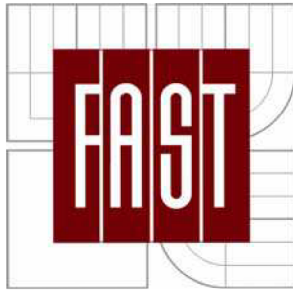




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ  
ÚSTAV POZEMNÍHO STAVITELSTVÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING DEPARTMENT

OPTIMALIZACE KONSTRUKČNÍCH DETAILŮ  
JEDNOPLÁŠŤOVÝCH PLOCHÝCH STŘECH  
THE OPTIMIZATION OF STRUCTURAL DETAILS FOR FLAT SINGLE-LEAF ROOFS

TEZE DISERTAČNÍ PRÁCE  
SHORT VERSION OF DISSERTATION

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Ing. Libor Matějka, DiS.

ŠKOLITEL  
SUPERVISOR

doc. Ing. Libor Matějka, Ph.D., CSc., MBA

BRNO 2014

## **Klíčová slova**

Optimalizace; plochá jednoplášťová střecha; konstrukční detail; tepelný most; metody multikriteriální analýzy.

## **Kay words**

Optimization; flat single-leaf roof; structural details; thermal bridge; multi-criteria decision analysis methods.

SHORT VERSION OF DISSERTATION

Rukopis disertační práce je uložen na Ústavu pozemního stavitelství, Fakultě stavební, VUT v Brně.

© Ing. Libor Matějka, DiS., 2014

## OBSAH

ÚVOD .....	2
1 PŘEHLED O SOUČASNÉ PROBLEMATICE.....	3
1.1 Současné nízkoenergetické a pasivní budovy s plochou střechou.....	3
1.2 Problematika eliminace tepelných mostů stavebních objektů .....	3
1.2.1 Konstrukční detaily atiky plochých jednoplášťových střech .....	4
1.2.2 Konstrukční detail ukončení ploché jednoplášťové střechy u okapu .	5
1.2.3 Konstrukční detail průniku vertikální konstrukce střešním pláštěm ..	6
1.2.4 Tepelně technické modelování a analýza konstrukčních detailů .....	6
1.3 Teorie multikriteriální analýzy.....	6
2 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE .....	7
3 ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ .....	8
3.1 Analýza tepelně technických modelů (MKP a simulace).....	8
3.2 Technické veličiny a normativní podklady.....	8
3.3 Multikriteriální analýza a aplikované vyhodnocovací metody .....	9
3.3.1 Metoda váženého součtu (WSA) .....	9
3.3.2 Metoda TOPSIS .....	9
3.3.3 Metoda shody a neshody (CDA) .....	9
3.3.4 Matematické metody určování kvantitativních multiplikátorů .....	9
3.3.5 Metoda analýzy datových obalů (DEA) .....	11
3.4 Experimentální měřicí metody .....	11
3.4.1 Laboratorní stanovení nasákavosti kompozitního materiálu .....	11
3.4.2 Tepelně technické měření na reálném objektu .....	13
4 VÝSLEDKY PRÁCE A NOVÉ POZNATKY .....	13
4.1 Charakteristika, členění a značení konstrukčních detailů .....	13
4.2 Tepelně technická analýza užitím výpočetních modelů .....	16
4.2.1 Konstrukční detail A - atika.....	16
4.2.2 Konstrukční detail B - ukončení ploché střechy okapem.....	21
4.2.3 Konstrukční detail C - průnik železobetonové konstrukce střešním pláštěm .....	22
4.3 Výběr optimálních variant multikriteriální analýzou.....	22
4.3.1 Návrh optimalizačního algoritmu .....	22
4.3.2 Sestavení hodnotících kritérií a stanovení vektoru vah $v$ .....	24
4.3.3 Konstrukční detail A - atika.....	26
4.3.4 Konstrukční detail B - ukončení ploché střechy okapem.....	29
4.3.5 Konstrukční detail C - průnik nosné konstrukce střešním pláštěm ..	29
4.3.6 Komparace užitých tepelně izolačních materiálů.....	30
5 ZÁVĚR PRO PRAXI A DALŠÍ ROZVOJ VĚDY .....	32
6 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....	35
7 SEZNAM VLASTNÍ LITERATURY .....	36
8 ABSTRACT.....	38

## ÚVOD

V dnešním světě je otázka využívání recyklovaných materiálů nejen v odvětví stavebnictví aktuálním tématem. Aplikací těchto materiálů v nízkoenergetické a pasivní výstavbě lze dosáhnout ještě většího zefektivnění v oblasti trvale udržitelného rozvoje. Současně je tak řešen i jeden z problémů rizika životního prostředí. Jedná se o environmentální dopady, které zahrnují především energetickou zátěž a emise. Na naší planetě je omezené množství využívaných zdrojů a pouze určitý potenciál pro jejich regeneraci. Proto je nutné zajistit, aby míra čerpání těchto zdrojů nepřesahovala míru jejich vytváření. Zvyšující se průmyslová výroba vede ke zvýšení potřeby surovin. Recyklace je přitom jedna z možných cest k řešení problému nedostatku surovin. Existuje několik možných hodnotitelských přístupů k posuzování ekologické výstavby a tedy i ve využívání recyklovaných materiálů. Příkladem je Posuzování životního cyklu (LCA). Je však vhodné zabývat se komplexní optimalizací konstrukčních detailů s užitím všech důležitých faktorů již při vlastním konstrukčním návrhu. Tyto faktory jsou často protichůdné a nezastávají zpravidla pouze environmentální hledisko.

Také problematika konstrukčních detailů z oboru plochých jednoplášťových střech je aktuálním tématem. Podle výzkumu agentury STEM/MARK, jenž byl zadán firmou DEKTRADE a. s. v roce 2012 a uveřejněn v časopise DEKTIME 01/2012, žije v České republice v objektech s plochou střechou 39 % respondentů. Je velmi pravděpodobné, že se toto číslo bude navyšovat s dalším průběhem rozvoje nízkoenergetické a pasivní výstavby.

V této práci je řešena tepelně technická optimalizace konstrukčních detailů plochých jednoplášťových střech u nízkoenergetických a pasivních objektů. Pomocí modelů multikriteriální analýzy a tepelně technických výpočtových modelů je hledána nejen optimální varianta stavebně konstrukčního návrhu, ale i možnost aplikace vhodného stavebního tepelně izolačního materiálu, mezi jehož případné varianty se kromě tradičních materiálů řadí i moderní kompozitní materiál<sup>1</sup> na bázi druhotných surovin, který je nyní ve stádiu vývoje pro zdokonalování svých vlastností. Z výše uvedených stručných informací z oblasti druhotných surovin a trvale udržitelné výstavby lze předběžně usuzovat na efektivní užití tohoto konstrukčního prvku na bázi odpadních polymerů a skla. Pro přispění k jeho vývoji jsou navrženy varianty konstrukčních detailů s užitím tohoto materiálu analyzovány a jsou také hodnoceny některé jeho již laboratorně zjištěné materiálově fyzikální parametry. Celkově by tato práce měla být přispěním nejen v oboru navrhování nízkoenergetických a pasivních budov, ale také v environmentální oblasti stavebního odvětví průmyslu.

---

<sup>1</sup> MATĚJKA, L.; PĚNČÍK, J.; VUT v Brně: *Tepelně izolační kompozitní plast*. 20388, užitný vzor. Praha (2009)



# 1 PŘEHLED O SOUČASNÉ PROBLEMATICE

Soudobé trendy návrhu konstrukčních detailů kladou důležitost v převážné většině na tepelně technické parametry. Jejich optimalizace je realizována pomocí jasně stanovených postupů, které jsou uvedeny v platných technických normách. Komplexní posouzení přínosu konstrukčního návrhu však závisí na jeho autorovi.

## 1.1 Současné nízkoenergetické a pasivní budovy s plochou střechou

Energetická náročnost budov je v dnešní době jedním z nejvýraznějších hledisek při navrhování nových, nebo při rekonstrukci stávajících staveb. Podněcuje k tomu neustálé zdražování energií a rostoucí uvědomělost společnosti v environmentální oblasti. Tento trend se odráží na vývoji technických norem. Kritéria, která je nutné splnit, jsou neustále přísnější. Nabízí se tak prostor k hledání mnohem sofistikovanějších konstrukčních řešení jednotlivých stavebních detailů a užití moderních termoizolačních materiálů.

V případě nízkoenergetických a pasivních objektů dominují návrhy konstrukcí plochých jednoplášťových střech, které umožňují svou tvarovou proporcí dosáhnout nízkoenergetické koncepce objektů. Vzhledem k tomu, že se zároveň jedná o ekonomicky nejméně náročnou konstrukci z oblasti plochých střech, navrhuje se a realizuje jako jejich nejčastější varianta. Příznivě ovlivňují faktor tvaru objektu a přispívají tak pozitivně k jeho geometrické charakteristice. Kromě jejich nízké energetické zátěži a ekonomické výhodnosti nabízejí další přednosti v podobě tvorby provozních ploch (teras) a ploch s vegetačním souvrstvím. Skladba střešního pláště je diferencována podle funkčních, konstrukčních a technologických předpokladů, které musí optimálně splňovat. Z hlediska tepelné techniky je nejdůležitější tepelně izolační vrstva a její návaznost na tepelně izolační vrstvu vertikální obvodové konstrukce a obecně na konstrukce, které na střešní plášť navazují. Úspora energie a ochrana tepla je jedním z hlavních požadavků normy (ČSN 73 1901 Navrhování střech - Základní ustanovení) na střešní konstrukce, dalším z nich je využití přírodních zdrojů umožňující udržitelný rozvoj.

## 1.2 Problematika eliminace tepelných mostů stavebních objektů

Jednou z rozsáhlých problematik ve sféře nízkoenergetických a pasivních budov je návrh a provádění konstrukčních detailů se snahou eliminovat tepelné toky z interiéru do exteriéru v zimním období. Konstrukční detail je obecně základním pojítkem mezi architektonickým a konstrukčním řešením. Měl by respektovat statická, architektonická a také tepelně technická hlediska, aby splňoval všechny předpoklady pro svou funkčnost. V současnosti je nedílnou

součástí komplexního řešení většiny stavebních objektů a především těch, které se řadí do kategorie pasivní a nízkoenergetické výstavby.

„Tepelný most, část dané stavební konstrukce, kde se její tepelný odpor místně významně mění: úplným nebo částečným průnikem stavební konstrukce nebo vrstvy materiálu s odlišnou tepelnou vodivostí, nebo stavební konstrukce obsahuje alespoň jednu nestejnorodou vrstvu, změnou tloušťek vrstev stavební konstrukce; rozdílem mezi vnitřními a vnějšími plochami stavební konstrukce, např. výztužným žebrem. Tepelná vazba je rozhraní mezi dvěma a více konstrukcemi, kde tepelný tok v konstrukcích je významně změněn jejich vzájemným působením.”<sup>2</sup>

Posuzování tepelných mostů a vazeb se provádí podle aktuálně platných technických norem ČSN 730540, část 1 - 4, které vymezují národní požadavky na stavební konstrukce a z toho vyplývající vliv tepelných mostů. Další existující technické normy pro tuto problematiku se pak zabývají výpočtovými metodami. Jsou jimi především: ČSN EN ISO 14683 (730561) Tepelné mosty ve stavebních konstrukcích - Lineární činitel prostupu tepla - Zjednodušené výpočty a orientační hodnoty, ČSN EN ISO 10211 Tepelné mosty ve stavebních konstrukcích – Tepelné toky a povrchové teploty – Podrobné výpočty, ČSN EN ISO 6946 (730558) Stavební prvky a stavební konstrukce – Tepelný odpor a součinitel prostupu tepla – Výpočtová metoda, ČSN EN ISO 13790 (730317) Energetická náročnost budov – Výpočet spotřeby energie na vytápění a chlazení a další.

### 1.2.1 Konstrukční detaily atiky plochých jednoplášťových střech

Atika je konstrukcí vystupující nad rovinu střešního pláště. Význam má při ochraně před zatékáním srážkové vody na fasádu objektu a dále je výrazným architektonickým doplňkem. Podstatou funkčnosti tohoto stavebního detailu je dosažení celistvosti tepelně izolační obálky. „Konstrukční řešení ploché střechy musí zajistit co nejlepší návaznost její tepelné izolace na tepelnou izolaci obvodové stěny, souběžně se zajištěním samostatného dilatování atiky.”<sup>3</sup> U těžkých konstrukcí se zděnou atikou z keramických tvarovek, jejichž tepelná vodivost není ve všech osových směrech stejná, je toto častým problémem. Výsledek správnosti provedení zateplení celé střechy závisí na kvalitě konstrukčních detailů s omezením vlivu tepelných mostů. Nejsou-li náležitě splněny tyto požadavky, tepelně izolační funkce plochých střech se zhoršují a dochází ke zvýšení tepelných ztrát a k případným vadám a poruchám.

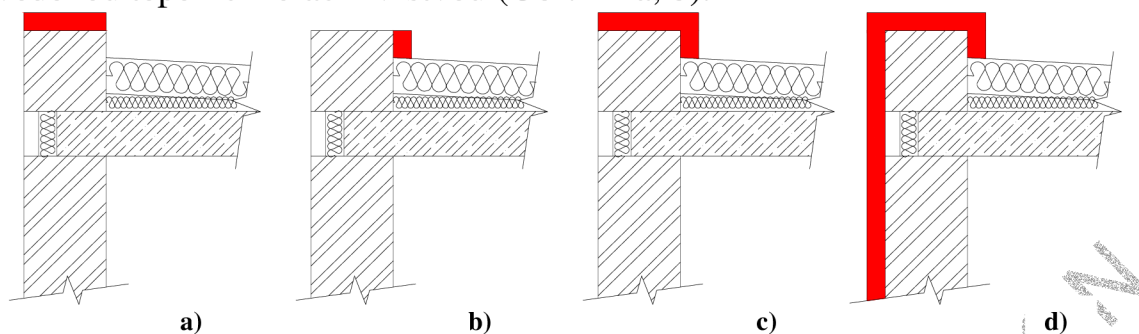
V současnosti je řešen tepelný most této konstrukce použitím tradičně dostupných tepelně izolačních materiálů (Obr. 1 - c, d), jako jsou expandovaný polystyren, výjimečně extrudovaný polystyren a pěnové sklo. Pro kvalitní projekt

---

<sup>2</sup> KEIM, L. *Cihlářský lexikon - kap. 13. Tepelná ochrana budov*. Cihlářský svaz Čech a Moravy, 2007. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.cscm.cz/lexikon/kap13.pdf>>.

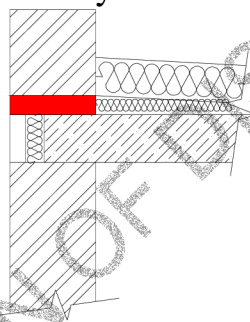
<sup>3</sup> ČSN 73 0540-2 *Tepelná ochrana budov – Část 2: Požadavky*. Praha: Český normalizační institut 2011. 44 s.

zateplení střešní konstrukce je zcela zásadní správný výběr tepelné izolace, podle účelu střechy a typu konstrukce. Někdy je možné setkat se v praxi s nedokonalě provedenou tepelně izolační vrstvou (Obr. 1 - a, b).



**Obr. 1** Nejčastější varianty řešení eliminace tepelného mostu konstrukce střešní atiky tepelnou izolací (a, b, c, d)

Alternativa aplikace pěnového skla není příliš častá. Takové řešení je vhodné při konstrukci tzv. kompaktní ploché střechy, kde tento materiál tvoří i plošné tepelně izolační pole jednoplášťové střechy.



**Obr. 2** Alternativní řešení eliminace tepelného mostu s využitím pěnového skla

Užití tepelně izolačního materiálu podle Obr. 2 lze realizovat také použitím keramické dutinové tvarovky uvnitř vysypané expandovaným perlitem, popřípadě sypkým pěnovým polystyrenem. Dalším vhodným materiálem pro takový typ konstrukce je již v úvodu zmiňovaný kompozitní materiál, který bude součástí výzkumu, aby se prokázaly jeho aplikační možnosti v porovnání mezi ostatními materiály a konstrukčními variantami.

### 1.2.2 Konstrukční detail ukončení ploché jednoplášťové střechy u okapu

Pro pasivní budovy a budovy s nízkou energetickou náročností je konstrukční detail styku střešního a obvodového pláště bez převislých konstrukcí problematickým místem stavebního objektu. Pro dosažení kompaktnějšího tvaru vzhledem k tepelně technickým vlastnostem budovy se řadí ukončení střechy bez atiky mezi nejvhodnější řešení. Problematickou pasáží je však kotvení klempířských prvků. Jedná se tedy o komplikovaný technický detail, v kterém je nutné řešit protichůdné požadavky na statickou únosnost konstrukce a zároveň minimalizaci tepelného mostu při přechodu obvodového pláště na střešní.

