

Odezva konstrukce budovy a ohrožení jejích obyvatel výbuchem plynu

Doc. Ing. Daniel Makovička, DrSc.

ČVUT v Praze, Kloknerův ústav, 166 08 Praha 6, Šolínova 7

Ing. Daniel Makovička, Jr.

Statika a dynamika konstrukcí, 284 01 Kutná Hora, Šultysova 170

Klíčová slova: zdivo, odezva konstrukce, zatížení výbuchem, kritéria porušení, ohrožení osob

Souhrn

Článek je věnován vlivu výbuchového zatížení na zděnou konstrukci budovy při výbuchu uniklého zemního plynu z potrubního rozvodu v chodbové a schodišťové části domu. Jsou porovnávána kritéria namáhání zdiva při běžném statickém zatížení od návrhových - projektových zatížení s odezvou konstrukce při zatížení výbuchem relativně malé intenzity. Jsou uvedena kritéria pro ohrožení konstrukce objektu a jeho částí a také kritéria pro ohrožení osob uvnitř objektu.

Na příkladu obytné budovy se třemi nadzemními podlažími je stanovena odezva nejvíce zatížené části konstrukce a komentována prognóza porušení budovy a ohrožení jejích obyvatel.

1. Úvod

Při úniku plynu z potrubních rozvodů uvnitř obytných domů může dojít k nahromadění plynu v uzavřených chodbových prostorech nebo prostorech obytných místností a při vhodné iniciaci plynu např. elektrickou jiskrou k jeho výbuchu. Na příkladu staršího třípatrového zděného domu v uliční zástavbě městské části je řešen tento problém. Cílem práce je analýza dynamické odezvy nejvíce namáhaných nosných zdí uvnitř budovy, situovaných nejbližší výbuchu, spolu s uvedením kritérií pro porušování objektu výbuchovým zatížením. Za doplňující lze považovat i posouzení ohrožení osob v blízkých bytech, nebo v okolí domu účinky výbuchu.

Analyzovaný objekt má čtyři nadzemní podlaží (obr.1). Dům byl postaven mezi lety 1939 až 1945, jedná se tedy o objekt, který je typickým představitelem uliční zástavby menších měst. Nosná konstrukce domu je zděná s dřevěnými trámovými stropy. Vstup do domu je z ulice přes zádveří po vstupním schodišti do zvýšeného přízemí. Vstupní chodba je uzavřena proti vnitřní chodbové části dveřmi. Ve vnitřní části domu je ve zvýšeném přízemí chodba o půdorysných

rozměrech 4000×2000 mm. Ve vnitřní části domu je dvouramenné schodiště, se schodnicemi nad sebou na celou výšku budovy. V mezipatrech jsou skleněné dveře, oddělující chodbové části jednotlivých pater od vnitřní chodby se vstupy do jednoduchých malometrážních bytů. Na chodbě ve zvýšeném přízemí se nachází rovněž zařízení pro rozvod plynu a plynoměr. V těchto místech chodbové části došlo k výronu plynu. Plyn se rozšířil do vnitřních prostor chodby ve zvýšeném přízemí a do prostoru vnitřního schodiště.

2. Výbuchové zatížení

Podle skutečné události uniklo do vnitřních prostor přibližně 340 m³ zemního plynu, který ve směsi se vzduchem zaplnil prostory chodby zvýšeného přízemí a vnitřního schodiště přibližně do úrovně 1.patra (2.NP). Podle přibližných odhadů [3, 4] může výbuch tohoto plynného oblaku působit na stěny chodby ve zvýšeném přízemí a na schodišti do 1.patra, včetně dveří do bytů v 1.NP a na spojovací dveře do vstupní chodby a schodišťové dveře mezi 1.NP a 2.NP, přetlakem 5 kPa až 15 kPa s dobou působení přetlaku 0,5 až 0,8 s (obr.2). Při odhadu parametrů výbuchu byla respektována skutečnost, že výbušný oblak není v uvedených prostorách těsně uzavřen, ale může pronikat netěsnými dělicími dveřmi a okenními otvory do okolí. Přesnější stanovení úrovně přetlaku od výbuchu je problematické, neboť záleží na konfiguraci prostoru zaplněného výbušnou směsí, na přesném složení směsi apod. Pravděpodobný tvar průběhu přetlaku má charakter přibližně podle obr.2, kde kvazistatická část přetlaku má přibližně exponenciální klesající průběh na který jsou superponovány špičky odražené vzdušné rázové vlny od stěn, stropu a podlahy prostoru, ve kterém došlo k výbuchu.

Zjednodušeně se při stanovení charakteru zatížení zpravidla vychází z následujících zjednodušujících předpokladů:

- a) zatěžující impuls má v čase trojúhelníkový tvar a maximální intenzita impulsu odpovídá přetlaku výbuchu s uvážením výfuků tlaku prostřednictvím otevřených okenních a dveřních otvorů;
- b) tlaková vlna má rovinné čelo, tedy zatížení v jednotlivých bodech zatěžované konstrukce působí bez fázového zpoždění;
- c) zatížení zatěžuje stavební konstrukci (zeď, strop, okna ap.) spojitě a rovnoměrně, není tedy uvažován lokální efekt soustředěného zatížení, případně vliv pohybu trosek na poškození dalších částí konstrukce nebo zařizovacích předmětů v bytech.

3. Porušení okenních a dveřních konstrukcí

Časový průběh zatížení od výbuchu plynu je výrazně ovlivněn otevřenými otvory z uzavřeného prostoru uvnitř objektu. K tomuto otevření dojde v okamžiku porušení zasklení

oken a dveří, případně při destrukci plných dveřních či jiných výplní (zasklení schodiště skleněnými cihlami, lehké příčky apod.).

O porušení zasklení při působení tlakové vlny kolmo na střednicovou rovinu skla, rozhoduje buď dosažení meze pevnosti skla za ohybu, nebo dosažení úhlu lomu skleněné okenní tabule (tento úhel lomu je podle experimentálního ověření [6] $\alpha = 0,024 \sim 0,029$), nebo i druhotně náraz trosek, nesených výbuchovou vlnou.

O vytržení celé okenní nebo dveřní konstrukce ze zdiva nebo jiného materiálu konstrukce stěny rozhoduje způsob zajištění smykové únosnosti spoje okna nebo dveří se stěnou.

O vytržení celých okenních křídel nebo dveří rozhoduje směr působení zatížení na okenní křídlo a smyková pevnost konstrukce rámu okenního křídla a dále tahová, eventuálně smyková nebo ohybová pevnost závěsů podle uspořádání celé okenní konstrukce.

Okamžik porušení prosklení lze odhadnout z nomogramů [9], sestavených na základě experimentálních a teoretických analýz okenních skel při zatížení trojúhelníkovým přetlakem vzdušné rázové vlny (obr.3). Konkrétně pro skleněné tabule $0,5 \times 1,0$ m při tloušťce okenního skla 3 mm je při délce trvání přetlaku $\tau_+ = t = 0,8$ s (označení t použito na obr.3), je mezní velikost přetlaku rázové vlny přibližně $p_+ = 1,15$ kPa, která způsobí porušení hladkého skla daných rozměrů. Pro větší tabule skla nastává porušení již při nižších přetlacích.

Z uvedených hodnot porušení zasklení vyplývá, že následkem přetlaku od výbuchu plynu dojde v konkrétní námi uvažované budově k následujícím škodám:

- a) rozbití skel v oknech na schodišti,
- b) rozbití skel ve dveřích a vyrazení vstupních dveří do budovy,
- c) rozbití skel ve dveřích a vyrazení dělicích dveří mezi zádveřím a chodbou v přízemí,
- d) vyrazení vstupních dveří do bytů v přízemí
- e) a následně po vyrazení dveří i rozbití skel v oknech v obou bytech v přízemí.

