

16 BETONOVÉ KONSTRUKCE

- POKROČILÝ NÁVRH POMOCÍ SOFTWARE

16.1 Požární odolnost podle ČSN EN 1992-1-2

Norma ČSN EN 1992-1-2, viz [16.5], zajišťuje požární odolnost výhradně pasivními prvky, tj. vlastní odolností konstrukce. Hlavním úkolem je zabránit předčasnému kolapsu konstrukce a omezit šíření požáru. Dokument lze použít pro konstrukce nebo jejich prvky navržené podle ČSN EN 1992-1-1, viz [16.4], ale neplatí pro předpjaté konstrukce s vnějšími kabely a pro skořepiny. Metody uvedené v normě ČSN EN 1992-1-2, viz [16.5], lze použít až do třídy betonu C90/105 s tím, že pro třídu vyšší než C50/60 jsou v normě uvedena doplňující pravidla. Při návrhu betonových konstrukcí na účinky požáru se uvažuje mimořádná návrhová situace, viz ČSN EN 1992-1-1 [16.5] a ČSN EN 1991-1-2 [16.3], při návrhu se zohledňují jen rozdíly nebo dodatky k návrhu konstrukce za běžné teploty. Norma obsahuje následující přílohy:

- A – Teplotní profily (plná deska, základní průřezy trámů a sloupů)
- B – Jednoduché metody výpočtu (metoda izotermy 500°C, zónová metoda)
- C – Vzpěr sloupů za požáru (vliv účinků 2. řádu)
- D – Výpočtové metody pro smyk, kroucení a kotvení výztuže
- E – Zjednodušená metoda výpočtu pro trámy a desky (při rovnoměrném zatížení).

16.2 Návrhové metody

ČSN EN 1991-1-2 [16.5] uvádí tři možnosti návrhu požární odolnosti:

- návrh podle osvědčených návrhových řešení (tabulkové údaje nebo zkoušky),
- jednoduché výpočetní metody pro určité typy prvků,
- zpřesněné výpočetní metody pro vystižení chování nosných prvků, částí nebo celé konstrukce.

16.3 Návrh s využitím tabulek

Nejjednodušší způsob ověření požární odolnosti betonových prvků využívá tabulkové údaje, získané ze zkoušek a výpočtů. Tabulkové hodnoty jsou však vázány na jisté konstrukční úpravy, které je nutno vždy splnit. Vzhledem k tomu, že tabulkové hodnoty musí pokrývat celou řadu dalších parametrů prvků, na které nejsou tabulkové hodnoty vázány (tím by značně narostl počet tabulek), jsou hodnoty uvedené v tabulkách na straně bezpečné. Proto, pokud posuzovaný prvek nevyhovuje při posouzení pomocí tabulek, norma ČSN EN 1992-1-2 [16.5] uvádí možnost upřesnění tabulkových údajů pomocí jednoduchých výpočtů. Pokud ani takto prvek nevyhoví, je pak třeba prvek posoudit pomocí jednoduchých metod návrhu.

Tabulkové hodnoty požární odolnosti odpovídají ohřevu prvků podle normové teplotní křivky. Požární odolnost uvedená v tabulkách se označuje jako normová odolnost. Tabulky jsou zpracovány pro expozici do 240 min. Hodnoty uvedené v tabulkách platí pro normální beton (2000 až 2600 kg/m³) se silikátovým kamenivem. Pro beton s vápencovým kamenivem, lze v trámech a deskách rozměry příčného průřezu redukovat o 10%. Při použití tabulek není třeba ověřovat únosnost ve smyku, kroucení a kotvení výztuže. Při tloušťkách krycích vrstev 70 mm a větších, je třeba použít povrchovou výztuž.

Pro kontrolu nosné funkce, kritérium R, jsou v tabulkách uvedeny minimální rozměry průřezu a nejmenší osová vzdálenosti a těžiště výztužných vložek od povrchu betonu v závislosti na době vystavení normové požární expozici. Uvedené hodnoty splňují podmínku spolehlivosti při uvažování $\eta_{fi} = 0,7$. Pokud výztuž je umístěna ve více vrstvách, stanoví se průměrná hodnota a_m jako vzdálenost těžiště výztužných vložek od povrchu betonu. Pokud je použita výztuž o různých pevnostech, pak místo těžiště se stanoví poloha výslednice sil, při uvažování charakteristických pevností výztuže. Při současném použití betonářské a předpínací výztuže (částečně předpjaté prvky) se osová vzdálenosti stanoví odděleně. Při vícevrstvé výztuži nesmí být osová vzdálenost první vrstvy menší, než je požadováno pro požární odolnost R 30, ani menší než je polovina nejmenší osová vzdálenosti stanovené pro vícevrstvou výztuž. Připouští se lineární interpolace mezi sousedními hodnotami uvedenými v tabulkách.

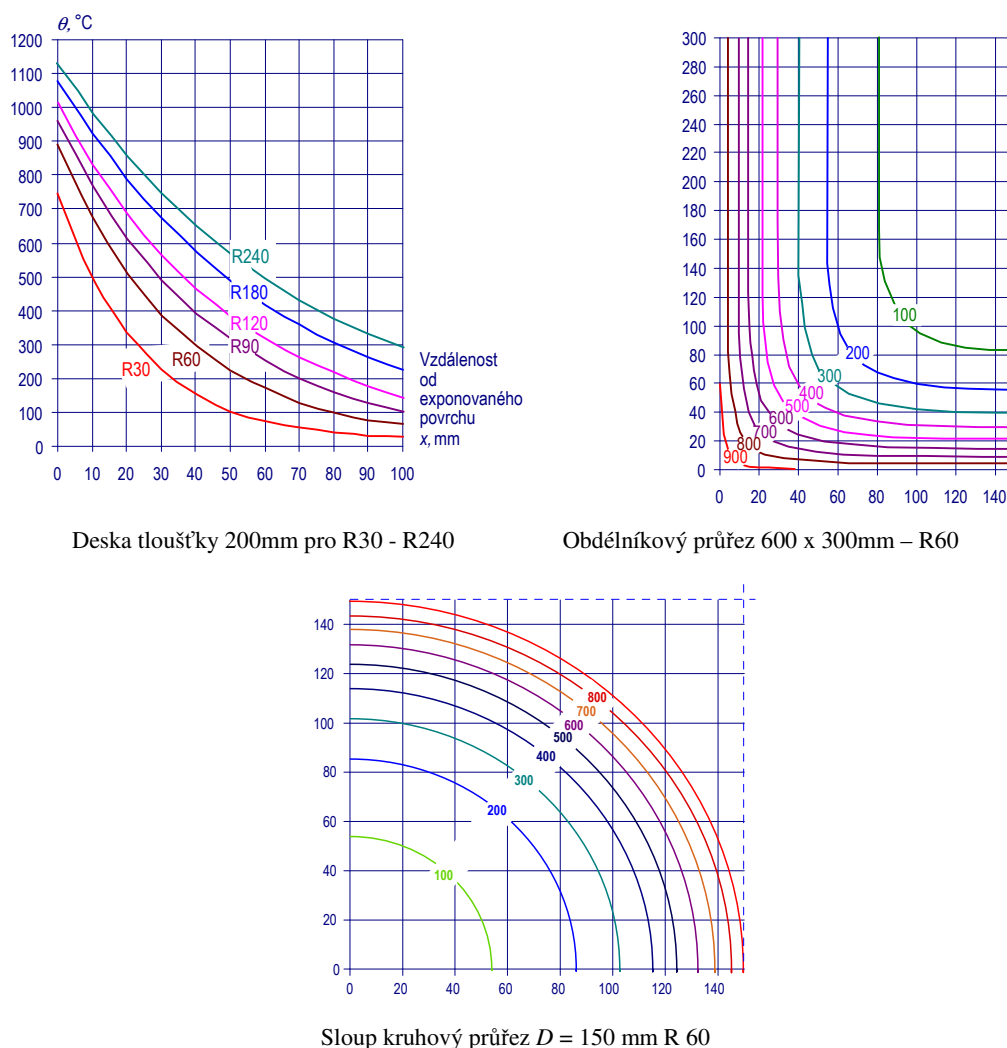
Požadavky pro požárně dělící funkci (kritéria E a I) jsou splněny dodržením nejmenší tloušťky stěny nebo desky. Použití tabulek pro posouzení požární odolnosti prvků je uvedeno v [16.6], vývojové diagramy pro posouzení a další informace jsou uvedeny na adrese www.fsv.cvut.cz/pozarni.odolnost. Proto v dalším bude věnována pozornost zejména jednoduchým výpočetním metodám.

16.4 Jednoduché výpočetní metody

Jednoduchými výpočetními metodami se určuje mezní únosnost otepleného průřezu a porovnává se s účinky zatížení při příslušné kombinaci zatížení.

Pro stanovení únosnosti průřezu namáhaných ohybovými momenty a normálovými silami při požáru, jsou v informativní příloze B ČSN EN 1992-1-2 [16.5] uvedeny dvě alternativní průřezové metody založené na redukci průřezu, a to metoda izotermy 500°C a zónová metoda. Obě metody umožňují vystižení účinků druhého řádu (štíhlé prvky). Obě metody jsou použitelné pro konstrukce vystavené normovému požáru, metodu izotermy 500°C lze použít i pro parametrický požár. V příloze B je uvedeno posouzení železobetonového průřezu s významnými účinky druhého řádu namáhaného ohybovým momentem a osovou silou metodou založenou na odhadu křivosti. Jednoduchá výpočetní metoda pro smyk, kroucení a kotvení je popsána v informativní příloze D. Jednoduchá metoda výpočtu, uvedená v příloze E, je použitelná převážně pro rovnoměrně zatížené trámy a desky.

Pro použití těchto jednoduchých výpočetních metod je potřeba znát rozložení teplot po průřezu v určité době požárního vystavení. Rozložení teploty je možné stanovit zkouškami, pomocí teplotních profilů uvedených v normě [16.5], nebo pomocí vhodných výpočetních programů. Pro běžné tvary průřezů jsou v příloze A normy ČSN EN 1992-1-2 uvedeny průběhy rozložení teplot při normovém požáru; najdeme zde rozložení teplot v desce, sloupech a trámech. Příklady některých teplotních polí uvedených v normě [16.5], jsou na obr. 16.1 (pro beton se silikátovým kamenivem při normovém požáru).



Obr. 16.1 Rozložení teplot v desce, v obdélníkovém průřezu a průřezu kruhového sloupu podle [16.5]

Teplotní profily uvedené v normě [16.5] jsou stanoveny pouze nejběžnější tvary a rozměry průřezů vystavených požáru po určitou dobu. V praxi se však vyskytují průřezy i jiných rozměrů a tvarů s jinou požadovanou dobou požárního vystavení. Pro některé z nich byly pomocí výpočetního programu TCD 5.0 [16.7] stanoveny teplotní pole, která jsou nezbytná pro určení teploty v průřezu při požadované době požárního vystavení. Tento program řeší dvojrozměrné teplotní pole daného průřezu metodou konečných prvků a také stanovuje únosnost průřezů při zvýšené teplotě.

Pomocí programu TCD 5.0 byly sledován vliv rozměrů, tvaru průřezu a doba požárního vystavení na teplotní profily průřezů [16.8]. V tomto programu byly definovány následující vstupní hodnoty: materiálové charakteristiky dle ČSN EN 1992-1-2, tj. beton z křemičitého kameniva s vlhkostí 1,5 %. Zatížení požárem bylo uvažováno dle normové nominální křivky ISO 834, geometrie dle typu průřezu s příslušnými okrajovými podmínkami.

Výpočty byly provedeny pro desky různých tloušťek, pro kruhové a obdélníkové průřezy a pro průřez tvaru T. Některé výsledky těchto výpočtů jsou dále uvedeny.

