

Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava

Fakulta bezpečnostního inženýrství

Katedra požární ochrany

**Modelování odezvy vybrané stavební konstrukce na
účinky výbuchu**

Student: Bc. Ondřej Kuchtík

Vedoucí diplomové práce: Ing. Miroslav Mynarz

Studijní obor: Technika požární ochrany a bezpečnosti průmyslu

Termín odevzdání diplomové práce: 15. dubna 2016

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Ondřej Kuchtík**

Studijní program: N3908 Požární ochrana a průmyslová bezpečnost

Studijní obor: 3908T006 Technika požární ochrany a bezpečnosti průmyslu

Téma: **Modelování odezvy vybrané stavební konstrukce na účinky výbuchu**
Modelling the Response of Selected Building Constructions to
Explosion Effects

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Cíl práce:

Analýza odezvy vybrané stavební konstrukce na účinky vnitřního výbuchu prostřednictvím zvoleného programového systému a matematického modelování.

Charakteristika práce:

Diplomová práce se bude zabývat numerickým modelováním chování vybrané stavební konstrukce za výbuchu. Práce se zaměří na strukturální analýzu stavební konstrukce včetně posouzení její odezvy.

Seznam doporučené odborné literatury:

COOPER, P. W.: Explosives Engineering, Wiley-VCH, New York 1997

EN 1991-1-7 - Zatížení konstrukcí - Část 1-7: Obecná zatížení - Mimořádná zatížení, Kloknerův ústav ČVUT, Praha 2007

EN 1998-1 - Navrhování konstrukcí odolných proti zemětřesení - Část 1: Obecná pravidla, seizmická zatížení a pravidla pro pozemní stavby. Český normalizační institut, Praha 2006

DAMEC, J.: Protivýbuchová prevence. Edice SPBI Spektrum č. 8. Ostrava 1999

HENRYCH, J.: Dynamika výbuchu a její užití. Academia, Praha, 1973

MAKOVIČKA, D., JANOVSÝ, B.: Příručka protivýbuchové ochrany staveb, ČVUT, Praha 2008

KOLÁŘ V., NĚMEC I., KÁNICKÝ V.: FEM principy a praxe metody konečných prvků, Computer press, 1997

ANSYS - Manuals & Tutorials

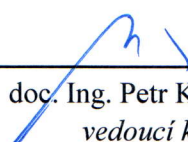
Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Miroslav Mynarz**

Datum zadání: 13.06.2014

Datum odevzdání: 15.04.2016




doc. Ing. Petr Kučera, Ph.D.
vedoucí katedry


prof. Ing. Pavel Poledňák, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení

„Místopřísežně prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci vypracoval samostatně.“

V Ostravě dne 15. 4. 2016

Kuchtík Ondřej

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- jsem byl/a seznámen/a s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. O právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů;
- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách),
ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava (dále jen VŠB – TUO), dostupná
k prezenčnímu nahlédnutí;
- beru na vědomí, že VŠB – TUO má právo nevydělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít v souladu s § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má právo VŠB – TUO na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem VŠB – TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB – TUO
na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové práce využito softwaru poskytnutého VŠB – TUO nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Jméno, příjmení

Ondřej, Kuchtík

Adresa

Nový Malín 595, 78803 Nový Malín

Dne: 15. 4. 2016

Podpis:.....

1) zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevydělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

2) zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacího zařízení (školní dílo).

3) zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat panu Ing. Miroslavu Mynarzi za zodpovědné vedení diplomové práce. Dále bych rád poděkoval panu kpt. Ing. Zdeňku Šlachtovi z HZS za poskytnuté informace o výbuchu řešeného rodinného domu. Největší poděkování patří mé rodině za trpělivost a podporu nejen při psaní diplomové práce, ale během celého studia.

Anotace

KUCHTÍK, Ondřej. *Modelování odezvy vybrané stavební konstrukce na účinky výbuchu*. Ostrava, 2016. 47 s. Diplomová práce. VŠB - TU Ostrava.

Diplomová práce se zabývá numerickým modelováním vybrané stavební konstrukce při účincích výbuchu. V úvodní části práce je obecně popsán princip výbuchu a dále je rozebrán reálný výbuch plynu v rodinném domě. V praktické části je vypočteno výbuchové zatížení a modul pružnosti zděné stěny podle platných požadavků českých technických norem. Dále je vytvořen model řešeného rodinného domu v programovém systému ANSYS. Numerický model je zatížen vypočteným výbuchovým zatížením a je sledována jeho strukturální odezva. V práci je rovněž analyzována odezva stavební konstrukce při statickém zatížení na vybraném prvku konstrukce.

Klíčová slova: mimořádné zatížení, model konstrukce, odezva stavební konstrukce, výbuch plynu

Summary

KUCHTÍK, Ondřej. *Modeling the Response of Selected Building Constructions to Explosion Effects*. Ostrava, 2016. 47 p. Diploma thesis. VŠB - TU Ostrava.

The diploma thesis deals with numerical modelling of a selected building construction affected by explosion. The introductory part generally describes the principle of explosion. Further, it analyses a real gas explosion in a family house. The explosive load and modulus of elasticity of masonry walls are calculated in the practical part. These values are calculated according to the applicable requirements of Czech technical standards. A model of the family house mentioned above is created in the ANSYS program. The numerical model is loaded with the calculated explosion load and is monitored for structural response. The thesis also analyses the response of structures under the static load on a selected design element.

Key words: accidental actions, construction model, response of building construction, gas explosion

Obsah

1	Úvod.....	1
2	Rešerše	2
3	Úvod do problematiky	4
3.1	Základní principy vzniku výbuchu.....	4
3.1.1	Používané termíny a jejich definice	4
3.1.2	Výbuch.....	5
3.1.3	Typické následky při úniku plynu.....	6
3.1.4	Výbuch plynu.....	6
3.1.5	Odlehčený výbuch plynu	8
3.1.6	Meze výbušnosti plynů	9
3.1.7	Iniciační zdroje.....	9
3.2	Statistiky výbuchů v ČR.....	10
3.3	Významné výbuchy plynu v minulosti.....	11
3.3.1	Výbuch propanu v Indianapolis, USA, 1963	11
3.3.2	Výbuch plynu, hl. město Praha, ČR, 2013.....	11
4	Výbuch v rodinném domě.....	12
4.1	Popis objektu	12
4.2	Popis mimořádné události	13
4.3	Doba pro vytvoření výbušné koncentrace	14
5	Účinky výbuchu na stavby	15
5.1	Chování stavební konstrukce při výbuchu	15
5.2	Porušení zděných stěn při výbuchu	16
5.3	Poškození objektů přetlakem p_+ ve vzdušné rázové vlně od účinků výbuchu... ..	17
6	Zatížení konstrukcí.....	18
6.1	Zatížení konstrukce vnitřním výbuchem.....	18
6.1.1	Ekvivalentní statický tlak podle ČSN EN 1991-1-7	19

6.2	Statické namáhání stavebních konstrukcí.....	19
6.3	Dynamické namáhání stavebních konstrukcí.....	20
6.3.1	Dynamický součinitel	21
7	Program ANSYS.....	22
7.1	Modelování metodou konečných prvků.....	22
7.2	Postup zadávání do programu	22
8	Vstupní hodnoty pro numerickou analýzu.....	24
8.1	Půdorys objektu.....	24
8.2	Materiálové vlastnosti zdiva.....	24
8.2.1	Výpočet modulu pružnosti zdiva dle ČSN EN 1996-1-1+A1	24
8.2.2	Výpočet modulu pružnosti zdiva dle ČSN 73 1101.....	25
8.2.3	Výsledný modul pružnosti	25
8.3	Výpočet ekvivalentního statického tlaku	26
8.4	Zjednodušený výpočet vnitřních sil a napětí v obvodové stěně.....	26
9	Modelování v programu ANSYS.....	29
9.1	Postup zadávání.....	29
9.2	Model rodinného domu	30
9.2.1	Okrajové podmínky	30
9.2.2	Modální analýza.....	30
9.2.3	Výpočet dynamického součinitele	31
9.2.4	Výpočet ekvivalentního statického tlaku	31
9.2.5	Výpočet mezního průhybu konstrukcí	32
9.2.6	Výsledné deformace konstrukce stanovené numerickou analýzou.....	33
9.2.7	Zhodnocení výsledků	34
9.3	Model rodinného domu bez stropní konstrukce.....	35
9.3.1	Okrajové podmínky modelu.....	35
9.3.2	Modální analýza modelu bez stropní konstrukce.....	35

9.3.3	Výpočet dynamického součinitele	36
9.3.4	Výpočet ekvivalentního statického tlaku	36
9.3.5	Výpočet mezního průhybu konstrukcí	37
9.3.6	Výsledné deformace konstrukce stanovené numerickou analýzou.....	37
9.3.7	Zhodnocení výsledků modelu bez stropní konstrukce.....	38
10	Ověření deformací zděné stěny.....	40
10.1	Model zděné stěny	40
10.2	Interpretace výsledků.....	41
11	Závěr	42
	Literatura.....	43
	Seznamy.....	46
	Seznam obrázků	46
	Seznam tabulek	47
	Seznam příloh.....	47

Seznam použitých zkratk

ANSYS	Analysis Systems
ČSN	Česká technická norma
FEM	Finite Element Method
HZS ČR	Hasičský záchranný sbor České republiky
MKP	Metoda konečných prvků
RD	Rodinný dům
NP	Nadzemní podlaží
ŽB	Železobeton

1 Úvod

Výbuchy plynů jsou v dnešní době rizikem, které si většina neodborné veřejnosti neuvědomuje. V téměř každé domácnosti totiž dochází pravidelně k manipulaci s plynovými spotřebiči, při níž hrozí vznik výbušné atmosféry. Také v průmyslových provozech se často pracuje s hořlavými plyny, které mohou být potenciálním rizikem výbuchu. Na základě uvedených důvodů je nutno tento nebezpečný jev dále odborně zkoumat.

Při výbuchu plynu dochází k vytvoření tlakové vlny, která způsobuje deformace stavební konstrukce a může mít destruktivní účinky na majetek i životy osob. Při projektování normou vyjmenovaných pozemních staveb (průmyslových staveb, administrativních budov, nemocnic, obchodních center, atd.) je dle platných norem nutné zhodnotit odezvu stavební konstrukce na účinky mimořádných zatížení, konkrétně na zatížení výbuchem.

Možnosti snížení rizik výbuchů lze v dnešní době posuzovat mnohem lépe díky vývoji informačních technologií, který umožňuje urychlovat složité výpočetní metody. Pomocí moderních programových systémů lze modelovat účinky výbuchového zatížení na konstrukce a porovnávat je s konzervativními odhady a výpočty, které byly užívány v minulosti. Numerické modelování stavebních konstrukcí na účinky výbuchu je velice efektivním řešením, jelikož výbuchové zkoušky reálných konstrukcí jsou oproti numerickému modelování finančně náročné.

Cílem této diplomové práce je shrnout nebezpečí spojené s výbuchy plynu, vytvořit numerický model vybrané stavební konstrukce a zhodnotit její odezvu při vnitřním výbuchu pomocí zvoleného programového systému.

V rámci diplomové práce bude zhodnocena stavební konstrukce konkrétního rodinného domu v Ostravě. Pro tvorbu numerického modelu konstrukce bude použit programový systém ANSYS.

2 Rešerše

Cílem této rešerše bylo vyhledat odborné publikace zaměřené na problematiku numerického modelování odezvy stavební konstrukce na účinky výbuchu plynu. Základem zpracování této práce bylo prozkoumat odborné publikace zabývající se výbuchy plynů. Publikace [10] [11] [19] obecně popisují problematiku výbuchu, rizika spojená s výbuchy plynu a par hořlavých kapalin, dále je zde uveden přehled požárně technických charakteristik hořlavých látek. Pro stanovení velikosti zatížení působící na stavební konstrukci při výbuchu byly vybrány publikace [4] [13] [22]. V odborných člancích [14] [17] se autor zabývá principy porušení stavebních konstrukcí a výpočtem odezvy konstrukcí při účincích výbuchu. Pro vytvoření odpovídajícího numerického modelu byl prostudován manuál k programu ANSYS [25]. Následuje přehled hlavních zdrojů důležitých pro tvorbu této diplomové práce.

Česká technická norma ČSN EN 1991-1-7 [4] uvádí potřebné informace o posuzování stavebních konstrukcí při mimořádných zatíženích. Obsahuje přehled staveb, ve kterých je nutno navrhovat stavební konstrukce na mimořádné zatížení. Norma stanovuje výpočet pro ekvivalentní statický tlak, který je nezbytný ke zhodnocení odezvy stavební konstrukce.

Příručka protivýbuchové ochrany staveb [13] popisuje výbuchy a odhad parametrů vygenerovaných tlakových vln. Uvádí jednotlivé kroky nutné pro analýzu odezvy stavební konstrukce při výbuchu. V publikaci jsou popsány vlastnosti stavebních materiálů při dynamickém zatížení.

V diplomové práci [22] je uveden přehled výpočtů pro stanovení velikosti výbuchových tlaků při ventilovaném výbuchu. V praktické části je provedena numerická analýza stavební konstrukce na účinky výbuchu pomocí softwaru Scia Enginner.

Limit response of masonry plate structure under explosiv effect [17]. Odborný článek popisuje chování zděných stěn při ohybovém zatížení tlakovou vlnou. Článek byl vypracován na základě zkoušky v pokusné štolě, kde byla při různých výbuchových tlacích sledována odezva stavební konstrukce. Práce dále popisuje způsob porušení příčkové konstrukce.

Dynamická odezva a způsob porušování cihelných příček při výbuchu plynu uvnitř budovy [14]. Příspěvek je zaměřen na analýzu odezvy příčkové cihelné konstrukce při

výbuchu metanu. Uvádí závislosti jednotlivých napětí v osách na modulu pružnosti při různých okrajových podmínkách.

