, \{\dot{x}\}_t, \{\ddot{x}\}_t) \quad (4)$$

Na začátku každého výpočetního kroku se stanoví CFL podmínka pro každou výpočetní buňku a vybere se nejmenší číslo, pro které je posuzován celý model. Velikost časového kroku tak závisí na charakteristickém rozměru nejmenší výpočetní buňky. Proto je v souvislosti s velikostí časového kroku důležité soustředit se při vytváření výpočetní sítě⁷ (mesh) na to, aby byly všechny její prvky ideálně stejně velké. Jediný malý prvek tak může mít obrovský dopad na velikost výpočetního kroku a s ním i celkovou dobu výpočtu. Výsledná velikost časového kroku je dále vynásobena bezpečnostním koeficientem, který je doporučen pro modelování výbuchů 0,67 nebo méně.

2.5.3 CFD modely

CFD, neboli Computational Fluid Dynamics, je deterministicky-matematická metoda zakládající se na principu dynamického proudění tekutin. CFD modely mohou využívat dvou metod, případně jejich vzájemné kombinace. První metodou je metoda Lagrangeova. Ta uvažuje shluk navzájem interagujících částic, které se mohou pohybovat jakýmkoliv směrem, po jakékoliv trajektorii. Druhou metodou je metoda Eulerova. Tato metoda rozděluje prostor do tzv. kontrolních objemů (nebo také výpočetních buněk / prvků / elementů), které dohromady tvoří síť (grid / mesh). V tomto případě se neuvažuje s prouděním jako s pohybem částic (jako je tomu v Lagrangeově metodě), ale počítají se rovnice kontinuity pro každou výpočetní buňku.

Principem Eulerovského CFD modelu je metoda konečných prvků (MKP / Finite Element Method / FEM). Ta již byla v podstatě popsána – rozděluje objem na elementy, které tvoří síť. Jedná se o nejčastěji používanou výpočtovou metodu i mimo CFD modelování. Na Lagrangeově metodě se zakládá tzv. SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics), která je často využívána při modelování podzemního výbuchu, kde je zemina tvořena navzájem interagujícími částicemi, které se mohou pohybovat jakýmkoliv směrem.

⁷ Síť složená z výpočetních buněk

Dále jsou v CFD modelech tři možné postupy pro řešení turbulentního proudění – přímá numerická simulace (Direct Numerical Simulation / DNS), metoda velkých vírů (Large Eddy Simulation / LES) a Reynoldsova metoda časového středování Navier-Stokesových rovnic (Reynolds-Averaged Navier-Stokes / RANS). DNS počítá celé spektrum vírů všech měřítek. Využívá se zejména pro velmi malé elementy (o hranách v řádu jednotek mm a méně). Tato metoda je nejpřesnější, ale také je nepřiměřeně výpočetně náročná. LES počítá jen velké víry a malé modeluje. Je výpočetně méně náročná než DNS při zachování dostatečné přesnosti. Pro vysoká Reynoldsova čísla ale vyžaduje také velký výpočetní výkon. RANS všechny víry modeluje, a tak nemusí být dostatečně přesný pro příliš velké kontrolní objemy. Řešičů, které by zahrnovaly modelování turbulentního proudění a zároveň možnost komprese média (vzduchu), není mnoho. Jeden z takových obsahuje program LS-Dyna (viz níže) – řešič CESE. Ten je však ještě v rané fázi svého vývoje a výbuch je zde možné modelovat jen jako tlakový profil v okrajové podmínce výpočetní sítě. Není zde zatím možné modelovat výbuch jako takový a šíření jeho produktů. Proto se v praxi turbulentní proudění při modelování výbuchu často zanedbává. Důvodem je i to, že při takto rychlém ději nemá turbulentní proudění zejména na tlakové účinky žádný vliv.

2.5.4 Analytický - ruční výpočet výbuchového tlaku

Pro modelování deflagrace nejsou k dispozici žádné jednoduché formulace, a proto je takováto reakce při modelování nahrazena modelem detonace s ekvivalentními účinky TNT. Hodnota tlakového napětí (přetlaku v čele tlakové vlny) je závislá na vzdálenosti výbuštiny od povrchu a na velikosti (hmotnosti) výbuštiny. Velikost přetlaku může být stanovena na základě empirických vzorců jako např. Hopkinsův zákon (5) [10].

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

Kde Z vyjadřuje redukovanou vzdálenost v $m/kg^{1/3}$, R je skutečná vzdálenost prvku od výbuštiny a W je hmotnost ekvivalentní nálože TNT v kg . Předpokládá se, že energie uvolněná výbuchem je úměrná hmotnosti výbuštiny a řešení spočívá v zavedení referenční výbuštiny, za kterou byl zvolen tritol (trinitrotoluen, 2-methyl-1,3,5-trinitrobenzen, TNT, viz kapitola 2.1.5). Proto se vyjadřuje hmotnost různých výbuštin s pomocí tzv. tritolového ekvivalentu k_{TNT} . Pokud tento ekvivalent nelze nalézt v odborné literatuře, může být s dostatečnou přesností stanoven ze vztahu (6) [5],

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

kde k_{TNT-p} je tlakový tritolový ekvivalent výbuštiny (pro TNT je roven 1) a Q_v je výbuchové teplo v MJ/kg . Vztah platí pro výbuštiny s výbuchovým teplem od 2 do 5 MJ/kg [5]. Dále potřebujeme koeficient těsnění určený rovnicí (7) [5].

$$k_E = 0,2 + \frac{0,8}{1 + k_B} \quad (7)$$

Poté potřebujeme ještě balistický poměr dle vztahu (8).

$$k_B = \frac{\text{hmotnost obalu}}{\text{hmotnost výbušniny}} \quad (8)$$

Dále musíme určit koeficient geometrie šíření k_G , pro který platí, že:

a) pro detonaci ve volném vzdušném prostoru je roven 0,5 [5]

b) pro detonaci na povrchu (země) je roven 1 [5]

Potom je celková ekvivalentní hmotnost TNT W , která se dosazuje do dalších rovnic, určena ze vztahu (9) [5],

$$W = W_N \cdot k_{TNT-p} \cdot k_E \cdot k_G \quad (9)$$

kde W je hmotnost ekvivalentní nálože TNT v kg a W_N je hmotnost použité (reálné) výbušniny v kg . Nyní už jsme schopni stanovit maximální přetlak talové vlny v bar (přetlak v čele rázové vlny) podle následujících vzorců (10), (11) a (12) [10].

$$\Delta p_+ = \frac{14,0717}{Z} + \frac{5,5397}{Z^2} - \frac{0,3572}{Z^3} + \frac{0,00625}{Z^4} \quad \text{pro } 0,05 < Z < 0,3 \quad (10)$$

$$\Delta p_+ = \frac{6,1938}{Z} - \frac{0,3262}{Z^2} + \frac{2,1324}{Z^3} \quad \text{pro } 0,3 < Z < 1,0 \quad (11)$$

$$\Delta p_+ = \frac{0,662}{Z} + \frac{4,05}{Z^2} + \frac{3,288}{Z^3} \quad \text{pro } 1,0 < Z < 10,0 \quad (12)$$

Případně lze maximální přetlak počítat podle vztahu (13), kde Δp_+ je v kPa [5].

$$\Delta p_+ = \frac{90}{Z} + \frac{383}{Z^2} + \frac{1275}{Z^3} \quad \text{pro } 2 < Z < 200 \quad (13)$$

Pro oblast nízkých přetlaků (např. při deflagraci) je možné použít zjednodušený vztah (14) a vztah (15) pro výpočet doby trvání přetlakové fáze t_+ v ms [5].

$$\Delta p_+ = 150,2 \cdot Z^{-1,1} \quad \text{pro } 20 < Z < 200 \quad (14)$$

$$t_+ = 1,653 \cdot W^{\frac{1}{3}} \cdot Z^{(0,547 - 0,0422 \cdot \ln Z)} \quad \text{pro } 10 < Z < 200 \quad (15)$$

Publikace Blast Load of Building Structures [21] udává další možné formulace vycházející z empirie (16), (17) (Δp_+ je v tomto případě v MPa).

$$\Delta p_+ = \frac{1,07}{Z^3} - 0,1 \quad \text{pro } Z < 1 \quad (16)$$

$$\Delta p_+ = \frac{0,0932}{Z} + \frac{0,383}{Z^2} + \frac{1,275}{Z^3} \quad \text{pro } Z > 1 \quad (17)$$

Asi nejpřesnější a nejpoužívanější formulace je však následující (18) [22] (p_{s0} je maximální absolutní tlak a je v jednotkách, v jakých se dosadí atmosférický tlak p_0).

$$p_{s0} = p_0 \frac{808 \left[1 + \left(\frac{Z}{4,5} \right)^2 \right]}{\sqrt{\left[1 + \left(\frac{Z}{0,048} \right)^2 \right] \left[1 + \left(\frac{Z}{0,32} \right)^2 \right] \left[1 + \left(\frac{Z}{1,35} \right)^2 \right]}} \quad (18)$$

Pro nálož detonující na povrchu země lze Δp_+ (v kPa) vypočítat pomocí vztahu (19) [5].

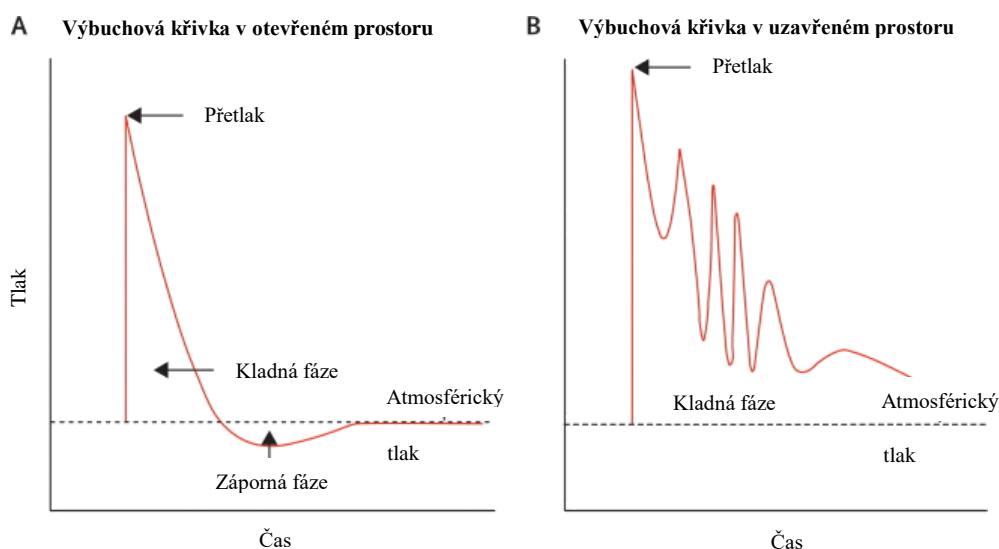
$$\Delta p_+ = \frac{0,106}{Z} + \frac{0,43}{Z^2} + \frac{0,14}{Z^3} \quad (19)$$

V případě velkých výbušnin může dojít ke vzniku podtlakové (negativní) fáze tlakové vlny. Orientačně mohou být její charakteristiky vypočítány ze vztahů (20) a (21) [5].

$$\Delta p_- = 46,48 \cdot Z^{-1,054} \quad (20)$$

$$t_- = 18,56 \cdot W^{\frac{1}{3}} \quad (21)$$

Popsané rovnice jsou platné pouze pro TNT a výbušniny přepočítané TNT ekvivalentem.



obr. 15: Průběh tlakové vlny v otevřeném prostoru (A) a v uzavřeném prostoru (B) [23]

Popsané rovnice platí pouze pro popis tlakové vlny v otevřeném prostoru. V uzavřeném členitém prostoru je průběh jen těžko předvídatelný (viz obr. 15) a je nutné přejít k počítačovým simulacím nebo fyzikální zkoušce.

2.5.5 MKP / MKD model – LS-Dyna

První verze řešiče (solveru / procesoru) LS-Dyna byla vyvinuta již v roce 1976. Tedy dva roky po vynalezení metody konečných sítí⁸ (metody konečných diferencí / MKD – Finite Difference Method) (1974), kterou taktéž obsahuje. Dodnes je program vyvíjen, aktualizován a zdokonalován. Díky neustálému vývoji obsahuje program obrovské množství modulů, díky kterým se dají řešit různé fyzikální, mechanické i elektrické jevy. Zároveň je díky širokému využití v praxi validovaný⁹. Program je schopný řešit problémy implicitně i explicitně (viz kapitola 2.5.2). Právě díky možnostem explicitního modelování se tak stala LS-DYNA široce využívaným řešičem pro dynamické děje. [20]

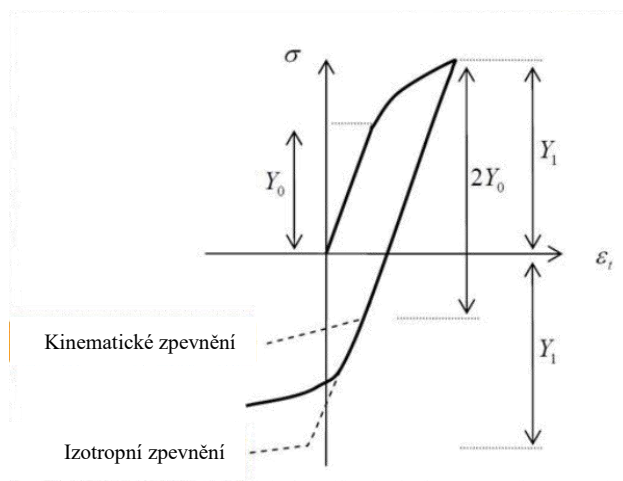
Pro modelování výbuchu je zde několik možností. Řešič obsahuje možnosti jako SPH (viz kapitola 2.5.3) nebo tzv. balónovou metodu, kdy se přiřadí některým prvkům (elementům) tekutého média (vzduchu) určitý přetlak, který se uvolní při spuštění simulace. Asi nejčastěji využívanou metodou je ale modelování výbušniny pomocí tzv. Jones-Wilkins-Lee stavové rovnice pro výbuch (22) [5, 10, 17]. Výbušnina i tekuté médium (vzduch) jsou modelovány jako multi-materiální ALE formulace (MM-ALE) využívající Eulerovských metod. Pevné objekty interagující s Eulerovskou sítí jsou modelovány Lagrangeovou metodou.

$$p = A \cdot \left(1 - \frac{\omega}{R_1 \cdot V}\right) \cdot \exp(-R_1 \cdot V) + B \cdot \left(1 - \frac{\omega}{R_2 \cdot V}\right) \cdot \exp(-R_2 \cdot V) + \frac{\omega \cdot e_0}{V} \quad (22)$$

Ocelové konstrukce jsou v LS-Dyna v souvislosti s výbuchem modelovány nejčastěji pomocí materiálového modelu PLASTIC_KINEMATIC. Takto je možné nastavit bilineární pružno-plastický model s izotropním i kinematickým zpevněním (Bauschingerův efekt). Izotropní zpevnění za mezí kluzu účinkuje při tahovém a následně tlakovém zatížení stejně. Kinematické zpevnění je takové zpevnění, při kterém je mez kluzu po odložení tahovým namáháním prvku za mezí kluzu snížena mez kluzu v tlaku. Izotropní i kinematické zpevnění popisuje obr. 16.

⁸ Obdoba metody konečných prvků – obě metody se doplňují a často zaměňují. Metoda konečných sítí je explicitní rozšíření metody konečných prvků (implicitní)

⁹ Ověřený v porovnání s fyzikálními experimenty nehodami apod.



obr. 16: Izotropní a kinematické zpevnění [24]

Materiálová model umí zohlednit i rychlost deformace pomocí Cowper-Symondova modelu (tzv. strain rate). Při rychlé deformaci (např. od rázové vlny při výbuchu) dochází ke zpevnění a zvýšení meze kluzu materiálu. Cowper-Symondsův vztah pro výpočet koeficientu zpevnění, kterým se násobí mez kluzu při dynamickém zatížení, popisuje rovnice (23) [25].

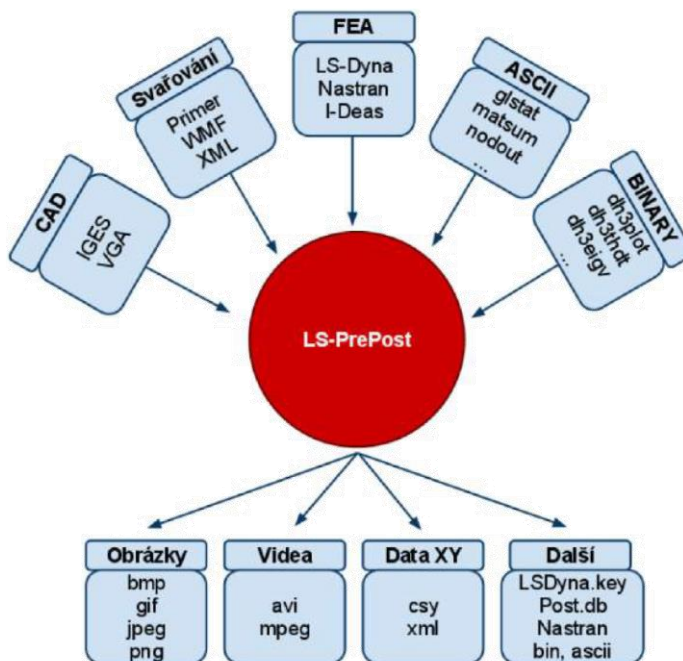
$$f_{CS} = 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C}\right)^{\frac{1}{P}} \quad (23)$$

Pro LS-Dyna je k dispozici pokročilý grafický proprocessor¹⁰ a postprocesor¹¹ LS-PrePost od společnosti Livemore Software Technology Corporation (LSTC). Používá se na přípravu vstupních dat i pro zobrazení výsledků analýz provedených kódem LS-Dyna, pro který byl speciálně navržen. Preprocessing podporuje využití klíčových slov LS-Dyna, jejich import, úpravu a následný export k-souboru¹². Disponuje možnostmi vkládat geometrii z CAD programů ve formátu IGES, STEP, VDA, DWG a další (možnosti LS-Dyna viz obr. 17). Obsahuje pokročilé meshovací nástroje, mezi které patří i kontrola kvality sítě nebo kontaktu. Vygenerovaný k-soubor se následně spouští v programu ANSYS Mechanical APDL Product Launcher s výběrem řešiče LS-Dyna (viz obr. 18). Postprocesor vykresluje tvarové a napěťové charakteristiky do různých typů souborů (viz obr. 17). [20]

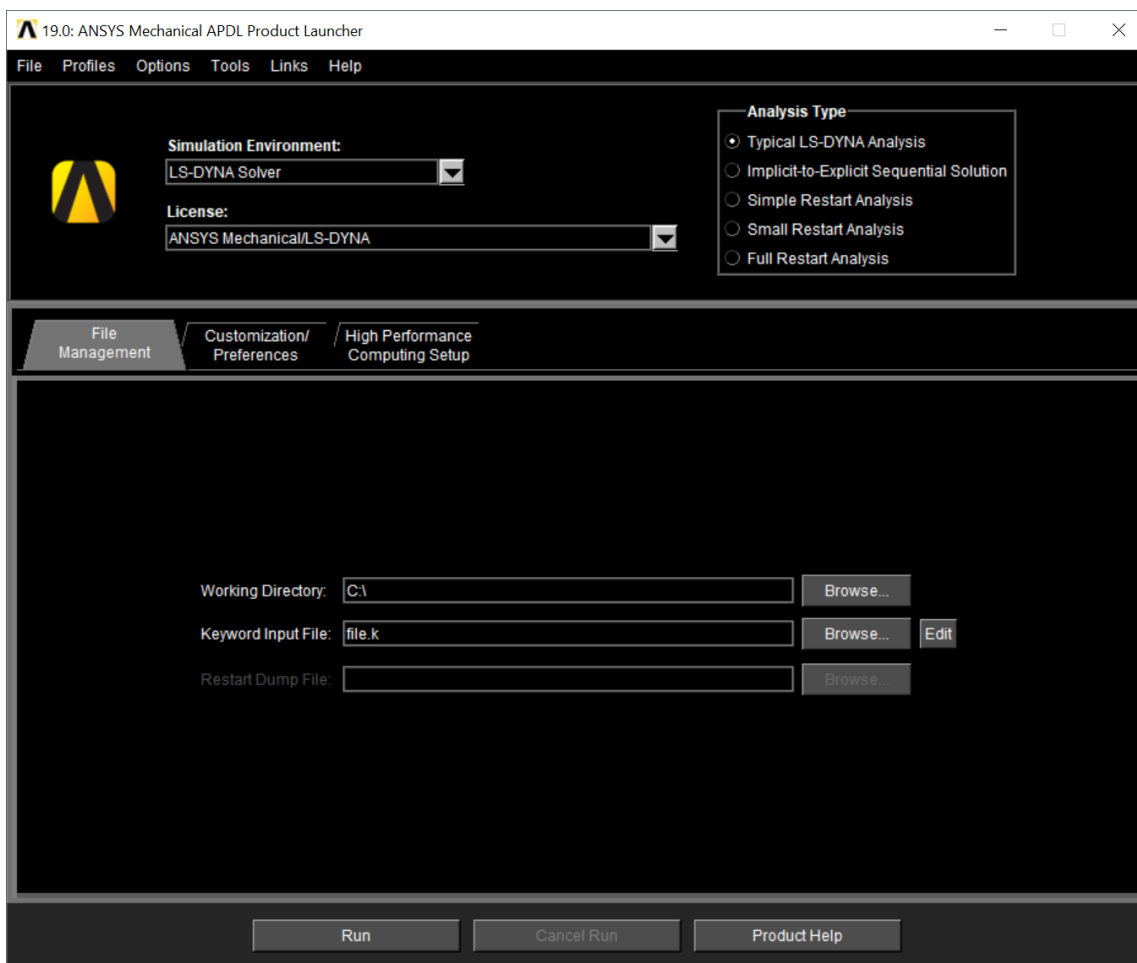
¹⁰ Program pro úpravu vstupních dat a editaci zdrojového kódu

¹¹ Program pro interpretaci výsledků – jejich vykreslení a export ze souborů vygenerovaných řešičem

¹² Zdrojový kód LD-Dyna (textový soubor), který obsahuje veškeré vstupní informace, které řešič potřebuje k výpočtu a podle kterého výpočet spouští.



obr. 17: Možnosti programu LS-PrePost [20]



obr. 18: ANSYS Mechanical APDL Product Launcher pro spuštění LS-DYNA kódu

3 Studie protivýbuchového deflektoru

V této kapitole je provedena studie protivýbuchového deflektoru v závislosti na jeho náklonu. Byly zkoumány síly v přípojích deflektoru, napětí v deflektoru a schopnost přežít výbuch bez toho, aby došlo k uvolnění deflektoru či jeho částí, a schopnost deflektoru odvrátit produkty výbuchu. Dále se kapitola zmiňuje, zdali je nezbytné simulovat výbuch komplexními metodami jako např. LS-Dyna, nebo je možné využít zjednodušených metod.

Vzhledem k tomu, že nejčastějším předpokládaným typem zařízení, na který by byl instalován protivýbuchový deflektor, je průmyslový prachový filtr, resp. vzduchový filtr se sběračem prachu, jsou parametry deflektoru studovány při výbuchu prachu v prachovém filtru.

3.1 Parametry výbuchu dřevěného prachu ve filtru

Z konzultace s Ing. Tadeášem Podstawkou, Ph.D., soudním znalcem v oblasti chemie výbuchu, vyplynulo, že více než 90 % všech průmyslových prachových filtrů, filtruje dřevní prach. [26] Pro studii deflektoru jsou tedy využity parametry dřevního prachu.

Pro výpočet velikosti otvoru pro uvolnění tlaku při výbuchu, je nezbytným parametrem kubická konstanta K_{St}^{13} . Norma ČSN EN 14491 [2] udává několik postupů pro výpočet rozměrů otvoru pro uvolnění tlaku a limitující veličinou je zde právě kubická konstanta. Kubická konstanta je dána následujícím vztahem (24) [27].

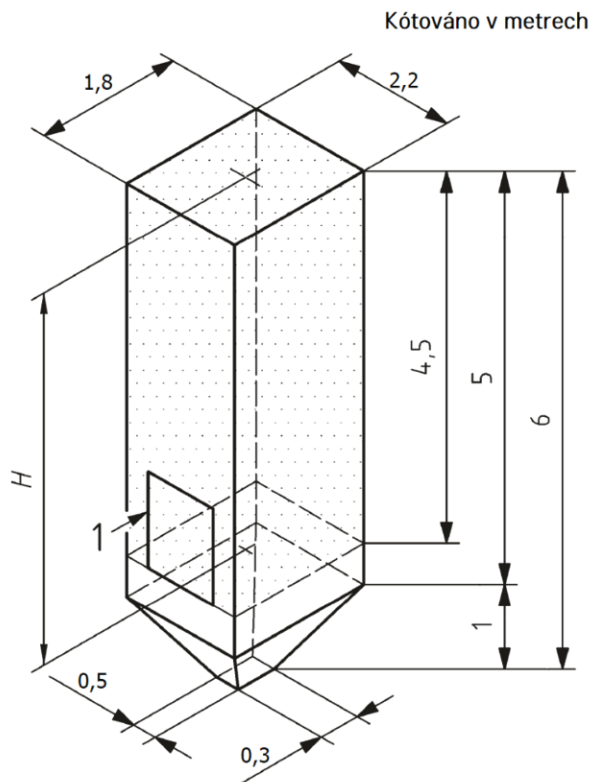
$$K_{St} = \frac{dp}{dt} \cdot V^{1/3} [\text{bar} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (24)$$

Pro dřevní prach má kubická konstanta hodnotu $K_{St} = 102 \text{ bar} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$. [28]

3.2 Parametry geometrie filtru a deflektoru

Parametry deflektoru budou studovány při nejnepříznivějším stavu, který připouští normy. Vzhledem k limitům norem ČSN EN 14994 [1] a ČSN EN 14491 [2] (viz kap. 2.4), je deflektor studován při maximálním možném efektivním objemu filtru, tj. 20 m^3 . (geometrie viz obr. 19)

¹³ Maximální hodnota nárůstu tlaku za časovou jednotku při specifických zkušebních podmínkách [1]



obr. 19: Geometrie filtru (převzato a upraveno z [2])

3.2.1 Výpočet velikosti otvoru pro uvolnění tlaku při výbuchu

Nejméně bezpečné osazení otvoru pro uvolnění tlaku při výbuchu je při spodní hraně filtru. Tento případ popisuje vzorový příklad C.6 v normě ČSN EN 14491 [2]. Nejdříve je nutné stanovit efektivní objem uzavřeného prostoru (25) a efektivní plochu průřezu (26).

$$V_{eff} = 4,5 \cdot 1,8 \cdot 2,2 = 17,82 \text{ m}^3 \quad (25)$$

$$A_{eff} = \frac{V_{eff}}{H} = \frac{17,82}{4,5} = 3,96 \text{ m}^2 \quad (26)$$

Z této plochy je možné vypočítat efektivní průměr průřezu uzavřeného prostoru (27).

$$D_{eff} = \sqrt{\frac{4 \cdot A_{eff}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 3,96}{\pi}} = 2,25 \text{ m} \quad (27)$$

Nyní je možné vypočítat teoretický poměr délky vůči šířce plamenu v uzavřeném prostoru (28).

$$\frac{L}{D} = \frac{H}{D_{eff}} = \frac{4,5}{2,25} = 2,00 \quad (28)$$

Dalšími nezbytnými vstupy pro výpočet velikosti otvoru pro uvolnění tlaku při výbuchu jsou maximální výbuchový přetlak p_{max} , maximální redukovaný výbuchový přetlak $p_{red,max}$ ¹⁴ a statický aktivační přetlak na membránu pro uvolnění tlaku p_{stat} . Podmínky pro použití vztahů podle normy [2] jsou následující.

Objem zařízení	$0,1 m^3 \leq V \leq 10\,000 m^3$
Statický aktivační přetlak	$0,1 bar \leq p_{stat} \leq 1 bar$ pro $p_{stat} < 0,1 bar$ použít $p_{stat} = 0,1 bar$
Maximální redukovaný výbuchový přetlak	$0,1 bar < p_{red,max} \leq 2 bar$ $p_{red,max}$ by měl být alespoň $p_{stat} + 2 \cdot$ <i>toleranční rozsah</i> p_{stat}
Maximální výbuchový přetlak	$5 bar \leq p_{max} \leq 10 bar$ pro prachy s parametrem $10 bar \cdot m \cdot s^{-1} \leq K_{St} \leq 300 bar \cdot m \cdot s^{-1}$

Vzhledem k limitům aplikace vzorce (32) (viz kapitola 3.3.2) byly použity hodnoty $p_{stat} = 0,1 bar$ (běžná hodnota aktivačního tlaku membrán pro uvolnění tlaku při výbuchu [29]), $p_{red,max} = 1 bar$, $p_{max} = 9 bar$. Z těchto hodnot je možné vypočítat velikost otvoru podle vzorců (29), (30), (31), které platí pro $0,1 bar \leq p_{red,max} \leq 1,0 bar$. [2]

$$\begin{aligned}
 B &= \left[3,264 \cdot 10^{-5} \cdot p_{max} \cdot K_{St} \cdot p_{red,max}^{-0,569} + 0,27 \cdot (p_{stat} - 0,1) \cdot p_{red,max}^{-0,5} \right] \\
 &\quad \cdot V^{0,753} \\
 &= [3,264 \cdot 10^{-5} \cdot 9 \cdot 102 \cdot 1^{-0,569} + 0,27 \cdot (0,1 - 0,1) \cdot 1^{-0,5}] \cdot 20^{0,753} \\
 &= 0,285
 \end{aligned} \tag{29}$$

$$C = -4,305 \cdot \log p_{red,max} + 0,758 = -4,305 \cdot \log 1 + 0,758 = 0,758 \tag{30}$$

$$A = B \cdot \left(1 + C \cdot \log \frac{L}{D} \right) = 0,285 \cdot (1 + 0,758 \cdot \log 2) = 0,352 m^2 \tag{31}$$

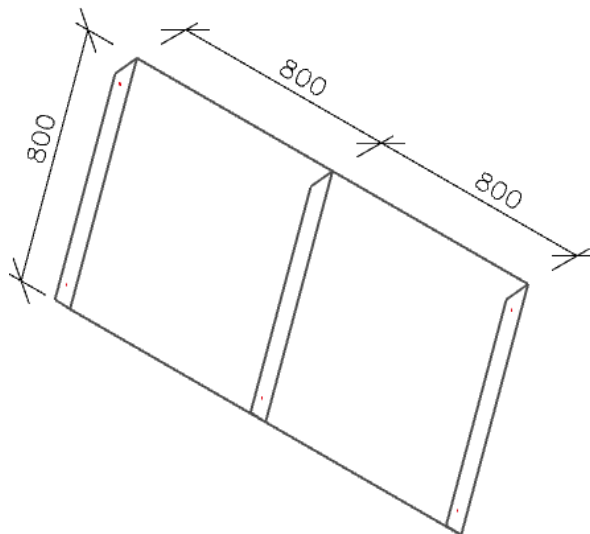
Minimální velikost otvoru pro uvolnění tlaku je tedy $0,352 m^2$. Dále bude uvažováno s otvorem o šířce $1 m$ a výšce $0,4 m$ (tj. celkem $0,4 m^2$).