Obdobně jako v případě skleněných výplní byla i únosnost okenních rámu ověřována při výbuchovém zatížení [6, 8]. Z výsledků těchto prací byla sestavena tab.1 pro odhad únosnosti okenních a dveřních konstrukcí. Z tab.1 vyplývá, že následkem výbuchu s přetlakem 5 až 15 kPa budou rozbity:

- a) okenní a dveřní rámy ve zvýšeném přízemí a ve schodišťové části,
- b) rám vstupních dveří do budovy.

Poznámky k odhadu porušení okenních a dveřních konstrukcí:

Pro starší okna s poškozeným dřevem rámu nebo okenních či dveřních zámků může dojít k vylomení dřeva při mnohem menších přetlacích výbuchu.

Okna v místě okenních závěrů (zadlabané otvory pro jazýčky, okenní tyče ap.) mívají plechové kování. Toto kování zvyšuje únosnost spoje, proti výše uvedeným hodnotám.

Možným vlivem na porušení skla je také deformace okenního křídla ohybem. Pokud je ohybová únosnost měkkého dřeva nebo plastového či ocelového rámu překročena, může dojít k lámání rámu okenního křídla. Při velkých deformacích rámu, které mohou nastat u tenkých dřevěných profilů okenních křídel nebo i u ocelových či plastových rámu, pak zpravidla dojde i k překročení ohybové únosnosti skla, jejímž důsledkem jsou vodorovné praskliny skla v místě největšího napětí (tedy ve výše uvedeném případě ve středu rozpětí) a tím i k poklesu únosnosti celé okenní tabule.

Dalším stavem porušení může být vytržení celého okna z obvodové zdi. V tomto případě záleží na způsobu kotvení okna ve zdi pomocí lavičníků, ozubů ve zdi ap.

Z výše uvedeného příkladu vyplývá, jak je významné při rekognoskaci nebo prognóze havárie se zabývat nejen rozměry rozbité tabule včetně stavu zatmělení, ale také stavem závěsů a uzávěrů, trvalými deformacemi rámu okenních křídel, vysunutím celého okna ze zdiva, ap.

Na základě výše uvedených poznámek je zřejmé, že tab.1 udává pouze pravděpodobný odhad účinků výbuchu na konstrukce tohoto typu. U nových konstrukcích může být únosnost oken a dveří i o 50% vyšší než udává citovaná tab.1. Naopak při starších oknech nebo dveřích, v závislosti na míře jejich opotřebení, může být jejich únosnost výrazně nižší, někdy i pouze 10% až 20% únosnosti uvedené v tab.1.

4. Odezva konstrukce

Výpočtové modely

Cílem výpočtové analýzy bylo stanovit odezvu nejvíce namáhaných částí konstrukce. Jedná se jednak o nosné zdivo stěny mezi chodbovou částí a přízemím, oslabené vstupními dveřmi do bytu na výšku jednoho podlaží a dále zdivo chodbové části přes výšku dvou podlaží (obr.4). Oba výpočtové modely byly sestaveny jako dílčí (úsekové) modely, odpovídající nosným zdem ve vnitřní části chodby 1.NP a schodišťové části mezi 1.NP a 2.NP, v místech, kde se předpokládá zatížení od výbuchu. Příčné nosné zdi, navazující na relativně jednoduché úsekové modely vytváří přirozené opěry posuvu modelované zdi jako celku a proto ve zjednodušeném případě lze modely zdiva A i B považovat za dostatečně vypovídající. Protože na modelovaných zdech spočívá i konstrukce stropů, je havarijní poškození – destrukce těchto modelovaných zdí dominantní skutečností pro bezpečnost celého objektu.

a) **Zed' A**: rozměr 3200 × 2800 × 300 mm – jedná se o zdivo stěny bytu ve zvýšeném přízemí se vstupními dveřmi do bytu.

b) **Zed' B**: schodišťová zed' na výšku dvou podlaží s rozměry $5000 \times (2 \times 2800) \times 250$ mm.

Lokalizace těchto částí konstrukce je zakreslena do schématu budovy na obr.1. Nosné zdivo uvnitř budovy pokračuje do vyšších podlaží objektu; z tohoto důvodu napojení zdiva na ostatní zděné konstrukce budovy bylo uvažováno jako vetknutí. Dveřní otvor v modelu *zed' A* byl uzavřen dřevěnou deskou, odpovídající tuhosti dveří. Napojení dveří na zděnou konstrukci bylo uvažováno jako kloubové – opření dveří o dveřní zárubeň zabraňuje posuvu dveří, ale umožňuje pootočení okolo osy spoje. Model *zed' B* je vysoký na výšku dvou podlaží. Kontakt ve střední části byl modelován jako kloubový – stropní konstrukce brání posuvu ve vodorovném směru, ale umožňuje pootočení okolo osy spoje. Zdivo výpočtových modelů bylo kromě dynamických účinků výbuchu zatíženo staticky zatížením od stálých zatížení z vyšších podlaží (zatížení od vlastní tíhy a odhadnuté stálé složky užitných zatížení).

Oba výpočetní modely byly zatíženy dynamickým trojúhelníkovým zatížením od výbuchu plynu, působícím rovnoměrně na celou stěnu výpočtových modelů ploše modelu, kolmo na jejich střednicovou rovinu:

- náběhová hrana do maximálního přetlaku 0,05 s (odhadem),
- maximální intenzita přetlaku 15 kPa s dobou trvání 0,8 s.

Vzhledem k cílům analýzy zaměřené na posouzení zda výbuch mohl vést k destrukci budovy nebo nikoliv, byly pro tento účel použity uvedené dílčí modely. Přesnější řešení např. modelováním větší části konstrukce v daném případě nemělo smysl, protože dynamické zatížení od výbuchu plynu bylo známo s odhadovanou chybou - nepřesností v řádu 100 %, případně i více.

Materiálové vlastnosti zdiva

Zdivo budovy je provedeno z plných cihel s rozměry $290 \times 140 \times 65$ mm, pevnostní označení cihel P10 na vápenocementovou maltu, značky 2 až 4 s výškou spár zdiva odhadem 10 mm. Cihelné konstrukce lze zjednodušeně posuzovat až do vzniku trhlin jako lineárně pružnou soustavu [7, 9, 10]. O porušování běžných zděných konstrukcí rozhoduje pevnost zdiva v tahu za ohybu podle příslušných norem pro navrhování (viz tab.3 v ČSN 73 1101 [1]).

Důležitou veličinou pro provedení výpočtu odezvy je modul pružnosti E zdiva, který lze odhadnout z modulu přetvárnosti E_{def2} (podle čl.38 v ČSN 73 1101 [1]) a následně se doporučuje upravit podle experimentálně ověřených zkušeností autorů příspěvku [7, 9, 10]:

a) pro výpočet dynamické odezvy neporušené konstrukce v blízkosti meze porušení:

$$E \approx 0,5 \cdot E_{def2} = 0,5 \cdot 945,0 = 472,5 \text{ MPa};$$

b) pro výpočet dynamické odezvy konstrukce již dříve porušené trhlínami:

$$E \approx 0,1 \cdot E_{def2};$$

c) pro výpočet staré konstrukce se podle míry možnosti vzniku trhlin ve zdivu odhadne modul pružnosti v rozmezí modulů spočtených podle a) a b)

$$E \approx 0,1 \sim 0,5 \cdot E_{\text{def}2}.$$

Z výše uvedených variant je zřejmé, že reálný modul pružnosti pravděpodobně leží v blízkosti 472 MPa. Podle citované normy rozhoduje o únosnosti konstrukce pevnost cihelného zdiva v dostředném a mimostředném tlaku $R_d = 0,90$ MPa a v dostředném tahu za ohybu $R_{\text{tfd}} = 0,02$ MPa (v rovné spáře) až 0,04 MPa (v zazubené spáře). I toto normové kritérium není úplně přesné – o skutečné destrukci stěny rozhoduje mezní deformace – odpovídající kritickému úhlu natočení střednice konstrukce v důsledku jejího ohybu, který je podle dříve publikovaných prací [9, 10] přibližně v rozmezí 2° až 3° podle stáří a kvality zdiva.

