

STAVEBNÍ OBZOR

ROČNÍK 21 ČÍSLO 06/2013

Navigace v dokumentu

| | |
|---|------------|
| VÍTEK, Jan L. – KŘÍSTEK, V. – ŘÍMAL, J. Reologické projevy v prvcích betonových komorových nosníků | 152 |
| ŠŤASTNÍK, S. – VALA, J. K možnostem identifikace tepelných vlastností reflexních izolací se vzduchovými bublinami | 157 |
| VRTIŠKA, J. – KŘEČEK, J. Indikace změn klimatu v horském povodí | 162 |
| DUFEK, Z. – KORYTÁROVÁ, J. Efektivní výstavba budov z hlediska nákladů životního cyklu | 167 |
| GALATÍKOVÁ, M. – MARKOVÁ, L. Simulace pořizovací ceny bytového domu | 170 |

Reologické projevy v prvcích betonových komorových nosníků

*prof. Ing. Jan L. VÍTEK, CSc., FEng.
prof. Ing. Vladimír KŘÍSTEK, DrSc., FEng.
prof. RNDr. Jaroslav ŘÍMAL, DrSc.
ČVUT v Praze – Fakulta stavební*

Účinky vysychání jsou sledovány jako důsledek difúze vlhkosti v betonových komorových mostech. Výsledky ukazují, že účinky těchto jevů na rozložení napětí jsou tak velké, že velikosti napětí získané obvyklými metodami jsou zcela fiktivní.

Rheological phenomena in concrete box girder members

The effect of drying as a moisture diffusion in concrete box girder bridges is investigated. The results indicate that the effects of these phenomena on the stress distributions are so large that the stress values obtained by customary methods are merely fictitious.

Úvod

Společenský význam závad na betonových mostech vyplývajících z ohrožení jejich použitelnosti je mimořádný a náklady vyvolané jejich důsledky ve striktně ekonomickém pohledu mnohonásobně převyšují náklady vyvolané poruchami statického charakteru. Objemové změny betonu jsou jednou z nejzávažnějších příčin poruch stavebních konstrukcí. Klasické metody výpočtu vlivu objemových změn, založených na charakteristikách celých průřezů, kde projevy dotvarování a smršťování betonu jsou vztaženy jako střední charakteristiky pro celý průřez podle normových doporučení, nejsou schopny napjatost desek reálně postihnout.

Výzkumu příčin vyvolaných objemovými změnami, konkrétně smršťováním a dotvarováním betonu, bylo věnováno značné úsilí. Vznikla řada hypotéz, ověřených i neověřených výsledků, doporučení. Avšak teprve komplexní, velmi důkladná a nákladná analýza působení, vývoje působení a konečného kolapsu mostu Koror-Babeldaob Bridge v Palau [3], provedená důsledně s použitím nejnovějších materiálových modelů a finitních metod, s respektováním vývoje statického systému, prostorového působení a se zahrnutím všech detailů uspořádání mostní konstrukce, umožnila pochopení řady faktorů a mechanismu jejich vzniku.

Protože však výpočtová analýza na takovéto úrovni je pro projektovou praxi (z hlediska programového vybavení, časových a finančních nároků) v naprosté většině případů nedostupná, je dále prezentována teoretická metodika pro výstižnou výpočtovou predikci reologických jevů v deskách a stěnách betonových komorových nosníků vystavených účinkům vnějšího prostředí, projevujících se zejména postupným vysycháním od povrchů konstrukce.

Analýza jevů dotvarování a smršťování betonu

Pro popis jevů dotvarování a smršťování betonu jsou používány dva přístupy, a to průřezové modely a bodové modely.

Průřezové modely

Představují zjednodušený přístup, modelují vliv smršťování a dotvarování na vývoj vnitřních sil a deformací v relaci

k celkovým charakteristikám průřezů, tj. pouze na úrovni technického výpočtu integrálních vnitřních sil. Samozřejmě, od takového přístupu nelze očekávat zjištění skutečného vývoje přetvoření a napětí v každém jednotlivém bodě betonové konstrukce. Je nutno se spokojit pouze s nalezením integrálních průřezových silových a momentových veličin (obvykle ohybových momentů, posouvajících a normálových sil) a jejich časového vývoje, a též celkového přetvoření konstrukce, nikoli však velikosti napětí a jejich rozložení po průřezu.

Tyto integrální veličiny jsou vyčíslovány na základě průměrných hodnot platných pro celý průřez, jak uvádějí různé modely predikce, popř. normová ustanovení, nebo doporučení na těchto modelech založená. Toto je v současnosti jediný přístup používaný v praxi při návrhu konstrukcí.

Žádný z dostupných průřezových modelů pro predikci dotvarování a smršťování betonu není zcela uspokojivý. Model ACI z roku 1971 (upravený v roce 2008 – ACI 2008) a v menší míře i modely CEB a JSCE velmi závažně podceňují dlouhodobá přetvoření, jakož i ztráty předpětí, a poskytují nereálný tvar vývoje deformací. Nedávný model GL (ACI 2008) poskytuje predikci výstižnější, nikoli však dostatečně. Ani jeden z nich nemá volné vnitřní vstupní parametry pro možnost aktualizace na základě výsledků experimentů, nemá možnost zkoumat rozsah možné odezvy a nemůže brát v úvahu teplotní účinky.

Teoretické opodstatnění má model B3, který byl kalibrován odfiltrováním databáze pro krátká i dlouhá období, poskytující výrazně lepší predikci dlouhodobých účinků, a to jak v absolutních hodnotách, tak i v historii vývoje. Avšak ani model B3 není vyhovující, pokud jeho vstupní parametry jsou založeny pouze na odhadnutém složení betonu nebo na převzatých výchozích hodnotách.

Při návrhu velkých, na dotvarování citlivých konstrukcí, by modely predikce dotvarování a smršťování měly být aktualizovány krátkodobými zkouškami dotvarování a smršťování daného betonu. Aktualizace je samozřejmě účinná pouze v případě, pokud křivky vývoje dotvarování a smršťování mají reálný tvar i v nepříliš starém betonu, což platí pouze pro model B3.

V modelu predikce dotvarování a smršťování by jevy vyvolané vysycháním měly být odděleny od základního dotva-

rování, protože první jsou závislé na tloušťce a mají konečnou hodnotu, zatímco druhé jsou na tloušťce prvku nezávislé a omezení nemají. Model B3 tuto přednost má. Jak vyplývá z podrobné studie [3], rozdíly ve funkcích popisujících dotvarování při vysychání mohou být významnější než rozdíly ve vztazích pro smršťování. Je třeba měřením zajistit ztráty vlhkosti vyvolané vysoušením, jinak mohou mít extrapolace chyby v řádu 100 %. Model B3 byl vyvinut speciálně pro snadnou aktualizaci pomocí lineární regrese; pro jiné modely by byla tato úloha nelineární.

Bodové modely

Jsou zaměřeny na skutečný stav napětí, na skutečné rozložení napětí a přetvoření v betonovém tělese, tj. v jeho jednotlivých bodech (nikoli integrálně v celém průřezu jako u průřezových modelů), a to bez použití jakýchkoli doplňkových předpokladů (např. o rozložení napětí v průřezu konstrukčního prvku). Jedině takto lze získat skutečné hodnoty napětí a pole přetvoření.

Tento bodový model je schopen respektovat též skutečnost, že povrch betonových konstrukcí je vystaven vlivům okolního prostředí a na jeho působení se velmi výrazně projevují změny vlhkosti a teplotní účinky. Oba tyto jevy by se u volných prvků elementárního objemu projeví pouze objemovými změnami (deformace vyvolané teplotní roztažností a smršťováním vznikajícím snižováním vlhkosti) bez vzniku napětí. U skutečných konstrukcí je časový průběh teploty a vlhkosti v jednotlivých bodech betonového tělesa rozdílný, avšak vyvolané deformace musí splňovat podmínky kompatibility (pokud nedojde k porušení betonového prvku) a důsledkem je vznik napětí. Vznikající napětí mají zpětný vliv na deformace prvku – v mnoha případech mohou vzniklá napětí dosahovat značných hodnot, v případě betonu překročit i tahovou pevnostní kapacitu, a tak vést ke vzniku trhlin.

Společně s účinky vlhkosti a teploty působí též zatížení (stálé a nahodilé). Protože obecně neplatí lineární vztah mezi deformací a její příčinou (napětí, vlhkost, teplota nebo jejich gradienty), nelze účinky jednotlivých zatížení superponovat, ale je nutné řešit možné kombinace všech zatížení současně. Kromě vnějších zatížení je chování betonových prvků ovlivňováno stářím betonu, historií průběhu vlhkosti a teploty a historií zatěžovacího procesu. V průběhu času se mění pevnost betonu a modul pružnosti.

Základní úlohou je řešení vývoje napětí konstrukčního prvku vystaveného (kromě zatížení) na svých površích obecně rozdílným, v čase proměnným účinkům okolního prostředí. Výpočetní postup spočívá v postupném řešení dílčích úloh, jejichž výsledky jsou podkladem pro iterační proces, na základě deformací a nelineárních konstitutivních vztahů, s uvažováním reologických faktorů.

Specifický obsah vlhkosti w a míra jeho změny nevyvolávají pouze smršťování, popř. nabývání, ale mají také významný vliv na dotvarování betonu. Výstižné závislosti popisující tento vliv je však z měření obtížné určit, protože zkušební vzorky jsou obvykle nerovnoměrně vlhké, a tudíž mají nerovnoměrné rozložení napětí, zahrnující reziduální napětí (která jsou v rozsahu průřezu sama o sobě v rovnováze), a obvykle dochází ke vzniku tahového potrhání nebo tahového změkčení napětí v důsledku těchto reziduálních napětí.

Transport vlhkosti betonu je řešen použitím teorie difuzivity. Je prokázáno, že rovnice, která popisuje vývoj vlhkosti v betonu, je značně nelineární, zejména vlivem silné závislosti propustnosti λ (i difuzivity C) na pórové relativní vlhkosti. Příslušné diferenciální rovnice jsou ve tvaru

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -\operatorname{div} \underline{J}, \quad \underline{J} = -\frac{a}{g} \operatorname{grad} \mathbf{p}, \quad (1)$$

kde

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{\partial w}{\partial p} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial w}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} - \dot{w}_h, \quad \dot{w}_h = -\frac{\partial w}{\partial t_e} \frac{\partial t_e}{\partial T}, \quad (2)$$

přičemž w je specifický obsah vody [kg/m^3] včetně vody, která je chemicky vázaná,

w_h – míra ztráty volné vody z porů z důvodu hydratace,

\underline{J} – tok vody betonem [$\text{kg}/\text{s}\cdot\text{m}^2$],

a – propustnost,

g – tíhové zrychlení,

t_e – ekvivalentní čas,

T – teplota,

p – pórový tlak.

Pro betonové komorové nosníky, vytvořené jako soustava deskových prvků, lze dále předpokládat, že transport vlhkosti, stejně jako přenos tepla, je jednorozměrný, probíhající pouze ve směru kolmém na rovinu deskového prvku nosníku, tj. migrace vlhkosti a kolísání teploty v rovině prvků může být zanedbávána. Potom lze dospět ke zjednodušeným vztahům:

● relativní vlhkost h v závislosti na čase t a příčné souřadnici z v příslušném deskovém prvku je popsána nelineární parabolickou parciální diferenciální rovnicí

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[C(t, h) \frac{\partial h}{\partial z} \right]. \quad (3)$$

Difuzivita $C(t, h)$ je proměnná v důsledku stárnutí betonu, závisí nejen na čase, ale také na lokální vlhkosti, což je funkce h . Závislost C na h velmi silná a může být aproximována empirickým vztahem

$$C(t_e, h) = C_1(t_e) \left[\alpha_0 + \frac{1 - \alpha_0}{1 + \frac{(1-h)^n}{(1-h_c)^n}} \right], \quad (4)$$

ve kterém $C_1(t_e)$ je referenční vodivost vlhkosti v betonu při plném nasycení ($h = 1$), která je závislá na odpovídající době hydratace, t_e , α_0 , n , h_c jsou empirické konstanty (typické hodnoty: $\alpha_0 = 0,05$, $n = 6,00$, $h_c = 0,75$).

Dále

$$C_1(t_e) = C_0 (0,3 + 3,6 t_e^{-0,5}) 10^{-6} \quad [\text{m}^2/\text{den}], \quad (5)$$

kde čas t_e je uveden ve dnech, C_0 lze brát hodnotou $0,1 \text{ cm}^2/\text{den}$;

● rovnice difuzivity pro vedení tepla

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}, \quad (6)$$

kde součinitel α je uvažován přibližně jako konstanta.

Je třeba poznamenat, že vlhkostní difuzivita je ovlivněna též trhlinami v betonu; tato závislost je však významná pouze v případě, že trhliny by byly širší než 0,2 mm, což se nepředpokládá.

Napětí a přetvoření betonu nemá podstatný vliv na C . Z tohoto důvodu lze problém transportu vlhkosti, stejně jako rozložení teploty, přibližně považovat za nepropojený s problémem napětí a deformací – tyto problémy mohou být řešeny předem a odděleně.

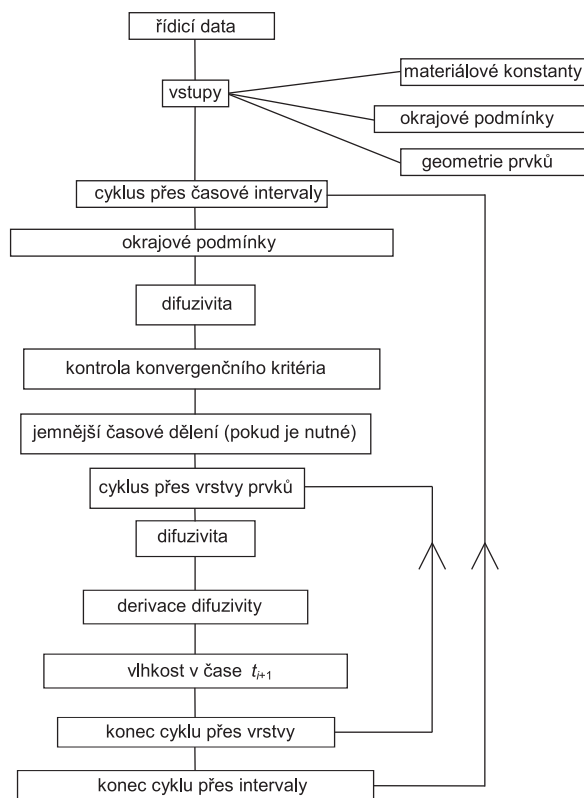


Schéma výpočtu rozložení vlhkosti a teploty

Ke složkám deformace přibývají další složky, a to smršťování závislé na napětí (stress induced shrinkage) a teplotní roztažnost závislá na napětí (stress induced thermal dilatation) – Pickettův efekt. Smršťování závislé na napětí je složka deformace od napětí související s vysycháním betonu (snížením jeho vlhkosti). Tato složka deformace je též často označována jako dotvarování při vysychání betonu (drying creep).

Vznikající deformace nemohou (jak již bylo uvedeno) probíhat volně a vzájemně nezávisle, neboť jim brání podmínka souvislosti prvku nebo konstrukce. Pro zachování souvislosti vznikají v betonovém tělese napětí, která vyvolávají současně další složky deformace (ke složkám původně vyvolaným změnou vlhkosti a teploty). Působením napětí se objevuje další složka deformace, a to dotvarování betonu. Jde o deformaci běžně označovanou jako základní dotvarování (basic creep). Základní dotvarování vyplývá z povahy betonu a není důsledkem změny podmínek prostředí – jde o vztah napětí a deformace při konstantní teplotě a vlhkosti. Společně s pružnou částí deformace, vyvolanou napětím, může být popsána např. funkcí dotvarování. (Vliv proměnné vlhkosti na dotvarování, tzv. drying creep, je již vyjádřen formou dříve zmíněného smršťování závislého na napětí.)

Tlaková napětí obvykle dosahují hodnot, jež jsou relativně malá v porovnání s pevností betonu v tlaku. Tahová napětí však mohou dosahovat relativně větších hodnot v porovnání s pevností betonu v tahu, zvláště v případech mladého betonu. Nerovnoměrným smršťováním a současným působením teplotních změn může dojít k takovým deformacím, resp. napětím, která vedou ke vzniku a později rozvoji mikrotrhlin, resp. trhlin. Následkem těchto jevů je deformace větší, než by odpovídalo lineárnímu chování materiálu (strain softening). Trhliny se mohou buď dále zvětšovat, pak je napětí v místě trhlin nulové, nebo může dojít k jejich uzavření, a průřez pak může přenášet tlakové napětí.

Při odtěžování oblastí namáhané tahovým napětím (kde již trhliny jsou) dochází k jejich uzavírání a průřez je schopen přenášet tlakové napětí. Při opětovném zatížení tahovým napětím se respektují již dříve vzniklé trhliny. Při odtěžování dochází k menší deformaci než při původním zatěžování, protože trhliny se plně neuzavrou.

Zjednodušeně lze nahradit oblast s trhlinami náhradním prostředím s menší tuhostí, jež je schopné přenášet „průměrné“ napětí v místech s trhlinou a bez trhlin. Náhradní prostředí má proměnnou tuhost v závislosti na množství trhlin v oblasti. Do výpočtu je možné vliv trhlin zavést pomocí upraveného pracovního diagramu betonu v oblasti tahových napětí.

Strategii analýzy časově závislého rozdělení napětí a deformace deskových prvků komorových mostů – v každém časovém kroku – lze formulovat následně. Průřez komorového mostu je rozdělen na konečné prvky, a každý z nich je dále rozdělen do několika vrstev. Některé z vrstev slouží k modelování ocelové výztuže, o níž se předpokládá, že zůstává pružná a že nedochází k jejím pokluzům. Řešení je provedeno v malých časových intervalech. Vzhledem k tomu, že difúze je považována za jednorozměrnou ve směru přes tloušťku desky nebo stěny mostu, probíhá řešení – pro dané okrajové podmínky – podle výše uvedeného algoritmu. To poskytuje (před analýzou napětí) hodnoty relativní vlhkosti a teploty v těžišti každé vrstvy každého průřezu, v každém v diskrétním čase.

Na základě nelineárních konstitutivních vztahů a s uvažováním reologických faktorů je počítáno napětí v jednotlivých bodech konstrukčních prvků. Teorie řešení vychází z obecného postupu odvozeného v [1]. Pro řešení vlivu dotvarování je možné použít numerický postup založený na Maxwellově řetězovém modelu, který umožňuje efektivně respektovat vliv historie zatěžování při zachování konstitutivních vztahů v přírůstkovém tvaru. Pro vypočtený přírůstek napětí se znovu počítají deformace od smršťování a teploty a deformace vyvolané napětím, znovu probíhá řešení a určují se nové deformace a přírůstky napětí. Proces se opakuje tak dlouho, až rozdíl výsledných deformací v následujících iteracích je menší než zvolená hodnota. Kritérium rozdílu deformací musí být splněno ve všech oblastech. Pak řešení může pokračovat v dalším časovém intervalu.