¹⁴ Tlaková odolnost konstrukce

3.2.2 Stanovení rozměrů protivýbuchového deflektoru

Podle přílohy E normy ČSN EN 14994 [1] a ČSN EN 14491 [2] by měla být plocha deflektoru alespoň 3x větší než plocha otvoru pro uvolnění tlaku při výbuchu. To odpovídá ploše alespoň $1,2 \text{ m}^2$. Zároveň mají být rozměry alespoň 1,6x větší než rozměry otvoru. Uvažovaný deflektor bude mít tedy rozměry následující.

Šířka	1,6 m
Výška	0,8 m
Plocha	$1,28 \text{ m}^2$
Tloušťka plechu	8 mm
Počet výztuh	3
Výška výztuh	80 mm



obr. 20: Geometrie deflektoru [mm]

3.3 Numerický model

Pro účely studie protivýbuchového deflektoru bylo vytvořeno několik numerických modelů. V řešiči LS-Dyna byla provedena dynamická analýza s využitím možností modelování výbuchu. V řešiči SCIA Engineer byla provedena jednoduchá statická analýza statickým zatížením pro zjednodušený výpočet.

3.3.1 Numerický model v řešiči LS-Dyna

Pro potřeby simulace byl vytvořen model metodou „Lagrange in solid“. Pevné prvky byly vymodelovány pomocí plošných elementů (shell) a svou polohou jsou nezávislé na síti (Lagrangeova metoda), která tvoří vzdušné médium. Vzduch byl vymodelován jako prostorový element (solid), který tvoří Eulerovskou síť. (Lagrangeova a Eulerova metoda viz kap. 2.5.3)

Model byl vytvořen v základních jednotkách SI. Vstupní data materiálových modelů a stavových rovnic jsou následující (tab. 7 a tab. 8).

tab. 7: Vstupní data pro materiály modelu LS-Dyna

Vzduch [30]		Ocel [25, 30]		Výbušnina [5, 31]	
Materiálový model	NULL	Materiálový model	PLASTIC_KINEMATIC	Materiálový model	HIGH_EXPLOSIVE_BURN
Objemová hmotnost	1,225 kg/m ³	Objemová hmotnost	7850 kg/m ³	Objemová hmotnost	1630 kg/m ³
		Youngův modul	210 · 10 ⁹ Pa	Rychlost výbuchu	500 m/s
		Poissonův součinitel	0,3	Chapman-Jougetův tlak ¹⁶	550 · 10 ⁶ Pa
		Mez kluzu	355 · 10 ⁶ Pa		
		Tangenciální modul	955 · 10 ⁶ Pa		
		Strain rate parametr C ¹⁵	41,0 m/s		
		Strain rate parametr P ¹⁵	6,2		
		Relativní protažení při porušení	6 %		

tab. 8: Vstupní data pro stavové rovnice modelu LS-Dyna

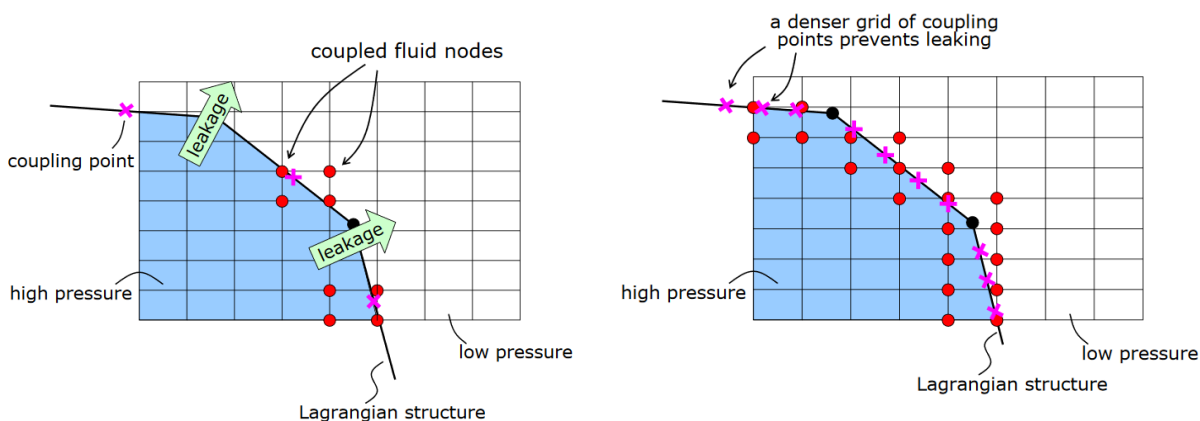
Vzduch	C0	C1	C2	C3	C4	C5	C6	Počáteční interní energie [Pa]	Zdroj
	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]		
LINEAR_POLYNOMIAL	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,4	0,0	253,3 · 10 ³	[17]
Výbušnina	A [Pa]		B [Pa]		R1 [-]	R2 [-]	Ω [-]	Výbuchová energie [Pa/m ³]	Zdroj
JWL	6,59 · 10 ⁸		1,11 · 10 ⁸		4,15	0,95	0,3	437,5 · 10 ³	¹⁶

¹⁵ Cowper-Symondsův materiálový model (viz kapitola 2.5.5)

¹⁶ Upraveno tak, aby vzniklý přetlak odpovídal předpokladům (viz kapitola 3.5.1)

Materiálový model pro výbušninu a její stavová rovnice mají své omezení. Je nutné zdůraznit, že výbuch modelovaný pomocí JWL stavové rovnice nijak nezohledňuje možné hoření částic vně filtru, které může ovlivnit jak tlak působící na protivýbuchový deflektor, tak šíření žhavých částic. V tomto modelu tedy uvažujeme se situací, kdy dojde k odhoření většiny hořlavého prachu uvnitř prachového filtru, příp. před deflektorem.

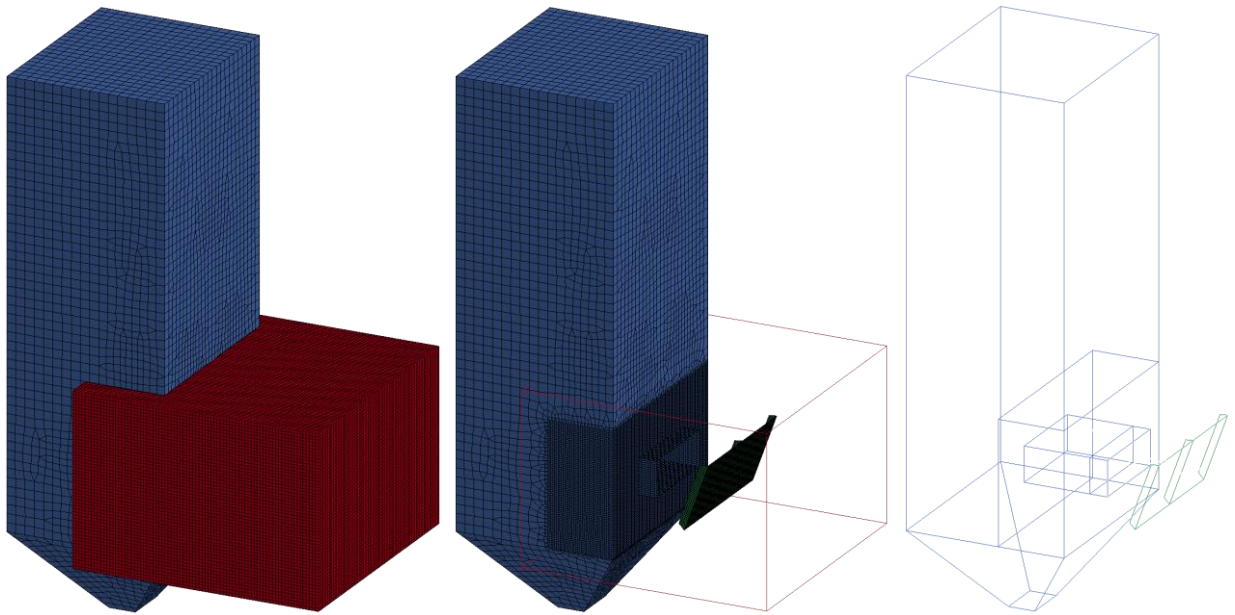
Důležité je také správné nastavení okrajových podmínek. Na okraji ALE domény byl nastaven atmosférický tlak, tedy $101,325 \cdot 10^3 \text{ Pa}$ s okrajovou podmínkou `BOUNDARY_NON_REFLECTING`, která zajistí, že se od kraje domény nebude odrážet přetlak. [20] Dále byla v kartě `CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID` nastavena hodnota `ILEAK`, tj. kontrola úniku tlaku skrz Lagrangeovské prvky, na hodnotu 2 (strong) a `PLEAK` („Leakage control penalty factor“) na 0.02. Počet „coupling“ bodů, tedy bodů, ve kterých dochází k přenosu energie mezi Lagrangeovskou a Eulerovskou sítí, byl nastaven na 12. Princip fungování „coupling“ bodů naznačuje obr. 21. Vyšším množstvím „coupling“ bodů omezuje průnik (leakage) tlaku skrz Lagrangeovské objekty.



obr. 21: Princip „coupling“ bodů [32]

V kartě `CONTROL_ALE` byla nastavena hodnota `AFAT` na -1. Tím se zabrání vyhlazování Eulerovské sítě. V kartě `CONTROL_TIMESTEP` je nastaven bezpečnostní koeficient časového kroku na 0,5 (viz kapitola 2.5.2).

Velikost hrany elementu Lagrangeovské sítě (objektů) i Eulerovské sítě (vzdušného média) je zhruba 20 mm. Lagrangeovská síť je tvořena převážně čtvercovými elementy (el. type - quad), místně i trojúhelníkovými (el. type - tri). Eulerovská síť je tvořena pravidelnými hexagonálními elementy. Eulerovská síť je tvořena plošnými (SHELL) převážně čtvercovými elementy (el. type - quad), místně i trojúhelníkovými (el. type - tri). Model obsahuje 44 394 prvků Lagrangeovské sítě a 1 687 560 prvků sítě Eulerovské. Celkem obsahuje 1 775 091 nodů. Model včetně elementů je na obr. 22.



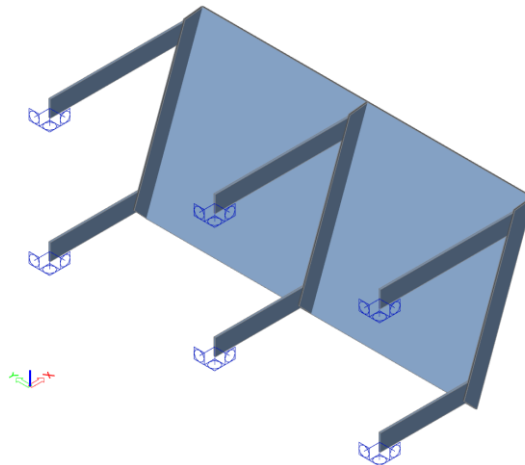
obr. 22: Model LS-Dyna

Červeně je vyznačena síť vzdušného média, modře je vyznačen prachový filtr, zeleně je vyznačen protivýbuchový deflektor. Rozměry filtru a deflektoru odpovídají výpočtům v kapitole 3.2.

Verze zdrojového souboru byla použita V971_R10. Zdrojový kód byl spuštěn programem ANSYS Mechanical APDL Product Launcher verze 19.

3.3.2 Numerický model v řešiči SCIA Engineer

V softwaru SCIA Engineer je možné zadat dynamické i statické zatížení. Nejsme ale schopni spolehlivě stanovit, s jakými parametry a kde by mělo dynamické zatížení působit, bez použití jiných programů (jako např. výše popsany řešič LS-Dyna). Můžeme však využít jednoduchosti tohoto softwaru pro statickou analýzu. Geometrie modelu SCIA Engineer viz obr. 23. Velikost prvku sítě je v tomto případě nastavena na 10 mm.



obr. 23: Geometrie deflektoru v modelu SCIA Engineer

Úchyty k prachovému filtru a výztuhy deflektoru byly modelovány z lineárně pružného materiálového modelu oceli pevnostní třídy S355 (dle [33]). Samotná deska deflektoru byla vymodelována z izotropního pružno-plastického materiálu se zpevněním s von Mises podmínkou, opět oceli S355. Použité materiálové modely popisuje obr. 24.

Jméno	S 355 (LINEAR)	Jméno	S 355 (NONLINEAR)
Nezávislé na normě		Nezávislé na normě	
Typ materiálu	Ocel	Typ materiálu	Ocel
Tepelná roztažnost [m/mK]	0,00	Tepelná roztažnost [m/mK]	0,00
Jednotková hmotnost [kg/m ³]	7850,0	Jednotková hmotnost [kg/m ³]	7850,0
Modul E [MPa]	2,1000e+05	Modul E [MPa]	2,1000e+05
Poissonův součinitel	0,3	Poissonův součinitel	0,3
Nezávislý modul G	<input type="checkbox"/>	Nezávislý modul G	<input type="checkbox"/>
Modul G [MPa]	8,0769e+04	Modul G [MPa]	8,0769e+04
Log. dekrement (pouze nerovnoměrné tlumení)	0,15	Log. dekrement (pouze nerovnoměrné tlumení)	0,15
Barva		Barva	
Tepelná roztažnost (pro požární odolnost) [m/mK]	0,00	Tepelná roztažnost (pro požární odolnost) [m/mK]	0,00
Měrné teplo [J/gK]	6,0000e-01	Měrné teplo [J/gK]	6,0000e-01
Tepelná vodivost [W/mK]	4,5000e+01	Tepelná vodivost [W/mK]	4,5000e+01
Chování materiálu pro nelineární výpočty		Chování materiálu pro nelineární výpočty	
Chování materiálu	Elastický	Chování materiálu	Izotropní pružno-plastický, von Mises
EC3		Poznámka	duktilní materiály (kov, ocel, hliník)
Pevnost v tahu [MPa]	490,0	Typ zadání	Pružno-plastický se zpevněním
Mez kluzu [MPa]	355,0	Mez kluzu v jednoosém tahu [MPa]	355,0
Rozsah tloušťky		Modul zpevnění [MPa]	2,1000e+01
		EC3	
		Pevnost v tahu [MPa]	490,0
		Mez kluzu [MPa]	355,0
		Rozsah tloušťky	

obr. 24: Materiálové modely SCIA Engineer

Pro studii odezvy deflektoru v programu SCIA Engineer byly vytvořeny 3 zatěžovací stavy. Norma ČSN EN 14994 [1] udává možnost zatížení deflektoru statickým tlakem rovným $p_{red,max}$. Jako první zatěžovací stav byl tedy uvažován $p_{red,max} = 1 \text{ bar} = 100 \text{ kPa}$ (viz kap. 3.2.1). Další uvažovaný zatěžovací stav vyplývá z modelu LS-Dyna. Pro verifikaci tlaků v modelu LS-Dyna byl vytvořen zjednodušený model bez deflektoru. V tomto modelu byl změřen mj. přetlak ve vzdálenosti 0,6 m od prachového filtru. Tato vzdálenost odpovídá vzdálenosti deflektoru od prachového filtru. Změřený přetlak byl tedy využit jako druhý zatěžovací stav pro model SCIA Engineer a jeho hodnota odpovídá $p_{LS-Dyna} = 57,7 \text{ kPa}$ (viz kap. 3.5.1). Třetí zatěžovací stav vyplývá z normy ČSN EN 14491 [2], která udává vzorec pro výpočet maximálního externího přetlaku (32). Jeho hodnota je $p_{ext,max} = 31,3 \text{ kPa}$. Zatěžovací stavy pro model SCIA Engineer shrnuje tab. 9.

$$p_{ext,max} = 0,2 \cdot p_{red,max} \cdot A_v^{0,1} \cdot V^{0,18} = 0,2 \cdot 100 \cdot 0,4^{0,4} \cdot 20^{0,18} = 31,3 \text{ kPa} \quad (32)$$

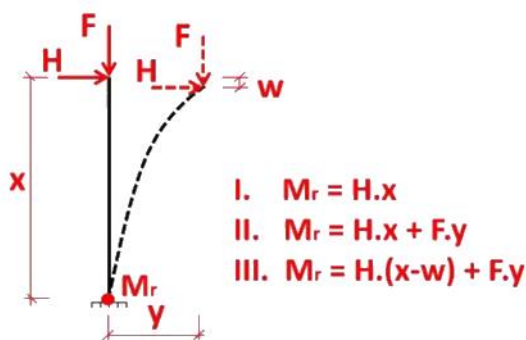
tab. 9: Zatěžovací stavy pro model SCIA Engineer

$p_{red,max}$	$p_{LS-Dyna}$	$p_{ext,max}$
100 kPa	57,7 kPa	31,3 kPa

Použití rovnice (32) je limitováno parametry $0,1 \text{ m}^3 \leq V \leq 250 \text{ m}^3$, $p_{stat} \leq 0,1 \text{ bar}$, $0,1 \text{ bar} < p_{red,max} \leq 1,0 \text{ bar}$, $p_{max} \leq 9 \text{ bar}$, $K_{St} \leq 200 \text{ bar} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, $L/D \leq 2$. Parametry jsou však splněny (viz kapitola 3.2.1).

Vzhledem k tomu, že se tlaková vlna šíří podle Huygensova principu, tedy z každého bodu všemi směry (v kuloplochách), i tlak na konstrukce bude působit zejména jako normála na plochu. [34] Proto bylo zatížení modelováno vždy kolmo na plochu deflektoru. Rozdílné výsledky stejného zatěžovacího stavu při různých náklonech tedy nebudou výsledkem odlišného zatížení, ale rozdílné tuhosti podpor. Podpory jsou totiž delší či kratší podle náklonu deflektoru, a tedy i vzdálenosti jeho horní a dolní hrany od prachového filtru.

Řešič programu SCIA Engineer byl nastaven tak, aby zohledňoval zadané nelinearity. Metoda výpočtu byla zvolena tečnová - modifikovaná Newton-Raphsonova. Pro geometrické nelinearity byl vybrán výpočet 3. řádem, tj. výpočet zohledňující velké deformace (např. u membránových prvků). Rozdíl mezi prvním, druhým a třetím řádem popisuje obr. 25.



I. řád – řešení bez geometrické nelinearity

II. řád – přesné řešení diferenciálních rovnic pro většinu případů nelineárního chování konstrukce, zohledňuje moment od vodorovného posunu

III. řád – iterativní řešení vhodné zejména pro modely s membránami, zohledňuje také změnu momentu od svislého poklesu

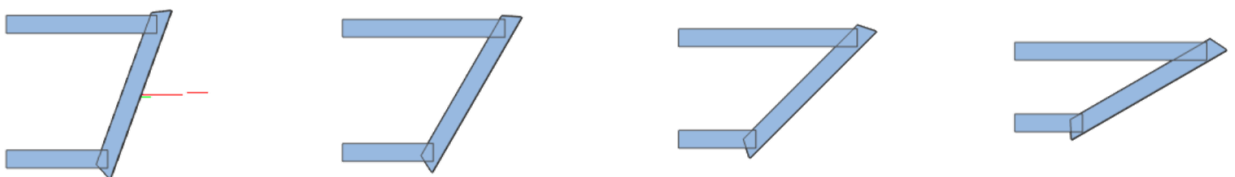
obr. 25: Teorie I. řádu, II. řádu a III. řádu [35]

Pro simulaci byl použit program SCIA Engineer verze 18.1.1047.

3.4 Studie deflektoru v závislosti na náklonu

3.4.1 Prostorové uspořádání

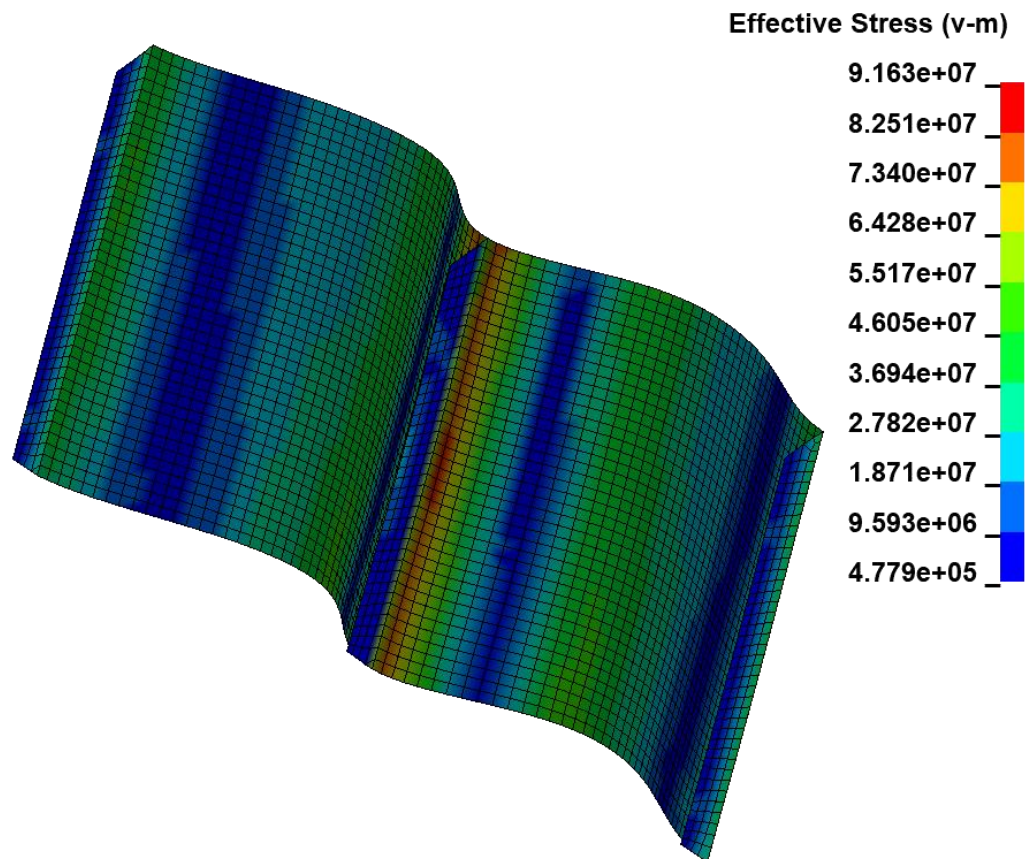
Protivýbuchový deflektor byl studován při náklonech 70° (tj. mimo doporučení norem, viz kap. 2.4), 60° , 45° a 30° (opět mimo doporučení norem, viz kap. 2.4). Všechna ostatní doporučení norem ČSN EN 14994 [1] a ČSN EN 14491 [2] byla dodržena. Deflektor byl tedy umístěn v osové vzdálenosti $1,5 \cdot D = 0,6 \text{ m}$ od ústí otvoru pro uvolnění tlaku při výbuchu.



obr. 26: Prostorové uspořádání deflektoru

3.4.2 Napět'ový posudek konstrukce deflektoru

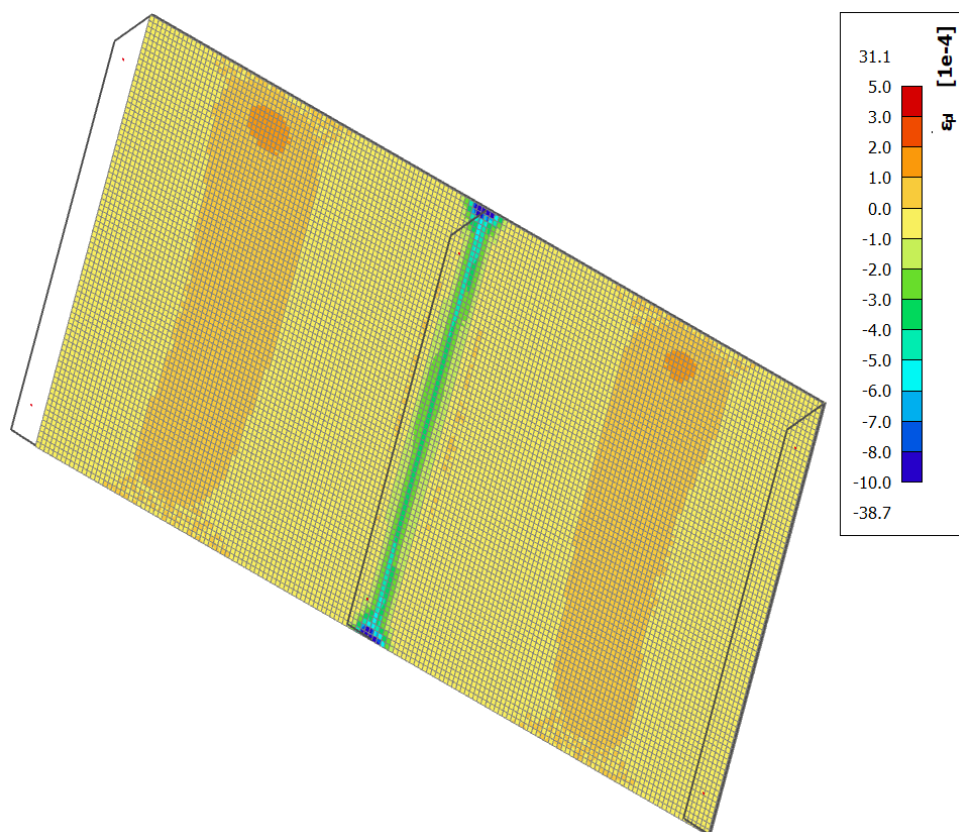
Z posuzovaných situací je deflektor nejvíce zatížen při náklonu 70 stupňů. Nejvyšší tlak v okolí deflektoru v modelu LS-Dyna je zhruba v 35. ms simulace (viz příloha B1). Část energie se však na konstrukci přenesla v podobě kinetické energie. Proto se maximální tlak a deformace na konstrukci vyskytují až po 50. ms simulace, kdy je kinetická energie postupně přeměněna na napětí a deformaci.



obr. 27: Napětí von Mises na deflektoru v modelu LS-Dyna [Pa] (náklon 70°, čas 5. ms)

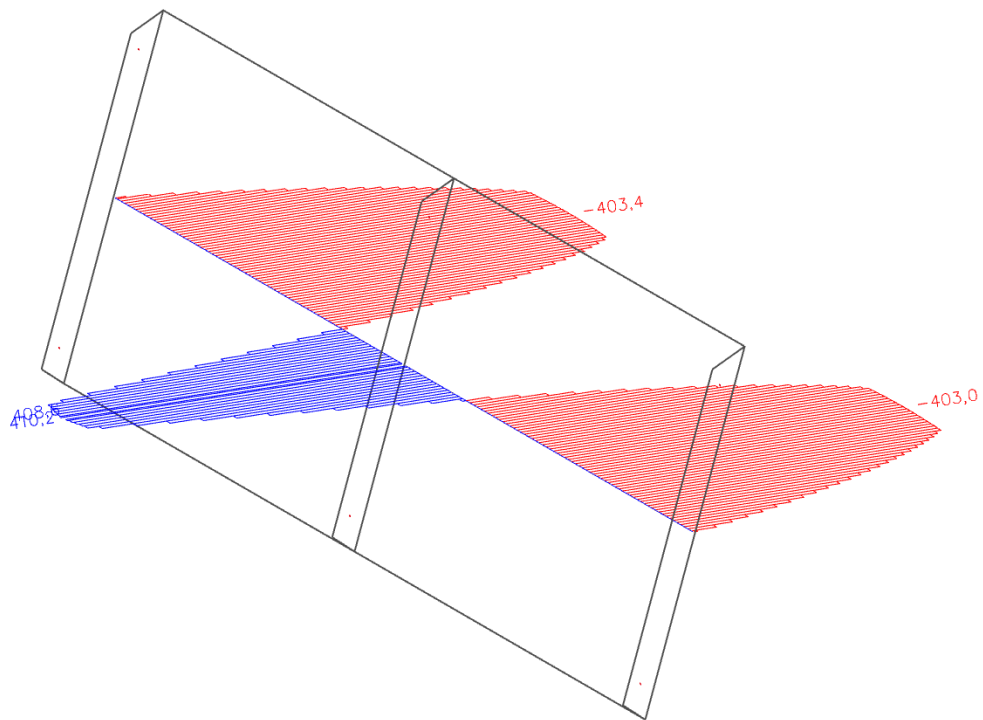
Nejzatíženější byl deflektor při náklonu 70°, jak se předpokládalo. Na obr. 27 je vidět, že v konstrukci vzniká jen velmi malé napětí (necelých 100 MPa v nejnamáhanější oblasti). Není tedy dosaženo ani meze kluzu a nedochází ke zplastizování. Výsledné napětí v konstrukci v modelu LS-Dyna se výrazně liší od napětí v konstrukci v modelu SCIA Engineer od druhého zatěžovacího stavu ($p_{LS-Dyna}$, viz příloha B2). Rozdíl může být způsoben tím, že energie z dynamického zatížení v modelu LS-Dyna se uloží v podobě deformace konstrukce, přičemž v modelu SCIA Engineer je konstrukce zatěžována stále stejně i po své deformaci. Bylo by vhodné provést fyzikální zkoušku pro ověření, který z vytvořených modelů je zatěžován přesněji.