V ČSN EN 1992-1-2 v příloze A obr. A.2 lze najít rozložení teplot pro desku tloušťky 200 mm. Programem TCD byly spočítány i desky jiných tloušťek (100, 150, 250, 300 mm). Všechny desky byly namáhané požárem při spodním líci. Z provedených výpočtů vyplývá, že teploty u ohříváního povrchu u všech tloušťek desky v oblasti běžných uložení nosné tahové výztuže, jsou pro různé časy prakticky shodné. Po delším ohřevu se objeví malé rozdíly okolo 10°C ve vzdálenosti 80 mm od ohříváního povrchu. Pro stanovení charakteristik výztuže je tato skutečnost zanedbatelná. Teploty na odvrácené straně jsou podstatné pro stanovení pevnosti tlačeného betonu. Zde se již objevují malé rozdíly. Pokud budeme sledovat izotermu 500°C zjistíme že se pro R30, R60 a R90 nachází ve stejné vzdálenosti od ohříváního povrchu; pro R120 je rozptýl její vzdálenosti od ohříváního povrchu 4 mm. Z výše uvedeného je patrné, že teploty pro desku tl. 200 mm uvedené v normě [16.5] se dají použít i pro desky jiných tloušťek.

Uvedeným programem byly vyšetřovány sloupy kruhového průřezu těchto rozměrů: 200, 250, 300, 350 a 400mm. Šíření tepla a tedy i průběh teplot směrem od povrchu sloupů je velice podobný u všech zkoumaných rozměrů. Proto teplotu výztuže (která je blízko povrchu) můžeme stanovit z teplotního profilu sloupu o průměru 300mm uvedeného v normě [16.5]. Při použití metody izotermie 500°C lze u nižších požárních odolností uvažovat vzdálenost izotermie 500°C od povrchu sloupu prakticky totožnou jako je uvedena v normě [16.5] pro sloup o průměru 300 mm. U vyšších odolností se však tyto hodnoty rozcházejí (Tab. 16.1).

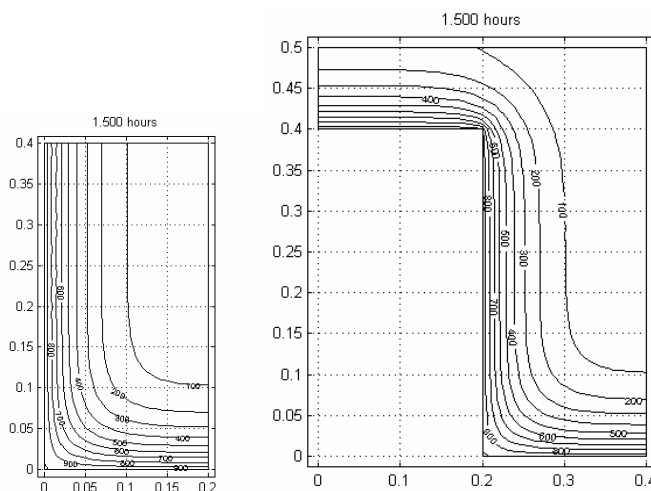
Tab.16.1 Vzdálenost izotermie 500°C od povrchu sloupu

průměr sloupu [mm]	Vzdálenost izotermie 500°C od povrchu sloupu [m]					
200	0,012	0,030	0,050	0,090	-	-
250	0,012	0,025	0,040	0,057	-	-
300	0,012	0,025	0,037	0,050	-	-
350	0,012	0,025	0,036	0,045	0,055	0,065
400	0,012	0,022	0,035	0,045	0,052	0,064

U desky namáhané požárem při spodním líci a u kruhového průřezu sloupu namáhaného požárem po celém obvodu lze sledovat nárůst teploty po přímce kolmé k povrchu prvku. U obdélníkových a čtvercových průřezů záleží výsledné rozložení teplot nejen na rozměrech průřezu, ale u obdélníkových průřezů také na poměru stran.

V normě jsou opět uvedena teplotní pole pro některé obdélníkové průřezy ohříváné ze všech čtyř stran. Tyto podklady lze tedy použít např. pro sloupy ohříváné ze všech čtyř stran. Pokud bychom takto počítali trám, ohříváný jen při spodním povrchu, vyšla by nám únosnost průřezu podle normových podkladů menší. Kromě toho u trámu spojeného s deskou a vystaveného požáru zdola, uplatní se vliv spolupůsobící desky. Připojená deska v podstatě izoluje horní část průřezu a tak zvyšuje pevnost tlačného betonu a dále zvětšuje šířku tlačné oblasti.

Na obr. 16.2 je znázorněno teplotní pole nosníku širokého 400 mm v čase 90 minut, přičemž průřez modelován jednak jako obdélníkový ohříváný ze všech čtyř stran (stejně jako v normě), a jednak jako T průřez ohříváný zdola. Sledujme průběh izotermy 500°C v těchto dvou případech. Pokud bychom uvažovali hodnoty z normy, pravděpodobně bychom šířku tlačné oblasti uvažovali 340 mm (tj. šířka nosníku minus ohřátá část trámu v šířce 2·30 mm) dle obr. 16.2 vlevo. Pokud ovšem budeme celý trám modelovat včetně desky viz obr. 16.2 vpravo, pak pro stejnou dobu zatížení dostaneme šířku tlačné oblasti mnohem vyšší. Z obrázku je patrné, že můžeme dokonce počítat se spolupůsobící částí desky.



Obr. 16.2 Izotermy R90 pro průřez tvaru T průřez tvaru T

Programem TCD 5.0 [16.7] byly též stanoveny teplotní pole průřezů některých předpjatých dutinových panelů uvedených v příloze A, zpracované Ing. J. Langrem.

V případech, kdy je třeba vyšetřit teplotní profily průřezů odlišných tvarů, nebo rozměrů než je uvedeno v normě [16.5], nebo kdy nutné hledat větší množství hodnot a pak použití teplotních profilů je poměrně pracné (zejména při výpočtu zónovou metodou) a v neposlední řadě v případech, kdy uvažujeme průřezy vystavené parametrickému požáru, lze použít některý z výpočetních programů (ConTemp, TCD aj.). V následujícím textu bude popsán výpočet pomocí programu ConTemp.

Program ConTemp [16.9] je společně s uživatelskou příručkou [16.10] volně dostupný na internetových stránkách Technical University of Denmark, Department of Civil Engineering (www.byg.dtu.dk). Program počítá teplotu v bodě zadaném souřadnicemi x , y , kde x se měří podél rozměru W a y podél rozměru H zadaného tvaru průřezu (obr. 16.3.a až obr. 16.3.e).

Teplota v bodě (x, y) se vypočítá pro parametrický požár zadaný faktorem otvorů O [$\text{m}^{1/2}$], požárním zatížením vztaženým k celé ploše povrchu ohraničujících konstrukcí q_{id} [MJ/m^2] a koeficientem povrchů b [$\text{J}/\text{m}^2\text{s}^{1/2}\text{K}$]. Alternativně se teplota může určit pro normový požár.

Maximální teplota v bodě (x, y) je vypočtena, pokud jí je dosaženo do 10 hodin od začátku požáru. Kromě maximální teploty v zadaném bodě pracuje program také s tzv. „HOT“ teplotou. To je teplota dosažená v čase, ve kterém je maximální teplota právě v hloubce 30 mm pod povrchem betonu.

Výstupem z výpočtu jsou čtyři datové soubory s příponou „.RES“. Tyto soubory jsou automaticky uloženy do stejné složky, ve které je umístěn program ConTemp. K otevření souborů je možné použít např. program WordPad - Poznámkový blok.

Jedná se o následující datové soubory:

1. CONTXY.RES

Udává změnu teploty v čase v zadaném bodě (x, y) . Časový interval je 1 min.

2. CONTXTI.RES

Udává změnu teploty napříč průřezem (po 1 cm do vzdálenosti W) v zadaném čase t .

3. CONTXMAX.RES

Udává maximální teploty napříč průřezem (po 1 cm do vzdálenosti W).

4. CONTXHOT.RES

Udává změnu teploty napříč průřezem (po 1 cm do vzdálenosti W) v čase „HOT“, ve kterém je maximální teplota právě v hloubce 30 mm pod povrchem betonu.

Pomocí vhodně zadaných rozměrů W [m] a H [m] je možné modelovat následující průřezy:

a) *Sloup vystavený požáru ze čtyř stran* (obr. 16.3.a)

Pro sloup vystavený požáru ze čtyř stran se označí jeho šířka jako $2W$ a výška jako $2H$. Musí platit $H \geq W$. Pro zadání bodu (x, y) se souřadnice x měří podél rozměru W , souřadnice y podél rozměru H .

b) *Trám (sloup) vystavený požáru ze tří stran* (obr. 16.3.b)

Pro trám (sloup) vystavený požáru ze tří stran, u kterého je výška větší než polovina šířky, se označí jeho šířka jako $2W$ a výška jako H . Musí platit $H \geq W$. Pro zadání bodu (x, y) se souřadnice x měří podél rozměru W , souřadnice y podél rozměru H .

c) *Nízký trám vystavený požáru ze tří stran* (obr. 16.3.c)

Pro nízký trám vystavený požáru ze tří stran, u kterého je výška menší než polovina šířky, se označí jeho šířka jako $2H$ a výška jako W . Musí platit $H \geq W$. Pro zadání bodu (x, y) se souřadnice x měří podél rozměru W , souřadnice y podél rozměru H .

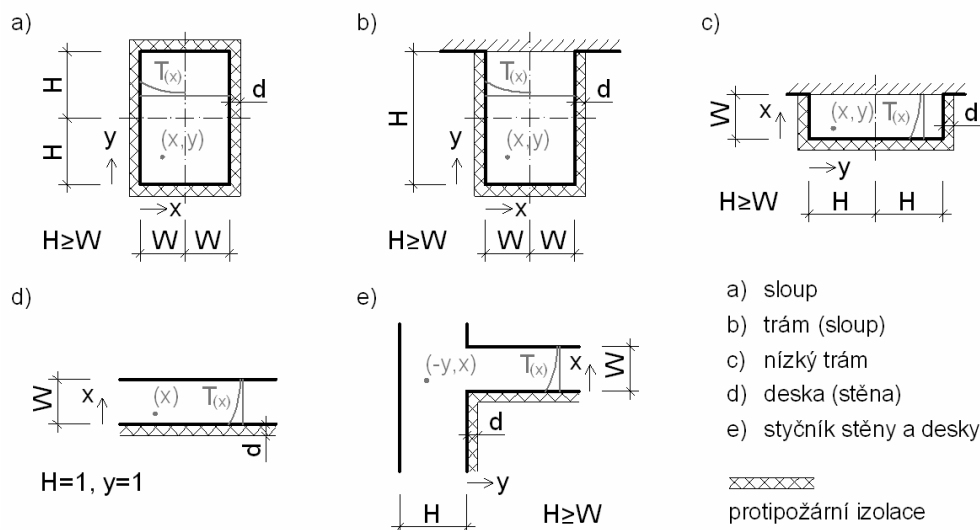
d) *Deska či stěna vystavená požáru z jedné strany* (obr. 16.3.d)

Pro stěnu či desku vystavenou požáru z jedné strany se její tloušťka označí jako W . Rozměr H a souřadnice y se uvažují rovny jedné. Pro zadání „bodu“ (x) se souřadnice x měří ve směru rozměru W .

e) Styčnick stěny a desky (obr. 16.3.e)

Pro styčnick stěny a desky je možné přibližně určit teplotu (např. v kotevní oblasti) zadáním záporné hodnoty souřadnice x či y . Menší z tlouštěk stěny či desky se označí jako W , větší jako H . Pro zadání bodu (x, y) se souřadnice x měří podél rozměru W , souřadnice y podél rozměru H .

Pro všechny průřezy je také možné zadat parametry požárně ochranné vrstvy, tzn. tloušťku d [m] a hodnotu tepelné vodivosti izolace [W/mK].