ANSYS Mechanical APDL Basic Analysis Guide [25]. Manuál popisuje principy tvorby modelů po jednotlivých krocích a prostřednictvím příkladů vysvětluje funkce programu.

3 Úvod do problematiky

3.1 Základní principy vzniku výbuchu

V prostoru, ve kterém může vznikat nebezpečná koncentrace hořlavých plynů, představuje výbuch závažné riziko pro obyvatele, stavební konstrukce a jednotlivé technologické zařízení. V této kapitole bude zpracován přehled základních mechanismů ovlivňujících výbuchy, konkrétně výbuchy hořlavých plynů.

3.1.1 Používané termíny a jejich definice

výbuch (explosion)

prudká oxidace nebo rozkladná reakce vyznačující se vzrůstem teploty, tlaku nebo obojího současně [3]

výbušná atmosféra (explosive atmosphere)

směs hořlavých látek ve formě plynů, par, mlhy, prachů vláken nebo polétavých částic se vzduchem za atmosférických podmínek, ve které se po vznícení samovolně šíří hoření [7]

výbušná plynná atmosféra (explosive gas atmosphere)

směs hořlavých látek ve formě plynů nebo par se vzduchem za atmosférických podmínek, ve které se po vznícení samovolně šíří hoření [7]

hořlavý plyn nebo pára (flammable gas or vapour)

plyn nebo pára, která po smíchání v určitém poměru se vzduchem vytváří výbušnou plynnou atmosféru [7]

výbuchové parametry (explosion parameters)

ukazatele výbušnosti stanovené standardizovanými zkušebními postupy [10]

iniciační zdroj (ignition source)

jakýkoliv zdroj s dostatečnou energií pro iniciaci hoření [3]

3.1.2 Výbuch

Za výbuch je obecně považován děj, při kterém dochází k velmi rychlému uvolnění tlaku a tepla s následnými destruktivními účinky na zdraví a životy osob, technologii, či stavební konstrukce [11]. V praxi se lze setkat se třemi základními druhy výbuchů:

- výbuch fyzikální,
- výbuch chemický,
- výbuch jaderný.

Pro vznik výbuchu je nutné, aby současně a na jednom místě byly splněny následující podmínky:

- přítomnost hořlavé látky v koncentračních mezích výbušnosti,
- přítomnost oxidačního prostředku (např. vzdušného kyslíku) v dostatečném množství pro průběh výbuchového děje,
- přítomnost účinného iniciačního zdroje [11].



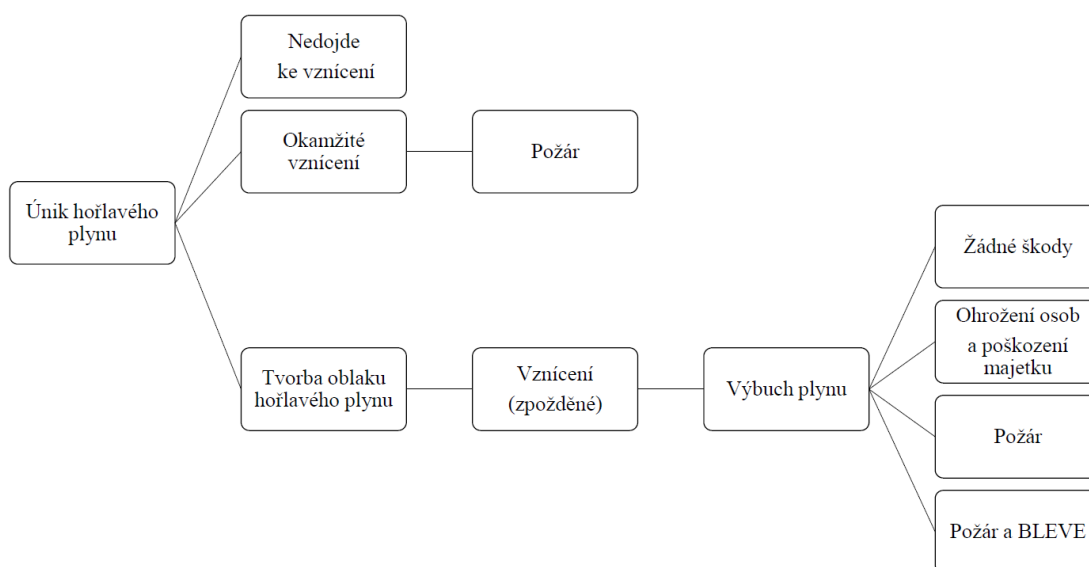
Obr. 3.1 Výbuchový trojúhelník [11]

3.1.3 Typické následky při úniku plynu

Diagram (Obr. 3.2) znázorňuje typické možné následky při úniku hořlavého plynu.

Únik plynu se vyvíjí následovně:

- únik plynu, při kterém nedojde ke vznícení (není přítomen iniciační zdroj),
- únik plynu s okamžitým vznícením (přítomnost dostatečného iniciačního zdroje),
- únik plynu s vytvořením oblaku hořlavých plynů, následuje zpožděné vznícení plynu a výbuch.



Obr. 3.2 Typické následky náhodného úniku hořlavého plynu do atmosféry [26]

3.1.4 Výbuch plynu

Výbuch plynu je definován jako proces, kdy hoření promíseného oblaku plynu (palivo-vzduch, palivo-okysličovadlo) způsobuje rychlý nárůst tlaku. Po iniciaci se plamen šíří hořlavou oblastí dvěma základními mechanismy:

- deflagrací (explozivním hořením),
- detonací.

V případě výbuchů plynů je proces deflagrace běžnější. Deflagrace (reakční zóna) se vzhledem k nevyhořelému plynu šíří podzvukovou rychlostí, typické rychlosti plamene (vztaženo k stojícímu pozorovateli) jsou řádově od 1 do 1000 m·s⁻¹. Vzhledem k hodnotám rychlosti hoření dochází k tomu, že tlaková vlna předbíhá reakční pásmo. Vygenerované přetlaky mohou v závislosti na rychlosti plamene dosáhnout hodnot několika MPa [13].

Detonační vlna je nadzvukovou vlnou hoření (vztaženo k rychlosti zvuku v nevyhořelém plynu před vlnou). Detonace se vyznačuje rázovou vlnou v čele tlakového pole. Detonační vlna se v oblaku palivo-vzduch oproti výbušninám šíří rychlostí pouze z intervalu $1500 - 2000 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ [13].

Rozdělení výbuchu plynu podle místa, kde k němu dojde:

- a) ohraničený výbuch (uvnitř nádob, potrubí, kanálů, tunelů),
- b) částečně ohraničený výbuch (v místnostech, budovách, ropných plošinách),
- c) neohraničený výbuch (v otevřených provozech a jiných neohraničených oblastech).

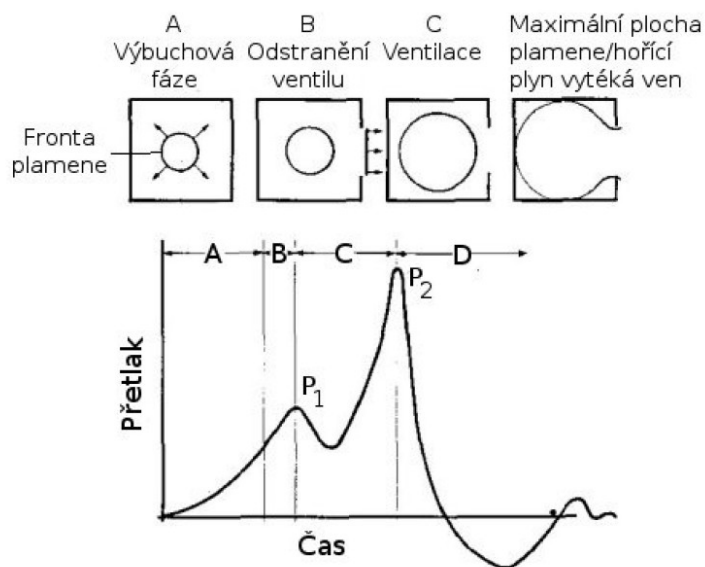
V této práci bude dále rozebrán částečně ohraničený výbuch, ke kterému dochází v objektech.

Jedním ze základních parametrů při úniku plynu s následným ohraničeným výbuchem je parametr větrání prostor. Dalším parametrem je rychlost unikání plynu. Závisí na geometrii zdroje úniku, rychlosti unikající látky, koncentraci a těkavosti hořlavé látky. Jestliže má plyn nižší relativní hustotu než vzduch, má snahu se pohybovat vzhůru. Je-li plyn významně těžší než vzduch, má tendenci shromažďovat se nad zemí. Klimatické podmínky při úniku plynu ovlivňují rychlost rozptýlování plynů a par v atmosféře. Existuje požadovaná minimální rychlost větru 2 m/s pro vznik turbulentního rozptýlování. Pod touto rychlostí dochází k vrstvení plynů nebo par a vzdálenost pro bezpečné rozptýlení se významně zvyšuje [13].

3.1.5 Odlehčený výbuch plynu

Průběh odlehčeného výbuchu je rozdělován na několik samostatných fází. Idealizovaný průběh tlaku odlehčeného výbuchu je patrný z Obr. 3.3. Hodnota tlaku P_1 se mění v závislosti na velikosti a hmotnosti odlehčovacích ploch. V určitých případech může tlak P_1 téměř splýnout s hodnotou P_2 .

V porovnání s výbuchy v uzavřených komorách mají odlehčené výbuchy nižší hodnoty.



Obr. 3.3 Idealizovaný průběh tlaku při odlehčeném výbuchu [22]

Idealizovaný průběh odlehčeného výbuchu se rozděluje na jednotlivé etapy:

a) Etapa ohraničeného výbuchu

Nárůst tlaku závisí exponenciálně na rychlosti plamene a času. Pro efektivní odlehčení musí být odlehčovací plocha vytvořena v počátečním stadiu výbuchového procesu. Vyrazení odlehčovací plochy je žádoucí při nejnižším možném tlaku. Ideálním řešením by bylo, kdyby odlehčovací plocha byla neustále otevřena a tímto řešením by etapa ohraničeného výbuchu byla zcela eliminována [13].

b) Etapa odstranění odlehčovací plochy

Pro ideální odlehčení výbuchu by měla být odlehčovací plocha konstruována tak, aby se porušila při nízkém přetlaku a umožnila výtoku plynu z obalu. V případě, že by byl vyrážecí přetlak příliš vysoký, nemuselo by už po jeho otevření dojít k žádnému odlehčení.

Pokud je přetlak na vyražení odlehčovací plochy příliš vysoký, nemusí k odlehčení výbuchu vůbec dojít. V tomto případě by nedošlo k poklesu tlaku P_1 .

c) Etapa odlehčování

Generovaný vnitřní přetlak je určován objemem plynů produkovaných hořením a výtokem plynů otvorem. Rychlost odlehčování je výrazně závislá na velikosti odlehčovací plochy [13].

3.1.6 Meze výbušnosti plynů

Mezi základní technicko-bezpečnostní parametr výbušnosti hořlavých plynů patří posouzení koncentrace plynů ve směsi se vzduchem. Toto pásmo je pro každou látku specifické a je omezeno horní a dolní mezí výbušnosti. Uvnitř toho pásma tvoří látka se vzduchem výbušnou směs [13].

3.1.7 Iniciační zdroje

Při hodnocení rizika výbuchu je nutno stanovit iniciační zdroj, který se v ohrožených prostorách může vyskytovat v důsledku očekávaných i výjimečných poruch. Norma ČSN EN 1127-1 ed. 2 uvádí 13 základních iniciačních zdrojů [11].

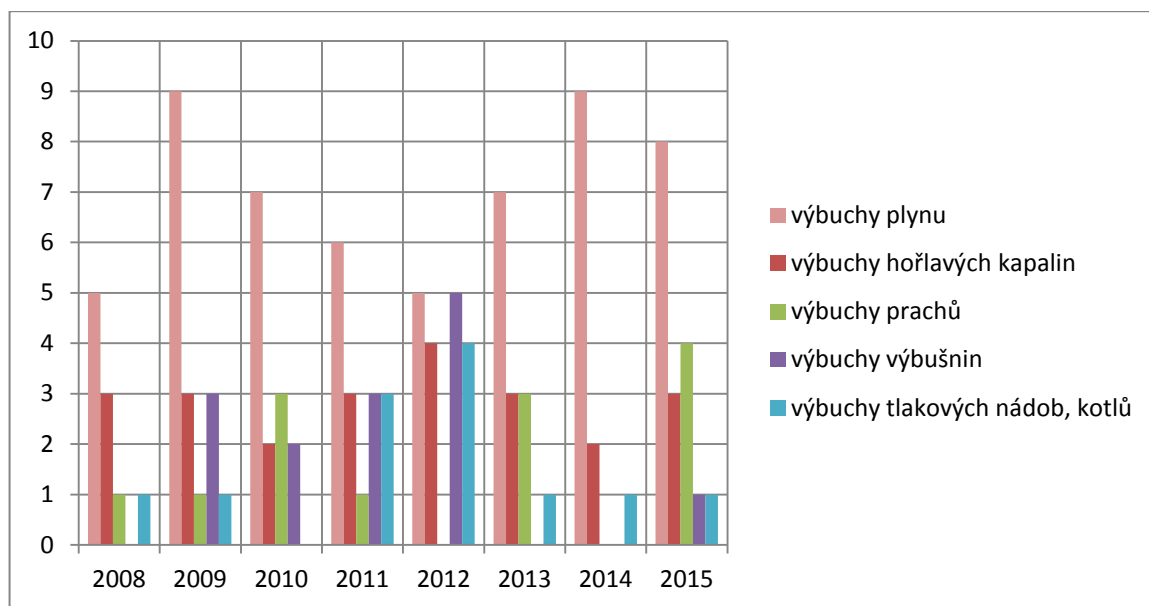
Mezi základní iniciační zdroje patří:

- horké povrchy,
- plameny, horké plyn (včetně horkých částic),
- mechanicky vznikající jiskry,
- elektrická zařízení,
- rozptylové elektrické proudy, katodová ochrana proti korozi,
- statická elektřina,
- úder blesku,
- vysokofrekvenční elektromagnetické vlny,
- elektromagnetické vlny,
- ionizující záření,
- ultrazvuk,
- adiabatická komprese a rázové vlny,
- exotermické reakce.