Napětí na deflektoru v modelu SCIA Engineer se v závislosti na jeho náklonu příliš neliší (viz příloha B2). Při posouzení na nejpřísnější zatěžovací stav (tj. při zatížení $p_{red,max}$) deflektor vyhoví. Dochází ke zplastizování pod vnitřní výztuhou a k mírnému zplastizování v polích mezi výztuhami. Plastické přetvoření dosahuje hodnot pod 4 % (viz obr. 28). Dle studií dosahuje celkové poměrné přetvoření na mezi pevnosti hodnot kolem 6 %. [36] Přípustné deformace pro ocel S355 jsou tedy elastické do 0,17 % a plastické do 5,83 % (celková deformace do 6 %), což je splněno.

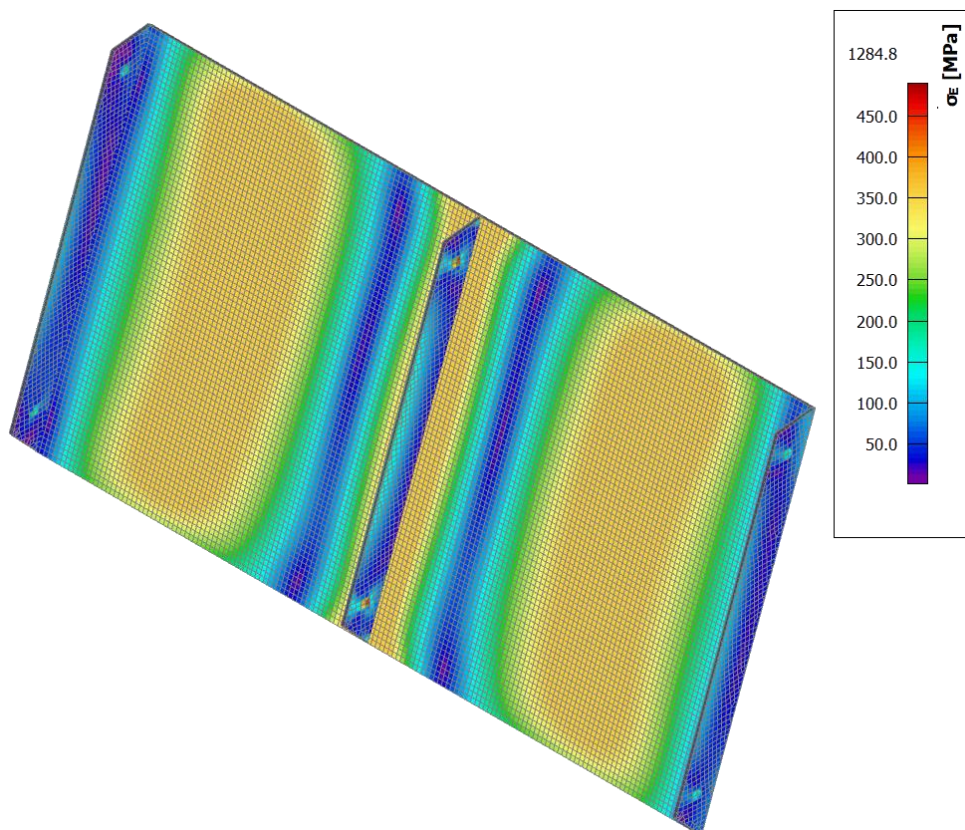


obr. 28: Plastické přetvoření deflektoru v modelu SCIA Engineer [-] (náklon 70°)

Výše popsanému plastickému přetvoření také odpovídá napětí na deflektoru. Z obr. 29 je zřejmé, kde dochází k plastickému přetvoření a uplatnění izotropního zpevnění materiálu (tzn. napětí von Mises překročí hodnotu meze kluzu – 355 MPa). Napětí v žádném místě nepřekročí mez pevnosti ocele pro prvky do tloušťky 40 mm. Dle ČSN EN 10025-2 [37] mez pevnosti pro ocel S355 odpovídá hodnotě 490 MPa. Zároveň je možné poznamenat, že mezi výztuhami dochází k membránovému chování deflektoru. Neutrální osa neprochází v tomto místě prvkem a účinek momentu je v tomto místě minimální (napětí na lici i rubu desky je téměř identické a deska je zatěžována zejména tahovou osovou silou).



obr. 29: Napětí v ose deflektoru v modelu SCIA Engineer [MPa] (náklon 70°)



obr. 30: Napětí na deflektoru v modelu SCIA Engineer (náklon 70°)

Deformace i napětí na deflektoru odpovídají předpokladům a limitům. Takováto konstrukce pro uvažovanou situaci tedy vyhovuje.

3.4.3 Reakce v podporách a návrh přípoje deflektoru

V závislosti na náklonu deflektoru byla vytvořena studie a návrh přípoje deflektoru. Výsledné síly v přípojích v závislosti na použitém řešiči a náklonu deflektoru popisuje tab. 10. Model SCIA Engineer s náklonem 30 stupňů bohužel vždy při nelineárním výpočtu skončil numerickou nestabilitou (singularitou) nebo jeho výsledky v iteracích divergovaly (při každé iteraci se více rozcházely). Výpočet se nepodařilo úspěšně dokončit ani při zvýšení robustnosti řešiče¹⁷ zvýšení možného počtu iterací, zvýšení počtu přírůstků zatížení nebo změně metody výpočtu (Newton-Raphson; modifikovaný Newton-Raphson; Picard; Picard a Newton-Raphson). Síly v přípojích jsou tedy pro tento případ odhadnuty na základě ostatních simulací a je nutné je brát s rezervou.

tab. 10: Síly v přípojích deflektoru vyvolané nárazem tlakové vlny

Síla v podpoře [kN]	Náklon 70°	Náklon 60°	Náklon 45°	Náklon 30°
$F_{x,stat}^{1)}$	-38,9 / -22,8 / -12,4	-36,5 / -23,7 / -13,2	-37,1 / -24,0 / -15,6	Numerická nestabilita
$F_{z,stat}^{1)}$	10,2 / 6,9 / 3,8	17,6 / 10,6 / 6,0	30,3 / 13,4 / 9,4	Numerická nestabilita
$F_{celk,stat}^{1),3)}$	40,2 / 23,8 / 12,9	40,5 / 24,4 / 13,3	40,9 / 26,0 / 15,7	Numerická nestabilita (41,6 / 30,3 / 16,1) ⁴⁾
$F_{x,dyn,max}^{2)}$	-21,4	-19,4	-19,5	-16,5
$F_{z,dyn,max}^{2)}$	0,8	0,7	0,5	0,5
$F_{celk,dyn,max}^{2),3)}$	21,4	19,4	19,5	16,6

¹⁾ Hodnota z modelu SCIA Engineer (zatížení $p_{red,max}$ / $p_{ext,0,6}$ z modelu LS-Dyna / $p_{ext,max}$), statické zatížení

²⁾ Hodnota z modelu LS-Dyna, dynamické zatížení výbuchem

³⁾ Velikost výslednice sil, nemusí odpovídat F_x a F_z (maxima zmíněných sil nemusejí pocházet ze stejné podpory)

⁴⁾ Předpokládaná velikost sil

Z výše uvedené tabulky vyplývá, že při statickém (plošném) zatěžování náklon nemá na velikost výslednice sil v přípoji zásadní vliv. Zanedbatelný rozdíl velikosti výslednice sil (v řádu jednotek procent) je výsledkem zkracování či prodlužování úchytů deflektoru, a tedy i měnící se tuhosti podpor v závislosti na náklonu deflektoru.

Dále můžeme pozorovat, že nejvyšších sil v přípojích je dosaženo plošným statickým zatěžováním tlakem $p_{red,max}$, jak udávají normy ČSN EN 14491 [2] a ČSN EN 14994 [1]. Tento přístup je tedy na straně bezpečnosti. Je nutné poznamenat, že při simulaci výbuchu a odezvy konstrukce v programu LS-Dyna vyšly síly menší než při statickém zatížení konstrukce tlakem převzatým ze zjednodušeného modelu LS-Dyna v místě, kde se má nacházet deflektor. Z toho vyplývá, že je bezpečné pro návrh přípoje provést zjednodušenou analýzu bez deflektoru

¹⁷ Zvýšení robustnosti řešiče omezuje změny v modelu mezi jednotlivými iteracemi. Simulace je tedy stabilnější, ale je potřeba více iterací.

v programu LS-Dyna a následně provádět statickou analýzu podle tlaků, které vycházejí v dynamické analýze.

Za pozornost stojí fakt, že v modelu LS-Dyna vycházejí v přípojih minimální svislé síly. Podíl na takovémto výsledku může mít zanedbání gravitace v modelu. Tíha konstrukce by však zvýšila sílu v přípoji o pouhých cca 0,25 kN. Tento jev by bylo vhodné podrobněji prozkoumat v další simulaci.

Celkově jsou síly v přípojih deflektoru v CFD modelu LS-Dyna zhruba poloviční oproti výsledkům při statickém zatížení tlakem $p_{red,max}$, které udávají normy ČSN EN 14491 [2] a ČSN EN 14994 [1].

Abychom zůstali na straně bezpečnosti, šroubový přípoj bude navržen na nejvyšší změřenou sílu v podpoře, tedy $F_{v,ED} = 41,5 \text{ kN}$. Pro situaci uvažovanou v této práci je vyhovující šroubový přípoj s jedním šroubem M16 z materiálu 5.6.

tab. 11: Posouzení šroubového přípoje deflektoru

Vstupní hodnoty										
šroub				plech		díry			síly	
průměr	materiál	ks	počet stříhů	tl. (mm)	materiál	d_0	e_1	p_1	F_{Vd}	F_{Td}
									(kN)	
M16	5.6	1	1	8	S355	18	40	40	41,6	0,0
Unosnost pro jeden šroub a jeden stříh										
rovina stříhu	A (mm ²)	f_{ub} (Mpa)	f_u (Mpa)	α	γ_{Mb}	$F_{v,Rd}$	$F_{b,Rd}$	$F_{t,Rd}$	(kN)	
v dříku	201,1	500	355	0,5	1,25	48,3	44,6	56,5		
Posouzení skupiny										
stříh		otlačení			tah			stříh/tah		
86%		93%			0%			86%		

Takto navržený přípoj vyhovuje pro všechny uvažované zatěžovací stavy modelu LS-Dyna i SCIA Engineer.

3.5 Validace a verifikace numerických modelů

Pro ověření relevantnosti výsledků je nutné provést validaci vstupních dat a verifikaci modelu. Veškeré materiálové charakteristiky a parametry stavových rovnic byly převzaty z ověřených zdrojů (viz tab. 7, příp. obr. 24 [33]). Vstupní parametry je tedy možné považovat za validované. Pro validaci modelu jako celku však doporučuji provést fyzikální zkoušky.

3.5.1 Verifikace modelu LS-Dyna

Pro ověření správného nastavení modelu LS-Dyna a jeho chování byl vytvořen zjednodušený model se stejnými parametry jako v modelu pro studii deflektoru (tj. stejná velikost elementu sítě i materiálový model pro vzduch). Bylo zkoumáno šíření tlakové vlny v modelu a velikost její přetlakové fáze. Následně byly hodnoty porovnány s hodnotami vypočtenými podle vzorců (10), (11), (12) a (18), viz kap. 2.5.4. Aby byly výsledky porovnatelné, bylo nutné počítat s výbušninou, jejíž parametry jsou obecně známé. Ve zjednodušeném modelu bylo tedy počítáno se 100 g výbušninou TNT (uvažované parametry viz tab. 12).

tab. 12: Parametry výbušnin použité v modelu [31]

Výbušnina	ρ_0 [kg/m ³]	A [GPa]	B [GPa]	R_1 [-]	R_2 [-]	ω [-]	E_0 [GPa]
TNT 1 [38]	1 630	373,75	3,747	4,15	0,90	0,35	6,0
TNT 2 [31]	1 630	371,21	3,231	4,15	0,95	0,30	7,0
TNT 3 [38]	1 630	524,41	4,900	4,579	0,86	0,23	7,1
TNT 4 [38]	1 630	454,86	10,119	4,50	1,50	0,25	7,8

tab. 13: Velikost absolutního tlaku při analytickém výpočtu a při numerické simulaci

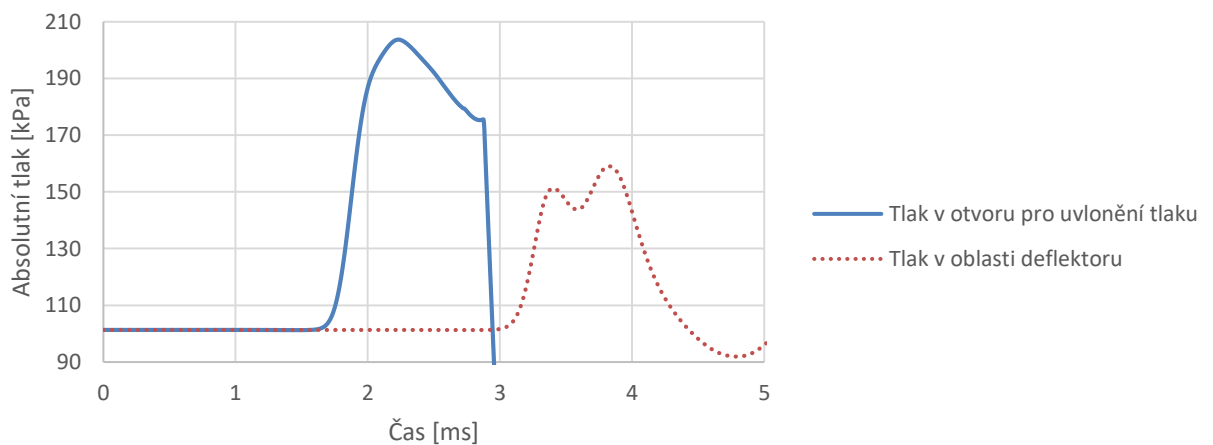
Vzdálenost od výbušnin [m]	Z [m/kg ^{1/3}]	p dle (10),(11),(12) [MPa]	p dle (18) [MPa]	p_{so} LS-Dyna [MPa]	Odchylka od (10),(11),(12) [%]	Odchylka od (18) [%]
0,400	0,862	1,108	1,385	0,653	-41,0	-52,8
0,500	1,077	0,774	0,858	0,574	-25,8	-33,1
0,600	1,293	0,546	0,571	0,476	-12,8	-16,6

Při ověřování modelu odpovídaly výsledné tlaky nejvíce výbušnině TNT 4 podle tab. 12. Porovnání výsledků simulace s TNT 4 a analytického výpočtu popisuje tab. 13. Je nutné poznamenat, že vypočtený tlak se výrazně liší už v závislosti na tom, jaký použijeme vzorec pro analytický výpočet. Odchylka mezi tlaky vypočtenými dle (10),(11),(12) a dle (18) se pohybuje v řádu desítek procent. Podobných odchylek dosahují i výsledky numerické simulace. Z různých zdrojů (např. [20, 39]) se můžeme dozvědět, že odchylka velikosti přetlaku mezi numerickým modelem a analytickým výpočtem klesá se vzdáleností od zdroje. Výrazný vliv má také jemnost sítě. Čím menší je hrana elementu, tím přesnějších výsledků můžeme dosáhnout. Odchylku je možné v LS-Dyna snížit také funkcí ALE_REFERENCE_SYSTEM_GROUP, PRTYPE=8 a hodnotou EFAC (vhodné nastavení této hodnoty je na 0.01). Toto klíčové slovo zajistí, že se bude výpočetní síť deformovat podle tlakové vlny a bude kopírovat čelo vlny. Nevýhodou je prodloužení doby výpočtu zhruba dvakrát (při EFAC=0.01), nevhodné deformace výpočetní sítě při příliš malé hodnotě EFAC a náchylnost k průniku tlaku skrz Lagrangeovskou síť (leakage, viz kap. 3.3.1). Pro tyto nedostatky bylo od použití funkce ALE_REFERENCE_SYSTEM_GROUP upuštěno. Příklad deformované sítě na hraně tlakové vlny je na obr. D.46.

Odchyšky tlaku v modelu v porovnání s analytickým výpočtem jsou poměrně výrazné (pro vzdálenost od zdroje výbuchu 0,6 m a méně). Pokud bychom tedy potřebovali porovnat numerický model s fyzikální zkouškou, bylo by potřeba využít mnohem jemnější síť. V našem případě byl však tlak jako vstupní hodnota nastaven a porovnáván u jeho zdroje (viz dále) a jak ukazuje obr. D.45, tlakové špičky neklesají se vzdáleností od zdroje výbuchu tak výrazně jako při použití analytického výpočtu. Proto se dá předpokládat, že v modelu bude v oblasti deflektoru vyšší tlak, než by měl být podle vztahů (10)(11)(12) nebo (18). Pohybujeme se tedy na straně bezpečnosti.

Jemnost zvolené výpočetní sítě odpovídá možnostem a limitům dostupného hardwaru, na kterém probíhaly simulace. Simulace při jemnější výpočetní síti by na tomto hardwaru nebyla možná. Proto nebyla vypracována ani studie vlivu velikosti elementu na výsledky simulace. Přesto můžeme říci, že použitá velikost elementu výpočetní sítě (hrana 20 mm) je vyhovující pro konzervativní šíření tlaku (viz tab. 13).

Vzhledem k tomu, že výbušnina TNT vytváří příliš velký přetlak při příliš malém objemu, není pro modelování deflagrace vhodná. Proto byl upraven model výbušniny (viz tab. 7) tak, aby odpovídal tlakovým poměrům při výbuchu prachu v prachovém filtru. Záměrem tedy bylo, aby přetlak v oblasti otvoru pro uvolnění tlaku při výbuchu odpovídal $p_{max} = 1 \text{ bar}$ (viz kapitola 3.2.1).

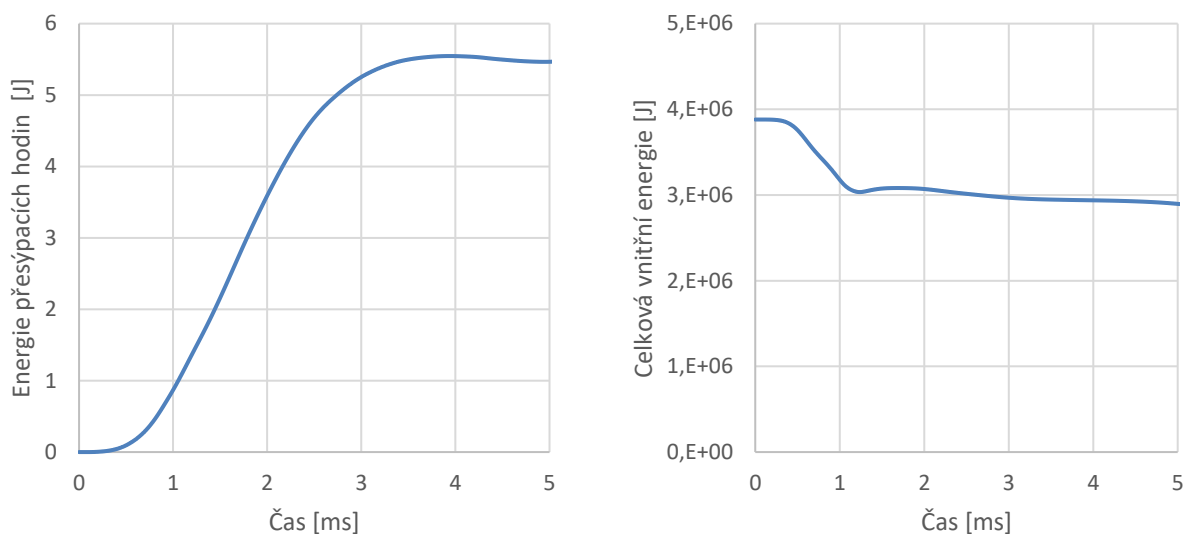


obr. 31: Tlak při výbuchu – model LS-Dyna

V obr. 31 je znázorněn tlak v oblasti otvoru pro uvolnění tlaku. V absolutních hodnotách dosahuje velikosti $p_{50} = 203,7 \text{ kPa}$, což odpovídá přetlaku $p = 102,4 \text{ kPa} \cong 1 \text{ bar}$. Přetlak v ústí otvoru filtru tedy odpovídá předpokladům a hodnotám použitých při výpočtu velikosti otvoru pro uvolnění tlaku a velikosti deflektoru.

Dalším parametrem, který je nutné ověřit při modelování dynamických dějů, je tzv. energie přesýpacích hodin (hourglassing energy). Tato energie se vyskytuje u elementů s jednobodovou

integrací¹⁸ (jedním Gaussovým bodem), kdy se element může deformovat symetricky právě kolem tohoto bodu. Jedná se o tzv. mód deformace s nulovou energií. Při příliš velkých ztrátách vnitřní energie do energie přesýpacích hodin může dojít k numerické nestabilitě. [20] Simulace se považuje za vyhovující, pokud energie přesýpacích hodin nepřesáhne 5 % celkové vnitřní energie soustavy. [40] V případě modelu LS-Dyna jsou s jedním integračním bodem modelovány elementy vzdušného média („ELEMENT FORM 11 - 1 point ALE multi-material element“). Jsou však nastaveny tak přísné podmínky kontroly energie přesýpacích hodin, že k žádným výrazným ztrátám energie nedochází. Celkovou vnitřní energii a energii přesýpacích hodin znázorňuje obr. 32. Energie přesýpacích hodin se v modelu vykytuje v řádu 10^{-4} % z celkové vnitřní energie. Model je tedy v tomto ohledu vyhovující. Módy deformace způsobené energií přesýpacích hodin a možné deformace sítě popisuje příloha D2.



obr. 32: Energie přesýpacích hodin

3.5.2 Verifikace modelu SCIA Engineer

Model SCIA Engineer nevyžaduje tak složité nastavení jako model LS-Dyna a jeho možnosti jsou již mnohokrát validované a verifikované (viz [41, 42]). Aby se předešlo numerické nestabilitě, byla simulace provedena jednotlivě, vždy pro každý náklon deflektoru zvlášť.

¹⁸ Jeden bod pro výpočet parametrů (např. napětí) prvku na celou jeho šířku

4 Závěr a doporučení pro další výzkum

První část diplomové práce popisuje fenomén výbuchu, současnou praxi zavádění protivýbuchových opatření a vybrané možnosti modelování výbuchu. Uvádí základní dělení výbuchů a podrobněji se zaměřuje na chemický výbuch, který je nejčastějším typem výbuchu v průmyslovém prostředí. V rámci analýzy účinků výbuchu na člověka a na konstrukce se došlo k závěrům, že tlaková vlna způsobená výbuchem není pro člověka tak nebezpečná jako zplodiny výbuchu – žhavé částice, které je však možné odvrátit protivýbuchovým deflektorem. Oproti tomu konstrukce jsou nejvíce ohroženy tlakovou vlnou, kterou je do jisté míry možné omezit, ale vzhledem k charakteru jejího šíření není možné ji zcela eliminovat.

Následuje rozbor legislativy spojené s protivýbuchovými opatřeními, a zejména s protivýbuchovým deflektorem. Z legislativních požadavků i logického zamyšlení nad problematikou plyne, že některé systémy protivýbuchové ochrany jsou nedostačující, či přímo porušují platný legislativní rámec, a protivýbuchový deflektor by zde jistě našel své uplatnění.

Po přezkoumání normových požadavků bylo zjištěno, že jedinými dvěma normami, které se zmiňují o protivýbuchovém deflektoru, jsou ČSN EN 14994 [1] a ČSN EN 14491 [2]. Deska pro odvrácení výbuchu je zde však zmíněna jen okrajově. Je zde popsáno geometrické uspořádání deflektoru vůči nádobě, ve které došlo k výbuchu, minimální doporučené rozměry deflektoru v návaznosti na velikost membrány pro uvolnění tlaku při výbuchu a možný konzervativní přístup pro zatěžování deflektoru při jeho návrhu.

Na závěr rešerše byly popsány vybrané metody modelování výbuchu. Práce zmiňuje rozdíl mezi metodami semi-empirickými a metodami prvoprincipiálními. Nejčastěji používanými a také nejvhodnějšími metodami pro modelování situací popsaných v této práci jsou jednoznačně metody semi-empirické. Dále zde byl vysvětlen rozdíl mezi implicitními a explicitními metodami. Pro modelování rychlých dynamických dějů jsou téměř výhradně využívány explicitní metody.

V kapitole zabývající se CFD modely byly uvedeny možné přístupy k modelování dynamiky plynů, včetně popisu typů výpočetních sítí a řešení turbulentního proudění tekutin. Při modelování výbuchu se často používá Eulerovská síť pro vzdušné médium a Lagrangeovská síť pro pevné prvky (případně Eulerovská síť i pro pevné prvky, pokud se nejedná o jednoduchou plošnou konstrukci). Takto byla modelována i situace v druhé části diplomové práce – Studii protivýbuchového deflektoru.

Zmíněny byly i vzorce pro analytický výpočet výbuchového tlaku. Ty však slouží pouze k ověření modelu, neboť není možné je použít v komplexním modelu, který zahrnuje i odražený tlak a tlak na konstrukci, která není kolmá na tlakovou vlnu.

Zároveň byl v této části diplomové práce popsán program LS-Dyna. Tento program obsahuje velké množství řešičů (využívaných zejména s explicitním přístupem) vhodných pro modelování výbuchu. Práce se dále podrobněji zabývala metodou „Lagrange in solid“.

Ve druhé části práce se nachází studie protivýbuchového deflektoru před vzduchovým filtrem o efektivním objemu 20 litrů se sběračem prachu s dřevním prachem. Tato situace byla vybrána, protože filtr s dřevním prachem tvoří drtivou většinu všech vzduchových filtrů se sběračem prachu v průmyslovém prostředí. Na tento filtr byla vypočítána potřebná plocha otvoru pro uvolnění tlaku při výbuchu a rozměry deflektoru dle požadavků norem ČSN EN 14994 [1] a ČSN EN 14491 [2].

Pro studii protivýbuchového deflektoru byly vytvořeny modely v programech LS-Dyna a SCIA Engineer. Program LS-Dyna byl nastaven tak, aby tlak při výbuchu odpovídal tlaku uvolněnému membránou filtru dle předpokladů (viz kap. 3.2.1 a 3.5.1). Následně byla v tomto řešiči prováděna dynamická analýza.

V programu SCIA Engineer byla provedena statická nelineární analýza při zatížení tlakem, který doporučují normy ČSN EN 14994 [1] a ČSN EN 14491 [2], dále tlakem, který se má podle modelu LS-Dyna vyskytovat v oblasti deflektoru a v poslední řadě maximálním externím tlakem vypočteným podle vzorců zmíněných norem.

Při konzervativním přístupu zatěžování podle norem dochází ke zplastizování deflektoru. Konstrukce však stále vyhovuje a v žádné její části nedochází k překročení meze pevnosti. V ostatních případech (druhý a třetí zatěžovací stav v modelu SCIA Engineer i modely LS-Dyna) se konstrukce vždy chová pouze pružně.

Z hlediska odolnosti konstrukce při výbuchu pro uvažovaný případ deflektor tl. 8 mm s rezervou vyhovuje (i při konzervativním přístupu připouštěném normami). Vzhledem k velikosti napětí na deflektoru v modelu LS-Dyna však vzniká otázka, jestli je takovýto model opravdu použitelný. Pro další studii doporučuji ověřit model fyzikální zkouškou. Také je nutné mít na paměti omezení spojená s modelováním výbuchu pomocí JWL stavové rovnice (viz kapitola 3.3.1).

Výslednice sil v přípojích jsou při konzervativním zatížení podle norem zhruba dvojnásobné v porovnání s CFD modelem LS-Dyna (40 kN a 21 kN). Pro optimalizaci návrhu přípojů je tedy velmi výhodné využít numerické simulace. Bylo také zjištěno, že v případě, že v modelu LS-Dyna bez deflektoru změříme tlakovou špičku v místě, kde by se měl deflektor vyskytovat, a zatížíme tímto tlakem deflektor při statické analýze, dostáváme výsledky mírně konzervativnější než v případě zatěžování deflektoru přímo v CFD modelu (platné při stejném nastavení a hrubosti sítě, jaké bylo použito v našem případě). Je tak možné uspořit čas při náročné numerické simulaci.

V každém případě pro připojení deflektoru k úchytu vyhovuje šroubový přípoj se šroubem M16 materiálu 5.6 se stříhem v dříku, vždy jeden v každém rohu výztuhy. S ohledem na to, že simulace byla uvažována pro jednu z nejméně příznivých situací (vzhledem k objemu filtru a jeho tlakové odolnosti), měl by takovýto přípoj vyhovovat pro jakýkoliv deflektor navržený dle ČSN EN 14491 [2] pro prachový filtr s dřevním prachem.

