

Praha 18.5. 2022

IDENTIFIKOVANÉ HROZBY

Marta KUŘÍKOVÁ, Matyáš KOŽICH,
Zuzana KUBÍKOVÁ a František WALD

České vysoké učení technické v Praze

FAILNOMORE

Mitigation of the risk of progressive collapse
in steel and composite building frames
under exceptional events



Research Fund for Coal & Steel

FAIL **NO
MORE**



1. ÚVOD

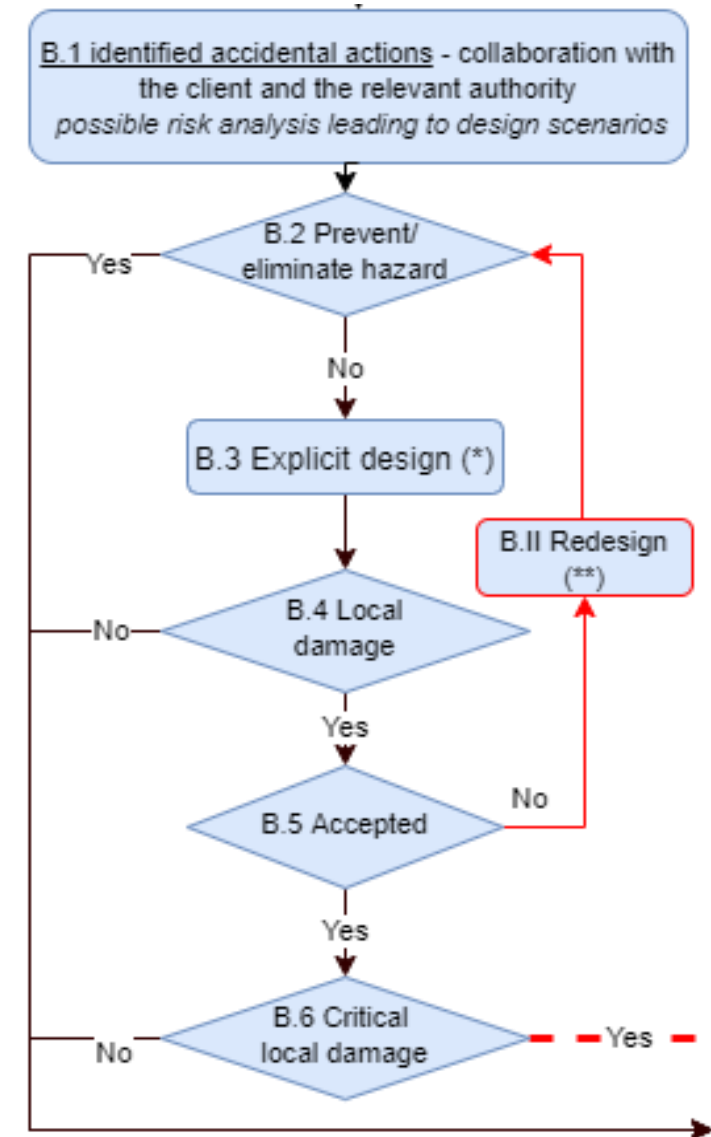
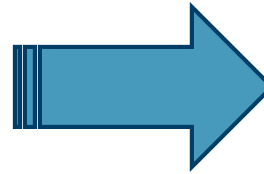
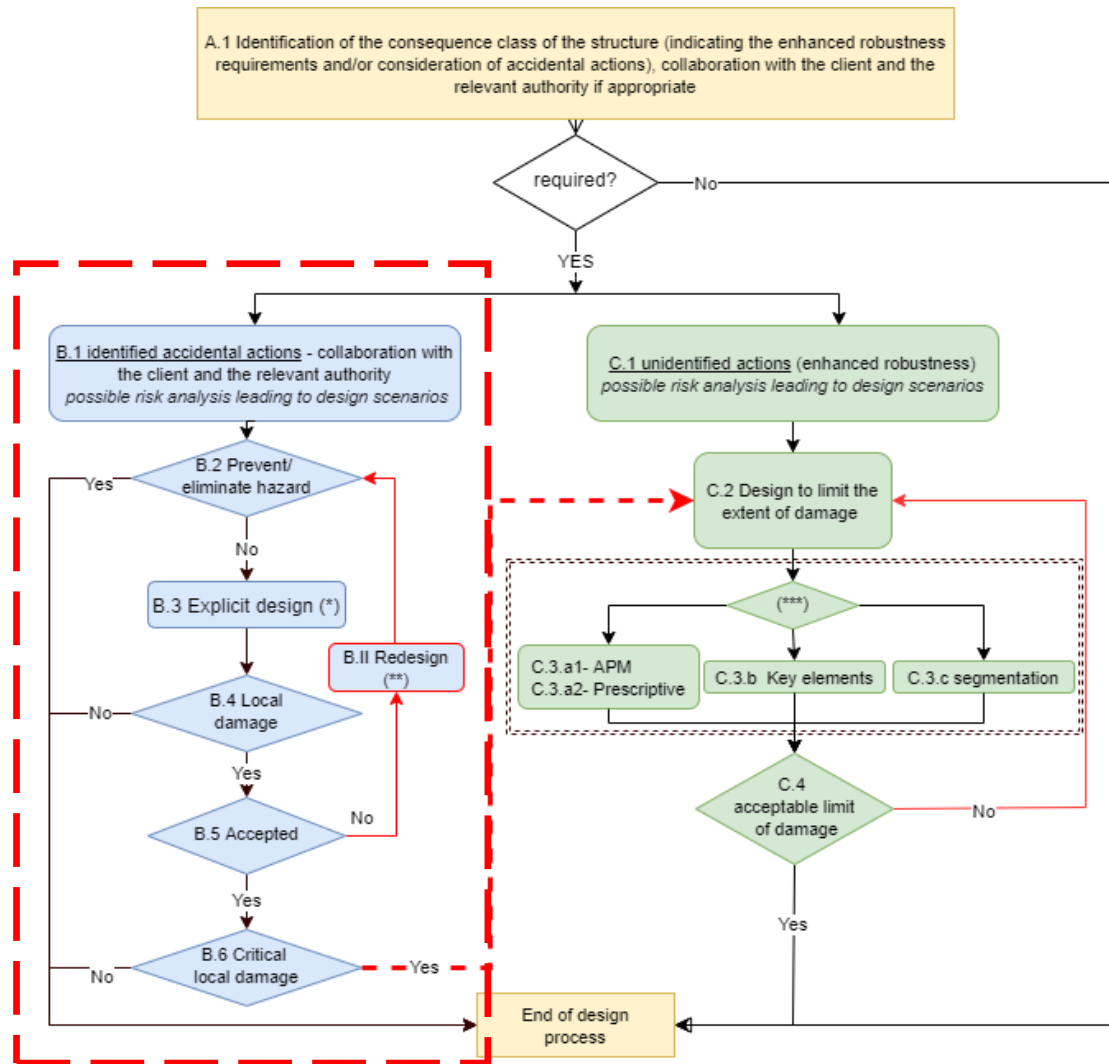
- 1. Úvod
- 2. Náraz
- 3. Výbuch
- 4. Požár jako mimořádná událost
- 5. Zemětřesení jako mimořádná událost
- 6. Závěr

■ Tato část popisuje strategie zmírňování rizika a návrhové přístupy pro pět typů identifikovaných mimořádných zatížení

■ Prezentace je rozdělena následovně:

- 1. Úvod
- 2. Náraz
 - 2.1 Návrhový postup pomocí ekvivalentní statické síly
 - 2.2 Zjednodušená dynamická analýza
 - 2.3 Úplná dynamická analýza
- 3. Výbuch
 - 3.1 Vnější výbuch
 - 3.2 Vnitřní výbuch plynu
- 4. Požár jako mimořádná událost
- 5. Zemětřesení jako mimořádná událost
- 6. Závěr

1. ÚVOD



1. ÚVOD

- Návrh na robustnost lze provést s ohledem na přímé účinky extrémního zatížení (**identifikovaná zatížení**)
- Pokud není výsledek návrhu přijatelný, je třeba konstrukci přepracovat (zmírnění nebezpečí nebo pokročilejší metody analýzy, pokud je to vhodné)
- Návrh má být proveden s ohledem na vhodné metody analýzy, které závisí na kategorii bezpečnosti nebo třídě následků

Třída následků 1	Žádná specifická opatření
Třída následků 2	Zjednodušená analýza a/nebo použití návrhových normových pravidel
Třída následků 3	Dynamická analýza/nelineární analýza, pokud je vhodná

1. Úvod
- 2. Náraz**
3. Výbuch
4. Požár jako mimořádná událost
5. Zemětřesení jako mimořádná událost
6. Závěr

■ Tato část popisuje strategie zmírňování rizika a návrhové přístupy pro pět typů identifikovaných mimořádných zatížení.

