

Ing. arch. Michala BALOUNOVÁ¹⁾
 Ing. Federica GRECO²⁾
 prof. Ing. Karel KABELE, CSc.¹⁾
 prof. Ing. Petr KABELE, Ph.D.²⁾

¹⁾ ČVUT v Praze, Fakulta stavební,
 Katedra technických zařízení
 budov

²⁾ ČVUT v Praze, Fakulta stavební,
 Katedra mechaniky

Recenzenti:

doc. Ing. Ondřej Šíkula, Ph.D.

doc. Ing. Vladimír Zmrhal, Ph.D.

Použití simulace energetického chování budovy k analýze poruch historické budovy



Application of the Building Energy Behaviour Simulation for Failure Analysis of the Historical Building

Príspevek prezentuje štúdiu, provedenou na veži kostela Nejsvětějšího Srdce Páně na Vinohradech v Praze, dokumentující využití energetické simulace při analýze statických poruch historických konstrukcí. Simulační software, běžně používaný k modelování energetického chování budov a kvality vnitřního prostředí (BPS), byl využit k nahrazení dlouhodobého monitorování skutečných teplotních poměrů. K modelování byl použit software DesignBuilder GUI, pracující s výpočtním jádrem ENERGY+, založeným na dynamickém jednorozměrném modelu přenosu tepla ve vícevrstvých konstrukcích s vypočteným koeficientem konvekce. Simulace v BPS zahrnuje klimatické jevy, jako je sluneční záření, změny teploty a vlhkosti vzduchu, rychlost a směr větru v měřítku modelu budovy (makroměřítku) po dobu jednoho roku s detailním časovým rozlišením 30 minut. Simulací byl určen časový vývoj povrchových teplot jednotlivých konstrukčních prvků obvodové stěny sledovaného objektu. Tato data byla následně využita jako zatížení v numerické termomechanické analýze konstrukce poškozené statickými poruchami, která se obvykle provádí při podezření na zatížení teplotními změnami. Výsledek analýzy potvrdil hypotézu, že statické poruchy vznikly v důsledku teplotního zatížení.

Klíčová slova: simulace tepelného chování, statická analýza konstrukcí

The paper presents a study performed on the case of the church tower of the Sacred Heart of Jesus church in Prague Vinohrady, documenting the application of the energy simulation for analysis of static failures of historical constructions. The simulation software, commonly used for modelling of building energy behaviour and indoor environment quality (BPS), was used to substitute long term monitoring of the real temperature conditions. Software DesignBuilder GUI was used for the modelling, working on a computational core of the EnergyPlus, which is based on the one-dimensional model of conduction heat transfer in multilayer constructions with calculated convection coefficient. The BPS simulation took into account the effects of the climate, such as solar radiation, changes of temperature and humidity, wind speed and direction at the scale of the building model (macro-scale), for the period of one year, with detailed time-step 30 minutes. It assessed the course of the surface temperatures of individual perimeter walls constructions elements of the monitored building. The obtained data were consequently used as a load in numerical thermomechanical analysis of the construction damaged by the static failures, which is commonly carried out when there is a suspicion of a stress caused by temperature changes. The results of the analysis confirmed the hypotheses that the static failures were formed due to the thermal stress.

Keywords: thermal behaviour simulation, static analysis of constructions

ÚVOD

Při ochraně historických budov je často nezbytné zabývat se otázkami spojenými s poškozením stavebních konstrukcí. Nezřídka je příčinou těchto poruch tepelné namáhání. Jakémukoliv sanačnímu, případně restaurátorskému zásahu do konstrukce budovy by však měla předcházet pečlivá identifikace příčiny stávajícího poškození. Jedná-li se o objekty vysoké historické a kulturní hodnoty, je tento postup obzvláště nutný a restaurátorské kroky by měly být uvážené a podložené analýzou příčin poruch. Při podezření na tepelné namáhání se obvykle provádí termomechanická analýza postižené konstrukce simulací na numerickém modelu. Okrajové podmínky pro tuto numerickou simulaci jsou zpravidla určeny měřeními teplot postižené konstrukce. K tomu, abychom mohli výsledky měření považovat za relevantní, je nutné měření provádět během dlouhého časového období a s vysokou četností měřených hodnot. Ve většině reálných situací je však takové měření časově i technicky náročné, a tak se hledají alternativní způsoby řešení tohoto problému.