Obr. 16.3. Geometrie a typy průřezů, podle [16.10]

Zadávaní parametrů pro výpočet:

Po otevření programu se objeví zadávací panel (obr. 16.4). Postup zadávání parametrů pro výpočet je následující:

- Zadájí se rozměry prvku W [m] a H [m] podle obr. 16.3.
- Zadájí se souřadnice bodu (x, y) , ve kterém chceme zjistit teplotu.
- Zadá se čas t [min], ve kterém chceme zjistit teplotu v bodě (x, y) .
- Pokud se použije izolační vrstva, zadá se její tloušťka d [m] a hodnota tepelné vodivosti - Conductivity of insulation [W/mK].
- Zvolí se buď výpočet podle parametrického požáru („Opening Factor Fire“) nebo výpočet podle normového požáru s fází chladnutí („Standard Fire With Cooling“). Vždy se značí „Opening Factor Fire“ (viz dále).
- Pro parametrický požár se zadá faktor otvorů („Opening Factor“) O [m^{1/2}], požární zatížení („Fire Load“) vztažené k celé ploše povrchu ohraničujících konstrukcí q_{td} [MJ/m²] a koeficient povrchů („Thermal Inertia“) b [J/m²s^{1/2}K]. Zadání normového požáru je vysvětleno níže.
- V kolonce „Concrete“ se zvolí odpovídající beton – při použití běžného kameniva se označí položka „1 Main Group Concrete“, při použití síkatového kameniva „2 Siliceous Concrete“.

Kliknutím na označení vybraného betonu se spustí výpočet.

ConTemp

Calculates the temperature in a point (x,y) and through a two sided exposed wall.

Version date 2006-11-20
Expiration date 2008-01-01
The date today 2006-11-20

W 0.150 m H 1.000 m
x 0.030 m y 1.000 m
t 60 min d 0.000 m
Conductivity of insulation 0.15 W/mC

Concrete 1 Main Group Concrete Click on name!

☒ Opening Factor Fire ☐ Standard Fire With Cooling
Opening Factor 0.02 m² Fire Load 200 MJ/m²
Thermal Inertia b 1160 Ws½/m²C

Output
Temperature at time t 257. C in point (X,Y)
Max temperature 413. C Found at time 162 min
HOT Temperature 413. C Found at time 150 min

Made by Kristian Hertz
The program can be used on your own responsibility

END

Obr. 16.4. Zadávací panel programu ConTemp

Výsledky:

Některé výsledky se zobrazí přímo ve spodní části zadávacího panelu, a sice:

- teplota v bodě (x, y) v čase t,
- maximální teplota v bodě (x, y) a čas, ve kterém je této teploty dosaženo,
- teplota „HOT“ v bodě (x, y) a čas, ve kterém je této teploty dosaženo (teplota „HOT“ je teplota dosažená v čase, ve kterém je maximální teplota právě v hloubce 30 mm pod povrchem betonu).

Podrobnější výsledky jsou zapsány ve čtyřech datových souborech do složky, ve které je umístěn program ConTemp (viz výše).

Upozornění:

Po zadání číselné hodnoty do zadávacího pole se nesmí stisknout Enter (vyvolá zavření programu). Desetinná čísla se oddělují tečkou (např. 9.78, nikoli 9,78). Pokud se změní zadávací parametry po provedení výpočtu (po kliknutí na označení betonu), změní se i data v uložených datových souborech.

Obrázek v pravém horním rohu zadávacího panelu je pouze ilustrativní, skutečný tvar a typ prvku je dán volbou rozměrů W a H (viz výše).

Popis výpočetní metody, modelování požáru

Výpočet rozdělení teploty v zadaném betonovém prvku je založen na metodě konečných diferencí. Proces výpočtu probíhá do okamžiku, kdy je ve všech vrstvách dosaženo maximální teploty, nejdéle však do maximální doby požáru 10 h (600 min). Podrobné informace o výpočtu a o uvažovaných fyzikálních parametrech betonu je možné nalézt v originále uživatelské příručky [16.10].

Vývin požáru je modelován pomocí vztahů uvedených v Danish action code DS410. Parametrická teplotní křivka je definována vztahem (16.1).

$$\theta_g = 20 + \frac{150 \cdot \ln(8 \cdot \Gamma \cdot t + 1)}{1 + 0,04 \cdot (t/t_d)^{3,5}}, \quad (16.1)$$

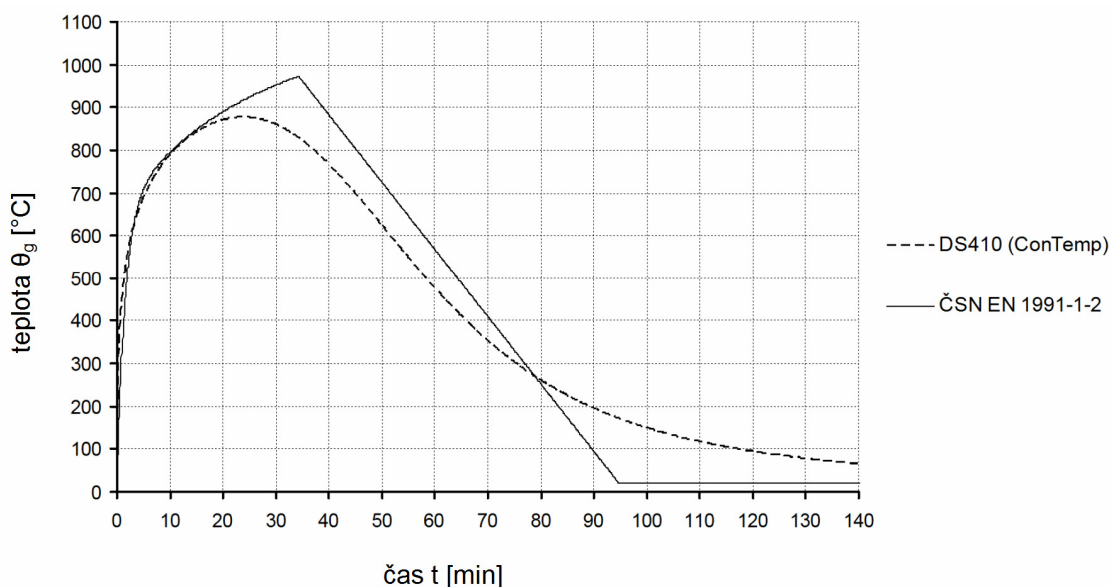
kde

$$\Gamma = \frac{\left(\frac{O}{b}\right)^2}{\left(\frac{0,04}{1160}\right)^2}, \quad (16.2)$$

$$t_d = 7,80 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{q_{td}}{O}. \quad (16.3)$$

Pro výpočet veličin Γ , O , b a q_{td} lze použít vztahy z ČSN EN 1991-1-2 [16.3].

Parametrická křivka popsaná výše uvedenými vztahy není totožná s parametrickou křivkou definovanou normou [16.3]. Pro názornost budou porovnány křivky pro zvolený požární úsek s následujícími parametry: $q_{td} = 200 \text{ MJ/m}^2$, $b = 1400/\text{m}^2\text{s}^{1/2}\text{K}$, $O = 0,07^{1/2}$. Z obr. 16.5 je zřejmé, že obě porovnávané křivky mají přibližně stejný průběh.



Obr. 16.5 Porovnání parametrické teplotní křivky podle normy [16.3] a podle Danish action code DS410 (ConTemp) pro zadaný požární úsek

Kromě uvedené parametrické křivky udává autor programu také možnost výpočtu pro „Standard Fire with a cooling phase“, tedy normový požár s fází chladnutí. V ČR platná norma [16.3] však normovou křivku s fází chladnutí neudává, a ani v uživatelské příručce [16.10] není tato křivka podrobně popsána. Proto pokud neznáme křivku s fází chladnutí, lze doporučit, aby bylo počítáno vždy jen s použitím „Opening Factor Fire“. Pro modelování normového požáru však může být s výhodou použit následující postup.

Postup zadání normového požáru:

- Označí se položka „Opening Factor Fire“ (stejně jako pro výpočet parametrického požáru). Program bude počítat podle vztahů uvedených výše.
- Položky O a b se zadají referenčními hodnotami uvedenými v normě [16.3]; tedy $O = 0,04 \text{ m}^{1/2}$, $b = 1 \text{ 160 J/m}^2\text{s}^{1/2}\text{K}$. Program poté bude počítat s hodnotou $\Gamma = 1$.
- Zadá se velká hodnota požárního zatížení, např. $q_{td} = 10^5 \text{ MJ/m}^2$, obecně $q_{td} \rightarrow \infty$.

Program bude počítat: $t_d \rightarrow \infty$, poté $\left(1 + 0,04 \cdot (t/t_d)^{3,5}\right) \rightarrow 1$ a výsledná rovnice požární křivky bude mít podobu:

$$\theta_g = 20 + 150 \cdot \ln(8t + 1). \quad (16.4)$$

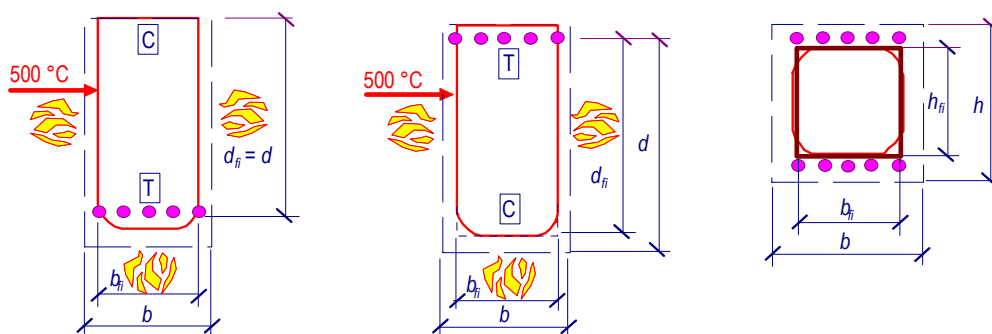
Křivka vyjádřená touto rovnicí má téměř stejný průběh a dosahuje přibližně stejných hodnot jako normová křivka popsaná v normě [16.3] rovnicí:

$$\theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1). \quad (16.5)$$

Křivky popsané pomocí vztahů (16.4) a (16.5) se liší průměrně cca o 1°C . Z toho plyne, že program ConTemp je výhodné použít pro výpočet teplot v prvcích vystavených normovému požáru, pokud je tento požár zadán podle výše uvedených pravidel.

16.4.1 Metoda izotermie 500°C

Tato metoda je založena na hypotéze, že beton vystavený teplotě vyšší než 500°C je ve výpočtech meze únosnosti zanedbán, přičemž beton s nižší teplotou si svou únosnost zachovává a je započítán (viz obr. 16.6). Metodu lze použít pro normovou i parametrickou teplotní křivku. Metoda platí pro namáhání průřezu normálovou silou, ohybovým momentem nebo jejich kombinací. Tuto metodu lze uplatnit pouze na prvky konstrukcí, jejichž rozměry splňují podmínky minimální šířky průřezu uvedené v tab. 16.2.