3.2 Statistiky výbuchů v ČR

Pro představu, ke kolika výbuchům v ČR pravidelně dochází, byla sestavena Tab. 3.1. Na základě statistické ročenky GŘ HZS ČR byl stanoven počet výbuchů v jednotlivých letech v ČR.

Tab. 3.1 Počet výbuchů v ČR v jednotlivých letech dle statist. ročenek HZS ČR [29]



Dle výše uvedené tabulky patří výbuchy plynu mezi mimořádné události, které se na území ČR vyskytují. Dále je nutno jim věnovat pozornost z důvodu ohrožení osob a škod na majetku. S rizikem výbuchu se v praxi musí uvažovat všude tam, kde se nedá zcela vyloučit.

3.3 Významné výbuchy plynu v minulosti

3.3.1 Výbuch propanu v Indianapolis, USA, 1963

K výbuchu propanu došlo dne 31. října 1963 ve sportovní hale Indiana State Fairgrounds Coliseum ve městě Indianapolis v USA. Výbuch se vyžádal 74 obětí na životech a téměř 400 zraněných. Výbuch vznikl během představení pro více než 4 000 návštěvníků. K úniku propanu, který byl používán pro ohřev popcornu, došlo v důsledku vadného ventilu nádrže. Unikající plyn se následně hromadil v nevětraných částech haly, k iniciaci plynu pravděpodobně došlo elektrickým strojem na popcorn [11].

3.3.2 Výbuch plynu, hl. město Praha, ČR, 2013

Významnou mimořádnou událostí spjatou s výbuchem plynu v ČR, byl výbuch v ulici Divadelní v Praze. K události došlo dne 29. dubna 2013. Jednalo se o výbuch plynu uniklého z narušeného produktovodu plynu. Při výbuchu bylo zraněno 43 lidí, z toho dva vážně. V 1. NP objektu, který byl označen jako epicentrum výbuchu, došlo ke zborcení konstrukcí stropů a příček, k viditelnému vychýlení obvodové zdi a poškození pavlačí a nosných zdí ve vnitřním traktu [29].

4 Výbuch v rodinném domě

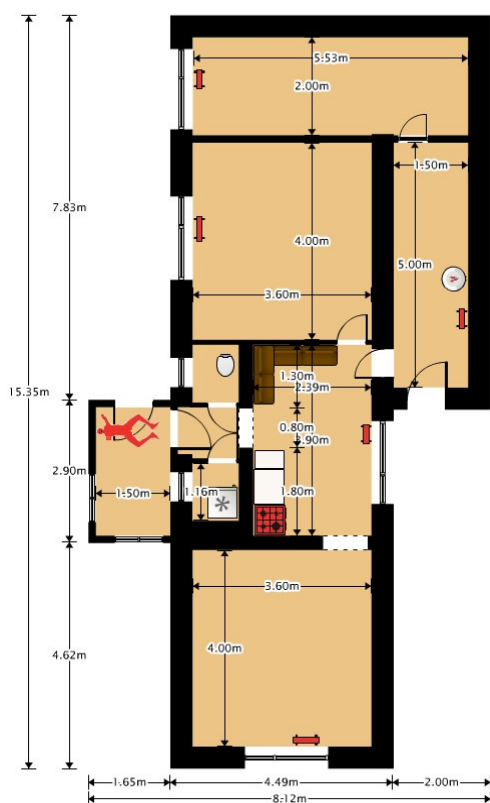
V této části bude rozebrán výbuch plynu v rodinném domě, ke kterému došlo dne 5. 2. 2014 v Ostravě - Martinov [24][27]. Tento případ výbuchu bude použit jako předloha pro modelování odezvy stavební konstrukce v praktické části.



Obr. 4.1 Ukázka RD v Martinově před a po vzniku mimořádné události [27]

4.1 Popis objektu

Jedná se o jednopodlažní rodinný dům (dále jen RD) se sedlovou střechou a s částečným podsklepením v zadní části. Nosné obvodové stěny byly vyžděny z plných cihel (tl. 450 mm). Stropní konstrukce byla tvořena dřevěnými trámy s podbitím a záklopem. Světlá výška místností byla 2,4 m. Půdorysný tvar domu byl obdélníkový s rozměry 15,4 x 8,1 m. Do domu byly přivedeny funkční a používané rozvody zemního plynu. Vytápění domu bylo řešeno lokálními plynovými topidly (celkem 5 konvekčních kamen). Pro vaření byl v kuchyni instalován kombinovaný plynový sporák s elektrickou troubou. Na Obr. 4.1 je znázorněn půdorys 1.NP se zakreslením otvorů, umístění konvekčních kamen a plynového sporáku.



Obr. 4.2 Půdorys 1.NP rodinného domu v Ostravě - Martinov [24]

4.2 Popis mimořádné události

Na základě informací získaných v průběhu šetření příčiny vzniku požáru bylo zjištěno, že se jednalo o výbuch, který zničil nosnou konstrukci rodinného domu. Výbuch způsobil únik zemního plynu. V průběhu hasebního zásahu ani při ohledání sutin nebyly nalezeny žádné tlakové nádoby s technickými plyny. Poškození konstrukcí RD bylo rovnoměrné, došlo k popraskání, roztržení nebo vyvrácení většiny zděných příček a obvodových stěn, dále k destrukci konstrukce stropu.

Zemní plyn pravděpodobně unikl z plynového sporáku v kuchyni. Další místem úniku by mohl být únik plynu z konvekčních kamen v kuchyni. Při ohledání střední části domu (kuchyně) bylo zjištěno, že z této místnosti vedou všechny stopy výbuchu směrem ven (vychýlení stěn, zničené okno, nadzvednutý strop, ohnuté rámy a panty dveří atd.). Vzhledem k uvedeným faktům je možné konstatovat, že k iniciaci výbuchu došlo v prostorách kuchyně, odkud se dále šířila tlaková vlna do ostatních místností.

Po určení prostoru, kde k výbuchu došlo, byly dále prověřovány následující možné iniciační zdroje výbuchu:

- a) technický zdroj (elektrická instalace),
- b) zdroj otevřeného ohně.

Vzhledem k rozsáhlé destrukci RD se nepodařilo jednoznačně určit konkrétní zdroj iniciace. K iniciaci tohoto výbuchu pravděpodobně došlo v důsledku činnosti majitele RD, a to buď použitím elektrické instalace (zapnutí/vypnutí osvětlení v kuchyni) nebo při manipulaci s otevřeným ohněm.

Příčinou výbuchu byl v tomto případě únik zemního plynu ve vnitřních prostorách RD. Konkrétní místo úniku plynu a způsob iniciace výbuchu byly stanoveny formou možných vyšetřovatelských verzí [24].

4.3 Doba pro vytvoření výbušné koncentrace

V této části bude uveden předpokládaný výpočet doby, která je nutná pro vytvoření výbušné koncentrace při úniku hořlavého plynu v ohraničeném prostoru (při výpočtu bude uvažováno s uzavřeným prostorem). Pro výpočet budou použita konkrétní zjištěná data při výbuchu v řešeném rodinném domě v Ostravě). K úniku plynu došlo pravděpodobně v kuchyni o rozměrech 3,9 x 2,4 x 2,5 m. Jako zdroj úniku byly pro výpočet použity konvekční kamna. Z konvekčních kamen začal unikat zemní plyn rychlostí $I = 0,37 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Dolní mez výbušnosti zemního plynu je $LEL = 4,4 \text{ \% obj.}$

$$LEL = \frac{V_{\text{metanu}}}{V_{\text{místnosti}}} = \frac{I \cdot \tau}{V_{\text{místnosti}}}$$

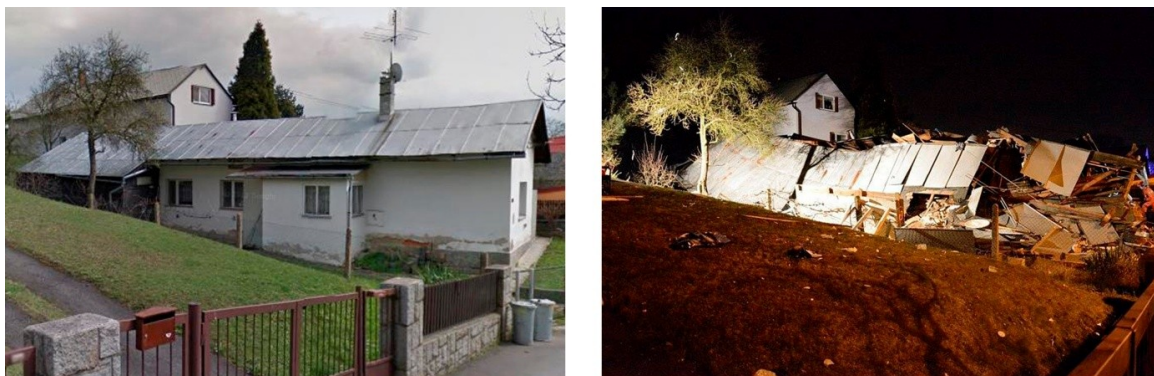
$$\tau = \frac{LEL \cdot V_{\text{místnosti}}}{I} = \frac{0,044 \cdot 23,4}{0,37} = 2,78 \text{ hod} \approx 166,8 \text{ minut}$$

Z výše uvedeného vyplývá, že po 167 minutách může dojít v místnosti ke vzniku výbušné koncentrace a při výskytu dostatečné iniciační energie dojde k explozi.

V prostorách menších než 100 m^3 se za nebezpečné množství výbušné směsi považuje již jeho 1/10000 objemu v daném uzavřeném prostoru. Pokud se v bezprostřední blízkosti úniku plynu nacházejí lidé, tak toto nebezpečné množství může být i menší [10].

5 Účinky výbuchu na stavby

Tato kapitola se zabývá porušením stavebních konstrukcí při účincích výbuchu.



Obr. 5.1 Ukázka rodinného domu před a po výbuchu plynu [27]

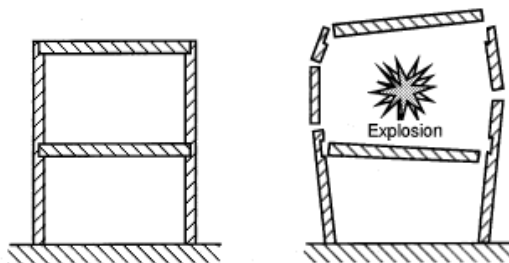
5.1 Chování stavební konstrukce při výbuchu

Výbuch se při interakci s konstrukcí projevuje [19]:

- tlaky v dopadající a odražené vzdušné tlakové (rázové) vlně,
- časovým průběhem tlakové a podtlakové fáze rázové vlny,
- letícími troskami generovanými výbuchem.

Při výbuchu nízké intenzity vznikají tlaky ve vzdušné rázové vlně v řádu 3,5 až 7,5 kPa a dochází k rozbití okenních výplní. Z hlediska narušení nosných prvků jsou tyto přetlaky zanedbatelné, ovšem z hlediska ohrožení osob jsou létající části oken velmi nebezpečné a mohou způsobit smrtelná zranění.

Rozhodující pro porušení konstrukcí jsou výbuchy, u nichž je přetlaková fáze výbuchu větší než 30 kPa. Pro masivní konstrukce jsou to hodnoty přetlaků větší než 50 kPa [19].

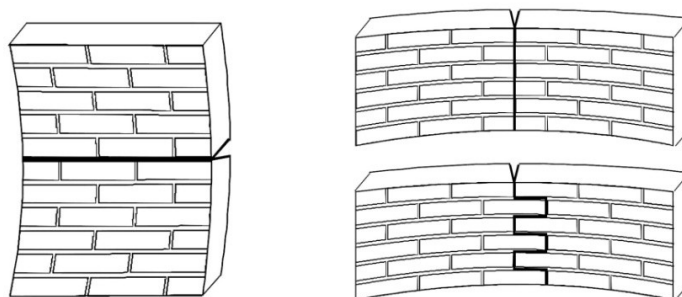


Obr. 5.2 Ukázka porušení konstrukcí v důsledku vzniklého přetlaku při výbuchu [26]

5.2 Porušení zděných stěn při výbuchu

Výbuch zatěžuje stavební konstrukce především ohybem působícím na stěny a stropní konstrukce. Porušení zděné stěny namáhané ohybem je naznačeno na Obr. 5.3. Norma ČSN EN 1996-1-1 [5] uvádí dva základní typy porušení:

- s rovinou porušení rovnoběžnou s ložnými spárami,
- s rovinou porušení kolmo k ložným spárám.



Obr. 5.3 Roviny porušení při ohybovém namáhání zděné stěny [5]

Pokud by bylo celkové porušení konstrukce při výbuchu odvozováno z normové pevnosti zdiva v tahu za ohybu, pak by bezpečnost konstrukce před celkovou havárií byla více než stonásobná [17]. Toto normové kritérium není zcela přesné.