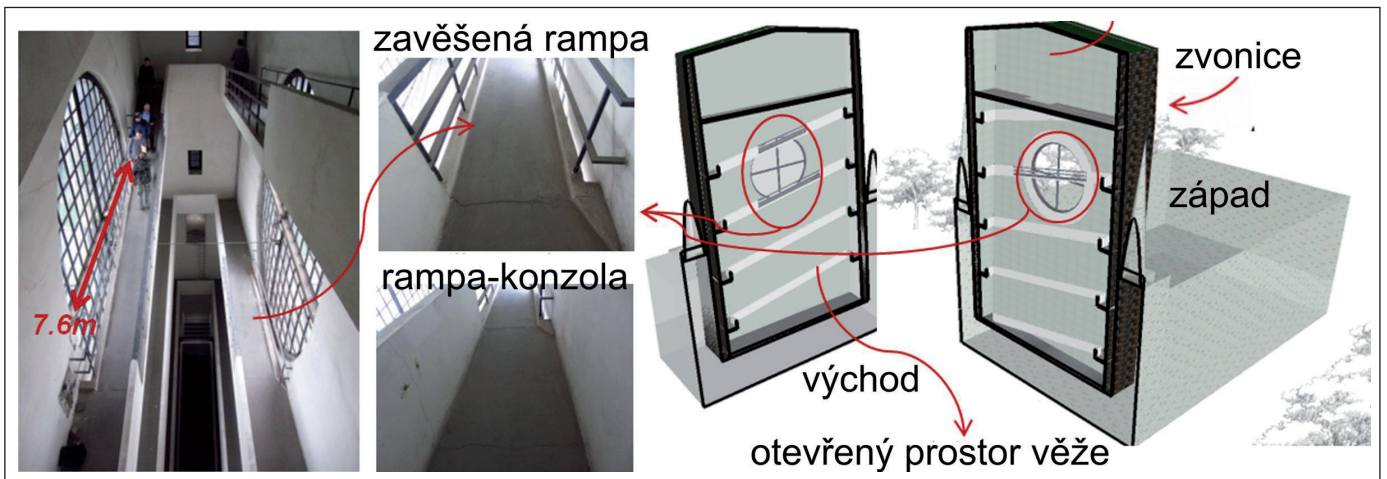
Príspevek prezentuje možnosť nahrazení časově náročného monitorování tepelného chování objektu dynamickým výpočtním modelem budov, který je primárně určen k modelování energetického chování bu-

dovy a tepelně-vlhkostní složky vnitřního prostředí. Cílem použití tohoto modelu bylo získání odhadu průběhu povrchových teplot na částech konstrukce, které byly následně použity jako vstupní údaje pro analýzu mechanického chování konstrukcí. Na příkladu historické budovy je demonstrován způsob použití tohoto typu výpočtních nástrojů, v případě, kdy není možné provádět dlouhodobé monitorování objektů.

POPIS PROBLÉMU

Kostel Nejsvětějšího Srdce Páně na pražských Vinohradech je nejznámější českou sakrální stavbou 20. století, která byla v roce 2010 zapsána na seznam národních kulturních památek. Kostel je tvořen chrámovou lodí a charakteristickou věží obdélníkového tvaru.

Po vnitřním obvodu otevřeného prostoru věže s obdélníkovým půdorysem je vedena vykonzolovaná rampa, sloužící k přístupu k hodinovému stroji a do zvonice umístěné v oddělené horní části věže. V místech rozsáhlých prosklených kruhových otvorů s hodinami se rampy od konstrukce stěn oddělují. Konstrukce výplní kruhových otvorů s hodinami je řešena jednoduchým zasklením v ocelo-betonovém rámu. Ten je tvořen dvěma příč-



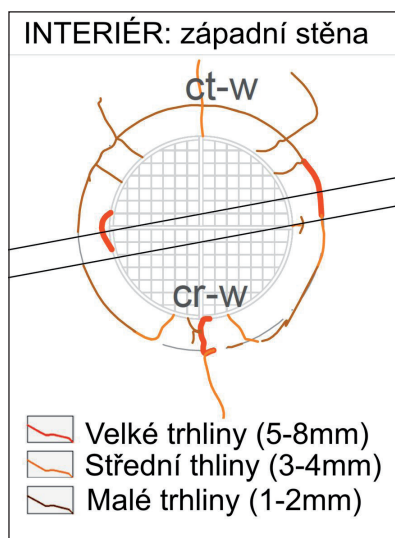
Obr. 1 Geometrie věže kostela [7]

nými železnými profily a jedním kruhovým, který je napojen na betonový rám kolem okna. Rám je vložen do zděné konstrukce.

V posledních letech se na věži kostela začaly objevovat viditelné trhliny v okolí kruhových oken v podélných stěnách věže.

Analýza konstrukce se zaměřila na nejvíce poškozenou část konstrukce, kterou je západní podélná stěna v oblasti kolem kruhového otvoru (obr. 2, obr. 3).

Radiální trhliny se objevily v betonovém kruhu, ve zdivu a obvodové trhliny pak na rozhraní těchto dvou materiálů. Značné poškození bylo zaznamenáno na spojení mezi horizontálním ocelovým profilem a betonovým rámem, kde došlo ke ztrátě části betonu (obr. 4). Poškození bylo identifikováno na vnější i vnitřní straně kruhu.



Obr. 2 Identifikace poškození na západní straně věže – interiérová část [7]

Na základě průzkumu a expertního posouzení tvaru trhlin bylo zjištěno, že možnou příčinou vzniku těchto trhlin je působení teplotních změn. S ohledem na masivní konstrukci a charakter trhlin se analýza zaměřila na krátkodobé i dlouhodobé působení teploty na konstrukce.

METODA

Pro ověření hypotézy, že příčinou vzniku těchto trhlin je dlouhodobé působení teplotních změn na konstrukci, byly provedeny termomechanické numerické simulace chování a porušování konstrukce v konečnoprvekovém programu ADINA. Jako okrajové podmínky pro termální část výpočtu je třeba definovat průběhy povrchových teplot jednotlivých modelovaných konstrukcí. V běžné praxi se tyto okrajové podmínky stanovují měřením nebo empiricky. V našem případě, kdy je hypotézou příčiny vzniku trhlin dlouhodobé působení teplotních změn, by znamenalo monitorovat povrchové teploty sledovaných konstrukcí po dobu minimálně jednoho roku.