Obr. 16.6 Metoda izotermie 500°C

Tab.16.2 Minimální šířka průřezu jako funkce požární odolnosti (pro vystavení normovému požáru) a hustoty požárního zatížení (pro vystavení parametrickému požáru)

a) Požární odolnost

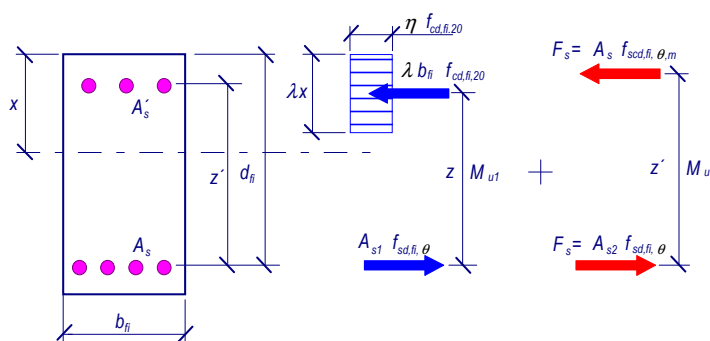
Požární odolnost	R 60	R 90	R 120	R 180	R 240
Minimální šířka průřezu v mm	90	120	160	200	280

b) Hustota požárního zatížení

Hustota požárního zat. MJ/m ²	200	300	400	600	800
Minimální šířka průřezu v mm	100	140	160	200	240

Postup lze rozdělit do několika kroků:

- stanoví se izoterma 500°C pro daný čas požárního vystavení (normový požár nebo parametrický požár),
- stanoví se nová šířka b_{fi} a nová účinná výška d_{fi} příčného průřezu, při vyloučení betonu větší teploty než 500°C; přičemž izotermu lze idealizovat pravoúhelníkovým průřezem,
- stanoví se teplota v těžišti jednotlivých výztužných prutů ležících uvnitř průřezu b_{fi} a d_{fi} např. s použitím teplotních profilů, do výpočtu únosnosti lze zahrnout i pruty ležící vně tohoto průřezu, avšak při respektování příslušné snížené pevnosti - viz obr. 16.6 ,
- stanoví se redukované pevnosti ve výztuži – viz [16.5],
- obvyklou metodou se stanoví mezní únosnost redukovaného průřezu viz obr. 16.7,
- porovná se účinek návrhového zatížení s odpovídající mezní únosností.



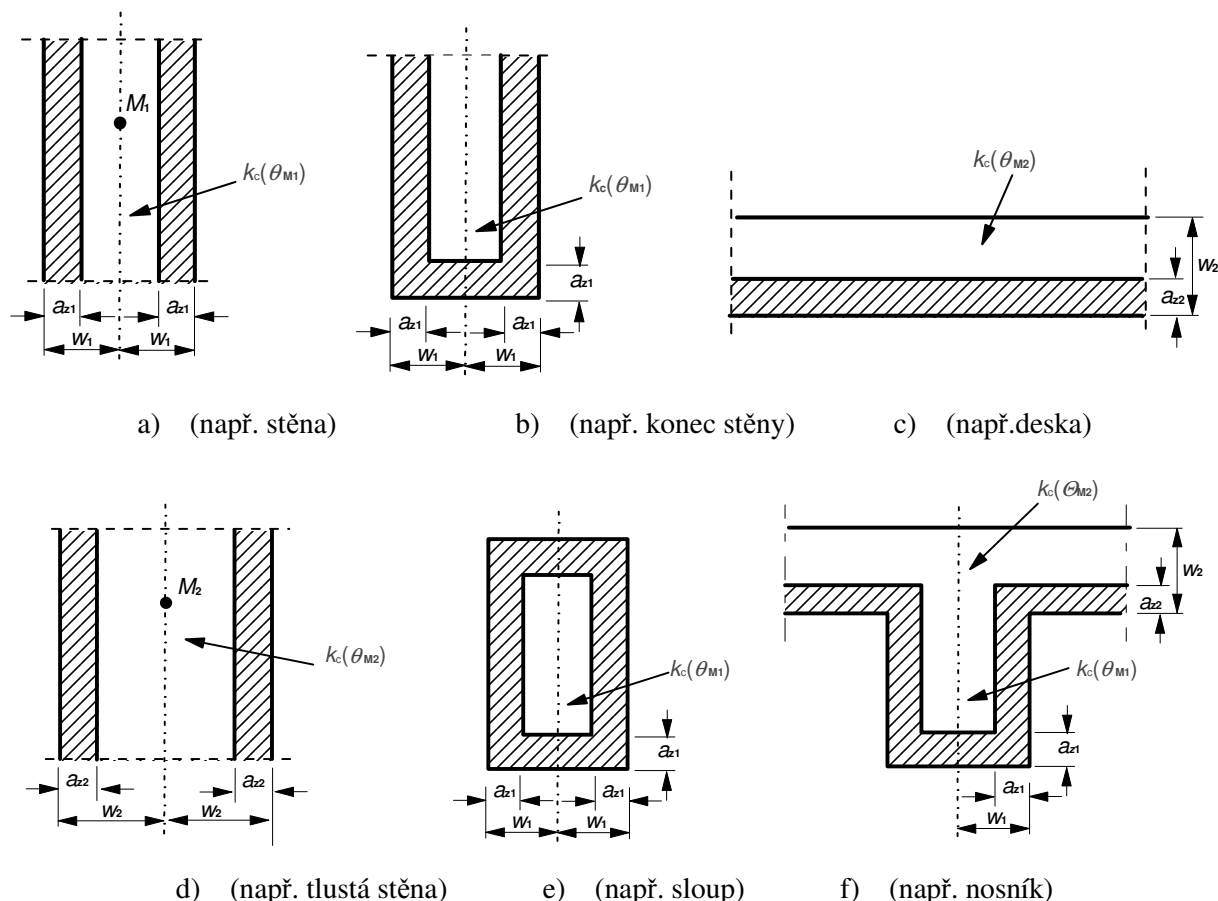
Obr. 16.7 Výpočet mezní únosnosti ohybaného průřezu

16.4.2 Zónová metoda

Tato metoda, i když je pracnější, je přesnější než metoda izotermu 500°C, zejména u sloupů. Metodu lze použít pouze pro normovou teplotní křivku. Metodu lze uplatnit pro namáhání průřezu normálovou silou, ohybovým momentem nebo jejich kombinací.

Teplotou poškozený průřez je vyjádřen redukovaným průřezem, který neuvažuje teplotou poškozené zóny o tloušťce a_z na stranách vystavených požáru, viz obr. 16.8. Lze jej představit např.

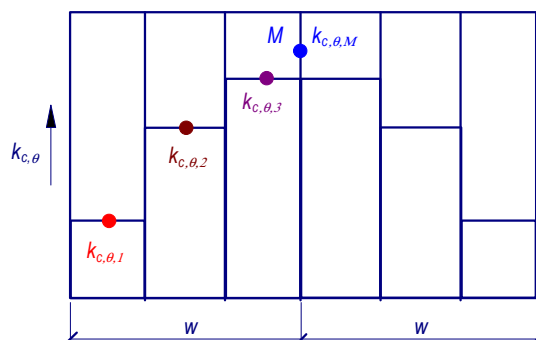
ekvivalentní stěnou uvedenou na obr. 16.8a a 16.8d. Redukovaná pevnost v tlaku celého redukovaného průřezu se stanoví v bodě M na ose ekvivalentní stěny. Pokud jsou požáru vystaveny dvě protilehlé strany, uvažuje se šířka $2w$ (viz obr. 16.8a). Pro obdélníkový průřez vystavený požáru jen z jedné strany se uvažuje šířka w (viz obr. 16.8 c). Tlustá stěna je reprezentována stěnou se šířkou rovnou $2w$ (viz obr. 16.8d). Příruba na obr. 16.8f odpovídá ekvivalentní stěně na obr. 16.8c a stojina ekvivalentní stěně na obr. 16.8a. Pro spodní části a konce obdélníkových prvků vystavených požáru, u nichž šířka je menší než výška, se předpokládá, že hodnota a_z je stejná jako hodnoty vypočítané pro strany, viz obr. 16.8b, e, f.



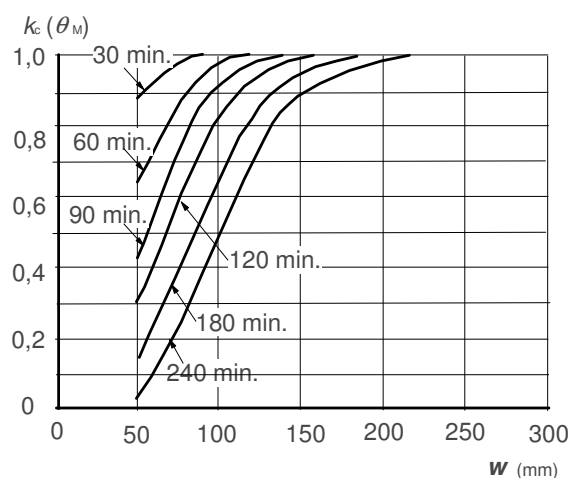
Obr. 16.8 Redukce pevnosti a průřezů při vystavení požáru

Redukce průřezu se stanoví na základě poškozené zóny tloušťce a_z na stranách vystavených požáru, která se vypočítá následovně. Poškozená zóna a_z se určí jako pro ekvivalentní stěnu vystavenou požáru z obou stran. Postup výpočtu je následující:

- průřez se rozdělí na několik rovnoběžných zón ($n \geq 3$) stejné tloušťky (pravoúhelníkové prvky), např. pro stěnu viz obr. 16.9,
- ve středu každé zóny se stanoví teplota θ_i ,
- dále se stanoví odpovídající redukční součinitel k_{c,θ_i} tlakové pevnosti betonu – viz [16.5],



Obr.16.9 Rozdělení stěny vystavené požáru z obou stran na zóny, při výpočtu redukované pevnosti a hodnoty a_z



w je určeno jako:

- tloušťka desky,
- tloušťka stěny nebo sloupu
- , vystavených požáru z jedné strany,
- polovina šířky stojiny nosníku,
- polovina tloušťky stěny nebo
- sloupu vystavených požáru z obou stran
- polovina nejmenšího rozměru
- sloupu vystaveného požáru ze čtyř
- stran.

Obr. 16.10 Redukce pevnosti v tlaku pro redukovaný průřez z betonu s křemičitým kamenivem bod M

- střední součinitel redukce pro konkrétní průřez, který zahrnuje součinitel $(1 - 0,2 / n)$ vyjadřující změny teploty v každé zóně, lze vypočítat ze vztahu:

$$k_{c,m} = \frac{(1 - 0,2n)}{n} \sum_{i=1}^n k_{c,\theta,i}, \quad (16.6)$$

kde n je počet rovnoběžných zón v šířce w , w je polovina šířky průřezu, m číslo zóny,

- šířka poškozené části se stanoví u desek, trámů nebo prvků namáhaných ohybem:

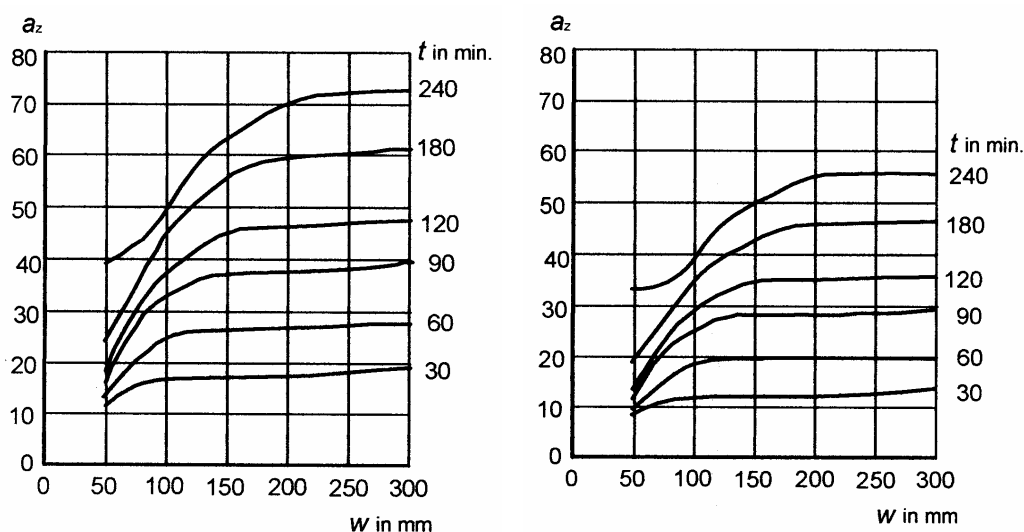
$$a_z = w \left[1 - \left(\frac{k_{c,m}}{k_{c,\theta,M}} \right) \right], \quad (16.7)$$

u sloupů, stěn a dalších konstrukcí, kde se uplatní účinek druhého řádu:

$$a_z = w \left[1 - \left(\frac{k_{c,m}}{k_{c,\theta,M}} \right)^{1,3} \right], \quad (16.8)$$

- po stanovení redukovaného průřezu, pevností a případného modulu pružnosti za požáru, se provede výpočet mezní únosnosti redukovaného průřezu obdobně jak je naznačeno na obr. 16.7, při použití součinitelů $\gamma_{m,fi}$, avšak uvažuje se redukovaná pevnost tlačného betonu, která se stanoví v bodě M redukované stěny, viz obr. 16.9,
- porovná se účinek návrhového zatížení s odpovídající mezní únosností.