■ **Prezentace je rozdělena následovně:**

1. Úvod
2. Náraz
 - 2.1 Návrhový postup pomocí ekvivalentní statické síly
 - 2.2 Zjednodušená dynamická analýza
 - 2.3 Úplná dynamická analýza
3. Výbuch
 - 3.1 Vnější výbuch
 - 3.2 Vnitřní výbuch plynu
4. Požár jako mimořádná událost
5. Zemětřesení jako mimořádná událost
6. Závěr

2. NÁRAZ

- Mimořádné zatížení, které působí po velmi krátkou dobu (obvykle zlomek sekundy)
- Zatížení vyskytující se s malou pravděpodobností, ale významnými následky
- Pro budovy je častý náraz vozidlem:
 - Budovy blízko pozemních komunikací
 - Parkovací domy nebo budovy blízko parkovišť
 - Budovy, do kterých je povolen vjezd vozidel a nákladních aut



Náraz vozidla do budovy



2. NÁRAZ

PREVENCE A ELIMINACE NEBEZPEČÍ

■ Preventivní opatření jsou zaměřena na snížení rychlosti narážejícího objektu (např. vozidla) a/nebo na omezení přístupu k budově

■ Nejčastěji používaná opatření jsou:

- Náležitý návrh přístupových cest
- Použití nárazníků a bloků (trvalé nebo automatické)



Concrete Temporary Barriers (J-J Hooks):

Steel or Water Temporary Barriers:

Trvalé nárazníky

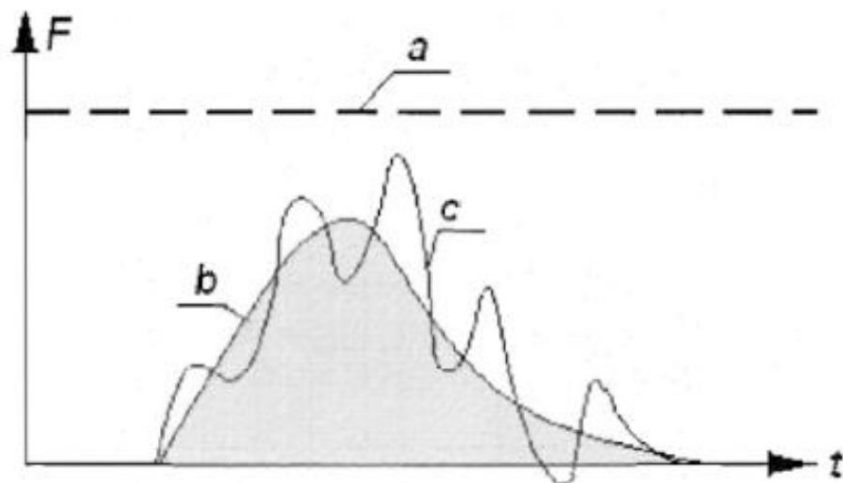


Automatické nárazníky

2. NÁRAZ

NÁVRHOVÉ STRATEGIE

■ **"Náraz je interakční jev mezi pohybujícím se předmětem a konstrukcí, při kterém se kinetická energie předmětu náhle přemění na energii deformační." EN 1991-1-7**



Key :
a : equivalent static force
b : dynamic force
c : structural response

Závislost síly nárazu na čase (EN 1991-1-7:2006)

■ **Tvrdý náraz** (nebo tuhý náraz) – Konstrukce je považována za tuhou a nárazející předmět absorbuje veškerou energii nárazu (**konzervativní předpoklad**)

■ **Měkký náraz** – Konstrukce se deformuje a energie nárazu je rozptýlena

Druhy analýzy

- Návrhový postup pomocí ekvivaletní statické síly (Tvrdý náraz)
- Zjednodušená dynamická analýza (Tvrdý nebo měkký náraz)
- Úplná dynamická analýza (Tvrdý nebo měkký náraz)

1. Úvod
- 2. Náraz**
3. Výbuch
4. Požár jako mimořádná událost
5. Zemětřesení jako mimořádná událost
6. Závěr

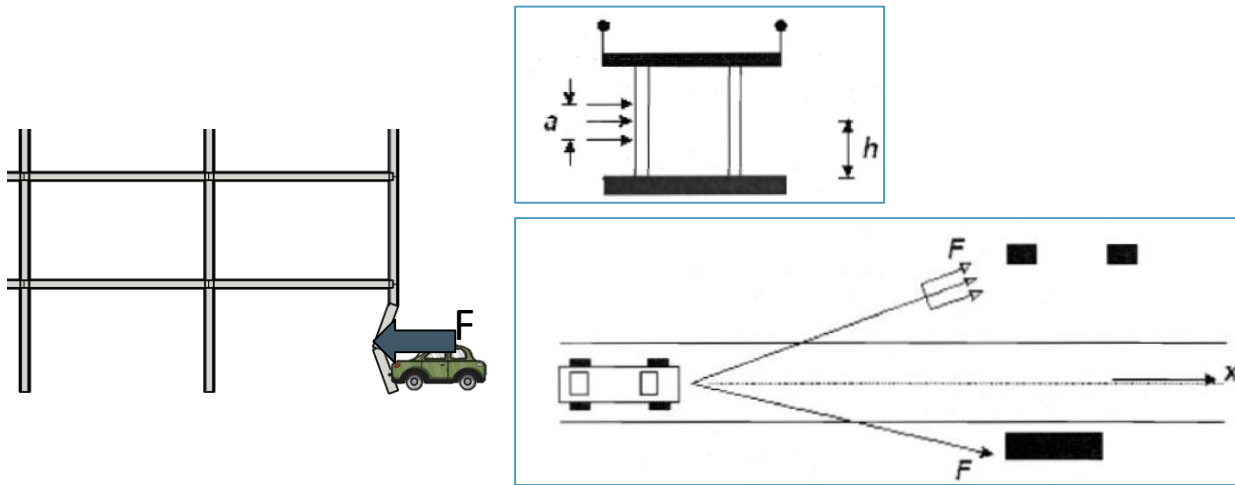
■ Tato část popisuje strategie zmírňování rizika a návrhové přístupy pro pět typů identifikovaných mimořádných zatížení.

■ **Prezentace je rozdělena následovně:**

1. Úvod
2. Náraz
 - 2.1 Návrhový postup pomocí ekvivalentní statické síly
 - 2.2 Zjednodušená dynamická analýza
 - 2.3 Úplná dynamická analýza
3. Výbuch
 - 3.1 Vnější výbuch
 - 3.2 Vnitřní výbuch plynu
4. Požár jako mimořádná událost
5. Zemětřesení jako mimořádná událost
6. Závěr

2.1 NÁVRHOVÝ POSTUP POMOCÍ EKVIVALENTNÍ STATICKÉ SÍLY

- V návrhovém postupu je náraz reprezentován ekvivalentní statickou silou
- Návrhový postup může být použitý pro tvrdý náraz a konstrukce třídy následků CC1 a CC2
- Umožňuje posouzení statické rovnováhy, únosnosti a deformací konstrukce



a – výška doporučené oblasti pro působení síly - od 0,25 m (pro auta) do 0,50 m (nákladní auta)
 h – poloha výsledné kolizní síly F , výška nad úrovní silnice - od 0,50 m (auta) do 1,50 m (nákladní auta)
 x – je střed jízdního pruhu

Category of traffic	Force F_{dx}^a [kN]	Force F_{dy}^a [kN]
Motorways and country national and main roads	1000	500
Country roads in rural area	750	375
Roads in urban area	500	250
Courtyards and parking garages with access to:		
- Cars	50	25
- Lorries ^b	150	75

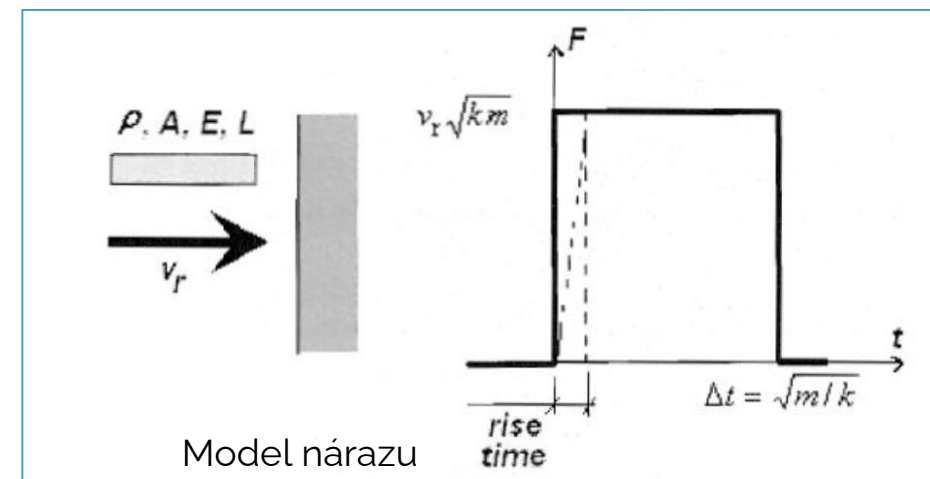
^a x = direction of normal travel, y = perpendicular to the direction of normal travel.
^b The term "lorry" refers to vehicles with maximum gross weight greater than 3,5 tonnes.

Kolizní síla na nosné spodní stavby v blízkosti jízdních pruhů pro mosty a nosné konstrukce budov (EN 1991-1-7:2006)

2.2 ZJEDNODUŠENÁ DYNAMICKÁ ANALÝZA

■ Postup závisí na typu nárazu (Příloha C EN 1991-1-7):

- Tvrdý náraz → pro konstrukce až do třídy CC2b
- Měkký náraz → pro konstrukce do třídy CC3



■ Tvrdý náraz

Maximální nárazová síla na vnější líc budovy:

$$F = v_r \sqrt{k \cdot m}$$

v_r – rychlost nárazu

k, m – tuhost a hmotnost nárazejícího předmětu

■ Dynamický součinitel zatížení (DLF) lze použít pro navýšení síly o dynamické účinky:

■ Kroková funkce (čas vzestupu = 0 sek):

DLF = 2.0

■ Pulzní zatížení: **DLF** je třeba vyčíslit (**DLF = 1.0** až do **1.8**)