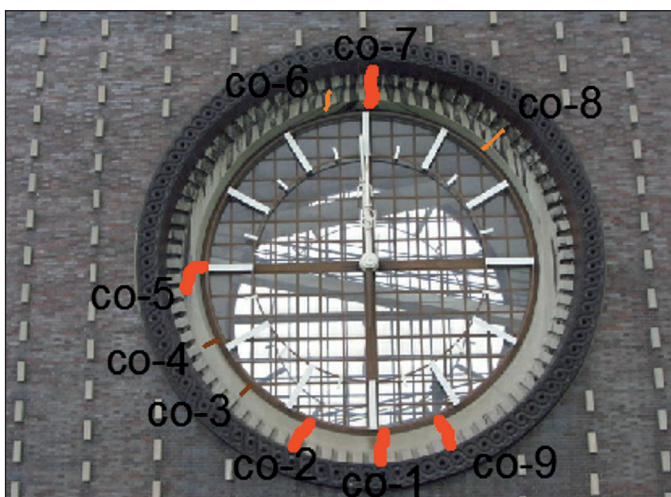
Vzhledem k časové i technické náročnosti a nejistotě celého monitorovacího procesu (monitorovaný rok může být z hlediska klimatického atypický), byla k predikci časového vývoje povrchových teplot zkoumaných konstrukcí použita simulační metoda. Jako nástroj pro tento výpočet byl zvolen program DesignBuilder s výpočetním jádrem EnergyPlus.

SOUVISLOSTI

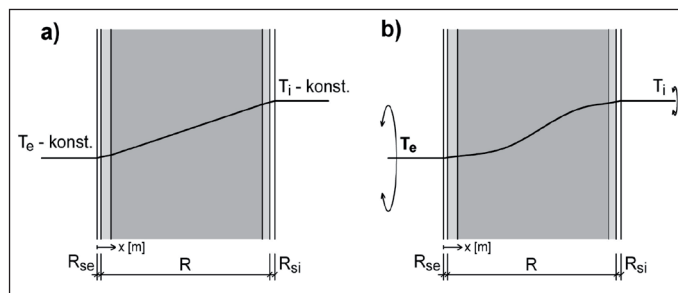
Jednou ze základních podmínek vedoucích k dosažení odpovídajících výsledků, je volba vhodné výpočetní metody a stanovení okrajových podmínek (například klimatických dat).



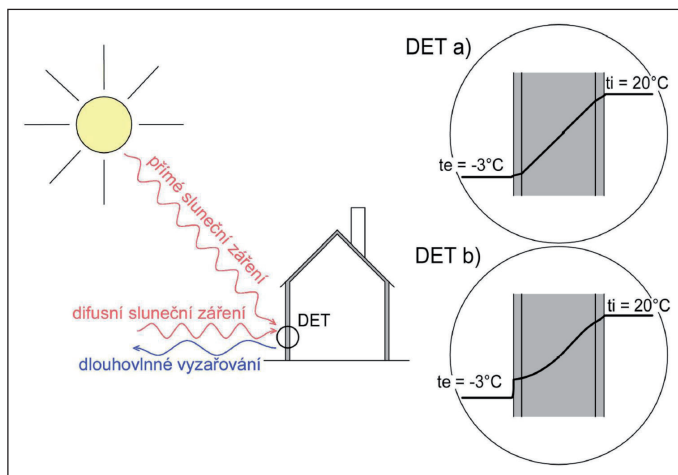
Obr. 4 Interiér: viditelné poškození [7]



Obr. 3 Identifikace poškození na západní straně věže – exteriérová část [7]



Obr. 5 Průběh teploty v konstrukci stěny: a) v ustáleném stavu podle normy ČSN 730540; b) podle skutečnosti [1]



Obr. 6 Průběhy teploty stěnou: DET a) bez vlivu slunečního záření; DET b) s vlivem slunečního záření [1]

Aby bylo možné nahradit skutečné měření skutečného stavu simulací, musí být zohledněny všechny faktory, které by měření interiérových a exteriérových povrchových teplot mohly ovlivnit, ovšem v takovém detailu, který odpovídá dostupným informacím o konstrukcích. Vzhledem k tomu, že cílem simulace tepelného chování budovy bylo stanovení zatěžovacích stavů pro následnou detailní analýzu stavebních konstrukcí, byl zvolen jednorozměrný dynamický model zohledňující fyzikální jevy, které výpočty tepelného chování ve stacionárním stavu zanedbávají.

Minimální kritéria pro simulační software používaný k předpovědi jednorozměrného přenosu tepla a vlhkosti ve vícevrstvých stavebních konstrukcích vystavených přechodným klimatickým podmínkám na obou stranách popisuje norma ČSN EN 15026:2007. Tato norma obsahuje modelové rovnice a související vlastnosti materiálů, které mohou být použity pro výpočet přenosu tepelných a vlhkovních jevů:

- akumulace tepla a vlhkosti v konstrukci,
- závislost součinitele tepelné vodivosti materiálu na množství vlhkosti v materiálu,
- latentní přenos tepla difúzí vodních par,
- ukládání vlhkosti sorpcí par a kapilární síly,
- transport vlhkosti vodní parou,
- povrchová difúze a kapilární tok [5].