Pro stanovení požárem poškozené části o tloušťce a_z a pro stanovení redukované pevnosti tlačného betonu v bodě M redukované stěny, jsou uvedeny v [16.5] grafy – viz obr. 16.10 a 16.11.



Obr. 16.11 Redukce průřezu a_z z betonu s křemičitým kamenivem při normové teplotní křivce
a) trámy a desky, b) sloupy nebo stěny

16.4.3 Jednoduchá výpočetní metoda pro nosníky a desky

Metoda platí jen pro převážně rovnoměrné zatížení spojitých nosníků nebo desek, kde byl návrh při běžné teplotě založen na lineární analýze nebo lineární analýze s omezenou redistribucí momentů podle kapitoly 5 EN 1992-1-1 [16.4] (při redistribuci vyšší než 15 % je třeba zajistit dostatečnou rotační kapacitu v podporách pro požadované vystavení požáru).

Tato jednoduchá výpočetní metoda rozšiřuje použití tabulkové metody pro nosníky vystavené požáru na třech stranách a desky. Metoda určuje vlivy na únosnost v ohybu pro případy, kdy osová vzdálenost a spodní výztuže od povrchu je menší, než je požadováno v tabulkách. Minimální rozměry průřezu ($b_{\min}$, b_w , h_s), dané v tabulkách, se nemají redukovat. Tato metoda používá součinitele redukce pevnosti uvedeného v [16.5] obr. 5.1. Metoda neplatí pro spojitě nosníky, které mají v oblasti záporného momentu šířku $b_{\min}$ nebo b_w menší než 200 mm a výšku h_s menší než $2b$, kde $b_{\min}$ je hodnota uvedená v [16.5] sloupec 5 tab. 5.5.

Prostě podepřené nosníky a desky

Má se ověřit že

$$M_{Ed,fi} \leq M_{Rd,fi}. \quad (16.9)$$

Zatížení při požáru se stanoví podle EN 1991-1-2 [16.3]. Postup výpočtu je následující:

- Vypočte se maximální návrhový moment při požáru $M_{Ed,fi}$ pro převážně rovnoměrné zatížení ze vztahu

$$M_{Ed,fi} = w_{Ed,fi} l_{eff}^2 / 8, \quad (16.10)$$

kde $w_{Ed,fi}$ je rovnoměrné zatížení (kN/m) při požáru,

l_{eff} účinná délka nosníku nebo desky.

- Dále stanovíme moment únosnosti $M_{Rd,fi}$ při návrhu pro požární situaci ze vztahu

$$M_{Rd,fi} = (\gamma_s / \gamma_{s,fi}) \times k_s(\theta) \times M_{Ed} (A_{s,prov} / A_{s,req}), \quad (16.11)$$

kde γ_s je dílčí součinitel spolehlivosti materiálu pro ocel používaný v EN 1992-1-1 [16.4], $\gamma_{s,fi}$ dílčí součinitel spolehlivosti materiálu pro ocel při požární situaci, $k_s(\theta)$ součinitel redukce pevnosti oceli pro danou teplotu θ pro požadovanou požární odolnost; teplota θ může být stanovena podle teplotních profilů – viz obr. 16.1 a 16.2, M_{Ed} působící moment pro návrh při běžné teplotě podle EN 1992-1-1 [16.4], $A_{s,prov}$ plocha navržené tahové výztuže, $A_{s,req}$ plocha tahové výztuže při návrhu za běžné teploty podle EN 1992-1-1 [16.4] a $A_{s,prov} / A_{s,req}$ nemá být větší než 1,3.

Spojité nosníky a desky

Při návrhu na účinky požáru se má zajistit statická rovnováha ohybových momentů a posouvajících sil po celé délce spojitých nosníků a desek. Pro zajištění této rovnováhy při návrhu na účinky požáru, je možné redistribuovat momenty z pole do podpor tam, kde je nad podporou navržena dostatečná výztuž pro návrhové zatížení při požáru. Tato výztuž má dostatečně přesahovat do pole tak, aby se zajistilo bezpečné přenesení momentové obálky.

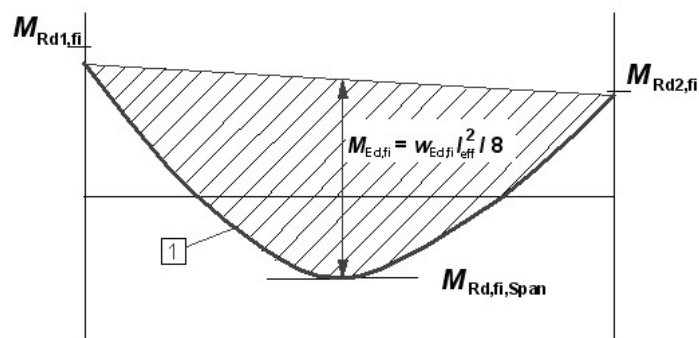
Únosnost průřezu v ohybu $M_{Rd,fi,Span}$ v místě maximálního mezipodporového momentu se vypočte pro podmínky požáru podle vztahu (16.11). Maximální ohybový moment na prostém nosníku od působícího rovnoměrného zatížení při požáru $M_{Ed,fi} = w_{Ed,fi} l_{eff}^2 / 8$, má být umístěn v tomto momentu únosnosti tak, aby podporové momenty $M_{Rd1,fi}$ a $M_{Rd2,fi}$ zajistily rovnováhu, viz obr. 16.12. To lze provést tak, že se zvolí podporový moment na jedné straně jako rovný nebo menší než je únosnost v ohybu v této podpoře, stanovený podle vztahu (16.12) a potom se vypočítá požadovaný moment ve druhé podpoře.

Moment únosnosti v podpoře při návrhu pro požární situaci lze stanovit ze vztahu

$$M_{Rd,fi} = (\gamma_s / \gamma_{s,fi}) M_{Ed} (A_{s,prov} / A_{s,req}) (d - a) / d \quad (16.12)$$

kde γ_s , $\gamma_{s,fi}$, M_{Ed} , $A_{s,prov}$, $A_{s,req}$ jsou definovány výše; a je požadovaná průměrná osová vzdálenost výztuže od spodního povrchu uvedená v [16.5] - tab. 5.5, sloupec 5 pro nosníky a tab. 5.8 sloupec 3 pro desky, d účinná výška průřezu, $A_{s,prov} / A_{s,req}$ nemá být uvažováno větší než 1,3.

Vztah (16.12) platí tam, kde teplota horní výztuže nad podporou nepřekročí 350° C pro betonářskou výztuž a nepřekročí 100° C pro předpínací výztuž. Pro vyšší teploty se má $M_{Rd,fi}$ redukovat součinitelem $k_{s,\theta_{cr}}$ nebo $k_{p,\theta_{cr}}$ podle [16.5] obr. 5.1.



1 Momentový obrazec prostého nosníku pro rovnoměrné zatížení při požární situaci

Obr. 16.12 Umístění momentového obrazce prostého nosníku $M_{Ed,fi}$ pro zajištění rovnováhy

Dále je třeba posoudit zkrácení kotevní délky $l_{bd,fi}$, požadované pro požární situaci, kterou lze stanovit za vztahu

$$l_{bd,fi} = (\gamma_s / \gamma_{s,fi}) (\gamma_{c,fi} / \gamma_c) l_{bd}, \quad (16.13)$$

kde l_{bd} - viz [16.4] kapitola 8. Výztužný prut horní výztuže má být od podpory zatažen za příslušný bod změny křivosti, stanovený z obr. 16.12, na délka rovnou $l_{bd,fi}$.

16.5 Zpřesněné výpočetní metody

Zpřesněná výpočetní metoda má umožnit reálný výpočet konstrukce vystavené účinkům požáru. Musí vycházet ze základního fyzikálního chování vedoucího ke spolehlivému přiblížení očekávaného chování konstrukce při požáru. Možné způsoby porušení, které zpřesněná metoda nezahrnuje, je třeba vyloučit vhodnými prostředky (konstrukčními opatřeními - např. lokální vybočení, poškození kotevních zařízení apod.).

Zpřesněnou výpočetní metodu je možné použít pro libovolnou požární křivku za předpokladu, že jsou známy průběhy hodnot materiálových vlastností odpovídajících danému rozsahu teplot a rychlosti zahřívání.

Zpřesněné výpočtové metody mají zahrnovat výpočetní modely pro stanovení:

- vývoje a rozložení teploty v nosných prvcích (model teplotní odezvy),
- mechanického chování konstrukce (model mechanické odezvy).

V modelu teplotní odezvy se musí uvažovat příslušné teplotní zatížení podle ČSN EN 1991-1-2 [16.3] a tepelné vlastnosti materiálů závislé na teplotě. Vliv vlhkosti a její změny uvnitř betonu nebo případných ochranných vrstev lze zanedbat. Teplotní profil železobetonového prvku lze uvažovat bez ohledu na výztuž.

Mechanická odezva má být provedena s využitím metod a principů mechaniky, s uvažováním změn mechanických vlastností v závislosti na teplotě. Je třeba omezit deformace a zajistit splnění podmínek uložení

prvků a konstrukce. Dále je třeba uvážit ve výpočtu napětí a přetvoření vznikající změnou teploty, jejího nárůstu, popř. rozdílů teplot. Deformace v mezním stavu uvažované ve výpočetních metodách, musí být podle potřeby omezeny, aby byla zajištěna kompatibilita mezi všemi částmi konstrukce. V rozhodujících případech je třeba uvažovat též případné účinky geometrické nelinearity. Únosnost jednotlivých prvků, částí konstrukce nebo celých konstrukcí vystavených účinkům požáru může být stanovena s uvážením plasticity podle EN1992-1-1 [16.4]. Plastická rotační kapacita železobetonových prvků se má posoudit s uvážením zvětšujících se mezních přetvoření za zvýšené teploty. Tlačená oblast betonu vystavená přímým účinkům požáru musí být posouzena a konstrukčně upravena s ohledem na odštěpování, popř. odpadávání krycí vrstvy betonu.

Ověření přesnosti výpočetních modelů musí být provedeno na základě příslušných výsledků zkoušek. Kritické parametry (účinná délka, úroveň zatížení apod.) musí být posouzeny pomocí analýzy citlivosti tak, aby model splňoval platné inženýrské zásady.