Podle publikace [17] o skutečném porušení stěn zatížených výbuchem rozhoduje mezní deformace odpovídající kritickému úhlu natočení střednice v důsledku jejího ohybu. Kritériem porušení je mezní pootočení (úhel lomu), které je definováno jako úhel, který svírají dvě tuhé desky po vytvoření plastických kloubů ve středu a na okrajích rozpětí konstrukce v době těsně před porušením [17]. Hodnota mezního pootočení ψ na mezi porušení je přibližně $2,3^\circ$ pro zdivo podle prací [16] [17]. Rovnice pro výpočet mezního pootočení:

$$\psi = 2 \arctg (2y / l)$$

ψ mezní pootočení (úhel lomu)

y maximální dosažený průhyb stěny (ve středu rozpětí)

l rozpětí konstrukce v kratším směru

5.3 Poškození objektů přetlakem p_+ ve vzdušné rázové vlně od účinků výbuchu

Je-li znám přetlak od výbuchu, lze odhadnout pravděpodobné škody na konstrukci [13]. Přehled pravděpodobných poškození objektů je uveden v Tab. 5.1. Pro představu a prvotní odhad velikosti přetlaků při výbuchu je následující tabulka účinným řešením. Dále je nutno dodat, že tabulka uvádí pouze pravděpodobný odhad účinků výbuchu na konstrukce. Hodnoty se mohou lišit o desítky procent (například při použití nových oken a dveří se může únosnost těchto prvků zvýšit až o 50 %).

Tab. 5.1 Poškození objektů přetlakem p_+ od účinků výbuchu [13]

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	Částečné rozrušení staveb	Menší průmyslové haly, vesnické stavby
20 - 30	Značné rozrušení městských staveb	Osamělé obytné budovy, stavby a zařízení
30	Těžká zranění osob, zhroucení nenosných příček, vážné poruchy nosných prvků zděných konstrukcí, propadnutí nebo zřícení střech, převrácení lehkých nákladních automobilů	Stavby obytné a průmyslové, vozidla
50	Poboření částí nosných prvků zděných konstrukcí, převrácení tanků a těžkých nákladních vozidel	
100 a více	Smrtelná zranění osob na otevřeném prostranství, totální havárie zděných konstrukcí	Destrukce zděných staveb

6 Zatížení konstrukcí

6.1 Zatížení konstrukce vnitřním výbuchem

Zatížení výbuchem spadá do kategorie mimořádných zatížení. Norma [4] uvádí kategorizaci pozemních staveb do tříd následků podle typů staveb a charakteru užívání. Tato kategorizace se vztahuje k malé, střední a velké třídě následků (viz Tab. 6.1). U staveb klasifikovaných jako CC1 se nemusí s účinky výbuchu uvažovat. Je však nutno ověřit, zda jsou splněna pravidla pro zajištění robustnosti a stability podle ČSN EN 1992 až ČSN EN 1999. U staveb klasifikovaných jako CC2 a CC3 se mají klíčové prvky konstrukcí navrhovat na příslušná zatížení tak, aby bylo zabráněno progresivnímu zřícení následkem vnitřního výbuchu [4].

Tab. 6.1 Příklady kategorizace podle typů pozemních staveb [4]

Třída následků CC	Příklady kategorizace podle typů pozemních staveb a jejich používání
1 - malá	Zemědělské stavby Rodinné domy Obytné domy do 4 podlaží
2a - střední	Administrativní budovy do 4 podlaží Hotely do 4. podlaží
2b - střední	Nemocnice do 3 podlaží Obchodní plochy vyšší než 3 podlaží a menší než 15 podlaží
3 - velká	Všechny stavby, kde se shromažďuje značný počet lidí Stadióny s více než 5 000 diváky Stavby s nebezpečnými látkami

Z normových požadavků vyplývá, že při návrhu novostavby rodinného domu se nemusí uvažovat s mimořádnými zatíženími. U novostaveb například administrativních budov, nemocnic a shromažďovacích prostor by měla být zohledněna zatížení vnitřním výbuchem ve statickém výpočtu. V případě výbuchu v rodinném domě v Ostravě bude použita analýza založená na ekvivalentním statickém modelu zatížení.

Předpoklady o zatížení výbuchem [16]:

- tlaková vlna působí s rovinným čelem (zatížení v jednotlivých bodech působí bez fázového zpoždění),
- zatížení působí na konstrukci spojitě rovnoměrně (není uvažován lokální efekt soustředného zatížení).

6.1.1 Ekvivalentní statický tlak podle ČSN EN 1991-1-7

Pro konstrukce, které mají odolat účinkům vnitřního výbuchu plynu, norma [4] uvádí následující vztahy pro nominální hodnotu ekvivalentního statického tlaku:

$$p_d = 3 + p_{stat} \quad \text{nebo}$$

$$p_d = 3 + p_{stat} / 2 + 0,04 / (A_v/V)^2$$

p_{stat} rovnoměrně rozdělený statický tlak, při kterém se poruší odlehčovací prvky [kN/m²]

A_v plocha odlehčovacích prvků [m²]

V objem pravoúhlého prostoru [m³]

Výše uvedené vztahy lze použít při splnění následujících podmínek:

- celkový objem prostoru $V < 1000 \text{ m}^3$,
- pokud jsou odlehčovací prvky ze stavebních prvků s různými hodnotami p_{stat} , má se použít největší hodnota p_{stat} ,
- poměr plochy odlehčovacích částí a celkového objemu má splnit nerovnost $0,05 \leq A_v/V \leq 0,15$.

Mimořádná zatížení se musí uvažovat v kombinaci se stálými a proměnnými zatíženími. Tlak od deflagrace působí současně na všechny plochy, které prostor ohraničují [4].

6.2 Statické namáhání stavebních konstrukcí

Statické zatížení nezpůsobuje významné zrychlení konstrukce. Za staticky namáhané konstrukce se považují ty, u kterých se zatížení nemění často nebo se nemění významně. Na účinky statického zatížení musí být navrženy všechny stavby již v projektové fázi.

Statické zatížení se dělí na:

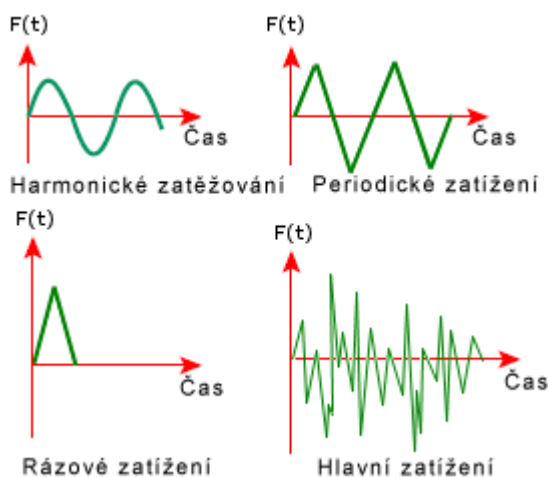
- stálé (G) - vlastní tíha konstrukce,
- proměnné (nahodilé) zatížení (Q) - užité zatížení, zatížení sněhem a větrem.

6.3 Dynamické namáhání stavebních konstrukcí

U dynamických zatížení vznikají v konstrukci významná zrychlení. Výsledné účinky na konstrukce závisí na tuhosti, na časovém průběhu zatěžování a na hmotnosti konstrukce [23]. Výbuch spadá do kategorie dynamického zatížení, které zatěžuje konstrukci v řádu zlomků sekund a v čase je proměnné. Mnohdy se dynamické zatížení převede na zvětšené statické (kvazistatické).

Dynamické zatížení konstrukce je dáno silovými a momentovými účinky, jejichž velikost nebo poloha se mění v čase. Dynamickou odezvu konstrukce způsobují budící síly. Budící síly se dělí na:

- deterministické - síly, které jsou funkcí času a lze je přesně předvídat (harmonické, periodické nebo neperiodické zatížení),
- stochastické - síly, jejichž výskyt nebo velikost je náhodný (zatížení dopravou).



Obr. 6.1 Ukázka dynamických zatížení [28]

Zatížení vyvozená výbuchem by měla být udávána vždy alespoň dvěma parametry a to velikostí tlaku a údajem o časovém průběhu zatížení.

Podle příručky protivýbuchové ochrany staveb [13] lze při vnitřním výbuchu analyzovat konstrukční prvky objektu samostatně (stropní desky, stěny). Dále zjednodušit výpočet tak, že statické namáhání konstrukce vynásobíme dynamickým součinitelem a celková hodnota působícího zatížení se upraví (obvykle navýší). Dynamickým součinitelem je tedy vyjádřen dynamický charakter celého jevu (dynamické zvětšení namáhání a přetvoření konstrukce).

Pro posouzení dynamického chování konstrukce bude v praktické části použita modální analýza. Jedná se o numerickou analýzu používanou pro zjištění vlastních frekvencí konstrukce.

6.3.1 Dynamický součinitel

Dynamický součinitel δ je funkcí zjednodušeného časového průběhu zatížení, součinu délky trvání rázového zatížení τ a příslušné, zpravidla první vlastní kruhové frekvence konstrukce. Pro zatížení rázovou vlnou je velikost dynamického součinitele s uvažováním duktilního chování konstrukce v mezích $\delta = 1$ až 2 [13].

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

- δ dynamický součinitel [-]
- $T_{(i)}$ vlastní perioda ohybového kmitání [s]
- μ přetvárnost (duktilita) konstrukce [-]
- τ_+ doba působení přetlakové fáze [s]

7 Program ANSYS

7.1 Modelování metodou konečných prvků

Modelování odezvy stavební konstrukce na účinky výbuchu bylo provedeno programem ANSYS 13.0. Software ANSYS je program, který dokáže řešit různé typy analýz (strukturální, termodynamickou, akustickou, proudění kontinua). Jedná se o program využívající metodu konečných prvků (Finite Element Method). Pro korektní používání tohoto programu je nutná znalost stavební mechaniky, zákonitosti pevnosti a pružnosti materiálů. V průběhu numerického řešení dochází k diskretizaci řešení do uzlových míst. Uzel je tedy možné považovat za elementární stavební částici modelu. Spolupůsobení mezi jednotlivými uzlovými body je zajištěno jejich vzájemným propojením pomocí elementů [25].

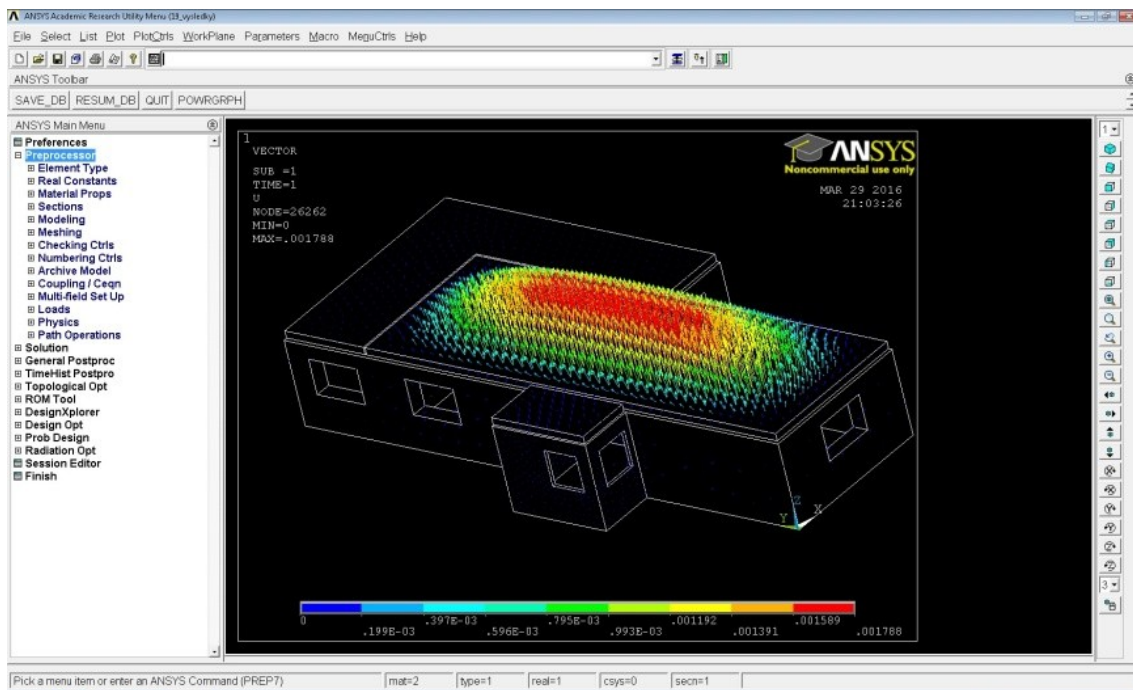
Program umožňuje spočítat deformace a napětí v konstrukci již při jednoduchém zadání geometrie konstrukce, pevnostních charakteristik materiálů, zatížení a nastavení vazeb k okolí.

Při modelování v praktické části budou uvažovány lineární materiálové vlastnosti prvků. Průběh deformací a napětí bude definován modulem pružnosti (E) a Poissonovou konstantou (ν).