Řešení probíhá v jednotlivých vrstvách v malých časových intervalech Δt . Přírůstková závislost napětí a deformace pro dotvarování a pružné deformace betonu v jednotlivých časových krocích je aproximována vzorcem

$$\Delta \varepsilon = \frac{\Delta \sigma}{E''} + \Delta \varepsilon'' ,$$

ve kterém $\Delta \sigma$ a $\Delta \varepsilon$ jsou přírůstky napětí a deformace během časového kroku, E'' je inkrementální pseudoelastický modul, který odráží jak pružné deformace, tak deformace vyvolané dotvarováním.

Přírůstek nepružných přetvoření během časového kroku může být vyjádřen jako

$$\Delta \varepsilon'' = \Delta \varepsilon_C + \Delta \varepsilon_S + \Delta \varepsilon_T + \Delta \varepsilon_{CS} + \Delta \varepsilon_{CT} + \Delta \xi,$$

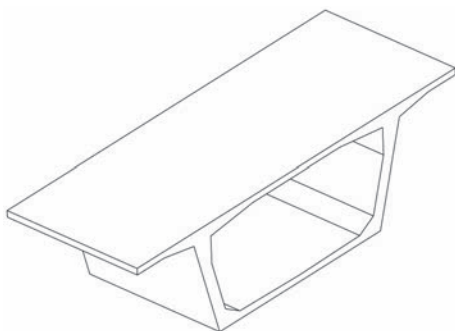
kde ξ je deformace vyvolaná trhlinami, $\Delta \varepsilon_C$ je přírůstek deformace dotvarováním vyvolaný všemi napěťovými kroky, které vznikly v předchozích časových intervalech.

Nerovnoměrné vysychání, stejně jako změny teploty, vyvolává deformace, které překračují maximální napětí a vyvolávají mikrotrhliny, makroskopicky projevující se jako tahové změkčení. Mikrotrhliny mohou dále růst a splýnout do spojitých trhlin, nebo se mohou později uzavřít a v nich mohou být přes ně přenášena tlaková napětí. Přerozdělení vnitřních sil má tendenci lokalizovat mikrotrhliny v izolovaných částech konstrukce.

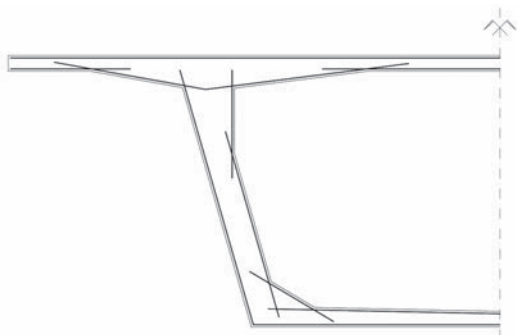
Všechny výpočetní procedury manipulují s přírůstkem napětí, resp. deformací. Výsledné hodnoty napětí a deformací jsou součtem přírůstků z jednotlivých intervalů. Během výpočtu se nehromadí v paměti počítače žádné údaje potřebné pro jeho další pokračování, jeho rychlost je stejná ve všech intervalech a výpočetní čas je úměrný počtu intervalů, na které byl časový úsek rozdělen.

Příklad

Jako příklad lze uvést analýzu chování mostního segmentu znázorněného na obr. 1. Komorový mostní nosník je sestaven z prefabrikovaných segmentů – analýza je zaměřena na chování segmentu v příčném směru. Předpokládá se, že podélná výztuž a předpětí toto chování neovlivňuje; v příčném směru je průřez vyztužen měkkou výztuží (obr. 2). Segment je ošetřován v bedně do stáří betonu sedm dní (obr. 3), kdy je odbedněn a nastává proces vysychání betonu a začíná působit vlastní tíha segmentu. Účinky kolísání vnější vlhkosti a teploty – pro jejich náhodný charakter – brány v úvahu nejsou.

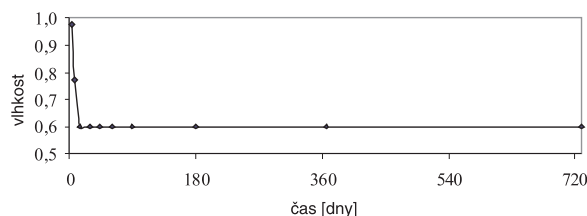


Obr. 1. Mostní segment



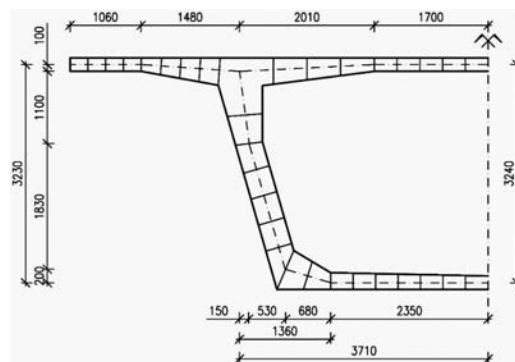
Obr. 2. Příčná výztuž: 6 Ø 20/m'

Po odbednění jsou povrchy betonu vystaveny vnější vlhkosti, která je uvažována hodnotou 50 % na vnějších površích a 60 % uvnitř komory (obr. 3). Důvodem pro předpoklad, že průměrná vlhkost na vnitřním povrchu je vyšší než na vnějším povrchu, je předpoklad, že vnitřní prostor není tak intenzivně větrán jako vnější povrch a není též vysušován sluncem. Tento předpoklad přibližně odráží skutečné podmínky.



Obr. 3. Vývoj vlhkosti

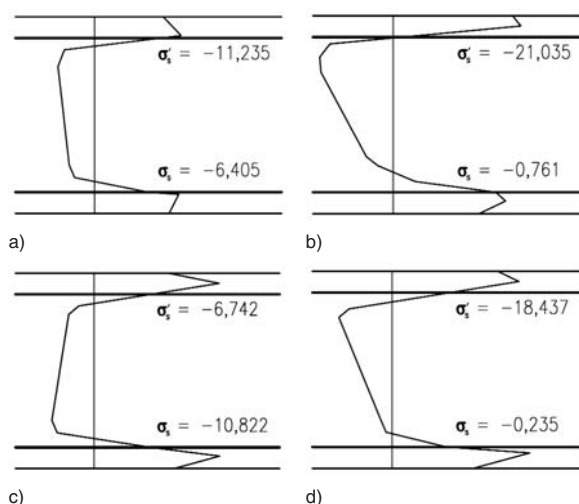
Pro účely výpočtové analýzy jsou desky a stěny průřezu rozděleny na konečné prvky – hlavní rozměry a dělení na konečné prvky ukazuje obr. 4. Každý konečný prvek se pro výpočet dále dělí do čtrnácti vrstev stejné tloušťky. Analýza zahrnuje deformaci průřezu a napětí vyvolaná vysycháním po dobu 55 dnů po odbednění, což odpovídá době spojení segmentů v mostní konstrukci.



Obr. 4. Dělení průřezu na konečné prvky

Hlavním záměrem studie je zjištění vývoje napětí v deskách a stěnách komorového segmentu ovlivněného vysycháním. Tato napětí jsou závislá na stáří betonu a na vzdálenosti uvažovaného bodu od povrchu. Rozložení normálových napětí v době po 55 dnech od ukončení ošetřování betonu je uvedeno pro několik typických řezů v obr. 5 – tahová napětí vznikají v povrchových oblastech (maximum těchto napětí odpovídá tahové pevnosti betonu zde uvážené hodnotou 3 MPa), ve vnitřních částech tloušťky prvku vznikají napětí tlaková; napětí též vznikají ve výztuži. Na rozdíl od ohybových momentů a normálových sil jako integrálních silových veličin je rozložení napětí silně ovlivněno nerovnoměrným vysycháním a tahovým změkčením. I v oblastech, kde je obvyklý výpočet – bez respektování vysychání – by ukazoval tlaková napětí, vznikají v důsledku smršťování významná tahová napětí.

Je zřejmé velmi nelineární rozložení napětí, které je rovněž časově proměnné. Při malém stáří betonu v povrchových oblastech tahové napětí roste, v následujícím období tahové napětí zde dosáhne pevnosti betonu v tahu a na povrchu v důsledku tahového změkčení vznikají nejprve mikrotrhliny a později trhliny. Proto napětí (v souladu s jevem tahového změkčení) má tendenci u povrchu klesat a nejvyšší hodnoty dosahuje již hlouběji v průřezu, nikoli na povrchu.



Obr. 5. Rozložení napětí po tloušťce stěny/desky a napětí ve výtuzi pro několik typických míst průřezu

a – na konzole, b – ve stěně příčného řezu, c – v rohu příčného řezu, d – ve spodní desce

Závěr

Na základě výsledků analyzovaného příkladu lze dojít k závěru, že účinek vysychání značně mění rozložení napětí v deskách i stěnách komorového segmentu. Je zřejmé, že napětí získaná obvyklými výpočetními přístupy, které ignorují jevy postupného vysychání, smršťování, dotvarování a tahového změkčení, jsou pouze fiktivní. Prokazuje se, že kdybychom vyčíslili napětí běžným technickým výpočtem, ignorujícím uvedené jevy, založeným na elementárním (a zde zcela nesprávném) předpokladu rovinného rozložení napětí, dostali bychom výsledky diametrálně rozdílné od skutečných (ukázaných v obr. 5). Prokazuje se, že zanedbávání těchto složitých jevů může vést k podcenění jejich účinků a zhoršení kvality konstrukcí. V případech, kdy tato napětí jsou významná, je nutné využít současných možností pokročilých výpočetních metod a posoudit jejich účinky. V ostatních případech je nutné uvedené jevy respektovat a dodržet konstrukční zásady, aby konstrukce byly v průběhu celoživotního cyklu odolné, aby se zabránilo větším nákladům na údržbu a na opravy a často také zkrácení životnosti.

Studie ukázala metodiku analýzy namáhání deskových konstrukcí, u nichž závažným jevem jsou objemové změny. Je patrné, že pro výpočet napjatosti je nutné uvažovat rozdílné vysychání konstrukčního prvku podél jeho tloušťky. Výsledky jasně prokazují, že rozložení napětí po tloušťce desky je nelineární. Nelineární je celá úloha, a proto je ve výpočtech nutné uvažovat interakci – současné působení – účinků objemových změn a účinků vnějších zatížení. Neplatí zde princip superpozice.

Výpočet uvedeným způsobem je sice složitější než dosud obvykle používané výpočetní postupy, avšak jedině správný. Navržený postup, pokud má být dostatečně spolehlivý, vyžaduje spolehlivé zjištění všech vstupních dat popisujících vlastnosti betonu, podmínek vnějšího prostředí atd. Nicméně takovýto výpočet není možné nahradit neadekvátním přístupem založeným na zastaralých primitivních předpokladech, které jsou v rozporu s charakterem úlohy.

V praxi lze podobný výpočet (na kvalitativně vyšší úrovni) aplikovat jen pro zvláštní konstrukce, kde je výstižnější analýza žádoucí. U běžnějších i důležitých konstrukcí se bude nadále využívat klasických metod, které výše uvedené

skutečnosti neuvažují. Přesto si však projektant musí být vědom toho, že tyto jevy existují a že je nelze zanedbávat. V návrhových předpisech je na toto pamatováno dvěma způsoby:

a) do výpočtů jsou zavedeny bezpečnostní koeficienty, které do jisté míry zahrnují nejistoty plynoucí ze zjednodušených předpokladů;

b) částí – nazývané konstrukční zásady – požadují vyztužování konstrukcí v místech, kde se napjatost nepočítá.

Z tohoto důvodu je třeba pečlivě dbát na konstrukční vyztužení. Zásadní chybou je tvrzení, se kterým se lze setkat ve stavební praxi, a to, že vyztužení není třeba, protože to bylo výpočtem prokázáno. Přitom byl použit výpočet, který takové jevy ze samotného principu metody zohlednit nemůže. Právě nadměrná důvěra v numerické výpočtové metody, založené však na neadekvátních zjednodušujících předpokladech, vede k nepřiměřenému vylehčování konstrukcí, zeslabování základních konstrukčních prvků apod., a následně k poruchám. Pak se jen obtížně vzniklé chyby napravují. Proto je na místě navrhovat konstrukce robustní, přiměřeně konzervativně a nenechat se ekonomickými, architektonickými a jinými tlaky přinutit k návrhům na hranici bezpečnosti a funkčnosti.

Článek vznikl za podpory projektu č. 104/11/1301 GA ČR.

Literatura

- [1] Bažant, Z. P. – Křístek, V. – Vítek, J.: Drying and Cracking Effects in Box – Girder Bridge Segment. *Journal of Structural Engineering*, 1992, Vol. 118, No. 1.
- [2] Bažant, Z. P. – Yu, Q. – Li, G.-H. – Klein, G. – Křístek, V.: Excessive deflections of record-span prestressed box girder: Lessons learned from the collapse of the Koror-Babeldaob Bridge in Palau. *Concr. Int.*, 2010, 32(6), 44-52.
- [3] Bažant, Z. P. – Yu, Q. – Li, G.-H.: Excessive Long-Time Deflections of Prestressed Box Girders. I: Record-Span Bridge in Palau and Other Paradigma. *Journal of Structural Engineering*, ASCE/ June 2012.
- [4] Černý, R.: Mathematical modeling of water and salt transport in porous materials. *Computational Methods and Experimental Measurements XIII*. Southampton, WIT Press 2007, Vol. 46, pp. 339-348. ISBN 978-1-84564-084-2
- [5] Štemberk, P. – Krejčí, T. – Kruiš, J. – Křístek, V.: Výpočet rozložení vlhkosti v poréznych materiálech. *BETON-technologie, konstrukce, sanace*, 2007, č. 6, s. 54-56.
- [6] Černý, R. – Konvalinka, P. – Doležel, T.: Počítačová analýza průběhu teplot v betonu. *Stavební obzor*, 16, 2007, č. 9, s. 264-266. ISSN 1210-4027 (Print)
- [7] Keppert, M. – Pernicová, R. – Černý, R.: Retenční křivky stavebních materiálů. *Stavební obzor*, 21, 2012, č. 8, s. 252-254. ISSN 1805-2576 (Online)
- [8] Pavlík, Z. – Žumár, J. – Pavlíková, M. – Černý, R.: Využití Boltzmannovy transformace pro stanovení parametrů transportu vodní páry ve stavebních materiálech. *Stavební obzor*, 21, 2012, č. 6, s. 173-176. ISSN 1805-2576 (Online)
- [9] Kočí, J. – Maděra, J. – Černý, R.: Stanovení součinitele vlhkostní vodivosti pomocí genetického algoritmu. *Stavební obzor*, 19, 2010, č. 2, s. 45-48. ISSN 1210-4027 (Print)
- [10] Pavlíková, M. – Mňahončáková, E. – Padevět, P. – Konvalinka, P. – Černý, R.: Měření základních tepelných, vlhkostních a mechanických parametrů vysokohodnotného betonu s trhlinaми. *Stavební obzor*, 16, 2007, č. 4, s. 97-100. ISSN 1210-4027 (Print)

K možnostem identifikace tepelných vlastností reflexních izolací se vzduchovými bublinami

prof. RNDr. Ing. Stanislav ŠTASTNÍK, CSc.

prof. Ing. Jiří VALA, CSc.

VUT v Brně – Fakulta stavební

Článek ukazuje možnost fyzikálně průhledné výpočtové predikce tepelného odporu novodobých reflexních izolací, např. na bázi polyetylenových fólií se vzduchovými bublinami opatřených hliníkovými vrstvami s nízkou emisivitou, ve vazbě na experimentální data.

Identification of thermal properties of reflective insulation with air gaps

The paper demonstrates the possibility of a physically transparent prediction of thermal resistance of advanced reflective insulation, such as polyethylene-based insulations with air gaps supplied with aluminium low-emissivity layers, related to experimental data.

Úvod

Pokusy o využívání lehkých reflexních izolací omezujících radiaci ve vzduchových mezerách lze sledovat v literatuře už od druhého desetiletí dvacátého století. Za zakladatelskou práci oboru bývá považováno pojednání [5]. O výrazném pokroku v oblasti navrhování stavebně tepelných izolací v padesátých letech svědčí výsledky nezávislých výzkumů [11] a [14]. Obsáhlý přehled [7] odkazuje na 105 relevantních publikací z let 1900-1989. Novějšími přístupy i možnými budoucími trendy se zabývá [10], v oblasti identifikace materiálových vlastností odkazující na zjednodušující pojetí [18]. Podobné úvahy lze nalézt ve [4] a [5].

Nejvíce žádanou vlastností stavebně tepelných izolací je dosažení co nejvyššího tepelného odporu R [$\text{m}^2/(\text{K}\cdot\text{W})$] při použití technologicky přijatelných (s přihlédnutím k budoucímu využití objektu) a levných materiálů; díky vysokému tepelnému odporu vzduchu mohou být vhodnými materiály např. polyetylenové fólie s bublinami obsahujícími vzduch, jejichž izolační schopnost nicméně omezuje nezanedbatelný vliv tepelného vyzařování. Intuitivně je zřejmé, že tento vliv je vhodné (přinejmenším částečně) eliminovat snížením emisivity povrchů, např. zařazením jedné či více tenkých hliníkových vrstev do izolačního souvrství. Spolehlivé navrhování materiálové skladby pro taková souvrství je nicméně předmětem odborných diskusí s rozpačitými výsledky, jež v českém prostředí odráží [8] a [9]. Z důvodů tohoto stavu lze zmínit přinejmenším dva:

- i) zatímco u klasických izolací se při predikci jejich chování vystačí s linearizovaným Fourierovým konstitutivním vztahem, formulovaným pro čisté (obvykle jednorozměrné) vedení tepla, u reflexních izolací se uplatňují i další fyzikální děje, a to proudění vzduchu, přestup tepla mezi vrstvami, tepelné záření podmíněné emisivitou jednotlivých povrchů apod., z nichž některé mají výrazně nelineární charakter;
- ii) podstatně menší zkušenosti s navrhováním moderních izolací oproti klasickým poskytují příležitost pro uvádění nerealistických údajů u některých komerčních produktů, jež se následně nepotvrzují ani při laboratorních experimentech, tím méně pak u reálných staveb vystavených klimatickým podmínkám.