Oznámení

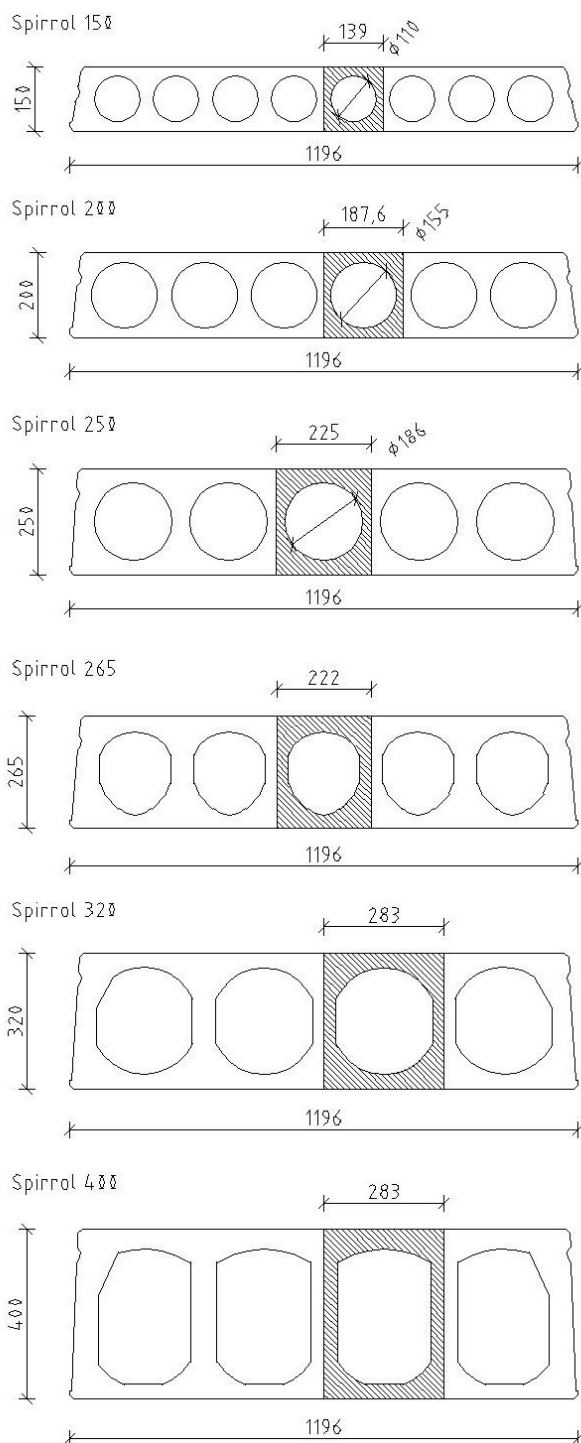
Příspěvek prezentuje výsledky práce na výzkumné záměru MSM 6840770001 Spolehlivost, optimalizace a trvanlivost stavebních materiálů a konstrukcí.

Literatura

- [16.1] ČSN EN 1990 Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí, ČSN 03/2004.
- [16.2] ČSN EN 1991-1-1: Zatížení konstrukcí – Obecná zatížení – Část 1-1: Objemové tíhy, vlastní tíha a užitná zatížení budov, ČSN 03/2004.
- [16.3] ČSN EN 1991-1-2: Zatížení konstrukcí – Obecná zatížení – Část 1-2: Zatížení konstrukcí při požáru, ČSN 08/2004.
- [16.4] ČSN EN 1992-1-1: Navrhování betonových konstrukcí – Obecně - Část 1-1: Obecná pravidla pro pozemní a inženýrské stavby, ČSN 11/2006.
- [16.5] ČSN EN 1992-1-2: Navrhování betonových konstrukcí – Obecně - Část 1-2: Navrhování na účinky požáru, ČSN 11/ 2006.
- [16.6] Wald, F. a kol.: Výpočet požární odolnosti stavebních konstrukcí, Vydavatelství ČVUT Praha 2005, ISBN 80-0103157-8.
- [16.7] TCD 5.0 – výpočetní software firmy FSD International AB – ČVUT FSv zakoupená jednorocní licence v rámci VZ MSM 6840770001.
- [16.8] Nožičková, L., Procházka, J.: Teplotní profily namáhané na účinky požáru, In: Sborník konference 12. Betonářské dny 2005, ČBS.
- [16.9] HERTZ, K. ConTemp [software online]. Ver. 2006-11-20. Denmark: Technical University of Denmark, Department of Civil Engineering, 2006 [cit. 2007-05-12].
URL: www.byg.dtu.dk/English/Research/software.aspx.
- [16.10] HERTZ, K. Users Guide for the Program ConTemp.exe [online], 2006 [cit. 2007-05-12].
URL: www.byg.dtu.dk/upload/institutter/byg/sofware/contemp_users_guide.pdf.

Příloha A Teplotní profily pro předpjaté dutinové panely vypočtené programem TCD 5.0

Typ panelu



Legenda

 výpočtový průřez

Materiálové a teplotní charakteristiky:

EN Teplotní vodivost betonu
- podle EN 1992-1-2
(použit spodní limit)

Měrné teplo
- podle EN 1992-1-2

Okrajové podmínky:

Ohřívání povrch
- normový požár, ISO 834
„time emissivity“ = 0,56
„time convection“ = 25

Dutiny

- model TCD „Dutiny EC“
„time emissivity“ = 0,6
„time convection“ = 15

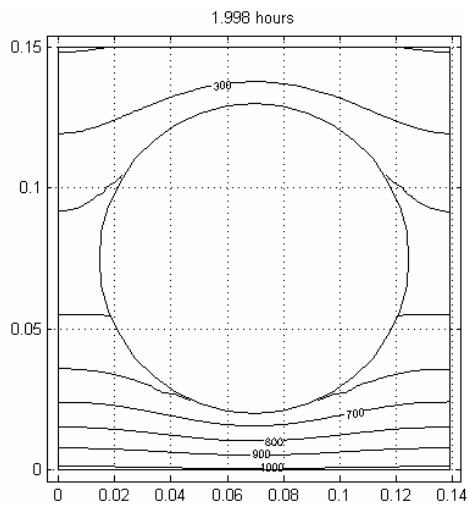
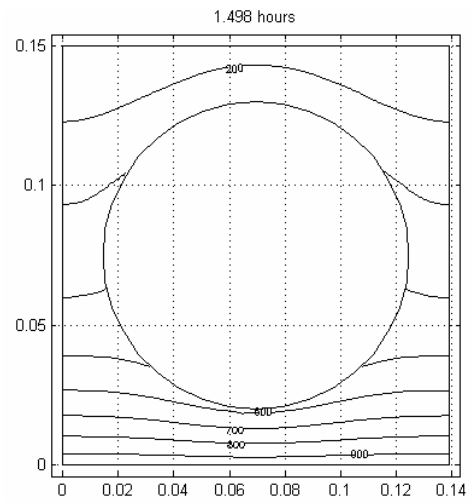
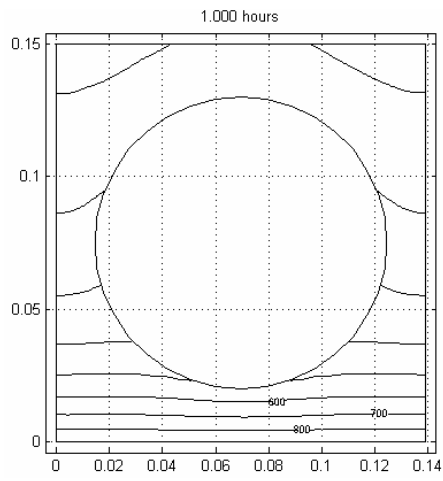
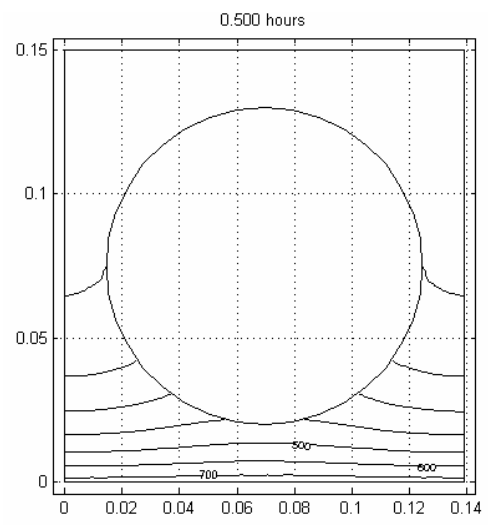
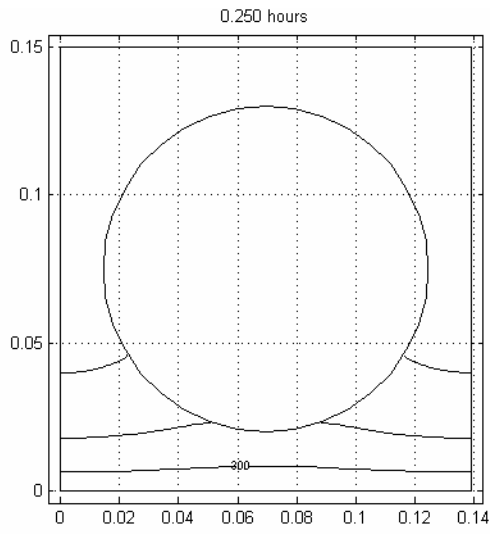
Odvrácený povrch

- model TCD „Teplota plynu 20°C EC“
„time emissivity“ = 0,8
„time convection“ = 9

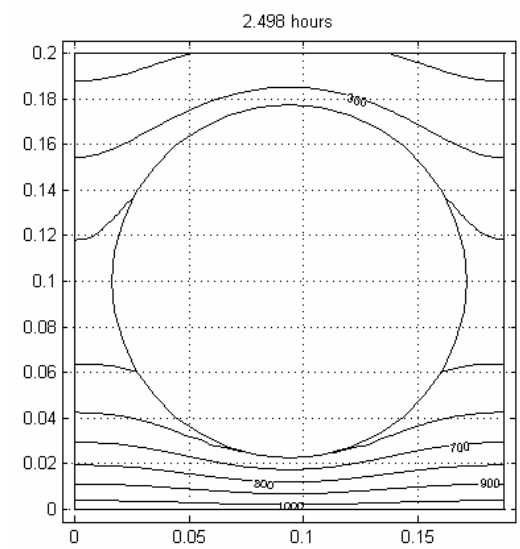
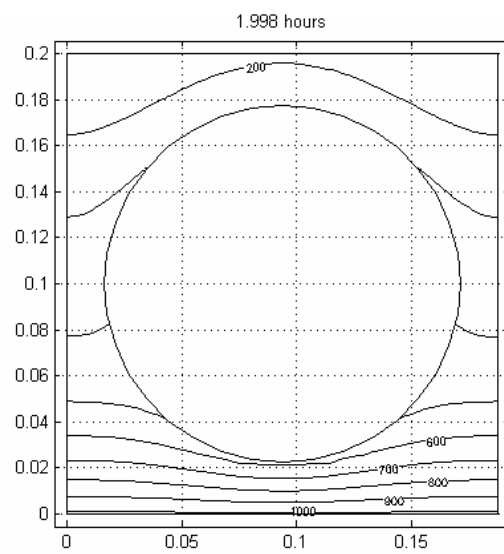
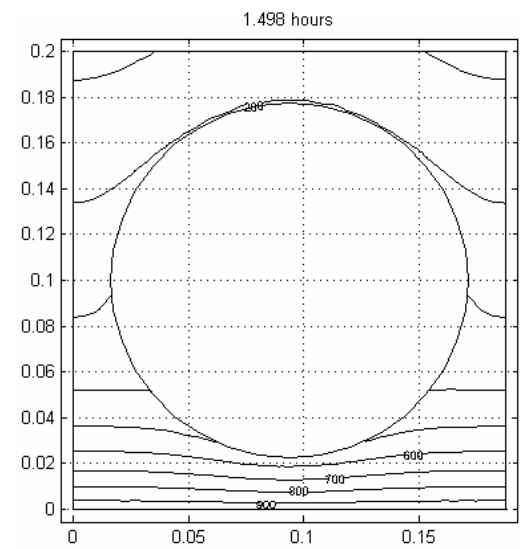
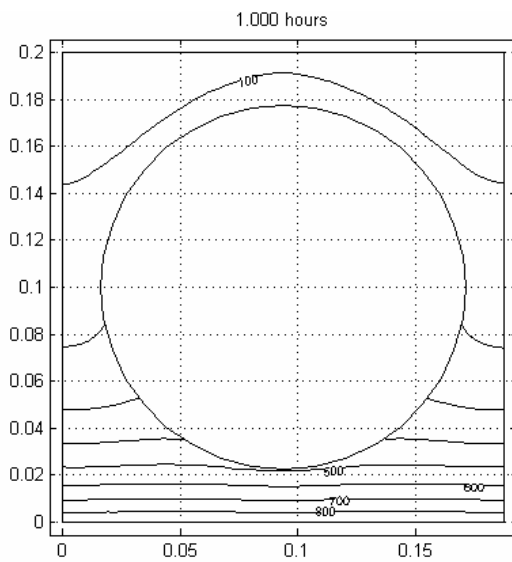
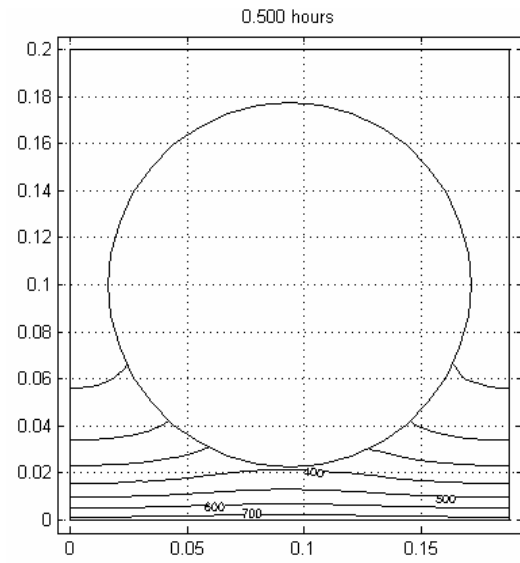
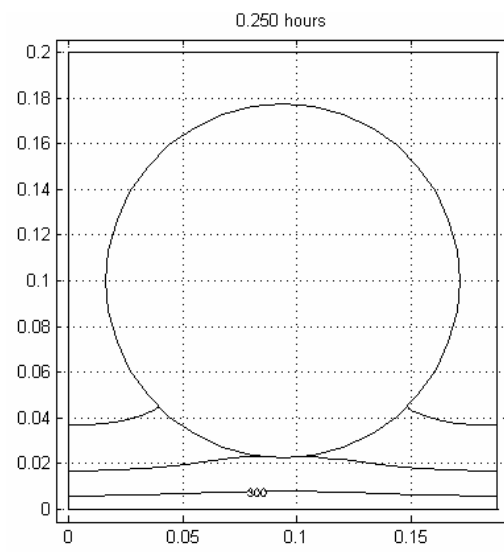
Poznámka