■ Měkký náraz

A. Konstrukce odolává prostřednictvím pružných deformací

■ See hard impact, but with k being the stiffness of the structure

B. Konstrukce odolává prostřednictvím plastických deformací

■ Je požadováno, aby tažnost konstrukce byla dostatečná k absorpci celkové kinetické energie nárazejícího předmětu:

$$E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_r^2$$

■ Za předpokladu tuhé plastické odezvy:

$$\frac{1}{2} \cdot m \cdot v_r^2 \leq F_o y_o$$

F_o – Plastická únosnost konstrukce

y_o – Deformační kapacita

2.3 ÚPLNÁ DYNAMICKÁ ANALÝZA

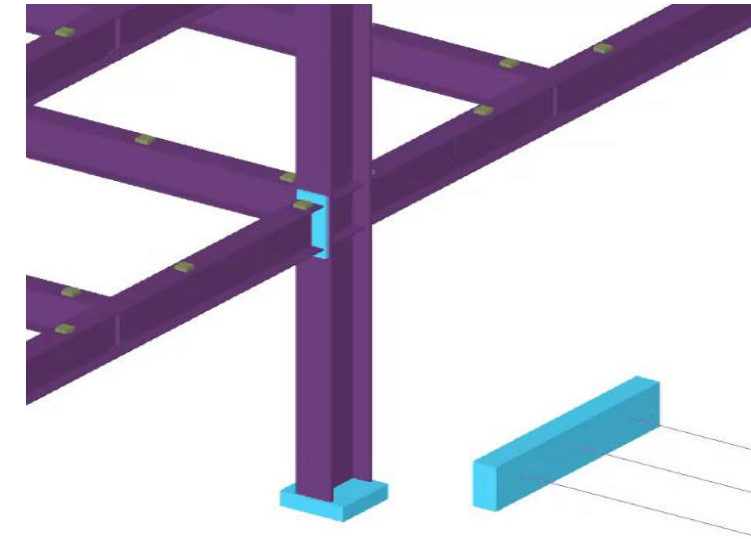
■ Mohou být použity dva postupy

■ Zatížení nárazem je explicitně modelováno:

- Nejvíce realistický přístup
- Numerický model zahrnuje modelování narážejícího tělesa (hmotnost, tuhost), nárazového zatížení (rychlost, směr, trvání), odezvy konstrukce (napětí, deformace, průhyby) a interakce mezi konstrukcí a narážejícím předmětem.
- Vliv rychlostí deformace na materiál prostřednictvím faktoru DIF

■ Metoda alternativního přenosu zatížení

- Předpokládá se úplné odstranění sloupu z důvodu nárazu (viz neidentifikované hrozby)
- Praktičtější než předchozí přístup, stále poskytuje dobrý odhad robustnosti konstrukce bez složitého modelování nárazu



Model zatížení nárazem (analýza pomocí ELS)

1. Úvod
2. Náraz
- 3. Výbuch**
4. Požár jako mimořádná událost
5. Zemětřesení jako mimořádná událost
6. Závěr

OBSAH

■ Tato část popisuje strategie zmírňování rizika a návrhové přístupy pro pět typů identifikovaných mimořádných zatížení.

■ **Prezentace je rozdělena následovně:**

1. Úvod
2. Náraz
 - 2.1 Návrhový postup pomocí ekvivalentní statické síly
 - 2.2 Zjednodušená dynamická analýza
 - 2.3 Úplná dynamická analýza
3. Výbuch
 - 3.1 Vnější výbuch
 - 3.2 Vnitřní výbuch plynu
4. Požár jako mimořádná událost
5. Zemětřesení jako mimořádná událost
6. Závěr

3. VÝBUCH

■ **Výbuch – extrémně rychlé uvolnění energie ve formě tlakové vlny, tepla, zvuku a světla**

■ **Výbušné materiály mohou být pevné látky, plyny, páry nebo prach**

■ **Deflagrace versus detonace:**

■ V závislosti na povaze výbušného materiálu a místních podmínkách se může výbuch rozvinout jako **deflagrace** nebo se rychle rozpínat a vytvářet rázové vlny – **detonace**

■ **Deflagrace** - šíření oblasti hoření rychlostí, která je menší než rychlost zvuku v nezreagovaném médiu (např. vnitřní výbuch plynu v budovách)

■ **Detonace** - šíření oblasti hoření rychlostí, která je větší než rychlost zvuku v nezreagovaném médiu (např. průmyslové výbušnin)

1 – dopadající vlna
2 – odražená vlna povrchem země
3 – odražená vlna konstrukcí



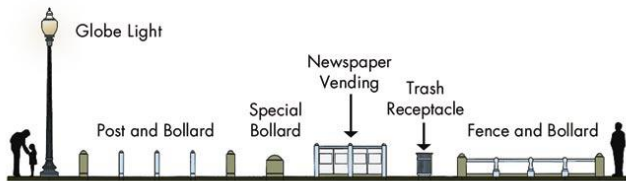
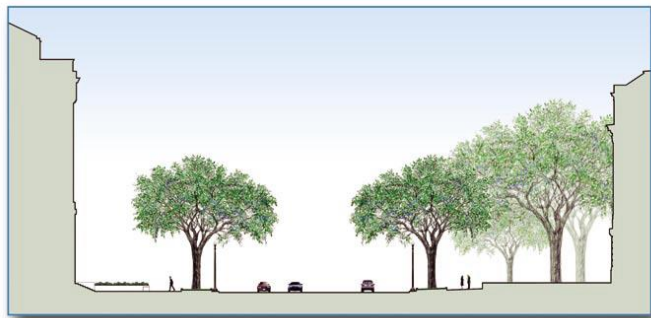
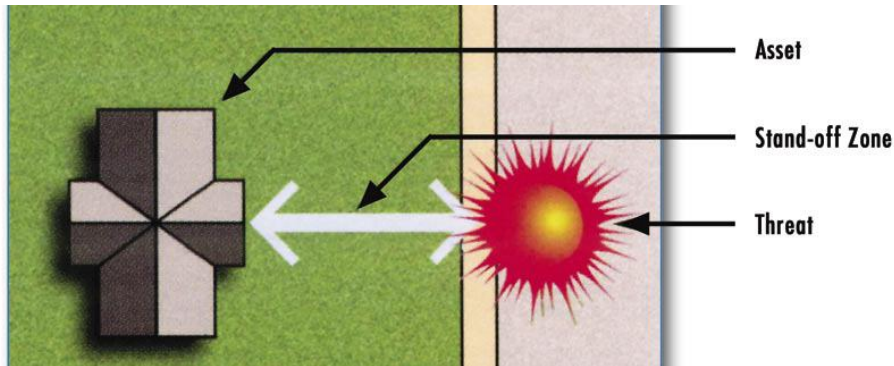
Detonace vysoce výbušné nálože v blízkosti budovy (SAFE-WALL, 2021)



3. VÝBUCH

PREVENCE/ELIMINACE NEBEZPEČÍ

■ Vnější výbuch



- Tlak výbuchu se výrazně snižuje se vzrůstající vzdáleností → maximalizace **odstupové vzdálenosti** sníží účinky výbuchu
- Veřejná prostranství: patníky, stromy, městský mobiliář mohou být použity jako překážky
- Oblast s vyšším rizikem: lze postavit stěnu odolnou proti výbuchu, (barikáda, která chrání konstrukci před výbuchem)
- Vyhnout se použití nekonstrukčním prvkům připevněným k vnější části budovy → omezení letících úlomků, nouzové východy zůstávají v provozu
- Okna způsobují vážná zranění: použití vhodného typu zasklení, zmenšení plochy oken na exponovaných fasádách
- Konstrukční tvary a rozměry: **okrajová část** → dlouhé obdélníkové tvary indukují menší špičky odražené tlakové vlny než čtvercové tvary; **parabolické** nebo **krychlové** fasády fungují lépe než svislé fasády

3. VÝBUCH

PREVENCE/ELIMINACE NEBEZPEČÍ

■ Vnitřní výbuch plynu

■ Je třeba vzít v úvahu nebezpečí výbuchu plynu od začátku projektu:

- rozdělení oblastí
- celkové uspořádání

■ Pevné rámové konstrukce podpírající střechu a jednotlivá podlaží: pokud je potřeba pevná stěna, použijte stěnové panely s nízkou hmotností, aby se usnadnilo včasné odvětrání výbuchu

■ Větrací oblast:

- Velikost a umístění → když je dostatečné větrání blízko bodu vznícení, rychlost plamene bude nízká a turbulence generované za překážkami budou omezeny
- obecně by měl být větrací otvor výbuchu plynu nasměrován do otevřených prostor s minimem překážek
- částečné ucpání větracího otvoru může mít za následek silné zvýšení tlaku

1. Úvod
2. Náraz
- 3. Výbuch**
4. Požár jako mimořádná událost
5. Zemětřesení jako mimořádná událost
6. Závěr

OBSAH

■ Tato část popisuje strategie zmírňování rizika a návrhové přístupy pro pět typů identifikovaných mimořádných zatížení.