V dnešní době existuje několik variant konstrukčních řešení, případně jejich kombinace (užití dřevěných prvků, ocelových rámu apod.). Tato řešení však nejsou definitivní možností z hlediska času. Se vznikem nových materiálů, které nabízejí při své aplikaci určité vhodné vlastnosti, se mohou zároveň rozvíjet moderní konstrukční řešení. I zde by mohl nalézt uplatnění moderní kompozitní materiál ve formě tepelné izolace s dobrými mechanickými vlastnostmi.

### **1.2.3 Konstrukční detail průniku vertikální konstrukce střešním pláštěm**

S moderní architekturou přichází celá řada komplikovaných konstrukčních detailů, které je nutné optimálně tepelně technicky vyřešit. Dalším takovým vytypovaným stavebním detailem v oblasti plochých střech je průnik těžké vertikální nosné konstrukce střešním pláštěm. S vertikálními konstrukcemi procházejícími horizontální nosnou vrstvou střešního pláště, případně na ni navazující se lze setkat např. u zděných či monolitických objektů kaskádových domů s terasami, kde zmíněné konstrukce tvoří dělicí prvky teras nebo nosnou konstrukci zastřešení jejich částí. Dalším druhem staveb, kde se nabízí taková řešení, jsou objekty s železobetonovými skelety. Nutnost realizace a požadavky na projekci takových konstrukcí z požárně bezpečnostního hlediska kladou také normy ČSN 730802 a ČSN 730804, jež se touto problematikou zabývají.

Standardním tepelně technickým opatřením je vybavit vertikální konstrukci tepelně izolační vrstvou po celé její vnější ploše. Na kolik je popsané řešení optimální a zda-li lze dosáhnout stejné efektivity i s jinou variantou konstrukčního řešení za použití kompozitního materiálu, je také součástí zkoumání v této práci.

### **1.2.4 Tepelně technické modelování a analýza konstrukčních detailů**

Pro optimalizaci konstrukčních detailů je nezbytné získat jejich potřebné technické parametry. K jejich stanovení slouží celá řada matematických výpočtových metod. Jednou z nejpoužívanějších je metoda konečných prvků, která je implementována ve většině výpočetních programech pracujících s matematicko-fyzikálními modely se simulací rozložení teplotního pole. Takto lze získat základní fyzikální parametry, od nichž lze následně odvodit všechny tepelné technické veličiny. Tyto veličiny, které jsou při současných tepelně technických analýzách vyhodnocovány a následně komparovány, vychází z definic uvedených v platných technických normách.

## **1.3 Teorie multikriteriální analýzy**

S aplikací moderní metody multikriteriální analýzy je možné se setkat napříč spektrem všech technických oborů. Slouží k vyhodnocení různých variant řešení daného problému, výběru efektivního a tedy optimalizovaného řešení. Také nabízí srovnání mezi jednotlivými navrženými alternativami v širokém spektru hledisek. Mohou tak snadno posloužit k zhodnocení nových zaváděných technických prvků, materiálů a konstrukčních řešení.

V současnosti není příliš využíván žádný podobný dostupný nástroj pro zhodnocení a výběr optimálního konstrukčního řešení pro komplexní skupinu hledisek se stanovením jejich individuální důležitosti. Obecný algoritmus vhodného nástroje, vícekriteriálního analytického hodnocení, je uveden na Obr. 3. Pro jeho aplikaci při optimalizaci konstrukčních detailů ve stavebnictví je nutné jej modifikovat, detailněji charakterizovat a více konkretizovat.



**Obr. 3** Obecný postup vícekriteriálního hodnocení variant<sup>4</sup>

Vybrané metody (viz kap. 3.3), které náleží vícekriteriálnímu rozhodování, lze využít jak k optimalizaci konstrukčního řešení, tak i k výběru vhodného stavebního materiálu. Právě v případě volby stavebního materiálu byl obdobný optimalizační proces užitím jedné ze základních multikriteriálních metod prezentován.<sup>5</sup> Nebyl však dále vhodně modifikován od prostého užití jedné metody (sledoval pouze princip maximalizace užitku) a obsahoval některé nepřesnosti (ověření podmínky pro stanovení vah kritérií).

## 2 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Hlavní cíle:

- Posouzení tepelně izolačního bloku v konstrukčních detailech ploché jednoplášťové střechy za účelem eliminace tepelného mostu.
- Optimalizace konstrukčních detailů atikové konstrukce, ukončení ploché střechy u okapu a průniku vertikální nosné konstrukce konstrukcí ploché jednoplášťové střechy metodou konečných prvků.
- Tepelně technická analýza reálného měření na reálném objektu pro ověření platnosti výpočtového modelu.
- Návrh optimalizačního algoritmu hodnocení konstrukčních detailů při aplikaci multikriteriálních hodnotících metod a jeho ověření.
- Vyhodnocení optimálních variant konstrukčních detailů užitím metod multikriteriálních analýz a multikriteriálního rozhodování s důrazem na optimalizaci parametrů při aplikaci termoizolačního bloku z kompozitního materiálu na bázi druhotných surovin - zhodnocení významu a možností jeho aplikace s přihlédnutím k environmentálnímu dopadu užití druhotných materiálů jako surovin k jeho výrobě;
- Stanovení nasákavosti kompozitního materiálu normovou laboratorní zkouškou s vyhodnocením výsledků a jejich užití při multikriteriálním

<sup>4</sup> KORVINY, P. *Teoretické základy vícekriteriálního rozhodování*. 2006 [cit. 2012-28-11]. Dostupné na World Wide Web: <[http://korviny.cz/mca7/soubory/teorie\\_mca.pdf](http://korviny.cz/mca7/soubory/teorie_mca.pdf)>.

<sup>5</sup> PYTLÍK, P. *Vlastnosti a užití stavebních výrobků*. Brno: VUTIUM, 1998. 399 s. ISBN 80-214-1123-6.

hodnocení tepelně izolačních materiálů navržených v konstrukčních detailech.

Vedlejší cíle:

- Doporučení pro další vývoj a praktické použití tepelně izolačního bloku.
- Podpora trvale udržitelného rozvoje v oblasti stavebnictví.

## 3 ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ

### 3.1 Analýza tepelně technických modelů (MKP a simulace)

Metoda konečných prvků vznikla jako nástroj k usnadnění výpočtů diferenciálních rovnic a byla zvolena vzhledem k faktu, že je vysoce efektivní numerickou metodou pro řešení nejrůznějších technických a vědeckých úloh, jakými jsou i přenosové jevy tepla. Využívají ji téměř všechny již poměrně rozšířené výpočtové aplikace.

### 3.2 Technické veličiny a normativní podklady

V této kapitole jsou shrnuty platné normativní podklady úzce se vztahující k řešené problematice, které obsahují metodiku na posuzování technických požadavků na stavební konstrukce.

- **Lineární činitel prostupu tepla:**

„Lineární činitel prostupu tepla vyjadřuje rozdíl mezi výpočtem prostupu tepla klasickým jednoduchým přibližným postupem a uvažováním prostupu tepla jen jednotlivými konstrukcemi. Pro snazší práci se jednotlivé tepelné vazby stanovují samostatně, mohou se tedy i samostatně hodnotit.“<sup>6</sup> Přesnější výpočet lze tedy získat s uvažováním tepelných vazeb mezi stavebními konstrukcemi (jejich styk), jejichž vliv se zjišťuje řešením dvojrozměrných a trojrozměrných teplotních polí. Definici lineárního činitele prostupu tepla uvádí norma ČSN EN ISO 14683 (730561). Pro popis lineární tepelné vazby je nejpoužívanější vnější součinitel  $\psi_e$ , který je stanoven z vnějších rozměrů konstrukcí. Tato veličina bude využita jako ukazatel kvality snížení vlivu tepelného mostu.

- **Teplotní faktor vnitřního povrchu:**

Posouzení na kritickou povrchovou teplotu konstrukce je prováděno dle normy ČSN 73 0540 veličina – teplotní faktor vnitřního povrchu. Definici teplotního faktoru vnitřního povrchu  $f_{Rsi}$  uvádí norma ČSN 73 0540. Tento teplotní faktor musí splňovat podmínku  $f_{Rsi} \geq f_{Rsi,N}$ , kde  $f_{Rsi,N}$  je požadovaná teplota nejnižšího teplotního faktoru vnitřního povrchu. Veličina teplotního faktoru bude stejně jako předchozí lineární činitel prostupu tepla využita jako další kritérium kvality eliminace tepelného mostu.

---

<sup>6</sup> ŠÁLA, Jiří, et al. *Tepelná ochrana budov*. Praha: Informační centrum ČKAIT, 2006. 292 s. ISBN 978-80-87093-30-6.



### 3.3 Multikriteriální analýza a aplikované vyhodnocovací metody

Jako hlavní optimalizační procesy byly zvoleny vybrané metody multikriteriálních analýz. Model multikriteriální analýzy variant předpokládá konečnou množinu přípustných řešení. Každá z těchto variant je hodnocena podle určitého počtu stanovených kritérií  $f$ . Cílem této metody je nalezení jediné optimální varianty (kompromisního řešení), případně nalezení více takových variant, jejichž přerozdělením na efektivní a neefektivní lze získat jejich výsledné uspořádání od nejefektivnější varianty až po neúčelná řešení. Výběr aplikovaných vyhodnocovacích metod při rozhodovacích optimalizačních procesech byl založen na různorodosti jejich algoritmů při hledání optimálních řešení.

#### 3.3.1 Metoda váženého součtu (WSA)

„Metoda váženého součtu vychází z principu maximalizace užitku.“<sup>7</sup> „Dosáhne-li varianta  $a_i$  podle kritéria  $j$  určité hodnoty  $y_{ij}$ , přináší tak uživateli užitek, který lze vyjádřit pomocí lineární funkce užitku.“<sup>8</sup> Vzhledem k tomu, že se jedná o předpoklad lineární funkce, dochází tak k zjednodušení celého problému. Metodou WSA se sestaví komplexní vyhodnocení pro jednotlivé varianty. Lze ji použít jak pro nalezení jediné neoptimálnější varianty, tak pro konstrukci pořadí variant od nejefektivnější k nejméně efektivní. Optimální variantou je ta, která dosáhne maximální hodnoty užitku.

#### 3.3.2 Metoda TOPSIS

V této metodě jsou varianty posuzovány z hlediska jejich minimální vzdálenosti od ideální (horní) a bazální (dolní) varianty. V závěru metody jsou varianty seřazeny podle klesajících hodnot relevantního ukazatele vzdáleností variant od bazální varianty  $c_i$ . Takto lze dospět k celkovému uspořádání všech hodnocených variant, kde nejlepší varianta dosahuje největší hodnoty  $c_i$ .

#### 3.3.3 Metoda shody a neshody (CDA)

Analýza shody a neshody je založena na porovnání variant výběru po dvojicích. Je měřen stupeň, kterým jednotlivé možnosti výběru a váhy faktorů potvrzují nebo vyvracejí vyřazovací vzájemný poměr mezi alternativami. Diference ve vahách faktorů a posuzování kritérií jsou prostřednictvím metody shody a neshody analyzovány samostatně.

#### 3.3.4 Matematické metody určování kvantitativních multiplikátorů

Výsledná optimalizace při vícekritériálním rozhodování je ve velké míře závislá na rozhodnutí o důležitosti hodnotících kritérií. Aby byla všem

---

<sup>7</sup> FIALA, P., JABLONSKÝ, J., MAŇAS, M. *Vícekritériální rozhodování*. Praha: VŠE, 1997. ISBN 80-7079-743-7.

<sup>8</sup> BROŽOVÁ, H., HOUŠKA, M., ŠUBRT, T. *Modely pro vícekritériální rozhodování*. Praha: CREDIT, 2003. 178 s. ISBN 80-213-1019-7.

parametrům přiřazena co nejvhodnější váha, nabízí se užití metod pro stanovení váhových vektorů:

- **Metoda pořadí:**

Metody pořadí lze vhodně využít ke stanovení neoptimálnějšího řešení z výstupů několika různých metod multikriteriálních analýz, jejichž výsledná pořadí variant nejsou shodná. Součtem dílčích pořadí ustanovených jednotlivými metodami lze stanovit celkové pořadí variant.

- **Metoda párového hodnocení – Fullerova metoda:**

Pro odhad vah lze v tomto případě použít takové ordinální informace, která formuluje vztahy mezi všemi kombinacemi dvojic kritérií. Postupně je tak proveden  $N$  počet srovnání. Porovnání se většinou provádí pomocí Fullerova trojúhelníku. U každé dvojice prvků, které představují hodnotící faktory, se zakroužkuje ten prvek, který se považuje za důležitější.

- **Saatyho metoda určování vah kritérií:**

„Tato metoda slouží k určení vah kritérií, hodnotí-li je pouze jeden expert. Jde o metodu kvantitativního párového porovnávání kritérií. Pro ohodnocení párových porovnání kritérií se používá 9-ti bodové stupnice a je možné používat i mezistupně (hodnoty 2, 4, 6, 8): 1 - rovnocenná kritéria  $i$  a  $j$ , 3 - slabě preferované kritérium  $i$  před  $j$ , 5 - silně preferované kritérium  $i$  před  $j$ , 7 - velmi silně preferované kritérium  $i$  před  $j$ , 9 - absolutně preferované kritérium  $i$  před  $j$ .“<sup>9</sup> Pro výsledný zápis porovnání jednotlivých kritérií slouží tzv. Saatyho matice  $S = (s_{ij})$ , kde jsou uvedena všechna kritéria a jejich podíly podle následujícího předpisu (1).

$$S = \begin{pmatrix} 1 & s_{12} & \dots & s_{1n} \\ 1/s_{12} & 1 & \dots & s_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/s_{1k} & 1/s_{12} & \dots & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

Nejužívanějším postupem odvození váhového vektoru je metoda normalizovaného geometrického průměru řádků Saatyho matice.

$$g_i = \sqrt[k]{\prod_{j=1}^k s_{ij}}; \quad i, j = 1, 2, \dots, k. \quad (2)$$

kde  $s_{ij}$  jsou prvky Saatyho matice.

Samotnou normalizaci určených vah lze provést následujícím vztahem.

$$v_i = \frac{g_i}{\sum_{i=1}^k g_i}; \quad i, j = 1, 2, \dots, k. \quad (3)$$

kde  $g_i$  je normalizovaný geometrický průměr řádků.

Výhodou Saatyho postupu je získání váhového vektoru s nenulovými prvky bez nutnosti další transformace tohoto vektoru.

<sup>9</sup> BROŽOVÁ, H., HOUŠKA, M., ŠUBRT, T. *Modely pro vícekritériální rozhodování*. Praha: CREDIT, 2003. 178 s. ISBN 80-213-1019-7.



### 3.3.5 Metoda analýzy datových obalů (DEA)

Touto metodou lze ověřit koncept navrženého optimalizačního algoritmu v kapitole 4.3.1 odlišným matematickým postupem a získat zpětnou vazbu o efektivnosti jednotlivých vstupů, příp. výstupů, z kterých původní kriteriální matice sestává. Jako efektivní varianty se hledají hodnocené jednotky, které při minimálních vstupech produkují maximální výstupy. Předpokladem výsledků této analýzy metodou výpočtového modelu CCR je určení množiny efektivních variant konstrukčního řešení. Tento výstup však neprezentuje míru dané efektivity mezi úspěšnými variantami. Tu lze rozlišit až užitím CCR modelu superefektivnosti. Rozšíření původního modelu nabízí klasifikaci již předchozí analýzou určených efektivních variant. Při výpočetním stanovení míry superefektivnosti se váha původní efektivní jednotky položí rovna nule (prakticky dojde k vyrazení této hodnocené jednotky ze souboru jednotek), což vede k důsledku změny původní efektivní hranice. Poté je modelem superefektivnosti měřena vzdálenost mezi vstupy a výstupy hodnocené jednotky již od nové efektivní hranice.<sup>10</sup>

## 3.4 Experimentální měřící metody

Experimentální měřící metody slouží nejen k ověření nově získaných teoretických poznatků, ale také k rozšíření sestavy těchto poznatků pro jejich uplatnění při multikriteriálním optimalizačním procesu.

### 3.4.1 Laboratorní stanovení nasákavosti kompozitního materiálu<sup>11</sup>

Každý konstrukční detail má svá technická specifika a požadavky na přípustné hodnoty nasákavosti. Aplikace kompozitního materiálu není omezena pouze na stavební detaily plochých střech. Lze jej úspěšně aplikovat i do detailů při spodní stavbě (přechod nosné stěny na základovou konstrukci, příp. tzv. jako konstrukce pod prahovou spojkou<sup>12</sup>), kde je kladen důraz na nízkou nasákavost materiálu. Nasákavost a postupy k jejímu určení u materiálů na bázi plastů definuje norma ČSN EN ISO 62 (64 0112) – Plasty – Stanovení nasákavosti ve vodě. Zvolená Metoda 1 (Stanovení množství vody absorbované po ponoření do vody o teplotě 23 °C) předepisuje výpočtový vztah a normou je dále definován pracovní postup pro ponoření a vysoušení vzorků, které jsou následně měřeny.