Komplexní fyzikální modelování naznačené v i) není ve většině případů možné:

- a) jednoduché není (vzhledem k jejich nelineárnímu charakteru) ani samotné řešení přímých úloh se známými efektivními materiálovými charakteristikami, u nichž se nejasnosti s existencí a jednoznačností řešení a konvergencí numerických metod ve vhodném prostoru abstraktních funkcí, diskutované v [15], s. 255, následně projevují v komplikovanosti výpočtových algoritmů, vyžadujících různé fyzikálně neprůhledné numerické stabilizace;
- b) efektivní materiálové charakteristiky (pokud vůbec existují) použitelné na makroskopické úrovni by měly být odvozeny korektní (např. dvouškálovou) homogenizací na základě znalosti mikrostruktury použitých materiálů, která v klasickém dokonalé periodickém případě vede podle [3], s. 112, k řešení jistých pomocných soustav partiálních diferenciálních rovnic, v obecnějším případě, jak ukazuje [6], potom ke složitým úvahám o homogenizačních strukturách a spektrech Banachových algeber, v inženýrských aplikacích dosud považovaným za nepoužitelné;
- c) překonání obtíží a), b) klade požadavky na rozvoj experimentálních metod pro věrohodnou identifikaci jednotlivých materiálových charakteristik, bez nichž (ve svém základě deterministické) modely nevedou k rozumné predikci chování novodobých materiálů a konstrukcí.

Některé práce, zejména z posledních let, se snaží o implementaci vybraných prvků a), b), c): tak [17] precizuje vliv proudění ve vzduchových mezerách různé tloušťky metodami výpočtové dynamiky tekutin, [12] aplikuje v jednorozměrném případě jistý průměrovací algoritmus, jež lze interpretovat jako velmi speciální dvouškálovou homogenizaci, apod. V tomto článku se nicméně, navazující na [16], soustředíme na možnost relativně jednoduché (aspoň podmíněně věrohodné) predikce tepelného odporu na základě souboru experimentálních údajů, zjistitelných v běžné stavební laboratoři. Při vědomí ii) byly všechny potřebné experimentální údaje získávány v laboratoři stavební fyziky na Fakultě stavební VUT v Brně, kde byl také vytvořen potřebný simulační software v prostředí programu MATLAB.

Výpočtový model

Výpočtový model šíření tepla musí respektovat zákony zachování hmotnosti, hybnosti a energie klasické termomechaniky. Zanedbáme-li změny hustoty a nebudeme se zabývat ani pohybem vůči počáteční geometrické konfiguraci, můžeme ve stacionárním stavu (je-li již časová změna teploty bezvýznamná) formulovat ve shodě s [1], s. 8, zákon zachování energie s neznámou (absolutní) teplotou T [K] na libovolném elementárním prvku i na celé oblasti Ω v trojrozměrném euklidovském prostoru (případně zobecnění na prostor jiné přirozené dimenze je snadné) ve tvaru

$$\nabla \cdot q(T) + f = 0 \quad \text{na } \Omega, \quad (1)$$

kde f [W/m³] vyjadřuje zadaný tepelný zdroj a q je předem neznámý tepelný tok [W/m²], jehož závislost na T udává empirický konstitutivní vztah typu

$$q(T) = -\varphi(T) \nabla T \quad \text{na } \Omega, \quad (2)$$

v němž by funkce $\varphi(T)$ měla být nastavena experimentálně: z běžných tepelně technických charakteristik by zřejmě měla zahrnovat tepelnou vodivost λ [W/(m·K)] a (bezrozměrnou) relativní emisivitu ε (bezrozměrnou hodnotu mezi 0 a 1), potřebnou ve Stefanově-Boltzmannově konstitutivním vztahu podle [4] na s. 116, která obecně zpracovává informaci o geometrické konfiguraci povrchů a jejich schopnosti vyzařování. Zde i dále rovněž označujeme tečkou skalární součin tříčlenných vektorů a ∇ (pro stručnost) namísto $(\partial/\partial x_1, \partial/\partial x_2, \partial/\partial x_3)$ v kartézské soustavě souřadnic (x_1, x_2, x_3) . Na hranici $\partial\Omega$ (nebo jen na její části) oblasti Ω lze předepsat okrajovou podmínku Neumannova typu

$$q(T) \cdot \nu = p \quad \text{na } \partial\Omega, \quad (3)$$

kde p je předepsaný povrchový tepelný tok [W/m²] a ν označuje jednotkový vektor vnější normály k ploše $\partial\Omega$ dohodnuté orientace (zpravidla vně oblasti), případně okrajovou podmínku pro přestup tepla

$$q(T) \cdot \nu = \psi(T, T^*) \quad \text{na } \partial\Omega, \quad (4)$$

kde T^* [K] je známá vnější teplota a funkce $\psi(T, T^*)$ by měla být nastavena experimentálně. V nejjednodušším případě může ν (4) být

$$\psi(T, T^*) = \zeta (T - T^*) \quad \text{na } \partial\Omega \quad (5)$$

pro konstantní přestupový součinitel ζ ; speciálně pro ζ blízký se limitně k nekonečnu (čili pro $1/\kappa$ blízký se nule) degeneruje (5) v okrajovou podmínku Dirichletova typu $T = T^*$ na $\partial\Omega$. Poznamenejme ještě, že přestupové podmínky typu (5) je nezbytné formulovat i na všech očekávaných plochách Γ nespojitosti teploty T uvnitř oblasti Ω (namísto hranice $\partial\Omega$ či její části).

Při vyšetřování tepelně technických vlastností stavebních materiálů se snažíme o co nejjednodušší geometrickou konfiguraci experimentu a o potlačení dalších fyzikálních procesů, které by mohly ovlivnit naměřené výsledky. S ohledem na tyto požadavky budeme místo konečné trojrozměrné oblasti Ω uvažovat $\Omega = (-a, a) \times (-a, a) \times (0, l)$, kde rozměr a se limitně blíží nekonečnu a zkoumá se izolační schopnost vrstveného materiálu o celkové tloušťce l pro teplo šířící se kolmo na rovinu $(-a, a) \times (-a, a)$; následně je možné celou úlohu přeformulovat jako jednorozměrnou s oblastí $\Omega = (0, l)$.

Je-li též tepelný zdroj f zanedbatelný, degeneruje (1) v požadavek konstantní hodnoty q (nezávisle na T). Budeme-li čárkou naznačovat derivaci podle jediné zbývající proměnné x (původně x_3), dostáváme potom z (2) jen $q = -\varphi(T) T'$, přičemž v souladu s [12] můžeme v případě konečného počtu n vrstev ze stejného materiálu shodně tloušťky, ale různých emisních vlastností (způsobených možným zařazováním reflexních fólií), tedy pro $l = n\delta$ volit

$$\varphi(T) = \lambda + 4\delta\varepsilon\sigma T^3 \quad \text{na } (0, l), \quad (6)$$

přičemž $\sigma \approx 5,6704$ W/(m²·K⁴) je Stefanova-Boltzmannova konstanta (pro absolutně černé těleso) a ε je (na rozdíl od globální konstanty λ) jednoduchá funkce s konstantními hodnotami $\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n$ na jednotlivých vrstvách: ve shodě s [12] lze fyzikálně zdůvodnit volbu $\varepsilon_i = 1 / (1/\varepsilon_{Li} + 1/\varepsilon_{Ri} - 1)$, kde ε_{Li} a ε_{Ri} jsou emisivity povrchů nalevo a napravo od uvažované vrstvy s pořadovým číslem $i \in \{1, \dots, n\}$. K jediné konstantě λ ještě poznamenejme, že se snaží vystihnout jak účinek vedení tepla v tuhé fázi, tak proudění v tekutinách: nezávislost na T je tak zjednodušením přijatelným v malém teplotním rozsahu, zatímco nezávislost na δ (a mikrostrukturu materiálu) můžeme akceptovat jedinečně s ohledem na formulaci identifikačního problému a stejný materiál a tloušťku vrstev.

Rovnice (2) má nyní na každé i -té vrstvě jednoduchý tvar

$$\lambda dT + 4\delta\varepsilon_i\sigma T^3 dT + q dx = 0. \quad (7)$$

Označíme-li na této vrstvě $\varepsilon_i = T((i-1)\delta)$ a $\tau_i = T(i\delta)$, dostaneme klasickým řešením obyčejné diferenciální rovnice (7) se separovanými proměnnými

$$\lambda (\tau_i - \varkappa_i) + \delta\varepsilon_i\sigma (\tau_i^4 - \varkappa_i^4) + \delta q = 0. \quad (8)$$

Vydělíme-li (8) tloušťkou vrstvy δ a (v zájmu jednoduchosti zápisu) označíme $q = \lambda/\delta$ a rovněž $\omega_i(\tau_i) = q \tau_i + \varepsilon_i\sigma \tau_i^4$ a $\omega_i(\varkappa_i) = q \varkappa_i + \varepsilon_i\sigma \varkappa_i^4$, obdržíme pro $i \in \{1, \dots, n\}$ celkem n rovnic

$$\omega_i(\tau_i) - \omega_i(\varkappa_i) + q = 0. \quad (9)$$

Podle (3) musí být tepelný tok p totožný s q ; jeho případnou znalost však prozatím (pro řešení přímé úlohy, známe-li předem λ , ζ a všechna ε_i) nepoužijeme. Označíme-li ještě jako γ_i postupně konstanty $\zeta(i\delta)/\delta$ pro $i \in \{1, \dots, n\}$, můžeme k (9) podle (4) a (5) (formálně k hranici $\partial\Omega = \{0, l\}$) doplníme $\Gamma = \{\delta, 2\delta, \dots, (n-1)\delta\}$ přidat $n+1$ dalších rovnic

$$\begin{aligned} \gamma_1 (\varkappa_1 - \vartheta_L) + q = 0, \quad \gamma_2 (\varkappa_2 - \tau_1) + q = 0, \quad \dots \\ \gamma_n (\varkappa_n - \tau_{n-1}) + q = 0, \quad \gamma_n (\vartheta_R - \tau_n) + q = 0, \end{aligned} \quad (10)$$

kde známé teploty ϑ_L a ϑ_R jsou vlastně dvojicí hodnot T^* z (5).

Uvažujme sloupcový vektor ϑ , jenž sestává z $2n+1$ reálných čísel $\varkappa_1, \tau_1, \dots, \varkappa_n, \tau_n, q$, vektor F stejného typu, který má nenulový pouze první a poslední prvek

$$F_1 = \gamma_1 \vartheta_L, \quad F_{2n+1} = \gamma_n \vartheta_R,$$

a čtvercovou matici $A(\vartheta)$ řádu $2n+1$, jejíž první řádky mají nenulové jediné prvky

$$\begin{aligned}
 A_{1,1} &= \gamma_1, & A_{1,2n+1} &= 1, \\
 A_{2,1} &= -\omega_1(\kappa_1), & A_{2,2n+1} &= 1, \\
 A_{3,2} &= -\gamma_2, & A_{3,3} &= \gamma_2, & A_{3,2n+1} &= 1, \\
 A_{4,2} &= -\omega_2(\kappa_2), & A_{4,4} &= -\omega_2(\tau_2), & A_{4,2n+1} &= 1,
 \end{aligned}$$

obdobně lze pak psát nenulové prvky dalších řádků až po poslední

$$\begin{aligned}
 A_{2n,2n-1} &= -\omega_n(\kappa_n), & A_{2n,2n} &= \omega_n(\tau_n), & A_{2n,2n+1} &= 1, \\
 A_{2n+1,2n+1} &= -\gamma_n, & A_{2n+1,2n+1} &= 1.
 \end{aligned}$$

V dalším budeme potřebovat též matici D , která se od matice A liší jedině tím, že místo funkcí ω . (za tečku lze dosadit libovolný přirozený index nepřevyšující $2n + 1$) obsahuje funkce ϖ ., pro něž pro libovolný reálný argument τ platí

$$\varpi(\tau) = \omega(\tau) + \tau d\omega(\tau)/d\tau.$$

Pro neznámý vektor ϑ dostáváme tak soustavu nelineárních algebraických rovnic

$$A(\vartheta) \vartheta = F. \quad (11)$$

Její analytické řešení není v obecném případě k dispozici. Máme-li nicméně k dispozici kvalifikovaný odhad ϑ_0 , můžeme jej zlepšit na ϑ_1 Newtonovou metodou, jejíž algoritmus zde nabývá velmi jednoduchého tvaru

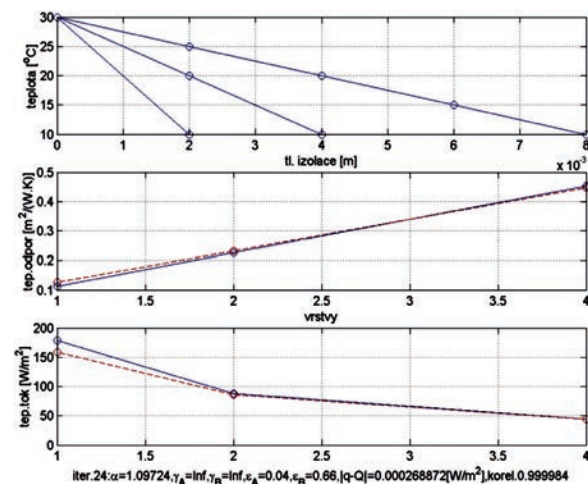
$$D(\vartheta) (\vartheta_0 - \vartheta_1) = A(\vartheta_0) \vartheta_0 - F; \quad (12)$$

stačí tedy řešit řídkou soustavu lineárních algebraických rovnic a opakováním uvedeného postupu (s ϑ_1 a ϑ_2 namísto ϑ_0 a ϑ_1 atd.) můžeme očekávat rychlou konvergenci ϑ . k hledanému řešení ϑ .

Pro ilustraci si ještě všimněme vybraných zvlášť jednoduchých případů. Volíme-li všechny koeficienty γ . jako jdoucí k nekonečnu, máme místo (10) jen $\kappa_1 = \vartheta_L$, $\kappa_2 = \tau_1$, ..., $\kappa_n = \tau_{n-1}$, $\tau_n = \vartheta_R$, takže z (11) zbývá jen soustava n rovnic, které jsou v případě všech nulových koeficientů λ . dokonce lineární, takže algoritmus (12) poskytuje přesné řešení hned v prvním kroku nezávisle na počátečním odhadu. Připustíme-li, že všechny koeficienty ε . jsou stejné (ne nutně nulové), lze formální eliminací dospět k přesnému vyčíslení q , aniž by bylo třeba řešit jakoukoli nelineární rovnici. Poznamenejme ještě, že ke hledání kořenů algebraických rovnic čtvrtého stupně jsou k dispozici i analytické Cardanovy vzorce podle [13], s. 69 (čímž bychom teoreticky mohli obejít Newtonovy iterace), pro numerické výpočty však nejsou vhodné.

Pro konkrétní izolační souvrství obvykle neznáme (přinejmenším některé) materiálové charakteristiky λ , ε . a κ ., nicméně jsme schopni experimentálně určit jeho tepelný odpor R , a tedy i potřebné (zde jedině) $p = \delta/R$ z (3). Zpětně lze pak určit uvedené charakteristiky metodou nejmenších čtverců, konkrétně minimalizací součtů druhých mocnin rozdílů $p - q$ pro všechny dostupné výsledky měření rozličných izolačních souvrství obdobného složení; uvedený součet pak poskytuje základní informaci o nejistotě prováděné identifikace, tj. nakolik experimentální tepelné toky p (ne)odpovídají výpočtově predikovaným tepelným tokům q . Rozlišit chyby měření, nesplnění fyzikálních podmínek pro zjednodušený výpočet a numerické nepřesnosti není ovšem na této úrovni možné.

Numerický příklad



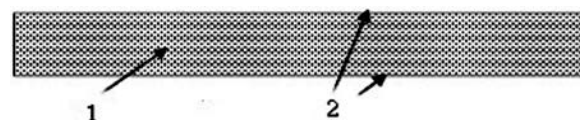
Obr. 1. Experimentálně podpořená predikce tepelného odporu pro různá izolační souvrství: zleva AB (1 vrstva), ABABA (2 vrstvy), ABABABABA (4 vrstvy)

Pro zkoušení prezentovaného algoritmu bylo využito měření tepelného odporu pro izolační materiály sestávající z polyetylenové fólie se vzduchovými bublinami, kterou výrobce dodává ve vrstvách o tloušťce 7 mm. Jednotlivé vrstvy byly opatřeny reflexními hliníkovými fóliemi zanedbatelné tloušťky; o zařazení fólie do souvrství vypovídá v označení použitém na obr. 1 písmeno A, zatímco B reprezentuje jednu polyetylenovou vrstvu. Vzhledem k malému počtu experimentů se počítalo s předem známými emisivitami povrchů; alternativně se počítalo s konečnými (předem neznámými) součiniteli přestupu tepla a formálně nekonečnými těmito součiniteli; obr. 1 demonstruje druhý z výpočtů, výsledky prvního z nich jsou však jen nepatrně odlišné (součinitele vycházejí při optimalizaci metodou nejmenších čtverců velmi vysoké).

Experimentální stanovení tepelně izolačních vlastností termoreflexního materiálu

Pro účely zjišťování tepelně izolačních vlastností reflexních tepelných izolací vzniká normativ [9], který určuje metodiku měření. V tomto návrhu jsou jednak definovány termoreflexní izolace a popisují se metody zjištění tepelně izolačních vlastností takto:

- produkt typu 1 je pravidelného tvaru s rovnoběžnými protilehlými plochami nebo je stlačitelný, takže může být umístěn mezi studenou a horkou deskou, aniž by změnil své deklarované tepelné vlastnosti. Povrch tohoto produktu je hladký a rovný, bez zřejmých nerovností (nerovnosti musí být menší než 2 mm). Emisivita povrchů může nabývat různých hodnot;



Obr. 2. Schematické zobrazení typového produktu 1 podle [19] 1 – izolační materiál, 2 – povrch s nízkou emisivitou

- produkt typu 2 se od předcházejícího typu 1 liší pouze povolenými nerovnostmi povrchu, které mohou být hluboké až 5 mm. Pokud je vroubkování povrchu produktu

hlubší více než 5 mm, je třeba ho zařadit do produktu typu 3;



Obr. 3. Schematické zobrazení typového produktu 2 podle [19]

- iii) produkt typu 3 je nepravidelného tvaru, nemusí mít rovnoběžné protilehlé plochy a rovnoběžnosti protilehlých ploch se nemusí dosáhnout ani stlačením materiálu. Povrch tohoto produktu může a nemusí být vroubkovaný. Pokud je produkt vroubkovaný, není předepsána omezující hloubka vroubkování. Příkladem tohoto produktu může být prošivaná vícevrstvá reflexní izolace;
- iv) produkt typu 4 je charakterizován jako tenká fólie nebo plech s tloušťkou menší než 2 mm. Tato fólie (plech) může být použita samostatně, nebo ve vrstvách. Při použití vícevrstvé izolace je třeba zajistit vzduchovou mezeru mezi jednotlivými vrstvami.