Kromě toho norma uvádí několik zjednodušujících faktorů, např. zanedbává objemové změny, chemické reakce, procesy stárnutí aj.

Model tepelného chování budovy za neustáleného stavu (dynamický model) zahrnuje důležité faktory, které model tepelného chování budovy v ustáleném stavu neumožňuje:

a) Proměnlivá vnitřní a vnější teplota

Šíření tepla stavebními konstrukcemi v ustáleném stavu vychází z 1. Fourierova zákona, kde jedinou tepelnou charakteristikou použitých materiálů je součinitel tepelné vodivosti λ [W/m.K]. Množství tepla nakuulovaného v konstrukcích je však závislé na dalších materiálových vlastnostech, jako je objemová hmotnost [kg/m³] a tepelná kapacita [J/kg.K]. Výpočet v neustáleném stavu tak zohledňuje i akumulaci tepla v konstrukcích, která v případě masivních historických budov výsledky výpočtu významně ovlivňuje (obr. 5).

b) Sluneční a dlouhovlnné záření

Krátkovlnné a dlouhovlnné elektromagnetické záření je dalším fyzikálním jevem, ovlivňujícím šíření tepla v konstrukci. Rozdíl průběhů teplot v konstrukci se započítanou sluneční a sálavou složkou je patrný z obr. 6. Zatímco v průběhu dne teplota konstrukcí vlivem krátkovlnného slunečního záření stoupá, v průběhu jasné noci vlivem dlouhovlnného záření vůči jasné obloze teplota povrchu oproti teplotě vzduchu klesá. I tento vliv byl považován za významný a použitý výpočet jej postihoval.

c) Vliv vlhkosti

Množství vlhkosti ve zdivu má významný vliv na součinitel tepelné vodivosti λ . Zároveň vlhkost v materiálech v závislosti na teplotě materiálu mění své skupenství a dochází tak k uvolňování/přijímání skupenského tepla [3].

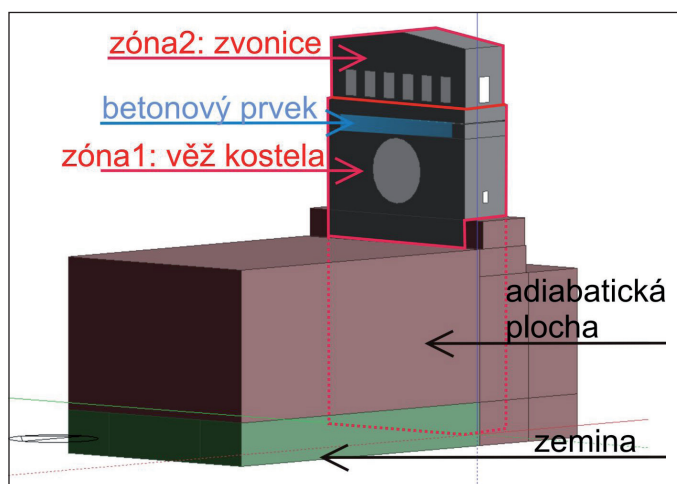
Stacionární hodnocení používá při výpočtu šíření vlhkosti Glaserovu metodu. Tato metoda popisuje šíření vlhkosti jako šíření vodní páry v konstrukci, závislé na charakteru materiálu (faktoru difúzního odporu). Tato metoda uvažuje konstantní hodnoty vnitřního a vnějšího tlaku vodních par.

V dynamickém výpočtu je šíření vlhkosti konstrukcí ovlivňováno proměnlivými okrajovými podmínkami, a proto v konstrukci dochází i k akumulaci vlhkosti. Množství akumulované vlhkosti je popsáno křivkou nazývanou rovnovážná vlhkost [2] (někdy sorpční izoterma). V porézních materiálech, což je většina stavebních materiálů (cihla, dřevo, beton, kámen, některé tepelné izolace atd.), ovšem dochází k šíření vlhkosti i v kapalně fázi v důsledku kapilárních sil [4]. Šíření vlhkosti konstrukcí ovlivňuje nejen proměnlivá teplota a relativní vlhkost vnějšího a vnitřního vzduchu, ale i srážky, které dopadají na vnější povrch obalových konstrukcí budovy.

ANALÝZA TEPELNÉHO CHOVÁNÍ

Pro stanovení povrchových teplot konstrukcí bylo použito nástroje pro simulaci energetického chování budov DesignBuilder založeného na výpočetním jádru EnergyPlus. DesignBuilder je simulační program umožňující analyzovat i tepelné chování konstrukcí při jednorozměrném vedení tepla v neustáleném stavu, což pro tento případ bylo postačující. Na základě uživatelského popisu objektu z hlediska geometrického řešení, použitých systémů, užívání budovy aj. počítá potřebu tepla pro udržení požadovaných podmínek, spotřebu energie zadaným HVAC systémem a mnoho jiných parametrů. Program DesignBuilder byl vybrán i kvůli jeho pokročilým nástrojům pro modelování geometrie objektu, které umožnily vymodelovat netradiční tvar kostela.

