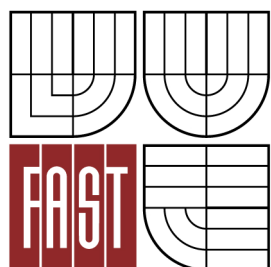




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV POZEMNÍHO STAVITELSTVÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF BUILDING STRUCTURES

OPTIMALIZACE KONSTRUKČNÍCH DETAILŮ JEDNOPLÁŠŤOVÝCH PLOCHÝCH STŘECH

THE OPTIMIZATION OF STRUCTURAL DETAILS FOR FLAT SINGLE-LEAF ROOFS

DISERTAČNÍ PRÁCE
DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Ing. LIBOR MATĚJKA, DiS.

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. LIBOR MATĚJKA, CSc., Ph.D., MBA

BRNO 2014

Abstrakt

Tato práce se zabývá optimalizací konstrukčních detailů plochých jednoplášťových střech.

V první části práce jsou charakterizovány, klasifikovány a zkoumány tři skupiny konstrukčních detailů pro ploché střechy (atika, ukončení střešní konstrukce okapem bez přesahu střešního pláště, průnik ploché střechy a svislé nosné konstrukce). V každé skupině je jedna z variant těchto konstrukčních detailů navržena s využitím moderního kompozitního materiálu na bázi druhotných surovin (stále v procesu vývoje). Teoreticky je popsána současná problematika tepelných mostů v konstrukcích a platné technické normy.

Další část se zabývá tepelně technickou analýzou (založené na metodě konečných prvků) konstrukčních detailů za účelem získání datových výstupů pro další šetření. Následující hlavní část práce poskytuje navržený inovativní optimalizační algoritmus s využitím analyzačních multikriteriálních rozhodovacích metod, který je pak prakticky testován na variantách zkoumaných konstrukčních detailů s ohledem na trvale udržitelný rozvoj ve stavebnictví. Výstupy jsou sledovány také z hlediska efektivity aplikace kompozitního materiálu na bázi druhotných surovin ve srovnání s tradičními postupy.

V závěru jsou shrnuty výsledky a ustanoveny závěry a inovace na základě dokončeného výzkumu.

Klíčová slova

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

Abstract

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

In the first part of the thesis, 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) are characterized, classified and examined. 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.

Keywords

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

Bibliografická citace

MATĚJKA, Libor. *Optimalizace konstrukčních detailů jednoplášťových plochých střech*. Brno, 2014. 130 s., 0 s. příl., příl. CD. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemního stavitelství. Vedoucí práce doc. Ing. Libor Matějka, CSc., Ph.D., MBA.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem disertační práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje. Dále prohlašuji, že elektronická forma odevzdané disertační práce je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 7.10.2014

.....
podpis autora

Ing. Libor Matějka, DiS.

Motto

„Pollution is nothing but the resources we are not harvesting. We allow them to disperse because we've been ignorant of their value.“

- Richard Buckminster Fuller -

Poděkování

Především bych na tomto místě chtěl poděkovat za cenné rady a odborné připomínky svému školiteli panu doc. Ing. Liboru Matějkovi, Ph.D., CSc., MBA.