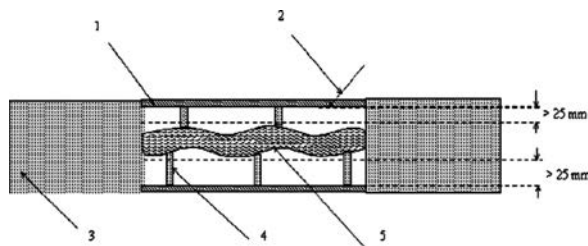
Metody hodnocení

Pro stanovení tepelného odporu jsou nastíněny různé metody zkoušek. Některé jsou pro stanovení tepelného odporu vhodnější, ale všechny poskytují přibližně stejné výsledky. Dále je popsána metoda pro měření emisivity povrchu materiálu:

- metoda A – metoda chráněné topné desky ve smyslu normy ISO 8302, ČSN EN 1946-2, ČSN EN 12664 a EN 12667,
- metoda B – metoda Heat Flow Meter ve smyslu normy ISO 8301, ČSN EN 1946-3, ČSN EN 12664 a EN 12667,
- metoda C – metoda Hot Box, která se řídí požadavky normy EN ISO 8990,
- metoda D – slouží pro výpočtové stanovení podle emisivity povrchu materiálů.

Hot Box

Hot Box je měřicí zařízení ke zjišťování tepelného odporu termoreflexních tepelných izolací. Je konstruováno tak, aby simulovalo téměř reálné prostředí, ve kterém by měla být termoreflexní izolace instalována. V zařízení musí být vytvořeny dvě nevětrané vzduchové mezery o tloušťce minimálně 25 mm. Vzduchové mezery pak od exteriéru odděluje MDF nebo překližková deska. Vnitřní stěny zkušebního zařízení jsou osazeny termočláňky, které zajišťují ideální prostředí pro zkoušku. Zkušební vzorek termoreflexní tepelné izolace o rozměru 1 x 1 m je pak umístěn na polystyrénových podporách tak, aby byly zajištěny parametry obou vzduchových mezer. Tímto uspořádáním vznikne prostředí, ve kterém dutiny tvoří teplou a studenou komoru s teplotním rozdílem 10 ± 1 K.



Obr. 4. Schéma zařízení Hot Box

1 – stěna, 2 – termočláňek, 3 – pěnový polystyrén, 4 – podpora z pěnového polystyrénu, 5 – termoreflexní tepelná izolace

Při měření se zjišťuje tepelný odpor celé soustavy, kterou tvoří obě vzduchové mezery a samotná termoreflexní izolace. Pro zjištění tepelného odporu izolace se pak od celkového tepelného odporu odečte tepelný odpor vzduchových mezer. Přednorma dále doporučuje teplotní tok směrem shora dolů.

Metoda chráněné teplé desky

Tato stacionární metoda se využívá při ustáleném tepelném stavu a její provádění se řídí ČSN EN 1946-2, resp. ISO 8202. Zařízení vyrábí mnoho výrobců a jsou založena na stejném principu. Mohou být pro jeden nebo dva vzorky. V přístroji se vytváří rozdílná teplota jednotlivých povrchů a musí se udržovat na stejné hodnotě. Izolace vzorku se provádí pomocí kompenzačních částí zařízení, které dokáží udržet danou teplotu povrchu vzorku. V průběhu zkoušky zařízení měří množství tepla, které projde vymezenou plochou vzorku. Následně je třeba provést výpočet součinitele tepelné vodivosti

$$\lambda = \frac{Q \cdot d}{A \cdot (\theta_1 - \theta_2)}, \quad (9)$$

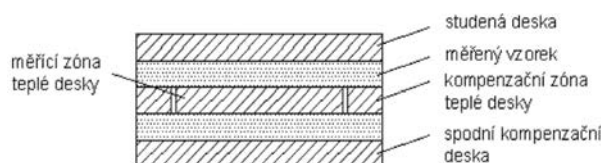
kde λ je součinitel tepelné vodivosti [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$],

Q – elektrický výkon topné spirály v měřicí části [W],

d – tloušťka vzorku [m],

A – plocha referenčního povrchu [m^2],

$\theta_1 - \theta_2$ – termodynamický teplotní rozdíl povrchových teplot vzorku [K].



Obr. 5. Uspořádání měřidla pro měření součinitele tepelné vodivosti stacionární metodou

Vlastní měření

Pro měření vzorků termoreflexních izolací byla použita metoda chráněné teplé desky. Termoreflexní souvrství se měřilo pro stejné teploty a teplotní spády a byly pořízeny hodnoty součinitele tepelné vodivosti pro různé kombinace termoreflexního souvrství za těchto podmínek:

- vzorek půdorysného rozměru 300 x 300 mm,
- střední teplota, teplotní spád 10°C , 10 K,
- nevětraná vzduchová mezera 20 mm nad vzorkem,
- nevětraná vzduchová mezera 20 mm pod vzorkem,
- A – hliníková fólie,
- B – bublinová fólie.

Na stacionárním přístroji Holometrix se pracovalo se středními teplotami 10°C a 30°C a teplotním spádem 10 K. Výstupní veličinou byl tepelný odpor souvrství. Smyslem výpočtu bylo určit tepelnou vodivost $\lambda = \alpha \lambda_0$, kde λ_0 je její počáteční odhad a α je součinitel nastavovaný tak, aby zmiňovaná účelová funkce byla minimální (teoreticky co nejbližší nule). Originální softwarový kód pro identifikaci materiálových charakteristik využívá vybraných funkcí optimalizačního toolboxu MATLAB. Jistou kvazilineritu výsledků lze vysvětlit při hlubší analýze (11) přibližným vztahem

$$\tau^4 - \kappa^4 = (\tau - \kappa)(\tau + \kappa)(\tau^2 + \kappa^2) \approx 4\vartheta^*(\tau - \kappa)$$

pro $\vartheta^* = (\vartheta_L + \vartheta_R) / 2$, jakož i skromným množstvím experimentálních výsledků.

Závěr

V práci jsou shrnuty některé informace o tepelném odporu termoreflexních izolací získané experimenty s různými souvrstvími termoreflexních izolací. Tato část je doplněna laboratorními experimenty pro ověření dosažených poznatků v praxi. Problém účinnosti termoreflexních tepelných izolací při použití ve stavbách je daleko širší.

Článek shrnuje vyhodnocení poskytnutých výsledků naměřených hodnot tepelného odporu a po přepočtu ekvivalentní hodnoty součinitele tepelné vodivosti reflexních tepelných izolací. Po vyhodnocení naměřených hodnot jsou shrnuty dílčí poznatky.

Článek vznikl za podpory projektu specifického vysokoškolského výzkumu reg. č. FAST-S-12-25/1660.

Literatura

- [1] de Astro, B.: *Continuum Thermomechanics*. Birkhäuser, 2005.
- [2] Bokel, R. M. J. – Peters, B. H. G. – van der Voorden, M.: CFD-simulations of transparent coated and gas-filled facade panels. *Proceedings of the 9th IBPSCA Conference Building Simulation in Montreal, 2005*, 91-98.
- [3] Cioranescu, D. – Donato, P.: *An Introduction to Homogenization*. Oxford University Press 1999.
- [4] Černý, R. – Kočí, J. – Kočí, V. – Xinying, LU – Maděra, J.: Vliv prostředí na životnost tepelně izolačních systémů, *Stavební obzor*, **20**, 2011, č. 5, s. 153-157. ISSN 1805-2576 (Online)
- [5] Černý, R. – Michálek, P. – Pavlík, Z. – Tydlitát, V.: Tepelné a vlhkostní vlastnosti hydrofilních minerálních vln. *Stavební obzor*, **15**, 2006, č. 6, s. 183-186. ISSN 1210-4027
- [6] Davies, M. G.: *Building Heat Transfer*, Wiley & Sons 2004.
- [7] Dickenson, H. C. – van Dusen, M. S.: The testing of thermal insulations. *American Society of Refrigerating Engineering*, 3/2 (1916), 5-25.
- [8] Francú, J. – Svanstedt, N.: Some remarks on two-scale convergence and periodic unfolding. *Applications of Mathematics*, 57 (2012), 359-375.
- [9] Goss, W. P. – Miller, R. G.: Literature review of measurement and predictions of reflective building insulation performance: 1900–1989. *ASHRAE Transactions* 1995/2 (1989), 651-664.
- [10] Hejhálek, J.: Tepelný odpor vzduchové mezery ve skutečnosti a podle normy ČSN EN ISO 6946. *Stavebnictví a interiér*, 6/2012.
- [11] Hejhálek, J.: Vlastnosti vzduchové mezery. *Stavebnictví a interiér*, 9/2012.
- [12] Fricker, J. M. – Yarbrough, D.: Review of reflective insulation estimation methods. [Proceedings], 12th Conference of International Building Performance Simulation Association in Sydney, 2011, 1989-1996.
- [13] Nash, G. D. – Comrie, J. – Broughton, H. F.: *The Thermal Insulation of Buildings: Design Data and How to Use Them*. London, Her Majesty's Stationery Office 1955.
- [14] Levinson, R. – Akbari, H. – Gartland, L. M.: Impact of temperature dependency of fibre glass insulation R-value on cooling energy use in buildings. [Proceedings], 10th ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings in Berkeley, 1996, 85-94.
- [15] Rektorys, K.: *Přehled užití matematiky*. SNTL, Praha, 1968.
- [16] Robinson, H. E. – Powel, J. F.: Thermal resistance of airspaces and fibrous insulations bounded by reflective airspaces. *Building Materials and Structures Report 151*, U. S. National Bureau of Standards, 1957.
- [17] Roubíček, T.: *Nonlinear Partial Differential Equations with Applications*, Birkhäuser 2005.
- [18] Šťastník, S.: Evaluation of thermal resistance of building insulations with reflective surfaces. [Proceedings], ICNAAM in Kos, 2012, AIP Conference Proceedings 1479, 2204-2207.
- [19] Uvsløkk, S. – Arnesen, H.: Thermal insulation performance of reflective material layers in well insulated timber frame structures. [Proceedings], 8th Symposium on Building Physics in the Nordic Countries in Copenhagen, 2008, 8 p.
- [20] Yarbrough, D. W.: Reflective materials and radiant barriers for insulation in buildings. In: *Materials for Energy Efficiency and Thermal Comfort in Buildings* (M. R. Hall, ed.), Chap. 12, Woodhead, Cambridge, 2010.
- [21] prEN 16012 Thermal insulation for buildings – Reflective insulation products – Determination of the declared thermal performance, CEN Brusel 2011

Indikace změn klimatu v horském povodí

Ing. Jiří VRTIŠKA

doc. Ing. Josef KŘEČEK, CSc.

ČVUT – Fakulta stavební, Praha

Horská povodí v České republice jsou převážně zalesněná s dominantním zastoupením smrkových porostů. Cílem článku je analýza dendrochronologie smrku na náhorní ploše Jizerských hor v návaznosti na změny klimatu (teplotu vzduchu, úhrn atmosférických srážek) a kyselé atmosférické depozice.

Climate change indications in a mountain watershed

In the Czech Republic, mountain watersheds are mostly forested with dominant spruce plantations (*Picea abies*). The aim of this paper is to analyse changes in the dendrochronology of spruce trees in the upper plain of the Jizera Mountains, related to changes in the climate (air temperature, precipitation) and acid atmospheric deposition.

Úvod

Horská povodí patří mezi oblasti velmi citlivé na změny klimatu [6]. Vodohospodářské důsledky klimatických změn v podmínkách ČR jsou uváděny [4] zejména s přihlédnutím ke změnám vlastností sněhové pokrývky, tj. redukci měsíčních a sezónních maxim tloušťky vrstvy sněhu a snižování počtu dnů se sněhovou pokrývkou. Současně jsou v horských oblastech evidovány fenologické indicie oteplování klimatu [1], [3], [5], případně defoliace smrkových porostů a změny Ellenbergových indikačních hodnot prostředí vlivem znečištění ovzduší a kyselé atmosférické depozice [8], [9].

Za účinný nástroj detekce změn klimatu a stresujících faktorů prostředí je považována dendrochronologická analýza [2], [10], [13], [14]. Cílem článku je posouzení možnosti indikace klimatických změn pomocí analýzy dendrochronologie smrkového porostu (*Picea abies*) v zájmových povodích Jizerských hor.

Metodika

V povodí vodárenských nádrží Josefův Důl a Souš na náhorní části Jizerských hor byly v letech 2010-2012 odebrány vzorky smrkového porostu v nadmořské výšce 730 až 1 060 m. Presslerovým vrtákem byly odebrány ze živých dospělých stromů ve standardní výčetní výšce 1,3 m (30 vzorků ze čtyř stanovišť, plochy 30 x 30 m). Po odečtu letokruhů byla provedena synchronizace (křížové datování), odstraněn věkový trend a pro jednotlivá stanoviště určena standardní chronologie podle [14]. Na sledovaných stanovištích byly současně monitorovány porostní charakteristiky, což je prů-

Tab. 1. Charakteristiky testovaných smrkových porostů*

| Porost | H_n [m n. m.] | I [°] | E [-] | Z [-] | H [m] | R [kW] |
|--------|--------------------|------------|------------|------------|------------|-------------|
| 1 | 950 | 5 | NW | 0,74 | 19,3 | 16,8 |
| 2 | 1 060 | 12 | NW | 0,64 | 18,6 | 22 |
| 3 | 820 | 24 | NNW | 0,94 | 23,8 | 27 |
| 4 | 738 | 2 | SW | 0,92 | 24,4 | 15,3 |

* H_n – nadmořská výška, I – sklon, E – expozice, Z – zápoj,

H – výška porostu, R – odpor xylému

měrná výška, horizontální zápoj a vitalita stromů (reciproční hodnota elektrického odporu xylému), viz *tab. 1*. Vývoj průměrných ročních teplot vzduchu a ročních srážkových úhrnů byl analyzován na klimatologických stanicích ČHMÚ, a to Liberec, Bedřichov a Desná-Souš (*tab. 2*).

Tab. 2. Charakteristika klimatologických stanic

| Stanice | Poloha | Umístění [m n. m.] | Pozorování |
|------------|-------------------------------|-----------------------|------------|
| Liberec | 50,769 z. š., 85,024 z. d. | 398 | 1936-2012 |
| Desná-Souš | 50,789 z. š., 15,319 z. d. | 772 | 1951-2012 |
| Bedřichov | 50,815 z. š., 15,137 z. d. | 777 | 1938-2012 |

Vztah klimatu a tloušťkového přírůstku smrku byl uvažován v období 1961-2012. Soubory průměrných ročních teplot vzduchu, ročních srážkových úhrnů a ročních letokruhových indexů (podíl skutečné šířky aktuálního letokruhu k příslušné hodnotě detrendující křivky, odstraňující vliv stáří) byly analyzovány programem CTPA [15]. Byly stanoveny základní statistické charakteristiky souborů dat a provedeny testy nezávislosti prvků souboru, normálního rozdělení, existence trendu a případně změny trendu v časových řadách.

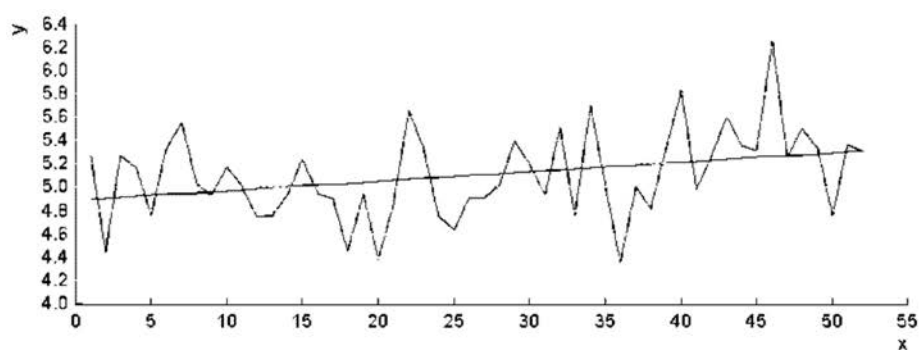
Výsledky

Základní statistické charakteristiky analyzovaných souborů ročních srážkových úhrnů, průměrných ročních teplot vzduchu a letokruhových indexů jsou uvedeny v *tab. 3*. Z rozboru časových řad průměrných ročních teplot vzduchu T_a a ročních srážkových úhrnů (klimatologických stanic Bedřichov, Desná-Souš a Liberec, období 1961-2012) vyplývá významný rostoucí trend teploty vzduchu (*obr. 1*), zatímco statisticky významný trend srážkových úhrnů nebyl potvrzen (pro $n = 52$ a $p = 0,05$), *obr. 2*. Současně ve stanicích Liberec a Bedřichov byla potvrzena významná změna (intenzivnější nárůst průměrné roční teploty), ke které došlo v letech 1980-1985 (*obr. 3*). Potenciální evapotranspirace, odpovídající současnému klimatickému normálu, stanovená metodou FAO ve vegetačním období, dosahuje hodnoty 343 mm [16].