Z výše uvedeného je patrné, že program DesignBuilder je využíván především pro modelování vybraných složek vnitřního prostředí a energetické bilance na zónovém modelu. V rámci výpočtu energetické bilance se provádí mj. i výpočet sdílení tepla konstrukcemi a jako dílčí výsledek je možné získat povrchové teploty jednotlivých ohraničujících konstrukcí. To byl jeden z důvodů, proč byl výpočetní nástroj DesignBuilder použit k řešení tohoto problému, kdy bylo třeba odhadnout průběh povrchových teplot vybraných konstrukcí během modelového roku.



Obr. 7 Zónování kostela: model DesignBuilder



Obr. 8 Zónování kostela: zakres

Pro potřeby získání požadovaných povrchových teplot vybraných konstrukčních prvků v oblasti kruhových otvorů věže nebylo nutné modelovat celý kostel. Geometrie modelu byla zjednodušena a zároveň bylo uvažováno s energetickou nezávislostí věže kostela na ostatních částech budovy. Tyto prostory (administrativní část, náboženská část, krypta a spojení s pyramidami okolo věže) byly uvažovány jako adiabatické, což znamená, že mezi posuzovanou zónou a těmito prostory nedochází ke sdílení tepla. Sdílení tepla mezi zónami bylo bráno v úvahu pouze stěnami a střechou kostelní věže v kontaktu s exteriérem a podlahou přiléhající k zemině. Vzhledem k podobnému charakteru vnitřního mikroklimatu náboženské části (žádná instalace HVAC, shodná obvodová konstrukce) byl model zjednodušen a nepočítá se sdílením tepla mezi jednotlivými částmi objektu. Tento model byl použit i pro případ krypty. Administrativní část přiléhá z velké části k zóně věže nevyužívaným podkrovím a chodbou, proto byl i tento prostor zjednodušen a neuvažuje s průstupem tepla konstrukcemi.

Průřez obvodové stěny kostela se s výškou mění, proto musela být věž vymodelována z několika bloků (building block). Vzhledem k tomu, že věž kostela je z velké části jeden otevřený prostor, byly následně jednotlivé bloky propojeny do jedné zóny. Další samostatnou zónou je zvonice, která je oddělena stropem.

Zdivo bylo navrženo jako vícevrstvé s materiálovou charakteristikou vybranou z knihovny DesignBuilder (tab. 1) korelující s hodnotami získanými průzkumem in-situ.

Tab. 1 Materiálové charakteristiky obvodové stěny

Materiály knihovny DesignBuilder	Tepelná vodivost [W/m.K]	Měrná tepelná kapacita [J/kg.K]	Objemová hmotnost [kg/m ³]
cementová/vápenná omítka	0,8	840	1 600
zdivo (CPP s cementovou maltou)	0,72	840	1 920
cihlové glazované obklady	0,85	840	1 500

Po účely analýzy tepelného chování je velmi zajímavý prvek kruhového okna s betonovým rámem. Betonový rám kolem okna byl zjednodušen na kvádrový prvek ve stejném materiálovém bloku, jako je umístěné okno na západní a východní fasádě. Tepelný tok je počítán v rámci jedné zóny, proto dopad na výsledek simulace byl minimální. Kruhové okno je složeno z jednotlivých tabulí jednoduchého skla v kovovém rámu a bylo charakterizováno vysokým součinitelem prostupu tepla $U = 6,2 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$.

Modelování historické budovy je v mnoha ohledech specifické. Především je nutné vzít v úvahu, že ve věži kostela se nenachází žádný zdroj tepla ani významný zdroj vlhkosti. Průběhy vlhkosti a teplot jsou tedy závislé na exteriérových podmínkách a materiálové charakteristice konstrukcí. Vzhledem k velmi nízké návštěvnosti zvonice model neuvažoval pohyb osob. Věž není vytápěna ani strojně větrána. Intenzita větrání byla stanovena odborným odhadem na 0,7 /h. Tento odhad byl následně ověřen kontrolním měřením značkovacím plynem, kdy bylo naměřeno hodnoty 0,65 /h při daných klimatických podmínkách.

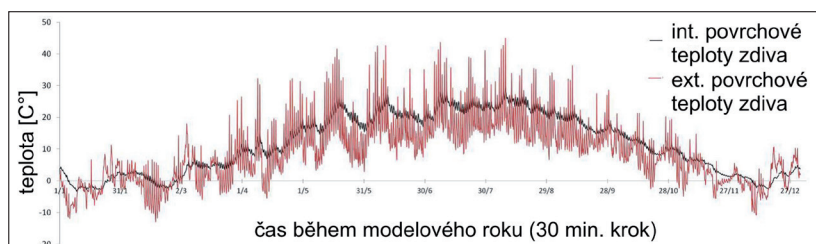
Při výpočtu byla použita klimatická data z programu s lokalizací pro Prahu. Tato data jsou poskytována WMO (World Meteorological Organisation). Po zvážení účelu simulace a dostupnosti klimatických dat byly použity datové soubory TMY2, které obsahují hodinové hodnoty pro dobu 1 roku a poskytují spíše typické než extrémní hodnoty.

Skutečnost minimálního výskytu extrémních hodnot klimatických dat je však třeba zohlednit při zkoumání výsledků trhlin v konstrukci věže kostela, kdy se během historie kostela extrémní klimatické podmínky pravděpodobně vyskytovaly.