7.2 Postup zadávání do programu

Zjednodušený postup pro zadání numerické analýzy v programu ANSYS lze provádět po jednotlivých krocích:

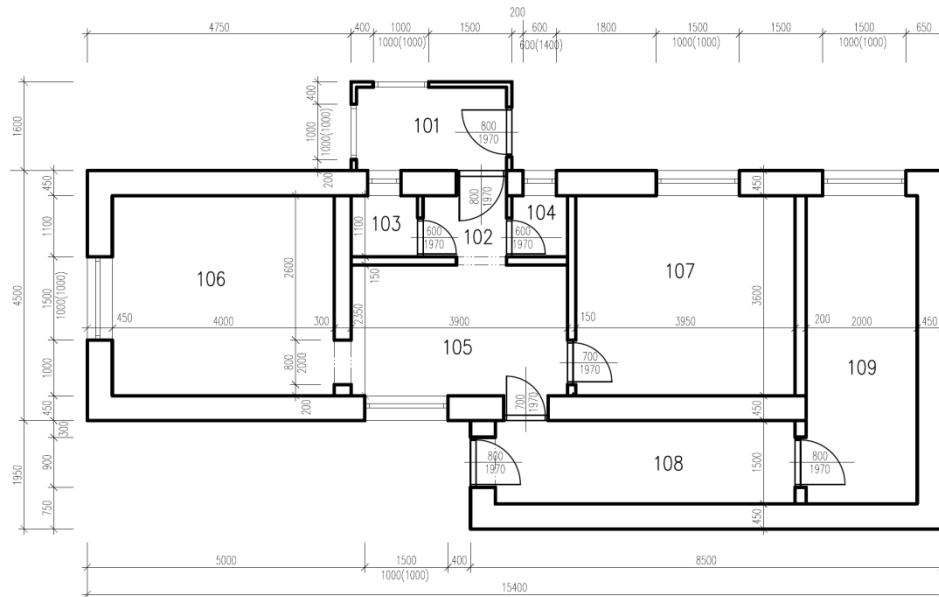
- zvolit druh analýzy (strukturální, termodynamická, atd.),
- vybrat typ elementu,
- přiřadit materiálové charakteristiky elementu (modul pružnosti, Poissonovu konstantu, hustotu),
- zadat konstrukci pomocí bodů, povrchů a objemů,
- nastavit okrajové podmínky (klouby, vetknutí),
- zadat zatížení (působící síly, vlastní tíha, užité zatížení),
- vytvořit výpočetní síť konečných prvků,
- zvolit typ výpočtu (běžný, po krocích),
- zobrazení výsledků (vnitřní síly, deformace).



Obr. 7.1 Ukázka numerického modelování konstrukce programem ANSYS

8 Vstupní hodnoty pro numerickou analýzu

8.1 Půdorys objektu



Obr. 8.1 Půdorys řešeného rodinného domu

8.2 Materiálové vlastnosti zdiva

Obvodové stěny řešeného rodinného domu jsou zděné o tl. 450 mm. Výška těchto stěn je 2,4 m. Jako zdící prvek stěn byla použita cihla pálená (zdící prvek skupiny 1) o rozměrech 290 x 140 x 65 mm. Pevnostní označení cihly pálené bylo stanoveno na P10. Dále byla použita vápenocementová malta s označením M2.

8.2.1 Výpočet modulu pružnosti zdiva dle ČSN EN 1996-1-1+A1

Normalizovaná pevnost v tlaku zdícího prvku:

$$f_b = \delta \cdot \eta \cdot f_u = 0,77 \cdot 1,0 \cdot 10 = 7,7 \text{ MPa}$$

δ součinitel vlivu šířky a výšky zdícího prvku [5]

η součinitel vlivu vlhkosti

f_u průměrná pevnost zdícího prvku [MPa]

Pevnost v tlaku obyčejné vápenocementové malty M2:

$$f_m = 2 \text{ MPa}$$

Charakteristická pevnost v tlaku nevyztuženého zdiva na obyčejnou maltu:

$$f_k = K \cdot f_b^{0,7} \cdot f_m^{0,3}$$

$$f_k = 0,8 \cdot 0,55 \cdot 7,7^{0,7} \cdot 2^{0,3} = 2,26 \text{ MPa}$$

K součinitel typu zdících prvků a malty; je-li ve zdivu podélná spára rovnoběžná s lícem stěny, vynásobí se K hodnotou 0,8

Krátkodobý sečnový modul pružnosti pro navržené zdivo:

$$E = K_E \cdot f_k = 1000 \cdot 2,26 = 2260 \text{ MPa}$$

K_E součinitel přetvárnosti zdiva pro pálené zdící prvky [5]

f_k charakteristická pevnost v tlaku nevyztuženého zdiva [MPa]

Úprava modulu pružnosti pro výpočet časem degradované konstrukce se podle možnosti vzniku trhlin ve zdivu stanoví podle vztahu na základě experimentálně ověřených zkušeností dle [15]:

$$E_0 = 0,2 \cdot E = 0,2 \cdot 2260 = 452 \text{ MPa}$$

8.2.2 Výpočet modulu pružnosti zdiva dle ČSN 73 1101

Norma ČSN 73 1101 byla zrušena v roce 2010. Pro možnost porovnání s platnými eurokódy je uveden výpočet modulu pružnosti i podle této neplatné normy [9].

Tečnový modul přetvárnosti (při dynamickém výpočtu zděných konstrukcí) [9]:

$$E_{\text{def2}} = \alpha \cdot k_m \cdot R_d = 500 \cdot 2,1 \cdot 0,9 = 945 \text{ MPa}$$

E_{def} největší hodnota modulů přetvárnosti zdiva [9]

α součinitel přetvárnosti zdiva [9]

k_m součinitel pevnosti zdiva

R_d výpočtová pevnost zdiva v tlaku při porušení

Úprava tečnového modulu pružnosti pro výpočet časem degradované konstrukce se podle možnosti vzniku trhlin ve zdivu stanoví podle vztahu na základě experimentálně ověřených zkušeností dle [15]:

$$E_0 = 0,2 \cdot E_{\text{def2}} = 0,2 \cdot 945 = 189 \text{ MPa}$$

8.2.3 Výsledný modul pružnosti

Zděné konstrukce lze zjednodušeně posuzovat až do vzniku trhlin jako lineárně pružnou soustavu [15]. Výsledná hodnota modulu pružnosti dle [5] je tedy stanovena na $E_0 = 452 \text{ MPa}$.

8.3 Výpočet ekvivalentního statického tlaku

$$p_d = 3 + p_{\text{stat}} \quad \text{nebo}$$

$$p_d = 3 + p_{\text{stat}} / 2 + 0,04 / (A_v/V)^2$$

Tab. 8.1 Výpočet ekvivalentního statického tlaku

p_{stat} - statický tlak, při kterém se poruší výfukové prvky [13]	5,0 kN/m ²
A_v - plocha výfukových prvků	3,0 m ²
V - objem prostoru	102,3 m ³
p_d - ekvivalentní statický tlak 1	8,0 kN/m ²
p_d - ekvivalentní statický tlak 2	52,0 kN/m ²

Podmínky použití:

- $V < 1000 \text{ m}^3$
- $0,05 \leq A_v/V \leq 0,15$

Podmínky pro použití ekvivalentního statického tlaku jsou splněny, dále bude uvažováno s ekvivalentním statickým tlakem $p_d = 52,0 \text{ kN/m}^2$.

8.4 Zjednodušený výpočet vnitřních sil a napětí v obvodové stěně

Pro výpočet bude použit zjednodušený výpočetní model, ve kterém se stěnodesková konstrukce zdiva bude chovat jako konzolová stěna [16]. Zjednodušený ruční výpočet bude sloužit pro odhad vnitřních sil a porovnání velikostí napětí s výpočtem z programu ANSYS. Délka trvání přetlakové fáze výbuchu je odhadnuta na $\tau = 0,3 \text{ s}$. Objemová hmotnost zdiva je 1800 kg/m^3 .

Statický moment ve vetknutí stěny:

$$M_{\text{expl}} = q \cdot \frac{l^2}{2} = q \cdot \frac{2,4^2}{2} = q \cdot 2,9 \text{ [kNm]}$$

q tlak působící na stěnu [kPa]

l výška stěny [m]

Vlastní kruhová frekvence stěny [16]:

$$\omega_{(1)} = \frac{3,516}{l^2} \cdot \sqrt{\frac{EI}{\mu}} = \frac{3,516}{2,4^2} \cdot \sqrt{\frac{473000 \cdot 0,45^3 / 12}{1,8 \cdot 0,45}} = 40,6 \text{ s}^{-1}$$

Součin: $\omega(1) \cdot \tau = 40,6 \cdot 0,3 = 12,2$

Napětí od rázového zatížení ve spáře zdiva:

$$\sigma_{\text{expl}} = \delta \cdot M_{\text{expl}}/W = 1,1 \cdot 2,9 q / (0,45^2 / 6) = 94,5 q \text{ [kPa]}$$

$\delta \approx 1,1$ dynamický součinitel [16]

Přítížení od vlastní tíhy zdiva a konstrukce střechy:

zdivo	$2,4 \cdot 0,45 \cdot 18 =$	19,4 kN/m
stropní konstrukce (odhad)	$2,0 \cdot 0,2 \cdot 7 =$	2,8 kN/m
konstrukce střechy (odhad)		15,0 kN/m
zatížení v základové spáře celkově:		37,2 kN/m

Napětí od zatížení v základové spáře:

$$\sigma_g = 37,2 / (0,45 \cdot 1) = 82,7 \text{ kPa}$$

Výsledné napětí:

$$\sigma = \sigma_g \pm \sigma_{\text{expl}} = 82,7 \pm 94,5 q \text{ [kPa]}$$

Charakteristická pevnost zdiva v tahu za ohybu při porušení v rovině kolmé k ložné spáře [5]:

$$f_{\text{vk}2} = 0,2 \text{ MPa}$$

Z rovnováhy napětí:

$$-200,0 = 82,7 - 94,5 q \quad \rightarrow \quad q = 2,99 \text{ kPa}$$

Výsledný tlak 2,99 kPa dle uvedených výpočtů může vést ke vzniku trhlin ve zděné stěně při zatížení výbuchem. Použitý výpočetní model konstrukce je velmi zjednodušený. Přesnost výpočtu závisí na stanovení pevnosti zdícího prvku, pevnosti použité malty a dále na přesnosti určení zatížení. Tyto nepřesnosti zavádí do zjednodušeného výpočtu odchylky cca 50 % [16]. Ke skutečnému porušení zděných konstrukcí dochází ještě při vyšších účincích výbuchu. Hlavním ukazatelem porušení zděné stěny při účinku výbuchu dle zkoušek [17] zpravidla bývá dosažení mezního průhybu, který odpovídá natočení střednice konstrukce a dosažením úhlu lomu.

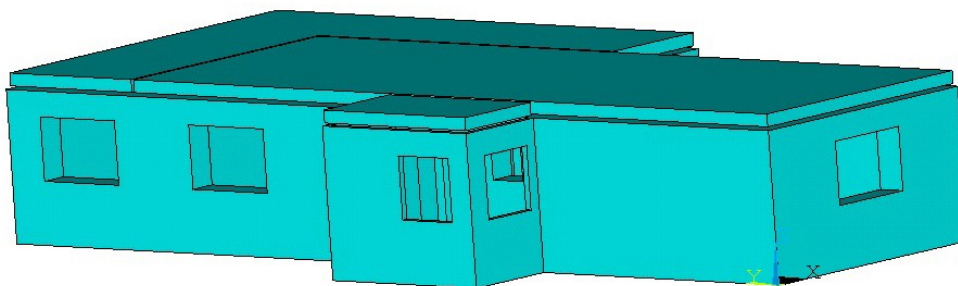
Při výpočtu byl uvažován zjednodušený model konstrukce ve tvaru konzoly. Druhým možným modelem by byl konzolový nosník kloubově podepřen při horním okraji. Tím by se zřejmě zvýšila únosnost konstrukce proti vzniku trhlin na cca 8 až 10 kPa [16].

Při numerickém modelování řešeného rodinného domu budou posuzovány oba výpočtové modely konstrukce (model konzoly, model konzolového nosníku s kloubovým podepřením u horního okraje). Model konstrukce ve tvaru konzoly se více přibližuje řešenému výbuchu rodinného domu díky nadzvednutí lehkého dřevěného stropu při výbuchu.

9 Modelování v programu ANSYS

Při tvorbě modelu byla snaha o přesné zachování dispozice RD podle zjištěných informací [24]. Nově byl vytvořen půdorys RD v programu AutoCAD (viz příloha 1), ze kterého jsou patrné všechny rozměry stěn, oken a dveří, které byly zadány do programu.

1
VOLUMES
TYPE NUM



Obr. 9.1 Vytvořený model rodinného domu

9.1 Postup zadávání

V programu byla prováděna strukturální analýza. Pro tvorbu modelu byl použit typ elementu Solid186. Dále byly použity dva materiály uvedené v Tab. 9.1. Jako svíslé nosné konstrukce byly zadány zděné stěny. Tloušťka jednotlivých stěn je patrná z půdorysu 1.NP (viz příloha č. 1). Jako stropní konstrukce byla zadána ŽB stropní deska s tloušťkou 0,2 m.

Tab. 9.1 Přehled použitých materiálů pro tvorbu modelu

	Modul pružnosti E	Poissonův součinitel	Hustota
Zdivo - CP	0,452 GPa	0,2	1800 kg/m ³
Beton - C25/30	30 GPa	0,2	2500 kg/m ³

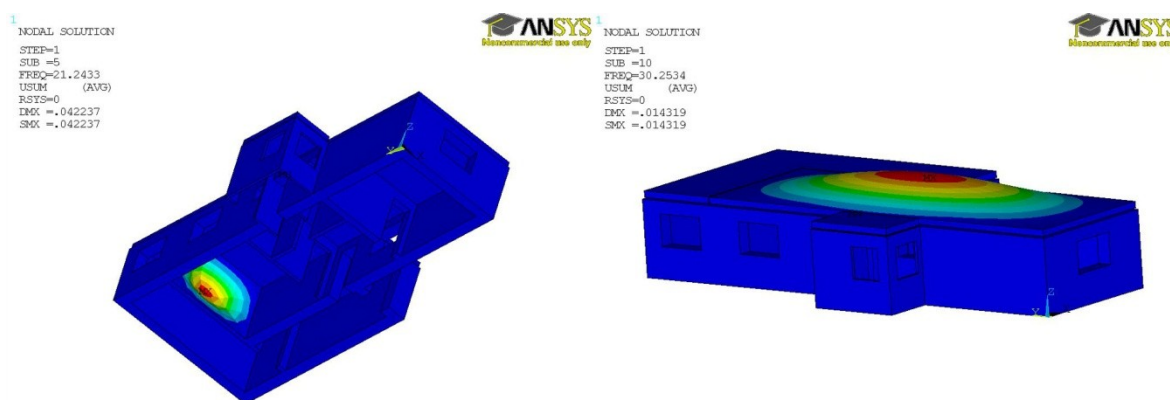
9.2 Model rodinného domu

9.2.1 Okrajové podmínky

Bylo uvažováno s kloubovým uložením stěn v základové spáře a s kloubovým uložením stropní konstrukce na stěnách. V modelu bylo uvažováno se spolupůsobením stropní konstrukce a zděných stěn.