Použitý CFD model LS-Dyna je vyhovující pro případ, kdy máme nastaven tlak v nějakém místě a tlak v určité vzdálenosti od tohoto místa nám působí na konstrukci. Velikost přetlaku rázové vlny se totiž v modelu oproti analytickému výpočtu se vzdáleností snižuje pomaleji. Pokud bychom zkoumali přesnou velikost přetlaku, museli bychom použít jemnější síť, případně v kombinaci funkce LS-Dyna ALE_REFERENCE_SYSTEM_GROUP, PRTYPE=8.

V Případné další studii je možné zaměřit se na způsob uchycení protivýbuchového deflektoru k prachovému filtru, provést analýzu schopnosti odvrátit produkty výbuchu, případně modelovat situaci v programu FLACS od firmy Gexcon, který je schopný simulovat explosivní hoření. Je však finančně poměrně nákladný.

V každém případě je před použitím deflektoru navrženého podle numerické simulace nezbytné validovat použitý výpočetní model v některé z certifikovaných zkušeben.

Seznam obrázků

obr. 1: Trojúhelník výbuchu (vlevo) jako obdoba trojúhelníku hoření (vpravo).....	3
obr. 2: Chybný návrh konstrukce (princip akce a reakce) [7].....	8
obr. 3: Základní skupiny protivýbuchové prevence [5].....	9
obr. 4: Skladování hořlavé kapaliny pod hladinou vody [11].....	10
obr. 5: Skladování hořlavé kapaliny nad hladinou vody [11].....	11
obr. 6: Nádrž s plovoucím víkem [11].....	11
obr. 7: Principy terciální protivýbuchové ochrany [7].....	12
obr. 8: Výhody a nevýhody tlakově odolné konstrukce [7].....	13
obr. 9: Výhody a nevýhody systémů pro potlačení výbuchu [7].....	13
obr. 10: Výhody a nevýhody systémů pro odlehčení výbuchu [7].....	14
obr. 11: Prachový filtr s membránou pro uvolnění tlaku, vhodné místo pro umístění deflektoru [13].....	14
obr. 12: Značení prostor s nebezpečím výbuchu.....	16
obr. 13: Úplné značení protivýbuchového zařízení.....	17
obr. 14: Doporučené umístění deflektoru [1, 2].....	18
obr. 15: Průběh tlakové vlny v otevřeném prostoru (A) a v uzavřeném prostoru (B) [23].....	23
obr. 16: Izotropní a kinematické zpevnění [24].....	25
obr. 17: Možnosti programu LS-PrePost [20].....	26
obr. 18: ANSYS Mechanical APDL Product Launcher pro spouštění LS-DYNA kódu.....	26
obr. 19: Geometrie filtru (převzato a upraveno z [2]).....	28
obr. 20: Geometrie deflektoru [mm].....	30
obr. 21: Princip „coupling“ bodů [32].....	32
obr. 22: Model LS-Dyna.....	33
obr. 23: Geometrie deflektoru v modelu SCIA Engineer.....	33
obr. 24: Materiálové modely SCIA Engineer.....	34
obr. 25: Teorie I. řádu, II. řádu a III. řádu [35].....	35
obr. 26: Prostorové uspořádání deflektoru.....	35
obr. 27: Napětí von Mises na deflektoru v modelu LS-Dyna [Pa] (náklon 70°, čas 5. ms).....	36
obr. 28: Plastické přetvoření deflektoru v modelu SCIA Engineer [-] (náklon 70°).....	37
obr. 29: Napětí v ose deflektoru v modelu SCIA Engineer [MPa] (náklon 70°).....	38

obr. 30: Napětí na deflektoru v modelu SCIA Engineer (náklon 70°).....	38
obr. 31: Tlak při výbuchu – model LS-Dyna	42
obr. 32: Energie přesýpacích hodin.....	43
obr. A.1: Model LS-Dyna	57
obr. B.2: Tlak v okolí deflektoru [Pa] (náklon 70°, vertikální řez osou deflektoru).....	58
obr. B.3: Napětí von Mises [Pa] v modelu LS-Dyna (náklon 70°).....	59
obr. B.4: Tlak v okolí deflektoru [Pa] (náklon 60°, vertikální řez osou deflektoru).....	60
obr. B.5: Napětí von Mises [Pa] v modelu LS-Dyna (náklon 60°).....	61
obr. B.6: Tlak v okolí deflektoru [Pa] (náklon 45°, vertikální řez osou deflektoru).....	62
obr. B.7: Napětí von Mises [Pa] v modelu LS-Dyna (náklon 45°).....	63
obr. B.8: Tlak v okolí deflektoru [Pa] (náklon 30°, vertikální řez osou deflektoru).....	64
obr. B.9: Napětí von Mises [Pa] v modelu LS-Dyna (náklon 30°).....	65
obr. B.10: Plastické deformace na deflektoru v modelu SCIA Engineer (náklon 70°, zatěžovací stav 1).....	66
obr. B.11: Napětí na deflektoru v modelu SCIA Engineer (náklon 70°, zatěžovací stav 1)....	66
obr. B.12: Plastické deformace na deflektoru v modelu SCIA Engineer (náklon 70°, zatěžovací stav 2).....	67
obr. B.13: Napětí na deflektoru v modelu SCIA Engineer (náklon 70°, zatěžovací stav 2)....	67
obr. B.14: Plastické deformace na deflektoru v modelu SCIA Engineer (náklon 70°, zatěžovací stav 3).....	68
obr. B.15: Napětí na deflektoru v modelu SCIA Engineer (náklon 70°, zatěžovací stav 3)....	68
obr. B.16: Plastické deformace na deflektoru v modelu SCIA Engineer (náklon 60°, zatěžovací stav 1).....	69
obr. B.17: Napětí na deflektoru v modelu SCIA Engineer (náklon 60°, zatěžovací stav 1)....	69
obr. B.18: Plastické deformace na deflektoru v modelu SCIA Engineer (náklon 60°, zatěžovací stav 2).....	70
obr. B.19: Napětí na deflektoru v modelu SCIA Engineer (náklon 60°, zatěžovací stav 2)....	70
obr. B.20: Plastické deformace na deflektoru v modelu SCIA Engineer (náklon 60°, zatěžovací stav 3).....	71
obr. B.21: Napětí na deflektoru v modelu SCIA Engineer (náklon 60°, zatěžovací stav 3)....	71
obr. B.22: Plastické deformace na deflektoru v modelu SCIA Engineer (náklon 45°, zatěžovací stav 1).....	72
obr. B.23: Napětí na deflektoru v modelu SCIA Engineer (náklon 45°, zatěžovací stav 1)....	72

obr. B.24: Plastické deformace na deflektoru v modelu SCIA Engineer (náklon 45°, zatěžovací stav 2).....	73
obr. B.25: Napětí na deflektoru v modelu SCIA Engineer (náklon 45°, zatěžovací stav 2)....	73
obr. B.26: Plastické deformace na deflektoru v modelu SCIA Engineer (náklon 45°, zatěžovací stav 3).....	74
obr. B.27: Napětí na deflektoru v modelu SCIA Engineer (náklon 45°, zatěžovací stav 3)....	74
obr. C.28: Síly v podporách v modelu LS-Dyna (náklon 70°)	75
obr. C.29: Síly v podporách v modelu LS-Dyna (náklon 60°)	75
obr. C.30: Síly v podporách v modelu LS-Dyna (náklon 45°)	76
obr. C.31: Síly v podporách v modelu LS-Dyna (náklon 30°)	76
obr. C.32: Výslednice sil [kN] v podporách v modelu SCIA Engineer (náklon 70°, zatěžovací stav 1).....	77
obr. C.33: Výslednice sil [kN]v podporách v modelu SCIA Engineer (náklon 70°, zatěžovací stav 2).....	77
obr. C.34: Výslednice sil [kN]v podporách v modelu SCIA Engineer (náklon 70°, zatěžovací stav 3).....	78
obr. C.35: Výslednice sil [kN]v podporách v modelu SCIA Engineer (náklon 60°, zatěžovací stav 1).....	78
obr. C.36: Výslednice sil [kN]v podporách v modelu SCIA Engineer (náklon 60°, zatěžovací stav 2).....	79
obr. C.37: Výslednice sil [kN]v podporách v modelu SCIA Engineer (náklon 60°, zatěžovací stav 3).....	79
obr. C.38: Výslednice sil [kN]v podporách v modelu SCIA Engineer (náklon 45°, zatěžovací stav 1).....	80
obr. C.39: Výslednice sil [kN]v podporách v modelu SCIA Engineer (náklon 45°, zatěžovací stav 2).....	80
obr. C.40: Výslednice sil [kN]v podporách v modelu SCIA Engineer (náklon 45°, zatěžovací stav 3).....	81
obr. D.41: Tlakový profil v modelu verifikace LS-Dyna při použití TNT 1 dle tab. 12	82
obr. D.42: Tlakový profil v modelu verifikace LS-Dyna při použití TNT 2 dle tab. 12	82
obr. D.43: Tlakový profil v modelu verifikace LS-Dyna při použití TNT 3 dle tab. 12	83
obr. D.44: Tlakový profil v modelu verifikace LS-Dyna při použití TNT 4 dle tab. 12	83
obr. D.45: Tlakové špičky z modelu verifikace LS-Dyna a z analytického výpočtu (TNT dle tab. 12)	84
obr. D.46: Deformace sítě na okraji tlakové vlny	84

obr. D.47: Princip energie přesýpacích hodin [43]	85
obr. D.48: Módy deformace s nulovou energií [20].....	85
obr. D.49: Síť s výrazným (vlevo) a neznatelným (vpravo) hourglassingem [44]	85

Seznam tabulek

tab. 1: Posuzované bezpečnostně technické vlastnosti [5].....	4
tab. 2: Poškození objektů a osob od účinků výbuchu [5].....	7
tab. 3: Tlakové tritolové ekvivalenty některých výbušnin [5]	9
tab. 4: Dělení prostor podle pravděpodobnosti výskytu explozivní atmosféry.....	15
tab. 5: Kategorizace zařízení do prostor s nebezpečím výbuchu	17
tab. 6: Teplotní třídy protivýbuchových zařízení.....	17
tab. 7: Vstupní data pro materiály modelu LS-Dyna	31
tab. 8: Vstupní data pro stavové rovnice modelu LS-Dyna	31
tab. 9: Zatěžovací stavy pro model SCIA Engineer.....	34
tab. 10: Síly v přípojích deflektoru vyvolané nárazem tlakové vlny	39
tab. 11: Posouzení šroubového přípoje deflektoru.....	40
tab. 12: Parametry výbušniny použité v modelu [31]	41
tab. 13: Velikost absolutního tlaku při analytickém výpočtu a při numerické simulaci.....	41

Zdroje

- [1] ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT. ČSN EN 14994 (38 9684) - *Ochranné systémy pro odlehčení výbuchu plynu*. B.m.: ÚNMZ. říjen 2007
- [2] ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT. ČSN EN 14491 (38 9682) - *Ochranné systémy pro odlehčení výbuchu prachu*. B.m.: ÚNMZ. únor 2013
- [3] MINISTERSTVO VNITRA - GENERÁLNÍ ŘEDITELSTVÍ HASIČSKÉHO ZÁCHRANNÉHO SBORU ČESKÉ REPUBLIKY. *Statistická ročenka 2015 Česká republika*. 2016
- [4] MAKOVIČKA, Daniel, Břetislav JANOVSÝ, ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE, KLOKNERŮV ÚSTAV, UNIVERZITA PARDUBICE a CHEMICKO-TECHNOLOGICKÁ FAKULTA. *Vlastnosti výbušnin a analýza charakteru výbuchového zatížení a jeho modifikací: sborník přednášek : [vzdělávací seminář - pilotní kurs projektu Protivýbuchová ochrana staveb]*. Praha: České vysoké učení technické, 2006. ISBN 978-80-01-03640-2.
- [5] MAKOVIČKA, Daniel, Břetislav JANOVSÝ, Milan ČERNÍN, ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE, KLOKNERŮV ÚSTAV, UNIVERZITA PARDUBICE a CHEMICKO-TECHNOLOGICKÁ FAKULTA. *Příručka protivýbuchové ochrany staveb*. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT v Praze, 2008. ISBN 978-80-01-04090-4.
- [6] *Vyhláška č. 246/2001 Sb. Vyhláška Ministerstva vnitra o stanovení podmínek požární bezpečnosti a výkonu státního požárního dozoru (vyhláška o požární prevenci)*. 23. červenec 2001
- [7] ALABÁNOVÁ, Hana, Jan KORNAS, Pavel PAŘÍK, Martin PAVLÍK, Adam PODSTAWKA a Tadeáš PODSTAWKA. *Seminář protivýbuchové ochrany - Ochrana pracovníků v EX prostředí*. In: . Tetčice u Brna. 17. duben 2018.
- [8] MALHOTRA, Ashok, Dan CARSON a Scott MCFADDEN. Blast pressure leakage into buildings and effects on humans. *Performance of materials and structures under extreme conditions* [online]. 2017, **210**, 386–392. ISSN 1877-7058. Dostupné z: doi:10.1016/j.proeng.2017.11.092
- [9] ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT. ČSN EN 1991-1-7 (730035) - *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-7: Obecná zatížení - Mimořádná zatížení*. B.m.: ÚNMZ. leden 2008
- [10] KOVÁŘ, Martin. *Methods of blast resistance determination of fiber reinforced concrete specimens*. Prague, 2015. Ph.D. thesis. Czech Technical University in Prague.
- [11] DAMEC, Jaroslav a FAK. HORNICKO-GEOL. *Protivýbuchová prevence*. Ostrava: Vysoká škola báňská, 1993. ISBN 978-80-7078-190-6.
- [12] EVROPSKÝ VÝBOR PRO NORMALIZACI. ČSN EN 1127-1 ed. 2 (389622) - *Výbušná prostředí - Prevence a ochrana proti výbuchu - Část 1: Základní koncepce a metodika*. únor 2012
- [13] ULPA DUST. Prachový filtr. In: [online]. B.m. 15. listopad 2018. Dostupné z: <https://www.ulpadust.com>
- [14] *Směrnice Evropského parlamentu a Rady 99/92/ES*. prosinec 1999

- [15] *Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2014/34/EU* [online]. 28. únor 2014. Dostupné z: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/En/TXT/?uri=CELEX:32014L0034>
- [16] MEDIT CONSULT S. R. O. *ČSN 33 2000-5-51 ed. 3 (332000) - Elektrické instalace nízkého napětí - Část 5-51: Výběr a stavba elektrických zařízení - Všeobecné předpisy*. B.m.: ÚNMZ. květen 2010
- [17] SHERKAR, Pushkaraj, Andrew WHITTAKER a Amjad AREF. *Modeling the effects of detonations of high explosives to inform blast-resistant design* [online]. 2010. Dostupné z: doi:10.13140/RG.2.1.3978.4565
- [18] GENTA, Giancarlo. *Introduction to the Mechanics of Space Robots - Appendix A: Equations of Motion in the Configuration and State Spaces* [online]. Dordrecht: Springer Netherlands, 2012 [vid. 2018-12-06]. ISBN 978-94-007-1795-4. Dostupné z: doi:10.1007/978-94-007-1796-1
- [19] EIDE, Hilde O. S. a Emil A. MELBY. *Blast Loaded Aluminium Plates* [online]. Trondheim, 2013. Master thesis. Norwegian University of Science and Technology, Faculty of Engineering Science and Technology. Dostupné z: https://brage.bibsys.no/xmlui/bitstream/handle/11250/237258/649744_FULLTEXT01.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [20] TATALÁK, Adam. *Deformačně-napěťová analýza tenkostěnné skříně vystavené rázovému zatížení od výbuchu*. Brno, 2016. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [21] MAKOVIČKA, Daniel a Daniel MAKOVIČKA JR. Blast Load of Building Structure. *Engineering Mechanics*. 2014, **21**(1), 11–18. ISSN 1802-1484.
- [22] KINNEY, Gilbert F. *Explosive shocks in air*. Place of publication not identified: Springer, 2014. ISBN 978-3-642-86684-5.
- [23] WOLF, Stephen J, Vikhyat S BEBARTA, Carl J BONNETT, Peter T PONS a Stephen V CANTRILL. Blast injuries. *The Lancet* [online]. 2009, **374**(9687), 405–415. ISSN 0140-6736. Dostupné z: doi:10.1016/S0140-6736(09)60257-9
- [24] KATEDRA MECHANIKY, PRUŽNOSTI A PEVNOSTI, TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI. *Plasticita* [online]. [vid. 2018-12-20]. Dostupné z: http://www.kmp.tul.cz/system/files/1_plast_uvod.pdf
- [25] ŠKRLEC, Andrej a Jernej KLEMENC. Estimating the Strain-Rate-Dependent Parameters of the Cowper-Symonds and Johnson-Cook Material Models using Taguchi Arrays. *Strojníški vestnik - Journal of Mechanical Engineering* [online]. 2016, **62**(4), 220–230. ISSN 00392480, 00392480. Dostupné z: doi:10.5545/sv-jme.2015.3266
- [26] PODSTAWKA, Tadeáš. Osobní rozhovor se soudním znalcem v oblasti chemie - chemického výbuchu, reaktivity, výbušnosti průmyslových prachů a par kapalin. 17. duben 2018
- [27] JANOVSKEJ, Břetislav, UNIVERZITA PARDUBICE, CHEMICKO-TECHNOLOGICKÁ FAKULTA, ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE a KLOKNERŮV ÚSTAV. *Parametry tlakových vln, zatížení konstrukcí a jejich ochrana: sborník přednášek : [vzdělávací seminář - pilotní kurs projektu Protivýbuchová ochrana staveb]*. V Praze: České vysoké učení technické, Kloknerův ústav, 2008. ISBN 978-80-01-03685-3.

- [28] JARC, Christopher A. a THE HIXSON BAKING INDUSTRY TEAM. *Combustible Dust Basics* [online]. B.m.: HIXSON Inc. Dostupné z: http://www.hixson-inc.com/_images/Combustible_Dust_0114_FINAL.pdf
- [29] MARSTON. *Marston Technical Catalogue - Explosion Vent Panels (Catalogue No. MAVP0801)* [online]. Dostupné z: <http://www.rit.it/public/downloads/CATALOGO%20PANNELLI.pdf>
- [30] JASWANTH, Gangolu a Hrishikesh SHARMA. Modelling and Analysing of JET BLAST DEFLECTOR. In: *International conference on composites/nanoengineering (ICCE-25)* [online]. 2017. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/316601235_Modelling_and_Analysing_of_JET_BLAZT_DEFLECTOR
- [31] DOBRAZ, M. *LLNL Explosives Handbook: Properties of Chemical Explosives and Explosive Simulants*. University of California, Springfield, Va: ISEE Explosives Engineers, 1985. ISBN 978-99948-1-102-1.
- [32] OLOVSSON, Lars. *Training class in ALE and fluid-structure interaction* [online]. B.m.: Livermore Software Technology Corporation. září 2006 [vid. 2018-12-20]. Dostupné z: ftp://ftp.lstc.com/outgoing/jday/ALE_training_by_Lars.Sept06.pdf
- [33] ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT. *ČSN EN 10027-1 (420011) - Systémy označování ocelí - Část 1: Stavba značek oceli*. B.m.: ÚNMZ. 1. říjen 2017
- [34] MILLER, David A. B. Huygens's wave propagation principle corrected. *Optics Letters* [online]. 1991, **16**(18), 1370. ISSN 0146-9592, 1539-4794. Dostupné z: [doi:10.1364/OL.16.001370](https://doi.org/10.1364/OL.16.001370)
- [35] KIKA, Ondřej a SCIA ENGINEER. Pokročilé výpočty ve SCIA Engineer: geometrická a fyzikální nelinearita. In: [online]. B.m. 18. duben 2018 [vid. 2018-12-20]. Dostupné z: <https://www.scia.net/cs/support/webinars/pokrocile-vypocty-ve-scia-engineer-geometricka-fyzikalni-nelinearita-specialni-typy>
- [36] SADOWSKI, Adam J., J. Michael ROTTER, Thomas REINKE a Thomas UMMENHOFER. Statistical analysis of the material properties of selected structural carbon steels. *Structural Safety* [online]. 2015, **53**, 26–35. ISSN 0167-4730. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2014.12.002>
- [37] ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT. *ČSN EN 10025-2 (420904) - Výrobky válcované za tepla z konstrukčních ocelí - Část 2: Technické dodací podmínky pro nelegované konstrukční oceli*. B.m.: 10/2005
- [38] SCHWER, Leonard E. Jones-Wilkens-Lee (JWL) Equation of State with Afterburning. In: *14th International LS-DYNA User Conference: Constitutive Modeling* [online]. 2016. Dostupné z: <https://www.dynalook.com/14th-international-ls-dyna-conference/constitutivemodeling/jones-wilkens-lee-jwl-equation-of-state-with-afterburning>
- [39] HÁJEK, R. a M. FOGLEAR. The reduction of peak overpressure using concrete blast barriers. In: *SUSI 2014* [online]. 2014, s. 265–275 [vid. 2018-12-20]. Dostupné z: [doi:10.2495/SUSI140231](https://doi.org/10.2495/SUSI140231)

[40] BELYTSCHKO, Ted, Jame Shau-Jen ONG, WING KAM LIU a James M. KENNEDY. Hourglass control in linear and nonlinear problems. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* [online]. 1984, **43**(3), 251–276. ISSN 00457825. Dostupné z: doi:10.1016/0045-7825(84)90067-7

[41] CVL. *Quality inside Scia Engineer - QA and QC in Scia Engineer* [online]. B.m.: NEMETSCHEK Scia. 3. červen 2015 [vid. 2018-12-20]. Dostupné z: https://resources.scia.net/en/attachments/benchmarks/quality_inside_scia_engineer.pdf

[42] NEMETSCHEK SCIA. *Scia Engineer Steel Code Check Theoretical Background* [online]. srpen 2012 [vid. 2018-12-20]. Dostupné z: https://help.scia.net/18.0/nl/pvt/attachments/steel_code_check_theory_enu.pdf?TocPath=Theoretische%20achtergrond%7C_____5

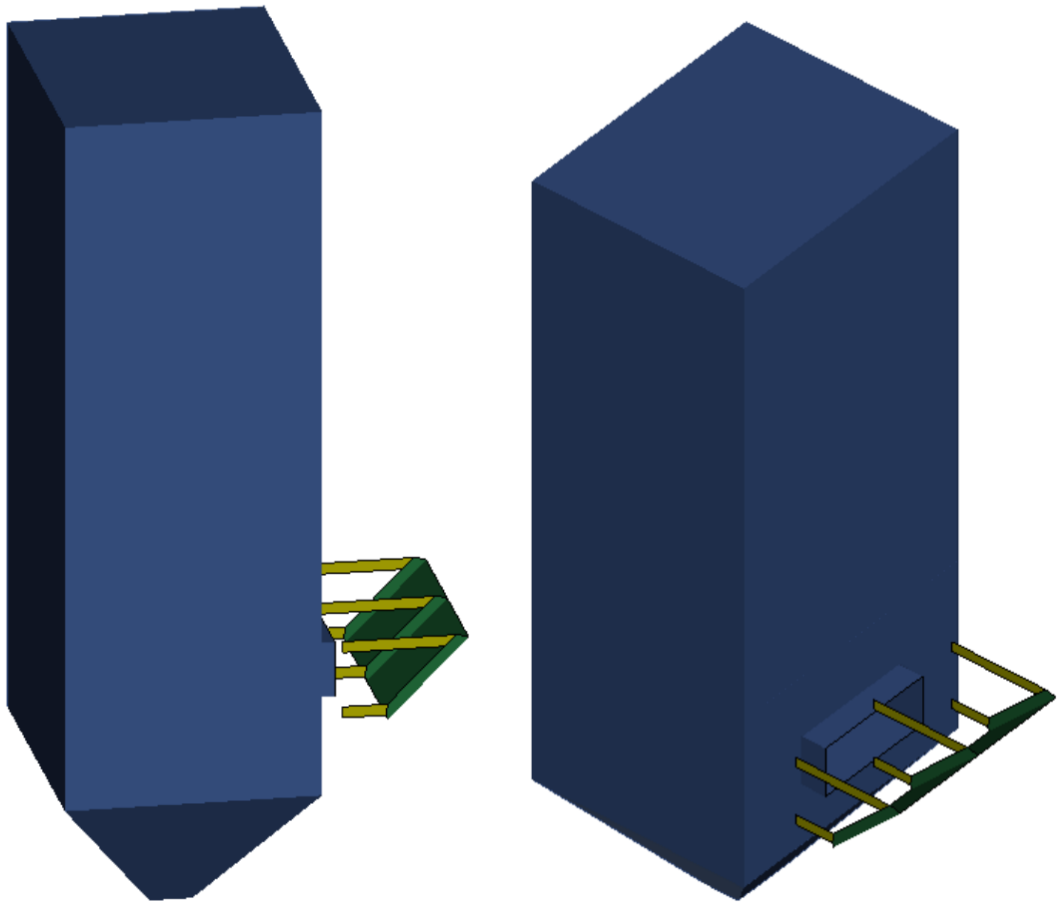
[43] GORASH, Yevgen, Alan BICKLEY a Francisco GOZALO. Design optimisation of swellable elastomeric seals using advanced material modelling and FEM simulations. In: *IOM3 - Innovations in Rubber Design* [online]. 2016 [vid. 2018-12-20]. Dostupné z: <https://strathprints.strath.ac.uk/59087/>

[44] HALE, Steve a CAE ASSOCIATES. *Why Worry About Hourglassing in Explicit Dynamics?* [online]. [vid. 2018-12-20]. Dostupné z: <https://caesai.com/blog/why-worry-about-hourglassing-explicit-dynamics-part-ii>

Seznam příloh

A	Model LS-Dyna	57
B	Napěťový posudek konstrukce deflektoru.....	58
B1	Model LS-Dyna	58
B2	Model SCIA Engineer.....	66
C	Reakce v podporách.....	75
C1	Model LS-Dyna	75
C2	Model SCIA-Engineer	77
D	Validace a verifikace.....	82
D1	Tlakový profil	82
D2	Energie přesýpacích hodin (hourglassing).....	85