Výsledné hodnoty jednotlivých povrchových teplot, teplot a vlhkosti vzduchu byly počítány s časovým krokem 10 minut a z důvodu kompatibility výsledků s následně používaným SW pro analýzu konstrukcí vyexportovány v časovém intervalu 30 min (obr. 9). Výsledky simulace potvrdily předpoklad, že povrchové teploty v interiéru se pro jednotlivé

Tab. 2 Extrémní hodnoty vnitřních a vnějších povrchových teplot na betonu a zdivu

Max. vnější povrchová teplota betonu (°C)	43,01
Max. vnější povrchová teplota zdiva (°C)	44,95
Min. vnější povrchová teplota betonu (°C)	-12,07
Min. vnější povrchová teplota zdiva (°C)	-12,95
Max. vnitřní povrchová teplota betonu (°C)	29,64
Max. vnitřní povrchová teplota zdiva (°C)	29,70
Min. vnitřní povrchová teplota betonu (°C)	-4,63
Min. vnitřní povrchová teplota zdiva (°C)	-3,28



Obr. 9 Vnitřní a venkovní teploty zdiva během roku – západní fasáda – výsledek simulace v DesignBuilderu

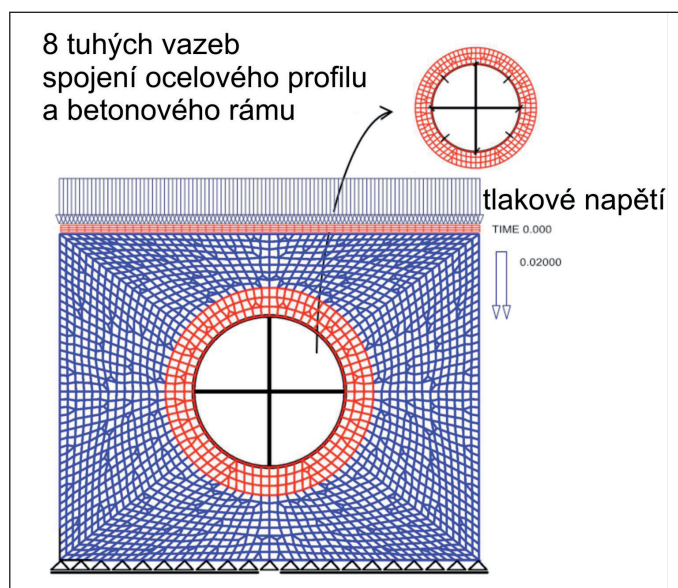
materiály v čase příliš neliší. Naopak exteriérové hodnoty ukazují velké výkyvy zejména na západní straně, proto se stala předmětem dalšího řešení. Dále bylo provedeno porovnání západní stěny exteriéru s interiérem a zděné stěny s betonovou konstrukcí. Za velmi významné lze považovat rozsáhlé výkyvy v průběhu roku. Vnější povrchové teploty dosahují během letního období až +44 °C a až -13 °C v zimním období (tab. 2).

TERMOMECHANICKÁ ANALÝZA

Trhliny identifikované v poškozených konstrukcích betonového okruží oken s hodinami a okolního zdiva se promítají jak v interiéru, tak v exteriéru. Lze tedy předpokládat, že procházejí celou tloušťkou konstrukce. Pokud tyto trhliny vznikly od teplotních objemových změn, pak příčinou byly dlouhodobé fluktuace teploty mezi ročními obdobími, které vedou k prohřátí, resp. prochladnutí celé tloušťky konstrukce. Dominantní je pak proměnnost teplotního zatížení v rovině konstrukce, jejíž příčinou je nejen rozdílná teplota jednotlivých materiálů, ale zejména jejich rozdílná teplotní roztažnost. Za těchto podmínek není nutné modelovat a analyzovat mechanické chování a porušování konstrukcí ve

Tab. 3 Základní materiálové parametry použité pro termomechanickou analýzu

	Modul pružnosti [GPa]	Pevnost v tahu [MPa]	Koeficient teplotní roztažnosti [$10^{-6} 1/°C$]
Beton	25	1,2	10
Zdivo	10	0,35	5
Železo	200	-	13



Obr. 10 Model v programu ADINA [7]

třech dimenzích, ale postačí dvourozměrná idealizace. Obr. 10 zobrazuje použitý konečněprvkový model stěny věže s kruhovým oknem. V modelu byly uvažovány tři materiály: zdivo (označeno modře), beton (označen červeně) a železný rám okna (označen černě). Zdivo a beton byly modelovány pomocí prvků pro rovinnou napjatost, zatímco liniové prutové prvky byly použity pro železný rám. Železný rám byl k betonovému okruží připojen prostřednictvím 8 tuhých vazeb, které modelovaly kotvení použité ve skutečné konstrukci.

Pro beton a zdivo byl použit konstitutivní model pro kvazikřehké materiály, který využívá Rankinovu podmínku porušení v tahu. Odezva obou materiálů po vzniku trhlin byla modelována pomocí metody rozetřených trhlin s lineárním změkčením. Pro železné prvky byl použit elastický materiálový model. Základní parametry materiálů jsou uvedené v tab. 3.