9.2.2 Modální analýza

Modální analýza slouží ke zjištění údajů o vlastních frekvencích konstrukce a stanovuje tvary vlastních kmitů. Programem bylo spočteno prvních 12 frekvencí konstrukce, které jsou patrné z níže uvedené tabulky (Tab. 9.2).



Obr. 9.2 Ukázka vlastních tvarů pro 5. a 10. frekvenci konstrukce

Tab. 9.2 Výpočet vlastních frekvencí programem ANSYS

Mode	f [Hz]	T [s]
1	11,800	0,08475
2	17,060	0,05862
3	17,275	0,05789
4	19,888	0,05028
5	21,243	0,04707
6	21,398	0,04673
7	25,049	0,03992
8	27,646	0,03617
9	30,245	0,03306
10	30,253	0,03305
11	31,149	0,03210
12	31,980	0,03127

Pro následující výpočty byla použita 5. vlastní frekvence konstrukce s hodnotou $f = 21,243$ Hz. Při nižších frekvencích globálně kmitala celá hmota stěn, což neodpovídalo reálným vlastním tvarům kmitání konstrukce.

9.2.3 Výpočet dynamického součinitele

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

$$\frac{1}{\delta} = \frac{0,04707 \cdot \sqrt{2 \cdot 1,5 - 1}}{\pi \cdot 0,3} + \frac{1 - \frac{1}{2 \cdot 1,5}}{1 + 0,7 \cdot \frac{0,04707}{0,3}} = 0,67132$$

Tab. 9.3 Výpočet dynamického součinitele

f - frekvence konstrukce [Hz]	21,243
T(i) - vlastní perioda ohybového kmitání [s]	0,044707
μ - přetvárnost (duktilita) konstrukce [-]	1,5
τ_+ - doba působení přetlakové fáze [s]	0,3
δ - dynamický součinitel [-]	1,49

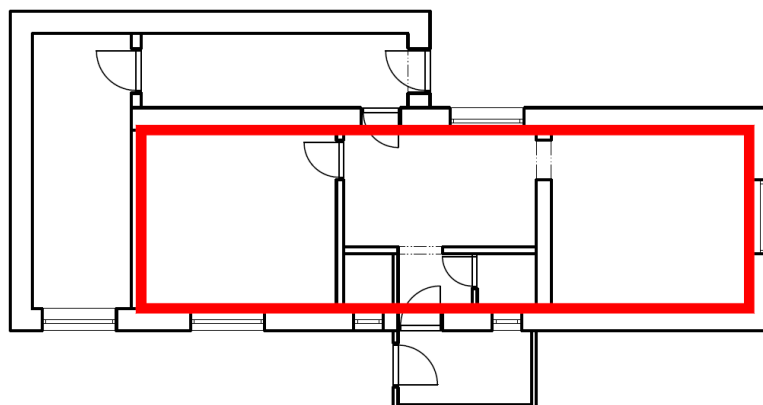
9.2.4 Výpočet ekvivalentního statického tlaku

Dynamickým součinitelem byl vyjádřen dynamický charakter celého jevu (dynamické zvětšení namáhání a přetvoření konstrukce). Ekvivalentní statický tlak (viz kapitola 8.3) byl upraven dynamickým součinitelem podle následujícího vztahu:

$$p_{ekv} = p_d \cdot \delta$$

$$p_{ekv} = 52,0 \cdot 1,49 = 77,5 \text{ kN/m}^2$$

Na stěny a strop bylo zadáno plošné zatížení $p_{ekv} = 77,5 \text{ kN/m}^2$. Z níže uvedeného obrázku (Obr. 9.3) je patrné, na které stěny a část stropu bylo zadáno zatížení vnitřním výbuchem.



Obr. 9.3 Půdorys RD s označením stěn, na které bylo zadáno zatížení výbuchem

9.2.5 Výpočet mezního průhybu konstrukcí

Z rovnice mezního pootočení deskových konstrukcí byla zjištěna hodnota maximálního průhybu, při kterém dojde k celkovému porušení konstrukce.

Mezní pootočení zděných stěn:

$$\psi = 2 \arctg (2y / l)$$

Tab. 9.4 Mezní průhyb zděné stěny při ohybovém namáhání

ψ - mezní pootočení při nadměrném průhybu pro zdivo dle [17]	2,3°
l - rozpětí konstrukce v kratším směru	2400 mm
y - maximální dovolený průhyb zděné stěny (ve středu rozpětí)	24,1 mm

Mezní pootočení stropní konstrukce:

$$\psi = 2 \arctg (2y / l)$$

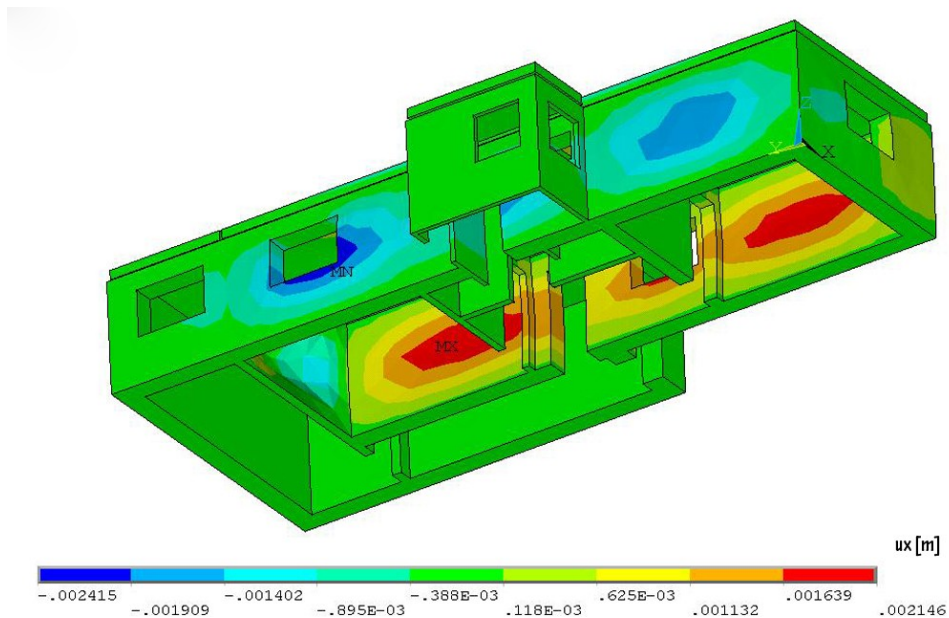
Tab. 9.5 Mezní průhyb stropní konstrukce

ψ - mezní pootočení při nadměrném průhybu pro železobeton dle [17]	3,4°
l - rozpětí konstrukce v kratším směru	3800 mm
y - maximální dovolený průhyb desky tl. 200 mm	56,4 mm

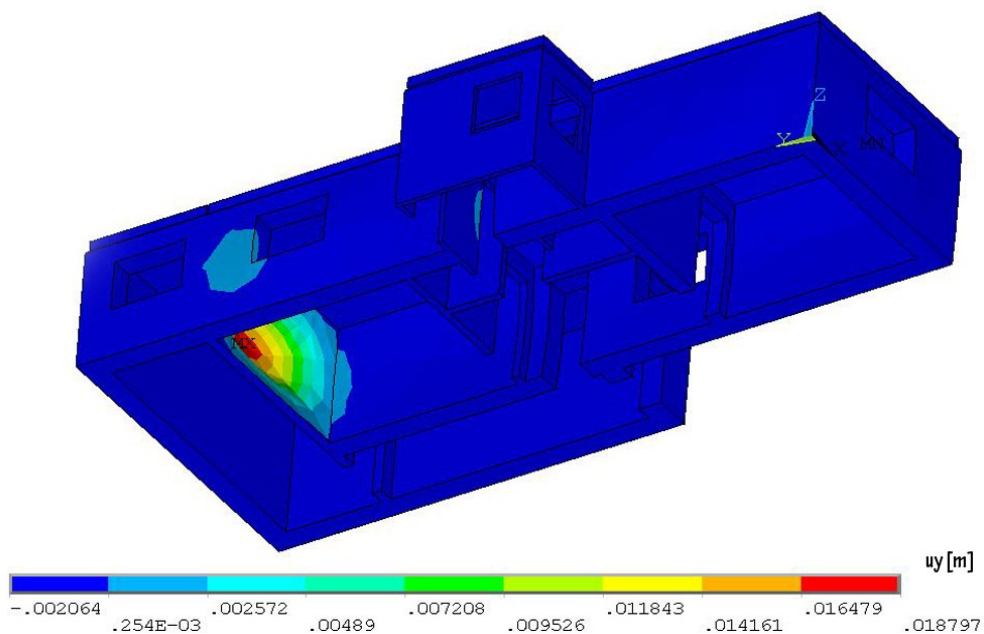
Dle výše uvedených tabulek je patrné, že při průhybu zděné obvodové stěny $y = 24,1$ mm dojde k celkovému porušení stěny. Pro železobetonový strop je mezní průhyb $y = 56,4$ mm. Tyto hodnoty budou porovnány s výsledky numerické analýzy.

9.2.6 Výsledné deformace konstrukce stanovené numerickou analýzou

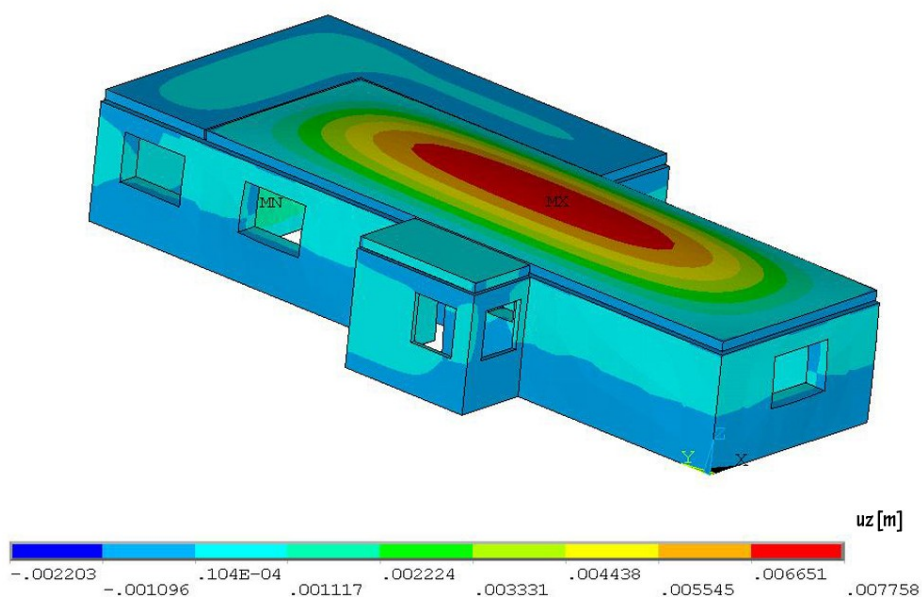
Výsledné průhyby konstrukce v jednotlivých osách jsou patrné z následujících obrázků.



Obr. 9.4 Výsledný průhyb konstrukce v ose X



Obr. 9.5 Výsledný průhyb konstrukce v ose Y



Obr. 9.6 Výsledný průhyb konstrukce v ose Z

9.2.7 Zhodnocení výsledků

Výsledné hodnoty průhybů jsou uvedeny v Tab. 9.6. Vypočtené maximální průhyby ve všech osách jsou menší než mezní průhyby způsobující porušení konstrukcí.

Při porovnání maximálních průhybů v jednotlivých osách je patrné, že stěny a stropní konstrukce by pravděpodobně odolaly účinkům výbuchového zatížení při stávajícím předpokladu spolupůsobení stropní konstrukce a stěn.

Tab. 9.6 Porovnání vypočtených maximálních průhybů s mezními průhyby

Průhyb - ANSYS	[mm]
Vypočtený maximální průhyb v ose X	2,4
Vypočtený maximální průhyb v ose Y	18,8
Vypočtený maximální průhyb v ose Z	7,8
Průhyb způsobující porušení dle kap. 9.2.5	[mm]
Mezní průhyb stěny pro porušení v ose X	24,1
Mezní průhyb stěny pro porušení v ose Y	24,1
Mezní průhyb stropu pro porušení v ose Z	56,4

9.3 Model rodinného domu bez stropní konstrukce

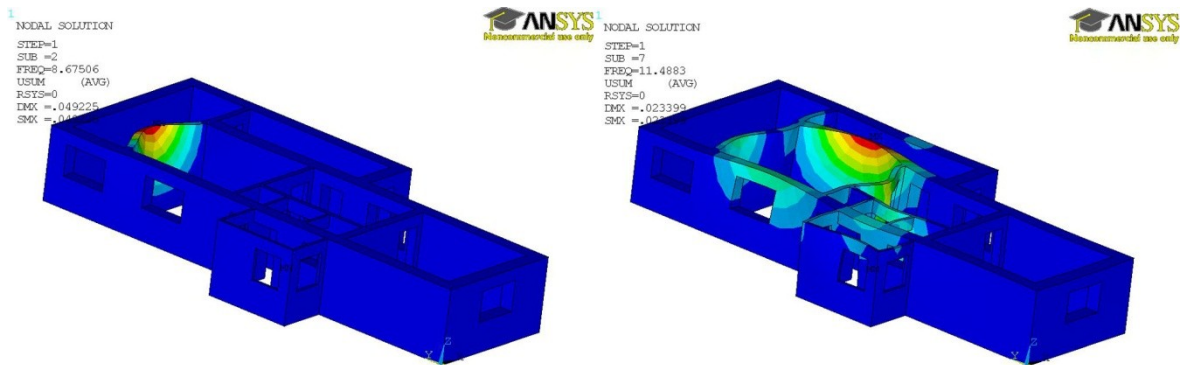
Druhou variantou modelu rodinného domu je konstrukce zděných stěn bez stropní konstrukce. Tento model konstrukce se více přibližuje řešenému výbuchu rodinného domu z důvodu nadzvednutí dřevěného stropu při výbuchu. V tomto modelu není uvažováno se spolupůsobením stropní konstrukce a stěn. Materiálové vlastnosti zděných stěn zůstávají stejné jako u předchozího modelu.