■ **Prezentace je rozdělena následovně:**

1. Úvod
2. Náraz
 - 2.1 Návrhový postup pomocí ekvivalentní statické síly
 - 2.2 Zjednodušená dynamická analýza
 - 2.3 Úplná dynamická analýza
3. Výbuch
 - 3.1 Vnější výbuch
 - 3.2 Vnitřní výbuch plynu
4. Požár jako mimořádná událost
5. Zemětřesení jako mimořádná událost
6. Závěr

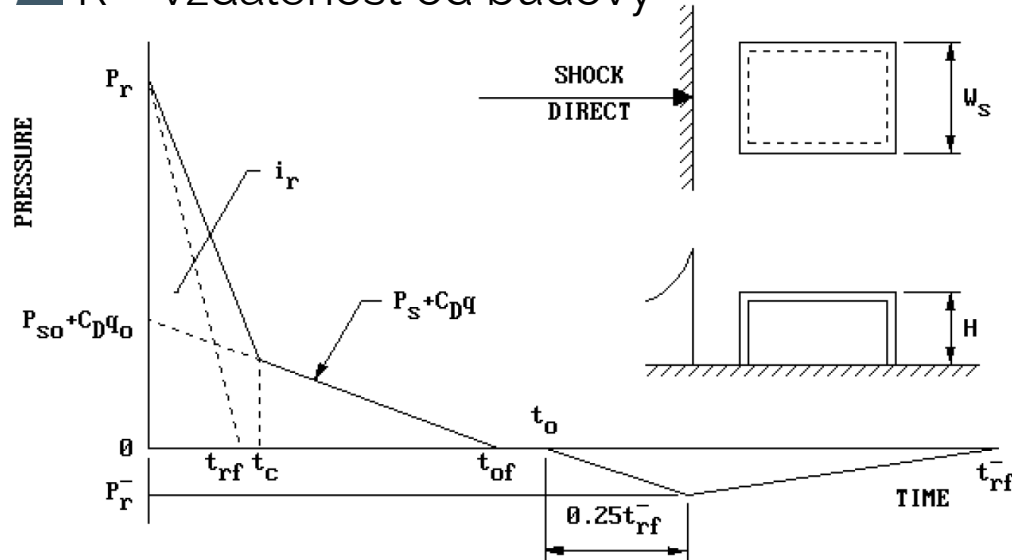
3.1 Vnější výbuch

EXPLICITNÍ NÁVRH

Definice scénáře

■ W – hmotnost nálože

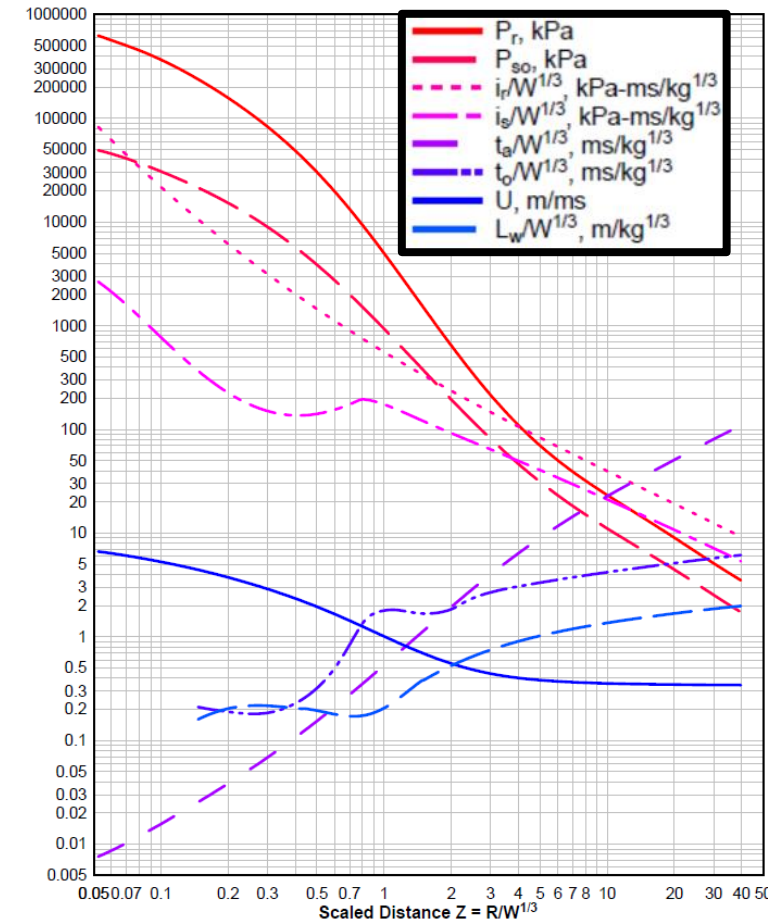
■ R – vzdálenost od budovy



$$t_c = \frac{4S}{(1 + R)C_r}$$

$$t_{of} = \frac{2i_s}{P_{s0}}$$

$$t_{rf} = \frac{2i_r}{P_r}$$



Závislost tlaku a impulsu

Parametry přetlakové fáze rázové sférické vlny z výbuchu nálože TNT

- t_c je čas, během kterého klesne odrazný tlak na hodnotu přetlaku dopadajícího plus dynamický tlak
- S je menší z hodnot výšky budovy H nebo poloviční šířky budovy $W/2$;
- C_r představuje rychlost zvuku v odraženém prostředí;
- R představuje poměr S/G , kde G je větší z hodnot výšky budovy H nebo poloviční šířky $W/2$;
- t_{of} je fiktivní čas ($t_{of} < t_o$, kde t_o je skutečné trvání přetlakové fáze) dopadající vlny;
- i_s je hodnota impulsu přetlakové fáze tlakové vlny;
- P_{so} je největší tlak v čele dopadající vlny;
- i_r je celkový odražený impuls; P_r je největší tlak odražené vlny.

3.1 Vnější výbuch

EKVIVALENTNÍ ANALÝZA S JEDNÍM STUPNĚM VOLNOSTI

- Prvek zatížený výbuchem je transformován na ekvivalentní systém SDOF s jedním stupněm volnosti
- Rozložení hmoty, okrajové podmínky, únosnost a historie zatížení idealizovány:

$$T_n = 2\pi\sqrt{m_E/k_E}$$

$$K_L = \frac{F_E}{F(t)} \quad K_m = \frac{m_E}{m}$$

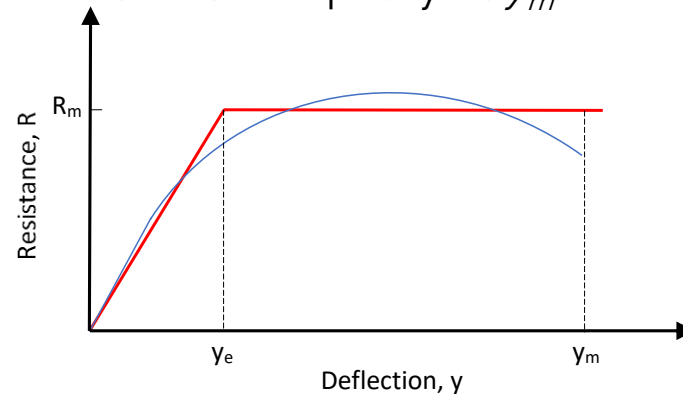
T_n perioda systému SDOF
 m_E hmotnost ekvivalentního systému
 k_E ekvivalentní konstanta pružiny
 K_L součinitel zatížení
 F_E ekvivalentní zatížení
 F skutečné celkové zatížení konstrukce
 K_M součinitel hmotnosti
 m celková hmotnost skutečného prvku

■ Pružné systémy SDOF

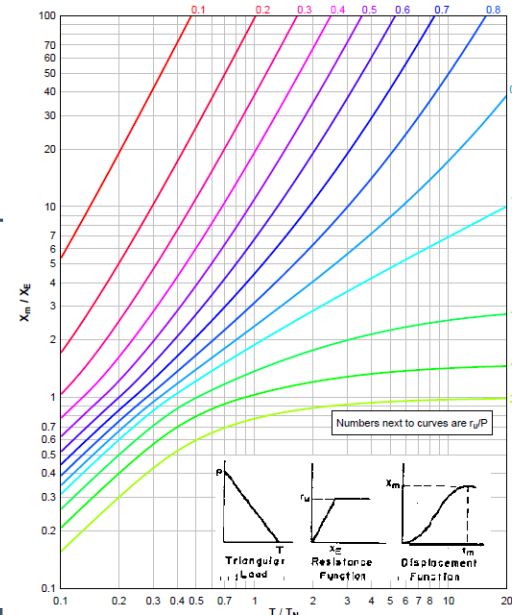
- Výsledky lze určit pomocí diagramů
- $y_{\max}$ je maximální dynamická výchylka
- y_{st} je průhyb způsobený statickým působením amplitudy zatížení F_m

■ Pružnoplastické systémy SDOF

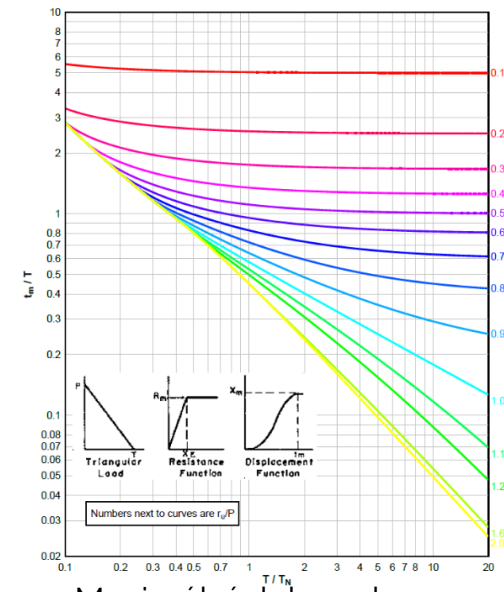
- Odezva systému s jedním stupněm volnosti s pružnoplastickou odezvou je definována z hlediska jeho největší únosnosti R_m a maximálního průhybu y_m