Jelikož výroba měřených vzorků probíhá v experimentálních podmínkách, není možné vždy zaručit uzavření povrchové struktury materiálu. Vzorek č. 53, který

---

<sup>10</sup> JABLONSKÝ, J.; DLOUHÝ, M. *Modely hodnocení efektivnosti produkčních jednotek*. 1. vyd. Praha: Professional Publishing, 2004. 184 s. ISBN 80-86419-49-5.

<sup>11</sup> MATĚJKA, L.; PĚNČÍK, J.; KRÁLOVÁ, M.; KALUŽOVÁ, A.; MATĚJKA, L.; POSPÍŠIL, T. *Thermal Insulation Composite Material Based on Thermal Insulation Composite Material Based on Polymers - Determination of Water Absorption*. International Journal of Civil and Environmental Engineering, 2013, roč. 35, č. 2, s. 1141-1146. ISSN: 1701- 8285.

<sup>12</sup> SMOLKA, R.; MATĚJKA, L. *Izolační prvek pod prahovou spojkou dveří*. 34. Vedecká konferencia katedier a ústavov konštrukcií pozemných stavieb. Žilina: Miroslav Gibala, KNM, 2010. s. 35-38. ISBN: 978-80-970171-6-3.

má uzavřenou povrchovou strukturu, dosáhl nasákavosti 0,89 % a vzorek č. 44 s porušenou povrchovou strukturou výrazněji nasákl až na hodnotu 8,35 % (Obr. 4). V návaznosti na tyto výsledky měření a pozorování byla vyvozena hypotéza, že nasákavost může být poškozením povrchu vzorku jistým způsobem ovlivňována. Proto bylo také cílem ověřit vliv povrchového poškození vzorku na jeho změřenou nasákavost. Za tímto účelem byl dále proveden Kolmogorov-Smirnovův test, který s p-hodnotou  $p = 0,1$  na hladině významnosti 5 % významný vliv povrchového poškození na nasákavost neprokázal.

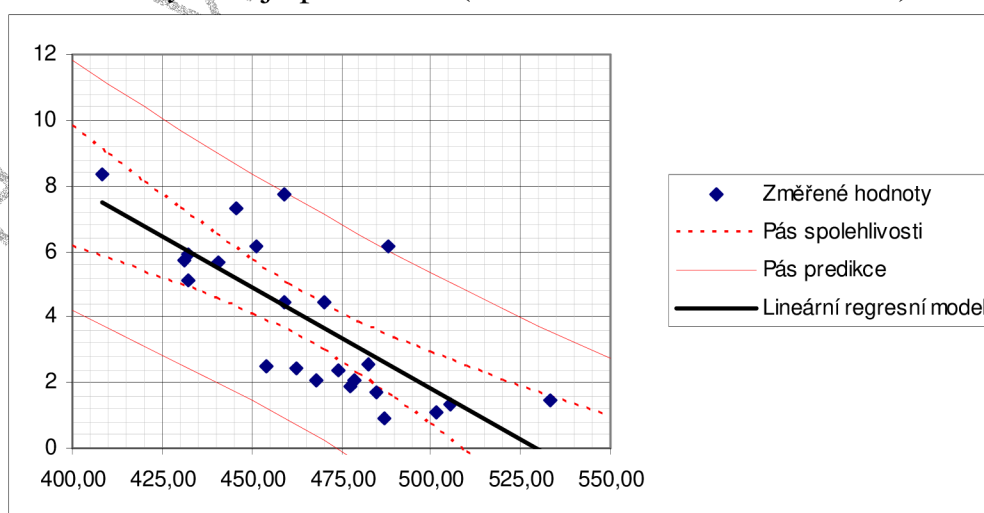


**Obr. 4** Vzorek č. 53 (vlevo) bez porušené povrchové struktury a vzorek č. 44 (vpravo) s porušenou strukturou povrchu

Materiálové složení testovaných vzorků je ovlivněno poměrem užitých výrobních surovin. Polymerní granule použité při výrobě zvyšují hodnotu objemové hmotnosti produktu, naopak prvky skla s dutinami tuto hodnotu snižují. Vhodným ukazatelem pro zjištění závislosti veličiny nasákavosti na materiálovém složení bude ověření této závislosti na objemové hmotnosti testovaných vzorků. Vlastní ověření míry souvislosti zmíněných veličin je provedeno metodou výpočtu Pearsonova korelačního koeficientu, jehož hodnota je  $-0,74$  a lze ji ze statistického hlediska interpretovat jako silnou nepřímou souvislost mezi objemovou hmotností a nasákavostí materiálu. Pro modelování závislosti nasákavosti na vybrané vysvětlující proměnné objemové hmotnosti byl sestaven regresní model (Obr. 5):

$$f(x) = y = 32,739 - 0,0619 \cdot x \quad (4)$$

kde  $x$  je proměnná pro hodnotu objemové hmotnosti,  
 $y$  je proměnná (funkční hodnota nasákavosti).



**Obr. 5** Lineární regresní model s intervaly pro pásy spolehlivosti a predikce

Závěrečným cílem výzkumu v této oblasti je stanovení objemové hmotnosti materiálu, aby jeho nasákavost nepřekročila hodnotu  $c = 3 \%$ , která by umožnila spolehlivou aplikaci ve všech typech konstrukčních detailů. Z Obr. 5 a dosazením do rovnice (4) je zřejmé, že pro objemovou hmotnost větší, než  $480,75 \text{ kg/m}^3$  je bodový odhad očekávané nasákavosti menší, než žádaných  $3 \%$ . 95%-ní intervalový odhad očekávané nasákavosti je vyjádřen přerušovanou křivkou. Tedy na  $95 \%$  se lze spolehnout, že pro objemovou hmotnost větší než  $500 \text{ kg/m}^3$  bude i horní odhad pro očekávanou nasákavost pod  $3 \%$ . Výsledek hodnoty nasákavosti byl zpracován v kapitole 4.3.6 do multikriteriálního hodnocení tepelně izolačních materiálů určených pro zatížením namáhaná místa stavebních konstrukcí.

### 3.4.2 Tepelně technické měření na reálném objektu

Součástí výzkumu je ověření teoretických předpokladů tepelně technických výpočtových modelů a srovnání s datovými výstupy výpočetních metod. Pro vybraný referenční model konstrukce bude nalezen vhodný objekt a provedeno experimentální tepelně technické měření v reálném prostředí. Měření je nutné provádět v zimním období při poklesu vnější teploty pod  $0^\circ\text{C}$ . Hodnoty je nezbytné zaznamenávat kontinuálně v delších časových úsecích vzhledem k potřebě eliminovat nepřesnosti způsobené tepelně akumulacími vlastnostmi stavebních materiálů a vzhledem k předpokládaným občasným výkyvům teplot v interiéru vlivem tepelných zdrojů. Teplotní čidla budou vhodně rozmístěna na měřeném objektu v místě, kde je předpokládána vnitřní extrémní povrchová teplota a dále pro měření vnější a vnitřní teploty prostředí.

Komparovanou hodnotou bude veličina minimální vnitřní povrchové teploty. Porovnáním získaných výsledků z měření s teoretickými a podrobením kritickému hodnocení budou vyvozeny další závěry disertační práce. Bude tak potvrzena část teoretické hypotézy vyvozené z modelové analýzy konstrukčních prvků ve stavebním detailu a prokázána vhodnost předchozích užitých výpočetních metod.

## 4 VÝSLEDKY PRÁCE A NOVÉ POZNATKY

### 4.1 Charakteristika, členění a značení konstrukčních detailů

K optimalizaci byly vybrány 3 základní konstrukční detaily jednoplášťové ploché střechy, které jsou označeny A, B a C. Kategorie A a B zahrnují ukončení ploché střechy v návaznosti na vertikální stěnovou konstrukci. Kategorie C pojímá stavební detail průniku železobetonové nosné konstrukce střešním pláštěm. Další podkategorie těchto třech skupin konstrukčních detailů jsou rozděleny podle konkrétních typů stavebně technických provedení:

- **Konstrukční detail A - atika**

Vzhledem k pozorování současného stavu navrhování struktury a tvaru konstrukce bylo vytipováno 6 reálně možných variant (označených A1 - A6) tepelně technického řešení. Sledován byl vliv jednotlivých variant na průběh

tepelně technických veličin. Při vytváření variant bylo užito dvou možných přístupů. První přístup připouští vertikální i horizontální změnu tvaru konstrukce, druhý přístup připouští pouze horizontální změnu tvaru konstrukce.

**Tab. 1** Přehled konstrukčních variant stavebního detailu A a jejich označení

Označení konstrukce		Popis konstrukce		
A1		Bez aplikace tepelné izolace		
A2		Aplikace tepelné izolace pouze na vnitřní straně nadezdívky atiky (Obr. 1b)		
A3.x	A3.1	Aplikace tepelné izolace pouze v horizontální rovině při ukončení atikové nadezdívky (Obr. 1a)	S vertikální změnou tvaru konstrukce	
	A3.2		Bez vertikální změny tvaru konstrukce	
A4.x	A4.1	Aplikace tepelné izolace v horizontální rovině při ukončení atikové nadezdívky a na její vnitřní straně (Obr. 1c)	S vertikální změnou tvaru konstrukce	
	A4.2		Bez vertikální změny tvaru konstrukce	
A5.x	A5.1	Aplikace tepelné izolace na všech plochách atikové nadezdívky s napojením na fasádní tepelnou izolaci (Obr. 1d)	S vertikální změnou tvaru konstrukce	
	A5.2		Bez vertikální změny tvaru konstrukce	
A6.x	A6.1	Aplikace tepelné izolace v horizontální rovině pod atikovou nadezdívkou v úrovni tepelné izolace střešního pláště (Obr. 2) c - termoizolační blok z kompozitního materiálu e - dutinová tvarovka vyplněná expandovaným perlitem p - dutinová tvarovka vyplněná polystyrenem EPS f - deska pěnového skla	S vertikální změnou tvaru konstrukce	
	A6.2.x		c	Bez vertikální změny tvaru konstrukce
			e	
			p	
			f	

Konstrukční detail s označením A6.2.c využívá fyzikálních vlastností termoizolačního bloku<sup>13</sup> z kompozitního materiálu na bázi druhotných surovin, které umožňují zabudování tohoto stavebního produktu do tlakem exponovaných míst v konstrukci. Termoizolační blok je schopen odolávat zatížení stejně, jako je tomu u pěnového skla. Svou pevností v tlaku pěnové sklo dokonce převyšuje.<sup>14</sup>

• **Konstrukční detail B - ukončení ploché jednoplášťové střechy okapem**

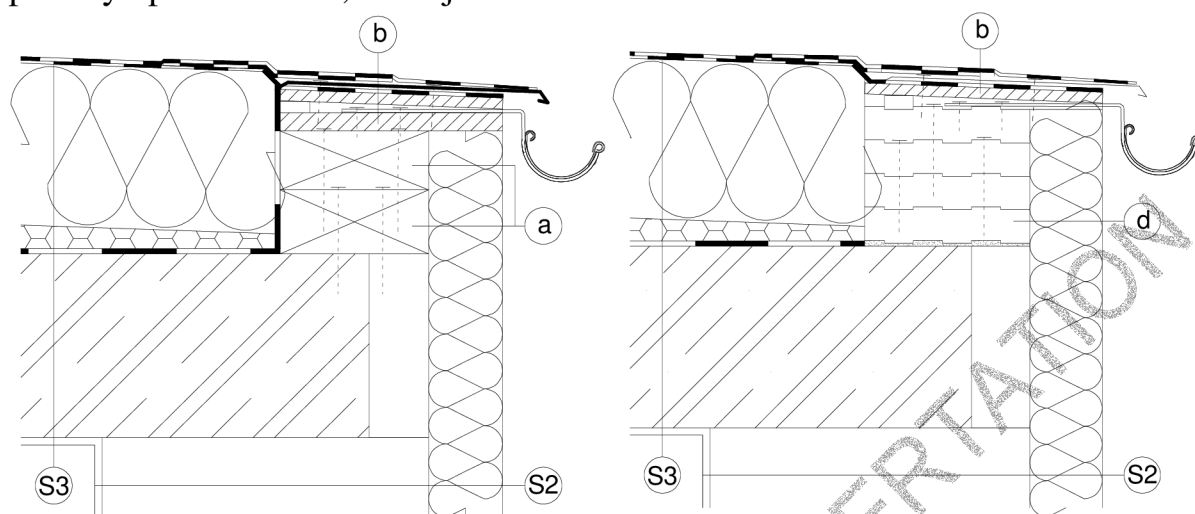
O konstrukčním provedení tohoto stavebního detailu z tepelně technického hlediska rozhodují především vlastnosti materiálu tepelné izolace. Upravené návrhy konstrukčních variant odpovídají dlouhodobým odborným návrhům z praxe. Vzhledem k tepelně izolačnímu materiálovému řešení byly stanoveny 3 základní varianty s označením B1, B2 a B3.

Varianta B1 (Obr. 6) je dnes již tradičním řešením. Podklad pro kotvení klempířských prvků tvoří zpravidla 2 vrstvy fošen. Ty mají maximální délku 2 m, z důvodu zabránění jejich kroucení. Pokud je použita pojistná hydroizolace, tvar spodního povrchu fošny v první vrstvě je pak nutné upravit drážkami pro odvod

<sup>13</sup> PĚNČÍK, J.; MATĚJKA, L. *Design and Analysis of Insulation Blocks for Masonry Structures*. Civil, Structural and Environmental Engineering Computing. Madeira, Portugalsko: 2009. s. 230 (s.) ISBN: 978-1-905088-30-0.

<sup>14</sup> MATĚJKA, L.; PĚNČÍK, J. *Design details of low-energy and passive houses using composites from waste raw materials*. David Publishing Company, 2011, roč. 5, č. 5, s. 440-453. ISSN: 1934- 7359.

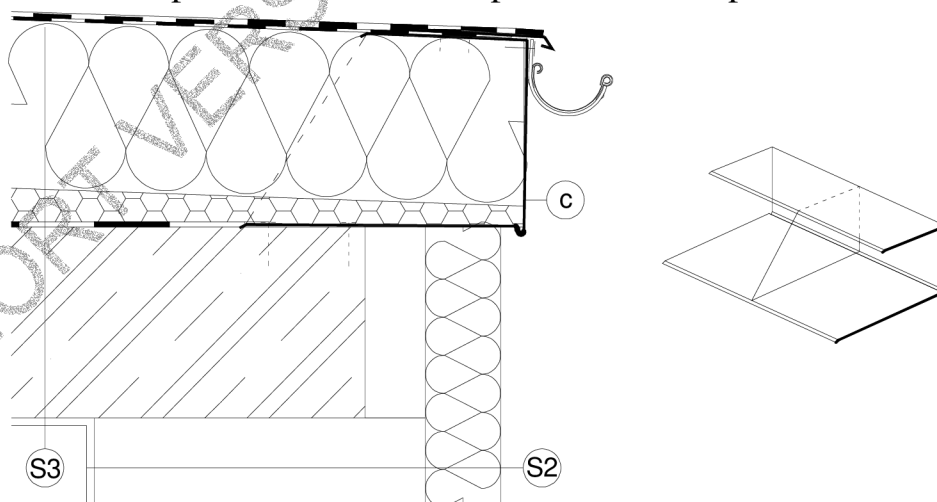
vody z pojistné hydroizolace. V první vrstvě jsou fošny kotveny do podkladní konstrukce, v druhé se poté kotví k vrstvě první. Do druhé vrstvy se upevňují žlabové háky. Vykonzolované fošny přes fasádní tepelnou izolaci jsou ještě opatřeny oplechováním, které je do nich kotveno.



**Obr. 6** Schéma konstrukčního řešení B1 pomocí dřevěných prvků (a – trámy, b – OSB desky) a B3 s tepelně izolačními bloky z kompozitního materiálu (ozn. d)

Podkladem pro kotvení klempířských prvků mohou být také dřevoštěpkové desky, příp. desky cementotřískové, které lze uložit na dřevěné fošny, či hranol.

V konstrukční variantě B2 (Obr. 7) je využit pozinkovaný plech U-tvaru o min. tloušťce 1,25 mm. Jeho ztužení je zajištěno pravidelnými plechovými výztuhami. Do uvedeného klempířského výrobku je zasunut prvek tepelné izolace. V případě užití pojistné hydroizolace je klempířský výrobek ve spodním ohybu perforován. Žlabový hák se kotví přímo na čelo tohoto pozinkovaného plechu.