Analyza konstrukce a její ohrožení

Součástí výpočtu obou modelů konstrukcí na výbuchová zatížení bylo stanovení naladění konstrukce. Vzhledem k časové charakteristice výbuchového zatížení jsou rozhodující nejnižší vlastní frekvence a tvary kmitání konstrukce. Nejnižší vlastní tvary kmitání jsou pro zeď A na frekvencích 33,4 Hz a 38,7 Hz a pro zeď B na frekvencích 12,2 Hz a 16,5 Hz. Útlum kmitání byl podle podle ČSN 73 0032 [2] odhadnut logaritmickým dekrementem tlumení $\Theta = 0,12$, který byl do výpočtu zaveden jako Rayleighův útlum pomocí součinitelů α při matici hmotnosti a β při matici tuhosti pohybových rovnic:

Zed' A: součinitelé útlumu: $\alpha = 4,302$; $\beta = 0,000084$;

Zed' B: součinitelé útlumu: $\alpha = 1,637$; $\beta = 0,000212$.

Charakter odezvy je vzhledem k délce působení dynamického zatížení kvazistatický. Na kvazistatickou složku deformace je superponována dynamická amplituda průhybů na nejnižších vlastních frekvencích.

Na obr.5 je pro oba modely konstrukce uvedena výsledná vypočtená obálka odezvy konstrukce v průhybech při dynamickém zatížení. Na obr.6 a obr.7 je obálka dosažených napětí při povrchu zdiva. Maximální namáhání zděné konstrukce jsou uvedena v tab.2.

Mez pevnosti zdiva v tahu za ohybu při porušení ve spárách mezi cihlami je podle ČSN 73 1201 napětích 20 kPa až 40 kPa. Protože vypočtená napětí podle tab.2 s rozložením napjatosti v konstrukci podle izolinií na obr.6 a obr.7 výrazně (řádově) překračují pevnost malty ve zdivu, dojde při tomto zatížení k rozvoji řady trhlin jak ve spárách mezi zdivy, tak napříč přes cihly. U konstrukce schodiště dojde vzhledem k významnému překročení pevnosti v tahu za ohybu k výrazným poruchám zdiva, možnému vypadnutí nebo posunutí celých bloků zdiva.

Porovnejme vypočtené vodorovné průhyby pro obě zdi:

Zed' A maximálně 2,3 mm, maximální úhel ohýbaných částí 0,11°(u podpor)

Zed' *B* maximálně 4,8 mm, maximální úhel ohýbaných částí 0,20° (na rozhraní 1.NP a 2.NP).

Podle kritéria mezního úhlu ohýbané konstrukce, je nepravděpodobné, že by obě zdi při výbuchu bezprostředně havarovaly, nicméně mohou se v nich rozevřít trhliny, může dojít k vypadnutí cihel ze stěn, zejména na volných okrajích u schodišťové zdi *B*, nebo v blízkosti dveřní zárubně u zdi *A*. V případě takovéto vážné havárie může dojít druhotně i k rozvolnění stropů, odpadnutí omítek, porušení lehkých příček na stropní konstrukci apod.

5. Ohrožení osob

Účinky výbuchu jsou nebezpečné pro zdraví osob, jestliže přetlak p_+ ve vzdušné rázové vlně, působící na osobu v konstrukci nebo v otevřeném terénu, je větší než 10 kPa. Škody na zdraví osob v závislosti na velikosti přetlaku je možné přibližně uvažovat podle následující tab.3.

Při posuzování ohrožení zdraví nebo života obyvatel domu, je tedy pravděpodobné, že minimálně část obyvatel, přítomných v domě, by byla těžce zraněna. Nelze vyloučit ani smrtelná zranění, zejména v místnostech okolo schodiště.

Při výbuchu plynu uvnitř objektu bude dále vymeteno sklo a úlomky dveří ven do zahrady a na ulici. Tlakové účinky výbuchu při otevření otvorů v konstrukci (oken a dveří v nejnižším podlaží) v důsledku ventilace výbuchu velmi rychle klesají. Je nepravděpodobné, že by byl přímo ohrožen další sousedící dům tlakovou vlnou v uliční zástavbě, s výjimkou rozbití oken v nejbližších objektech tlakovou vlnou nebo letícími troskami, případně poškození automobilů parkujících v blízkosti domu.

Porovnáme-li úroveň přetlaků výbuchu podle tab.3 s odhadem přetlaků v budově při výbuchu plynného oblaku, pak lze formulovat následující závěry:

- a) pokud by při výbuchu oblaku plynné směsi se nějaká osoba nacházela bezprostředně na chodbě zvýšeného přízemí nebo na schodišti v navazující části na přízemí byla by zřejmě těžce zraněna tlakovou vlnou. Kontaktní tlaky v ohnisku výbuchu jsou vyšší než velikost tlaku na obvodové stěny, který pro danou konfiguraci objektu může dosáhnout cca 15 kPa;
- b) osoby v bytech ve zvýšeném přízemí budou ohroženy výbuchy o přetlaku přibližně 15 kPa. Tento přetlak způsobí vylovení dveří a osoby v místnostech bezprostředně za vstupními dveřmi mohou přetlakem být povaleny a druhotně zraněny o ostré předměty v bytě, rohy skříní, stolu ap. Velmi pravděpodobné je, že by mohly být zraněny úlomky letících předmětů, např. zbytky dveří nebo skel. Trajektorie pohybu letících předmětů není jen přímá, ale může být i krouživá, takže ke zranění může dojít i ve stínu obvodových stěn místnosti;
- c) osoby na ulici před domem nebo na zahradě za domem mohou být zraněny troskami skel ze vstupních dveří do budovy, troskami okna schodiště a troskami vstupních dveří do budovy.

Kromě výše uvedených úrazů, mohou být lidé zraněni padajícími troskami schodiště, částmi zdiva, případně propadlými stropy. Tyto druhotné účinky havárie části budovy jsou mnohdy nebezpečnější než tlakové účinky od přetlaku výbuchu.

6. Závěr

Na příkladu obytné budovy městské zástavby je řešen problém výbuchu a ohrožení bezpečnosti budovy relativně krátkodobým – několikahodinovým únikem topného plynu. Příklad je převzat ze skutečné události; příčinou rizika výbuchu byla neodborná manipulaci jednoho z obyvatel domu s plynovým potrubím.

Analýza objektu, ohroženého výbuchem vychází z odhadu pravděpodobné intenzity a doby trvání přetlakové fáze výbuchu na základě uniklého množství plynu a prostor, které byly výbušnou směsí plynu se vzduchem zaplněny a dále využívá výsledky experimentálních i numerických analýz účinků výbuchu na konstrukce budov nebo částí budov, jako jsou zdivo, okna nebo dveře, provedené autory tohoto článku.