Závislost únosnosti na průhybu



Maximální výchylka



Maximální doba odezvy

3.1 Vnější výbuch

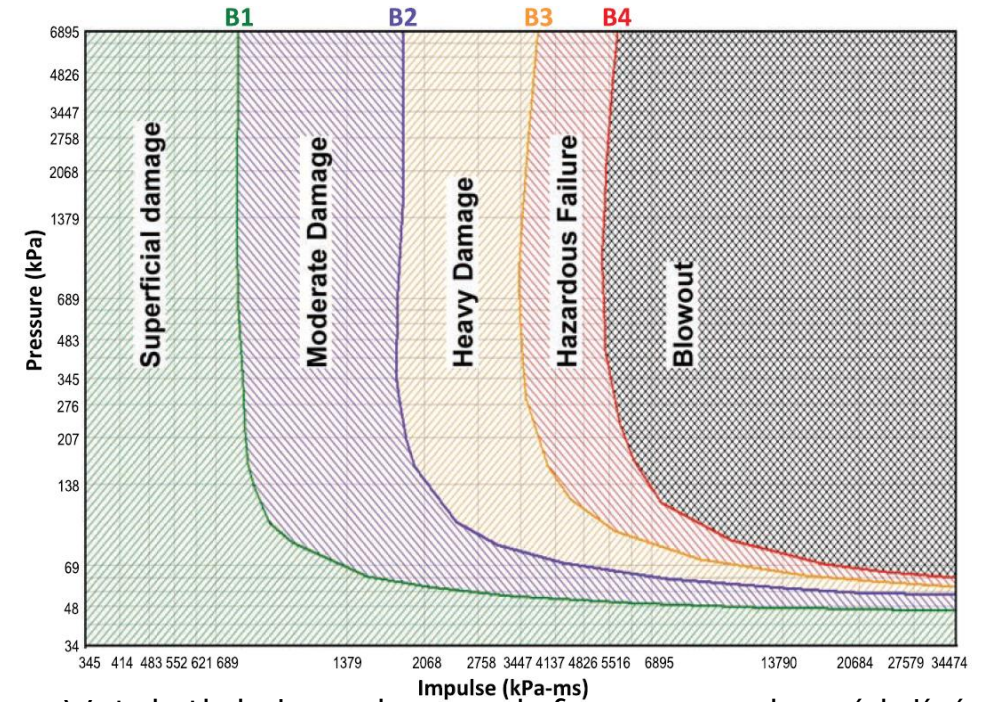
METODA POMOCÍ DIAGRAMŮ TLAK-IMPULS

- Krok 1: definování tvaru zatížení v souladu s hrozbou výbuchu
- Krok 2: SDOF analýza (nebo jiný přístup) ke stanovení odezvy prvku ve formě koncového natočení θ , a součiniteli tažnosti μ

μ je definován jako poměr mezi maximálním posunutím při uvažovaném tlakovém zatížení a pružným posunem, tzn., posunutí, když se v uvažovaném systému vytvoří plastický kloub

- Krok 3: odezva je porovnána s limity systému (limity jsou dostupné pro celé budovy, jednotlivé konstrukční prvky nebo okna)

- Krok 4: - na základě úrovně poškození stanovené v předchozím kroku je úroveň ochrany (třída následků) poskytnuta porovnáním výsledků s přípustnými limity



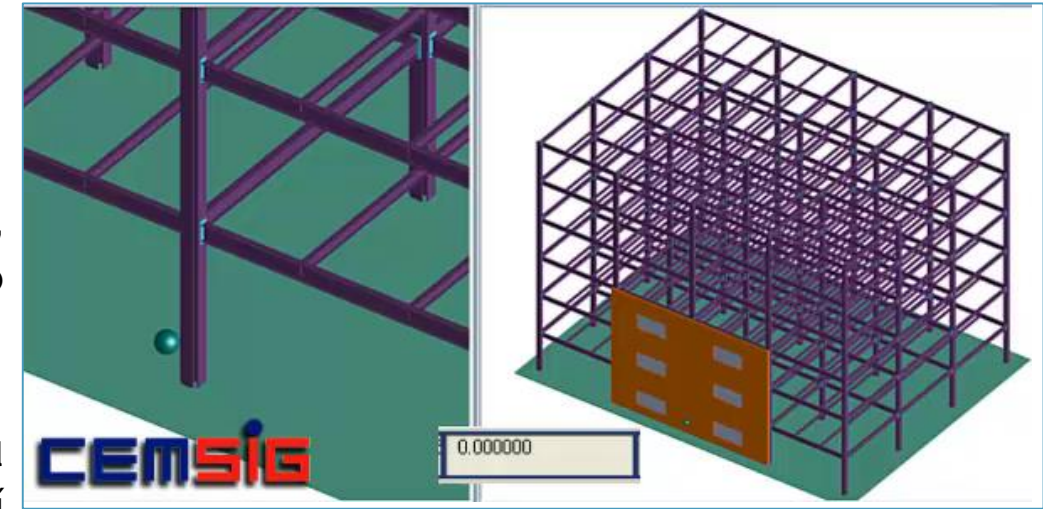
Vztah tlak-impuls pro deformace odpovídající limitům poškození

Typ prvku		B1		B2		B3		B4	
		$\mu_{\max}$	$\theta_{\max}$	$\mu_{\max}$	$\theta_{\max}$	$\mu_{\max}$	$\theta_{\max}$	$\mu_{\max}$	$\theta_{\max}$
Ohyb	Nosník s kompaktním průřezem	1	-	3	3°	12	10°	25	20°
	Nosník s nekompaktním průřezem	0,7	-	0,85	3°	1	-	1,2	-
	Ohyb desky k měkké ose	4	1°	8	2°	20	6°	40	12°
Tlak	Nosník-sloup s kompaktním průřezem	1	-	3	3°	3	3°	3	3°
	Nosník-sloup s nekompaktním průřezem	0,7	-	0,85	3°	0,85	3°	0,85	3°
	Sloup (osové porušení)	0,9	-	1,3	-	2	-	3	-

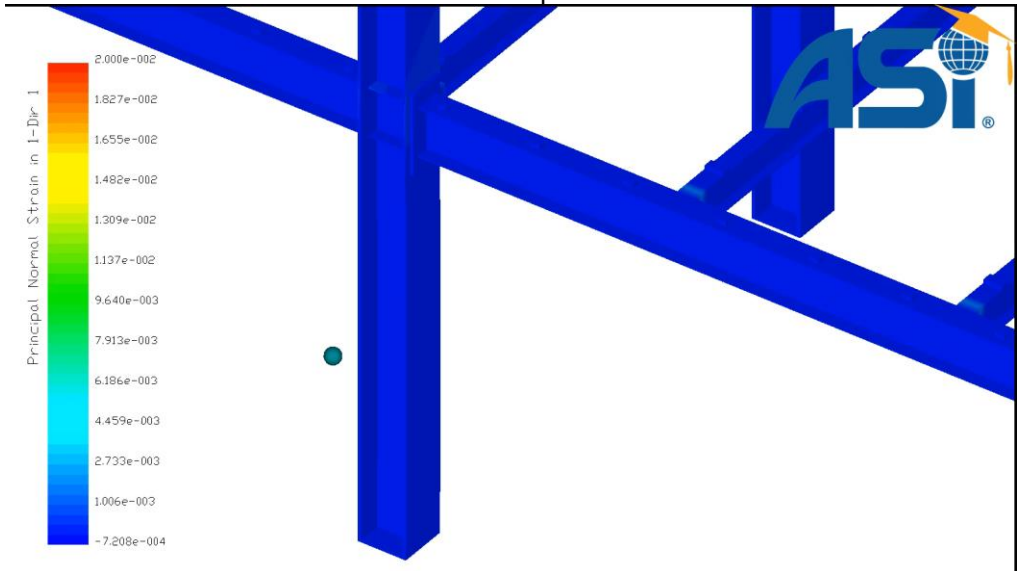
3.1 Vnější výbuch

PLNĚ DYNAMICKÝ PŘÍSTUP

- **Tatížení výbuchem** a chování konstrukce (vnitřní síly, napětí, deformace, průhyby) jsou funkcí času, a proto vyžadují vhodnou definici a modelování
- **Materiálové modely:**
 - V ocelových a ocelobetonových konstrukcích mohou být materiálové modely lineární, bilineární, multilineární nebo uživatelsky definované
 - Materiálové modely oceli a betonu lze již integrovat do knihovny programu
- **Kritéria porušení:**
 - Elastické materiály se chovají lineárně bez jakýchkoliv plastických deformací. Lze nastavit předdefinovaný bod porušení
 - Mohou být použita různá kritéria porušení:
 - Hlavní tahové přetvoření
 - Pevnost v tahu (ocel)
 - Pevnost v tlaku;
 - Pevnost ve smyku
 - Mohr-Coulombova obálka pevnosti (beton)
 - jiná kritéria založená na výsledcích testů, tabulkových hodnotách



Účinky zatížení výbuchem na ocelovou rámovou budovu (vnější stěna a skleněná okna jsou také znázorněna na obrázku vpravo)



Zatížení výbuchem působící na ocelový sloup (detail)

PLNĚ DYNAMICKÝ PŘÍSTUP (pokračování)

■ Časový krok výpočtu:

- Nastavení časových kroků je kontinuální během celé analýzy. Numerické řešení předpokládá malý časový krok, který může sledovat chování konstrukce
- Příliš malý časový krok → velmi dlouhá analýza // velký časový krok → méně přesná analýza
- Pokud je časový krok = ΔT , pak nejkratší perioda, kterou lze v analýze uvažovat je $2\Delta T$ (nejvyšší frekvence je $\pi/\Delta T$).
- Analýza při zatížení výbuchem většinou vyžaduje $\Delta T = 0,00001$ sek.

■ Scénáře výbuchu:

- Výbuch lze modelovat jako tlakovou vlnu ve volném prostoru a ovlivněnou povrchem
- Tlak vyplývající z tlakové vlny je funkcí hmotnosti výbušniny, vzdálenosti k výbušnině a času
- Alternativně lze použít uživatelem definovaný tlak od výbuchu. V případě potřeby lze použít pokročilé techniky včetně CFD.

- **Okrajové podmínky a počáteční stav:** posunutí nebo rotace v podporách mohou být tuhé a/nebo volné (částečná tuhost může být také zavedena). Pro numerické řešení časově závislého problému jsou vyžadovány počáteční podmínky (hodnoty rychlosti a zrychlení na začátku pohybu, $t = 0,0$)

■ Rovnovážné rovnice

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{F\}$$

M – hmotnost
F – zatížení

C – útlum (disipace energie)
 x – posunutí $\dot{x}$ – rychlost

K – tuhost
 $\ddot{x}$ – zrychlení

1. Úvod
2. Náraz
- 3. Výbuch**
4. Požár jako mimořádná událost
5. Zemětřesení jako mimořádná událost
6. Závěr

■ Tato část popisuje strategie zmírňování rizika a návrhové přístupy pro pět typů identifikovaných mimořádných zatížení.