9.3.1 Okrajové podmínky modelu

U modelu bylo nastaveno pouze kloubové uložení stěn v základové spáře.

9.3.2 Modální analýza modelu bez stropní konstrukce

Programem bylo spočteno prvních 12 vlastní frekvencí konstrukce, které jsou patrné z Tab. 9.7.



Obr. 9.7 Ukázka vlastních tvarů konstrukce pro 2. a 7. frekvenci

Tab. 9.7 Výpočet vlastních frekvencí konstrukce programem ANSYS

Mode	f [Hz]	T [s]
1	5,446	0,18364
2	8,675	0,11527
3	9,302	0,10750
4	9,743	0,10264
5	10,540	0,09488
6	11,078	0,09027
7	11,488	0,08705
8	11,827	0,08455
9	12,030	0,08313
10	12,398	0,08066
11	12,851	0,07781
12	13,488	0,07414

Pro následující výpočty byla použita 2. vlastní frekvence konstrukce s hodnotou $f = 8,675$ Hz. Při nižší frekvenci globálně kmitala celá hmota stěn, což neodpovídalo reálným vlastním tvarům kmitání konstrukce.

9.3.3 Výpočet dynamického součinitele

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

$$\frac{1}{\delta} = \frac{0,11527 \cdot \sqrt{2 \cdot 1,5 - 1}}{\pi \cdot 0,3} + \frac{1 - \frac{1}{2 \cdot 1,5}}{1 + 0,7 \cdot \frac{0,11527}{0,3}} = 0,69833$$

$$\delta = \frac{1}{0,69833} = 1,432$$

Tab. 9.8 Výpočet dynamického součinitele pro stěny

f - frekvence konstrukce [Hz]	8,675
T(i) - vlastní perioda ohybového kmitání [s]	0,11527
μ - přetvárnost (duktilita) konstrukce [-]	1,5
τ_+ - doba působení přetlakové fáze [s]	0,3
δ - dynamický součinitel [-]	1,432

9.3.4 Výpočet ekvivalentního statického tlaku

$$p_{ekv} = p_d \cdot \delta$$

$$p_{ekv} = 52,0 \cdot 1,432 = 74,5 \text{ kN/m}^2$$

Na stěny bylo zadáno plošné zatížení $p_{ekv} = 74,5 \text{ kN/m}^2$. Z obrázku (Obr. 3.1) je patrné, na které stěny bylo zadáno zatížení vnitřním výbuchem.

9.3.5 Výpočet mezního průhybu konstrukcí

Úhel mezního pootočení byl upraven dle publikace [14] na hodnotu $\psi = 0,6^\circ$. Dále byla upravena rovnice mezního pootočení z důvodu nespolečného působení stěn a stropní konstrukce. Z upravené rovnice mezního pootočení byla zjištěna hodnota maximálního průhybu, při kterém dojde k porušení konstrukce.

Mezní pootočení zděných stěn:

$$\psi = \arctg(y / l)$$

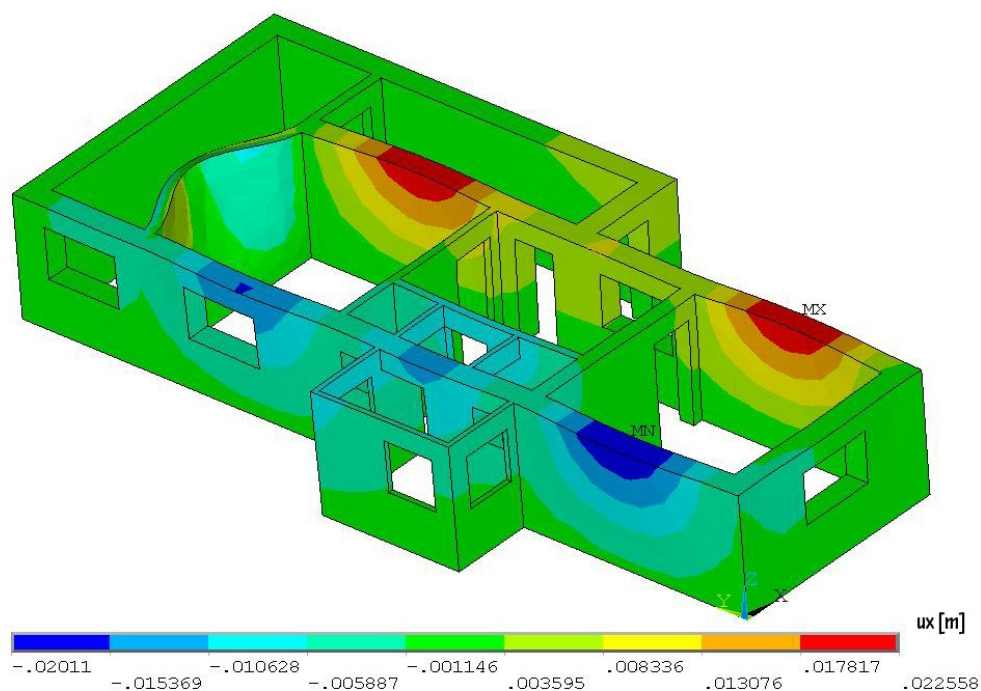
Tab. 9.9 Mezní průhyb zděné stěny při ohybovém namáhání

ψ - mezní pootočení při nadměrném průhybu pro zdivo dle [14]	0,6°
l - rozpětí konstrukce v kratším směru	2400 mm
y - maximální dovolený průhyb stěn (při horním okraji)	25,1 mm

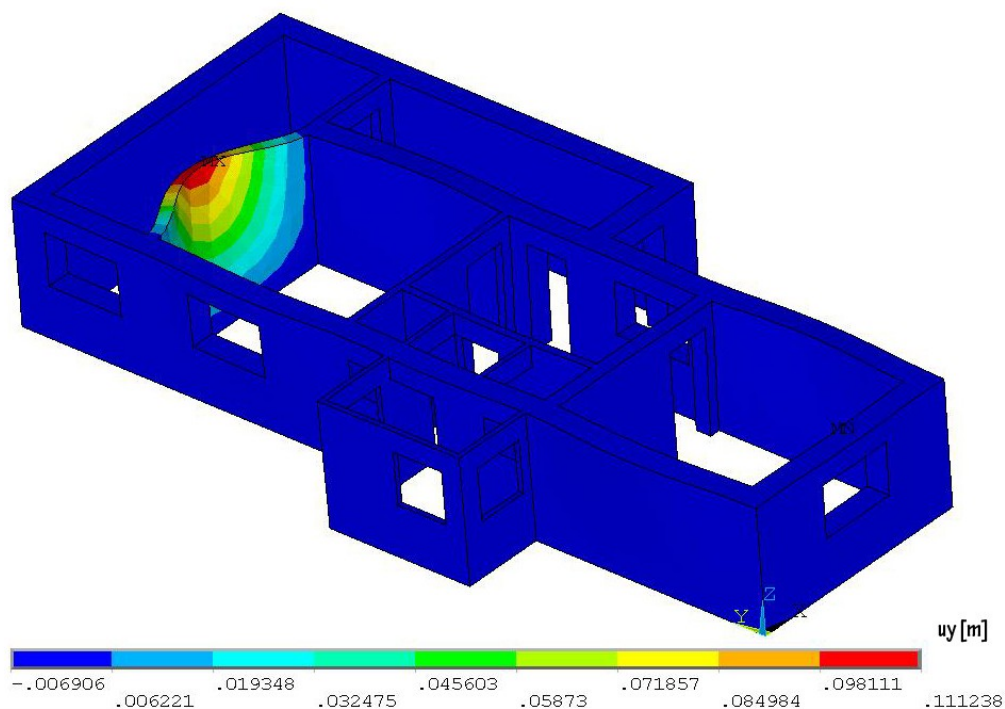
Maximální dovolený průhyb je patrný z Tab. 9.9. Při průhybu stěny $y = 25,1$ mm dojde k celkovému porušení stěny.

9.3.6 Výsledné deformace konstrukce stanovené numerickou analýzou

Výsledné průhyby konstrukce v jednotlivých osách jsou patrné z následujících obrázků.



Obr. 9.8 Výsledný průhyb stěn v ose X



Obr. 9.9 Výsledný průhyb stěn v ose Y

9.3.7 Zhodnocení výsledků modelu bez stropní konstrukce

Výsledné hodnoty průhybů jsou uvedeny v Tab. 9.1010. Vypočtený průhyb vnitřní zděné stěny (tl. 200 mm) je 111,1 mm. Mezní průhyb této stěny stanovený na základě mezního úhlu pootočení je 25,1 mm. Z důvodu překročení mezního průhybu dojde k porušení této stěny. Obvodové stěny (tl. 450 mm) mají vypočtený průhyb 22,6 mm, tato hodnota se blíží k mezní hodnotě průhybu a lze předpokládat, že povede k porušení obvodové stěny.

Tab. 9.10 Porovnání vypočtených maximálních průhybů stěn s mezními průhyby

Průhyb - ANSYS	[mm]
Vypočtený maximální průhyb v ose X	22,6
Vypočtený maximální průhyb v ose Y	111,1
Průhyb způsobující porušení dle kap. 9.3.5	[mm]
Mezní průhyb stěny pro porušení v ose X	25,1
Mezní průhyb stěny pro porušení v ose Y	25,1

Výsledné deformace se dle výše uvedených průhybů přibližují reálným hodnotám. Je však nutno dodat, že se stále jedná pouze o odhad deformací konstrukce. Pokud bychom chtěli zpřesnit výsledky této numerické analýzy, musely by se provést experimentální zkoušky řešené situace.

Numerické modelování ovlivňuje mnoho zavedených zjednodušení. Se zjednodušováním konstrukce souvisí i jisté nepřesnosti ve výsledcích. Přesnost výsledků ovlivňuje především zadání korektních pevnostních charakteristik materiálů a nastavení náležitých okrajových podmínek modelu.

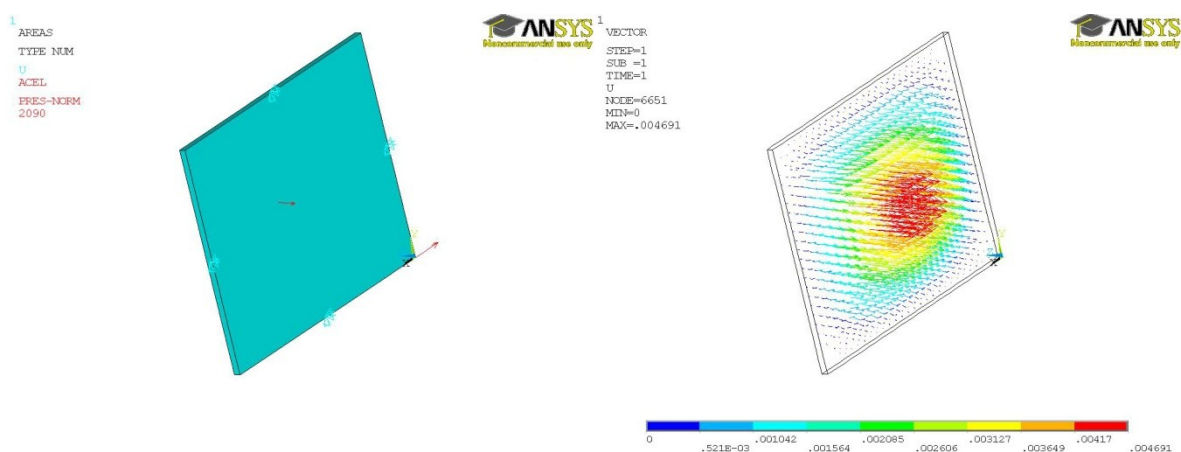
10 Ověření deformací zděné stěny

10.1 Model zděné stěny

Byl vytvořen jednoduchý 3D model stěny v programu ANSYS. Materiálové parametry a uložení stěny byly převzaty ze série zkoušek z publikace [17]. Tento model byl vybrán z důvodu možnosti porovnání výsledků reálné zkoušky s numerickou analýzou provedenou v programu ANSYS. Experimentální stěna byla zatěžována výbuchem plynu ve zkušební štolě ve Štramberku [17].

Zadané parametry do programu ANSYS dle [17]:

- zkušební zděná stěna byla po obvodě vetknuta,
- šířka a výška stěny: 2200 x 2575 mm,
- tloušťka stěny: 65 mm,
- modul pružnosti zdiva: $E = 732 \text{ MPa}$,
- Poissonovo číslo: 0,2 [-],
- přetlakové zatížení: $p_{\text{max}} = 2,09 \text{ kPa}$,
- zadána vlastní tíha stěny: 1800 kg/m^3 .