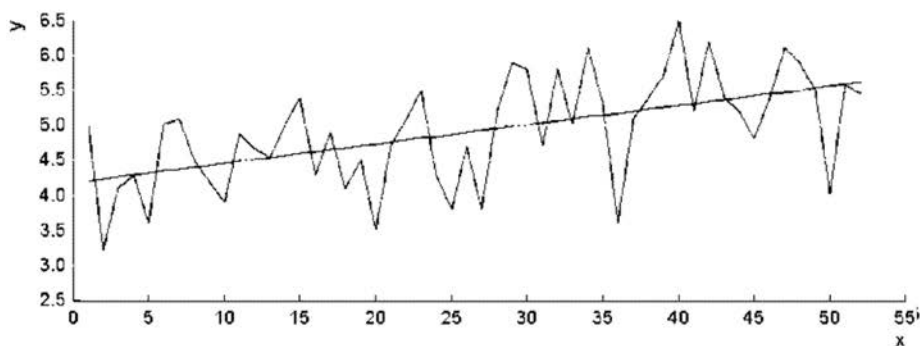
Tab. 3. Základní statistické údaje analyzovaných souborů v letech 1961-2012*

| Ukazatel | (L) | (D-S) | (B) | L_I [-] | Ukazatel | (L) | (D-S) | (B) |
|----------------------|------------|-------|------|-----------|----------------------|------------|-------|-------|
| | T_a [°C] | | | | | H_s [mm] | | |
| aritmetický průměr | 7,52 | 4,91 | 5,1 | 1,01 | aritmetický průměr | 828 | 1 349 | 1 215 |
| standardní odchylka | 0,79 | 0,77 | 0,38 | 0,317 | standardní odchylka | 139 | 203 | 218 |
| koeficient variace | 0,11 | 0,157 | 0,07 | 0,314 | koeficient variace | 0,17 | 0,15 | 0,18 |
| koeficient asymetrie | -0,19 | -0,2 | 0,36 | -0,456 | koeficient asymetrie | -0,183 | 0,28 | 0,2 |
| koeficient excesu | 2,29 | 2,58 | 3,78 | 2,177 | koeficient excesu | 2,97 | 3,22 | 3,48 |
| autokorelace 1. řádu | 0,4 | 0,35 | 0,15 | 0,797 | autokorelace 1. řádu | 0,04 | -0,05 | 0,1 |
| nezávislost prvků | ne | ne | ne | ne | nezávislost prvků | ano | ano | ano |
| normální rozdělení | ano | ano | ano | ne | normální rozdělení | ano | ano | ano |

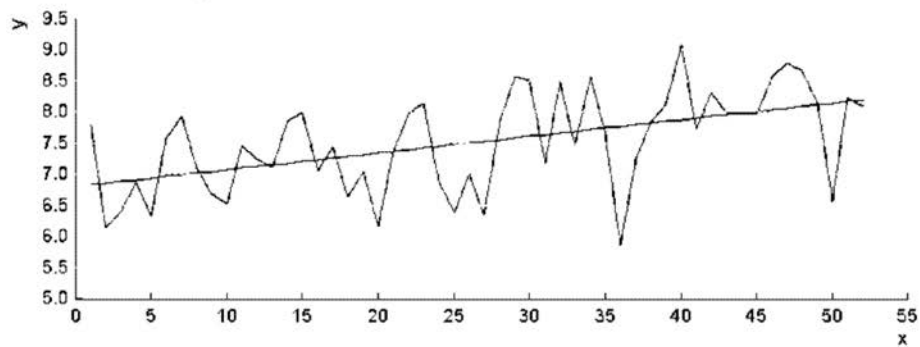
* L_I – letokruhový index, H_s – srážkový úhrn, T_a – průměrná teplota vzduchu; (B) Bedřichov, (D-S) Desná-Souš, (L) Liberec



Critical value = 2,009 at level of significance = 0,050 Test criterion = 2,434
Parameters of trend line: a = 4,888; b = 0,008

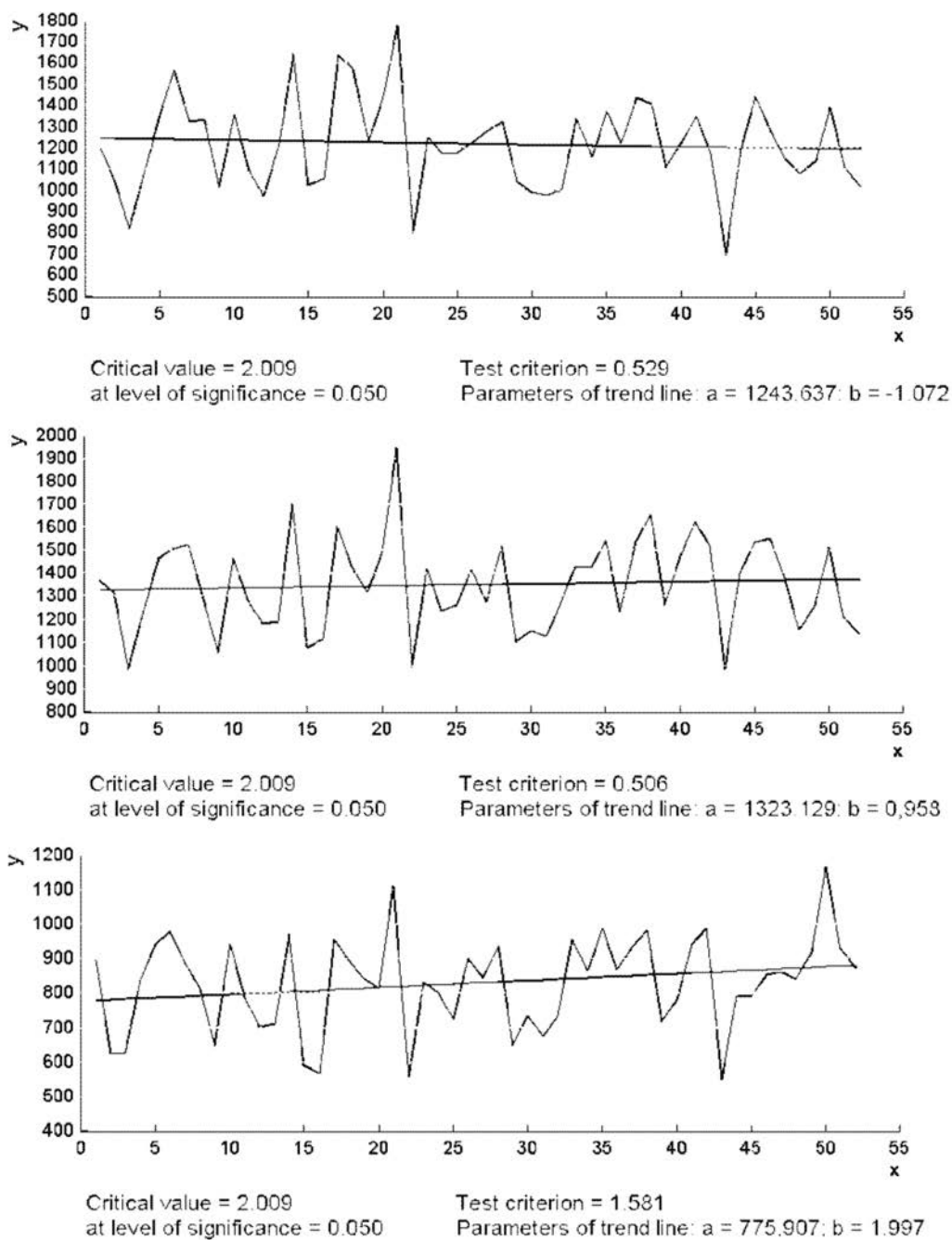


Critical value = 2,009 at level of significance = 0,050 Test criterion = 4,553
Parameters of trend line: a = 4,182; b = 0,028



Critical value = 2,009 at level of significance = 0,050 Test criterion = 4,211
Parameters of trend line: a = 6,804; b = 0,027

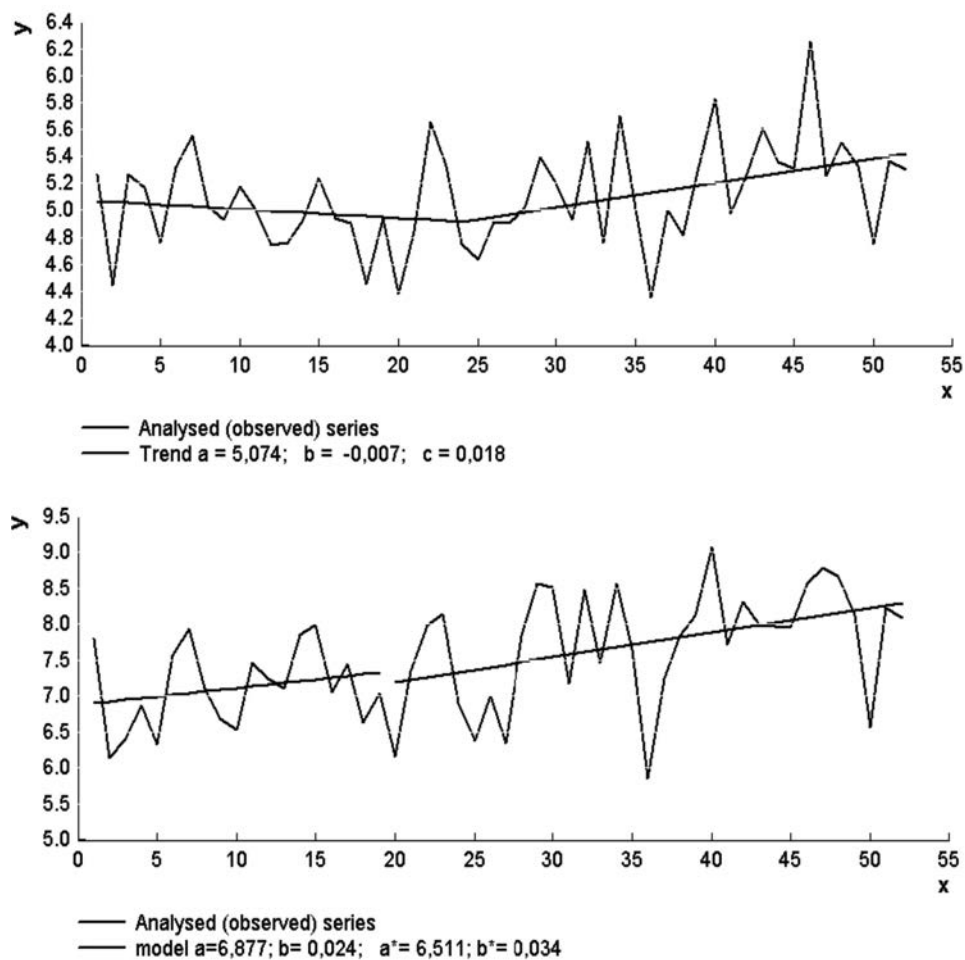
Obr. 1. Trend v časové řadě průměrných ročních teplot vzduchu v letech 1961-2012 (zde: Liberec, Desná-Souš a Bedřichov)



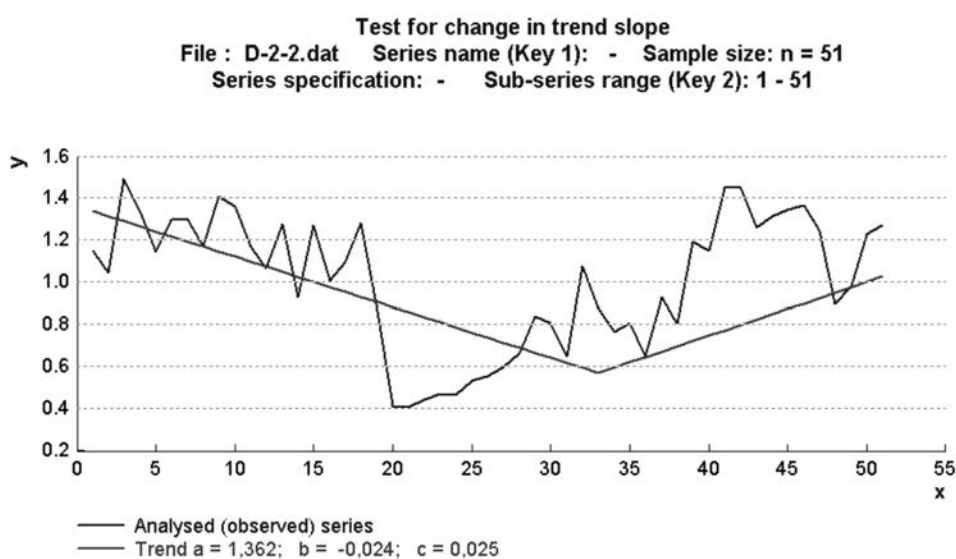
Obr. 2. Trend v časové řadě ročních srážkových úhrnů v letech 1961-2012 (zdola: Liberec, Desná-Souš, Bedřichov)

Na rozdíl od průměrných ročních teplot vzduchu a ročních srážkových úhrnů se v časové řadě letokruhového indexu objevuje významná autokorelace (prvního až třetího řádu), a významná změna trendu v roce 1993 (obr. 4). V průběhu standardní chronologie dospělého smrkového porostu (obr. 5) je možné identifikovat tři odlišná období: A (přírůst zřetelně neovlivňovaný, do 1978), B (redukovaný přírůst, 1979-1992) a C (zvýšený přírůst, 1993-2012). Soubory dat letokruhového indexu v časových úsecích A, B, C neodpovídaly normál-

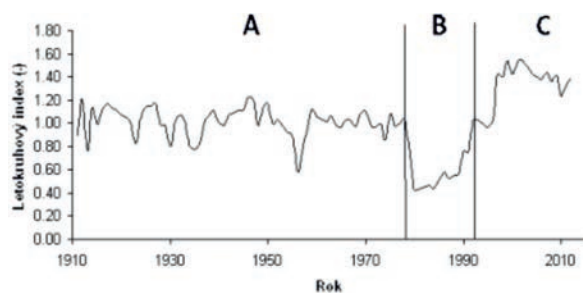
nímu rozdělení (tab. 3), a byly tudíž ověřovány pomocí neparametrického Kruskalova-Wallisova porovnávacího testu [12]: mediány souborů letokruhového indexu se v etapách A, B, C významně liší (rozdíly jsou významně větší než očekávané v rámci nahodilosti), tab. 4. Období menšího přírůstu (B) koresponduje s výrazným znečištěním ovzduší (a následně kyselých atmosférických depozic) ve sledované oblasti [3]. Naopak, v období revitalizace (C) je evidentní, že se sledované stromy vyvíjejí lépe než v předcházejících etapách (A, B).



Obr. 3. Změna trendu průměrných ročních teplot vzduchu v letech 1961-2012 (zdola Liberec a Bedřichov)



Obr. 4. Změna trendu v časové řadě letokruhového indexu v letech 1961-2012



Obr. 5. Standardní chronologie smrkového porostu v letech 1910-2012

Pro hodnocení vlivu základních faktorů prostředí (roční teploty vzduchu T , srážkového úhrnu H_s a obsahu kyslíčnicku siřičitého v ovzduší K_{SO_2}) na vývoj letokruhového indexu byla použita vícenásobná regresní analýza [12]. Z korelační matice (tab. 5) vyplývá významné ovlivnění letokruhového indexu obsahem SO_2 v ovzduší (a následnou kyselou atmosférickou depozicí) a průměrnou roční teplotou vzduchu.

Tab. 4. Změny vývoje letokruhového indexu v etapách A, B, C Kruskal-Walishův porovnávací test ($KW = 51,17$)

| Porovnání souborů | Medián | Průměrný rozdíl pořadí | Pravděpodobnost P |
|-------------------|--------|------------------------|---------------------|
| A – B | 1,02 | 39,41 | <0,001 |
| A – C | 0,54 | -34,04 | <0,001 |
| B – C | 1,4 | -73,45 | <0,001 |

Tab. 5. Korelační matice*

| | LI | K_{SO_2} | T | H_s |
|------------|--------------|--------------|-------------|-------|
| LI | 1 | -0,77 | 0,35 | -0,09 |
| K_{SO_2} | -0,77 | 1 | -0,24 | 0,05 |
| T | 0,35 | -0,24 | 1 | -0,32 |
| H_s | -0,09 | 0,05 | -0,32 | 1 |

* LI – letokruhový index, K_{SO_2} – obsah SO_2 v ovzduší, T – průměrná roční teplota vzduchu, H_s – roční srážkový úhrn

Byla potvrzena vzájemná nezávislost uvažovaných charakteristik prostředí a výsledkem vícenásobné regrese je vztah pro letokruhový index (1), pro který součinitel vícenásobné korelace $r_m = 0,79$,

$$LI = 1,049 - 0,027 K_{SO_2} + 0,129 T - 3,56 \cdot 10^{-5} H_s \quad (1)$$

Vliv nadmořské výšky, zápoje a zdravotního stavu na letokruhový index v daném rozsahu dat (tab. 1) nebyl statisticky významný [10].

Závěr a diskuze

Z výsledků studie vyplývá zásadní význam emisí síry (a následně kyselých atmosférických depozic) na vývoj letokruhů smrku v náhorní části Jizerských hor (730-1 060 m). Záro-

veň byl potvrzen významný vliv průměrné roční teploty vzduchu v posledních patnácti letech na zvýšené přírůstky sledovaných stromů. Tento závěr koresponduje s výsledky šetření provedených v několika geograficky odlišných lokalitách [5], [7], [11], [13]. Vývoj letokruhů smrku ve sledovaných lokalitách není dosud ovlivněn ročními srážkovými úhrny (a případným vodním deficitem). Na základě scénářů možných klimatických změn v období 2071-2100 [5] však již evidentně dojde k posunu stávající výškové zonace ekosystémů a ohrožení smrkových porostů v zájmových povodích Jizerských hor.

Článek vznikl za podpory projektu Earthwatch Institute (Mountain waters of the Czech Republic), projektů č. 526-09-0567 GA ČR a č. 12/128/OHK1/2T/11 SGS-ČVUT.

Literatura

- [1] Bauer, Z.: Reakce přírody na vývoj klimatu. Veronica, 5:6-8, 2009.
- [2] Fritts, H. C.: Tree rings and climate. London, Academic Press 1976.
- [3] Chen, I. C. – Hill, J. K. – Ohlemüller, R. – Roy, D. B. – Thomas, C. D.: Rapid range shifts of species associated with high levels of climate warming. Science, 333(6045):1024-6, 2011.
- [4] ČHMÚ: Atlas podnebí České republiky. Český hydrometeorologický ústav, Praha 2007.
- [5] IPCC: Climate Change: Synthesis Report. Geneva, World Meteorological Organization 2007.
- [6] Kohler, T. – Maselli, D.: Mountains and climate change – from understanding to action. Bern, Geographica Bernensia 2009.
- [7] Kramer, H.: Relation between crown parameters and volume increment of Picea abies stands damaged by environmental pollution. Scandinavian Journal of Forest Research, 1:251-263, 1986.
- [8] Křeček, J. – Hořícká, Z.: Degradation and recovery of mountain watersheds: the Jizera Mountains, Czech Republic. Unasylyva, 52: 43-49, 2001.
- [9] Křeček, J. – Hořícká, Z. – Nováková, J.: Ellenberg's indicator in water resources control: the Jizera Mountains, Czech Republic. Ecological Engineering, 36: 1112-1117, 2010.
- [10] Křeček, J. – Vrtiška, J.: Vliv revitalizace povodí a klimatických změn na dendrochronologii smrkového porostu v Jizerských horách. In: Revitalizace vodního systému krajiny a měst, zatíženého významnými antropogenními změnami. [Sborník], vědecký seminář MSM 6840770002. ČVUT v Praze, 2011, s. 108-110.
- [11] McLaughlin, S. B. – Shortle, W. C. – Smith, K. T.: Dendrological applications in air pollution and environmental chemistry: research needs. Dendrochronologia, 20:133-157, 2002.
- [12] Motulski, H. J. – Searle, P.: InStat guide to choosing and interpreting statistical tests. GraphPad Software, Inc., San Diego California USA, www.graphpad.com, 1998.
- [13] Pretzsch, H.: Forest dynamics, growth and yield. Berlin, Springer 2009.
- [14] Warren, W. G.: Dynamic standardization of tree-ring series. Canadian Journal of Forest Research, 20:1422-1431, 1990.
- [15] WMO: Technology for Detecting Trends and Changes in Time Series of Hydrological and Meteorological Variables. Hydrological Operational Multipurpose System. Genève, World Meteorological Organization 2001.
- [16] Punčochář, P. – Křeček, J.: Potencionální evapotranspirace v horském povodí. Stavební obzor, 20, 2011, č. 3, s. 84-86. ISSN 1210-4027

Efektivní výstavba budov z hlediska nákladů životního cyklu

Ing. Zdeněk DUFEK
doc. Ing. Jana KORYTÁROVÁ, Ph.D.
VUT v Brně – Fakulta stavební

Článek se zabývá zkoumáním efektivní výstavby budov s důrazem na náklady jejich životního cyklu. Výstupy případové studie, porovnávající tři obdobné domovy pro seniory z hlediska investičních nákladů na výstavbu, použitých kritérií hodnocení veřejné zakázky a následných provozních nákladů, dokazují nutnost komplexního nákladového pohledu na celý proces.