Obsah

Úvod	3
1 Přehled o současné problematice optimalizace návrhu konstrukčních detailů jednoplášťových plochých střech z tepelně technického hlediska	9
1.1 Současné nízkoenergetické a pasivní budovy	9
1.2 Jednoplášťové ploché střechy	10
1.3 Problematika eliminace tepelných mostů stavebních objektů.....	11
1.3.1 Konstrukční detaily atiky plochých jednoplášťových střech	12
1.3.2 Konstrukční detail ukončení ploché jednoplášťové střechy u okapu.....	14
1.3.3 Konstrukční detail průniku vertikální konstrukce střešním pláštěm.....	14
1.4 Tepelně technické modelování a analýza konstrukčních detailů staveb	15
1.5 Teorie multikriteriální analýzy.....	15
1.6 Komparace vlastností konstrukcí z tradičních materiálů a z druhotných surovin....	16
1.6.1 Kvalita a trvanlivost	17
1.6.2 Fyzikální vlastnosti	17
2 Cíle dizertační práce.....	20
3 Zvolené metody zpracování disertační práce	22
3.1 Analýza tepelně technických modelů.....	22
3.1.1 Metoda konečných prvků	22
3.1.2 Modelování a simulace pomocí výpočetních programů.....	23
3.2 Teoretický výpočet technických veličin a normativní podklady.....	24
3.2.1 Definice a veličiny teplotního pole	24
3.2.2 Součinitel tepelné vodivosti	25
3.2.3 Lineární činitel prostupu tepla.....	25
3.2.4 Teplotní faktor vnitřního povrchu	27
3.3 Multikriteriální analýza	28
3.3.1 Obecný význam a základní pojmy	28
3.3.2 Aplikované vyhodnocovací metody.....	30
3.3.3 Matematické metody určování kvantitativních multiplikátorů	35
3.3.4 Metoda analýzy datových obalů.....	40
3.4 Experimentální měřící metody	42
3.4.1 Laboratorní stanovení nasákavosti kompozitního materiálu.....	43
3.4.2 Tepelně technické měření na reálném objektu	51

4	Výsledky práce a nové poznatky	54
4.1	Přehled členění a značení konstrukčních detailů s charakteristikou	54
4.1.1	Konstrukční detail A - ukončení ploché jednoplášťové střechy atikou	54
4.1.2	Konstrukční detail B - ukončení ploché jednoplášťové střechy okapem.....	55
4.1.3	Konstrukční detail C - průnik železobetonové konstrukce střešním pláštěm ..	58
4.2	Tepelně technická analýza užitím výpočetních modelů.....	59
4.2.1	Stanovení okrajových podmínek	59
4.2.2	Stanovení vstupních parametrů	60
4.2.3	Konstrukční detail A - ukončení ploché jednoplášťové střechy atikou	61
4.2.4	Konstrukční detail B - ukončení ploché jednoplášťové střechy okapem.....	76
4.2.5	Konstrukční detail C - průnik železobetonové konstrukce střešním pláštěm ..	78
4.3	Výběr optimálních variant multikriteriální analýzou	79
4.3.1	Návrh optimalizačního algoritmu.....	79
4.3.2	Sestavení hodnotících kritérií.....	81
4.3.3	Stanovení vektoru vah v	86
4.3.4	Konstrukční detail A - ukončení ploché jednoplášťové střechy atikou	90
4.3.5	Konstrukční detail B - ukončení ploché jednoplášťové střechy okapem.....	103
4.3.6	Konstrukční detail C - průnik nosné konstrukce střešním pláštěm.....	104
4.3.7	Komparace užitých tepelně izolačních materiálů.....	106
5	Závěr pro praxi a další rozvoj vědy.....	109
	Seznam použité literatury	112
	Seznam vlastní literatury	116
	Seznam použitých zkratk, symbolů a veličin	119
	Seznam obrázků	122
	Seznam tabulek	125
	Resumé	128

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. Zmíněná efektivita by měla být zajištěna již při úpravě odpadů, přípravě druhotných surovin a vlastní výrobě materiálů, zde se jedná především o ekonomickou a energetickou náročnost procesů. Současně je tak řešen i jeden z problémů rizika životního prostředí. Jedná se o environmentální dopady, které zahrnují především energetickou zátěž a emise CO₂, SO₂, NO_x. 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. Tyto souvislosti však nejsou mnohdy dostatečně respektovány a v některých případech zase příliš přeceňovány.

„Stavebnictví, které je charakteristické požíváním velkých objemů materiálů v relativně méně náročných technologiích, má předpoklady pro využívání materiálů získaných z terciární recyklace odpadů i z jiných odvětví průmyslu. Tím lze dosáhnout udržení již vytěžených přírodních zdrojů (často využívaných pro krátkodobou funkci v jiných průmyslových výrobcích) v materiálovém cyklu po delší dobu a podstatně tak omezit primární spotřebu přírodních surovinových zdrojů a produkcí odpadu.“¹

Obecně je stavební průmysl velmi významným prvkem se širokým množstvím zásahů do oblasti životního prostředí. Existuje několik možných hodnotitelských přístupů k posuzování ekologické výstavby a tedy i ve využívání recyklovaných materiálů. Příkladem je Posuzování životního cyklu (LCA – Life Cycle Assessment).