Na základě analýz i velmi zjednodušených modelů části konstrukce je zřejmé, že výbuch by způsobil vážné poškození budovy s dílčími haváriemi schodiště a navazujících stropů s důsledky na zdraví obyvatel uvnitř i v těsné blízkosti budovy. Při možné hranice intenzity výbuchu jsou předpokládané škody na objektu velmi vážné, spojené s vytržením oken, zkroucením rámu dveří a poškozením vstupních dveří, vypadnutím části zdiva ze stěn a vážnými škodami na vnitřních nosných zdech v přízemí a v patře.

Poděkování

Práce na této problematice byla podporována grantovým projektem GAČR: 103/03/0082 „Nelineární odezva konstrukcí při mimořádných zatíženích a zatíženích způsobených pohybem člověka“ s pokračováním podpory projektem GAČR 103/06/1521 „Spolehlivost a rizika konstrukcí v extrémních podmínkách“. Autoři si dovoluji touto cestou vyslovit grantové agentuře za její podporu svůj dík.

Literatura

- [1] ČSN 73 1101: *Navrhování zděných konstrukcí*, Český normalizační institut, Praha, 1980.
- [2] ČSN 73 0032: *Výpočet stavebních konstrukcí zatížených dynamickými účinky strojů*, Český normalizační institut, Praha, 1978.
- [3] Janovský, B.: *Výbuch ve vnitřním prostoru objektů, vnitřní výbuch*. Učební texty, 2002 Univerzita Pardubice, KTTV.

- [4] Janovský, B., Podstawka, T., Makovička, D., Horkel, J. & Vejs, L.: Pressure wave generated in vented confined gas explosions: Experiment and Simulation, In: *Transactions of 17th International Conference on SMiRT*, ed. Vejvoda, S., University of Technology, p. 240 + 8 pp. on CD, Brno, 2003, p. 240 + 8 pp. on CD.
- [5] Koloušek, V. a kol: *Stavebné konštrukcie namáhané dynamickými účinkami*. SVTL, Bratislava 1967.
- [6] Makovička, D.: Shock Wave Load of Window Glass Plate Structure and Hypothesis of Its Failure. In: *Structures Under Shock and Impact '98*. Computational Mechanics Publications, Southampton 1998, pp. 43-52.
- [7] Makovička, D.: Failure of Masonry Under Impact Load Generated by an Explosion. *Acta Polytechnica*, Vol. 39, No. 1/1999, pp. 63-91.
- [8] Makovička, D.: Explosion Hazard to Buildings and Design Load Parameters. In: Jones, N., Brebbia, C.A.: *Structures Under Shock and Impact VI*. WIT Press, Southampton 2000, pp. 373-382.
- [9] Makovička, D., Makovička, D.: Failure of masonry under explosion effect, In: Jones, N., Brebbia, C.A.: *Structures Under Shock and Impact VIII*, WIT Press, Southampton, 2004, pp. 475-484.
- [10] Makovička, D., Makovička, D.: Vliv opakovaných extrémních zatížení na ohybovou únosnost zdiva, *Stavební obzor*, 2006, č.2, s. 37-43.

Tab.1 Charakter poškození budov a jejich součástí přetlakem p_m v dopadající vzdušné rázové vlně od účinků výbuchu

p_m [kPa]	Účinek
do 0,5	Žádné poškození
0,5 ~ 1	Malé poškození okenních výplní (pouze část, praskliny skel bez vysypání trosek ap.)
1 ~ 2	Větší poškození okenních výplní, dílčí vysypání trosek skel
2 ~ 5	Částečné poškození rámu dveří a oken; porušení omítky a vnitřních dřevěných příček
5 ~ 20	Zničení oken; poškození lehkých staveb a běžných zděných staveb
10 ~ 30	Částečné rozrušení staveb převážně přízemní zástavby rodinných domů
20 ~ 30	Značné rozrušení městských vícepodlažních staveb

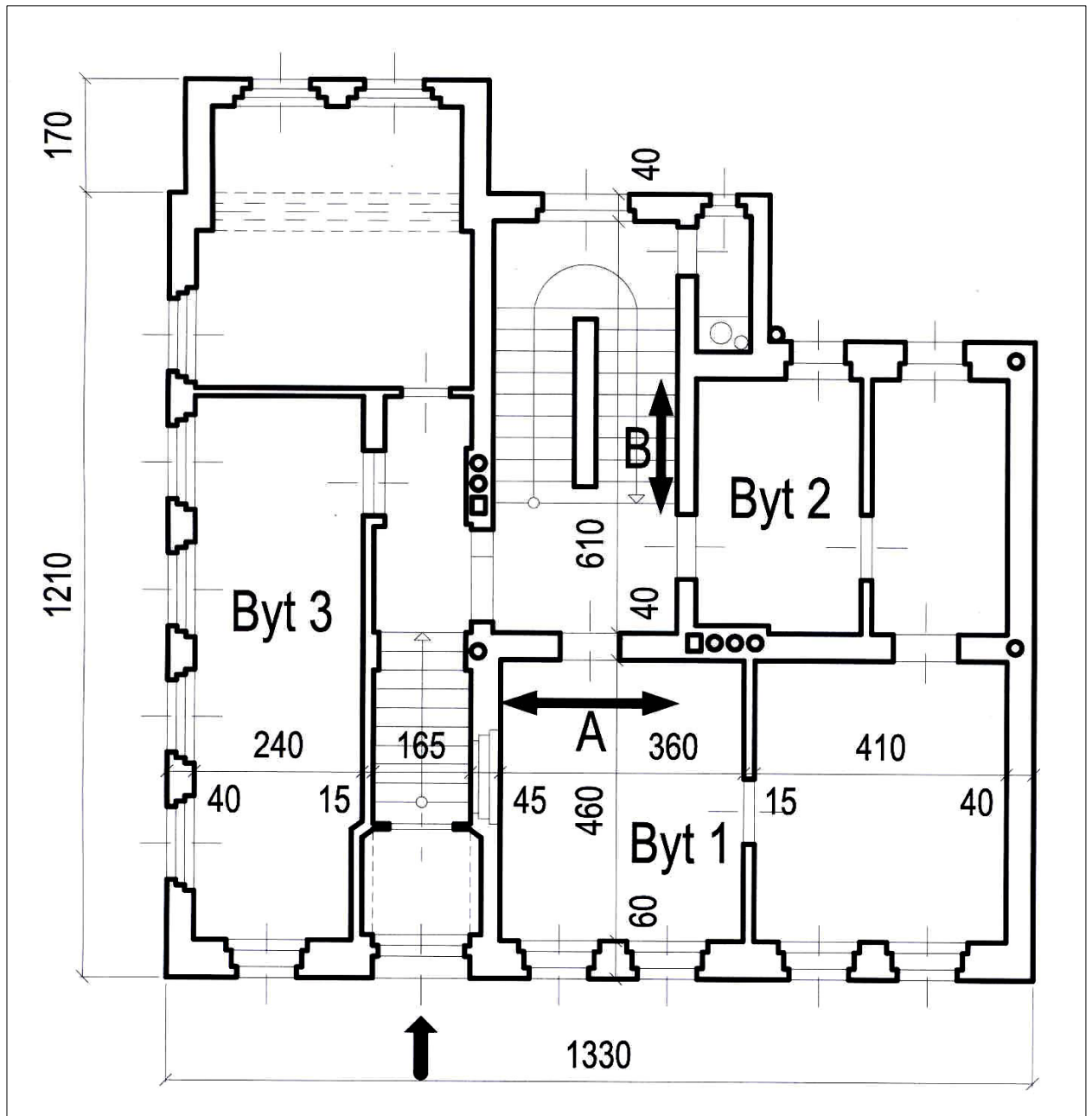
Tab.2 Vypočtená maxima namáhání nosné zděné konstrukce