Efficient building construction from the perspective of life cycle costs

The article deals with efficient building construction with the stress on life circle costs. The outputs from a case study comparing three similar retirement homes in terms of investment costs, used evaluation criteria during the process of public procurement and consecutive operating costs prove the necessity for a complex cost related view on the whole process.

Úvod

U stavebních zakázek zadávaných veřejnými investory je v současnosti pozornost investorů i veřejnosti zaměřena na dosažení co nejnižší nabídkové ceny díla. V odborné literatuře je dostatečně popsáno, že z hlediska výdajů investora netvoří investiční náklady rozhodující položku. Ze studie prováděné britskou Královskou technickou akademií [1] vyplývá, že náklady na vlastní stavbu jsou zanedbatelné ve vztahu k provozním nákladům. Tato studie uvádí, že poměr nákladů na výstavbu budovy k nákladům na údržbu a nákladům na provoz včetně nákladů na zaměstnance z hlediska celého životního cyklu je 1:5:200.

Problematikou výpočtu nákladů životního cyklu staveb (BLCC – Building Life Cycle Cost) se dlouhodobě zabývájí univerzitní pracoviště i v České republice. Metoda výpočtu nákladů životního cyklu budovy je založena na stanovení současných i budoucích nákladů spojených s technickými parametry stavby v jednotlivých fázích jejího životního cyklu [2], [3]. V průběhu realizační fáze jde o investiční náklady (v terminologii zadávání veřejných zakázek o nabídkovou cenu stavebního díla). V průběhu provozování jde zejména o náklady na opravy a udržování, rekonstrukce a modernizace, spotřebu energií; v likvidační fázi potom o náklady spojené s likvidací budovy. Hodnota BLCC posuzuje náklady stavby v přítomnosti, tedy v okamžiku hodnocení, proto musí být všechny budoucí náklady přepočteny na svou současnou hodnotu. Výpočet ukazatele lze vyjádřit vztahem

$$BLCC = \sum_{i=0}^n \frac{1}{(1+r)^i} \sum_{j=1}^t C_{ij}, \quad (1)$$

kde BLCC jsou kumulované náklady životního cyklu budovy [Kč], C_{ij} je j -tý náklad spojený s technickými parametry budovy v i -tém roce v Kč, i je rok, ve kterém vzniká náklad, n je délka životního cyklu budovy v letech a r je diskontní sazba [%/100], podrobněji [2].

Kritérium náklady životního cyklu je velmi dobře použitelné v případě pořízení stavby systémem Design-Built (DB), kdy uchazeč nabízí zpracování projektové dokumentace i realizaci stavby. Návrh stavby lze hodnotit na základě

celoživotních nákladů. Měl by sledovat kritéria 3E – hospodárnost, účelnost a efektivnost [5].

Vybrané objekty a použitá metodika

V rámci výzkumné činnosti byla zpracována případová studie dokládající význam komplexního pohledu na celý proces výstavby a provozování budov. Pro porovnání vlivu použitých kritérií výběru zhotovitele na cenu díla a následné provozní náklady byly vybrány tři projekty domovů pro seniory na území Jihomoravského kraje, a to Senior centrum Blansko (dále jen Blansko), S – centrum Hodonín (dále jen Hodonín) a Domov pro seniory Předklášteří (dále jen Předklášteří). Tyto stavby byly realizovány na přelomu roku 2000 původními okresními úřady. Zřizovatelské kompetence k těmto zařízením přešly následně po vzniku krajů na Jihomoravský kraj. Budovy lze velmi dobře porovnávat. Vznikaly přibližně ve stejné době, a tudíž byly k dispozici stejné poznatky z hlediska vývoje technologií a postupů používaných v pozemním stavitelství. Mezi termíny dokončení staveb není velká časová prodleva, lze konstatovat, že jsou pořízeny v porovnatelné cenové úrovni. Způsob využití a struktura uživatelů je obdobná, a tudíž netřeba zohledňovat různou úroveň náročnosti vnitřní výbavy. Zařízení mají centrálního dodavatele elektřiny a plynu, a tak pro porovnání jejich energetické spotřeby je možné používat náklady v korunách a není nutné řešit problém rozdílné ceny různých dodavatelů. U každého zařízení byl zjišťován rok uvedení do provozu, původní investiční náklady, použitá kritéria hodnocení při veřejné zakázce, počet lůžek, náklady na opravy a údržbu, náklady na energie. Provozní náklady byly požadovány za čtyřleté období, aby se eliminovalo případné krátkodobé zdržení udržovacích prací pro nedostatek finančních prostředků. Data byla poskytnuta z účetnictví zkoumaných subjektů. Informace o veřejné zakázce byly zjištěny z archivu veřejných zakázek [6].

Zjištěná data

Zadávací dokumentace veřejných zakázek neobsahovala definice provozních parametrů budovy ve smyslu nákladů

na opravy, spotřeby médií atd. Porovnání původních nákladů na investici a počtu lůžek uvádí *tab. 1*.

Tab. 1. Porovnání investičních nákladů a počtu lůžek u vybraných zařízení

| Položka | Blansko 2002 | Hodonín 2002 | Předklášteří 2001 |
|---|------------------|------------------|-------------------|
| celkové investiční náklady (vč. vybavení) při uvedení do provozu vč. DPH [Kč] | 118 895 002 | 198 795 000 | 98 075 205 |
| původní lůžková kapacita při uvedení do provozu | 104 | 141 | 84 |
| investiční náklady na lůžko [Kč] | 1 143 221 | 1 409 894 | 1 167 562 |

Tab. 2. Porovnání provozních nákladů u vybraných zařízení [Kč]

| Položka | Blansko | Hodonín | Předklášteří |
|---|---------------|---------------|---------------|
| náklady na opravy a údržbu budovy 2009 | 428 252 | 855 072 | 485 146 |
| náklady na opravy a údržbu budovy 2010 | 431 848 | 1 140 663 | 475 789 |
| náklady na opravy a údržbu budovy 2011 | 335 804 | 1 162 762 | 1 884 135 |
| náklady na opravy a údržbu budovy 2012 | 375 634 | 1 117 344 | 582 339 |
| průměrné roční náklady na opravy a údržbu na lůžko | 3 778 | 7 581 Kč | 10 201 |
| náklady na spotřebu elektřiny 2009 | 1 331 083 | 722 851 | 1 354 899 |
| náklady na spotřebu elektřiny 2010 | 1 145 309 | 624 991 | 1 612 047 |
| náklady na spotřebu elektřiny 2011 | 1 083 107 | 557 946 | 1 494 923 |
| náklady na spotřebu elektřiny 2012 | 1 142 950 | 610 334 | 1 557 482 |
| průměrné roční náklady na spotřebu elektřiny na lůžko | 11 304 | 4 461 | 17 915 |
| náklady na vytápění 2009 | 1 260 682 | 1 206 843 | 946 396 |
| náklady na vytápění 2010 | 1 113 554 | 1 133 141 | 913 778 |
| náklady na vytápění 2011 | 1 218 064 | 1 204 797 | 1 063 676 |
| náklady na vytápění 2012 | 1 408 089 | 1 435 737 | 1 254 190 |
| průměrné roční náklady na vytápění na lůžko | 12 020 | 8 831 | 12 435 |
| celkové průměrné roční náklady na opravy, elektřinu a vytápění | 27 102 | 20 873 | 40 550 |

Při zadání veřejné zakázky byla použita následující kritéria hodnocení:

■ Hodonín

- Reference a odborná způsobilost uchazeče se zaměřením na zakázky obdobného charakteru a rozsahu (váha 40 %);

- a) vlastní reference (informace o stavbách realizovaných uchazečem, o jeho postupu vůči objednatelům staveb, o dodržování termínů, ceny a kvality díla);
- b) počet a charakter zakázek uskutečněných uchazečem v posledních třech letech (i současně realizovaných).

- Celková nabídková cena včetně DPH (váha 30 %).
- Rozsah a způsob využití místních (regionálních) zdrojů pracovních sil při realizaci veřejné zakázky (váha 20 %):
 - a) podíl subdodavatelů z regionu vůči objemu subdodávek ostatních;
 - b) celkový objem (vyjádřený ve finanční hodnotě) realizovaný podnikatelskými subjekty z regionu.
- Systém řízení jakosti, záruka za jakost a záruční podmínky (váha 10 %):
 - a) stupeň zavedení systému řízení jakosti dle norem ISO nebo obdobný;
 - b) základní záruka za jakost vyjádřená v měsících;
 - c) záruční podmínky – doba nástupu na odstranění vad a havárií, sankce za nenastoupení ve sjednaném termínu a sankce za neodstranění vad ve sjednaném termínu;
 - d) jiné podmínky navržené uchazečem v souvislosti se zárukou.

■ Předklášteří

Celkový způsob technického řešení a soulad s podklady pro územní rozhodnutí (váha 40 %), reference firmy a odborná způsobilost (váha 20 %), profesní zabezpečení firmy (váha 15 %), celková cena díla (váha 15 %), lhůta plnění (váha 10 %).

■ Blansko

Údaje o referencích a odborné způsobilosti uchazeče se zaměřením na stavby obdobného charakteru a rozsahu (váha 1/6), celková nabídnutá cena včetně DPH (váha 2/6), záruka za jakost a záruční podmínky, systém řízení jakosti, garance za záruku (váha 3/6).

Tab. 3. Porovnání upravených pořizovacích cen a provozních nákladů z dlouhodobého hlediska [Kč]

| Položka | Blansko | Hodonín | Předklášteří |
|--|-----------|-----------|--------------|
| investiční náklady na lůžko po přepočtu na ceny 2012 | 1 394 000 | 1 719 171 | 1 462 120 |
| rozdíl proti nejlevnější stavbě | 0 | 325 170 | 68 120 |
| rozdíl v průměrných ročních nákladech na opravy, elektřinu a vytápění na lůžko oproti nejlevnější provozní variantě | 6 229 | 0 | 19 677 |
| součet rozdílů v průměrných ročních nákladech na opravy, elektřinu a vytápění na lůžko proti nejlevnější provozní variantě nominálně za 40 let | 249 147 | 0 | 787 072 |
| součet rozdílů v průměrných ročních nákladech na opravy, elektřinu a vytápění na lůžko proti nejlevnější provozní variantě za 40 let při diskontování sazbou 5 % | 106 878 | 0 | 337 636 |

Porovnání nejvýznamnějších provozních nákladů budovy, tj. nákladů na opravy a údržbu budovy, spotřebu elektřiny a nákladů na vytápění, je uvedeno v *tab. 2*.

Pro porovnání byly celkové investiční náklady areálů upraveny pomocí indexu stavebních prací publikovaných Českým statistickým úřadem na cenovou úroveň roku 2012. Dále byl proveden výpočet rozdílu ve sledovaných ročních průměrných nákladech na lůžko za očekávanou dobu životnosti budovy, která byla stanovena na 40 let, v nominální hodnotě a se zohledněním diskontní sazby ve výši 5 %. Výsledky těchto výpočtů jsou uvedeny v *tab. 3*.

Výsledky

Z dat *tabulky 1* a z použitých hodnotících kritérií je patrné, že praxe veřejných zadavatelů za dobu účinnosti zákona 199/1994 Sb., o zadávání veřejných zakázek, byla velmi různorodá a zadávací proces na relativně obdobné stavby vedl k odlišným výsledkům. Rozdíl nákladů mezi nejdražší a nejlevnější variantou činil 267 tis. Kč/lůžko, což je 19 %.

Nejnižší sledované provozní náklady v přepočtu na lůžko vykazuje budova v Hodoníně, která ovšem současně měla nejvyšší pořizovací hodnotu. Nabízí se tedy konstatování, že za vyšší cenu byla dodána vyšší kvalita – lepší řešení, kvalitnější materiály. Tato kritéria však nebyla v procesu hodnocení zohledňována. Navíc průměrný roční rozdíl provozních nákladů mezi Blanskem, jehož pořizovací náklady byly v přepočtu na lůžko nejnižší, a Hodonínem, je 6 229 Kč/lůžko. Pokud by byla tato hodnota přepočtena na dobu splacení, rozdíl ve vyšší investici a provozních nákladech při zohlednění diskontní sazby 5 % by činil 122 let.

Zajímavým extrémem jsou provozní náklady Předklášteří. U této veřejné zakázky mělo kritérium technické řešení 40 %, zatímco cena díla měla váhu jen 15 %. Dalo by se očekávat, že v rámci technického řešení bude zohledněna právě efektivnost provozu budovy. Opak je pravdou. Provozní náklady na lůžko nejlevnějšího Hodonína dosahují 52 % sledovaných provozních nákladů budovy Předklášteří. Z hlediska dlouhodobého časového horizontu bude tato stavba po zohlednění vlivu diskontování nákladnější než investičně nejdražší Hodonín. Toto zjištění kontrastuje se skutečností, že budova Předklášteří byla nominována na ohodnocení v rámci soutěže Stavba roku 2002.

Závěr

Ze současného pohledu byla hodnotící kritéria používaná za doby účinnosti zákona č. 199/1994 Sb., o zadávání veřejných zakázek, velmi volná. Zadávací proces v této podobě by byl podle současné účinné právní úpravy vyloučen (zákon č. 137/2006 Sb., o veřejných zakázkách v platném znění). V minulosti používaná hodnotící kritéria u veřejných stavebních zakázek neměla vazbu na následné provozní náklady budov. Pro porovnatelné druhy stavebních investic bylo dosahováno velmi odlišných výsledků z hlediska „value for money.“ Při zadávání veřejných stavebních zakázek je třeba se soustředit na přesné zadání očekávaných provozních parametrů budov a budoucí provozní náklady zohledňovat v hodnotícím procesu.

Zpracovaná případová studie plně podporuje a dokládá správnost názoru, že v oblasti výstavby budov je nutné zvažovat komplexní náklady jejich životního cyklu a preferovat ty varianty, které umožní náklady respektovat z hlediska celého hodnoceného období. To ve své podstatě znamená aplikaci principů 3E (hospodárnost, účelnost a efektivnost), jejichž sledování je většinou veřejných zadavatelů uloženo právními normami [5], [6], [7], [8].

Článek vznikl za podpory projektu specifického výzkumu Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně FAST-S-11-61 „Ekonomické aspekty přípravy, realizace a provádění stavebních projektů“.

Literatura

- [1] Evans, R. a kol.: Long Term Cost of Owning and Using Buildings. London, The Royal Academy of Engineering 1998.
- [2] Korytářová, J.: Celoživotní náklady budov. *Stavební obzor*, **18**, 2009, č. 7, s. 219-221. ISSN 1210-4027
- [3] Beran, V. – Měšťanová, D. – Macek, D.: Náklady životního cyklu inženýrských staveb. *Stavební obzor*, **22**, 2013, č. 5, s. 143-146. ISSN 1805-2576 (Online)
- [4] Marková, L. – Korytářová, J. – Nový, M. – Hromádka, V.: Náklady životního cyklu stavby. Brno, CERM 2011, 125 s. ISBN 978-80-7204-762-8
- [5] Schneiderová-Heralová, R. – Beran, V. – Dlask, P.: Rozhodování (vstupní data, významnost kritérií, hodnocení variant). ČVUT v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04982-2
- [6] www.centralniadresa.cz, informace o zadání zkoumaných veřejných zakázek
- [7] Zákon č. 199/1994 Sb., o zadávání veřejných zakázek
- [8] Zákon č. 127/2006 Sb., o veřejných zakázkách v platném znění

Simulace pořizovací ceny bytového domu

Ing. Milada GALATÍKOVÁ
doc. Ing. Leonora MARKOVÁ, Ph.D.
VUT v Brně – Fakulta stavební

Stanovení pořizovací ceny bytového domu v době jeho přípravy je omezeno dostupností relevantních informací. Nástrojem může být cenový model, který zohlední specifika stavebně technického charakteru ovlivňující pořizovací cenu.

Simulation of acquisition costs of housing

The determination of the acquisition costs of housing at the phase of its preparation is limited by the availability of relevant information. The tool may be a price model which takes into account specific construction characteristics of technical nature that affect costs.

Úvod

V předinvestiční a v investiční etapě přípravy výstavby stavebního díla je důležité stanovit jeho pořizovací cenu. Cílem je taková cena, která v budoucnosti vykáže co nejmenší odchylku od skutečně dosaženého stavu. Problém je v tom, že v počáteční etapě přípravy stavebního díla je nedostatek relevantních informací pro tvorbu ceny. V současné praxi lze pro počáteční propočet pořizovací ceny použít rozpočtové ukazatele porovnatelných objektů, vyjádřené v korunách na měrnou jednotku, u bytového domu je to 1 m³ obytné plochy (OP). Rozpočtový ukazatel může mít uživatel vygenerovaný z vlastní databáze již realizovaných zakázek. Pokud ji nemá, může využít informací publikovaných odbornými organizacemi.

Model sestavený pro simulace pořizovací ceny bytového domu v porovnání s rozpočtovými ukazateli umožní promítnout v širším rozsahu specifika stavebně technického charakteru objektu. Ve výsledku vedle pořizovací ceny vykazuje i stavebně ekonomické informace. Pořizovací cena je rozdělena podle funkčních dílů a podle jejich dílčích částí. Tyto údaje slouží dále pro výpočet nákladů životního cyklu při předpokládaných životnostech jednotlivých funkčních dílů a následně pro propočty efektivnosti vložené stavební investice. Může být nástrojem pro uživatele při rozhodování v alternativním stavebně technickém řešení s ekonomickým vyhodnocením [3].

Cenový model

Vstupní data pro vytvoření modelu bytového domu byla vytvořena z položkových rozpočtů sestavených pro vybrané bytové domy. Rozpočty vycházejí z dokumentace, kterou lze získat v předinvestiční a zčásti investiční etapě životního cyklu stavebního díla. Struktura nákladů v těchto rozpočtech je podle skupin stavebních dílů a konstrukčních prvků [4]. Do cenového modelu bylo vybráno 20 bytových domů o třech až sedmi podlažích s obestavěným prostorem 2 100-29 700 m³. Rozpočtový ukazatel je v rozpětí 3 000-5 000,- Kč/m³

obytné plochy. Rozpočet vybraných bytových domů byl upraven tak, aby všechny položky byly ohodnoceny jednotkovými cenami doloženými kalkulacemi v cenové úrovni 2011. Skupiny stavebních dílů a konstrukční prvky byly převedeny do struktury funkčních dílů a jejich dílčích částí [1]. Jednotlivé položky modelu vznikly agregací množství jednotlivých rozpočtových položek. Náklad na položku v modelu je vypočten oceněním jejího výsledného množství průměrnou cenou agregovaných položek.