■ **Prezentace je rozdělena následovně:**

1. Úvod
2. Náraz
 - 2.1 Návrhový postup pomocí ekvivalentní statické síly
 - 2.2 Zjednodušená dynamická analýza
 - 2.3 Úplná dynamická analýza
3. Výbuch
 - 3.1 Vnější výbuch
 - 3.2 Vnitřní výbuch plynu
4. Požár jako mimořádná událost
5. Zemětřesení jako mimořádná událost
6. Závěr

3.2 Vnitřní výbuch plynu

EXPLICITNÍ NÁVRH

Třída následků 1	Není potřeba žádné zvláštní posouzení účinků výbuchu
Třída následků 2	Klíčové prvky konstrukce mohou být navrženy tak, aby odolávaly zatížení pomocí ekvivalentního statického modelu zatížení
Třída následků 3	Dynamická analýza

- **Při výpočtu odezvy konstrukce lze použít trojúhelníkovou funkci zatížení-čas s dobou trvání 0,2 s. Měla by být provedena studie citlivosti na funkci zatížení-čas, aby se určila doba největší zátěže v průběhu 0,2 s.**

3.2 Vnitřní výbuch plynu

NÁVRHOVÝ POSTUP POMOCÍ EKVIVALENTNÍHO STATICKÉHO TLAKU

$$p_d = 3 + p_{stat}$$

p_d je nominální ekvivalentní statický tlak pro návrh konstrukce [kN/m²];

p_{stat} rovnoměrně rozložený statický tlak, při kterém ventilační komponenty selžou [kN/m²];

$$p_d = 3 + \frac{p_{stat}}{2} + \frac{0.04}{(A_v/V)^2}$$

A_v je volná plocha výfukových otvorů [m²];

V je celkový vnitřní objem objektu [m³].

Poměr plochy ventilačních otvorů a objemu by měl odpovídat následujícímu vzorci:

$$0.05m^{-1} \leq A_v/V \leq 0.15m^{-1}$$

3.2 Vnitřní výbuch plynu

DYNAMICKÝ PŘÍSTUP (METODA TNT EKVIVALENTU)

- Hmotnost plynu (nebo oblaku páry) je přeměněna na ekvivalentní nálož TNT
- Ekvivalentní nálož TNT se odhaduje z obsahu energie v explodujícím oblaku plynu

$$W_{TNT} = \eta \frac{W_g \times E_c}{E_{TNT}}$$

η je TNT ekvivalent založený na energii (účinnostní factor)

W_g je hmotnost páry v oblaku plynu (= hmotnost vzduchu a směsi hořlavých plynů)

E_c je spalné teplo uvažované hořlaviny

E_{TNT} je výbuchová energie TNT [4680 kJ/kg].

$$W_{TNT} \cong 0.16V [kg]$$

$V[m^3]$ je menší z celkového objemu naplněné oblasti nebo objemu oblaku plynu

■ Omezení metody TNT ekvivalentu

- Tuto metodu lze s uspokojivými výsledky použít u silných výbuchů oblaků plynu. Pro tlaky výbuchu pod 1 bar bude metoda TNT ekvivalentu nadhodnocovat tlak
- Odchylka je malá pro popis efektů ve vzdálené oblasti, zatímco je velká pro popis efektů v blízké oblasti
- Metoda TNT ekvivalentu může být užitečná jako hrubá aproximace, pokud se použije TNT ekvivalent 20 % a vhodná hodnota pro V (nebo odpovídající hmotnost uhlovodíku).

OBSAH

1. Úvod
2. Náraz
3. Výbuch
- 4. Požár jako mimořádná událost**
5. Zemětřesení jako mimořádná událost
6. Závěr

■ Tato část popisuje strategie zmírňování rizika a návrhové přístupy pro pět typů identifikovaných mimořádných zatížení.

■ **Prezentace je rozdělena následovně:**

1. Úvod
2. Náraz
 - 2.1 Návrhový postup pomocí ekvivalentní statické síly
 - 2.2 Zjednodušená dynamická analýza
 - 2.3 Úplná dynamická analýza
3. Výbuch
 - 3.1 Vnější výbuch
 - 3.2 Vnitřní výbuch plynu
4. Požár jako mimořádná událost
5. Zemětřesení jako mimořádná událost
6. Závěr

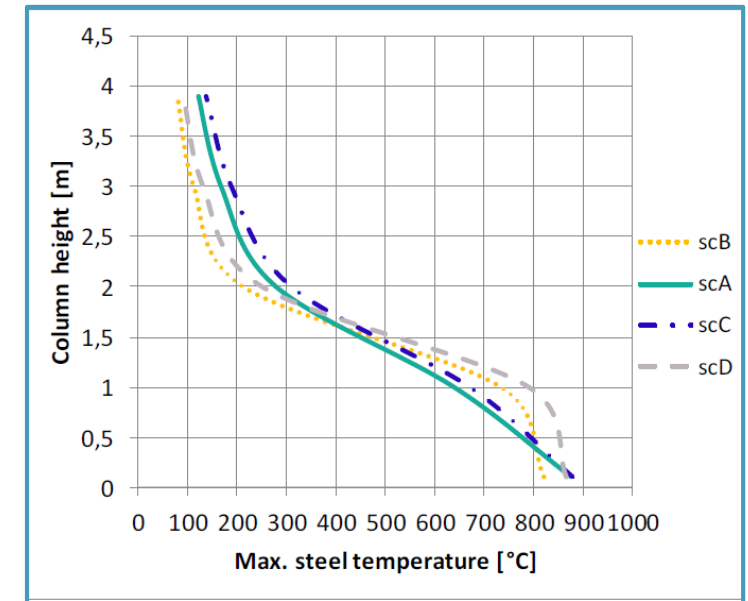
4. POŽÁR JAKO MIMOŘÁDNÁ UDÁLOST

- Konstrukce by měly být navrženy tak, aby splňovaly *minimální požadovanou požární odolnost*, která je obvykle založena na konceptu *minimální požadované doby požáru*. Tento koncept omezuje, na přijatelnou úroveň, pravděpodobnost ztrát na lidských životech a/nebo rozsáhlého poškození konstrukcí
- Část 1-2 Eurokódu 3 a Eurokódu 4 uvádí návrhová požární pravidla pro ocelové a spřažené konstrukce
- Mimořádná požární událost je událost nad rámec případů, na které se vztahují předpisy

4. POŽÁR JAKO MIMOŘÁDNÁ UDÁLOST

■ Příkladem mimořádné události je lokální požár kolem sloupu, kde by za normální situace požární zatížení nemělo být umístěno

Scénář	Průměr základny požáru	Rychlost uvolňování tepla	Hustota požárního zatížení	Rychlost růstu požáru
A	2 m	250 kW/m ² (kancelářská budova)	511 MJ/m ² (kancelářská budova)	300 sek (kancelářská budova)
B	1 m	500 kW/m ² (kancelářská budova)	511 MJ/m ² (kancelářská budova)	300 sek (kancelářská budova)
C	2 m	250 kW/m ² (komerční prostory)	730 MJ/m ² (komerční prostory)	150 sek (komerční prostory)
D	1 m	500 kW/m ² (komerční prostory)	730 MJ/m ² (komerční prostory)	150 sek (komerční prostory)



■ Zvýšení teploty vlivem neočekávané lokální požární situace pravděpodobně nepovede ke zřícení některých nosných prvků a ke ztrátě stability konstrukce, pokud konstrukce byla navržena na zatížení požárem podle pravidel Eurokódu a národních požadavků.

4. POŽÁR JAKO MIMOŘÁDNÁ UDÁLOST

■ Lokální požár lze uvažovat podle Přílohy C EN 1991-1-2

- Je nepravděpodobné, že dojde k celkovému vzplanutí
- V závislosti na velikosti požáru a požárního úseku může nebo nemusí lokální požár zasáhnout strop požárního úseku.

■ Délka plamene

$$L_f = 0.0148Q^{0.4} - 1.02D$$

Pokud je $L_f \geq H \rightarrow$ požár dosahuje stropu

H – výška stropu

Q – rychlost uvolňování tepla

D – průměr ohně

■ Teplota plamene

(pro $L_f < H$)

$$\theta_{(z)} = 20 + 0.25Q_c^{2/3} (z - z_0)^{-5/3} \leq 900$$

Q_c konvekční část rychlosti uvolňování tepla (=0.8Q)

Z výška plamene podél osy;

Z_0 virtuální počátek požáru

$$Z_0 = -1.02D + 0.00524Q^{2/5}$$

■ Čistý tepelný tok dopadající na jednotku povrchové plochy v úrovni stropu

(pro $L_f \geq H$)

$$\dot{h}_{net} = \dot{h} - \alpha_c(\theta_m - 20) - \Phi \varepsilon_m \varepsilon_f \sigma [(\theta_m + 273)^4 - (20 + 273)^4]$$

$\dot{h}$ tepelný tok dopadající na jednotku povrchové plochy v úrovni stropu

α_c součinitel přestupu tepla prouděním

θ_m teplota na povrchu prvku

Φ polohový factor

ε_m povrchová emisivita prvku

ε_f emisivita požáru

σ Stephan Boltzmannova konstanta
($5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$)

4. POŽÁR JAKO MIMOŘÁDNÁ UDÁLOST

■ Alternativně je možné použít pokročilé modely požáru:

- **Zónové modely** - viz příloha D EN 1991-1-2 pro základní rovnice zachování hmoty a energie. Příklady softwaru, který lze použít, jsou CFAST od NIST nebo OZONE vyvinutý na Univerzitě v Liege.
- **CFD model (Computational fluid dynamic model)** – návrhy viz příloha D normy EN 1991-1-2. Příkladem softwaru, který lze použít pro analýzu CFD, je FDS od NIST.