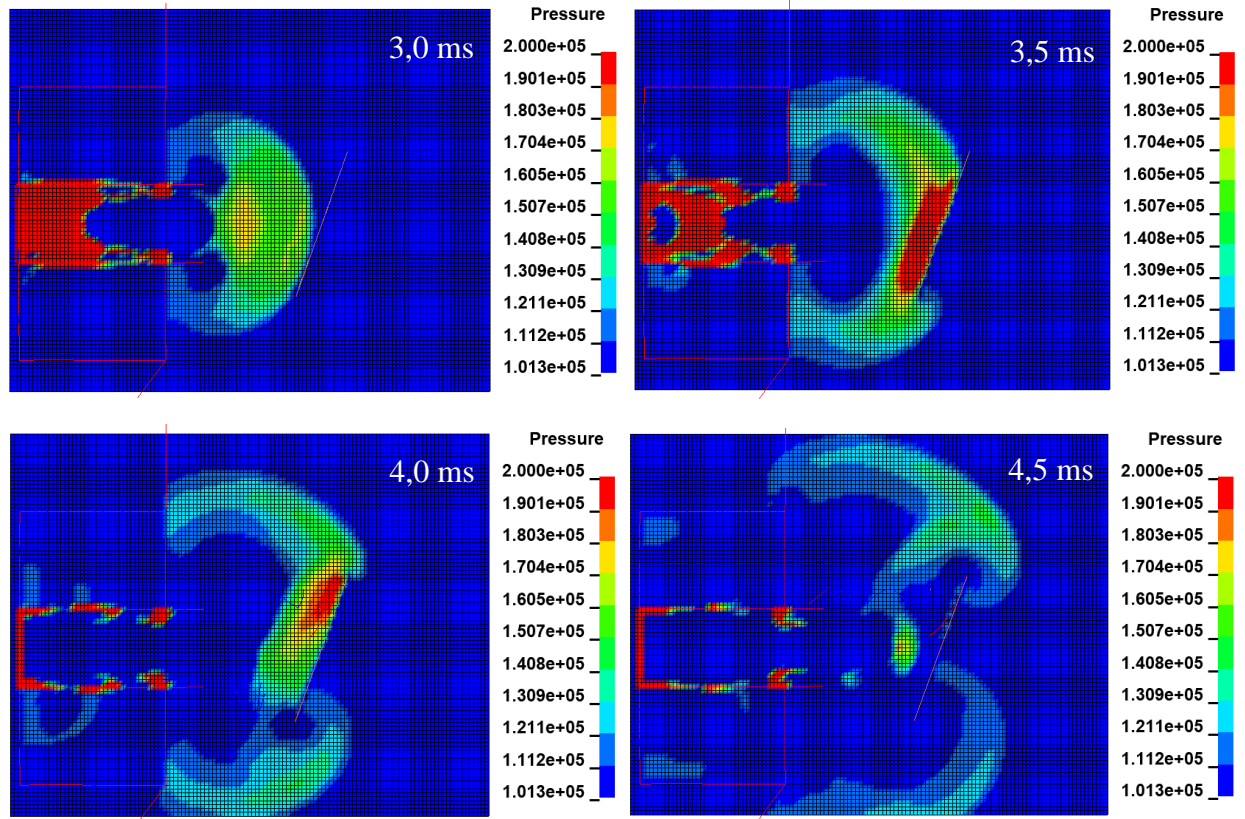
A Model LS-Dyna



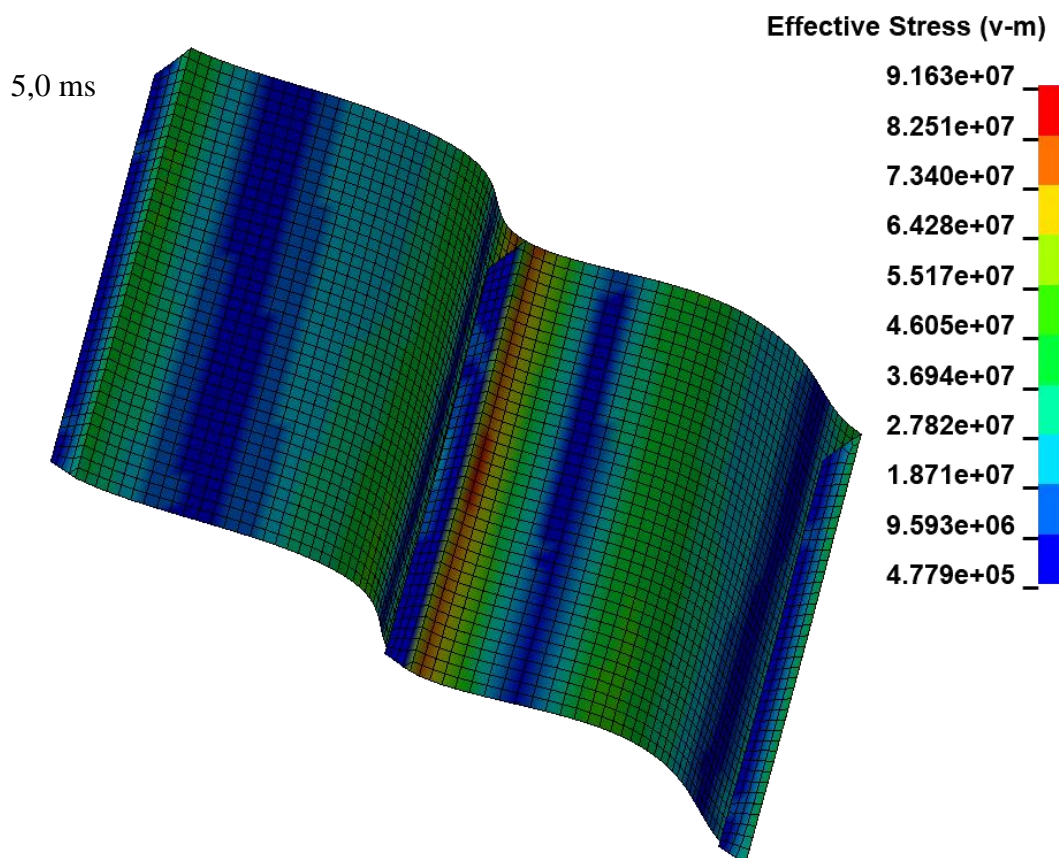
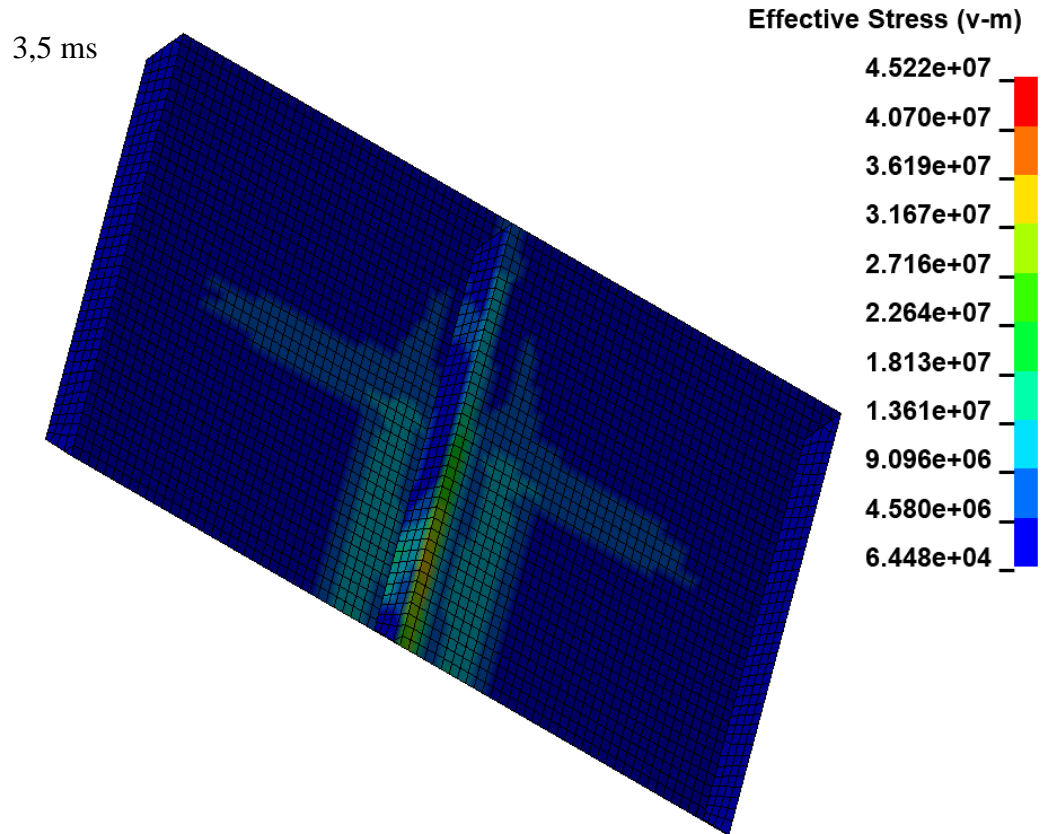
obr. A.1: Model LS-Dyna

B Napětový posudek konstrukce deflektoru

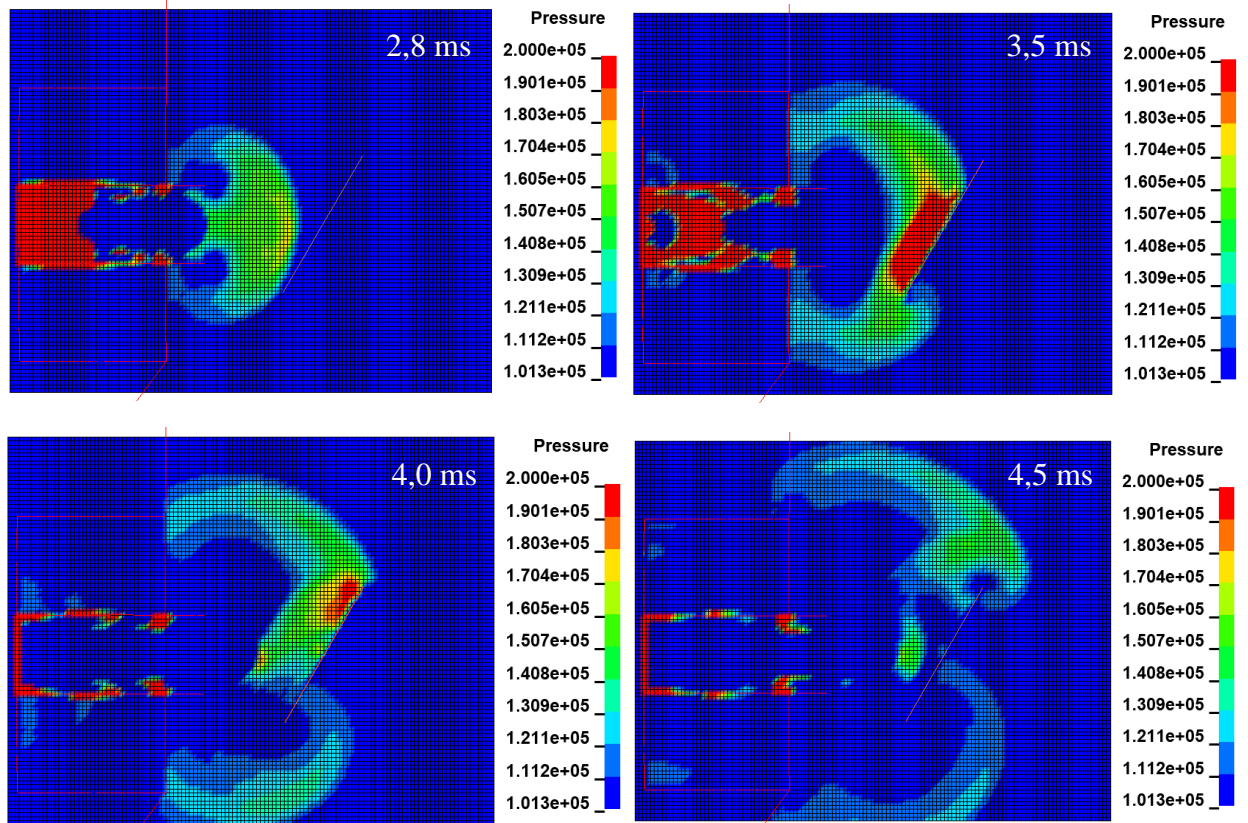
B1 Model LS-Dyna



obr. B.2: Tlak v okolí deflektoru [Pa] (náklon 70°, vertikální řez osou deflektoru)

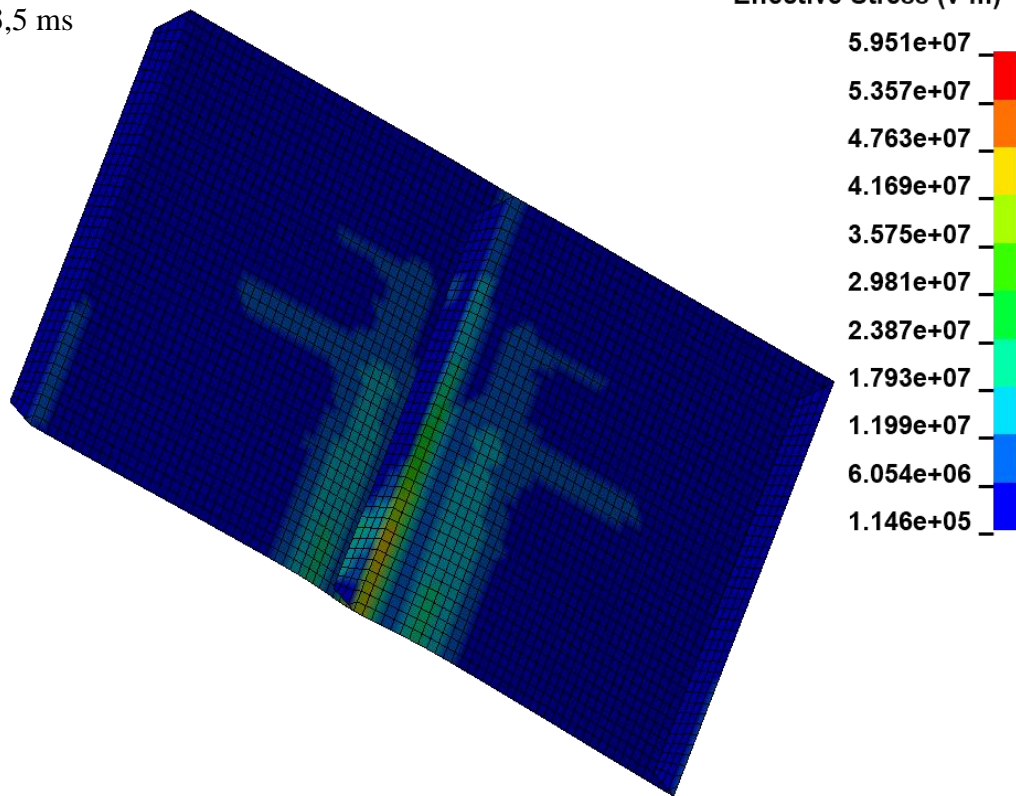


obr. B.3: Napětí von Mises [Pa] v modelu LS-Dyna (náklon 70°)

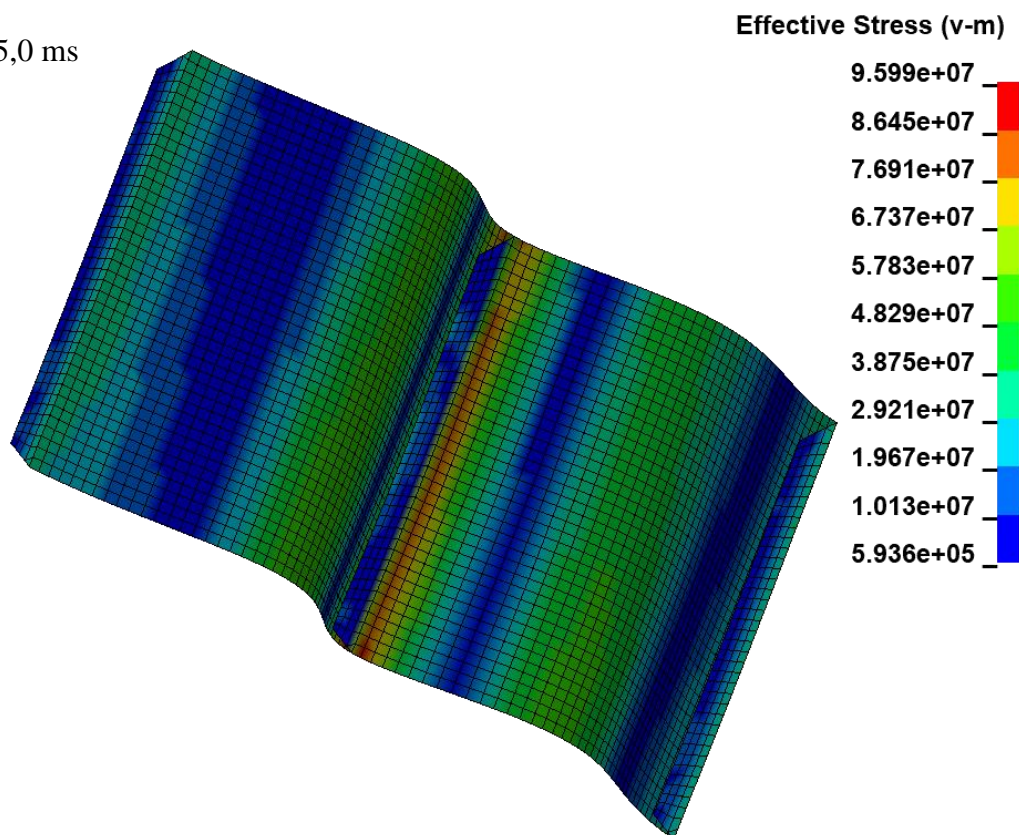


obr. B.4: Tlak v okolí deflektoru [Pa] (náklon 60°, vertikální řez osou deflektoru)

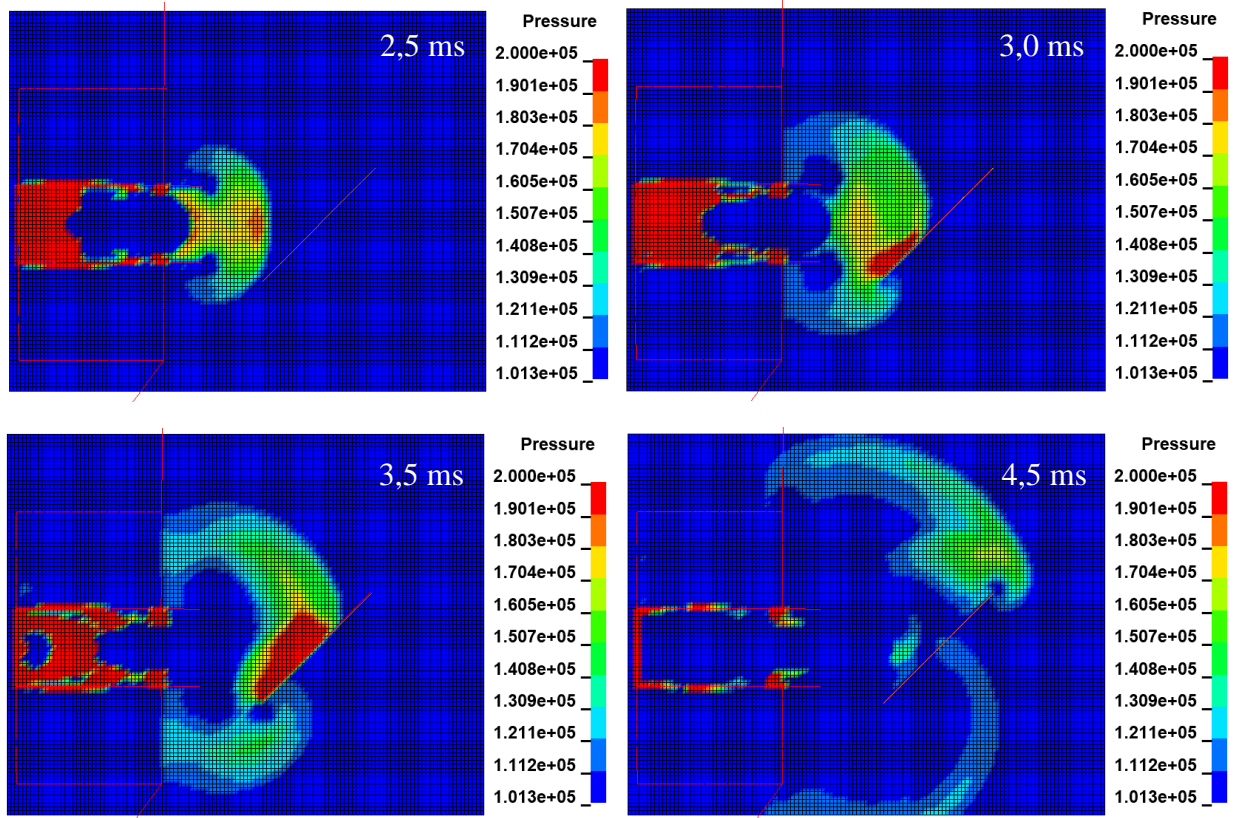
3,5 ms



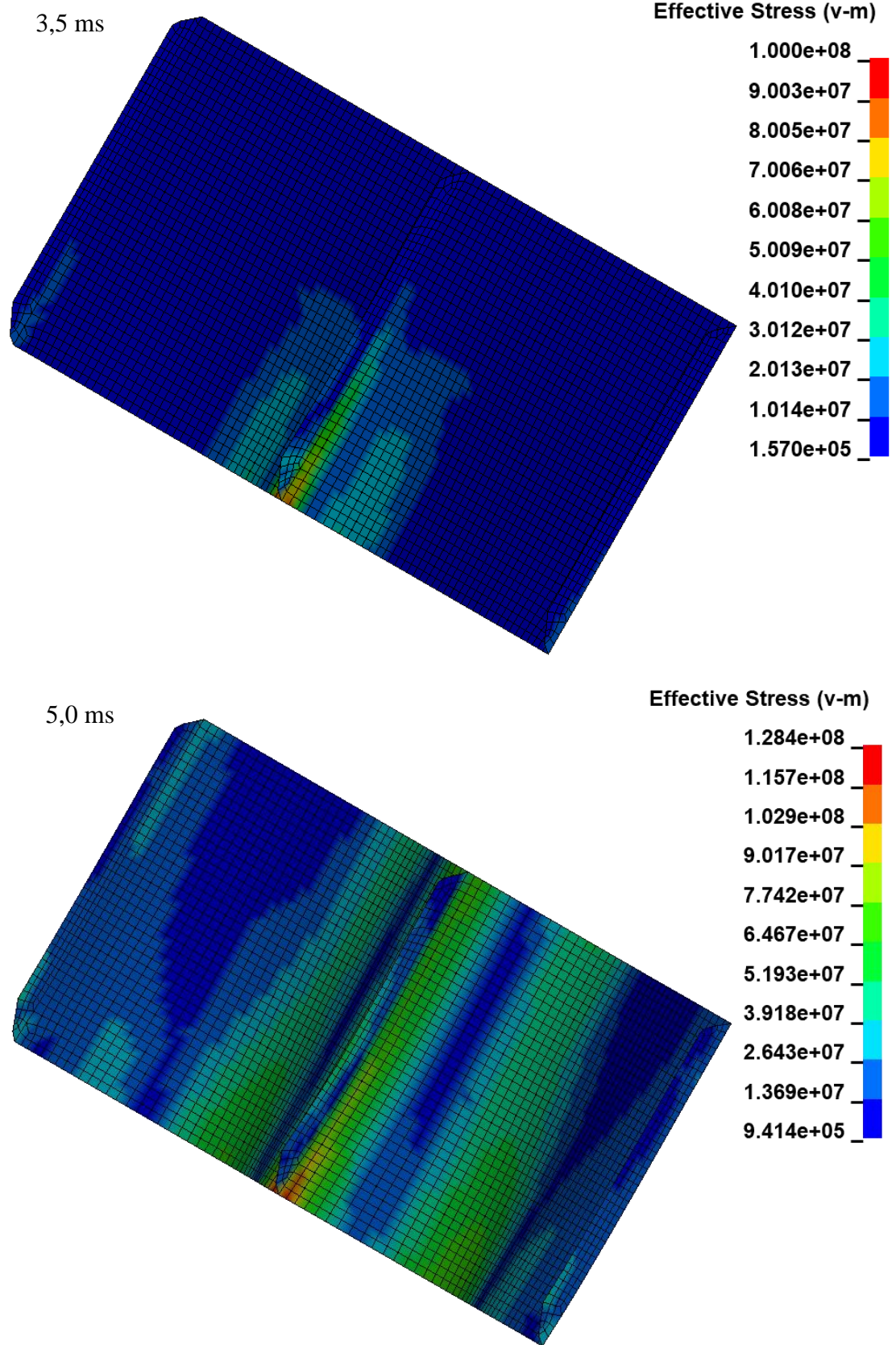
5,0 ms



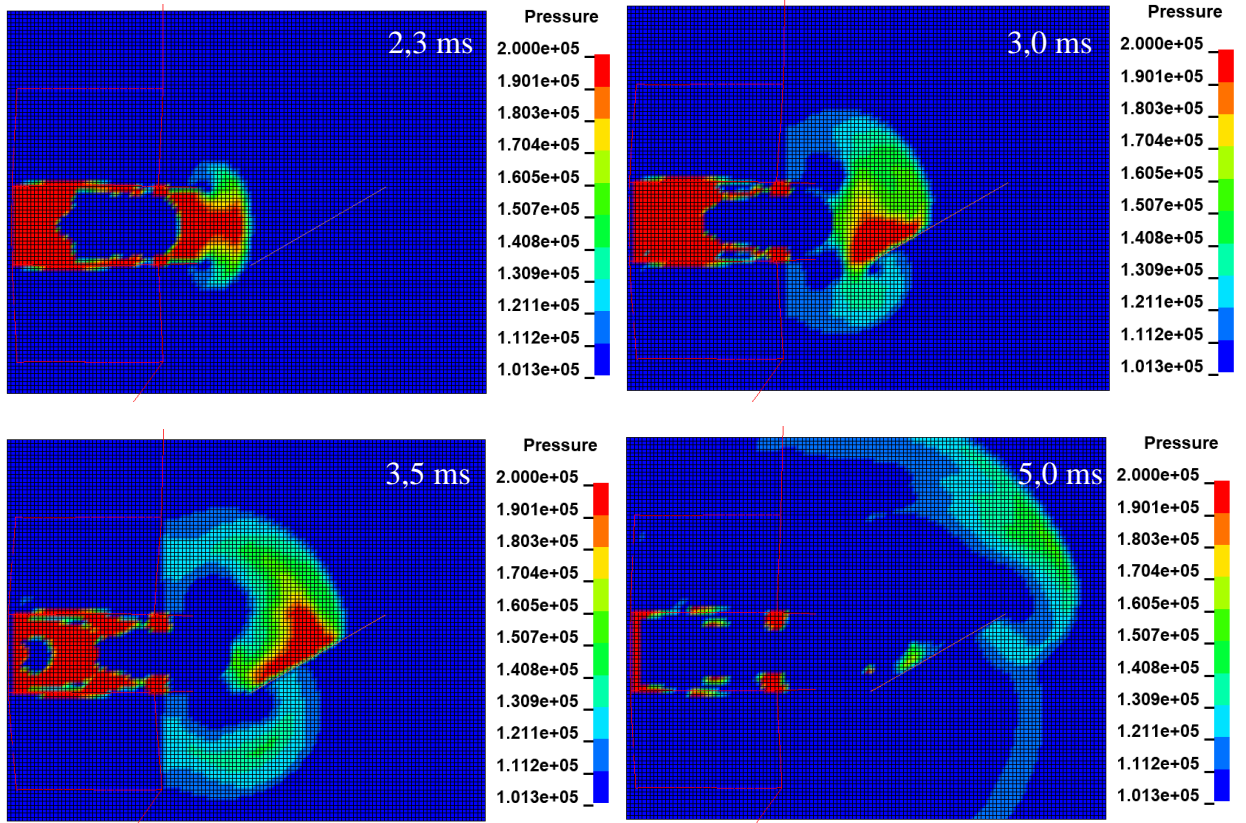
obr. B.5: Napětí von Mises [Pa] v modelu LS-Dyna (náklon 60°)



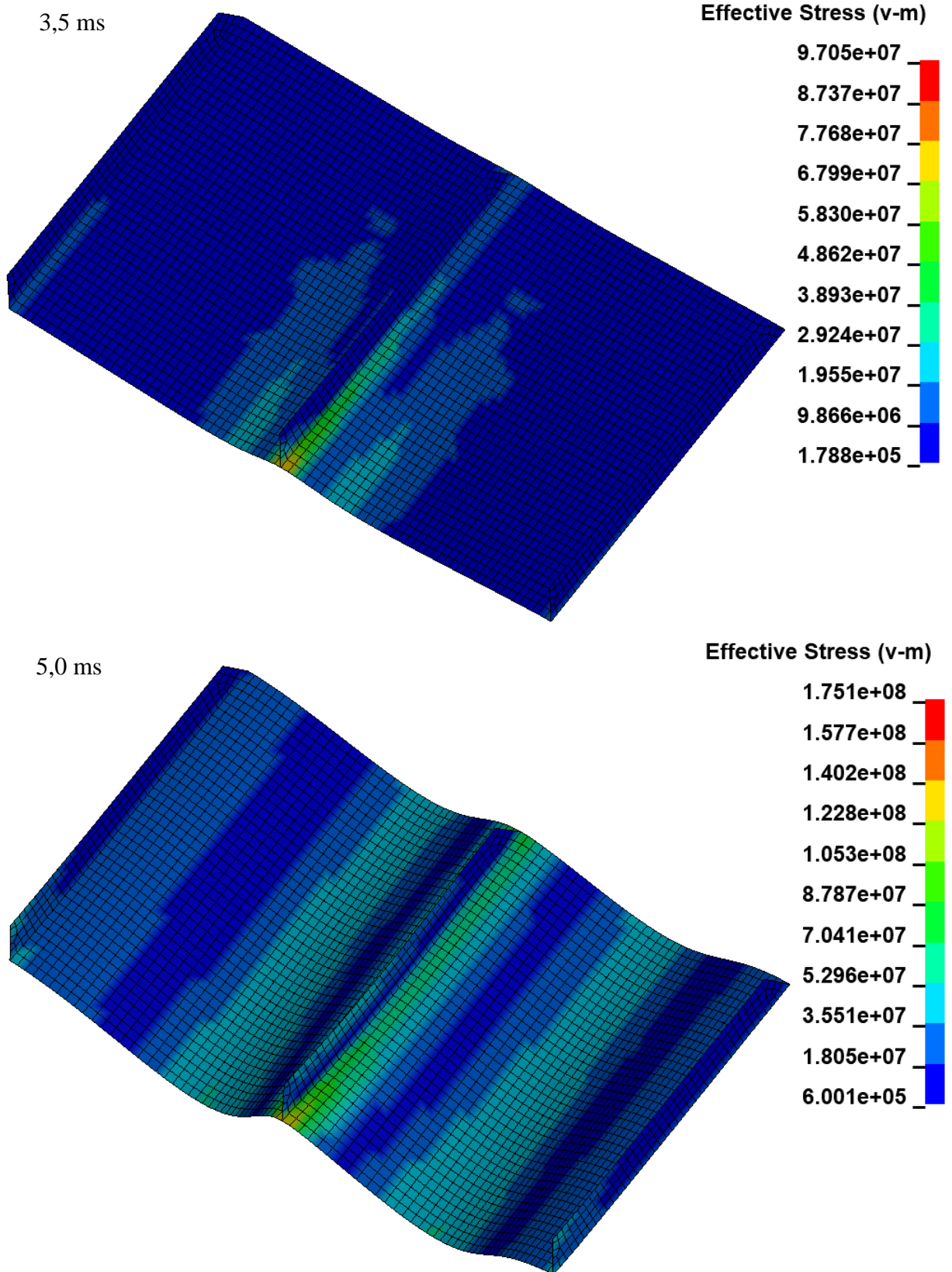
obr. B.6: Tlak v okolí deflektoru [Pa] (náklon 45°, vertikální řez osou deflektoru)



obr. B.7: Napětí von Mises [Pa] v modelu LS-Dyna (náklon 45°)

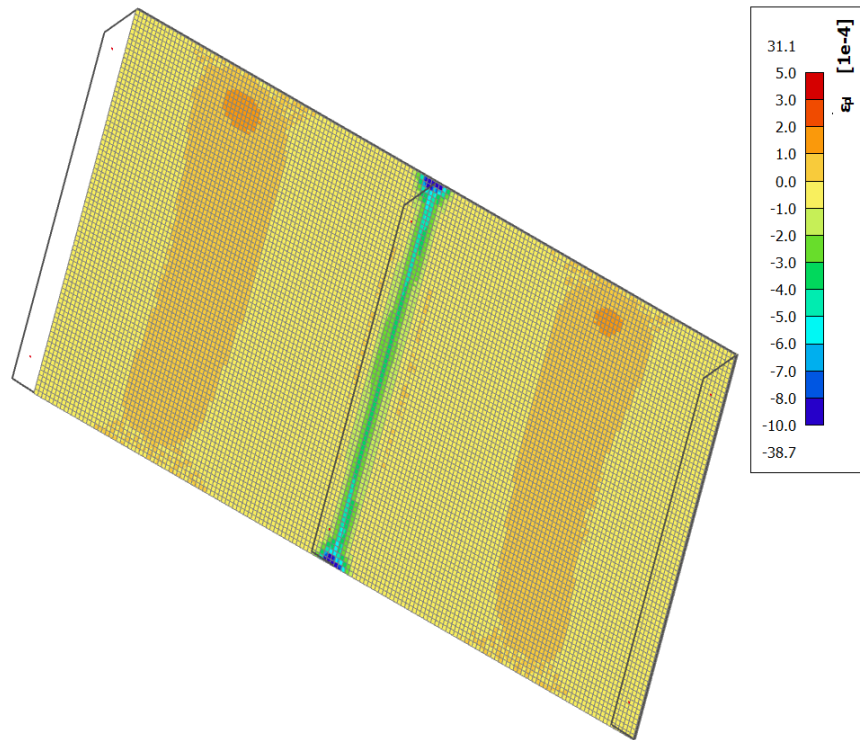


obr. B.8: Tlak v okolí deflektoru [Pa] (náklon 30°, vertikální řez osou deflektoru)