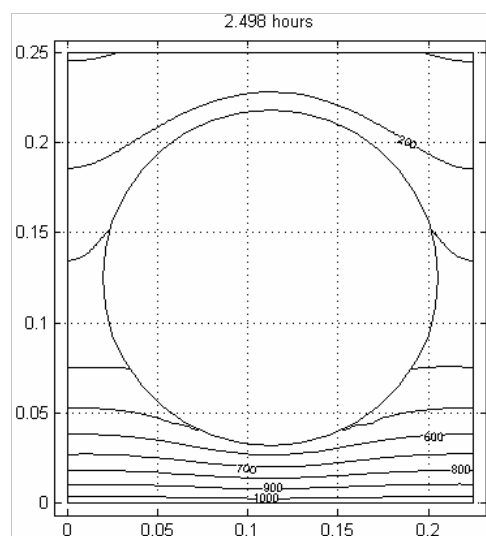
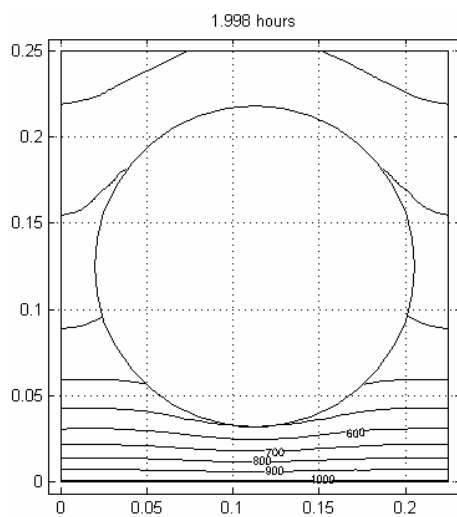
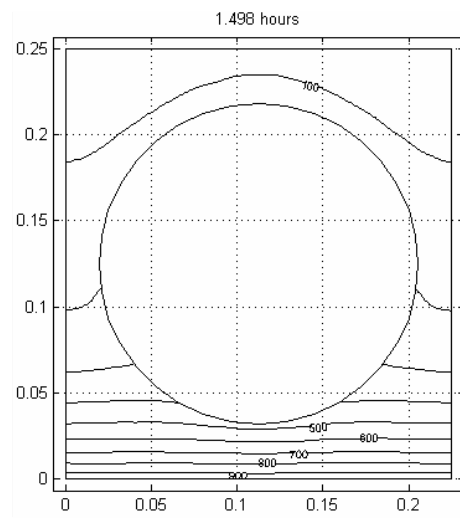
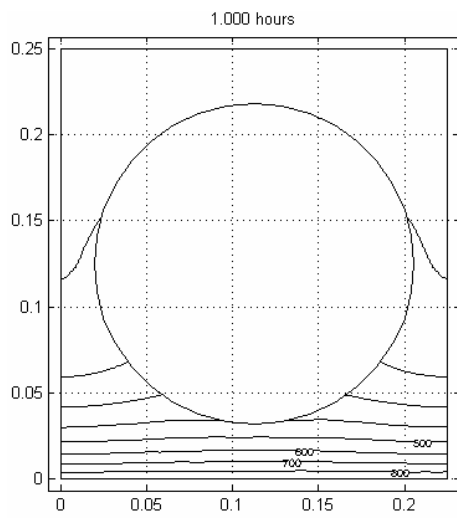
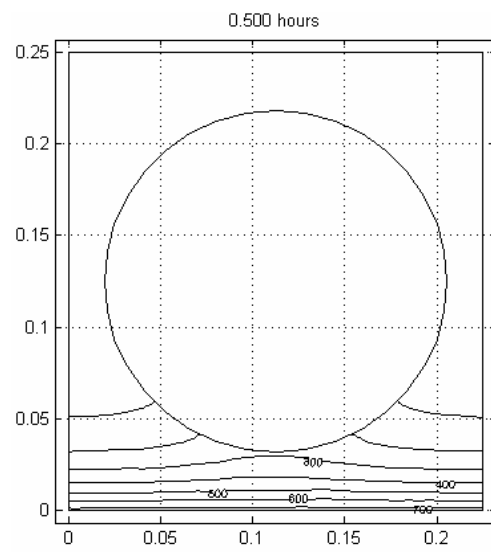
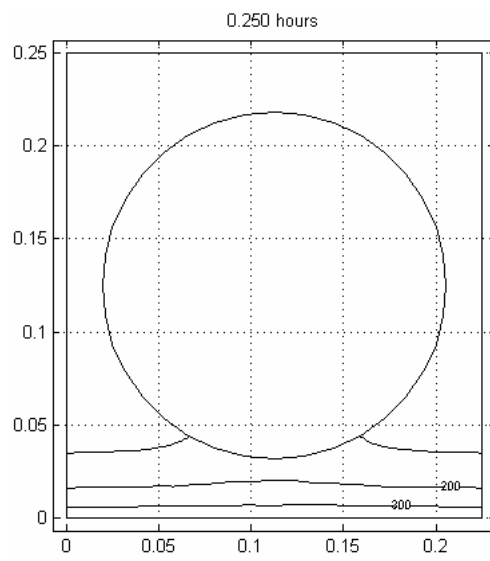
Není modelováno zmenšování průřezu v průběhu zahřívání ztrátou krycí vrstvy vyvolanou případným odštěpováním betonu.

SP150

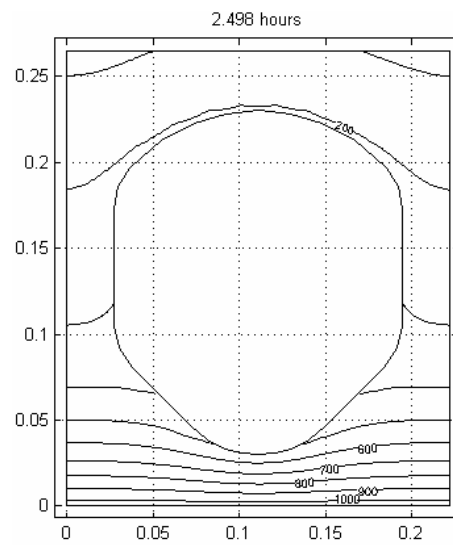
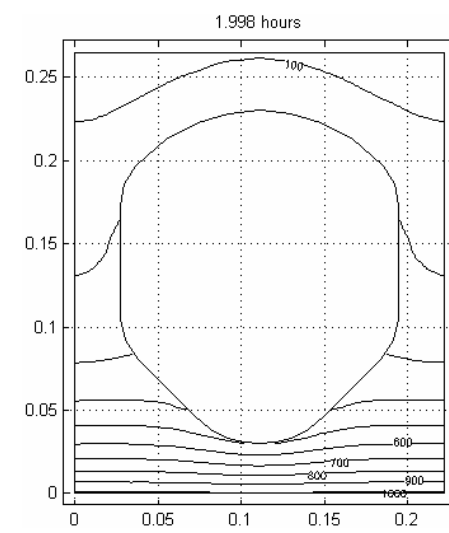
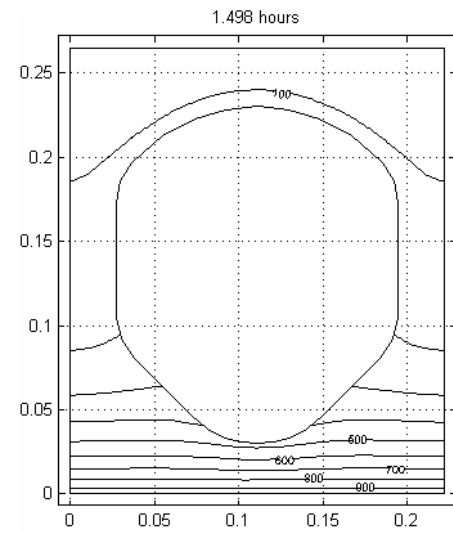
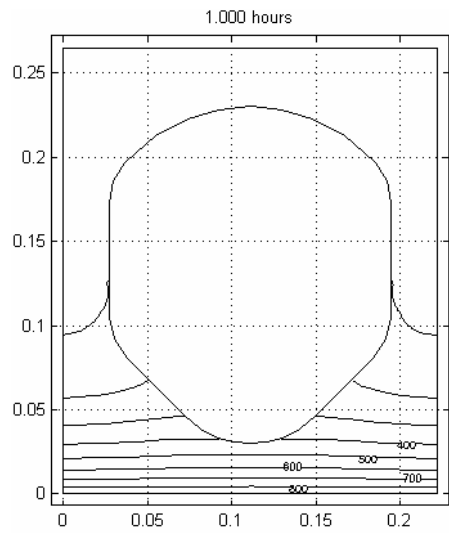
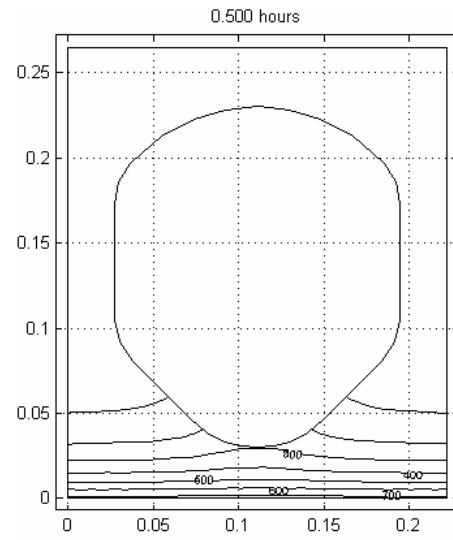
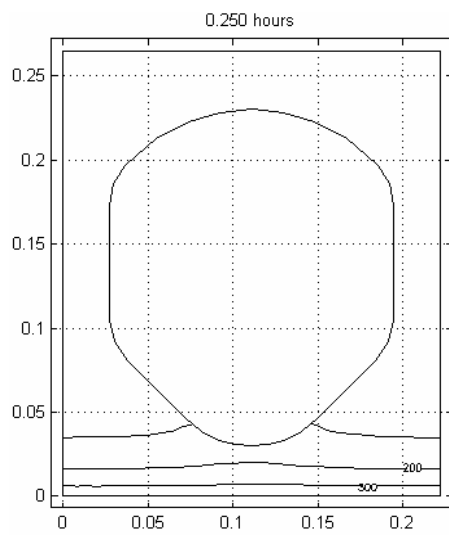