4. POŽÁR JAKO MIMOŘÁDNÁ UDÁLOST

SEKVENCE MIMOŘÁDNÝCH UDÁLOSTÍ

■ Další situací, kdy je požár považován za mimořádné zatížení, jsou případy, kdy se požár objeví po první mimořádné události, jako je např:

- Požár po zemětřesení
- Požár po výbuchu/explozi



Kobe, 1995 – Požár po zemětřesení



V těchto situacích je konstrukce již poškozena první událostí, požární norma tedy již neplatí

Twin Towers, 2001
Požár po výbuchu/explozi

4. POŽÁR JAKO MIMOŘÁDNÁ UDÁLOST

SNÍŽENÍ/PŘEDCHÁZENÍ ÚČINKŮ ZATÍŽENÍ

■ Měla by být zvážena opatření k zabránění a/nebo snížení účinků zatížení požárem a/nebo zamezení šíření požáru

■ **Aspekty upravené zákonem:**

- Skladování kolem sloupů je zakázáno
- Kontrola materiálů používaných na fasádách
- Vzdálenost mezi budovami pro snížení rizika šíření požáru

■ **Systémy zabraňující šíření požáru:**

- Hasicí přístroje – aktivují se ručně, když se objeví požár
- Sprinklery – automatické systémy aktivované při vzniku kouře nebo vysoké teploty

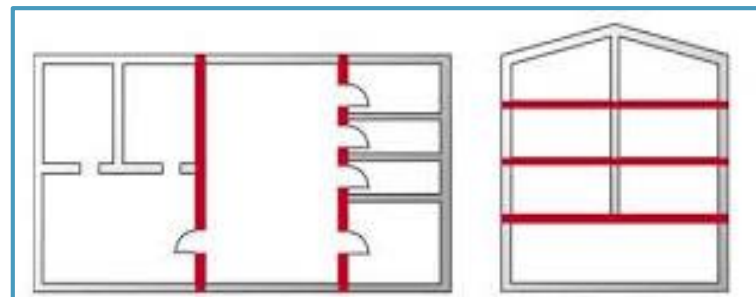
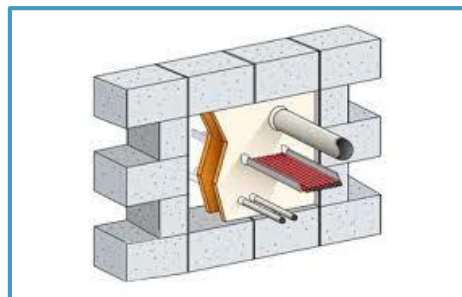


4. POŽÁR JAKO MIMOŘÁDNÁ UDÁLOST

SNÍŽENÍ/PŘEDCHÁZENÍ ÚČINKŮ ZATÍŽENÍ (pokračování)

■ Systémy zabraňující šíření požáru:

- Protipožární stěny – svislé izolace zabraňující šíření požáru
- Odvzdušňovací izolátory – izolace jakýchkoli otvorů mezi oddíly
- Rozčlenění na požární úseky – rozdělení budovy na části, mezi kterými se nešíří požár



■ Systémy pro rychlou detekci požáru a systémů včasného varování a evakuace:

- detektory kouře;
- tepelné detektory;
- poplašné systémy;
- značení únikových cest.



OBSAH

1. Úvod
2. Náraz
3. Výbuch
4. Požár jako mimořádná událost
- 5. Zemětřesení jako mimořádná událost**
6. Závěr

■ Tato část popisuje strategie zmírňování rizika a návrhové přístupy pro pět typů identifikovaných mimořádných zatížení.

■ **Prezentace je rozdělena následovně:**

1. Úvod
2. Náraz
 - 2.1 Návrhový postup pomocí ekvivalentní statické síly
 - 2.2 Zjednodušená dynamická analýza
 - 2.3 Úplná dynamická analýza
3. Výbuch
 - 3.1 Vnější výbuch
 - 3.2 Vnitřní výbuch plynu
4. Požár jako mimořádná událost
5. Zemětřesení jako mimořádná událost
6. Závěr

5. ZEMĚTŘESENÍ JAKO MIMOŘÁDNÁ UDÁLOST

Zemětřesení je náhlé uvolnění energie nahromaděné v zemské kůře, způsobené většinou posunem v místě geologických zlomů. Vzhledem k jeho povaze není prakticky možné zemětřesení zabránit nebo jej eliminovat.

→ snížení a prevence následků jsou přísně spojeny s konstrukcí budovy a integrovanými systémy, které pomáhají budově adekvátně reagovat na seismické zatížení

■ Zemětřesení lze považovat za mimořádnou událost:

- Konstrukce není dimenzována na seismické zatížení, nebo je dimenzována na nižší seismické zatížení: událost je proto mimořádná.
- Konstrukce je seismicky zranitelná (existující poškození, systém není navržen podle aktuálních normových požadavků).

5. ZEMĚTŘESENÍ JAKO MIMOŘÁDNÁ UDÁLOST

NÁVRHOVÉ NORMY

- Tento přístup je zvláště výhodný pro neseizmické oblasti, kde může dojít k seismickým účinkům, ale s velmi nízkou pravděpodobností

Konfigurace budovy (velikost budovy a tvar, a konstrukční a nekonstrukční prvky) určuje způsob distribuce seismických sil v konstrukci, jejich relativní velikost a další aspekty návrhu.

- Kroutící efekty vznikají vlivem asymetrického rozložení setrvačných hmot a/nebo tuhostí
- Symetrické uspořádání povede k vyvážené tuhosti a snížení kroutících účinků
- Doporučuje se pravidelnost v půdorysu a ve výškách podlaží

5. ZEMĚTŘESENÍ JAKO MIMOŘÁDNÁ UDÁLOST

NÁVRHOVÉ NORMY (pokračování)

■ Budovy s běžnou konfigurací mají obecně:

- Nízké poměry výšky k základně
- Stejně výšky podlaží
- Symetrický půdorys
- Jednotné řezy a pohledy
- Největší kroutící odolnost
- Krátká rozpětí a tvarovou přeurčitost
- Přímé trajektorie zatížení
- Návrh sekundárních/nekonstrukčních prvků, aby se zabránilo úlomkům.

5. ZEMĚTŘESENÍ JAKO MIMOŘÁDNÁ UDÁLOST

NÁVRHOVÉ NORMY (pokračování)

■ **Kontrola vibrací:** budovy obecně špatně absorbují dynamické rázy a rozptylují vibrace tím, že je pohlcují

■ **Ke zlepšení odezvy:**

■ **Izolaci základů** oddělit budovu od země takovým způsobem, že seismická energie přenášená do horní stavby je výrazně snížena. *Výškové budovy nebo budovy postavené na měkkých půdách nejsou pro izolaci základů vhodné.*

■ **Systémy pasivního tlumení.** Nejběžnější aplikací je zařízení hmotnostního tlumiče (TMD), které se skládá z hmoty, pružiny a tlumiče, který je připevněn ke konstrukci. Seismická energie je rozptýlena setrvačnou silou tlumiče působící na konstrukci

■ **Systémy aktivního tlumení.** Aktivní tlumiče hmoty ruší vibrace působením proti budicím silám narušeného hlavního systému. Každý tlumič se skládá z pohonu, řídicího systému a napájecí elektronické jednotky. Všechny komponenty tlumiče jsou vzájemně vyváženy, takže síla tlumiče působí přesně v opačném směru než budicí síla.

■ **Poloaktivní tlumicí systémy,** které využívají nejlepších vlastností pasivních i aktivních tlumících systémů. Termín poloaktivní se používá k označení toho, že provoz těchto systémů vyžaduje malé množství externí energie. Tlumicí síly jsou vyvíjeny prostřednictvím vhodného nastavení charakteristik tlumení nebo tuhosti.

5. ZEMĚTŘESENÍ JAKO MIMOŘÁDNÁ UDÁLOST

NÁVRHOVÉ NORMY (pokračování)

■ Pro zlepšení odezvy budovy na zemětřesení:

- Únosnost a tuhost by měl být stanovena s ohledem na rovnováhu mezi deformovatelností a kapacitou únosnosti.
- Tažnost je vlastnost materiálu (jako je ocel) nebo prvku odvádět část energie plastickou deformací
 - **Duktilní prvky** typicky selhávají až po vzniku značných plastických deformací
 - **Neduktilní prvky**, jako jsou slabě vyztužené betonové prvky, se porušují křehkým lomem, bez plastických deformací

■ Požadavky na tažnost se mohou vztahovat jak na prvky, tak na jejich přípoje

- **U prvků** se hlavní požadavky zaměřují na štíhlost a prevenci nestability (např. klopení nosníků) před dosažením jejich plastické pevnosti. Na úrovni průřezu jsou upřednostňovány duktilní nebo poloduktilní průřezy (třída 1, třída 2).
- **Pro přípoje** se doporučují symetrické konfigurace, protože mohou poskytnout stabilnější hysterezní odezvu během po sobě jdoucích cyklů. Také komponenty, u kterých může dojít k křehkému porušení (např. svary, šrouby), musí být navrženy se zvýšenou pevností.

5. ZEMĚTŘESENÍ JAKO MIMOŘÁDNÁ UDÁLOST

STRATEGIE NÁVRHU

■ Po zemětřesení je primárním zájmem stav konstrukce a to, zda je zajištěna před kolapsem při působení stálého zatížení, následných otřesů a před dalšími nebezpečími (FEMA P-2090, 2021)

- Pokud konstrukce postrádá robustnost, existuje riziko dalšího poškození nebo postupného zhroucení při následném otřesu nebo jiných nebezpečích,
- Aby se předešlo takovému katastrofickému scénáři, je třeba posoudit zbytkovou únosnost budovy. Zbytkovou únosnost po zemětřesení lze definovat jako závislost:
- Zbytkovou únosnost po zemětřesení lze definovat jako:
 - Příčné vyztužení prutové soustavy - minimální zrychlení, které odpovídá lokálnímu nebo globálnímu zřícení během následného otřesu.
 - Tíhová únosnost - nejmenší úroveň gravitačního zatížení, které odpovídá lokálnímu nebo globálnímu zřícení po ničivém zemětřesení.