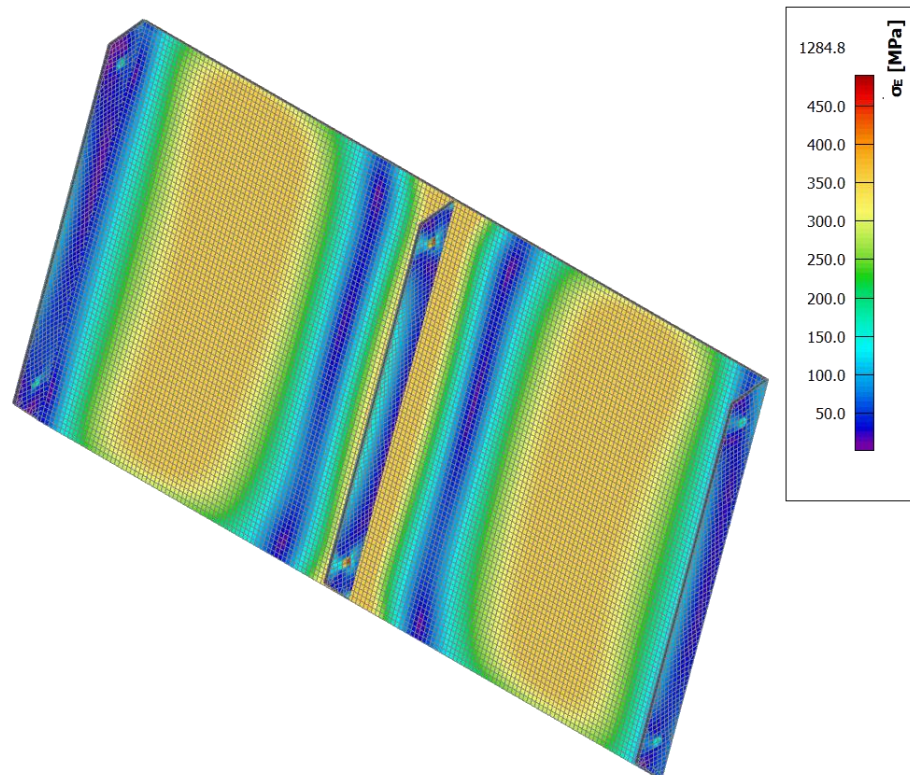


obr. B.9: Napětí von Mises [Pa] v modelu LS-Dyna (náklon 30°)

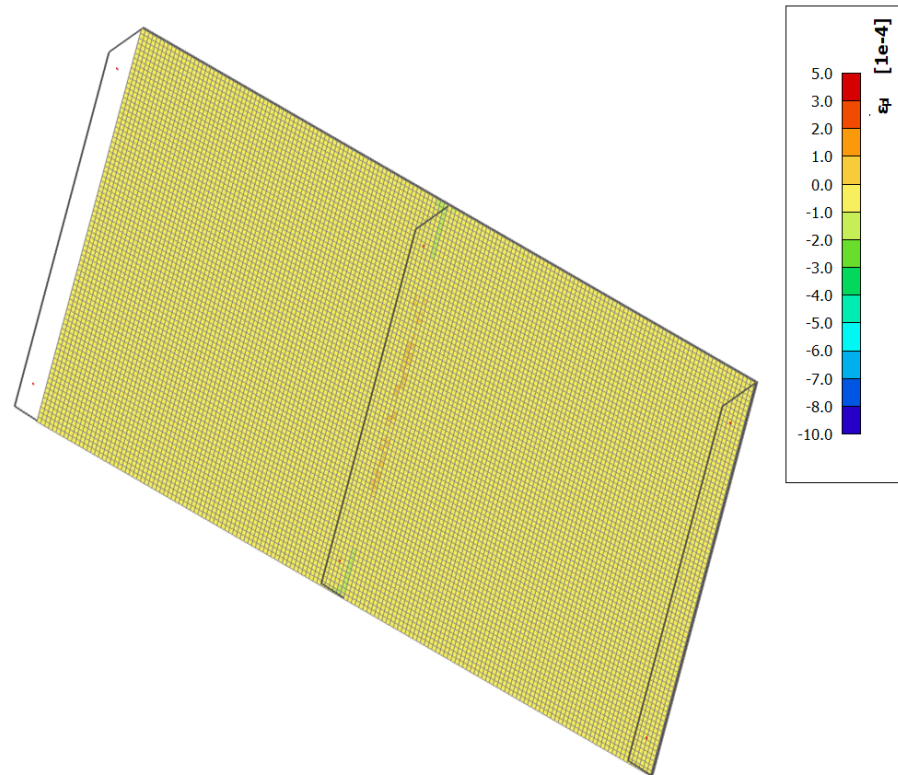
B2 Model SCIA Engineer



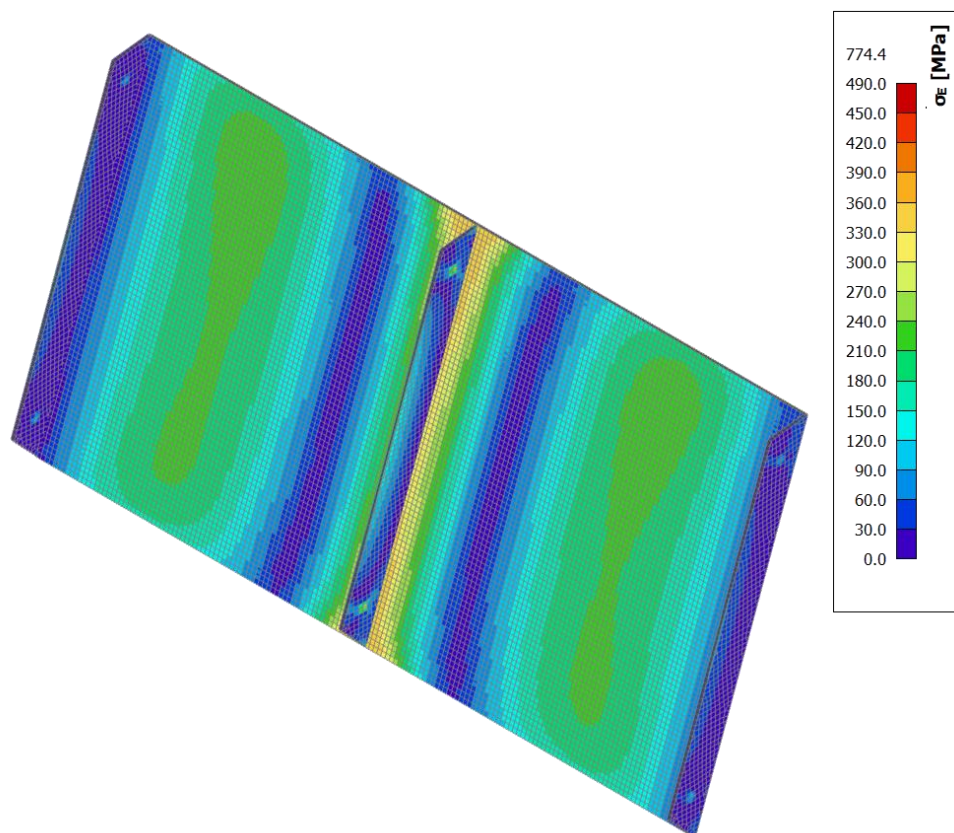
obr. B.10: Plastické deformace na deflektoru v modelu SCIA Engineer (náklon 70°, zatěžovací stav I)



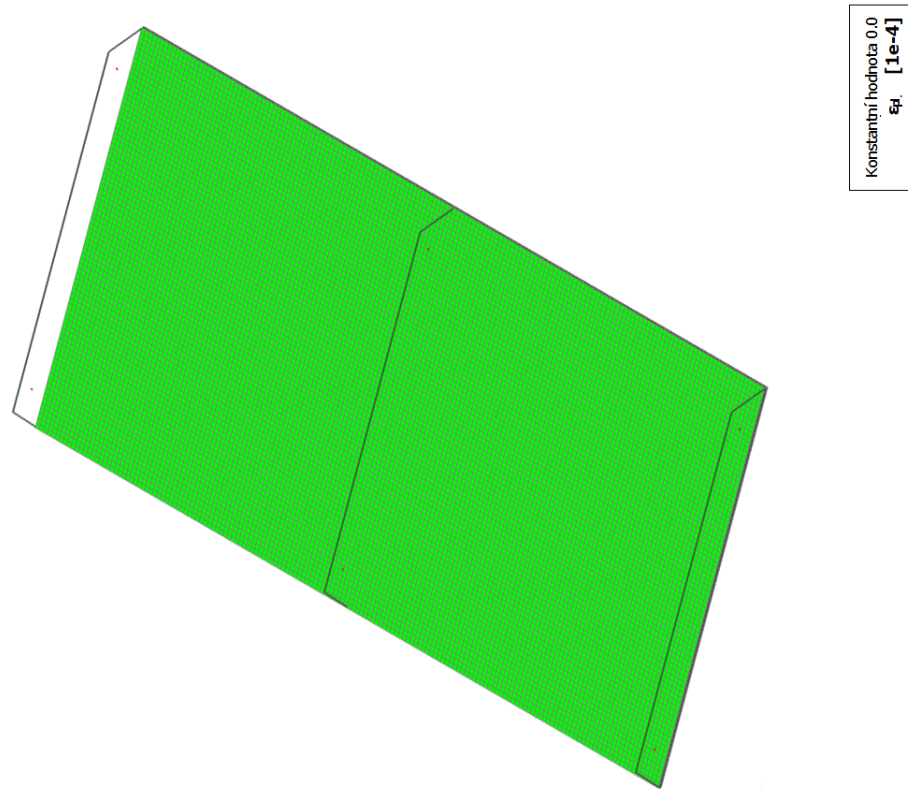
obr. B.11: Napětí na deflektoru v modelu SCIA Engineer (náklon 70°, zatěžovací stav I)



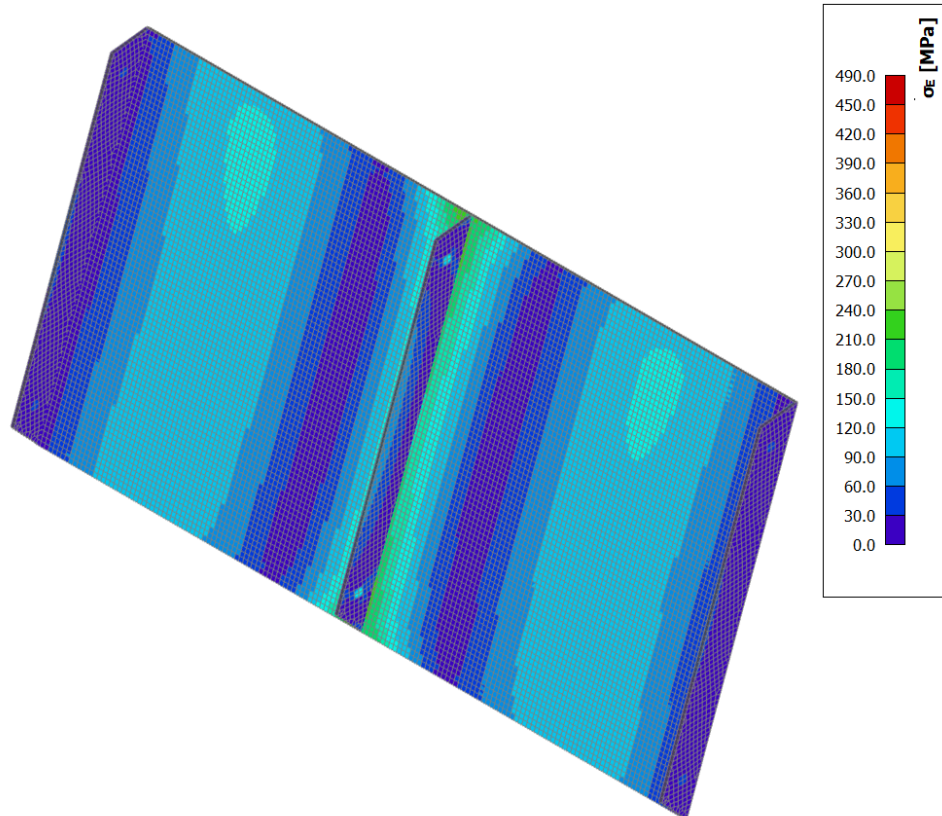
obr. B.12: Plastické deformace na deflektoru v modelu SCIA Engineer (náklon 70°, zatěžovací stav 2)



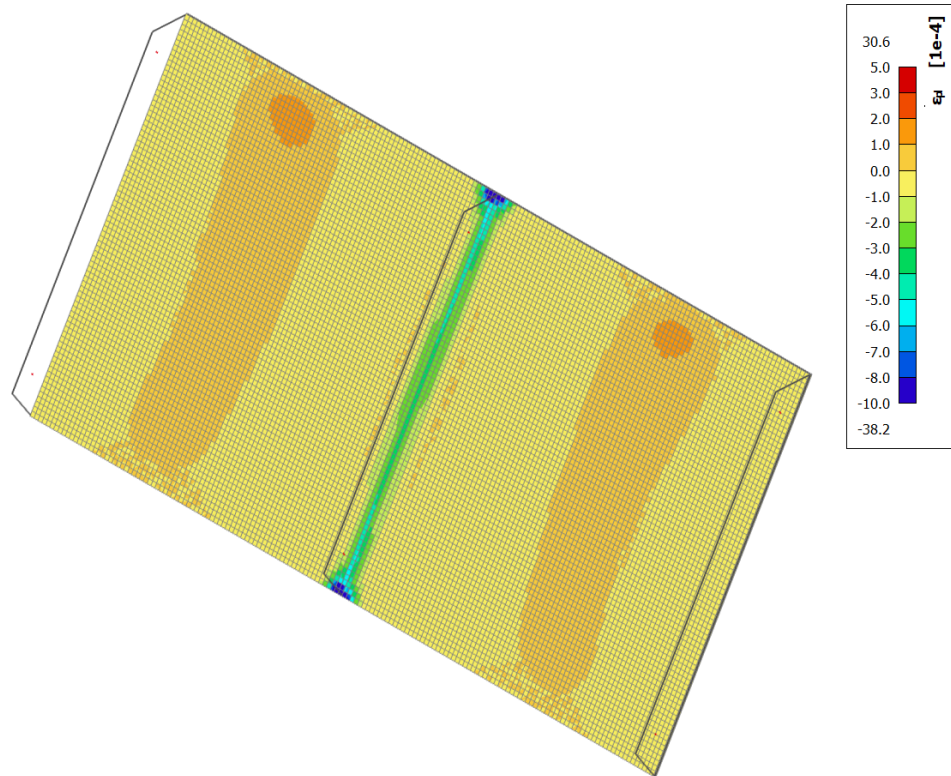
obr. B.13: Napětí na deflektoru v modelu SCIA Engineer (náklon 70°, zatěžovací stav 2)



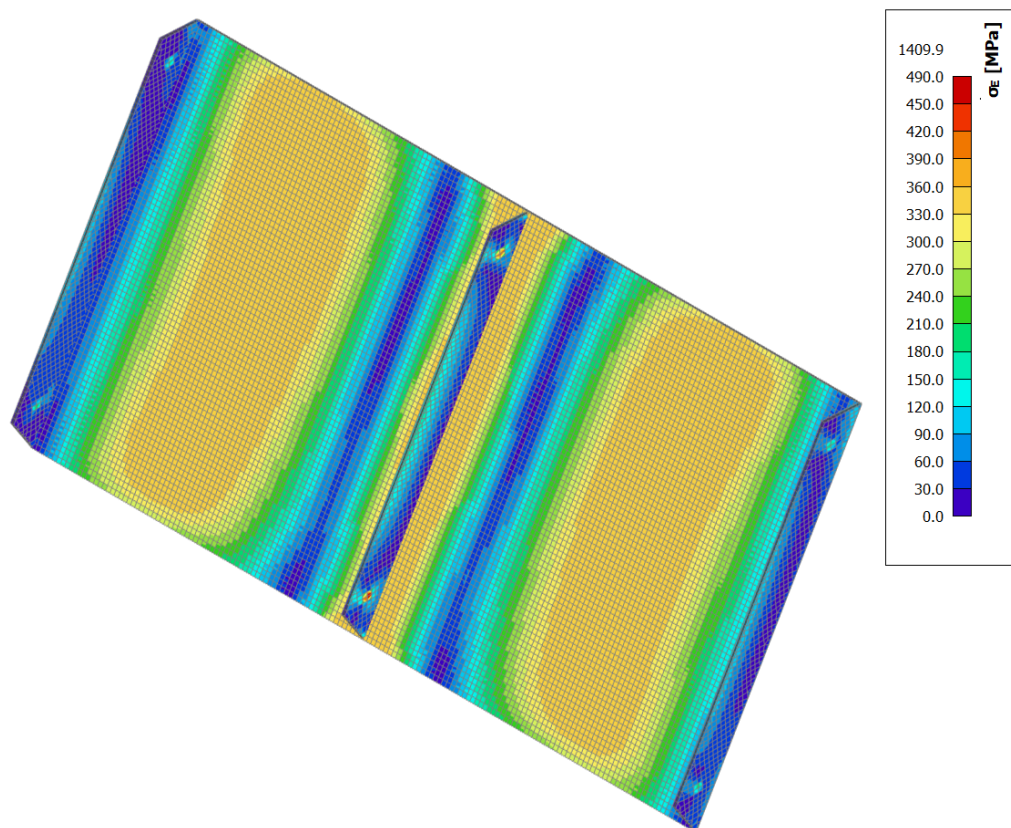
obr. B.14: Plastické deformace na deflektoru v modelu SCIA Engineer (náklon 70°, zatěžovací stav 3)



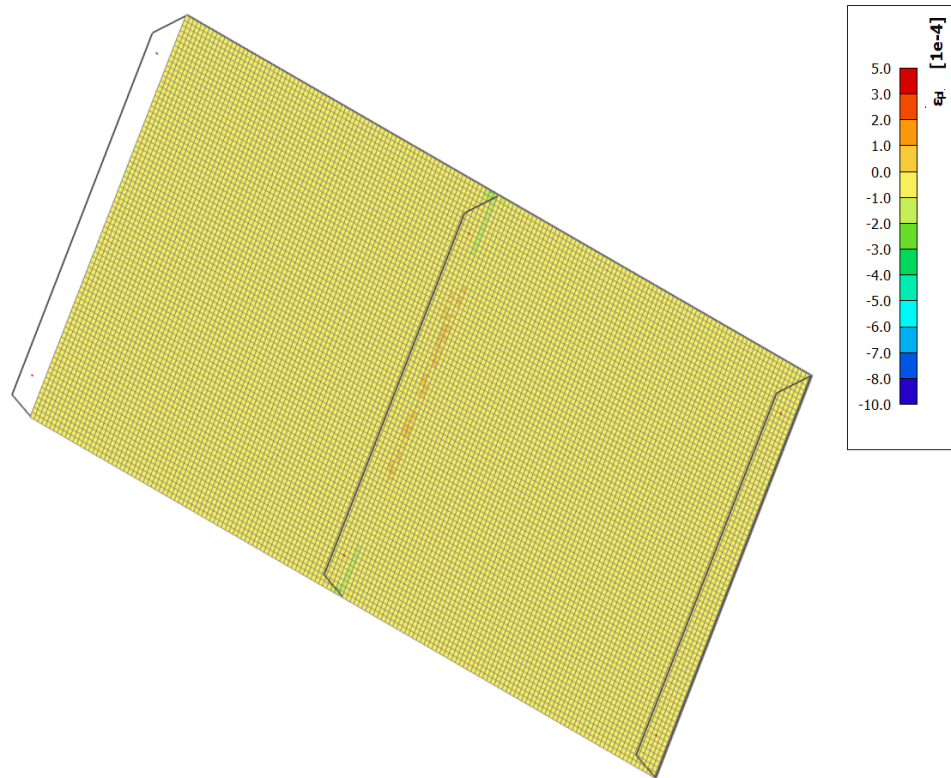
obr. B.15: Napětí na deflektoru v modelu SCIA Engineer (náklon 70°, zatěžovací stav 3)



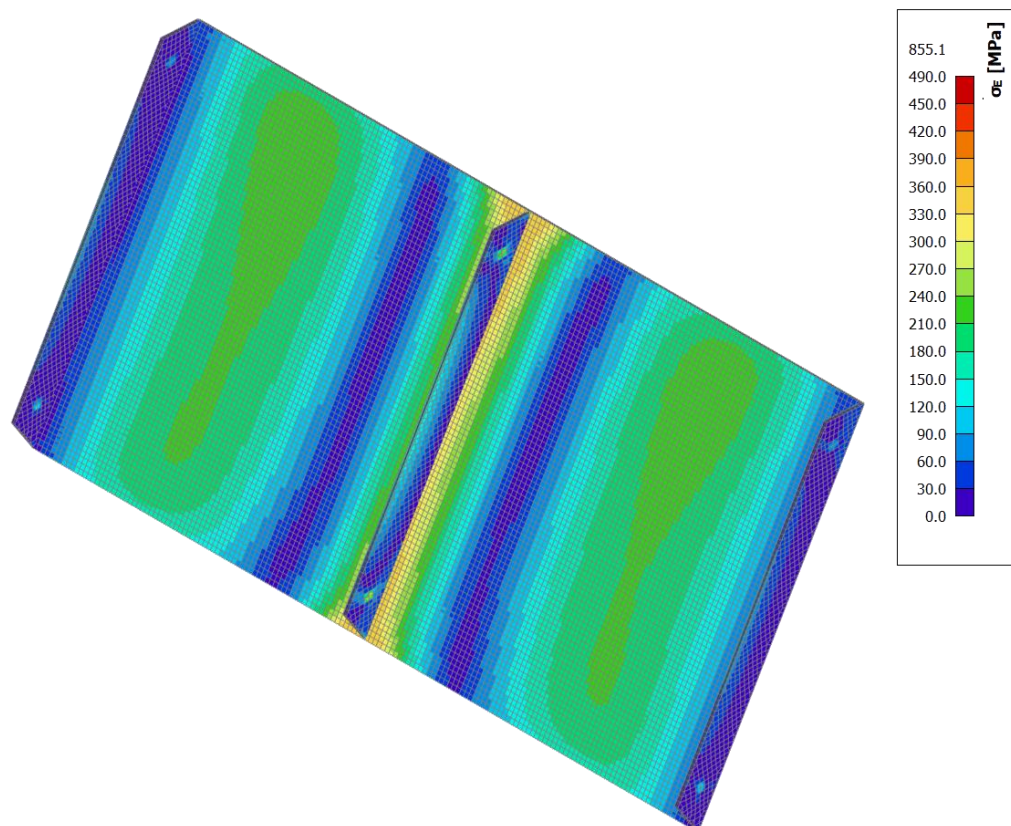
obr. B.16: Plastické deformace na deflektoru v modelu SCIA Engineer (náklon 60°, zatěžovací stav I)



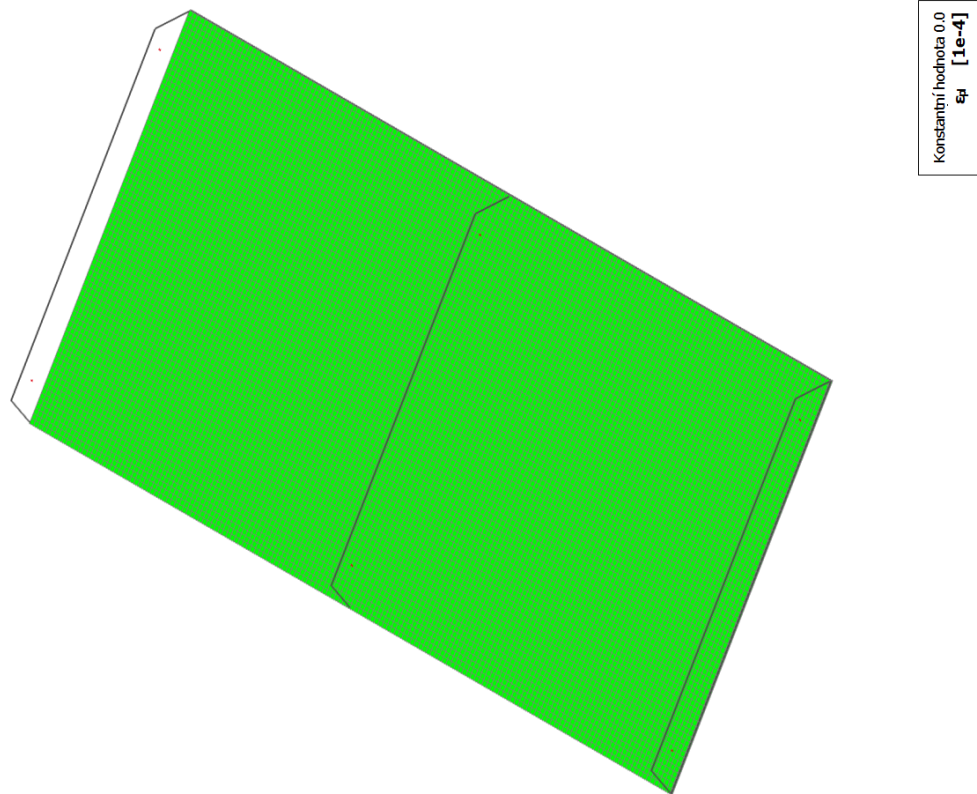
obr. B.17: Napětí na deflektoru v modelu SCIA Engineer (náklon 60°, zatěžovací stav I)



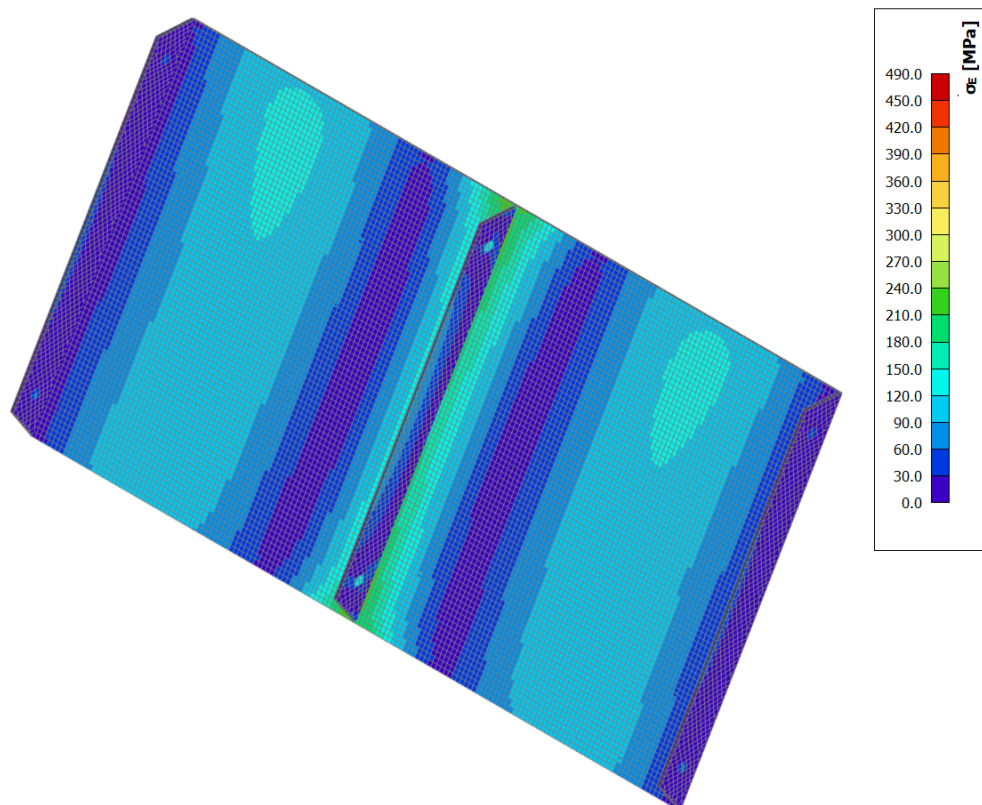
obr. B.18: Plastické deformace na deflektoru v modelu SCIA Engineer (náklon 60°, zatěžovací stav 2)