Model pracuje s podporou programu MS Office Excel. Zadáním velikostí obestavěného prostoru v metrech krychlových oceňovaného bytového domu, stavebně technických parametrů a u některých dílčích částí funkčních dílů i materiálové charakteristiky, lze provést výpočet pořizovací ceny. Struktura modelu je variabilní a pro výpočet lze vybrat ty funkční díly nebo jejich dílčí části, které oceňovaný bytový dům obsahuje. Všechny položky mají možnost nulování volbou funkce A/N, simulovaný model je tedy bude, či nebude obsahovat. Ekonomickou část lze modelovat úpravou jednotkových cen pomocí cenových indexů *i*. K promítnutí dalších specifik oceňovaného bytového domu je v modelu u některých vybraných položek funkce, která umožňuje další výběr volitelných materiálů či technologií.

Statistické hodnocení

Model byl ověřován metodou Monte Carlo. Vstupními hodnotami pro hodnocení jsou jednotkové ceny dílčích částí funkčních dílů vložené formou intervalu od minimální po maximální hodnotu a formou průměrných hodnot s vypočtenou směrodatnou odchylkou, která určuje míru statistické disperze od vstupních dat. Údaje jsou převzaty z bytových domů, které byly vybrány pro sestavení cenového modelu. Testování bylo provedeno s podporou nástavbového programu pro MS Office Excel – Crystal Ball [5]. Každý funkční díl je zadán rozdílným počtem hodnot, proto může být chyba modelu navýšena množstvím vstupních dat. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v *tab. 2*.

Tab. 1. Model bytového domu

| | | | | | | 10 401,00 | Celkem | 81 670 129,20 |
|---|-----|---|----------------|-----------------|-----------------|----------------------|--------|---------------|
| | | | | | | m ³ OP | | CZK |
| Popis | A/N | i | MJ | Množství celkem | Cena jednotková | Cena celkem | | |
| F0110 Základy včetně výkopů | | | | | | 11 442 451,41 | | |
| Zemní práce | A | 1 | m ³ | 1 199,65 | 619,4 | 743 061,96 | | |
| Základová deska z betonu tř. C 16/20 | A | 1 | m ³ | 126,267 | 5 155,33 | 650 948,20 | | |
| Základové pásy z betonu tř. C 16/20 | A | 1 | m ³ | 209,7 | 4 806,43 | 1 007 909,41 | | |
| Základové patky ze ŽB tř. C 25/30 | A | 1 | m ³ | 57,87 | 5 422,50 | 313 801,46 | | |
| Piloty | A | 1 | kpl | 1 | 1 848 922,59 | 1 848 922,59 | | |
| Štětové stěny | A | 1 | m ² | 855,233 | 6 210,00 | 5 310 998,29 | | |
| Trubkové mikropiloty | A | 1 | m | 515,371 | 2 360,00 | 1 216 274,71 | | |
| Ostatní - Základy a zemní práce | A | 1 | kpl | 1 | 350 534,80 | 350 534,80 | | |
| F0120 Hydroizolace spodní stavby | | | | | | 592 236,14 | | |
| Provedení hydroizolace asf. pásy | A | 1 | m ² | 1 911,12 | 290 | 554 225,39 | | |
| Ostatní - Hydroizolace | A | 1 | kpl | 1 | 38 010,75 | 38 010,75 | | |
| F0210 Svislé nosné a obvodové zděné konstrukce | | | | | | 15 540 667,70 | | |
| Zdivo nosné tl 240 mm POROTHERM | A | 1 | m ² | 443,061 | 1 018,55 | 451 277,94 | | |
| Zdivo nosné tl 250 mm POROTHERM | A | 1 | m ² | 685,343 | 1 539,00 | 1 054 743,18 | | |
| Zdivo nosné tl 300 mm POROTHERM | A | 1 | m ² | 921,995 | 1 436,11 | 1 324 086,91 | | |
| Zdivo nosné tl 365 mm POROTHERM | A | 1 | m ² | 985,38 | 1 564,00 | 1 541 134,72 | | |
| Zdivo nosné tl 400 mm POROTHERM | A | 1 | m ² | 521,493 | 1 720,00 | 896 967,31 | | |
| Zdivo nosné tl 440 mm POROTHERM | A | 1 | m ² | 1 286,90 | 1 860,00 | 2 393 639,38 | | |
| Zdivo nosné tl 250 mm Ytong | A | 1 | m ² | 141,89 | 962 | 136 498,01 | | |
| Zdivo nosné tl 300 mm Ytong | A | 1 | m ³ | 216,794 | 3 690,00 | 799 969,96 | | |
| Zdivo nosné tl 375 mm Ytong | A | 1 | m ³ | 922,95 | 3 730,00 | 3 442 604,35 | | |
| Nosná zeď ze ŽB tř. C 25/30 | A | 1 | m ³ | 125,537 | 10 975,56 | 1 377 840,06 | | |
| Sloupy nebo pilíře ze ŽB tř. C 25/30 | A | 1 | m ³ | 20,448 | 16 022,22 | 327 615,82 | | |
| Překlad ze ŽB tř. 25/30 | A | 1 | m ³ | 23,553 | 13 050,00 | 307 361,21 | | |
| Montáž ŽB pref. překladů | A | 1 | kpl | 1 | 229 231,78 | 229 231,78 | | |
| Překlad POROTHERM 11,5 cm | A | 1 | kus | 115,009 | 245,9 | 28 280,83 | | |
| Překlad POROTHERM 14,5 cm | A | 1 | kus | 258,416 | 290,67 | 75 112,96 | | |
| Překlad POROTHERM 23,8 cm | A | 1 | kus | 539,876 | 578,71 | 312 429,54 | | |
| Překlad POROTHERM RONO 36,5 | A | 1 | kus | 53,26 | 6 220,00 | 331 276,52 | | |
| Ostatní - Zdivo | A | 1 | kpl | 1 | 510 597,22 | 510 597,22 | | |
| F0220 Příčky a dělicí stěny | | | | | | 1 951 396,09 | | |
| Příčky tl 65 mm POROTHERM | A | 1 | m ² | 864,272 | 440 | 380 279,60 | | |
| Příčky tl 75 mm Ytong | A | 1 | m ² | 653,346 | 408 | 266 565,02 | | |
| Příčky tl 100 mm Ytong | A | 1 | m ² | 723,085 | 517,33 | 374 075,91 | | |
| Příčky tl 115 mm POROTHERM | A | 1 | m ² | 1 077,06 | 613,93 | 661 238,54 | | |
| Příčky tl 150 mm Ytong | A | 1 | m ² | 120,862 | 663,71 | 80 218,16 | | |
| Ostatní - Příčky | A | 1 | kpl | 1 | 189 018,86 | 189 018,86 | | |
| F0230 Komíny | | | | | | 215 027,99 | | |
| Komínové těleso | A | 1 | kpl | 1 | 215 027,99 | 215 027,99 | | |

| | | | | | | |
|---|---|---|----------------|----------|--------------|----------------------|
| F0310 Stropní konstrukce | | | | | | 17 861 340,65 |
| Strop POROTHERM tl 19 cm vložky MIAKO | A | 1 | m ² | 1 771,80 | 1 470,00 | 2 604 540,96 |
| Montáž stropních panelů FILIGRAN | A | 1 | m ² | 3 291,32 | 1 029,67 | 3 388 962,90 |
| Montáž pref. ŽB stropu SPIROLL | A | 1 | m | 1 898,78 | 1 562,50 | 2 966 845,16 |
| Stropy deskové ze ŽB tř. C 25/30 | A | 1 | m ³ | 485,228 | 8 677,50 | 4 210 563,50 |
| Nosníky ze ŽB tř. C 25/30 | A | 1 | m ³ | 28,759 | 15 863,64 | 456 226,89 |
| Ztužující pásy a věnce ze ŽB tř. C 16/20 | A | 1 | m ³ | 39,903 | 24 647,37 | 983 508,54 |
| Montáž izolace tepelné | A | 1 | m ² | 560,732 | 336,5 | 188 686,25 |
| Nájem bednění stropů DOKA SYSTEM | A | 1 | kpl | 1 | 2 655 998,71 | 2 655 998,71 |
| Ostatní - Stropy | A | 1 | kpl | 1 | 406 007,75 | 406 007,75 |
| F0320 Balkóny | | | | | | 920 332,99 |
| Balkony včetně zábradlí a dlažby | A | 1 | kpl | 1 | 920 332,99 | 920 332,99 |
| F0340 Schodiště | | | | | | 536 346,61 |
| Schodiště včetně zábradlí a dlažby | A | 1 | kpl | 1 | 536 346,61 | 536 346,61 |
| F0410 Střecha, kompletní skladba konstrukce včetně izolace | | | | | | 2 418 737,77 |
| Montáž vázaných krovů | A | 1 | kpl | 1 | 764 075,30 | 764 075,30 |
| Krov ze sbíjených vazníků | A | 1 | kpl | 1 | 898 396,42 | 898 396,42 |
| Montáž tepelné izolace | A | 1 | m ² | 879,902 | 542,75 | 477 566,54 |
| Ostatní - Střecha | A | 1 | kpl | 1 | 278 699,51 | 278 699,51 |
| F0420 Střešní okna, světlíky a průřezy | | | | | | 369 103,36 |
| Střešní okna Velux | A | 1 | kpl | 1 | 258 247,90 | 258 247,90 |
| Střešní světlíky, vikýře a výlezy | A | 1 | kpl | 1 | 110 855,46 | 110 855,46 |
| F0430 Krytina střechy | | | | | | 546 962,48 |
| Krytina povlaková | A | 1 | m ² | 985,38 | 493,23 | 486 019,93 |
| Ostatní - Krytina | A | 1 | kpl | 1 | 60 942,55 | 60 942,55 |
| F0440 Odvodnění střechy | | | | | | 243 598,61 |
| Odvodnění střechy | A | 1 | kpl | 1 | 243 598,61 | 243 598,61 |
| F0510 Povrchy vnitřních stěn - omítky, malby | | | | | | 2 628 768,25 |
| Vnitřní omítka včetně malby | A | 1 | m ² | 8 261,17 | 281 | 2 321 389,03 |
| Ostatní - Vnitřní omítky | A | 1 | kpl | 1 | 307 379,22 | 307 379,22 |
| F0520 Povrchy vnitřních stěn - obklady, izolace | | | | | | 908 995,25 |
| Montáž obkladů keramických | A | 1 | m ² | 858,287 | 700,95 | 601 616,03 |
| Ostatní - Obklady | A | 1 | kpl | 1 | 307 379,22 | 307 379,22 |
| F0530 Povrchy vnějších stěn - omítky, zateplení fasády | | | | | | 2 357 867,67 |
| Vnější omítka stěn | A | 1 | m ² | 2 010,33 | 373,29 | 750 443,18 |
| KZS stěn | A | 1 | m ² | 1 036,58 | 1 113,50 | 1 154 233,69 |
| Montáž a demontáž lešení | A | 1 | m ² | 1 886,84 | 173,42 | 327 217,00 |
| Ostatní - Fasáda | A | 1 | kpl | 1 | 125 973,81 | 125 973,81 |
| F 0540 Povrchy vnějších stěn - obklady | | | | | | 320 861,75 |
| Obklad venkovní k-konstrukce | A | 1 | kpl | 1 | 320 861,75 | 320 861,75 |
| F0560 Podhledy montované | | | | | | 429 704,60 |
| SDK podhled | A | 1 | m ² | 523,364 | 821,04 | 429 704,60 |

| F0610 Dveře vnitřní | | | | | | | 2 383 820,64 |
|---|---|---|----------------|----------|--------------|--------------|---------------------|
| Dveře včetně obložkové zárubně | A | 1 | kpl | 1 | 886 707,62 | 886 707,62 | |
| Dveře včetně ocelové zárubně | A | 1 | kpl | 1 | 636 315,38 | 636 315,38 | |
| Dveře protipožární vč. ocelové zárubně | A | 1 | kpl | 1 | 478 059,01 | 478 059,01 | |
| Dveře posuvné včetně pouzdra | A | 1 | kpl | 1 | 294 941,48 | 294 941,48 | |
| Ostatní - Dveře vnitřní | A | 1 | kpl | 1 | 87 797,16 | 87 797,16 | |
| F0620 Dveře vnější | | | | | | | 185 647,85 |
| Dveře vnější | A | 1 | kpl | 1 | 185 647,85 | 185 647,85 | |
| F0630 Vrata | | | | | | | 57 855,78 |
| Vrata garážová | A | 1 | kpl | 1 | 57 855,78 | 57 855,78 | |
| F0640 Okna, balkónové dveře | | | | | | | 2 241 495,45 |
| Montáž oken plastových | A | 1 | kpl | 1 | 1 325 032,06 | 1 325 032,06 | |
| Montáž balkonových dveří | A | 1 | kpl | 1 | 748 535,68 | 748 535,68 | |
| Ostatní - Okna a balkon. dveře | A | 1 | kpl | 1 | 167 927,70 | 167 927,70 | |
| F0710 Podlahy | | | | | | | 4 686 856,66 |
| Mazanina z betonu tř. C 16/20 | A | 1 | m ³ | 202,338 | 4 327,89 | 875 699,19 | |
| Vyrovnávací potěr samonivelační cementový | A | 1 | m ² | 1 747,55 | 426 | 744 456,54 | |
| Montáž izolace tepelné | A | 1 | m ² | 2 340,38 | 200 | 468 075,95 | |
| Montáž podlah keramických | A | 1 | m ² | 821,829 | 783,7 | 644 067,59 | |
| Montáž podlah plovoucích | A | 1 | m ² | 1 081,56 | 695,82 | 752 569,96 | |
| Montáž podlah povlakových | A | 1 | m ² | 962,743 | 452,5 | 435 641,42 | |
| Podlahy lité Nivelit | A | 1 | m ² | 1 488,36 | 262 | 389 949,59 | |
| Ostatní - Podlahy | A | 1 | kpl | 1 | 376 396,42 | 376 396,42 | |
| F0811 Vodovod vnitřní | A | 1 | kpl | 1 | 612 368,11 | 612 368,11 | |
| F0812 Kanalizace vnitřní | A | 1 | kpl | 1 | 427 480,53 | 427 480,53 | |
| F0813 Zařizovací předměty | A | 1 | kpl | 1 | 1 934 568,67 | 1 934 568,67 | |
| F0821 Rozvody ÚT | A | 1 | kpl | 1 | 1 860 297,05 | 1 860 297,05 | |
| F0830 Klimatizace, vzduchotechnika | A | 1 | kpl | 1 | 579 839,35 | 579 839,35 | |
| F0840 Instalace plynu | A | 1 | kpl | 1 | 134 732,92 | 134 732,92 | |
| F0851 Elektroinstalace | A | 1 | kpl | 1 | 2 141 470,00 | 2 141 470,00 | |
| F0852 Hromosvod | A | 1 | kpl | 1 | 106 562,20 | 106 562,20 | |
| F0862 Požární zabezpečení | A | 1 | kpl | 1 | 315 887,66 | 315 887,66 | |
| F0870 Výtahy, plošiny | A | 1 | kpl | 1 | 877 234,70 | 877 234,70 | |
| F0930 Okapové chodníky, předložené schody | A | 1 | kpl | 1 | 154 174,43 | 154 174,43 | |
| F0940 Vybavení kuchyní, vestavěné skříně | A | 1 | kpl | 1 | 1 199 890,37 | 1 199 890,37 | |
| F1010 Oplocení | A | 1 | kpl | 1 | 307 114,45 | 307 114,45 | |
| F1110 Kompletace | A | 1 | kpl | 1 | 954 360,70 | 954 360,70 | |
| F2040 Zařízení staveniště | A | 1 | kpl | 1 | 1 224 072,34 | 1 224 072,34 | |

Tab. 2. Statistické hodnocení

| Ukazatel | Hodnota | Jednotka |
|------------------------|---------------|----------|
| počet zkušebních kroků | 100 000 | počet |
| vstupní hodnota | 81 670 129,20 | CZK |
| průměrná hodnota | 81 681 206,27 | CZK |
| medián | 81 685 739,21 | CZK |
| směrodatná odchylka | 2 337 784,58 | CZK |
| minimum | 72 005 417,89 | CZK |
| maximum | 93 680 841,93 | CZK |
| rozsah hodnot | 21 675 424,04 | CZK |
| průměrná chyba | 7 392,72 | CZK |
| průměrná chyba | 0,01 | % |

Průměrná chyba podle statistického hodnocení je 0,01% s ohledem na zadané podmínky ocenění, při konstantních hodnotách množství. Grafické vyhodnocení průběhu pravděpodobnosti rozdělení jednotlivých hodnot modelu bytového domu je vidět na obr. 1.

Případová studie

Případová studie je provedena na náhodně vybraném čtyřpodlažním bytovém domu s výtahem a obytnou plochou 3 378 m². V prvním nadzemním podlaží jsou umístěna garážová stání pro devět osobních automobilů. Nosný systém bude tvořen cihelnými bloky Porotherm 30 P+D. Stropní konstrukce budou monolitické železobetonové tl. 200 mm. Založení stavby bude pod středními sloupky na pilotách v kombinaci se základovými pásy pro obvodové nosné zdivo. Střecha domu je plochá s vegetační úpravou. Obvodový plášť budovy bude zateplen minerální vatou ORSIL tl. 100 mm. Nové výplně otvorů budou dřevohliníkové. Fasáda bude s povrchovou úpravou z vápenocementové omítky v barvě přírodního odstínu. Vnitřní omítky jsou vápené štukové, obklady bělinové v koupelnách a WC do výšky 2,1 m, dlažby budou keramické. Další podlahy v obytných

místnostech budou laminátové nebo z dřevěných parket, opatřené u zdí dřevěnými podlahovými lištami.

Vstupní údaje pro ocenění vycházejí z projektové dokumentace pro výstavbu [6]. Cílem je otestovat využitím případové studie vypovídací schopnost navrženého cenového modelu. Ocenění je provedeno dvojím způsobem, jednak pomocí sestaveného položkového rozpočtu, jednak pomocí cenového modelu. Rozpočtová cena je sestavena oceněním jednotlivých stavebních prací a dodávek ve strukturování podle stavebních dílů. Jednotlivé položky a jejich výměry jsou stanoveny z projektové dokumentace, jednotkové ceny jsou ceny tržní z nabídky zhotovitele. Zvolený postup výpočtu ceny je podle současné stavební praxe.