**Obr. 7** Schéma konstrukčního řešení B2 pomocí klempířského prvku U-tvaru a znázornění ohýbaného prvku s žebrovou výztuží (ozn. c)

Následující řešení B3 (Obr. 6) představuje progresivní přístup v užití tepelně izolačních bloků z recyklovaného kompozitního materiálu. Stavební bloky z

kompozitního materiálu, kromě přerušení tepelného mostu, poskytují kvalitní podklad pro kotvení klempířských prvků a nevyžadují žádnou údržbu.

Vzhledem k dynamickému vývoji ve stavebnictví není a nikdy být nemůže tento výčet konstrukčně materiálových řešení představující nejčastější varianty prováděné v praxi konečný. Stejně tak je pravděpodobné, že se brzy objeví další nově vznikající materiály vhodné pro takovou aplikaci.

- **Konstrukční detail C - průnik železobetonové konstrukce střechou**

Při tepelně technickém opatření u tohoto stavebního detailu lze dospět ke dvěma základním konstrukčním řešením pro přerušení tepelného mostu.

První konvenční řešení C1 představuje ochranu celého povrchu železobetonové konstrukce na straně exteriéru. Nabízí se zde aplikace termoizolačního materiálu EPS, příp. minerální vaty. Možnost aplikace tepelně izolačního bloku z kompozitního materiálu nabízí moderní přístup C2 v řešení přerušení tepelného mostu přímo v místě průniku sloupu střešním pláštěm.

Pro komplexní srovnání byla modelována také varianta C3 bez aplikace tepelně izolačního materiálu pro přerušení tepelného toku železobetonovou konstrukcí.

Konstrukční detail C lze dále zobecnit na průnik střešním pláštěm různorodými nosnými konstrukcemi. Dalším příkladem může být dělicí stěnová konstrukce zděná z dutinových cihel (tzv. mezistřešní atika), či zděné pilíře apod. V jejich rozboru a analýze lze předpokládat zřejmou analogii.

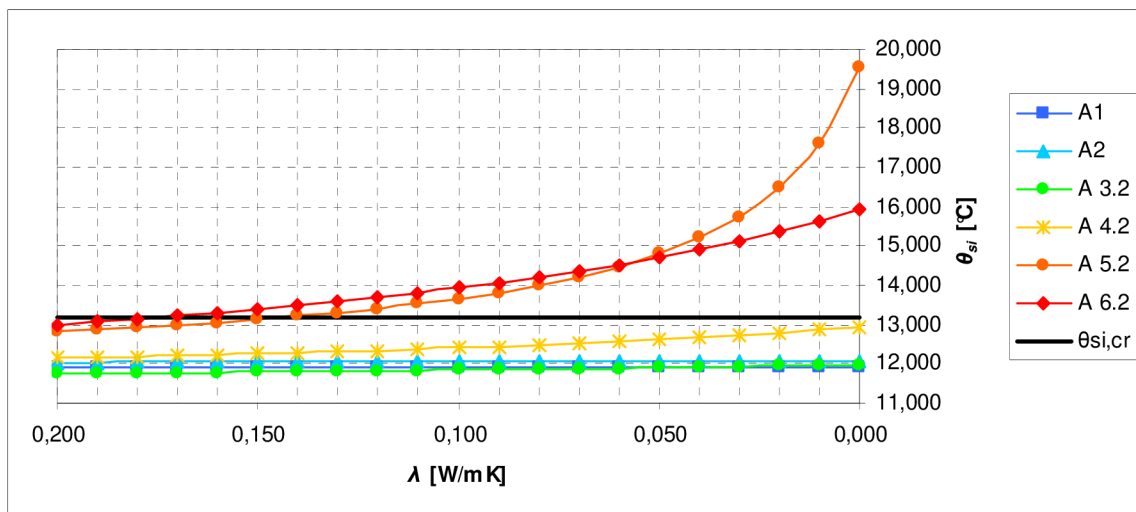
## **4.2 Tepelně technická analýza užitím výpočetních modelů**

### **4.2.1 Konstrukční detail A - atika**

Tepelně izolační vlastnosti konstrukce lze zkvalitnit čtyřmi zásadními způsoby. Jedná se o správnou volbu konstrukčního řešení, tvaru konstrukce, užitého množství tepelně izolačního materiálu a v neposlední řadě o hodnotu součinitele tepelné vodivosti materiálu. V první fázi tepelně technické analýzy konstrukčních detailů byl zkoumán vliv změny tvaru konstrukce navýšením množství stavebního materiálu a tím i zvětšením vzdálenosti, kterou musí prostoupit tepelný tok mezi interiérem a exteriérem ve vertikálním směru tepelného mostu.

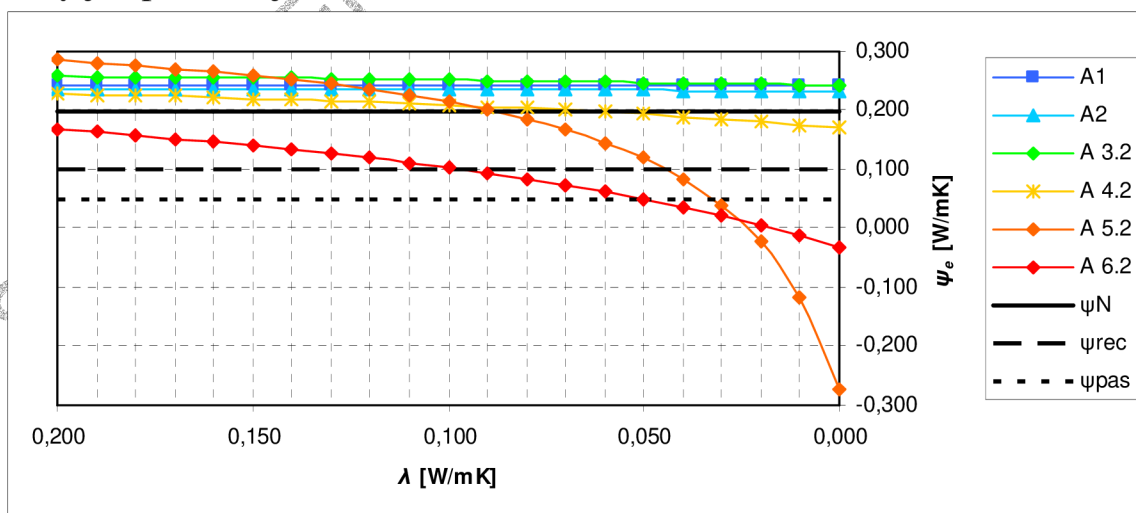
Výpočty bylo prokázáno, že vlivem vertikální změny tvaru konstrukce navýšením o tepelně izolační materiál nedochází k výraznému zkvalitnění tepelně technických parametrů v konstrukčním detailu typu A6.x a průběh těchto parametrů je dále spíše stagnující se snižující se hodnotou součinitele tepelné vodivosti  $\lambda$ . U stavebního detailu typu A5.x bylo tímto způsobem zásahu do konstrukce prokázáno dokonce zhoršení některých tepelně technických vlastností, především při stanovení vnitřní povrchové teploty. Z tohoto důvodu a z důvodu přehlednosti grafických výstupů jsou pro uvedené konstrukční detaily nadále v parametrizovaných tepelně technických analýzách zkoumány výpočtové modely ve variantách bez vertikální změny tvaru konstrukce.





**Obr. 8** Závislost minimální teploty vnitřního povrchu  $\theta_{si}$  [°C] na součiniteli tepelné vodivosti  $\lambda$  [W/mK], uvedena také kritická hodnota minimální teploty vnitřního povrchu  $\theta_{si,cr}$  (normový požadavek)

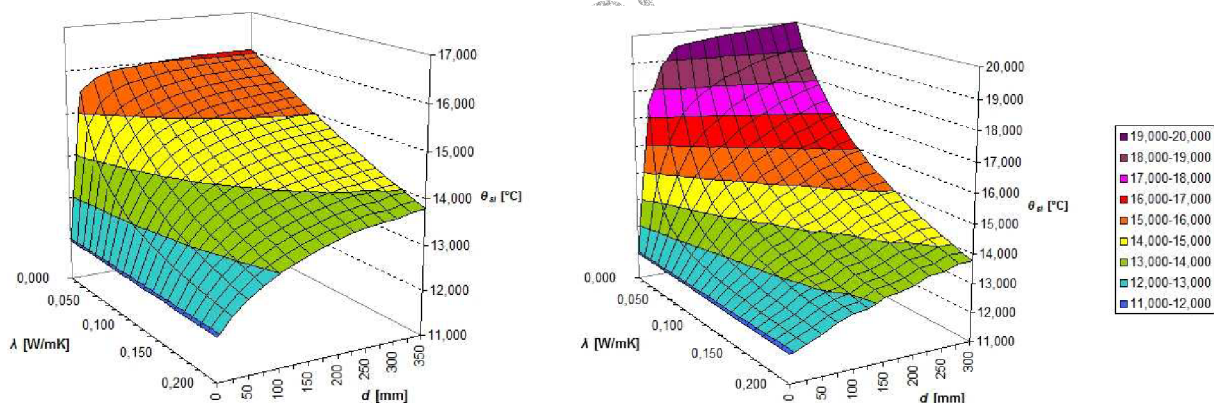
Na Obr. 8 je zřetelný nárůst minimální povrchové teploty v interiéru ve variantách A5.2 a A6.2.x. Průběhy obou křivek se protínají v intervalu součinitele tepelné vodivosti  $\lambda \in \langle 0,05; 0,06 \rangle$  W/mK. To odpovídá jen okrajově rozsahu většiny běžně rozšířených termoizolačních materiálů ( $\langle 0,035; 0,05 \rangle$  W/mK). Efektivnější je návrh konstrukční varianty A5.2, ale jen s minimálním navýšením vnitřní povrchové teploty. Pro hodnoty  $\lambda$  nad horní mez mimo uvedený interval dosahuje varianta A6.2.x lepších výsledků. Srovnání na Obr. 9 pro průběh veličiny lineárního činitele prostupu tepla  $\psi_e$  udává, že výsledky variant A5.2, A6.2.x se protínají v intervalu  $\lambda \in \langle 0,02; 0,03 \rangle$  W/mK. To jsou hodnoty výrazně nižší, než u běžných tepelně izolačních materiálů. Tedy pro zajištění co nejnižší hodnoty této veličiny je optimálnější variantou řešení A6.2.x.



**Obr. 9** Závislost lineárního činitele prostupu tepla  $\psi_e$  [W/mK] na velikosti součinitele tepelné vodivosti  $\lambda$  [W/mK] a konstrukčního řešení, uvedeny i normové hodnoty (požadovaná  $\psi_N$ , doporučená  $\psi_{rec}$ , doporučená pro pasivní budovy  $\psi_{pas}$ )

Z grafických výstupů charakteristik pro zvolené stavební konstrukce lze usuzovat, že při kvalitně provedené tepelně izolační vrstvě zdiva ve vertikální stěnové konstrukci, nelze nikdy dosáhnout s běžně dostupnými tepelně izolačními materiály lepších výsledků pro veličinu lineárního činitele prostupu tepla jiným způsobem, než provedením tepelně technického opatření dle varianty A6.2.x.

V souvislosti s vypořádanou vlastností zhoršení tepelně technických poměrů v některých konstrukčních detailech při vertikální změně tvaru konstrukce byl pro konstrukční detail A6.2.x při aplikaci proměnné tloušťky tepelného izolantu ve vztahu s jeho dalším proměnným parametrem součinitele tepelné vodivosti sestaven prostorový povrchový graf (Obr. 10), popisující chování průběhu minimální vnitřní povrchové teploty v závislosti na obou zmíněných proměnných parametrech. Tvar modelu konstrukce však zůstal neměnný. Ke změně tak dochází pouze v samotných vnitřních proporcích konstrukčního detailu ve vzájemném poměru složky zdícího a tepelně izolačního materiálu. Stejným způsobem byl sestaven povrchový graf pro variantu A5.2, která představuje tradiční způsob provádění tepelné izolace kontaktním zateplovacím systémem. Samozřejmě z obou zobrazených grafů vyplývá, že navržením konstrukční varianty A5.2 lze dosáhnout při extrémně nízké hodnotě součinitele tepelné vodivosti a značného množství tepelně izolačního materiálu vyšších hodnot minimální vnitřní povrchové teploty.

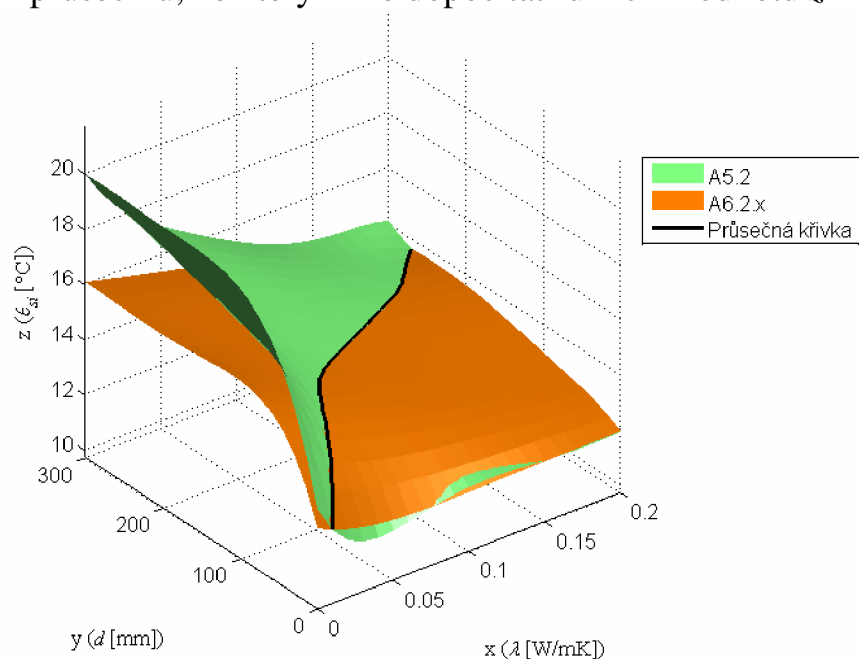


**Obr. 10** 3D graf závislosti minimální vnitřní povrchové teploty  $\theta_{si}$  [°C] na průběhu proměnných součinitele tepelné vodivosti  $\lambda$  [W/mK] a tloušťky  $d$  [mm] pro zkoumanou část tepelné izolace v konstrukci (varianta A6.2.x a A5.2)

Podstatné je také stanovení efektivity přidávání tepelného izolantu do stavební konstrukce varianty A6.2.x a porovnání těchto vlastností s konstrukční variantou A5.2. Z grafu (Obr. 10) lze odečíst, že při tloušťce izolačního materiálu nad 200 mm nedochází již výrazně k nárůstu nejnižší vnitřní povrchové teploty  $\theta_{si}$  [°C] v intervalu vyšších hodnot součinitele tepelné vodivosti  $\langle 0,04; 0,20 \rangle$  aplikovaného materiálu. V intervalu nižších hodnot součinitele tepelné vodivosti  $\langle 0,00; 0,04 \rangle$  dochází dokonce od tloušťky 300 mm k mírnému snížení a následné stagnaci hodnot teploty  $\theta_{si}$ . Pro modelování míry efektivity aplikace tepelně

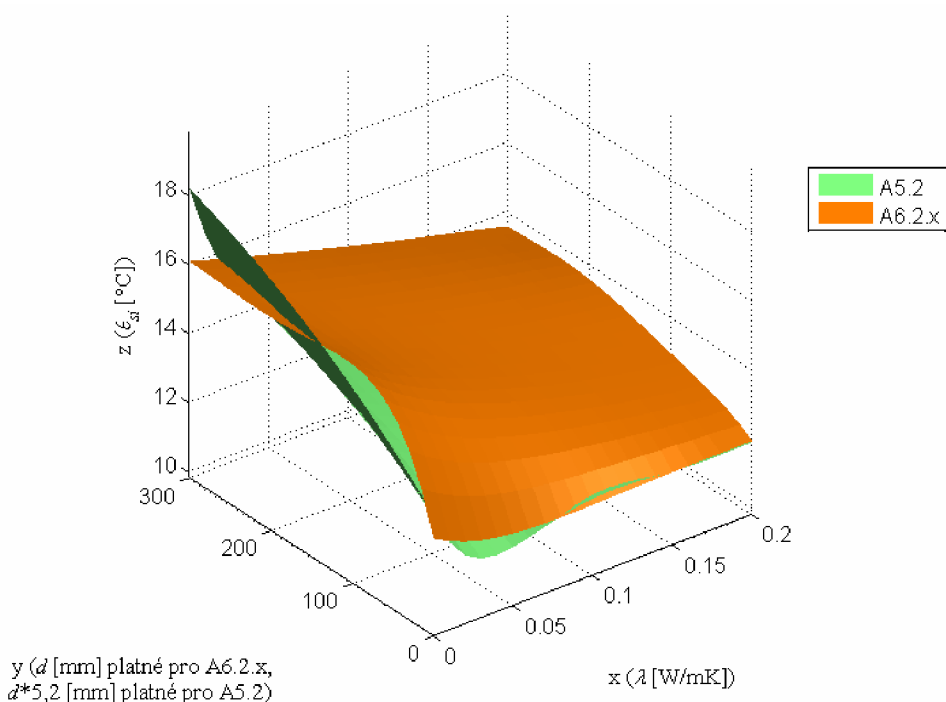


izolačního materiálu byly stanoveny obecné formy regresní funkce popisující tvar, trend a průběh zkoumaného problému variant A5.2 a A6.2.x. Pokud se z těchto funkcí sestaví rovnice  $f_1(x, y) = f_2(x, y)$ , je možné získat jejím řešením body v místech jejich průsečíků, ke kterým lze dopočítat funkční hodnotu  $z$  - Obr. 11.