Napětí v krajních vláknech	<i>Zed' A</i> [kPa]	<i>Zed' B</i> [kPa]
Od dynamického zatížení výbuchem:		
ve směru lokální osy x (svisle)	±889	±1187
ve směru lokální osy y (vodorovně)	±592	±680
Od stálých statických zatížení v konstrukci:		
ve směru lokální osy x (svisle)	-160	-210
ve směru lokální osy y (vodorovně)	-13 až -90	-3 až -20

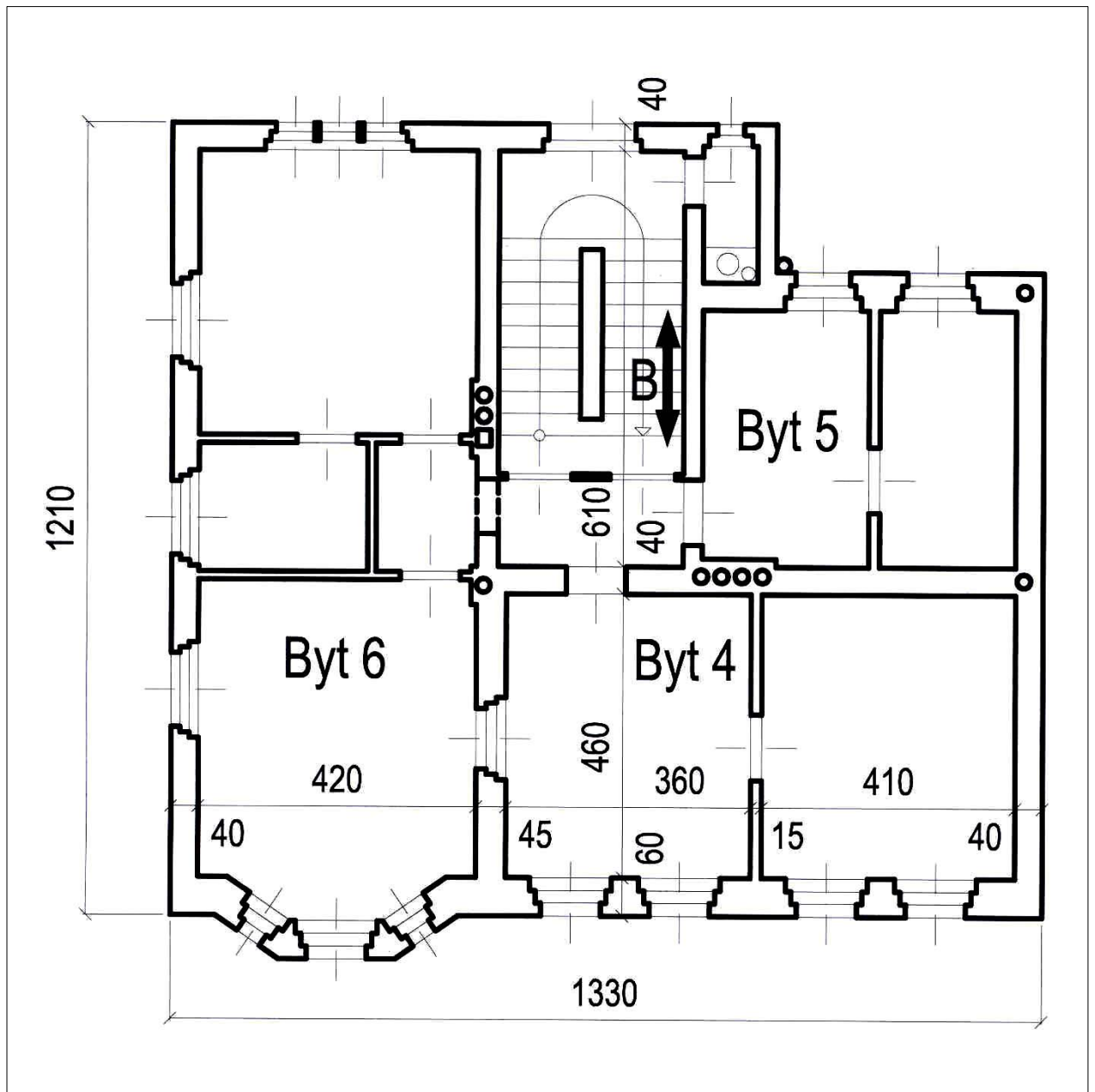
Tab.3 Zranitelnost osob přetlakem v dopadající vzdušné rázové vlně p_m

Skupina zranitelnosti	Přetlak p_m [kPa]	Popis zranění
0	měně než 10	Zranění od přímého působení tlakové vlny je nepravděpodobné
1	10 až 30	Lehké úrazy osob
		Při přetlaku cca 15 kPa dojde k povalení stojící osoby Při přetlaku cca 34 kPa dojde k prasknutí ušních bubínek
2	30 až 150	Těžké úrazy osob
3	150 až 200	Smrtelná zranění

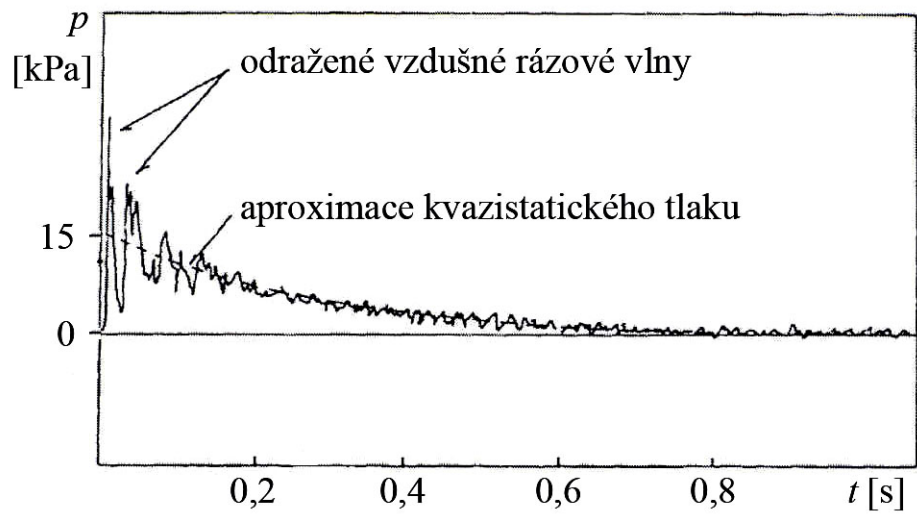
Poznámky:
Osoby mohou být poškozeny rovněž sekundárně, např. odletujícími troskami, pádem předmětů na stanoviště osob ap. Zvláště nebezpečné jsou malé přetlaky v rozmezí 5 až 20 kPa, při kterých je velmi pravděpodobné poranění osob troskami létajících (na velké vzdálenosti desítek až stovek metrů) rozbitých skleněných výplní oken a dveří, při tomto tlaku nejsou trosky sraženy k zemi, ale „plachtí“.
Tabulka byla sestavena podle výsledků lékařských a vojenských výzkumů na základě rešerší autorů podle amerických a ruských literárních pramenů.