Obr. 10.1 Ukázka výpočtu průhybu modelované zděné stěny

10.2 Interpretace výsledků

Pro porovnání výsledků byly použity 3 hodnoty (viz Tab. 10.1). První hodnotou je reálný maximální průhyb dle zkoušky uvedený v publikaci [17]. Druhou hodnotou je průhyb vypočtený programem [30] ve formátu xls (excel), který byl vytvořen v rámci série přednášek protivýbuchové ochrany. Poslední hodnota maximálního průhybu byla vypočtena programem ANSYS.

Tab. 10.1 Porovnání maximálních průhybů zděné stěny

	y_{\max} [mm]
Zkouška zděné stěny [17]	4,82
Výpočet programem [30]	4,70
Výpočet programem ANSYS	4,69

Výše uvedené hodnoty maximálního průhybu uprostřed zděné stěny jsou víceméně totožné. Dle uvedeného porovnání je možno prohlásit, že při použití programového systému ANSYS, vypočtené hodnoty odpovídají reálným hodnotám zjištěných na základě experimentálních zkoušek.

11 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo shrnout nebezpečí spojené s výbuchy plynu, vytvořit numerický model vybrané stavební konstrukce a zhodnotit její odezvu při vnitřním výbuchu pomocí zvoleného programového systému.

V úvodní teoretické části byl nejprve obecně popsán výbuch a parametry, které jej ovlivňují. Následně byl uveden rozbor skutečného výbuchu plynu v rodinném domě i s přehledem porušení stavebních konstrukcí při výbuchu. V práci jsem se zaměřil na způsob porušení zděných stěn při účincích výbuchu. Práce se dále zabývá výpočtem přetlaku působícího v tlakové vlně na stavební konstrukci. V praktické části byl vypočten modul pružnosti zděné stěny podle platných normových požadavků a dále stanoven mezní průhyb zděných stěn, při kterém dochází k jejich porušení.

Hlavní náplní této práce bylo vytvoření numerického modelu rodinného domu v programovém systému ANSYS. Do programu byly zadány odpovídající pevnostní charakteristiky použitých materiálů, geometrie rodinného domu a okrajové podmínky tak, aby se model co nejvíce přibližoval skutečnému případu. Model byl zatížen ekvivalentním statickým tlakem a byla sledována jeho strukturální odezva. Podle mezních průhybů stěn a stropu bylo zhodnoceno porušení konstrukce při účincích výbuchu. Po zhodnocení výsledných deformací lze konstatovat, že se numerický model jeví jako reálný a zjištěné hodnoty korespondují s předpokládanými deformacemi. Zvláště v případě modelu rodinného domu, ve kterém nebylo uvažováno se spolupůsobením stropní konstrukce a zděných stěn, byla odezva stavební konstrukce velice podobná s odhadovaným porušením konstrukce.

Numerickým modelováním stavební konstrukce bylo ověřeno, že jsou numerické modely efektivním a rychlým nástrojem pro posouzení stavební konstrukce na účinky výbuchu. Je však nutné myslet na to, že numerické modely v sobě nesou jisté nepřesnosti a jsou závislé na mnoha podmínkách a parametrech. Správnost řešení vždy závisí na přesnosti převedení konkrétních podmínek výbuchu do matematického modelu, a proto výsledky modelování lze považovat pouze za odhad odezvy stavební konstrukce.

Poznatky zjištěné v práci přispívají k prohloubení znalosti chování stavební konstrukce při účincích výbuchu a mohou sloužit pro další výzkum v této problematice.

Literatura

Zákony a vyhlášky

- [1] Vyhláška MV č. 246/2001 Sb., o stanovení podmínek požární bezpečnosti a výkonu státního požárního dozoru (vyhláška o požární prevenci), ve znění pozdějších předpisů.
- [2] Nařízení vlády č. 406/2004 Sb., o bližších požadavcích na zajištění bezpečnosti a ochrany zdraví při práci v prostředí s nebezpečím výbuchu.

Normativní dokumenty

- [3] ČSN EN 13237 (2013): *Prostředí s nebezpečím výbuchu - Termíny a definice pro zařízení a ochranné systémy určené pro použití v prostředí s nebezpečím výbuchu.* ČNI, Praha 2013
- [4] ČSN EN 1991-1-7 (2007): *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 1-7: Obecná zatížení – Mimořádná zatížení.* ČNI, Praha 2007.
- [5] ČSN EN 1996-1-1+A1 (2013): *Eurokód 6: Navrhování zděných konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla pro vyztužené a nevyztužené zděné konstrukce.* ČNI, Praha 2013.
- [6] ČSN EN 1996-3 (2007): *Eurokód 6: Navrhování zděných konstrukcí – Část 3: Zjednodušené metody výpočtu nevyztužených zděných konstrukcí.* ČNI, Praha 2007.
- [7] ČSN EN 60079-10-1 (2009): *Výbušné atmosféry – Část 10-1: Určování nebezpečných prostorů – Výbušné plynné atmosféry.* ČNI, Praha 2009.
- [8] ČSN EN 60079-10-2 (2009): *Výbušné atmosféry – Část 10-2: Určování nebezpečných prostorů – Výbušné atmosféry s hořlavým prachem.* ČNI, Praha 2010.
- [9] ČSN 73 1101 (1980): *Navrhování zděných konstrukcí.* ČNI, Praha 1980.

Tištěné monografie a odborné články

- [10] DAMEC, Jaroslav. *Protivýbuchová prevence.* Ostrava: SPBI, 1998, 188 s. ISBN 80-6111-21-0.
- [11] KULICH, Martin a Stanislav CÁB. *Koncepce řešení protivýbuchové prevence v podmínkách průmyslových provozů.* 1. vyd. V Ostravě: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2012. ISBN 978-80-7385-120-0.
- [12] KUCHAR, Martin. *Stanovení modulu pružnosti zdiva ve směru ložné spáry.* Brno, 2015. 52 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební.

- [13] MAKOVIČKA, Daniel, Břetislav JANOVSKEÝ a Milan ČERNÍN. *Příručka protivýbuchové ochrany staveb*. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT v Praze, 2008, 185 s. ISBN 978-80-01-04090-4.
- [14] MAKOVIČKA, Daniel. MAKOVIČKA Daniel. *Dynamická odezva a způsob porušování cihelných příček při výbuchu plynu uvnitř budovy*. *Stavební obzor* 2002, č. 2, str. 37-41
- [15] MAKOVIČKA, Daniel, MAKOVIČKA Daniel. *Odezva konstrukce budovy a ohrožení jejích obyvatel výbuchem plynu*. *Stavební obzor* 2006, č. 7, str. 197-202
- [16] MAKOVIČKA, Daniel, MAKOVIČKA Daniel. *Přibližné stanovení odezvy stavební konstrukce zatížené výbuchem*. *Vzdělávací seminář – pilotní kurs projektu „Protivýbuchová ochrana staveb“*, Pilotní seminář 3, Praha, 2008
- [17] MAKOVIČKA, Daniel, MAKOVIČKA Daniel. *Limit response of masonry plate structure under explosiv effect*, Praha, 2006
- [18] MAKOVIČKA, Daniel. *Únosnost okenních konstrukcí při tlakových účincích výbuchu*. *Stavební obzor* 2002, č. 4, str. 100 - 103
- [19] MAKOVIČKA, Daniel, MAKOVIČKA Daniel. *Zásady hodnocení bezpečnosti a spolehlivosti konstrukcí*. *Vzdělávací seminář – pilotní kurs projektu „Protivýbuchová ochrana staveb“*, Pilotní seminář 4, Praha, 2008
- [20] MANNAN, Sam. *Lee's loss prevention in the process industries, hazard identification, assessment and control*. 4rd ed. Texas: College Station, USA 2012, ISBN 978-0-12-397189-0.
- [21] PUME, Dimitrij, KOŠATKA, Pavel. *Betonové konstrukce 20 – Zděné konstrukce. Navrhování podle Eurokódu 6 I. a II. díl*. Praha : ČVUT, 2004. ISBN 80-01-02983-2.
- [22] SKOPAL, Adam. *Numerické modelování vybrané stavební konstrukce za výbuchu*. Ostrava, 2011. 69 s. Diplomová práce. VŠB - TU Ostrava.
- [23] PIRNER, M, a kol. *Dynamika stavebních konstrukcí*. TP 33, SNTL-Nakladatelství technické literatury, Praha 1989, ISBN 80-03-00000-9
- [24] HZS ČR. *Zpráva o zásahu k výbuchu rodinného domu na ul. Borovicová 2, Ostrava-Martinov*. 5 s. Evidenční číslo: 8114001204

Internetové zdroje

- [25] ANSYS Mechanical APDL Basic Analysis Guide. USA, 2013 [online]. [cit. 10.4.2016].

<http://148.204.81.206/Ansys/150/ANSYS%20Mechanical%20APDL%20Basic%20Analysis%20Guide.pdf>

- [26] BJERKETVEDT, Dag, BAKKE Jan Roar, WINGERDEN Kees van. *Gas explosion handbook*. [online]. [cit. 10.4.2016].
<http://www.sciencemadness.org/talk/files.php?pid=304820&aid=26988>
- [27] Hasiči zasahovali u výbuchu rodinného domku v Ostravě-Martinově. *Požáry.cz*. [online]. [cit. 10.4.2016].
<http://www.pozary.cz/clanek/77358-hasici-zasahovali-u-vybuchu-rodinneho-domku-v-ostrove-martinove-v-sutinach-nalezli-zraneneho-muze>
- [28] SOLIDWORKS Web Help. *Dynamická zatížení*. [online]. [cit. 10.4.2016].
http://help.solidworks.com/2013/czech/SolidWorks/cworks/c_Dynamic_Loads.htm
- [29] Statistické ročenky Hasičského záchranného sboru ČR. *Hasičský záchranný sbor České republiky*. [online]. [cit. 10.4.2016].
<http://www.hzscr.cz/clanek/statisticke-rocenky-hasicskeho-zachranneho-sboru-cr.aspx>
- [30] Protivýbuchová ochrana staveb. *Zjednodušený výpočet odezvy stěnodeskové konstrukce*. [online]. [cit. 10.4.2016].
http://pvoch.cvut.cz/ke_stazeni/

Seznamy

Seznam obrázků

Obr. 3.1 Výbuchový trojúhelník [11]	5
Obr. 3.2 Typické následky náhodného úniku hořlavého plynu do atmosféry [26]	6
Obr. 3.3 Idealizovaný průběh tlaku při odlehčeném výbuchu [22]	8
Obr. 4.1 Ukázka RD v Martinově před a po vzniku mimořádné události [27]	12
Obr. 4.2 Půdorys 1.NP rodinného domu v Ostravě - Martinov [24]	13
Obr. 5.1 Ukázka rodinného domu před a po výbuchu plynu [27]	15
Obr. 5.2 Ukázka porušení konstrukcí v důsledku vzniklého přetlaku při výbuchu [26]	15
Obr. 5.3 Roviny porušení při ohybovém namáhání zděné stěny [5]	16
Obr. 6.1 Ukázka dynamických zatížení [28]	20
Obr. 7.1 Ukázka numerického modelování konstrukce programem ANSYS	23
Obr. 8.1 Půdorys řešeného rodinného domu.....	24
Obr. 9.1 Vytvořený model rodinného domu.....	29
Obr. 9.2 Ukázka vlastních tvarů pro 5. a 10. frekvenci konstrukce.....	30
Obr. 9.3 Půdorys RD s označením stěn, na které bylo zadáno zatížení výbuchem	32
Obr. 9.4 Výsledný průhyb konstrukce v ose X.....	33
Obr. 9.5 Výsledný průhyb konstrukce v ose Y	33
Obr. 9.6 Výsledný průhyb konstrukce v ose Z	34
Obr. 9.7 Ukázka vlastních tvarů konstrukce pro 2. a 7. frekvenci.....	35
Obr. 9.8 Výsledný průhyb stěn v ose X.....	37
Obr. 9.9 Výsledný průhyb stěn v ose Y	38
Obr. 10.1 Ukázka výpočtu průhybu modelované zděné stěny	40

Seznam tabulek

Tab. 3.1 Počet výbuchů v ČR v jednotlivých letech dle statist. ročenek HZS ČR [29]	10
Tab. 5.1 Poškození objektů přetlakem p_+ od účinků výbuchu [13]	17
Tab. 6.1 Příklady kategorizace podle typů pozemních staveb [4]	18
Tab. 8.1 Výpočet ekvivalentního statického tlaku	26
Tab. 9.1 Přehled použitých materiálů pro tvorbu modelu	29
Tab. 9.2 Výpočet vlastních frekvencí programem ANSYS	30
Tab. 9.3 Výpočet dynamického součinitele	31
Tab. 9.4 Mezní průhyb zděné stěny při ohybovém namáhání	32
Tab. 9.5 Mezní průhyb stropní konstrukce	32
Tab. 9.6 Porovnání vypočtených maximálních průhybů s mezními průhyby	34
Tab. 9.7 Výpočet vlastních frekvencí konstrukce programem ANSYS	35
Tab. 9.8 Výpočet dynamického součinitele pro stěny	36
Tab. 9.9 Mezní průhyb zděné stěny při ohybovém namáhání	37
Tab. 9.10 Porovnání vypočtených maximálních průhybů stěn s mezními průhyby	38
Tab. 10.1 Porovnání maximálních průhybů zděné stěny	41

Seznam příloh

Příloha 1 - Půdorys 1.NP řešeného rodinného domu

Příloha 2 – Okrajové podmínky modelu rodinného domu

Příloha 3 – Modální analýza konstrukce rodinného domu

Příloha 4 – Vektorové znázornění maximálních průhybů při účincích výbuchu

Příloha 5 – Výsledné napětí v konstrukci rodinného domu