Základní principy a cíle trvale udržitelné výstavby jsou od roku 1999 definovány Agendou 21 pro udržitelnou výstavbu. Dále je vhodné definovat základní pojmy v této oblasti.

Definice základních pojmů:

- Trvale udržitelný rozvoj – „Trvale udržitelný rozvoj společnosti je takový rozvoj, který současným i budoucím generacím zachovává možnost uspokojovat jejich

¹ HÁJEK, Petr. *Sborník z konference - Pasivní domy*. 1. vyd. Brno: Centrum pasivního domu, 2005. Udržitelná výstavba budov - východiska a principy, s. 290.

základní potřeby a přitom nesnižuje rozmanitost přírody a zachovává přirozené funkce ekosystémů.“ (zákon o životním prostředí č. 17/1992 Sb.);

- Druhotné suroviny – „Surovina nebo materiál získaný z odpadu, který je způsobilý k dalšímu hospodářskému nebo jinému využití, který přitom zůstává odpadem až do dalšího zpracování.“²
- Recyklace – „Opětné využití surovin obsažených v odpadech z výroby, zemědělství a domácností.“³
- Ekotechnologie – „Výrobní a zpracovatelské průmyslové postupy, které zužitkují odpadové látky a nezatěžují životní prostředí.“⁴
- Environmentalismus – „Filozofický a psychologický směr zabývající se vztahem mezi vnějším (příroda) a vnitřním (člověk, společnost) prostředím. Důraz je kladen na určující vliv prostředí pro formování osobnosti a společnosti.“⁵

Produkce odpadů v České republice za rok 2009 vykazuje podle Českého statistického ústavu (Tab. 1) celkově 24,236 mil. tun. Z toho množství nebezpečného odpadu činí 1,511 mil. tun a ostatního je 22,725 mil. tun. Množství odpadů ze stavebnictví dosáhlo 9,747 mil. tun. Je tedy zřejmé, že objem odpadů vyprodukovaný ve stavebnictví převládá nad ostatními obory. V roce 2008 bylo celkové množství vyprodukovaného odpadu 25,869 mil. tun. Jedná se tedy o mírný pokles pro rok 2009.

² 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.

³ BULISOVÁ, J. at al. *Ottova všeobecná encyklopedie M-Ž ve dvou svazcích*. Praha: Ottovo nakladatelství, s. r. o., 2003. 1468 s. ISBN 80-7181-947-X.

⁴ BULISOVÁ, J. at al. *Ottova všeobecná encyklopedie A-L ve dvou svazcích*. Praha: Ottovo nakladatelství, s. r. o., 2003. 1468 s. ISBN 80-7181-947-X.

⁵ BULISOVÁ, J. at al. *Ottova všeobecná encyklopedie A-L ve dvou svazcích*. Praha: Ottovo nakladatelství, s. r. o., 2003. 1468 s. ISBN 80-7181-947-X.

Tab. 1 - Produkce odpadů v roce 2009 podle Českého statistického ústavu⁶

	Celkem	V tom odpady		Index 2009/2008
		Nebezpečné	Ostatní	
Produkce odpadů celkem	24236	1511	22725	93,7
V tom				
z podniků	20514	1495	19019	92,2
z toho: CZ-NACE				
zemědělství, lesnictví a rybnictví 01-03	176	6	170	69,3
těžba a dobývání 05-09	132	18	114	79,0
zpracovatelský průmysl	4232	533	3699	80,0
výroba a rozvod elektřiny, plynu tepla a klimatizovaného vzduchu 35	1721	25	1696	89,6
stavebnictví 41-43	10016	175	9842	94,0
doprava a skladování 49-53	243	41	203	82,7
činnost související s odpadními vodami, odpady a sanacemi 37-39	1975	616	1359	103,3
z obcí	3722	16	3706	102,7
z toho:				
komunální odpad	3310	7	3303	104,2

V současné době se v Evropě recykluje jen cca 10 – 30 % stavebního odpadu (údaj převzatý od federace recyklace stavebních odpadů F.I.R. – Federation Internationale du Recyclage).