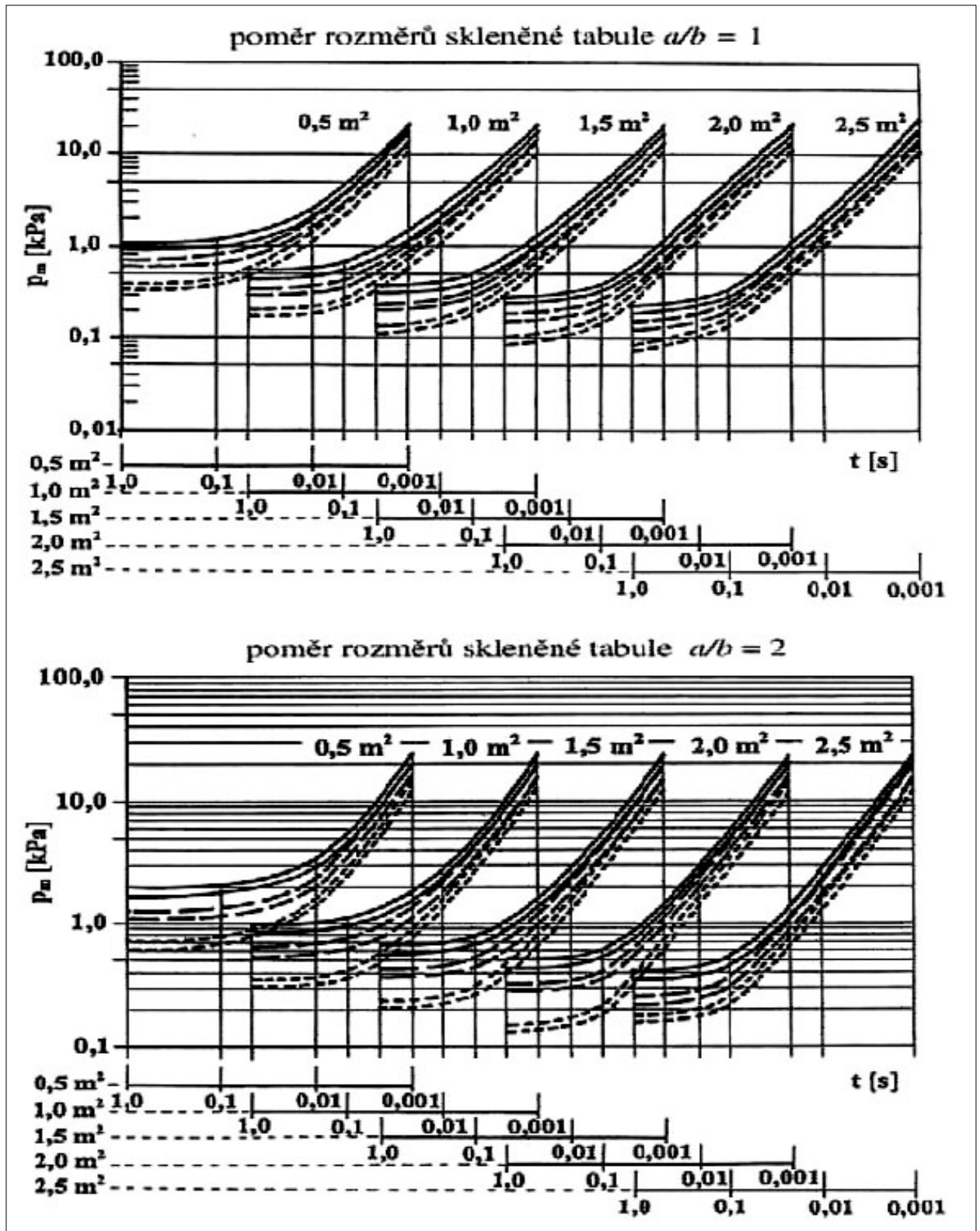
Obr.1a Půdorys přízemního podlaží vybrané obytné budovy městské zástavby



Obr.1b Půdorys 1.patra vybrané obytné budovy městské zástavby

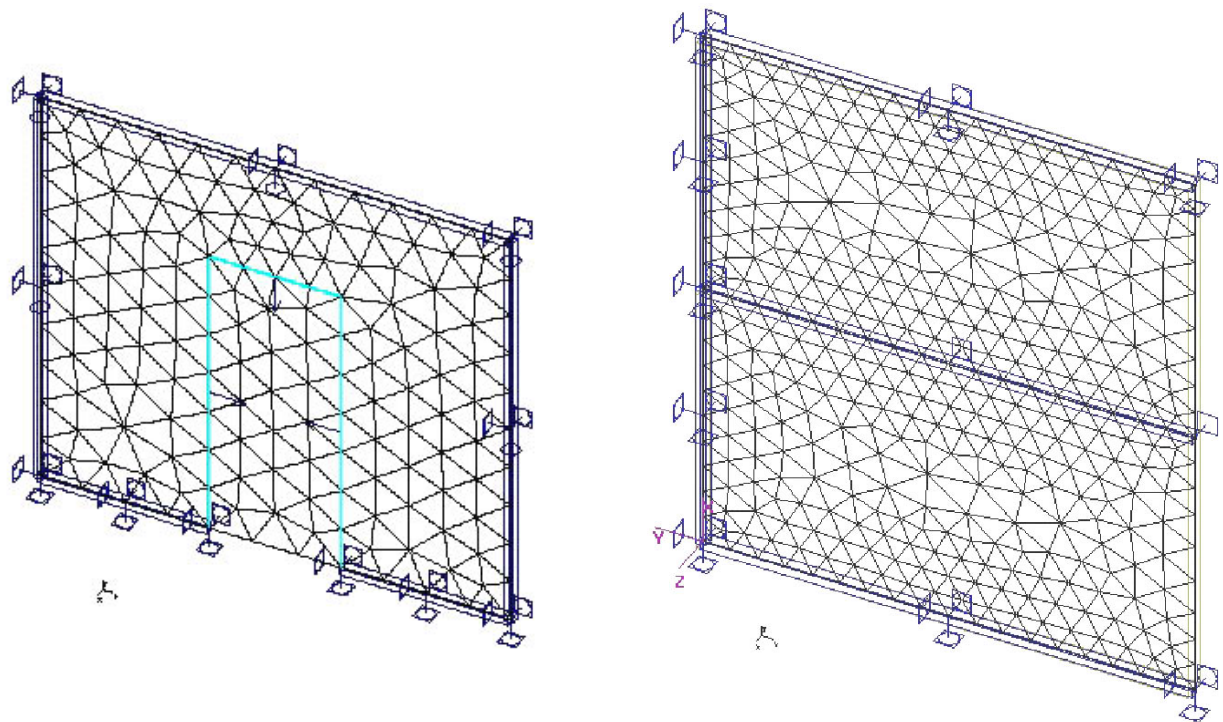


Obr.2 Odhad přetlaku generovaného výbuchem směsi plynu uvnitř vnitřních prostor budovy