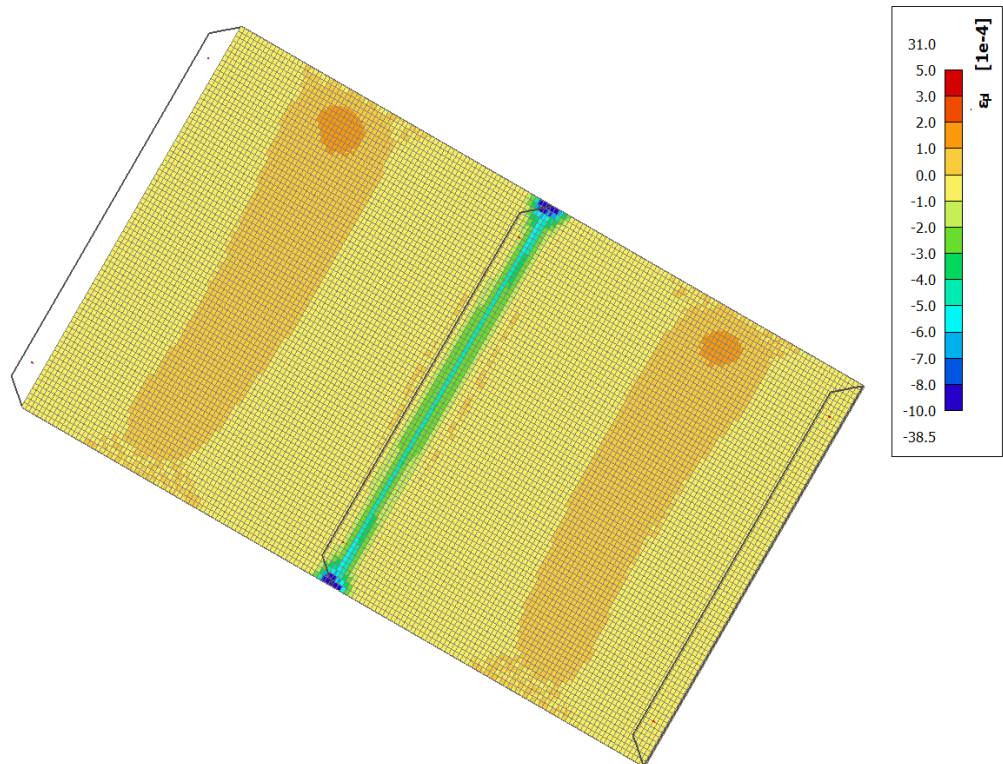
obr. B.19: Napětí na deflektoru v modelu SCIA Engineer (náklon 60°, zatěžovací stav 2)



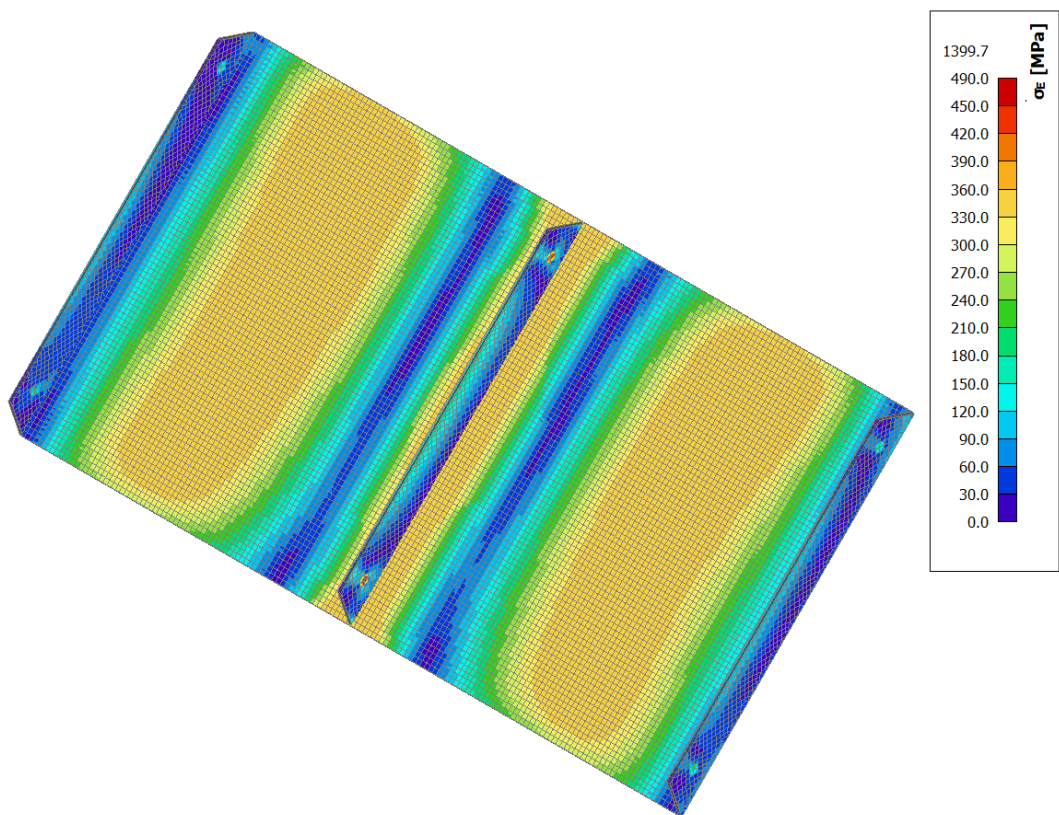
obr. B.20: Plastické deformace na deflektoru v modelu SCIA Engineer (náklon 60°, zatěžovací stav 3)



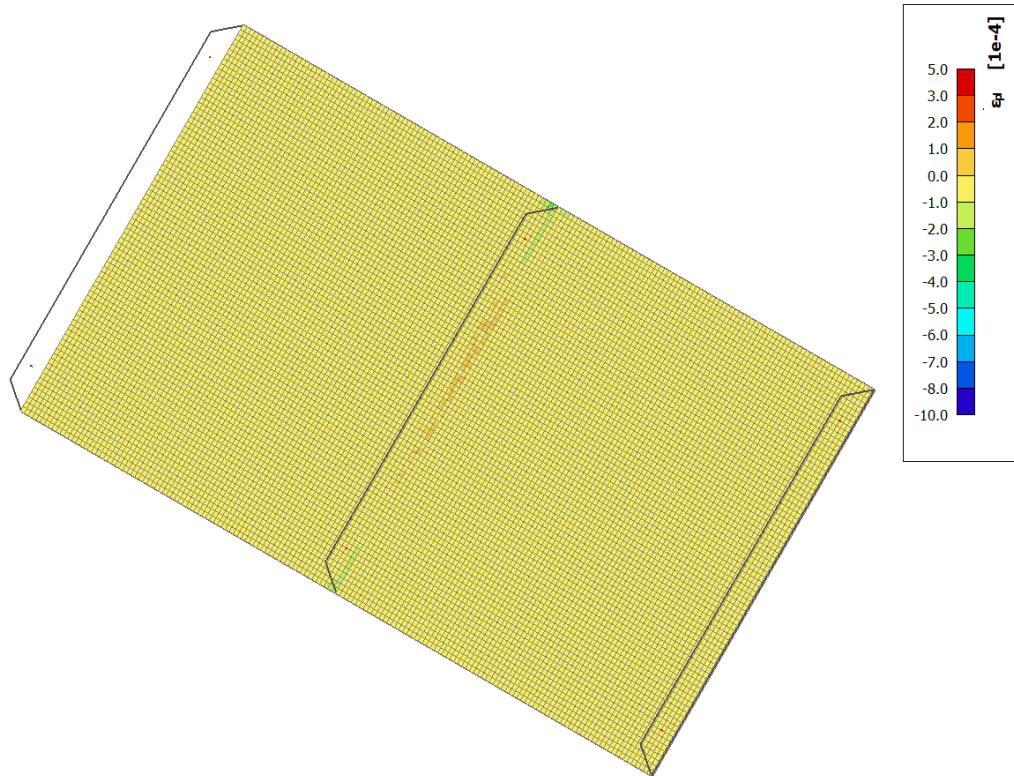
obr. B.21: Napětí na deflektoru v modelu SCIA Engineer (náklon 60°, zatěžovací stav 3)



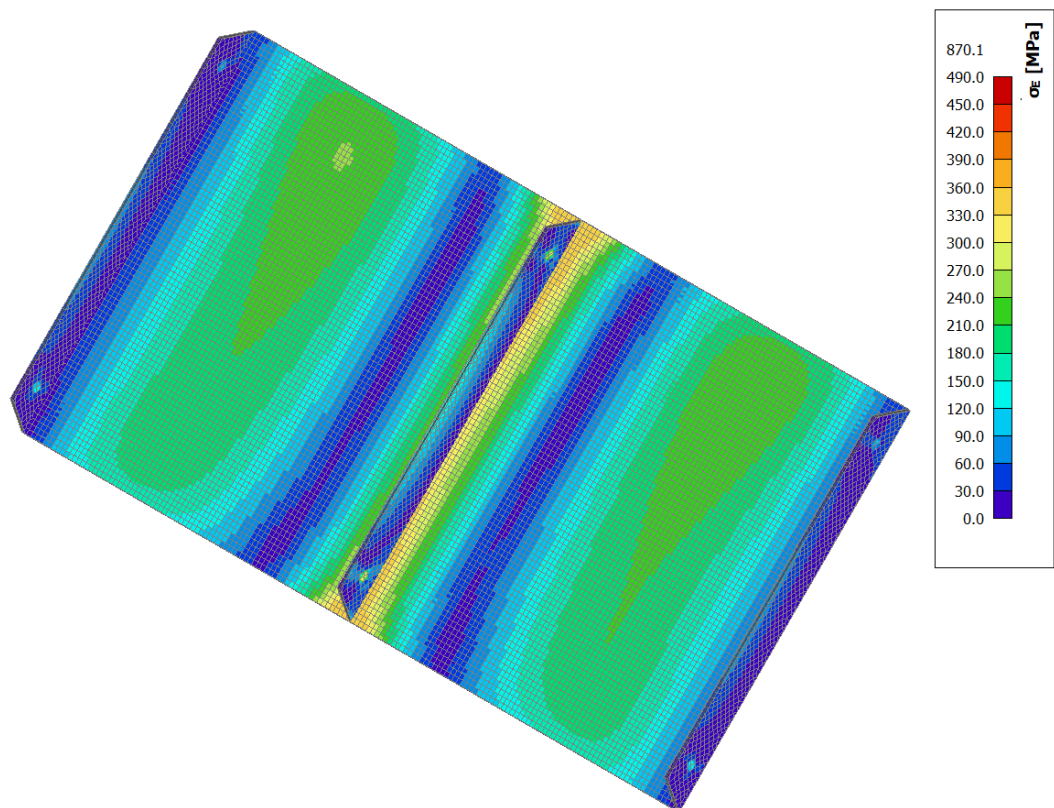
obr. B.22: Plastické deformace na deflektoru v modelu SCIA Engineer (náklon 45°, zatěžovací stav I)



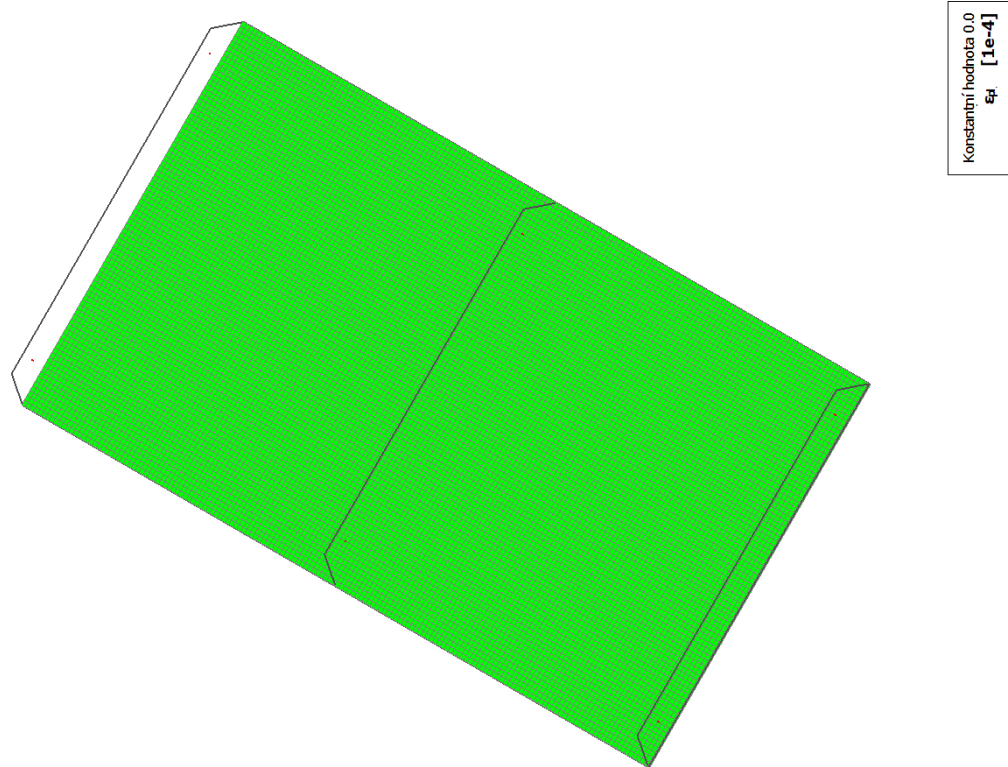
obr. B.23: Napětí na deflektoru v modelu SCIA Engineer (náklon 45°, zatěžovací stav I)



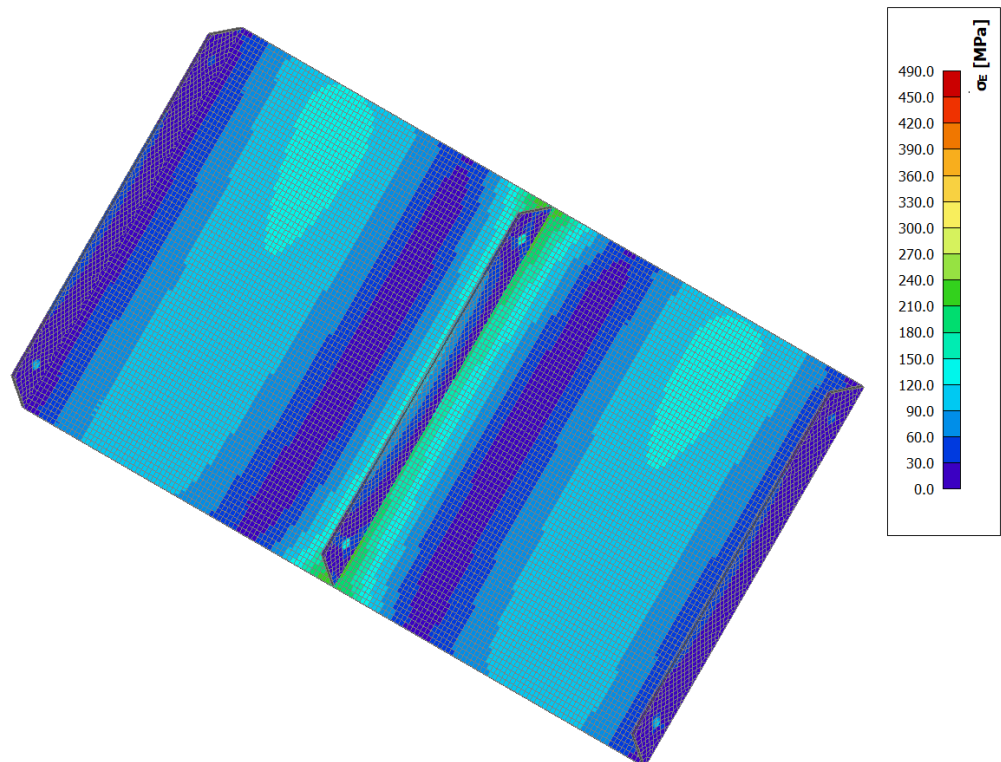
obr. B.24: Plastické deformace na deflektoru v modelu SCIA Engineer (náklon 45°, zatěžovací stav 2)



obr. B.25: Napětí na deflektoru v modelu SCIA Engineer (náklon 45°, zatěžovací stav 2)



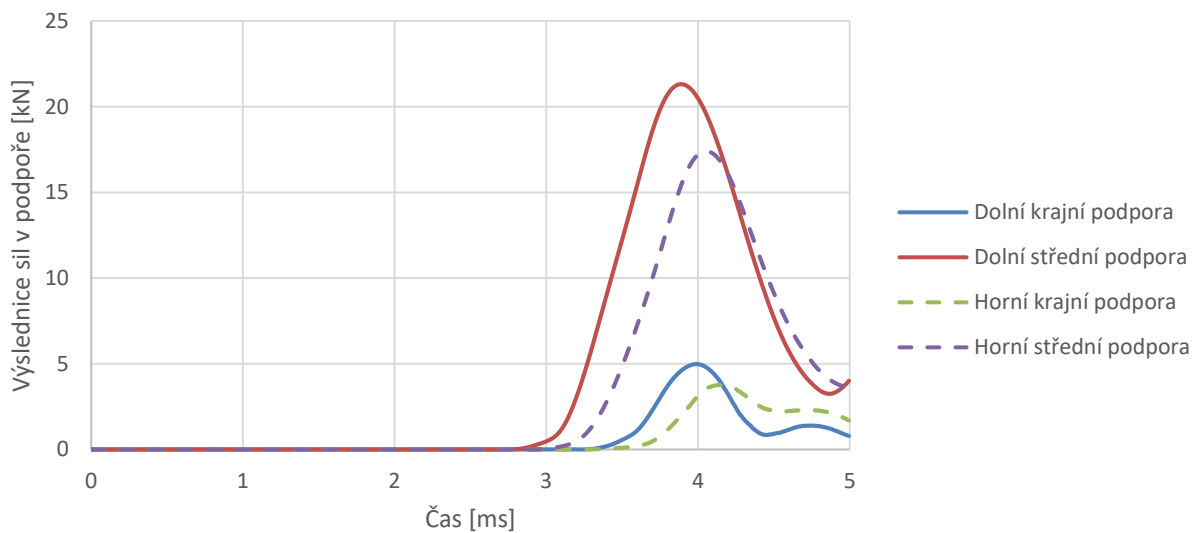
obr. B.26: Plastické deformace na deflektoru v modelu SCIA Engineer (náklon 45°, zatěžovací stav 3)



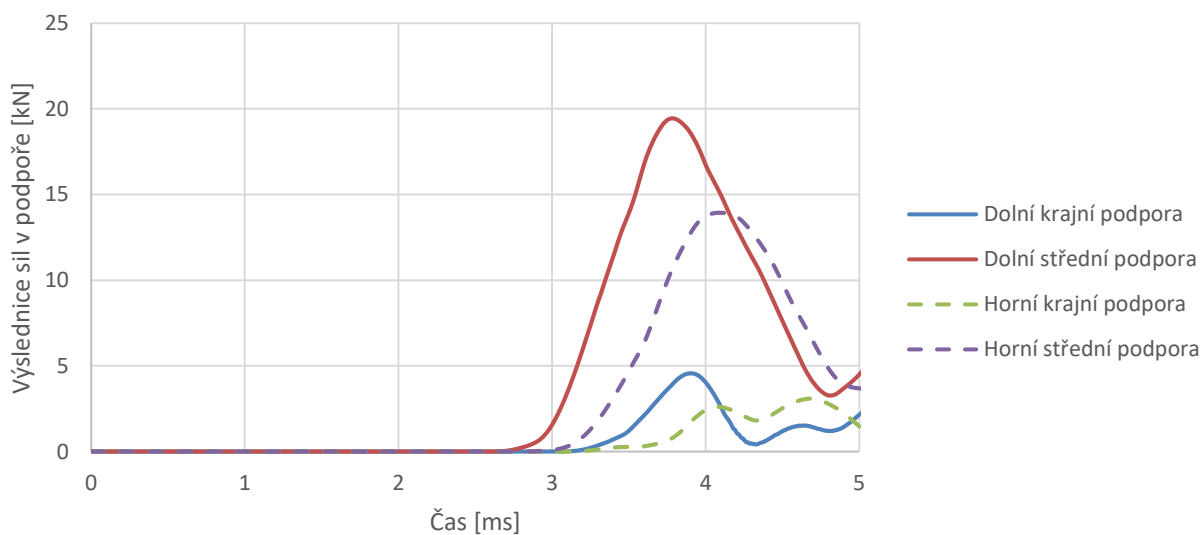
obr. B.27: Napětí na deflektoru v modelu SCIA Engineer (náklon 45°, zatěžovací stav 3)

C Reakce v podporách

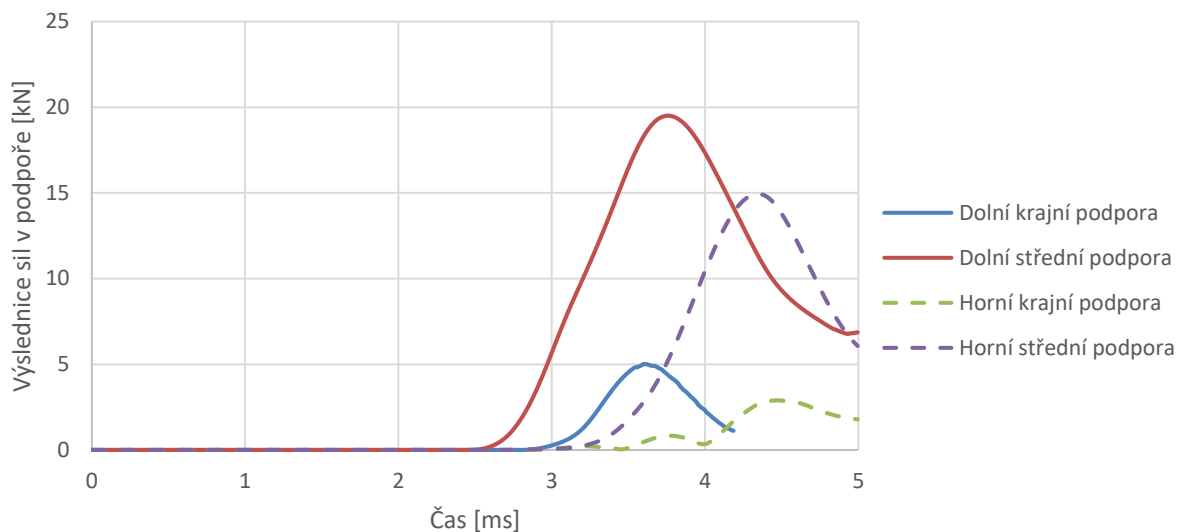
C1 Model LS-Dyna



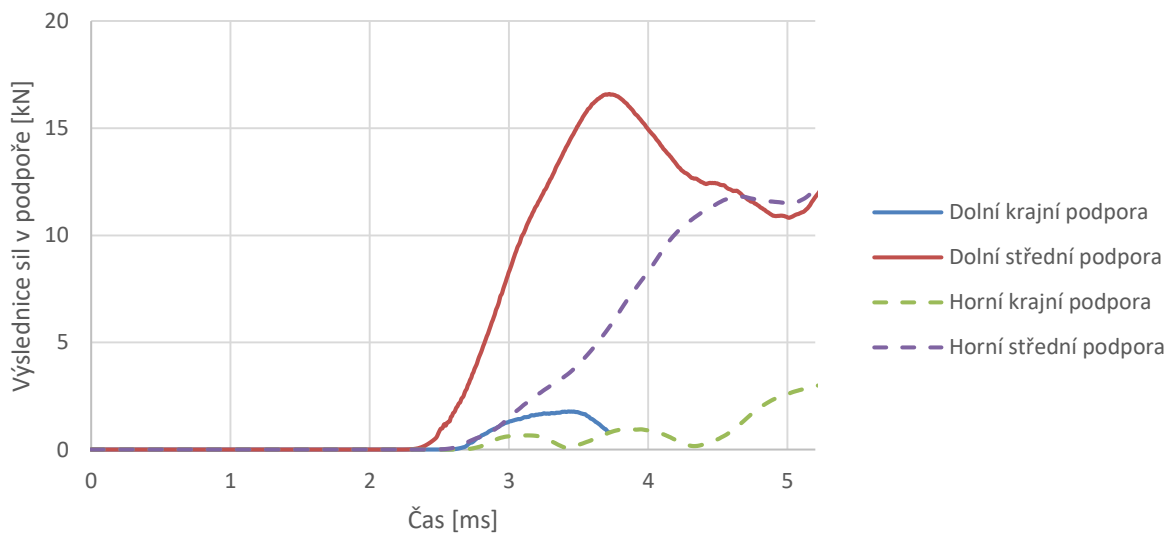
obr. C.28: Síly v podporách v modelu LS-Dyna (náklon 70°)



obr. C.29: Síly v podporách v modelu LS-Dyna (náklon 60°)

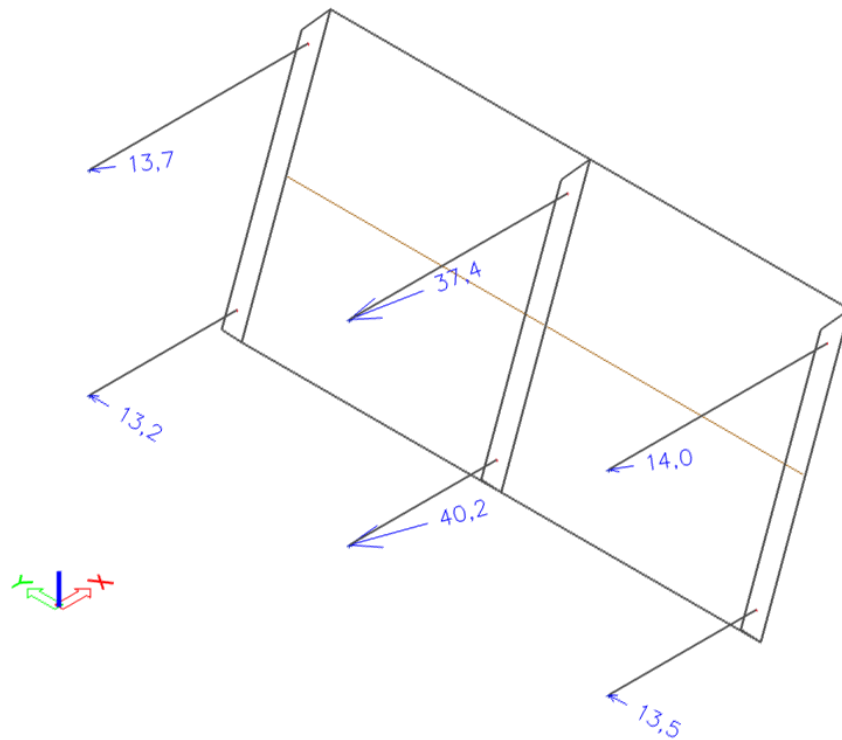


obr. C.30: Síly v podporách v modelu LS-Dyna (náklon 45°)

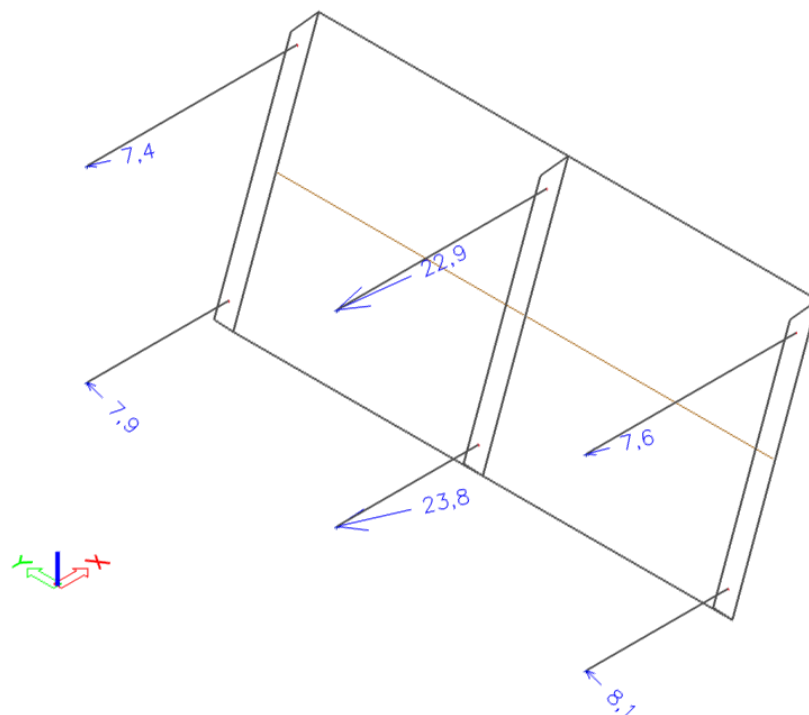


obr. C.31: Síly v podporách v modelu LS-Dyna (náklon 30°)