**Obr. 11** Průnik ploch funkcí pro modely A5.2 a A6.2.x

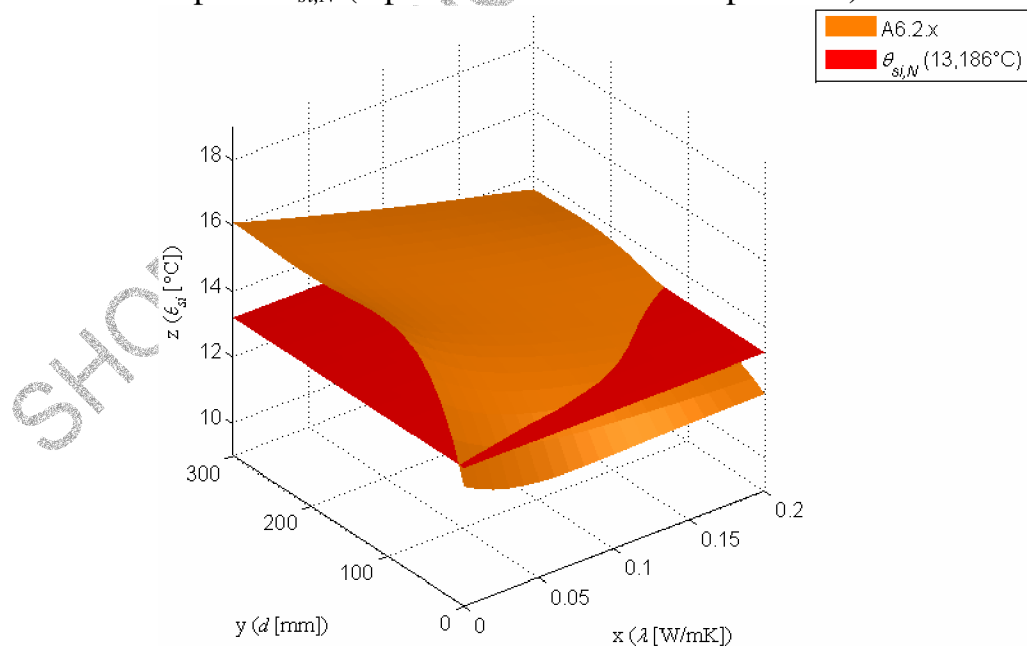
Průsečná křivka vymezuje hranici mezi optimálním užitím variant konstrukčního řešení (A5.2 a A6.2.x) podle parametrů (tloušťka  $d$ , součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$ ) zvoleného tepelně izolačního materiálu. Pro interval hodnot  $\lambda \geq 0,04$  W/mK je při tloušťce tepelného izolantu  $d = 100$  mm optimálnější varianta A6.2.x. Při nižších hodnotách mocnosti vrstvy tepelně izolačního materiálu je dolní mez tohoto intervalu pro hodnoty  $\lambda$  posunuta až na úroveň  $\lambda = 0,01$  W/mK. Pro provádění tepelně izolační vrstvy do tloušťky  $d = 100$  mm je tedy z tepelně technického hlediska konstrukčního detailu atiky optimálnější variantou varianta A6.2.x, oproti tradičnímu řešení A5.2, které je navíc náchylnější na poruchovost. Jedná se však pouze o tepelně technické hledisko. Požadavky platných technických norem mohou být splněny s optimálním množstvím tepelně izolačního materiálu s dostatečnou tepelně izolační vlastností s co nejnižší ekonomickou zátěží a pracností. Zde je na místě uvést, že i když je tloušťka aplikovaného tepelně izolačního materiálu shodná pro oba konstrukční detaily, není shodné jejich celkové množství (objem). Varianta A5.2 obsahuje při stejné tloušťce tepelného izolantu vždy více jak pětinašobek jeho množství, než je tomu ve variantě A6.2.x. Další srovnávací posouzení v oblasti tepelné techniky se tedy nabízí ve formě transformace funkce popisující model A5.2 ve smyslu stejného objemového množství pro varianty A5.2 a A6.2.x (viz Obr. 12).



**Obr. 12** Průnik ploch funkcí pro modely A5.2 (po transformaci na stejné objemové množství s A6.2.x) a A6.2.x; Tloušťce tepelného izolantu  $d$  [mm] ve variantě A6.2.x odpovídá tloušťka  $d/5,2$  [mm] ve variantě A5.2

Výsledkem je po tepelně technické stránce naprostá dominance konstrukčního řešení A6.2.x nad variantou A5.2 v celém intervalu hodnot součinitele tepelné vodivosti  $\lambda$  pro běžně používané tepelně izolační materiály.

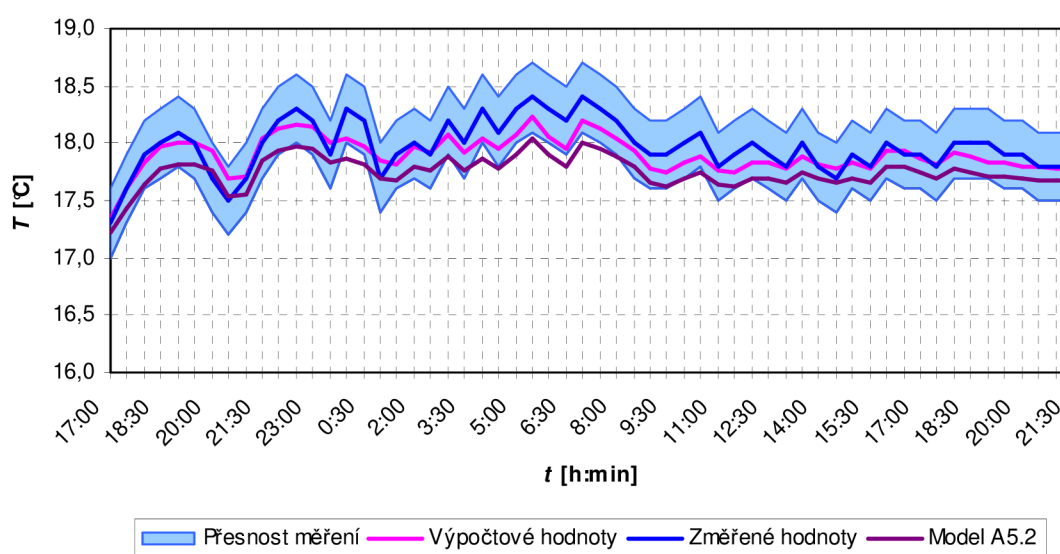
Ověření varianty A6.2.x na normové požadavky na vnitřní minimální povrchovou teplotu  $\theta_{si,N}$  (teplotní faktor vnitřního povrchu) uvádí Obr. 13.



**Obr. 13** Posouzení modelu A6.2.x na vnitřní povrchovou teplotu  $\theta_{si,N}$  [°C] (interval vyhovujících hodnot tvoří 81 % z celkového modelovaného intervalu)

Výpočtový model konstrukce A6.2.x průkazně splňuje normový požadavek. Pokud by byl v této variantě jako tepelně izolační materiál aplikován termoizolační blok z kompozitního materiálu (konstrukční řešení A6.2.c), vyhovělo by jeho množství v tloušťce  $d = 40$  mm.

Vzhledem k rozsáhlé skupině variant, není možné všechny experimentálně ověřit tepelně technickým měřením. Lze však využít dílčího měření jedné z variant konstrukce pro ověření funkčnosti teoretických modelů a vhodnosti zvolené metodiky pro danou problematiku. Měření bylo provedeno na objektu, jehož ukončení střešní konstrukce přibližně odpovídá variantě A5.2 (reálná konstrukce se liší pouze větší tloušťkou tepelně izolační vrstvy). Tvary průběhu změřených a vypočtených vnitřních povrchových teplot (Obr. 14) se v rámci přesnosti měření téměř shodují. Také průběh hodnot modelu A5.2 je shodný.



**Obr. 14** Měření konstrukce atiky přibližné konstrukční variantě A5.2

Skupina konstrukčních řešení A6.2.x se prezentuje jako druhé nejlepší tepelně technické řešení po celkovém zateplení ve variantách A5.1 a A5.2. Z hlediska tepelných ztrát je nutné navrhovat konstrukční řešení A6.2.x s větší tloušťkou tepelného izolantu, než je ho užito v rámci celkového zateplení konstrukčního detailu ve variantě A5.2, aby došlo ke shodnému snížení těchto tepelných ztrát. Avšak objemové množství užitého termoizolačního materiálu bude ve variantě A6.2.x několikanásobně menší. Takto optimalizovaný konstrukční detail bude mít parametry nízké ekonomické zátěže při užívání budovy, jíž bude součástí.

#### 4.2.2 Konstrukční detail B - ukončení ploché střechy okapem

Konstrukční detaily B1, B3 byly podrobeny tepelně technické analýze ve dvojdimenzionálním teplotním poli. Stejný postup nelze uplatnit pro získání tepelně technických výsledků v případě varianty B2. Ocelový rám obsažený ve stavebním detailu B2 je totiž vyztužen žebry, které není možné ve dvojrozměrném teplotním poli patřičně modelovat. Tato varianta byla tedy modelována v

trojrozměrném teplotním poli. Výsledky relevantních fyzikálních veličin z provedené tepelně technické analýzy jsou zapsány v Tab. 2.

**Tab. 2** Výsledky tepelně technické analýzy stavebních detailů B1, B2 a B3

Označení konstrukce	$\theta_{si}$ [°C]	$\psi_e$ [W/mK]	$f_{Rsi}$ [-]	$\Phi$ [W]
B1	15,671	0,0294	0,862	15,436
B2	15,122	0,0674	0,846	16,795
B3	16,004	0,0104	0,871	14,774

Ocelový rám se vykazuje výraznější tepelný most v konstrukci B2 vzhledem k ostatním variantám. Termoizolační bloky z kompozitního materiálu tvoří průkazně nejkompaktnější tepelně izolační obálku v místě lineárního tepelného mostu při napojení střešního pláště na vertikální stěnovou konstrukci. Pro ověření jeho skutečně optimálního užitku je nutné podrobit jej optimalizační analýze.

#### 4.2.3 Konstrukční detail C - průnik železobetonové konstrukce střešním pláštěm

Celý soubor detailů C byl vzhledem ke svým tvarovým proporcím modelován v trojrozměrném teplotním poli. Výstupy analýzy jsou uvedeny v Tab. 3.

**Tab. 3** Výsledky tepelně technické analýzy stavebních detailů C1, C2 a C3

Označení konstrukce	$\theta_{si}$ [°C]	$\chi$ [W/K]	$f_{Rsi}$ [-]	$\Phi$ [W]
C1	18,683	0,086	0,946	26,462
C2	18,407	0,114	0,938	27,441
C3	17,924	0,162	0,925	29,134

Obecně lze potvrdit, že tepelná izolace zabudovaná v místě průniku vertikální konstrukce střešním pláštěm je ve své účinnosti téměř stejnou měrou efektivní, jako její umístění na tuto konstrukci v exteriéru. Vzhledem k charakteristickým vlastnostem kompozitního materiálu a možnosti získání rezervy v tepelně izolační účinnosti varianty C2 užitím větší tloušťky vrstvy nabízí se provést určité modifikace a to především za účelem zvýšení jeho pevnosti v tlaku na úkor snížení tepelně izolační vlastnosti (zvýšení součinitele tepelné vodivosti  $\lambda$ ).

### 4.3 Výběr optimálních variant multikriteriální analýzou

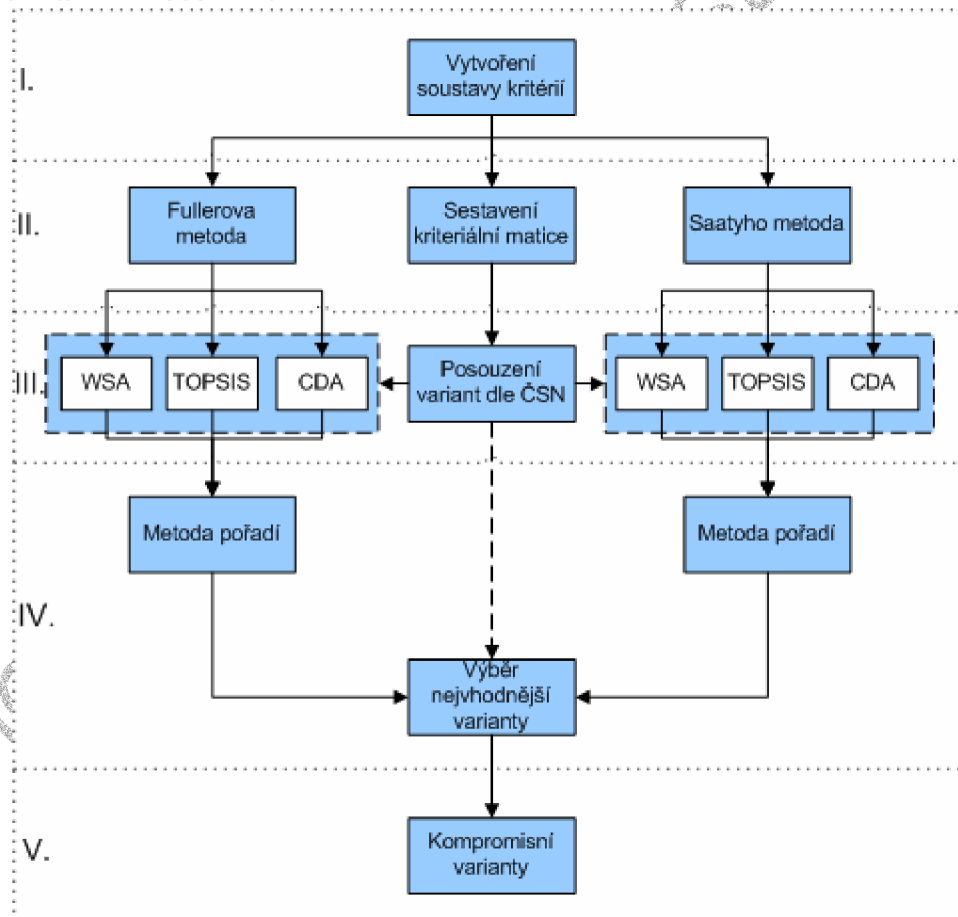
Závěry tepelně technických analýz a posouzení nejsou však jediným optimalizačním hlediskem. Zvolené konstrukční řešení se stanovenou tloušťkou a objemovým množstvím tepelně izolačních materiálů souvisí s celou řadou dalších faktorů, které mohou optimalizaci významně ovlivnit a podílet se tak na vlastní koncepci konstrukčního detailu. Pokud se však jedná o tepelně technické hledisko, mělo by toto být vždy upřednostněno jako jedno z hlavních hodnotících kritérií.

#### 4.3.1 Návrh optimalizačního algoritmu

Pro problematiku optimalizace konstrukčních detailů byl navržen algoritmus exaktního optimalizačního procesu (Obr. 15) vycházející z obecného schématu multikriteriálních metod (Obr. 3). Je rozčleněn na pět hlavních úrovní (I.-V.):



- I. - definice hodnotících faktorů pro problematiku konstrukčních detailů dle navržených variant řešení, tyto musí být jednoznačnými a vzájemně indiferentními indikátory pro rozhodovací proces;
- II. - stanovení důležitosti hodnotících kritérií ve váhovém vektoru (2 rozdílné přístupy pro zpracování ordinální a kardinální informace o jejich důležitosti - Fullerova a Saatyho metoda), sestavení kritériální matice z navržených konstrukčních variant vyžadující získání kvantitativních, příp. kvalitativních dat;
- III. - dílčí hodnocení variant normativním posouzením (ČSN), pokud je toto požadováno a optimalizace metodami multikritériální analýzy (zvoleny 3 algoritmicky rozdílné metody posuzování - WSA, TOPSIS, CDA);
- IV. - seřazení konstrukčních variant (kvaziuspořádání) podle optimálnosti metodou pořadí, posouzení rizik srovnáním výstupů metod s rozdílnými váhovými vektory;
- V. - výstupem je výběr nejvhodnější (kompromisní) varianty, která je optimálním řešením.