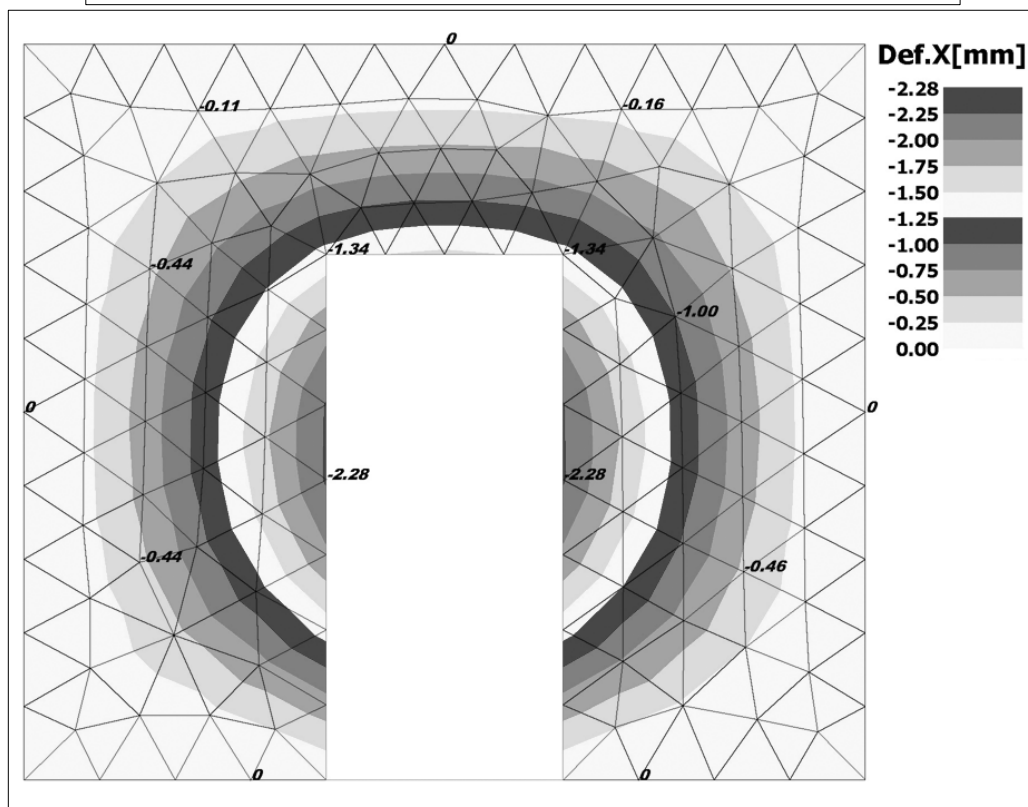
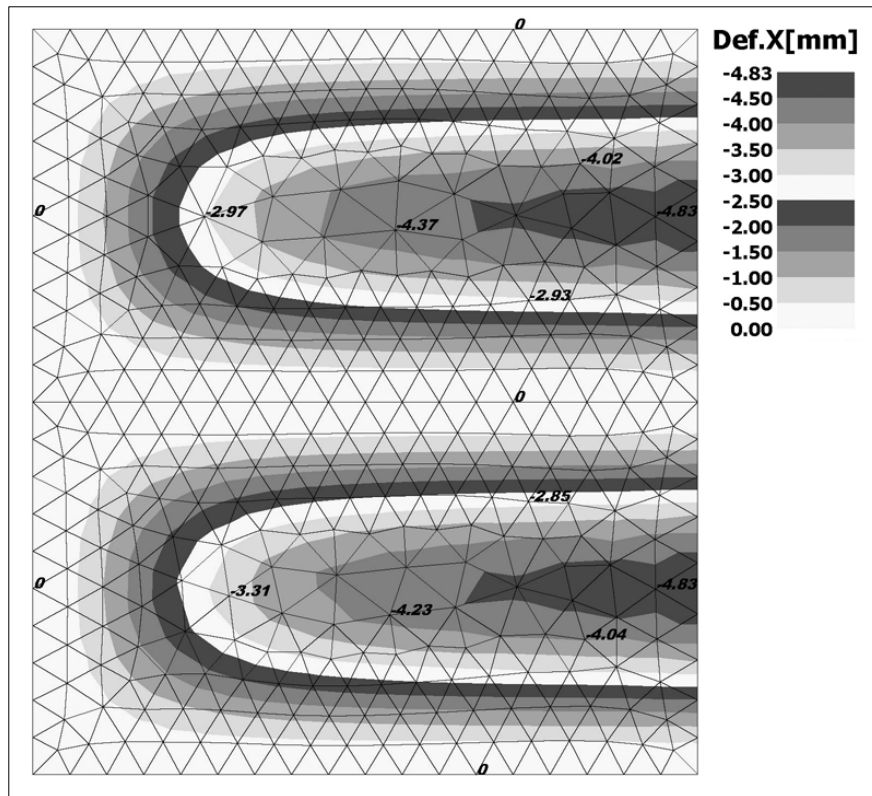


Obr.3 Mez porušení hladkého okenního skla s okenním tmelem uvolněným na polovině obvodu skla v závislosti na přetlaku v zatěžující rázové vlně p_m , době působení přtlaku t , ploše zasklení A , tloušťce a stáří okenního skla (tloušťku skla vyjadřuje typ čáry, stáří skla vyjádřeno dvojicí čar stejného typu, oboji stejně jako na obr.1)

a) poměr rozměrů skleněné tabule $a/b = 1$; b) $a/b = 2$

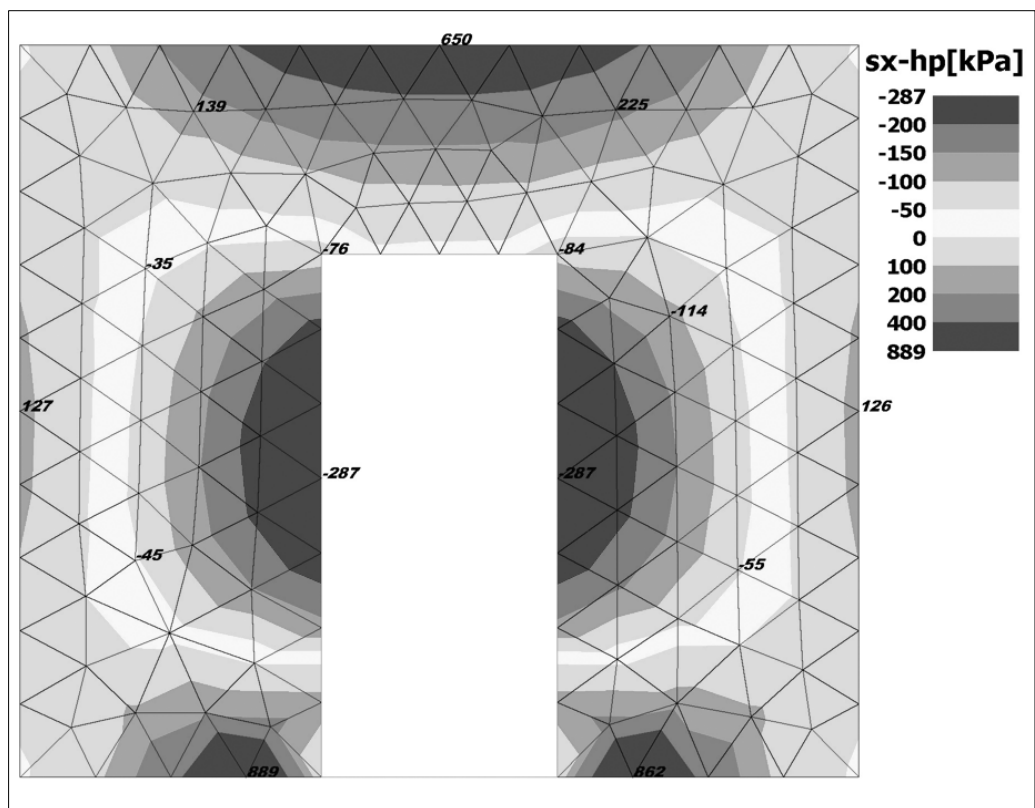
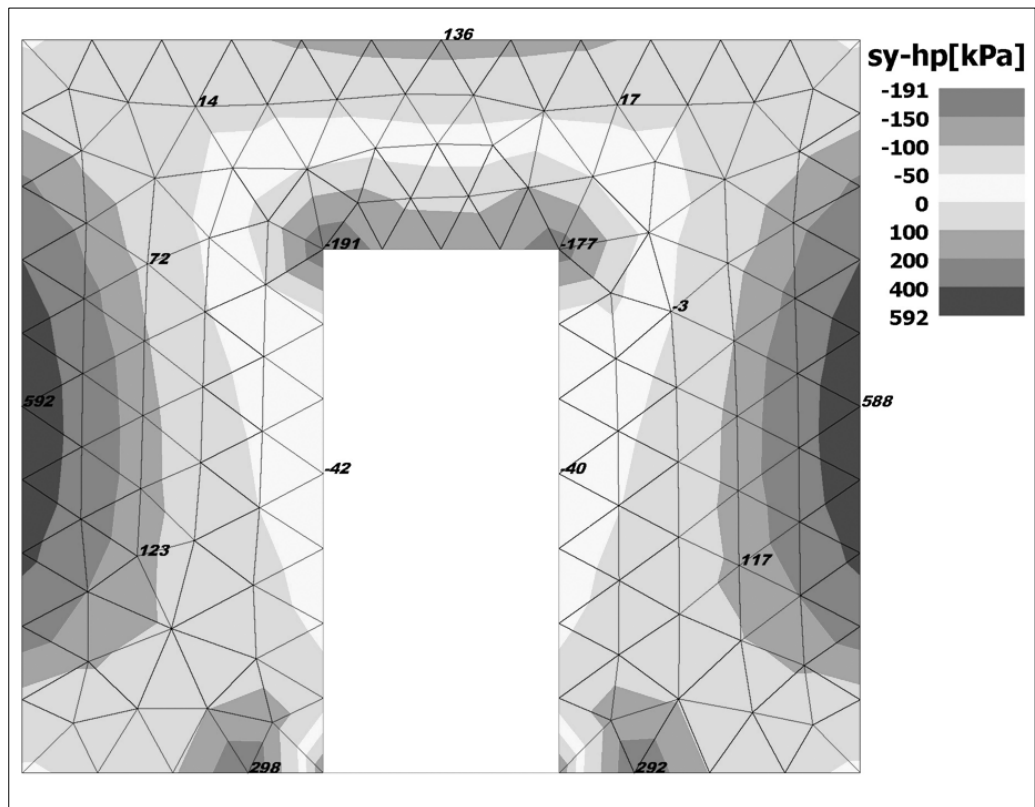