5. ZEMĚTŘESENÍ JAKO MIMOŘÁDNÁ UDÁLOST

POSTUP PRO POSOUZENÍ ROBUSTNOSTI PŘI ZEMĚTŘESENÍ

■ Krok 1: Návrh/posouzení pro trvalé a seismické návrhové situace

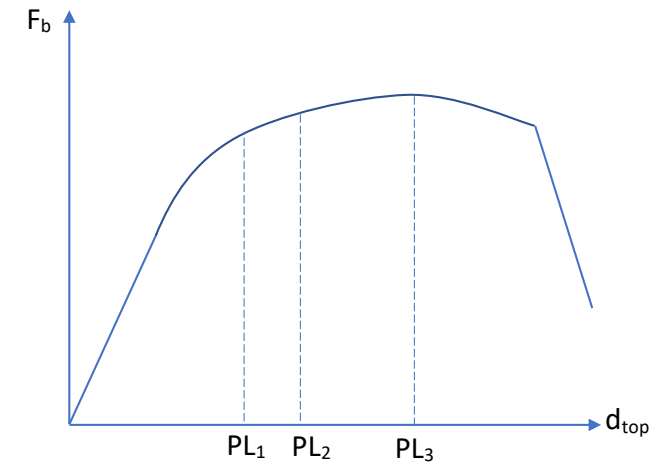
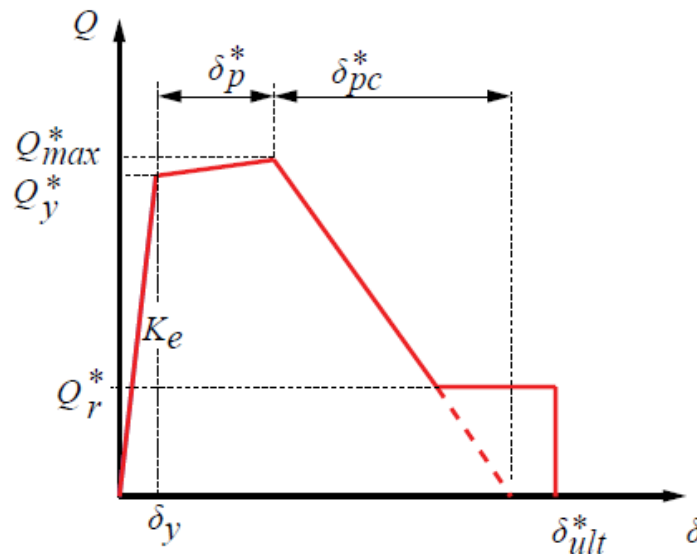
- Konstrukce je nejprve navržena tak, aby splňovala požadavky v Eurokódu (pro nové konstrukce). Seismickou odezvu lze vypočítat pomocí nelineární statické analýzy (metoda N2, EN 1998). Pro výběr vhodných materiálů a modelování konstrukčních prvků lze postupovat podle doporučení z EN 1993-1-14 (2020).
- Obecný vztah zatížení-deformace konstrukčního prvku lze charakterizovat pomocí prEN 1998-1-2 2019, příloha L. Komponentní model má být definován charakteristikami:
 - efektivní elastická tuhost, K_e zohledňující jak ohybovou, tak smykovou deformaci
 - mez kluzu, která je definována efektivní mezí kluzu Q_y^* a odpovídající deformací na mezi kluzu δ_y^*
 - plastická deformace před dosažení maxima, δ_p^* definuje plastickou deformaci až do největší odezvy konstrukčního prvku.
 - rozsah po dosažení meze kluzu, ve kterém konstrukční prvek vykazuje zpevnění před dosažením své největší pevnosti, $Q_{\max}^*$.
 - odezva po dosažení maxima je reprezentována plastickou deformací prvku, δ_{pc}^* .

5. ZEMĚTŘESENÍ JAKO MIMOŘÁDNÁ UDÁLOST

POSTUP PRO POSOUZENÍ ROBUSTNOSTI PŘI ZEMĚTŘESENÍ

■ Krok 1: Návrh/posouzení pro trvalé a seismické návrhové situace

- Globální seismické chování lze prezentovat ve formě závislosti smykové síly a horního posunutí $F_b - d_{top}$
- Úrovně výkonu (PL) jsou definovány odpovídajícím maximálním horním posunutím, t.j., PL_1 (omezené poškození), PL_2 (střední poškození) and PL_3 (velké škody). V závislosti na úrovni nebezpečí se očekává určitá úroveň poškození

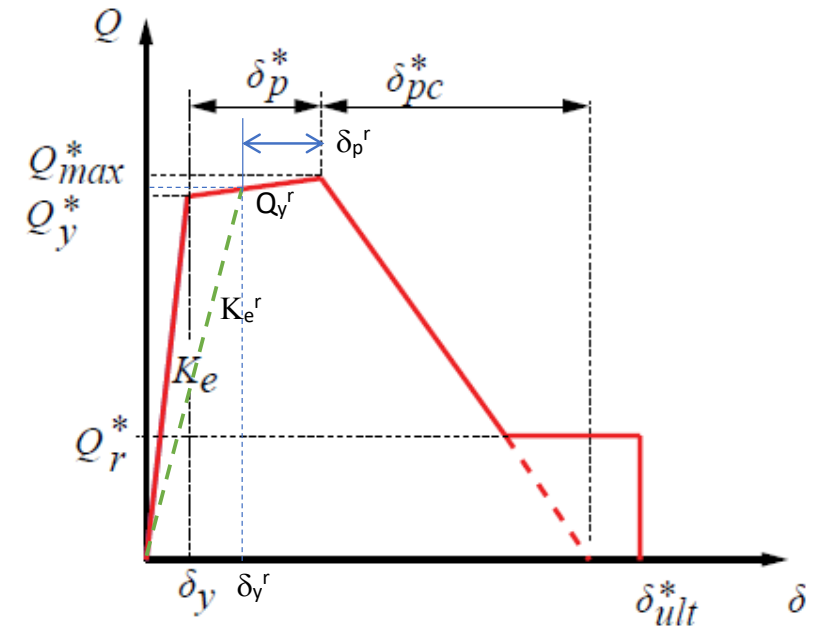


5. ZEMĚTŘESENÍ JAKO MIMOŘÁDNÁ UDÁLOST

POSTUP PRO POSOUZENÍ ROBUSTNOSTI PŘI ZEMĚTŘESENÍ

■ Krok 2: Vyhodnocení zbytkové kapacity po zemětřesení

- Po vyhodnocení lokálních a globálních požadavků na tažnost (Krok 1) jsou pro poškozené prvky (tj. prvky s plastickou deformací) zavedeny úpravy, jejichž výsledkem je upravený nelineární model. Zbytková pevnost sloupu se konzervativně považuje za nulovou, pokud je největší odezvy dosaženo během seismického pohybu
- Je třeba počítat s P- Δ efektem (zejména jsou-li zbytkové příčné deformace po zemětřesení významné)
- Odolnost prutové konstrukce proti následnému seismickému otřesu může být vyhodnocena pomocí nelineární analýzy (např. analýza náhradní vodorovnou silou, pushover). Analýza se provede na poškozeném modelu
- Odolnost prutové konstrukce proti postupnému zhroucení při stálém zatížení lze vyhodnotit statickou analýzou



	Stiffness	Strength	Ductility
Initial (intact)	K_e	Q_y	δ_p
Damaged	K_e^r	Q_y^r	δ_p^r

1. Úvod
2. Náraz
3. Výbuch
4. Požár jako mimořádná událost
5. Zemětřesení jako mimořádná událost
6. Závěr

OBSAH

■ Tato část popisuje strategie zmírňování rizika a návrhové přístupy pro pět typů identifikovaných mimořádných zatížení.

■ **Prezentace je rozdělena následovně:**

1. Úvod
2. Náraz
 - 2.1 Návrhový postup pomocí ekvivalentní statické síly
 - 2.2 Zjednodušená dynamická analýza
 - 2.3 Úplná dynamická analýza
3. Výbuch
 - 3.1 Vnější výbuch
 - 3.2 Vnitřní výbuch plynu
4. Požár jako mimořádná událost
5. Zemětřesení jako mimořádná událost
6. Závěr

6. ZÁVĚR

- V této prezentaci byly představeny návrhové přístupy pro robustnost v případě identifikovaných hrozeb
- Návrhové přístupy vyžadují identifikaci hrozeb a definici souvisejících zatížení
- Byly uvedeny případy nárazu, výbuchu, požáru jako mimořádné události a zemětřesení jako mimořádné události
- U některých zatížení lze úroveň ohrožení snížit nebo dokonce eliminovat preventivními nebo ochrannými opatřeními
- Pro explicitní návrh při identifikovaných mimořádných zatíženích se používají analytické a/nebo numerické metody
- Úroveň sofistikovanosti metod je silně spojena s třídou následků uvažované konstrukce

IDENTIFIKOVANÉ HROZBY

Praha

18.5. 2022

Děkuji! Dank je! Thank you! Merci!
Dankeschön! Grazie! Dziękuję Ci!
Obrigado! Mulțumesc! Gracias!

Marta KUŘÍKOVÁ, Matyáš KOŽICH,
Zuzana KUBÍKOVÁ a František WALD

<http://steel.fsv.cvut.cz/FAILNOMORE/index.htm>

steelconstruct.com/eu-projects/failnomore