SP200

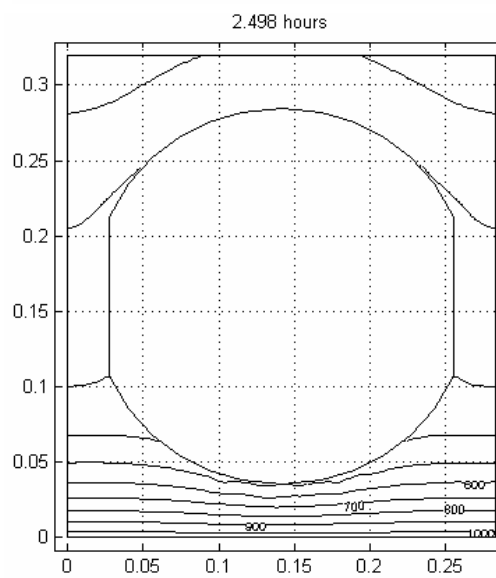
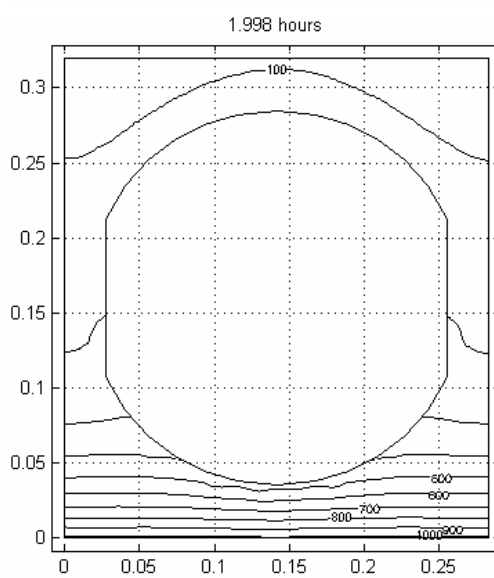
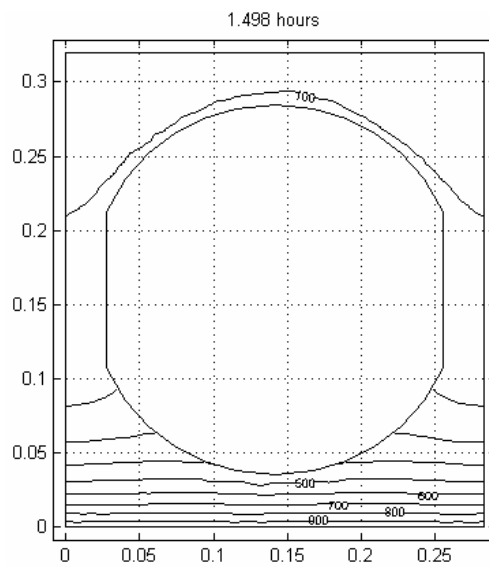
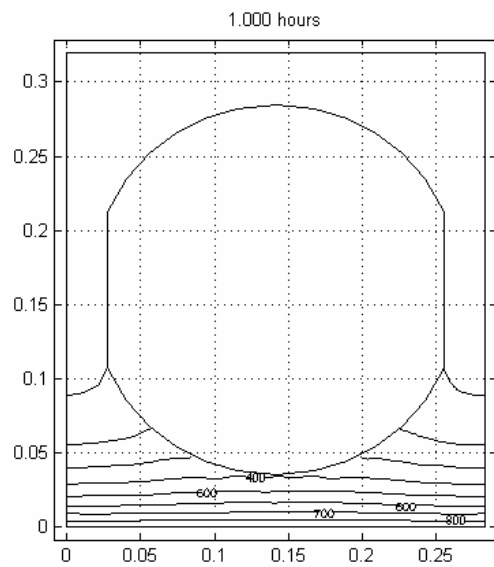
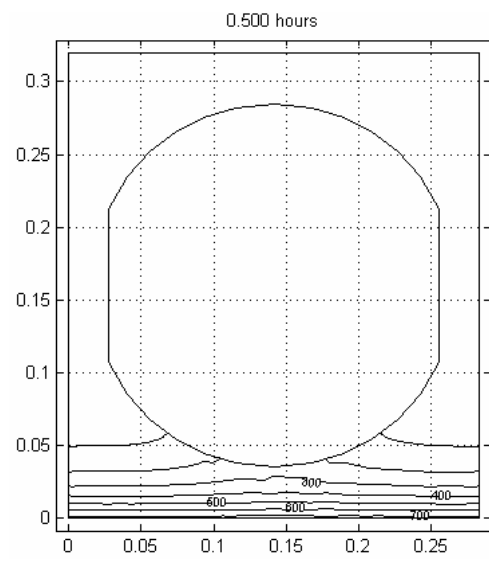
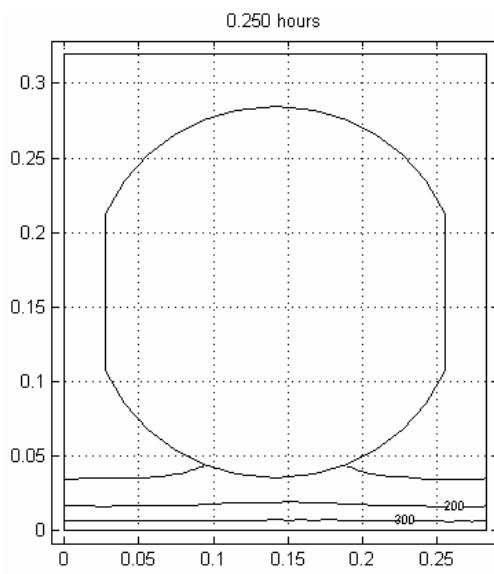


SP250

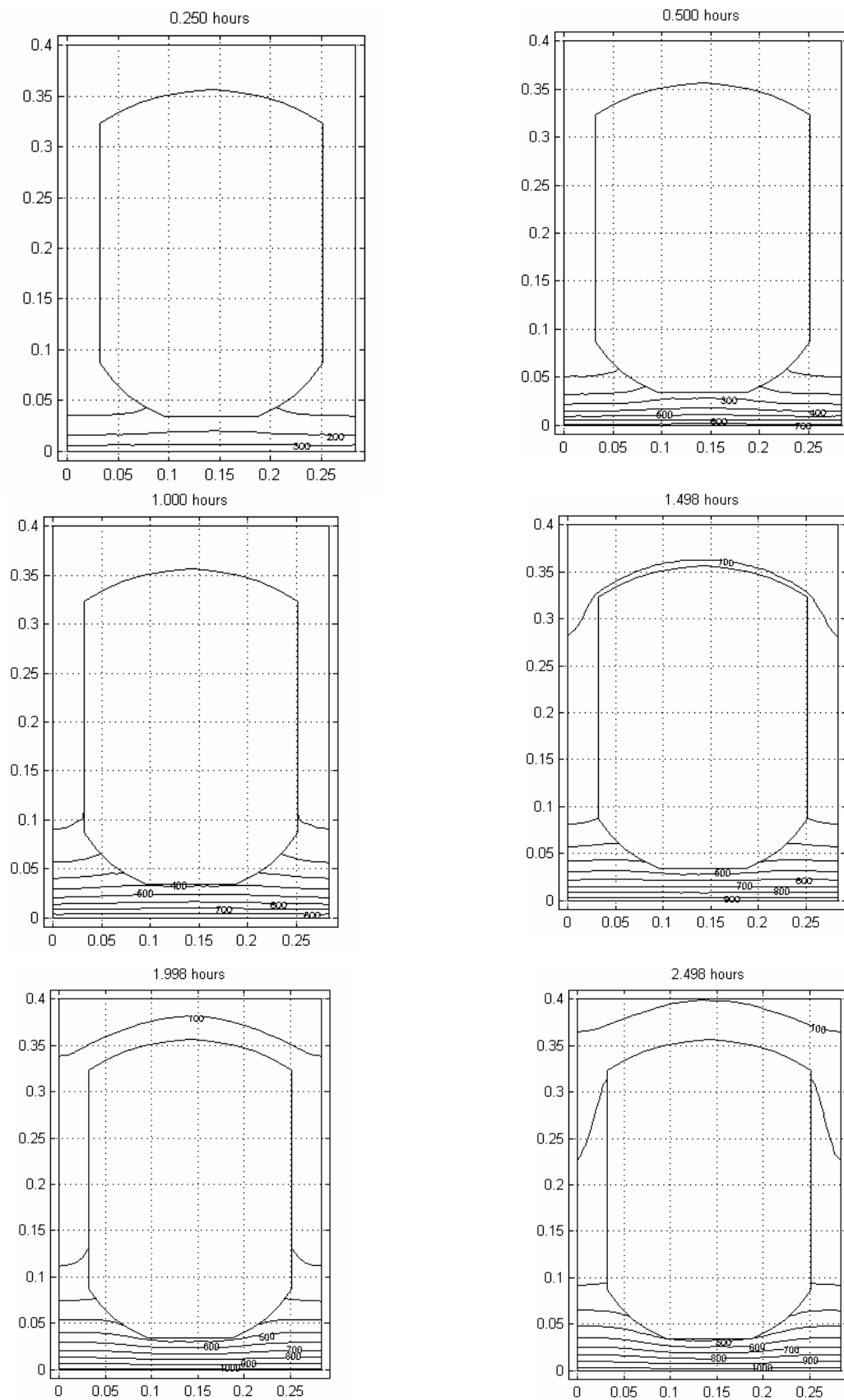
SP265



SP320



SP400



QUALITY RECORD

Název	Betonové konstrukce - pokročilý návrh pomocí software
Kategorie	Betonové konstrukce
Název souboru	2-16_Betonove_konstrukce_pomoci_SW.pdf
Datum vytvoření	19. 11. 2007
Autor	Prof. Ing. Jaroslav Procházka, CSc., Jaroslav Langer, Radek Štefan Katedra betonových a zděných konstrukcí, Fakulta stavební, ČVUT v Praze
Eurokódy	ČSN EN 1991: Zatížení konstrukcí, ČSN, Praha 2004. ČSN EN 1990: Zásady navrhování konstrukcí, ČSN, Praha 2004. ČSN EN 1992: Navrhování betonových konstrukcí, ČSN, Praha 2006.
Literatura	Wald F. a kol.: Výpočet požární odolnosti stavebních konstrukcí, České vysoké učení technické v Praze, Praha 2005, 336 s., ISBN 80-0103157-8. TCD 5.0 – výpočetní software firmy FSD International AB – ČVUT FSv zakoupená jednoroční licence v rámci VZ MSM 6840770001. Nožičková, L., Procházka, J.: Teplotní profily namáhané na účinky požáru, In: Sborník konference 12. Betonářské dny 2005, ČBS. HERTZ, K. ConTemp [software online]. Ver. 2006-11-20. Denmark: Technical University of Denmark, Department of Civil Engineering, 2006 [cit. 2007-05-12]. URL: www.byg.dtu.dk/English/Research/software.aspx. HERTZ, K. Users Guide for the Program ConTemp.exe [online], 2006 [cit. 2007-05-12]. URL: www.byg.dtu.dk/upload/institutter/byg/software/contemp_users_guide.pdf.