Obr.4 Výpočtové modely zdí *A* a *B* (úsekové modely)

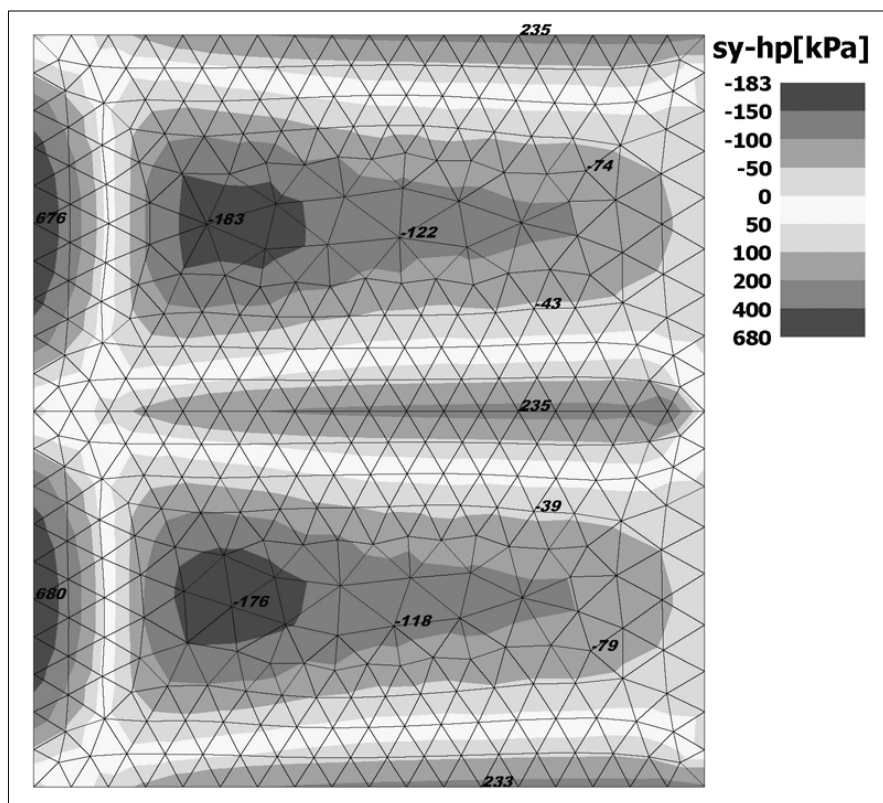
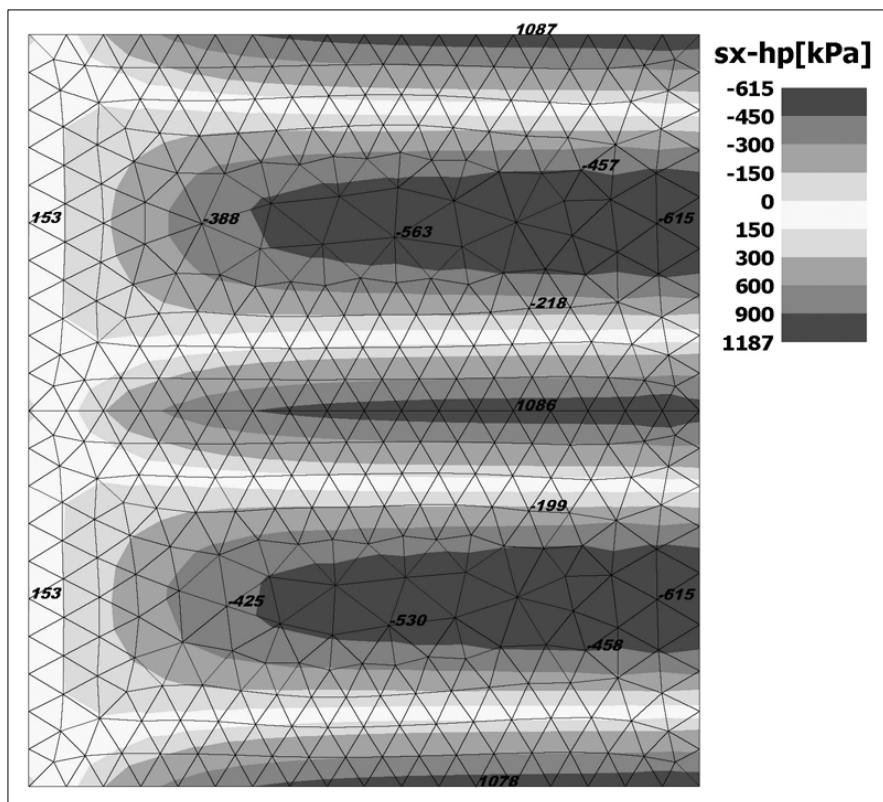


Obr.5 Tvar průhybové plochy při dosažení maximálních průhybů při dynamickém zatížení

a) model *zed' A*, b) model *zed' B*



Obr.6 Napětí při povrchu zdiva, odpovídající maximálním průhybům *zdi A* od zatížení výbuchem, a) napětí horizontálně, b) napětí vertikálně



Obr.7 Napětí při povrchu zdiva, odpovídající maximálním průhybům zdi B od zatížení výbuchem, a) napětí horizontálně, b) napětí vertikálně