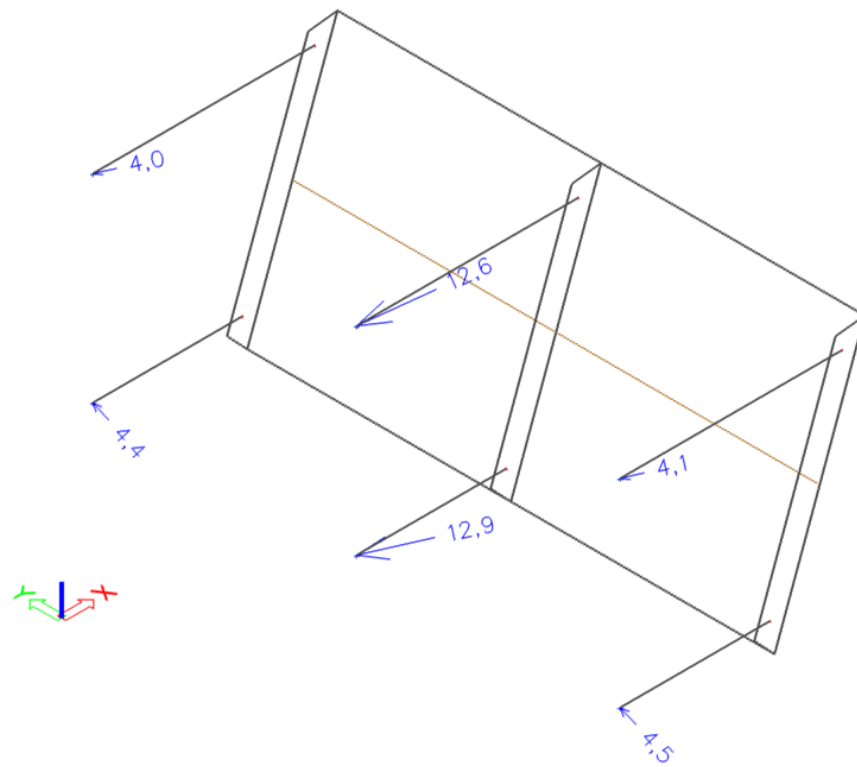
C2 Model SCIA-Engineer



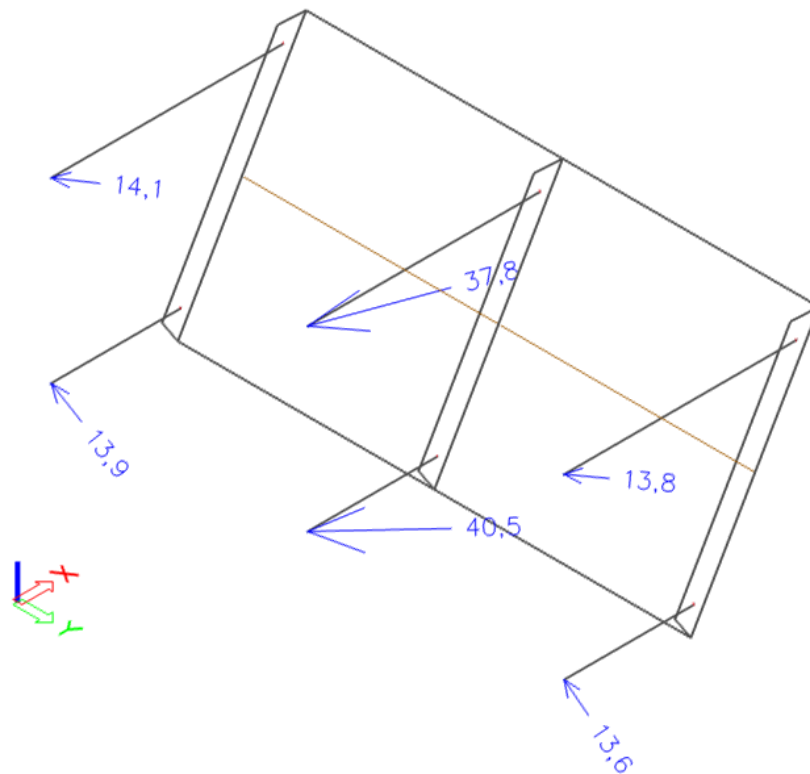
obr. C.32: Výslednice sil [kN] v podporách v modelu SCIA Engineer (náklon 70°, zatěžovací stav 1)



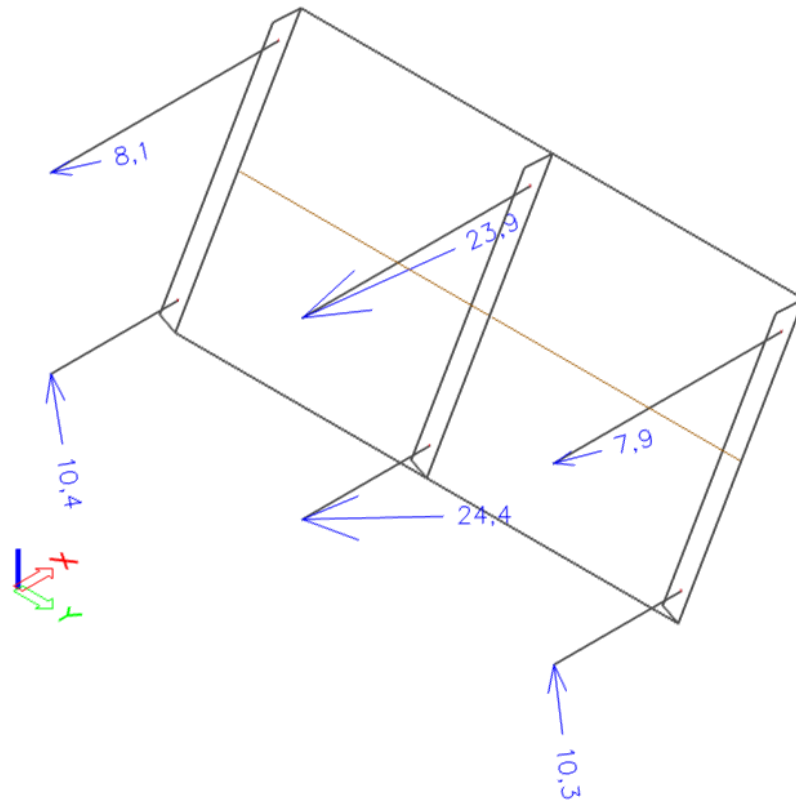
obr. C.33: Výslednice sil [kN] v podporách v modelu SCIA Engineer (náklon 70°, zatěžovací stav 2)



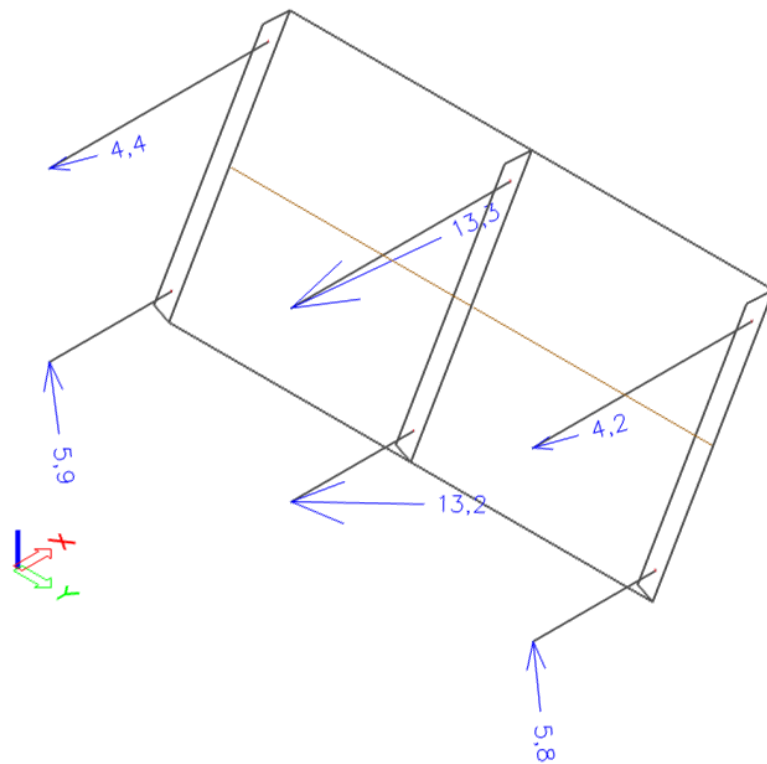
obr. C.34: Výslednice sil [kN]v podporách v modelu SCIA Engineer (náklon 70°, zatěžovací stav 3)



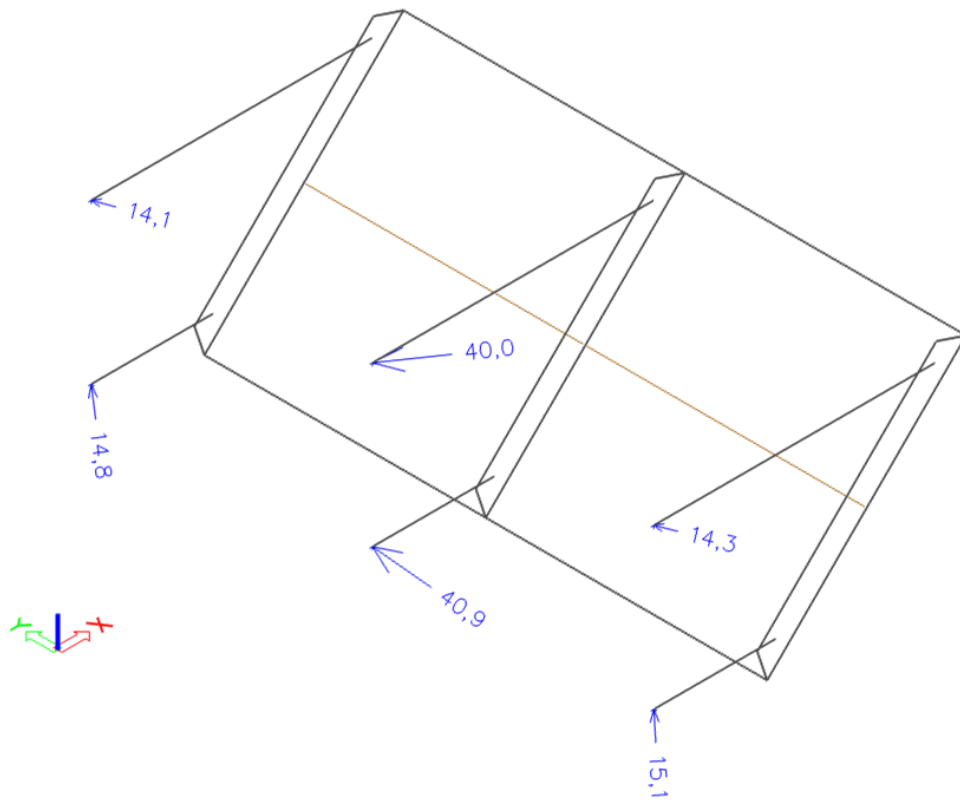
obr. C.35: Výslednice sil [kN]v podporách v modelu SCIA Engineer (náklon 60°, zatěžovací stav 1)



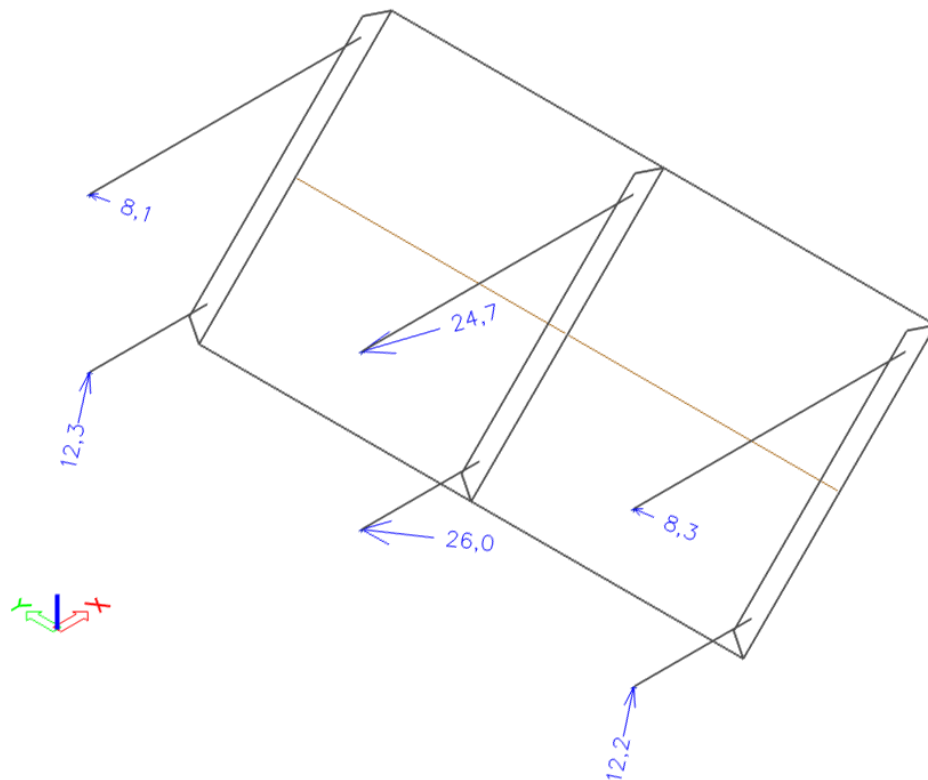
obr. C.36: Výslednice sil [kN]v podporách v modelu SCIA Engineer (náklon 60°, zatěžovací stav 2)



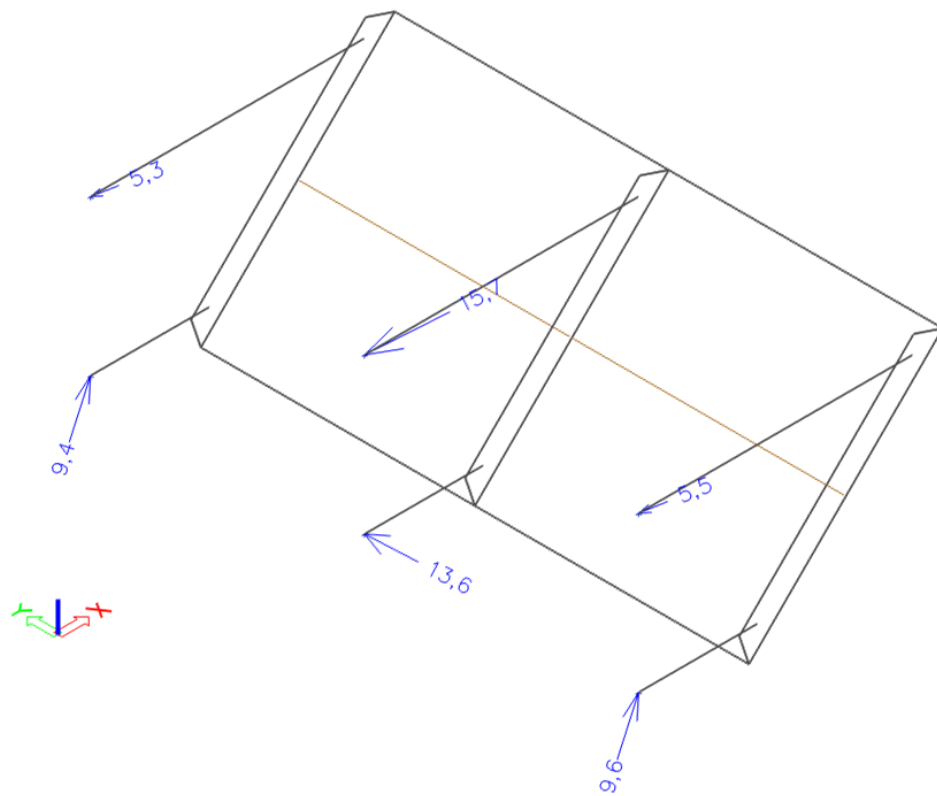
obr. C.37: Výslednice sil [kN]v podporách v modelu SCIA Engineer (náklon 60°, zatěžovací stav 3)



obr. C.38: Výslednice sil [kN]v podporách v modelu SCIA Engineer (náklon 45°, zatěžovací stav 1)



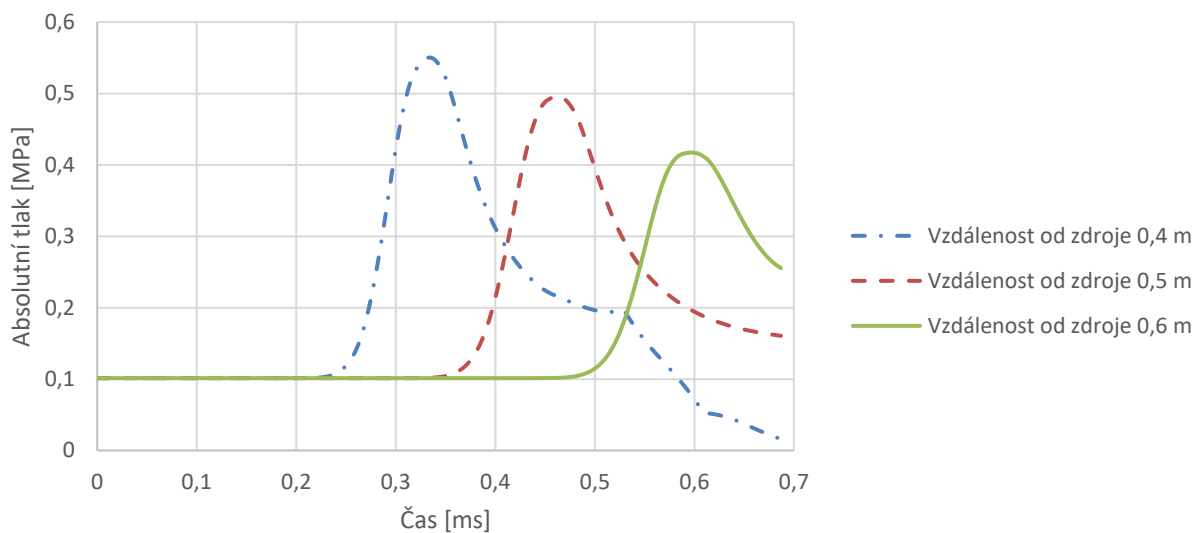
obr. C.39: Výslednice sil [kN]v podporách v modelu SCIA Engineer (náklon 45°, zatěžovací stav 2)



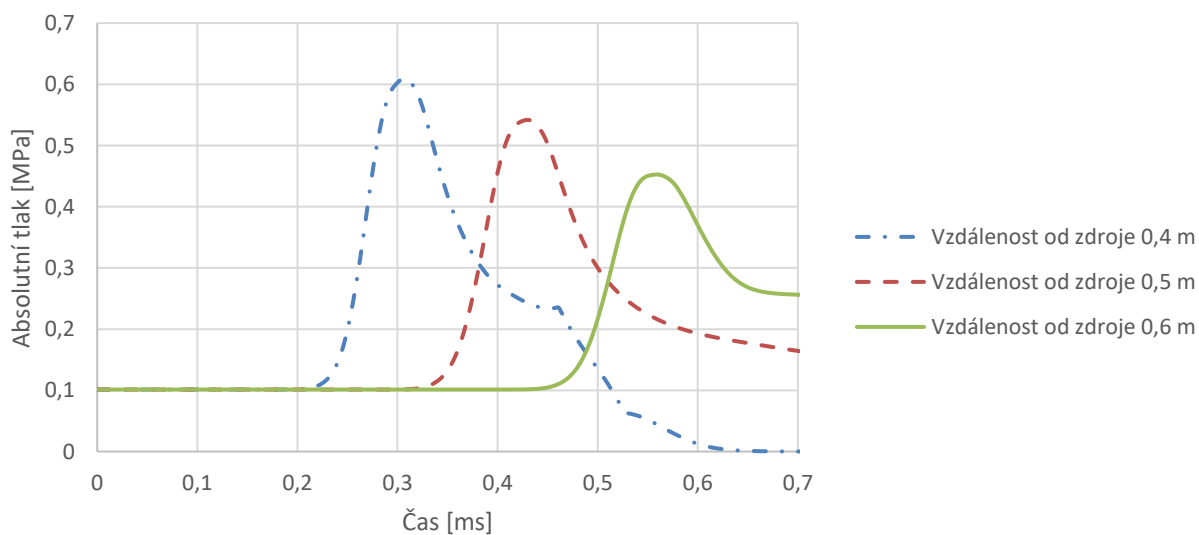
obr. C.40: Výslednice sil [kN] v podporách v modelu SCIA Engineer (náklon 45°, zatěžovací stav 3)

D Validace a verifikace

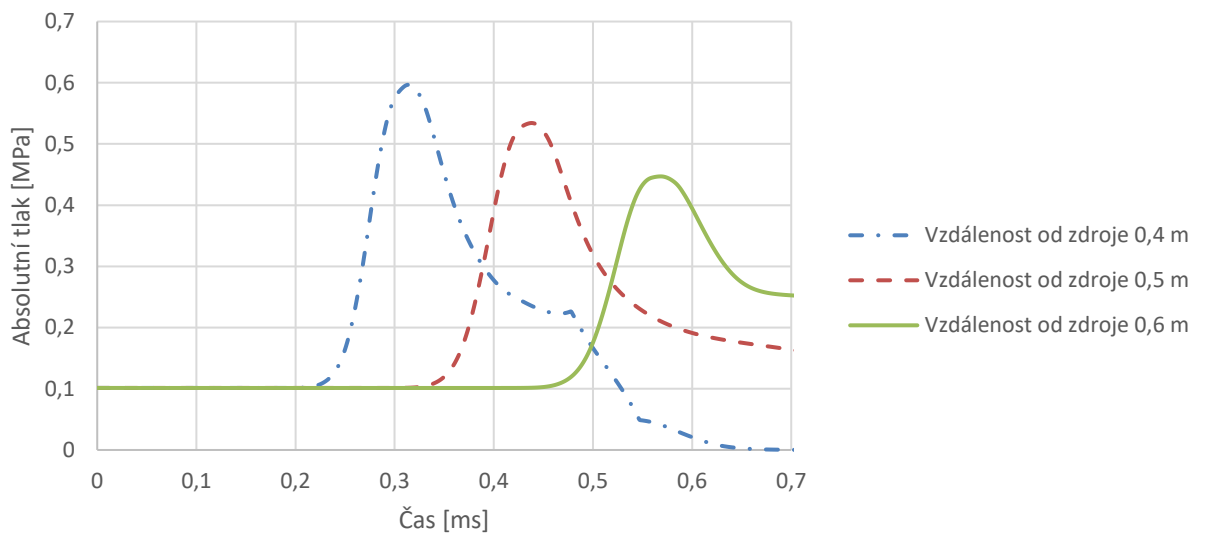
D1 Tlakový profil



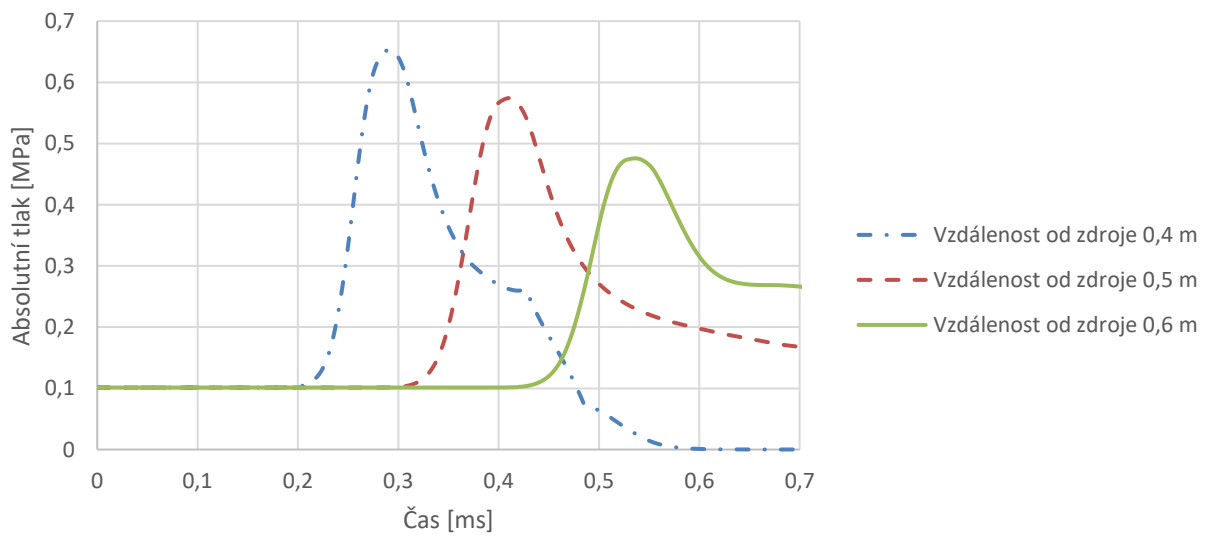
obr. D.41: Tlakový profil v modelu verifikace LS-Dyna při použití TNT 1 dle tab. 12



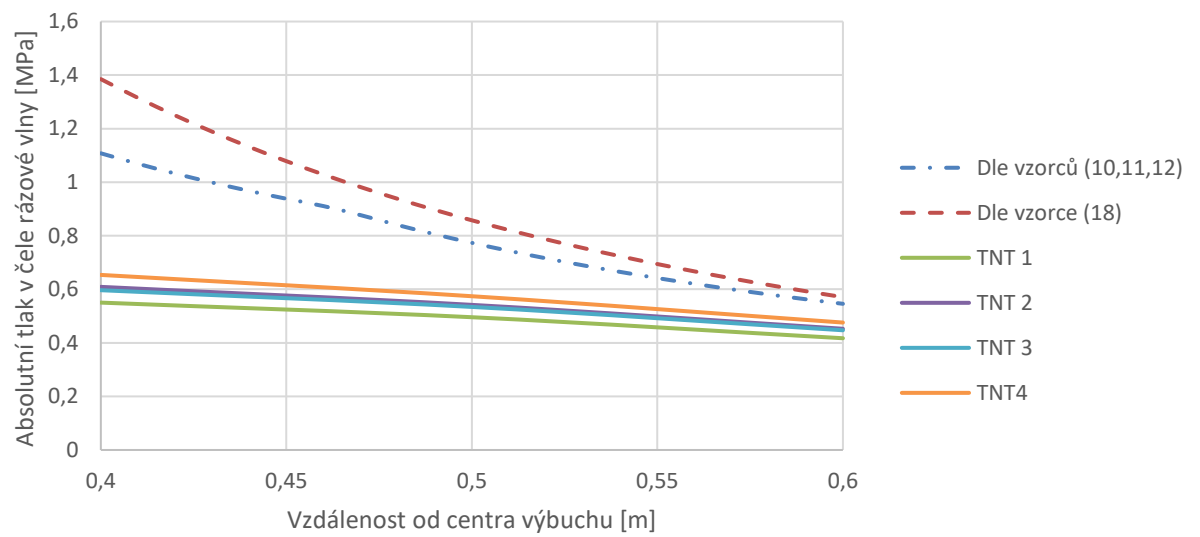
obr. D.42: Tlakový profil v modelu verifikace LS-Dyna při použití TNT 2 dle tab. 12



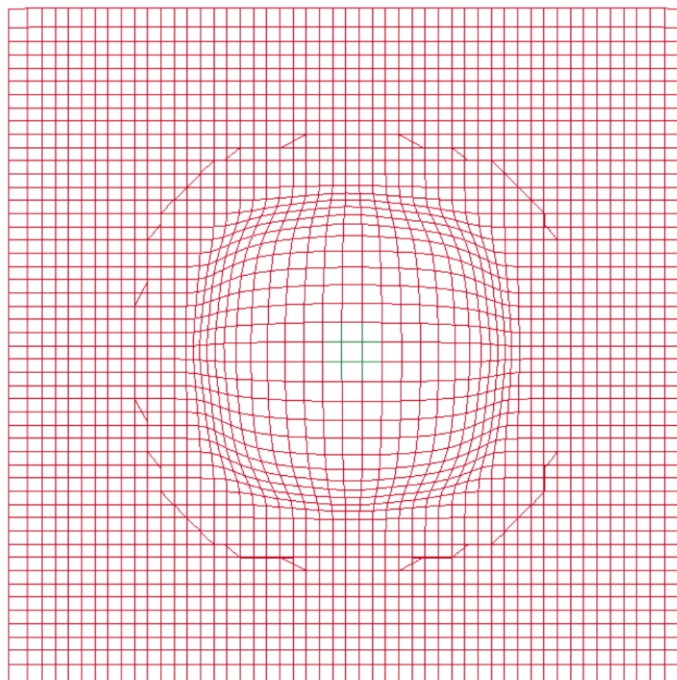
obr. D.43: Tlakový profil v modelu verifikace LS-Dyna při použití TNT 3 dle tab. 12



obr. D.44: Tlakový profil v modelu verifikace LS-Dyna při použití TNT 4 dle tab. 12

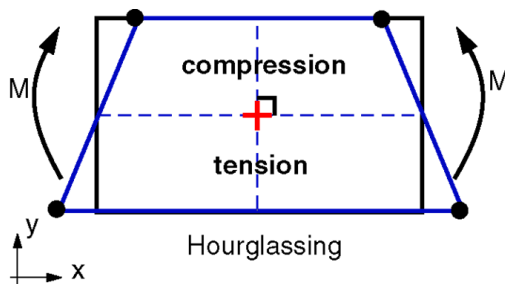


obr. D.45: Tlakové špičky z modelu verifikace LS-Dyna a z analytického výpočtu (TNT dle tab. 12)

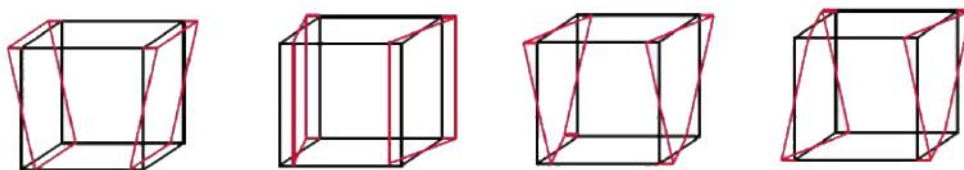


obr. D.46: Deformace sítě na okraji tlakové vlny

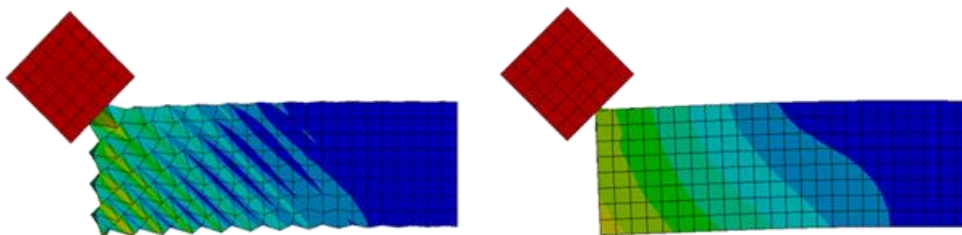
D2 Energie přesýpacích hodin (hourglassing)



obr. D.47: Princip energie přesýpacích hodin [43]



obr. D.48: Módy deformace s nulovou energií [20]



obr. D.49: Síť s výrazným (vlevo) a neznatelným (vpravo) hourglassingem [44]