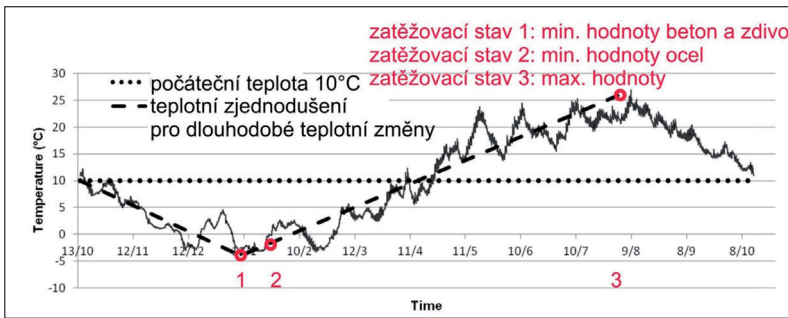
Z obr. 10 jsou patrné i uvažované okrajové podmínky. Zatížení od vrchních částí stavby, které nebyly v modelu zahrnuty (stěny zvonice, střecha), bylo zohledněno rovnoměrným spojitým zatížením na horní vodorovné hranici modelu. Na spodní vodorovné hranici modelu pak byly uvažovány nulové svislé posuny. Při modelování byl zohledněn i předpokládaný postup výstavby. V prvním kroku byly vytvořeny a zatíženy vlastní tíhou prvky zdiva a betonu a současně bylo zavedeno zatížení od zvonice a střechy. V druhém kroku byly generovány a zatíženy vlastní tíhou prvky železného rámu, což simulovalo jeho instalaci až poté, kdy došlo k deformaci okolního zdiva a betonu od jejich vlastní tíhy. Následně pak bylo inkrementálně řešeno chování konstrukce při zatížení teplotou.

Vzhledem k předchozím úvahám bylo betonové okruží a zdivo zatěžováno časově a prostorově (2D) proměnným teplotním polem, jehož hodnoty byly určeny jako průměry z teplotních profilů po tloušťce konstrukcí. Tyto profily byly předem vypočteny pomocí jednorozměrného modelu nestacionárního vedení tepla na základě historie povrchových teplot získaných z BPS simulace. Pro železné prvky rámu byl použit prostý průměr větší a vnitřní teploty (jejichž rozdíl byl vzhledem k malé tloušťce a vysoké tepelné vodivosti rámu velmi malý).

Jak již bylo diskutováno dříve, za dominantní byly uvažovány dlouhodobé fluktuace teploty konstrukcí. Jejich časový vývoj byl proto zjednodušen, jak je znázorněno v obr. 11.

Vzhledem k tomu, že namáhání a poškození konstrukce je způsobeno změnami teploty, byla velká pozornost věnována odhadu počáteční (referenční) teploty konstrukce – tj. teploty, při které získala schopnost přenášet zatížení. Podle historických dat a fotografií je možné stanovit datum výstavby věže kostela na září až říjen roku 1930, kdy byla věž postavena až nad úroveň kruhových hodin. Vzhledem k historickým podkladům o teplotách v tomto období lze předpokládat dvě mezní možnosti počátečních teplot: 10 °C a 20 °C (odpovídající 14. říjnu a 1. září). Tyto referenční teploty maxima a minima a jejich datování byly vzaty jako počátek zatěžovacích stavů a následně aplikovány do modelu. Tab. 4 a obr. 11 ukazují uvažované hodnoty teplot, kterých dosáhly jednotlivé materiály během modelového roku.

Simulace ukázaly, že v důsledku rozdílného součinitele teplotní roztažnosti a rozdílných teplot jednotlivých materiálů dochází při snížených teplotách (oproti referenčním) ke smrštění betonové konstrukce, kterému je bráněno tuhostí zdiva. To vede ke vzniku radiálních trhlin v betonu a částečně k odtrhávání betonového okruží od zdiva (obr. 12). Naopak,



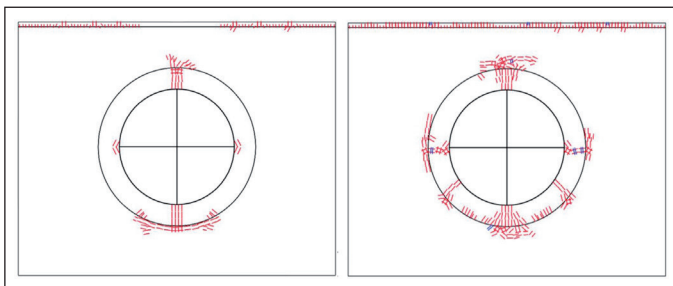
Obr. 11 Průměrné teploty západního zdiva v průřezu konstrukce během modelového roku získaného z jednorozměrného FEM modelu z úseku stěny s použitím okrajových podmínek z BPS. Tato data uvažují počáteční teplotu 10°C. [7]

při zvýšených teplotách dochází k většímu rozpínání betonového okruží, které vede k tahovému namáhání a porušování zdiva radiálními trhlinami.