**Obr. 15** Algoritmus procesu optimalizace aplikací multikritériálních metod

Výběr nejvhodnější varianty lze ovlivnit posouzením podle požadavků platných technických norem ČSN již na III. úrovni optimalizačního procesu tak, že nevyhovující varianty jsou z procesu vyňaty. Případně je možné varianty takto posoudit až při jejich kvaziuspořádání na IV. úrovni procesu, protože některé

varianty nemusí splnit požadavky dané normami, ale mohou být přesto optimálním řešením. Takto zvolené varianty konstrukčních řešení lze po zvážení rizik vyřadit, případně přepracovat jejich technický návrh na takovou míru, aby normové požadavky splnily.

#### 4.3.2 Sestavení hodnotících kritérií a stanovení vektoru vah $\nu$

Bylo vybráno 6 relevantních hodnotících kritérií, která tvoří klíčové faktory pro multikriteriální optimalizační procesy a nejsou mezi sebou v přímé závislosti:

- **Minimální povrchová teplota (faktor  $f_1$ )**

Největší důraz multikriteriálního hodnocení je kladen na tepelně technické parametry stavebních detailů, kterými se podrobněji zabývala předchozí kapitola 4.2. Tyto termofyzikální vlastnosti jsou však velmi často v kontradikci především s faktorem ekonomickým, ale také s pracností daného konstrukčního řešení.

Hodnota veličiny minimální povrchové teploty  $\theta_{si}$  [°C], která byla zvolena jako hlavní ukazatel pro jednotlivé varianty, je převzata z výpočetních modelů v kapitole 4.2.

- **Hmotnost (faktor  $f_2$ )**

Jedná se o celkovou hmotnost  $m$  [kg] konstrukčních detailů. Vyšší hmotnost stavebních prvků užitých v konstrukčních detailech má negativní vliv na dopravu materiálu (jejíž cena není promítnuta do celkové ceny stavebních detailů), manipulaci na staveništi a především zatížení stavebních konstrukcí, které ovlivňuje návrh základových konstrukcí a dalších nosných prvků objektů.

- **Cena (faktor  $f_3$ )**

Faktor určuje ekonomickou hodnotu konstrukčního detailu. Cena v [Kč] je souborem nákladů na stavební práce, materiály, stroje, výrobní režie, ostatní přímé náklady a zisk podle sborníku cen stavebních prací pro rok 2013 dle JKSO z databází užitých počítačové aplikace RTS Stavitel+. V ceně není započítána daň z přidané hodnoty (DPH) a doprava materiálů na staveniště, která je individuální pro každou stavbu. Je třeba dodat, že při krátkodobém stanovení ekonomického hodnotícího faktoru v praxi lze podřídít jeho sestavování momentálním tržním cenám a nejvýhodnějším nabídkám výrobců (resp. prodejců) dle vhodných lokalit.

- **Pracnost normová (faktor  $f_4$ )**

Tento faktor charakterizuje složitost konstrukčního řešení, tedy časový interval realizace dle příslušných stavebních prací v [Nh]. Pro určení hodnot pracnosti byl využit opět software RTS Stavitel+ 2013 firmy RTS, a. s. s příslušnou databází.

- **Ekologická zátěž (faktor  $f_5$ )**

Datové podklady byly získány z materiálových specifikací výrobců a datové banky GaBi profi database. Do faktoru jsou zahrnuty údaje o získávání vstupních surovin, energiích, výrobním procesu a dopravě. Výstupní data jsou v charakterizačním modelu CML 2001 a dále pro snadné porovnání normalizovány

na bezrozměrná čísla. Tento hodnotící faktor žádným způsobem nezohledňuje užití druhotných surovin při výrobě stavebních prvků navržených v konstrukcích.

- **Aplikace druhotných surovin (faktor  $f_6$ )**

Pro vyjádření množství aplikace druhotných surovin je do analýzy zaveden a definován koeficient hmotnostního podílu druhotných surovin  $C_{srm}$  [%]. Tato veličina vyjadřuje souhrnné množství surovin vzniklých recyklací odpadů a jejich podíl na celkovém množství stavebních materiálů užitých v konstrukčním detailu.

Informace o obsahu odpadních surovin v užitých stavebních materiálech byly převzaty od jednotlivých výrobců a technické literatury.<sup>15 16 17</sup> Vzhledem k tomu, že se jedná o experimentální kritériální faktor upravující metodiku hodnocení, bude vždy multikritériální analýza provedena nejen s jeho aplikací, ale i samostatně pouze pro pět faktorů.

Zvolené hodnotící faktory umožňují komplexní evaluaci jednotlivých konstrukčních detailů multikritériální analýzou. Z hlediska odborného (projekční práce) je zastoupena míra tepelně izolačního účinku ( $f_1$ ), hmotnost stavební konstrukce ( $f_2$ ) a složitost konstrukčního řešení v podobě jeho pracnosti při sestavení konstrukčního detailu ( $f_4$ ). Ekonomický aspekt (často výchozí stanovisko pro investory, resp. stavebníky) představuje cena konstrukčního řešení ( $f_3$ ). Moderní přístup představuje implementované environmentální hledisko stanovující meze šetrnosti k životnímu prostředí, tedy environmentální dopady stavební konstrukce ( $f_5$ ) a množství užitých odpadových materiálů jako surovin pro recyklaci ( $f_6$ ).

Vektor vah byl stanoven ve čtyřech variantách, aby byla analýza dat ověřena pro dva alternativní algoritmy pro vytváření kritériálních podmínek této analýzy a dále mohl být samostatně zkoumán přínos užití materiálů s obsahem druhotných surovin v celkovém hodnocení. První dvě varianty jsou určeny metodou párového srovnávání pro analýzy s hodnotícími faktory  $f_1$  až  $f_5$  a  $f_1$  až  $f_6$ . Druhá dvojice vektorů je pro srovnání a určení přesnosti metod stanovena postupem definovaným Saatyem. Dominantní je samozřejmě tepelně technické kritérium minimální povrchové teploty jako ústřední faktor analýzy.

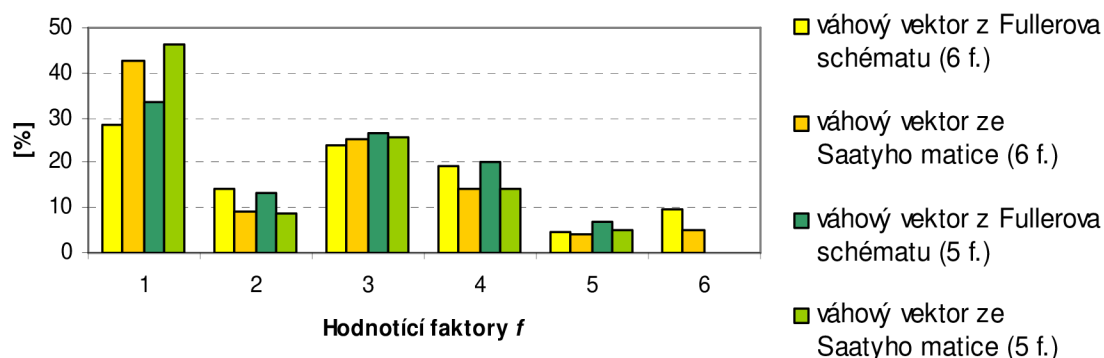
Pro pět hodnotících faktorů je ve srovnání na Obr. 16 s váhovým vektorem určeným z Fullerova schématu vektor vah vypočtený ze Saatyho matice odlišný pouze v jednotlivých poměrech důležitosti faktorů mezi sebou. Pořadí důležitosti faktorů však zůstává neměnné. Saatyho model významně posiluje váhu faktoru  $f_1$  a mírně snižuje váhy faktorů  $f_2, f_4$ .

---

<sup>15</sup> Foamglas.cz. *Foamglas Perinsul - Technický list*. 28. 6. 2010 [cit. 2013-19-9]. Dostupné na World Wide Web: <[http://www.foamglas.cz/katalogy/pds\\_perinsul\\_cz\\_2011.pdf](http://www.foamglas.cz/katalogy/pds_perinsul_cz_2011.pdf)>.

<sup>16</sup> VOJTĚCH, D. *Kovové materiály*. Praha: VŠCHT, 2006. 185 s. ISBN 80-7080-600-1.

<sup>17</sup> European Aluminium Association. 2009 [cit. 2013-20-9] Dostupné na World Wide Web: <<http://www.alueurope.eu/>>



**Obr. 16** Vektory vah pro hodnotící faktory z Fullerova schématu a Saatyho matice

Při porovnání váhových vektorů (Obr. 16) se šesti hodnotícími faktory lze dojít ke stejnému závěru jako v předchozím srovnání u pětifaktorového vážení hodnotících kritérií. Lze jen dodat, že při sestavení váhového vektoru Saatyho modelem je významněji snížena také důležitost hodnotícího faktoru  $f_6$ .

### 4.3.3 Konstrukční detail A - atika

V prvním kroku byla provedena analýza s pěti hodnotícími faktory k nalezení optimálního typu konstrukce s hypotetickým tepelně izolačním materiálem, který má stejné fyzikální parametry ve všech konstrukčních detailech stejné a liší se pouze svou polohou zabudování v konstrukci, příp. plochou (resp. objemem), kterou v konstrukci v rámci tepelně izolační vrstvy pokrývá.

**Tab. 4** Multikriteriální analýza stavebního detailu A zkoumající pouze varianty konstrukčního řešení

Váhový vektor stanovený Fullerovým schématem				Váhový vektor stanovený ze Saatyho matice			
WSA	TOPSIS	CDA	Výsledné seřazení	WSA	TOPSIS	CDA	Výsledné seřazení
A6.2	A6.2	A6.2	A6.2	A6.2	A6.2	A6.2	A6.2
A6.1	A6.1	A6.1	A6.1	A6.1	A6.1	A6.1	A6.1
A4.2	A4.2	A4.2	A4.2	A5.2	A5.2	A5.2	A5.2
A3.2	A4.1	A3.2	A3.2	A4.2	A5.1	A4.2	A4.2
A5.2	A3.2	A1	A1	A3.2	A4.2	A3.2	A3.2
A1	A1	A5.2	A4.1	A4.1	A4.1	A4.1	A4.1 + A5.1
A4.1	A2	A4.1	A5.2	A5.1	A3.2	A5.1	-
A2	A5.2	A2	A2	A1	A1	A1	A1
A3.1	A3.1	A3.1	A3.1	A2	A2	A3.1	A2
A5.1	A5.1	A5.1	A5.1	A3.1	A3.1	A2	A3.1

Výsledné pořadí analyzovaných variant (Tab. 4) vypovídá o velké efektivnosti konstrukčního řešení se zateplením pod atikovou nadezdívkou (A6.x). Varianta A6.1 s vertikální změnou konstrukce však nepřináší takový tepelně technický efekt, aby obstála v ostatních hodnotících faktorech s variantou A6.2. Proto je vhodné variantu A6.1 vyloučit a věnovat se nadále v optimalizačních metodách pouze variantě A6.2. Stejným způsobem, jako je uvedeno v úvodu této kapitoly, byly seříděny výsledky multikriteriálních výpočtových metod a sestaveny přehledné tabulkové výstupy.



Tab. 5 Multikriteriální analýza s pěti hodnotícími faktory pro konstrukční detail A

Analýza pro 5 faktorů							
Váhový vektor stanovený Fullerovým schématem				Váhový vektor stanovený ze Saatyho matice			
WSA	TOPSIS	CDA	Výsledné seřazení	WSA	TOPSIS	CDA	Výsledné seřazení
A4.2	A6.2.c	A4.2	A4.2	A5.2	A6.2.c	A5.2	A5.2
A5.2	A6.2.e	A6.2.c	A6.2.c	A6.2.c	A5.2	A6.2.c	A6.2.c
A6.2.c	A4.2	A6.2.e	A6.2.e	A6.2.e	A6.2.e	A6.2.e	A6.2.e
A3.2	A4.1	A3.2	A3.2	A4.2	A5.1	A4.2	A4.2
A6.2.e	A2	A5.2	A5.2	A5.1	A4.2	A5.1	A5.1
A6.2.f	A3.2	A1	A4.1	A6.2.f	A4.1	A4.1	A4.1
A4.1	A1	A4.1	A1	A4.1	A6.2.f	A6.2.f	A6.2.f
A1	A3.1	A2	A2	A3.2	A2	A3.2	A3.2
A2	A5.2	A3.1	A3.1 + A6.2.f	A1	A1	A1	A1
A3.1	A6.2.f	A5.1	-	A2	A3.2	A3.1	A2
A5.1	A5.1	A6.2.f	A5.1	A3.1	A3.1	A2	A3.1
Analýza pro 6 faktorů							
A6.2.c	A6.2.c	A6.2	A6.2	A5.2	A6.2.c	A6.2.c	A6.2.c
A4.2	A6.2.e	A4.2	A4.2	A6.2.c	A5.2	A5.2	A5.2
A5.2	A4.2	A3.2	A6.2.e	A4.2	A6.2.e	A4.2	A6.2.e + A4.2
A3.2	A4.1	A6.2.e	A3.2	A6.2.e	A5.1	A6.2.e	-
A6.2.e	A3.2	A5.2	A5.2 + A4.1	A6.2.f	A4.2	A5.1	A5.1
A6.2.f	A1	A1	-	A5.1	A4.1	A3.2	A6.2.f
A4.1	A2	A4.1	A1	A3.2	A6.2.f	A4.1	A3.2 + A4.1
A1	A3.1	A3.1	A6.2.f + A2	A4.1	A3.2	A6.2.f	-
A2	A6.2.f	A2	-	A1	A1	A1	A1
A3.1	A5.2	A6.2.f	A3.1	A2	A2	A3.1	A2
A5.1	A5.1	A5.1	A5.1	A3.1	A3.1	A2	A3.1

Pokud je sledována efektivita aplikace kompozitního materiálu (A6.2.c), tak v první analýze toto řešení s kompozitním materiálem nedosahuje pouze výše efektivity ekonomické verze tepelně technického řešení varianty A4.2, která spočívá v tepelně technické ochraně vnější části atikové nadezdívky. Konstrukční řešení A4.2 nemusí vždy splňovat normové požadavky jako v tomto případě pro tloušťku tepelně izolačního materiálu  $d = 100$  mm. Ve druhé analýze s větším důrazem na tepelně technický faktor vnitřní povrchové teploty nemůže již ekonomicky šetrná varianta zateplení A4.2 svou efektivitou dosáhnout na variantu A6.2.c. Neoptimálnějším řešením je varianta A5.2 s kompletním tepelně technickým opatřením, jehož součástí je kontaktní zateplovací systém fasády.

Provedení multikriteriálních analýz se zapojením šestého hodnotícího faktoru  $f_6$  přináší mírně odlišné výsledky (Tab. 5). Z uvedených výsledků jednotlivých vícekritériálních hodnocení je také patrné, že některé technické návrhy pro provedení tepelně izolačního opatření mohou být nejen neefektivní, ale dokonce do původní konstrukce bez tepelně izolačního řešení vnášejí v komplexním hodnocení jistá zhoršení konstrukčních parametrů.

Výslednou kompromisní variantou se z výstupu multikriteriální analýzy stává konstrukční řešení A6.2.c. Jako optimální řešení lze pojmout také varianty A5.2, příp. A6.2.e. Z celkového hlediska je zřejmé, že aplikace kompozitního materiálu, jehož surovinový základ na bázi druhotných zdrojů je hodnotícím faktorem  $f_6$  kladně klasifikován, prokazuje svou optimální funkčnost v dané konstrukci.

Jak již bylo podrobněji popsáno v kapitole 3.3.5, vzhledem k tomu, že variant konstrukčního detailu A je větší množství a vstupní data tak mohou být méně přehledná, je vhodné aplikovat další metodu, která na rozdíl od metod multikriteriálních analýz přináší kromě pořadí podle efektivity další přínosné informace. Vzhledem k tomu, že hodnotící faktor koeficientu hmotnostního podílu druhotných surovin ( $f_6$ ) byl sestaven jako experimentální pro posouzení zdrojů vstupních surovin, není vhodné ho dále užívat v algoritmech stanovení efektivity vlastností aplikace termoizolačních bloků (varianta A6.2.c). Jako výstupní kritérium byl zvolen maximalizační hodnotící faktor  $f_1$ , který představuje výslednou tepelně technickou kvalitu konstrukčního řešení. Ostatní minimalizační hodnotící faktory ( $f_2 - f_5$ ) jsou považovány za vstupy, které lze ovlivnit v rámci optimalizace.