Pokud není pro výpočet ceny v předinvestiční a v investiční fázi dostatek informací k sestavení rozpočtové ceny, lze využít navržený cenový model. Cena vypočtená s podporou cenového modelu zohledňuje jednotlivé funkční díly, které jsou důležité pro další výpočty nákladů životního cyklu stavebního díla. Rozpočtová cena v úrovni roku 2011 je 14 914 720 Kč bez DPH, cena modelová ve stejné cenové úrovni je 14 924 797 Kč bez DPH. Porovnáním rozpočtové ceny s cenou modelovou u této případové studie dochází k chybě +0,07 %.

Výsledky náhodně vybraných objektů bytových domů:

– objekt 1, OP 18 270 m³

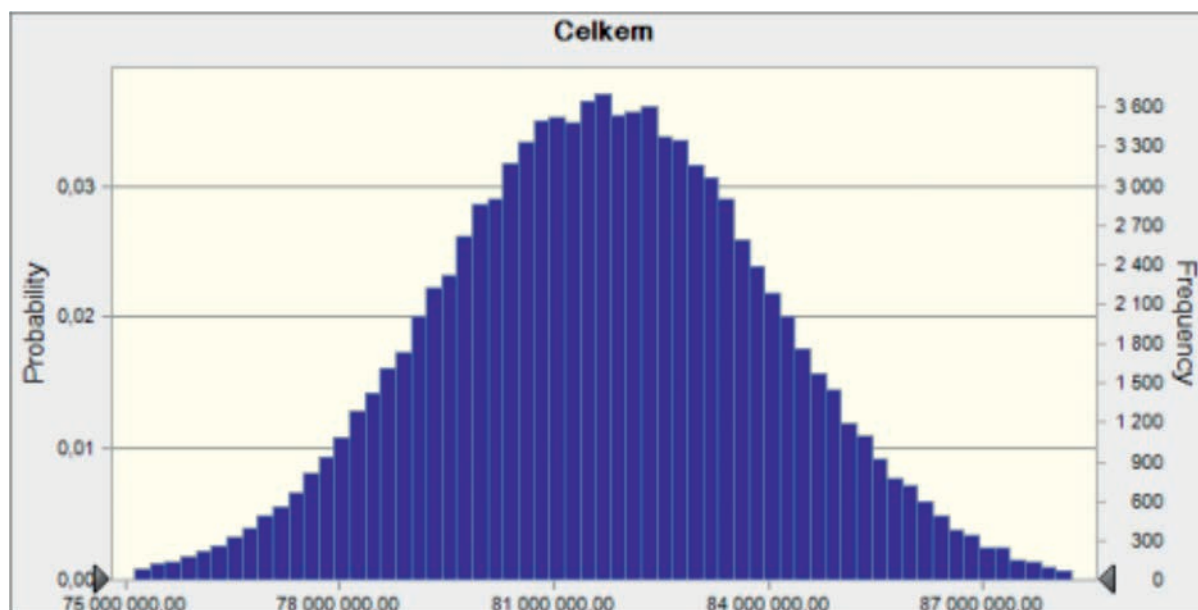
| | |
|-----------------|-----------------------|
| rozpočtová cena | 74 276 724 Kč bez DPH |
| modelová cena | 74 218 623 Kč bez DPH |
| rozdíl | -0,08 % |

– objekt 2, OP 10 070 m³

| | |
|-----------------|-----------------------|
| rozpočtová cena | 45 895 436 Kč bez DPH |
| modelová cena | 46 053 884 Kč bez DPH |
| rozdíl | +0,34 % |

– objekt 3, OP 8 113 m³

| | |
|-----------------|-----------------------|
| rozpočtová cena | 35 606 061 Kč bez DPH |
| modelová cena | 35 505 076 Kč bez DPH |
| rozdíl | +0,28 % |



Obr. 1. Statistické vyhodnocení

Tab. 3. Výpočet modelové ceny

3 378,00 Celkem 14 924 797,49

m3 OP

CZK

| Popis | A/N | i | MJ | Množství celkem | Cena jednotková | Cena celkem |
|---|-----|---|----------------|-----------------|-----------------|---------------------|
| F0110 Základy včetně výkopů | | | | | | 963 691,69 |
| Zemní práce | A | 1 | m ³ | 389,617 | 619,4 | 241 329,03 |
| Základová deska z betonu tř. C 16/20 | N | 1 | m ³ | 41,009 | 5 155,33 | 0 |
| Základové pásy z betonu tř. C 16/20 | A | 1 | m ³ | 68,106 | 4 806,43 | 327 345,26 |
| Základové patky ze ŽB tř. C 25/30 | N | 1 | m ³ | 18,795 | 5 422,50 | 0 |
| Piloty | N | 1 | kpl | 1 | 600 486,54 | 0 |
| Štětové stěny | N | 1 | m ² | 277,76 | 6 210,00 | 0 |
| Trubkové mikropiloty | A | 1 | m | 167,38 | 2 360,00 | 395 017,40 |
| Ostatní - Základy a zemní práce | N | 1 | kpl | 1 | 113 845,45 | 0 |
| F0120 Hydroizolace spodní stavby | | | | | | 179 999,36 |
| Provedení hydroizolace asf. pásy | A | 1 | m ² | 620,687 | 290 | 179 999,36 |
| Ostatní - Hydroizolace | N | 1 | kpl | 1 | 12 345,00 | 0 |
| F0210 Svislé nosné a obvodové zděné konstrukce | | | | | | 953 347,39 |
| Zdivo nosné tl 240 mm POROTHERM | N | 1 | m ² | 143,896 | 1 018,55 | 0 |
| Zdivo nosné tl 250 mm POROTHERM | N | 1 | m ² | 222,583 | 1 539,00 | 0 |
| Zdivo nosné tl 300 mm POROTHERM | A | 1 | m ² | 299,442 | 1 436,11 | 430 032,26 |
| Zdivo nosné tl 365 mm POROTHERM | N | 1 | m ² | 320,028 | 1 564,00 | 0 |
| Zdivo nosné tl 400 mm POROTHERM | N | 1 | m ² | 169,369 | 1 720,00 | 0 |
| Zdivo nosné tl 440 mm POROTHERM | N | 1 | m ² | 417,956 | 1 860,00 | 0 |
| Zdivo nosné tl 250 mm Ytong | N | 1 | m ² | 46,082 | 962 | 0 |
| Zdivo nosné tl 300 mm Ytong | N | 1 | m ³ | 70,41 | 3 690,00 | 0 |
| Zdivo nosné tl 375 mm Ytong | N | 1 | m ³ | 299,753 | 3 730,00 | 0 |
| Nosná zeď ze ŽB tř. C 25/30 | N | 1 | m ³ | 40,772 | 10 975,56 | 0 |
| Sloupy nebo pilíře ze ŽB tř. C 25/30 | A | 1 | m ³ | 6,641 | 16 022,22 | 106 401,91 |
| Překlad ze ŽB tř. 25/30 | A | 1 | m ³ | 7,649 | 13 050,00 | 99 823,69 |
| Montáž ŽB pref. překladů | A | 1 | kpl | 1 | 74 449,09 | 74 449,09 |
| Překlad POROTHERM 11,5 cm | A | 1 | kus | 37,352 | 245,9 | 9 184,95 |
| Překlad POROTHERM 14,5 cm | A | 1 | kus | 83,927 | 290,67 | 24 394,92 |
| Překlad POROTHERM 23,8 cm | A | 1 | kus | 175,339 | 578,71 | 101 469,76 |
| Překlad POROTHERM RONO 36,5 | A | 1 | kus | 17,298 | 6 220,00 | 107 590,82 |
| Ostatní - Zdivo | N | 1 | kpl | 1 | 165 829,96 | 0 |
| F0220 Příčky a dělicí stěny | | | | | | 338 260,58 |
| Příčky tl 65 mm POROTHERM | A | 1 | m ² | 280,695 | 440 | 123 505,86 |
| Příčky tl 75 mm Ytong | N | 1 | m ² | 212,191 | 408 | 0 |
| Příčky tl 100 mm Ytong | N | 1 | m ² | 234,841 | 517,33 | 0 |
| Příčky tl 115 mm POROTHERM | A | 1 | m ² | 349,804 | 613,93 | 214 754,72 |
| Příčky tl 150 mm Ytong | N | 1 | m ² | 39,253 | 663,71 | 0 |
| Ostatní - Příčky | N | 1 | kpl | 1 | 61 388,88 | 0 |
| F0230 Komíny | | | | | | 69 836,03 |
| Komínové těleso | A | 1 | kpl | 1 | 69 836,03 | 69 836,03 |
| F0310 Stropní konstrukce | | | | | | 2 651 152,63 |
| Strop POROTHERM tl 19 cm vložky MIAKO | N | 1 | m ² | 575,438 | 1 470,00 | 0 |
| Montáž stropních panelů FILIGRAN | N | 1 | m ² | 1 068,94 | 1 029,67 | 0 |
| Montáž pref. ŽB stropu SPIROLL | N | 1 | m | 616,679 | 1 562,50 | 0 |
| Stropy deskové ze ŽB tř. C 16/20 | A | 1 | m ³ | 157,591 | 7 993,33 | 1 259 673,73 |
| Nosníky ze ŽB tř. C 25/30 | A | 1 | m ³ | 9,34 | 15 863,64 | 148 171,76 |
| Ztužující pásy a věnce ze ŽB tř. C 16/20 | A | 1 | m ³ | 12,96 | 24 647,37 | 319 420,43 |
| Montáž izolace tepelné | A | 1 | m ² | 182,112 | 336,5 | 61 280,85 |
| Nájem bednění stropů DOKA SYSTEM | A | 1 | kpl | 1 | 862 605,87 | 862 605,87 |
| Ostatní - Stropy | N | 1 | kpl | 1 | 131 861,76 | 0 |
| F0320 Balkóny | | | | | | 298 902,49 |
| Balkony včetně zábradlí a dlažby | A | 1 | kpl | 1 | 298 902,49 | 298 902,49 |
| F0340 Schodiště | | | | | | 174 192,76 |
| Schodiště včetně zábradlí a dlažby | A | 1 | kpl | 1 | 174 192,76 | 174 192,76 |
| F0410 Střecha, kompletní skladba konstrukce včetně izolace | | | | | | 245 617,42 |
| Montáž vázaných krovů | N | 1 | kpl | 1 | 248 153,67 | 0 |
| Krov ze sbíjených vazníků | N | 1 | kpl | 1 | 291 778,01 | 0 |
| Montáž tepelné izolace | A | 1 | m ² | 285,771 | 542,75 | 155 102,37 |
| Ostatní - Střecha | A | 1 | kpl | 1 | 90 515,04 | 90 515,04 |

| | | | | | | | |
|---|---|---|----------------|----------|------------|------------|---------------------|
| F0420 Střešní okna, světlíky a průřezy | | | | | | | 36 003,24 |
| Střešní okna Velux | N | 1 | kpl | 1 | 83 872,84 | 0 | |
| Střešní světlíky, vikýře a výlezy | A | 1 | kpl | 1 | 36 003,24 | 36 003,24 | |
| F0430 Krytina střechy | | | | | | | 157 847,83 |
| Krytina povlaková | A | 1 | m ² | 320,03 | 493,23 | 157 847,83 | |
| Ostatní - Krytina | N | 1 | kpl | 1 | 19 792,70 | 0 | |
| F0440 Odvodnění střechy | | | | | | | 79 115,09 |
| Odvodnění střechy | A | 1 | kpl | 1 | 79 115,09 | 79 115,09 | |
| F0510 Povrchy vnitřních stěn - omítky, malby | | | | | | | 853 762,06 |
| Vnitřní omítka včetně malby | A | 1 | m ² | 2 683,03 | 281 | 753 932,52 | |
| Ostatní - Vnitřní omítky | A | 1 | kpl | 1 | 99 829,54 | 99 829,54 | |
| F0520 Povrchy vnitřních stěn - obklady, izolace | | | | | | | 295 220,26 |
| Montáž obkladů keramických | A | 1 | m ² | 278,751 | 700,95 | 195 390,73 | |
| Ostatní - Obklady | A | 1 | kpl | 1 | 99 829,54 | 99 829,54 | |
| F0530 Povrchy vnějších stěn - omítky, zateplení fasády | | | | | | | 765 779,93 |
| Vnější omítka stěn | A | 1 | m ² | 652,907 | 373,29 | 243 726,28 | |
| KZS stěn | A | 1 | m ² | 336,657 | 1 113,50 | 374 867,93 | |
| Montáž a demontáž lešení | A | 1 | m ² | 612,8 | 173,42 | 106 272,38 | |
| Ostatní - Fasáda | A | 1 | kpl | 1 | 40 913,33 | 40 913,33 | |
| F 0540 Povrchy vnějších stěn - obklady | | | | | | | 104 208,34 |
| Obklad venkovní k-ce | A | 1 | kpl | 1 | 104 208,34 | 104 208,34 | |
| F0560 Podhledy montované | | | | | | | 0 |
| SDK podhled | N | 1 | m ² | 169,976 | 821,04 | 0 | |
| F0610 Dveře vnitřní | | | | | | | 774 208,84 |
| Dveře včetně obložkové zárubně | A | 1 | kpl | 1 | 287 981,76 | 287 981,76 | |
| Dveře včetně ocelové zárubně | A | 1 | kpl | 1 | 206 660,26 | 206 660,26 | |
| Dveře protipožární vč. oc. zárubně | A | 1 | kpl | 1 | 155 262,31 | 155 262,31 | |
| Dveře posuvné včetně pouzdra | A | 1 | kpl | 1 | 95 790,05 | 95 790,05 | |
| Ostatní - Dveře vnitřní | A | 1 | kpl | 1 | 28 514,45 | 28 514,45 | |
| F0620 Dveře vnější | | | | | | | 60 294,05 |
| Dveře vnější | A | 1 | kpl | 1 | 60 294,05 | 60 294,05 | |
| F0630 Vrata | | | | | | | 18 790,20 |
| Vrata garážová | A | 1 | kpl | 1 | 18 790,20 | 18 790,20 | |
| F0640 Okna, balkonové dveře | | | | | | | 673 446,00 |
| Montáž oken plastových | A | 1 | kpl | 1 | 430 339,23 | 430 339,23 | |
| Montáž balkonových dveří | A | 1 | kpl | 1 | 243 106,77 | 243 106,77 | |
| Ostatní - Okna a balkon. dveře | N | 1 | kpl | 1 | 54 538,97 | 0 | |
| F0710 Podlahy | | | | | | | 1 163 965,42 |
| Mazanina z betonu tř. C 16/20 | A | 1 | m ³ | 65,715 | 4 327,89 | 284 406,49 | |
| Vyrovnávací potěr samonivelační anhydritový | A | 1 | m ² | 567,563 | 482,67 | 273 943,88 | |
| Montáž izolace tepelné | A | 1 | m ² | 760,1 | 200 | 152 020,05 | |
| Montáž podlah keramických | A | 1 | m ² | 266,911 | 783,7 | 209 177,99 | |
| Montáž podlah plovoucích | A | 1 | m ² | 351,266 | 695,82 | 244 417,01 | |
| Montáž podlah povlakových | N | 1 | m ² | 312,676 | 452,5 | 0 | |
| Podlahy lité Nivelit | N | 1 | m ² | 483,383 | 262 | 0 | |
| Ostatní - Podlahy | N | 1 | kpl | 1 | 122 244,70 | 0 | |
| F0811 Vodovod vnitřní | A | 1 | kpl | 1 | 198 882,75 | 198 882,75 | |
| F0812 Kanalizace vnitřní | A | 1 | kpl | 1 | 138 835,62 | 138 835,62 | |
| F0813 Zařizovací předměty | A | 1 | kpl | 1 | 628 302,37 | 628 302,37 | |
| F0821 Rozvody ÚT | A | 1 | kpl | 1 | 604 180,70 | 604 180,70 | |
| F0830 Klimatizace, vzduchotechnika | A | 1 | kpl | 1 | 188 318,17 | 188 318,17 | |
| F0840 Instalace plynu | A | 1 | kpl | 1 | 43 758,08 | 43 758,08 | |
| F0851 Elektroinstalace | A | 1 | kpl | 1 | 695 499,05 | 695 499,05 | |
| F0852 Hromosvod | A | 1 | kpl | 1 | 34 608,89 | 34 608,89 | |
| F0862 Požární zabezpečení | A | 1 | kpl | 1 | 102 592,88 | 102 592,88 | |
| F0870 Výtahy, plošiny | A | 1 | kpl | 1 | 284 905,18 | 284 905,18 | |
| F0930 Okapové chodníky, předložené schody | A | 1 | kpl | 1 | 50 072,23 | 50 072,23 | |
| F0940 Vybavení kuchyní, vestavěné skříně | A | 1 | kpl | 1 | 389 696,15 | 389 696,15 | |
| F1010 Oplocení | N | 1 | kpl | 1 | 99 743,54 | 0 | |
| F1110 Kompletace | A | 1 | kpl | 1 | 309 953,89 | 309 953,89 | |
| F2040 Zařízení staveniště | A | 1 | kpl | 1 | 397 549,89 | 397 549,89 | |

Závěr

Navržený cenový model je nástrojem, který lze využít pro výpočet pořizovací ceny bytového domu v předinvestiční a investiční etapě životního cyklu. Model lze uplatnit pro bytové domy, které splňují stavebně technické parametry, pro které byl sestaven. Jeho uplatnění je významné zejména v případech, že není k dispozici podrobnější dokumentace. Cenový model umožní simulovat pořizovací cenu s ohledem na představy investora pomocí funkčních dílů podle jejich stavebně technických parametrů a materiálové charakteristiky. Jeho strukturování ve funkčních dílech umožňuje získané hodnoty použít pro výpočet nákladů životního cyklu s ohledem na jejich životnost, nákladů na provoz z hlediska cyklu oprav, a následně efektivnost investice. Aktuálnost cenového modelu z hlediska jeho struktury závisí na dalším vývoji materiálů a technologií používaných ve výstavbě [7]. Výhodou modelu je, že pracuje v programu Office Excell, který je pro uživatele snadno dostupný.

Literatura

- [1] Marková, L. a kol.: Náklady životního cyklu stavby. Brno, CERM 2011.
- [2] Marková, L. – Galatíková, M.: Simulation of the purchase price range of construction work. [Proceedings], In: People, Buildings and Environment. Brno, CERM 2010, pp. 195-199. ISBN 978-80-7204-705-5
- [3] Marková, L. – Korytářová, J. – Nový, M.: Výpočet nákladů životního cyklu. [Proceedings], In: People, buildings and environment. Brno, CERM 2009, pp. 240-243. ISBN 978-80-7204-660-7
- [4] Marková, L.: Ceny ve stavebnictví II. Brno, VUT FAST 2007.
- [5] MS Office Crystal Ball, www.oracle.com
- [6] Projektová dokumentace pro stavební povolení – DSP bytových domů
- [7] Hromádka, V. – Kindermann, T. – Korytářová, J.: Vývoj nákladů při realizaci stavebního díla. Stavební obzor, **20**, 2011, č. 3, s. 92-96. ISSN 1805-2576 (Online)