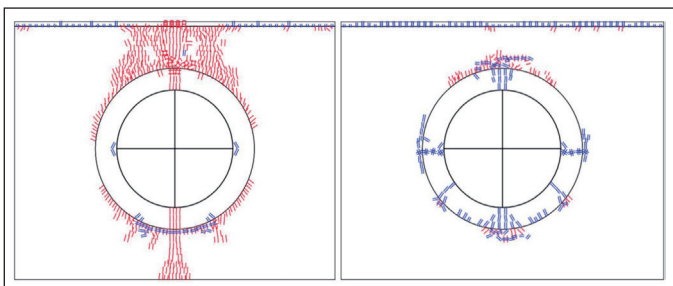
Zajímavé je i porovnání výsledků simulací s různými počátečními teplotami se skutečným poškozením konstrukce (obr 12, 13 a 14). Analýza s počáteční teplotou 10 °C lépe vystihuje tvar trhlin ve zdivu, zatímco analýza s počáteční teplotou 20 °C přesněji reprodukovala trhliny v betonovém kruhu. Tento výsledek lze vysvětlit tím, že v průběhu let existence konstrukce pravděpodobně docházelo k většímu kolísání teplot než mezi hodnotami, které poskytl modelový rok. Zároveň je nutné zdůraznit, že od počátku vzniku poškození se trhliny neustále otevírají a uzavírají, což vede k akumulaci poškození.

Tab. 4 Uvažované hodnoty teplot jednotlivých materiálů (časové kroky vyznačeny v obr. 11)

	Beton	Zdivo	Ocel
Teplota [°C]	-6,27	-3,99	-8,65
	-4,59	-2,83	-11,74
	29,43	26,92	45,93



Obr. 12 Vypočtené rozdělení trhlin vzniklých při snížených teplotách oproti referenční (vlevo výpočet pro referenční teplotu 10 °C, vpravo pro 20 °C). Červená – otevřené trhliny, modrá – zavřené trhliny. [7]



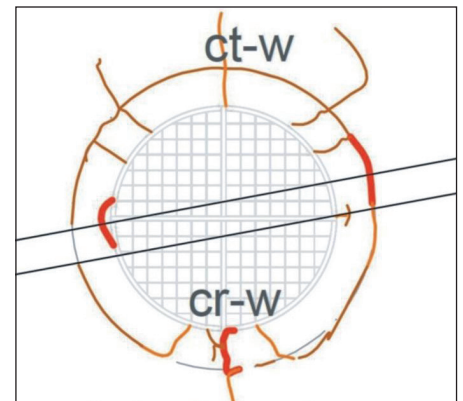
Obr. 13 Vypočtené rozdělení trhlin vzniklých při zvýšených teplotách oproti referenční (vlevo výpočet pro referenční teplotu 10 °C, vpravo pro 20 °C). Červená – otevřené trhliny, modrá – zavřené trhliny. [7]

Podrobnosti modelů, analýz a jejich vyhodnocení, které jsou diskutovány v této kapitole, lze nalézt v diplomové práci jedné z autorek [7].

ZÁVĚR

V příspěvku byl popsán synergický postup analýzy statických poruch historické budovy, využívající v prvním kroku simulaci na makromodelu energetického chování budovy a následně detailní termomechanickou analýzu porušených konstrukcí. Vypočtené hodnoty povrchových teplot získaných z roční simulace energetického chování budovy byly následně aplikovány do dvourozměrného konečnoprvkového modelu stěny věže a vygenerovaly přepokládané poškození v betonovém okruží i zděné stěně podobného charakteru, jako bylo zjištěno při vizuální prohlídce.

Pro případ působení dlouhodobých teplotních změn je rozhodující sledování extrémních hodnot povrchových teplot jednotlivých částí konstrukce. Vzhledem k tomu, že klimatická data modelového roku použitá v tomto případě poskytují spíše typické než extrémní hodnoty, lze očekávat výraznější rozptyl extrémních hodnot



Obr. 14 Skutečné poškození konstrukcí [7]

v reálné historii konstrukce. Z tohoto hlediska je patrné, že simulační metody nemohou plně nahradit dlouhodobé monitorování dané konstrukce. Přesto, v tomto případě, naprosto postačily k potvrzení hypotézy působení dlouhodobých teplotních změn a potvrdily tak, že výpočetní nástroje jsou velmi silnou pomůckou v případech, kdy není dlouhodobé monitorování konstrukce možné.

Kontakt na autora: michala.balounova@fsv.cvut.cz

Tento příspěvek vznikl za podpory grantu SGS14/117/OHK1/2T/11.

Použité zdroje:

- [1] SLANINA, P. *Dynamické tepelněvlhkostní hodnocení stavebních konstrukcí*. 2013, (5)16, 32-39.
- [2] MRLÍK, F. *Vlhkostné problémy stavebních materiálů konstrukcí*. Bratislava: Alfa, 1985.
- [3] KÜNZEL, H. M. *Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components. One- and two- dimensional calculation using parameters*. Stuttgart, 1995. Disertační práce. Fraunhofer Institute of Building Physics.
- [4] KRUS, M. *Moisture Transport and Storage Coefficients of Porous Mineral Building Materials. Theoretical Principles and New Test Method*. Stuttgart, 1996. Disertační práce: Fraunhofer IRB Verlag.
- [5] ČSN EN 15026:2007. Hodnocení šíření vlhkosti stavebními dílci pomocí numerické simulace.
- [6] ČSN EN ISO 15927-4. Tepelně vlhkostní chování budov: Výpočet a uvádění klimatických dat-část 4: hodinová data pro posuzování roční energetické spotřeby.
- [7] GRECO F. *Analysis of the faults in the Church of the Sacred Heart in Prague*. Prague, 2014. Master's Thesis. Faculty of Civil Engineering, Czech Technical University in Prague.