**Tab. 6** Výsledky analýzy datových obalů pro zjištění míry efektivity variant

Ozn. konstrukční varianty	Hodnocení [%]	Efektivita	Superefektivnost [%]	Pořadí
A1	91,9	-		9
A2	92,1	-		8
A3.1	90,8	-		11
A3.2	91,8	-		10
A4.1	95,6	-		7
A4.2	96,4	-		6
A5.1	97,7	-		5
A5.2	100,0	+	110,2	1
A6.2.c	100,0	+	105,4	3
A6.2.e	100,0	+	101,4	4
A6.2.f	100,0	+	109,1	2

Ve vztahu k množství vstupů je shledáno metodou DEA více variant jako efektivních (Tab. 6). Vyjádření efektivity variant potvrzuje závěr předešlých multikriteriálních analytických výpočtů. Do množiny efektivních konstrukcí byla vybrána varianta A5.2 a skupina variant A6.2.x. Aby bylo možné rozhodnout o přesnějším pořadí mezi zvolenými efektivními variantami a případně stanovit optimalizační požadavky na jednotlivé faktory, byl sestaven ještě tabulkový výstup z metody superefektivnosti (Tab. 6). Z výstupů v Tab. 6 lze odvodit, že progresivní konstrukční detail A6.2.c je efektivní při porovnání poměru vstupů a výstupu, ale mezi ostatními efektivními variantami má určité deficity. V Tab. 7 je srovnání efektivity jednotlivých vstupních parametrů a doporučená úprava jejich hodnot tak, aby se tato jednotka stala tou nejefektivnější a tedy konkurence schopnou alternativou k nynějším stavebně technickým řešením.

**Tab. 7** Porovnání efektivity parametrů pro variantu konstrukčního detailu A6.2.c

A6.2.c			
Parametr	Stávající hodnota	Upravená hodnota	Rozdíl [%]
$T$ [°C]	14,015	14,015	0,00
$m$ [kg]	1210,70	1259,89	4,06
Cena [Kč]	5780	6093	5,42
Pracnost [Nh]	4,44	4,68	5,42
Ekologická zátěž [ $\cdot 10^{-9}$ ]	2,445	2,240	-8,24

Analýza prokázala, že největším nedostatkem konstrukčního detailu A6.2.c je jeho ekologická zátěž, kterou je třeba snížit téměř o 10 %. Takové snížení ekologického dopadu lze realizovat na úkor zvýšení ceny přibližně o 5 %. Jedná se vlastně o doporučení pro optimalizaci nejen vlastního konstrukčního detailu, ale též výrobního procesu termoizolačních bloků z kompozitního materiálu.

#### 4.3.4 Konstrukční detail B - ukončení ploché střechy okapem

Analýza byla provedena přímo na třech variantách vyznačujících se zároveň rozdílným konstrukčním a konkrétním materiálovým provedením. Výstupy analýz provedených pro čtyři sestavené váhové vektory ( $v_{1f}$ ,  $v_{2f}$ ,  $v_{1s}$ ,  $v_{2s}$ ), resp. pro pět a následně šest hodnotících faktorů jsou uvedeny v Tab. 8.

**Tab. 8** Výstupy multikriteriálních analýz pro konstrukční detail B

Analýza pro 5 faktorů							
Váhový vektor stanovený Fullerovým schématem				Váhový vektor stanovený ze Saatyho matice			
WSA	TOPSIS	CDA	Výsledné seřazení	WSA	TOPSIS	CDA	Výsledné seřazení
B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1
B3	B3	B3	B3	B3	B3	B3	B3
B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2
Analýza pro 6 faktorů							
B1	B3	B1	B1	B1	B3	B1	B1
B3	B1	B3	B3	B3	B1	B3	B3
B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2

Jen malou odlišnost přináší hodnocení se šesti hodnotícími faktory v pořadí výsledků pro metodu TOPSIS, kde je preferováno konstrukční řešení B3. Konstrukční řešení B1 s dřevěnými prvky lze zvolit za kompromisní variantu. I když je po tepelně technické stránce horší než varianta s kompozitním materiálem B3, je oproti této variantě ekonomičtější a environmentálně šetrnější. Nutné je však uvést, že při analýze se šesti hodnotícími faktory je takový výsledek stanovený metodou pořadí velmi těsný a v rámci tolerance je možné považovat také konstrukční řešení B3 za optimální. Nejhorší možností bylo stanovení užití ocelových konstrukčních prvků (varianta B2), které je považováno za neoptimální řešení.

V závěru lze konstatovat, že tradiční stavební materiály, jakými jsou i dřevěné prvky, lze nadále užívat v moderních stavbách, avšak vždy s přihlédnutím k dodržení požadované tepelné ochrany stavebního detailu. Pokud nebudou již dřevěné prvky vyhovovat, lze je vhodně zaměnit za progresivní izolační materiály s kvalitními mechanickými vlastnostmi pro přenos zatížení a umístění kotevních prvků klempířských výrobků a tím se vyhnout náročné aplikaci kovových konstrukcí, které vytváří časté tepelné mosty a vyžadují náročnou údržbu.

#### 4.3.5 Konstrukční detail C - průnik nosné konstrukce střešním pláštěm

Po provedení multikriteriálních analýz na dvou variantách s různými způsoby aplikace tepelně izolačního materiálu o rozdílné tepelné vodivosti byly sestaveny



následující tabulkové výstupy. Výpis (Tab. 9) obsahuje výsledky z multikriteriálního hodnocení užitím pěti hodnotících faktorů. Zcela identické výsledky platí i pro analýzu se šesti faktory.

**Tab. 9** Výstupy multikriteriálních analýz pro konstrukční detail C

Váhový vektor stanovený Fullerovým schématem				Váhový vektor stanovený ze Saatyho matice			
WSA	TOPSIS	CDA	Výsledné seřazení	WSA	TOPSIS	CDA	Výsledné seřazení
C2	C3	C2	C2	C2	C3	C2	C2
C3	C2	C3	C3	C3	C2	C1	C3
C1	C1	C1	C1	C1	C1	C3	C1

Výrazně se projevuje předpoklad neefektivnosti konstrukčního řešení C1, představujícího užití tradičních tepelně izolačních materiálů. I při srovnání s variantou C3, kdy pronikající konstrukce střešním pláštěm není izolována žádným způsobem, vychází aplikace tradičního řešení (dle C1) v rámci výrazné tepelně izolační účinnosti střešního pláště poměrně nepřínosná při širším srovnání množství užitého materiálu, pracnosti řešení a jeho ceně.

Závěrem lze konstatovat, že multikriteriální hodnocení tohoto konstrukčního detailu potvrdilo tvrzení ze závěru kapitoly 4.2.3 o tepelně izolační rezervě varianty C2. Kompozitní materiál na bázi druhotných surovin je tak vhodným stavebním prvkem pro tepelně technické řešení zmíněného konstrukčního detailu. Pokud je v rámci pasivní výstavby nutné snížit energetické ztráty objektu na minimum, je vhodné, pokud to dostupné tepelně izolační materiály svými vlastnostmi umožňují, přiklonit se k řešení konstrukčního detailu podle optimálně zvolené kompromisní varianty C2.

#### 4.3.6 Komparace užitých tepelně izolačních materiálů

Pro komplexnost výsledků multikriteriálního hodnocení je nutné ještě na závěr analyzovat zvláště užitá tepelně izolační materiály z uvedených variant konstrukčních detailů. Tímto způsobem lze získat výsledek pouze pro porovnání jejich materiálových vlastností a zjistit míru efektivnosti vyvíjeného kompozitního materiálu navrhovaného ve variantách A6.2.c, B3, C2 nezávisle na způsobu konstrukčního řešení, v kterém je tento materiál aplikován.

Pro objektivní srovnání byly analyzovány jen materiály pro přenášení většího zatížení. Kromě dnes již poměrně rozšířeného materiálu pěnového skla a zkoumaného kompozitního materiálu je do multikriteriální analýzy zařazen jeden z poměrně moderních, avšak ekonomicky nákladných materiálů, které se objevily na trhu - purenit. Převážná část datové základny pro multikriteriální analytický výpočet byla sestavena z dat obsažených v technických listech výrobců (Tab. 10). Pro termoizolační blok z kompozitního materiálu byla užitá také data z kapitoly 3.4.1, která se zabývá stanovením nasákavosti tohoto materiálu, aby tak byl rozšířen počet poměřovaných vlastností.

**Tab. 10** Vstupní data multikriteriální analýzy tepelně izolačních materiálů

Ozn. varianty	Název materiálu	Součinitel tepelné vodivosti $\lambda$ [W/mK] - $f_{m1}$ -	Pevnost v tlaku $\sigma$ [MPa] - $f_{m2}$ -	Objem. hmotnost $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ] - $f_{m3}$ -	Nasákavost $c$ [%] - $f_{m4}$ -	Cena Kč/m <sup>3</sup> - $f_{m5}$ -	Koeficient podílu druhotných surovin $C_{srm}$ [%] - $f_{m6}$ -
M1	Pěnové sklo Perinsul	0,050	0,45*	165	0	49899	66
M2	Purenit (PIR - deska)	0,086	5,5	600	2,5	55000	0
M3	Kompozitní materiál	0,090	3,5** (5)	480***	3***	10909	100

**Poznámky:**

\* Výrobce udává hodnotu pevnosti v tlaku 1,6 MPa dle EN 826 přílohy A, dále však uvádí výpočtovou pevnost v tlaku po započtení bezpečnostního koeficientu 0,45 MPa.

\*\* Pevnost v tlaku kompozitního materiálu je součástí ještě neukončeného vědeckého zkoumání. Předpoklady a dílčí experimentální zkoušky nasvědčují hodnoty v rozsahu 2 - 5 MPa.<sup>18</sup> Byla uvažována průměrná hodnota.

\*\*\* Pro danou aplikaci byla stanovena maximální přípustná nasákavost materiálu  $c = 3\%$ , která, jak bylo zjištěno v kapitole 3.4.1. odpovídá hodnotám minimální objemové hmotnosti  $\rho = 480 \text{ kg/m}^3$ .

Pro provedení analýzy bylo sestaveno šest hodnotících faktorů. Stanovení váhového vektoru  $v_{3f}$  podléhá následujícímu klíči: Hlavní důraz je kladen na pevnost v tlaku, součinitel tepelné vodivosti, dále pak ekonomickou hodnotu a nasákavost. Méně podstatné parametry jsou objemová hmotnost a množství druhotných surovin užitých při výrobě izolačního materiálu (koeficient podílu druhotných surovin).

Výsledky jsou uvedeny v Tab. 11. Nelze si pod nimi však představit jednoznačné určení, který tepelně izolační materiál je nejlepší pro své vlastnosti. Jedná se pouze o srovnání skupiny vybraných a známých parametrů, které rozhodují o vhodnosti aplikace materiálu v konstrukčních detailech a především jejich porovnání s nově vyvíjeným kompozitním materiálem na bázi druhotných surovin, který je přednostně určen pro stavební detaily, ve kterých je vystaven větším hodnotám statického zatížení.

**Tab. 11** Výstupy multikriteriální analýzy materiálových variant

Multikriteriální hodnocení stávajících parametrů				Multikriteriální hodnocení po dosažení upravených parametrů varianty M3			
WSA	TOPSIS	CDA	Výsledné seřazení	WSA	TOPSIS	CDA	Výsledné seřazení
M1	M2	M2	M2	M3	M3	M3	M3
M3	M3	M3	M3	M1	M2	M2	M2
M2	M1	M1	M1	M2	M1	M1	M1

Z výsledků je patrné, že kompozitní materiál má mezi ostatními stavebními hmotami stabilní pozici. Dále lze definovat některé technické překážky pro užití kompozitního materiálu v praxi. Především se jedná o vyšší objemovou hmotnost, která nepříznivě ovlivňuje náročnost dopravy stavebních prvků a manipulaci s nimi. I normová pracnost při provádění stavby může být tímto parametrem značně

<sup>18</sup> MATĚJKA, L. *Progresivní konstrukční detaily obvodových plášťů s využitím druhotných surovin*. Brno: VUTIUM, 2013. 42 s. ISBN 978-80-214-4679-3.

ovlivněna. Předností materiálu je vyšší pevnost v tlaku, kterou je ještě možné zvyšovat a tím dosáhnout optimálního rozložení parametrů. Toto tvrzení je doloženo druhým optimalizačním hodnocením, kde varianta M3 po úpravě parametru pevnosti v tlaku z průměrné hodnoty 3,5 MPa na hodnotu maxima 5 MPa představuje tu neoptimálnější. Příznivé pro kompozitní materiál by bylo snížení jeho součinitele tepelné vodivosti.

## 5 ZÁVĚR PRO PRAXI A DALŠÍ ROZVOJ VĚDY

Optimalizace konstrukčních detailů je důležitým procesem s mnoha faktory, které do něj vstupují. Zásadním se stává výběr vhodného stavebního materiálu, konstrukčního řešení a důsledné porovnání s alternativami.

Výzkumem byl zpracován přínosný teoretický základ zkoumané problematiky, v jehož rámci byly zjištěny a komparovány vlastnosti několika variant vybraných konstrukčních detailů jednoplášťových plochých střech v návaznosti především na použití dutinových keramických zdících prvků pro jednovrstvé konstrukce, které se vyznačují většími svislými tepelnými toky (tepelné mosty v ose  $y$ ). Práce prezentuje současný stav při možnostech konstrukčních návrhů pro stavební detaily. Z takové datové základny byly optimalizačním procesem zvoleny nejvhodnější konstrukční varianty jednotlivých detailů a zároveň analýzou stanoveny závěry, proč tomu tak je. Tyto informace jsou vhodné nejen pro oblast praxe, ale také pro další vědecký výzkum.

Na základě prostudované metodiky multikriteriálních rozhodovacích procesů byl předložen návrh algoritmu inovačního optimalizačního procesu snižující riziko z důsledku realizace neoptimálních konstrukčních návrhů. Navržený postup není absolutním návodem pro návrh konstrukčních detailů, protože na průběh optimalizačního procesu působí celá řada rizikových faktorů, které mohou tento proces negativně ovlivnit. Pokud by se však stal takto sestavený postup součástí uceleného inženýrského postupu při projektování konstrukčních návrhů, konečný výsledek realizovaných konstrukčních řešení by mohl pozitivně ovlivnit. To by vedlo v praxi ke snížení ekonomických nákladů a zvýšení konkurenceschopnosti.

Protože byla práce zaměřena také na aplikaci progresivního stavebního prvku na bázi druhotných surovin (termoizolační blok z kompozitního materiálu), optimalizace probíhala ve dvou environmentálních úrovních. První využívala při optimalizaci pouze environmentálního dopadu při výrobě stavebních prvků a při druhé byl definován a zaveden koeficient hmotnostního podílu druhotných surovin  $C_{srm}$  [%] jako inovační hodnotící faktor.

Nejrozmanitějším konstrukčním detailem byla atika ploché jednoplášťové střechy, která nabízí několik různých konstrukčních i materiálových řešení. V první fázi bylo hledáno optimální konstrukční řešení a ověřeno, že přístup k eliminaci tepelného mostu ve variantě, která umožňuje užití termoizolačních bloků z vyvíjeného kompozitního materiálu na bázi druhotných surovin, patří k těmto

optimálním řešením. Následná optimalizace se týkala již přímo aplikovaných různých tepelně izolačních materiálů v těchto konstrukčních detailech, kde bylo opět prokázáno, že užitím tepelné izolace z kompozitního materiálu lze dosáhnout optimálního konstrukčního provedení.

Dalším optimalizační analýzou zkoumaným konstrukčním detailem byl stavební detail ukončení ploché střechy okapem bez přesahu střešního pláště. Bylo prokázáno, že konstrukce ocelových rámu v tomto případě nepatří mezi vhodné (optimální) varianty. Dřevěné prvky lze nadále užívat v moderních stavbách, avšak vždy s přihlédnutím k dodržení platnou technickou normou požadované tepelné ochrany stavebního detailu. Pokud by dřevěný prvek přestal vyhovovat, bylo teoreticky ověřeno, že konstrukci lze nahradit aplikací termoizolačních bloků z kompozitního materiálu.

Průnik nosné vertikální konstrukce střešním pláštěm byl posledním z řady zkoumaných konstrukčních detailů. V tomto stavebním detailu byla výzkumem teoreticky prokázána optimálnost užití konstrukční varianty s aplikací tepelně izolačního materiálu v místě tepelně izolačního pláště střešní konstrukce pod nosnou vertikální stěnovou či sloupovou konstrukcí. Jako užitý optimální stavební prvek byl vyhodnocen izolační blok kompozitního materiálu.

Vlastnosti všech navržených konstrukčních detailů byly zároveň srovnávány s požadavky platných tepelně technických norem. Pro technickou praxi jsou tyto nově zjištěné poznatky přínosnými informacemi, které by měly mít vliv na omezení narůstajícího trendu provádění vnějších kompaktních zateplovacích systémů, které, ač nepochybně velice často poskytují vynikající tepelně izolační obálku budov, nemusí být vždy tím nejoptimálnějším řešením konstrukčního návrhu.

Optimalizačními metodami vícekriteriálního hodnocení byly komparovány a hodnoceny vlastní tepelně izolační materiály, které mají shodný způsob své aplikace (zabudování v konstrukci do míst vystavených vysokému tlaku při zatížení). Práce tak nově definuje některé překážky směřující k nutným úpravám technických parametrů na stanovené cílové hodnoty při vývoji termoizolačních bloků z kompozitního materiálu.

Praktické užití zjištěných informací lze nalézt při projekční činnosti výběrem vhodného stavebně konstrukčního řešení a řešení materiálového. Při nízkoenergetické a pasivní výstavbě nabývají konstrukční detaily řešené z tepelně technického hlediska mnohem větší váhy. Nelze se vymezit pouze na splnění základních požadavků platných technických norem pro zabránění případných poruch, které by nedostatečným provedením mohly vzniknout. Aplikaci vhodně zvolených stavebních materiálů v návaznosti na optimálně navrženou variantu konstrukčního provedení stavebního detailu lze též ušetřit velké množství energie, která je svázána s celým stavebním procesem od počátku návrhu objektu až po jeho užívání a případnou demolicí.

Součástí práce bylo zjištění a ověření efektivity aplikace nového tepelně izolačního materiálu na bázi druhotných surovin, který je ve stádiu vývoje. Tento materiál byl zkoumán také z hlediska fyzikálně materiálové vlastnosti nasákavosti. Výsledky experimentální laboratorní zkoušky prokázaly jeho dobré vlastnosti pro využití v navrhovaných konstrukčních detailech. Byl sestaven vztah závislosti nasákavosti na objemové hmotnosti materiálu tak, aby jej bylo možné využít při výrobním procesu. Přínosem bylo doplnění fyzikálních parametrů do souboru dat pro specifikaci vyvíjeného kompozitního materiálu.

Pro následný vědecký výzkum by bylo vhodné experimentálně ověřit další důležité fyzikálně mechanické parametry tohoto zkoumaného materiálu, které doposud ověřeny nebyly, nebo byly ověřovány jen předběžně a sestavit tak vícerozměrný regresní model, který by snadněji umožnil efektivně nastavovat výrobní vstupy podle požadavků při jeho následné aplikaci. Je zřejmé, že některé materiálové parametry nastavované při výrobě způsobují protikladné účinky na konečné vlastnosti produktu. Je tedy nanejvýš nutné neustále hledat optimální hodnoty těchto vstupních parametrů ve vztahu k tomu, aby na výrobním výstupu byly komplexně splněny všechny požadavky. Z oboru materiálového inženýrství je to především vlastnost tepelné vodivosti (např. i při různých teplotách), tepelné roztažnosti, pevnost v tlaku, požární odolnost, možnost povrchových úprav aj.

Správně užitá recyklace v průběhu životního cyklu výrobku musí být ekonomicky výnosná. Stává se stále více podstatnou součástí tržního systému a zároveň tak tvoří velkou část podstaty trvale udržitelného rozvoje. Počty a variabilita recyklovaných výrobků na trhu neustále stoupají. Aby toto platilo i nadále, je nezbytné proces recyklace stále zefektivňovat. Nutností je také řádně objasňovat velké části společnosti správné informace, aby došlo k rozptýlení mnohých obav široké veřejnosti, které plynou z neinformovanosti a z dezinformací v této oblasti.



## 6 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] Agenda 21 pro udržitelnou výstavbu. Praha: CIB Report Publication 237, ČVUT v Praze, 2001. 120 s. ISBN 80-01-02467-9.
- [2] Asociace pro rozvoj recyklace stavebních materiálů v České republice. *Podstata recyklace stavebních odpadů*. 2010 [cit. 2010-20-04]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.arism.cz>>.
- [3] BABUŠKA, I., STROUBOULIS, T. *The Finite Element Method and its Reliability*. UK, Oxford: Oxford University Press Inc., 2001. 736 s. ISBN 978-0198502760.
- [4] BAREŠ, R. A. *Kompozitní materiály*. Praha: SNTL, 1988. 325 s.
- [5] BENNETT, C. *Greening Your Home. Sustainable Options for Every System in Your House*. USA: The McGraw-Hill Companies, Inc., 2008. 192 s. ISBN: 978-0071642606.
- [6] BODNÁROVÁ, L. *Kompozitní materiály ve stavebnictví*. Brno: VUT v Brně, 2002. 122 s. ISBN 80-214-2266-1.
- [7] BROŽOVÁ, H., HOUŠKA, M., ŠUBRT, T. *Modely pro vícekriteriální rozhodování*. Praha: CREDIT, 2003. 178 s. ISBN 80-213-1019-7.
- [8] BULISOVÁ, J. at al. *Ottova všeobecná encyklopedie A-Ž ve dvou svazcích*. Praha: Ottovo nakladatelství, s. r. o., 2003. 1468 s. ISBN 80-7181-947-X.
- [9] CALKINS, M. *Materials for Sustainable Sites: A Complete Guide to the Evaluation, Selection, and Use of Sustainable Construction Materials*. New Jersey, Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2009. 480 s. ISBN: 978-0-470-13455-9.
- [10] COBB, A., B. *Earth chemistry*. USA: New York, Chelsea House, 2009. 130 s. ISBN: 07-910-9677-7.
- [11] COOPER, W., SEIFORD, L., ZHU, J. *Handbook on Data Envelopment Analysis*. USA: Springer US, 2011. 497 s. ISBN: 978-1-4419-6150-1.
- [12] Český statistický úřad. *Produkce, využití a odstranění odpadu v roce 2009*. 29. 8. 2010 [cit. 2011-09-11]. Dostupné na World Wide Web: <[http://www.czso.cz/csu/tz.nsf/i/produkce\\_vyuziti\\_a\\_odstraneni\\_odpadu\\_v\\_roce\\_2009](http://www.czso.cz/csu/tz.nsf/i/produkce_vyuziti_a_odstraneni_odpadu_v_roce_2009)>.
- [13] ČSN 73 1901 *Navrhování střech - Základní ustanovení*. Praha: Český normalizační institut 2011. 56 s.
- [14] ČSN EN 13965-1 (83 8001) *Charakterizace odpadů - Názvosloví - Část 1: Názvy a definice vztahující se k materiálu*. Praha: Český normalizační institut 2005. 48 s.
- [15] ČSN EN ISO 10211-1 (730551). *Tepelné mosty ve stavebních konstrukcích – Výpočet tepelných toků a povrchových teplot – Podrobné výpočty*. Praha: Český normalizační institut 2009. 60 s.
- [16] ČSN EN ISO 14683 (730561) *Tepelné mosty ve stavebních konstrukcích – Lineární činitel prostupu tepla - Zjednodušené metody a orientační hodnoty*. Praha: Český normalizační institut 2009. 28 s.
- [17] ČSN EN ISO 62 (64 0112) *Plasty – Stanovení nasákavosti ve vodě*. Praha: Český normalizační institut 2008. 32 s.
- [18] ČSN 73 0540-2 *Tepelná ochrana budov – Část 2: Požadavky*. Praha: Český normalizační institut 2011. 56 s.
- [19] ČSN 73 0540-4 *Tepelná ochrana budov – Část 4: Výpočtové metody*. Praha: Český normalizační institut 2005. 60 s.
- [20] ČSN EN ISO 1133 (640861) *Plasty – Stanovení hmotnostního (MFR) a objemového (MVR) indexu toku taveniny termoplastů*. Praha: Český normalizační institut 2006. 20 s.
- [21] DUCHÁČEK, V. *Polymery: Výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. 2. vyd. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 1995. 354s. ISBN 80-7080-241-3.

Pozn.: další zdroje jsou uvedeny v disertační práci.

## 7 SEZNAM VLASTNÍ LITERATURY

- [1] STRUHALA, K.; MATĚJKA, L.; STRÁNSKÁ, Z.; MATĚJKA, L.; PĚNČÍK, J. *Komplexní posouzení konstrukčního detailu atiky ploché střechy, 3. díl*. Stavebnictví, 2014, roč. 2014, č. 6-7, s. 37-39. ISSN: 1802-2030.
- [2] STRUHALA, K.; MATĚJKA, L.; STRÁNSKÁ, Z.; MATĚJKA, L.; PĚNČÍK, J. *Komplexní posouzení konstrukčního detailu atiky ploché střechy, 2. díl*. Stavebnictví, 2014, roč. 2014, č. 5, s. 30-34. ISSN: 1802-2030.
- [3] STRUHALA, K.; MATĚJKA, L.; STRÁNSKÁ, Z.; MATĚJKA, L.; PĚNČÍK, J. *Komplexní posouzení konstrukčního detailu atiky ploché střechy, 1. díl*. Stavebnictví, 2014, roč. 2014, č. 4, s. 40-44. ISSN: 1802-2030.
- [4] KALUŽOVÁ, A.; MATĚJKA, L. *Kompozitní materiál pro eliminaci tepelných mostů a jeho tepelně technické vlastnosti*. Juniorstav 2013. Brno: VUT v Brně, 2013. s. 1-4. ISBN: 978-80-214-4670-0.
- [5] MATĚJKA, L.; MATĚJKA, L.; PĚNČÍK, J. *Analysis of the influence of geometrical thermal bridges and their elimination by using a composite material based on secondary raw materials*. Advanced Materials Research, 2013, roč. 2013, č. 649, s. 45-48. ISSN: 1022-6680.
- [6] MATĚJKA, L.; PĚNČÍK, J.; KRÁLOVÁ, M.; KALUŽOVÁ, A.; MATĚJKA, L.; POSPÍŠIL, T. *Thermal Insulation Composite Material Based on Thermal Insulation Composite Material Based on Polymers - Determination of Water Absorption*. International Journal of Civil and Environmental Engineering, 2013, roč. 35, č. 2, s. 1141-1146. ISSN: 1701-8285.
- [7] KALUŽOVÁ, A.; PĚNČÍK, J.; MATĚJKA, L.; MATĚJKA, L.; POSPÍŠIL, T. *Thermal Insulation Composite Material Based on Polymers - Determination of Thermal Conductivity*. International Journal of Civil and Environmental Engineering, 2013, roč. 35, č. 2, s. 1176-1180. ISSN: 1701-8285.
- [8] POSPÍŠIL, T.; PĚNČÍK, J.; MATĚJKA, L.; MATĚJKA, L.; KALUŽOVÁ, A. *Impact of Outer Wall Insulation Method at the Reinforced Concrete Strip Footing on the Temperature Factor and Linear Heat Transfer Coefficient*. International Journal of Civil and Environmental Engineering, 2013, roč. 35, č. 2, s. 1169-1175. ISSN: 1701-8285.
- [9] POSPÍŠIL, T.; PĚNČÍK, J.; MATĚJKA, L.; MATĚJKA, L.; KALUŽOVÁ, A.; DOSTÁLOVÁ, D. *Solution of thermal bridge under the opening in the cladding by means of support structure for a doors threshold made of thermal insulation composite material*. Key Engineering Materials (print), 2013, roč. 531-532, č. 2013, s. 404-408. ISSN: 1013-9826.
- [10] MATĚJKA, L.; KALUŽOVÁ, A. *Vliv tepelné vodivosti na tepelně technické parametry konstrukčních detailů*. Juniorstav 2013. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2013. s. 466-466. ISBN: 978-80-214-4669-4.
- [11] MATĚJKA, L. *Optimalizace aplikace tepelně izolačního materiálu*. Juniorstav 2013. Brno: VUT v Brně, 2013. s. 50-50. ISBN: 978-80-214-4669-4.
- [12] STRUHALA, K.; MATĚJKA, L.; KALUŽOVÁ, A. *Vliv demografického vývoje na obytnou výstavbu, možné využití nebytových prostor pro bydlení*. Juniorstav 2012. Brno: VUT v Brně, 2012. s. 517-517. ISBN: 978-80-214-4393-8.
- [13] MATĚJKA, L.; MATĚJKA, L.; PĚNČÍK, J.; KALUŽOVÁ, A.; POSPÍŠIL, T.; DOSTÁLOVÁ, D. *Use of Thermal Insulation Composite Material Based on Secondary Raw Materials for Elimination of Thermal Bridge in the Structure of Flat Roof Parapet*. Applied Mechanics and Materials, 2012, roč. 2012, č. 174-177, s. 1455-1458. ISSN: 1660-9336.
- [14] KALUŽOVÁ, A.; PĚNČÍK, J.; MATĚJKA, L.; MATĚJKA, L.; POSPÍŠIL, T.; DOSTÁLOVÁ, D. *Production of thermal insulation composite material based on*

- polymers*. Advanced Materials Research, 2012, roč. 2012, č. 535- 537, s. 239-242. ISSN: 1022- 6680.
- [15] MATĚJKA, L.; MATĚJKA, L.; PĚNČÍK, J. *Konstrukční detail atiky ploché střechy s užitím tepelněizolačního materiálu na bázi druhotných surovin*. Zborník z konferencie s medzinárodnou účasťou Poruchy a obnova obalových konštrukcií budov. Košice: Technická univerzita v Košiciach, Stavebná fakulta, 2012. s. 381-386. ISBN: 978-80-553-0798- 5.
- [16] MATĚJKA, L.; KALUŽOVÁ, A.; STRUHALA, K. *Obecná problematika recyklace ve stavebním průmyslu*. JUNIORSTAV 2012 - Sborník anotací. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2012. s. 504-504. ISBN: 978-80-214-4393- 8.
- [17] PĚNČÍK, J.; MATĚJKA, L.; KALUŽOVÁ, A.; MATĚJKA, L.; DOSTÁLOVÁ, D.; POSPÍŠIL, T. *Development of thermal insulation composite material from recycled polymer and recycled glass*. Advanced Materials Research, 2012, roč. 2012, č. 487, s. 701-705. ISSN: 1022- 6680.
- [18] POSPÍŠIL, T.; PĚNČÍK, J.; MATĚJKA, L.; MATĚJKA, L.; KALUŽOVÁ, A.; DOSTÁLOVÁ, D. *Elimination of thermal bridge by thermal insulation composite material*. Advanced Materials Research, 2012, roč. 2012, č. 482- 484, s. 1654-1659. ISSN: 1022-6680.
- [19] MATĚJKA, L.; MATĚJKA, L.; PĚNČÍK, J. *Konstrukční detail ukončení ploché střechy z hlediska tepelných mostů*. Stavebnictví, 2012, roč. VI, č. 03/ 2012, s. 25-27. ISSN: 1802-2030.
- [20] KALUŽOVÁ, A.; MATĚJKA, L.; STRUHALA, K. *Vliv vnějšího prostředí na tepelnou vodivost materiálů*. JUNIORSTAV 2012 - Sborník anotací. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2012. s. 495-495. ISBN: 978-80-214-4393- 8.
- [21] MATĚJKA, L. *Aplikace recyklovaných materiálů ve stavebních konstrukcích*. Juniorstav 2011. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2011. s. 424 ISBN: 978-80-214-4232- 0.
- [22] KALUŽOVÁ, A.; MATĚJKA, L.; PĚNČÍK, J.; MATĚJKA, L. *Development of The Insulating Block Made of Secondary Raw Materials and Its Use in Building Structures*. Mezinárodní stavební konference CzechSTAV 2011. Hradec Králové: MAGNANIMITAS1, 2011. s. 1-7. ISBN: 978-80-904877-5- 8.
- [23] MATĚJKA, L.; MATĚJKA, L. *Využití recyklovaného materiálu HDPE v konstrukci paty zdiva pro kritéria vyhodnocování tepelných mostů*. Zborník z konferencie s medzinárodnou účasťou Poruchy a obnova obalových konštrukcií budov. Košice, Slovensko: Technická univerzita v Košiciach, Stavebná fakulta, 2011. s. 1-6. ISBN: 978-80-553-0651- 3.
- [24] MATĚJKA, L.; MATĚJKA, L. *Tepelnoizolačné kompozitné materiály na báze druhotných surovín*. Eurostav, 2011, roč. VII., č. speciál, s. 30-32. ISSN: 1336- 7617.
- [25] MATĚJKA, L.; MATĚJKA, L. *Analýza využití recyklovaného materiálu HDPE v konstrukci paty zdiva - eliminace tepelného mostu*. Budovy a prostředí 2010. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2010. s. 234-239. ISBN: 978-80-214-4155- 2.

## 8 ABSTRACT

This thesis deals with the optimization of structural details for flat single-leaf roofs.

In the first part of the thesis are characterized, classified and examined 3 groups of structural details for flat roof (flat roof parapet, gutter at flat roof without overhang of the roof cladding, intersection of the flat roof and vertical supporting structure). In every group one of these structural details is designed with use of modern composite material based on secondary raw materials (still in development process). The theory describes the current issue of thermal bridges at constructions and applicable legislative documents.

The next part introduces thermal engineering analysis (based on finite element method) of structures with annotated data outputs. The another main part of thesis provides with designed innovative optimization algorithm using multi-criteria decision analysis methods, which is then practically tested on the surveyed construction details.

The conclusion summarizes the results and provides with improvements based on completed research.

SHORT VERSION OF DISSERTATION