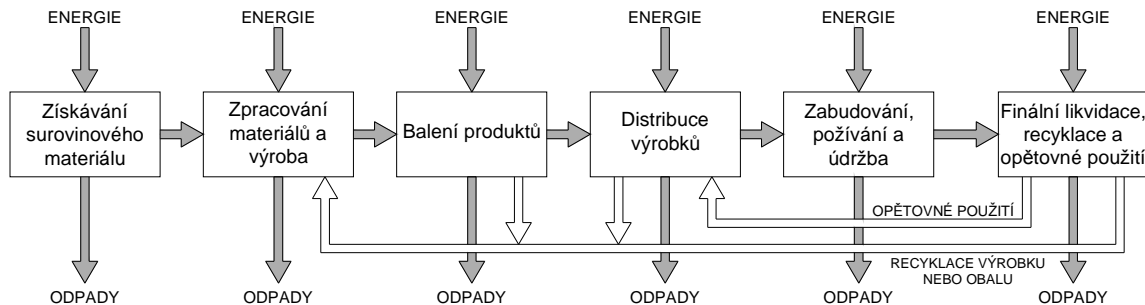
Důležitým hlediskem při recyklaci je kvalita výstupních produktů v porovnání k tradičním materiálům z přírodních surovin. Problematika využití odpadů ve stavebnictví nespočívá jen v energetické a ekonomické náročnosti. Problémem stále zůstává obava z recyklovaných materiálů u koncových uživatelů. Dále je rovněž otázkou znalost správné aplikace a seznámení se s dostupnými produkty na trhu a jejich materiálovými charakteristikami. Velké množství výrobců neupřesňuje původ všech surovin z obavy o odbyť svých výrobků.

Životní cyklus výrobku sestává z několika na sebe navazujících etap. Jedná se o stádia od získávání surovin až po dobu, kdy výrobek dosloužil svému účelu a je likvidován, recyklován nebo opětovně použit. V období každé takové etapy je nutné vynaložit určitou energii za vzniku jistého množství odpadu. Názorné schéma životního cyklu výrobku (Obr. 1)

⁶ Český statistický úřad. *Produkce, využití a odstranění odpadu v roce 2009*. 29. 8. 2010 [cit. 2011-09-11].

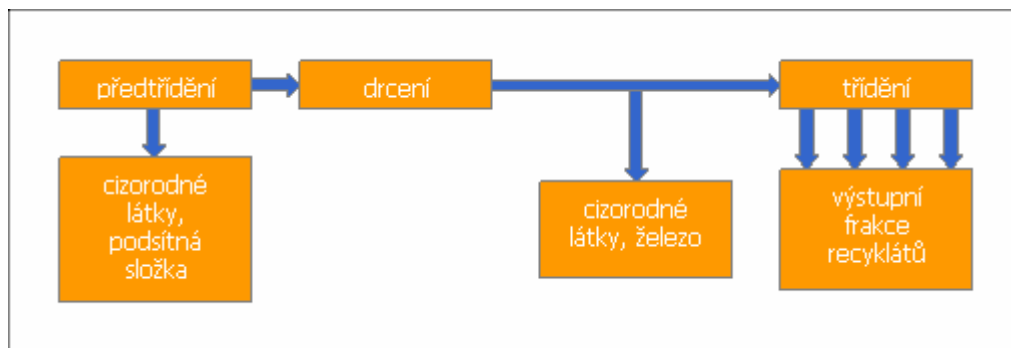
Dostupné na World Wide Web: <http://www.czso.cz/csu/tz.nsf/i/produkce_vyuziti_a_odstraneni_odpadu_v_roce_2009>.

prezentuje, kde je možné prostřednictvím recyklace (výrobku či jeho obalového materiálu) ušetřit energii a redukovat množství odpadových látek.



Obr. 1 - Typické fáze životního cyklu materiálu nebo výrobku (Charles George Ramsey © 2005)⁷

Obecně se technologický proces recyklace a zpracování stavebních odpadů skládá z několika základních fází (Obr. 2), než se podaří získat čistý recyklovaný materiál jako surovinu pro další použití. Pro získání kvalitní recyklované suroviny použitelné pro výrobu je základem řádné třídění, které probíhá v několika etapách.



Obr. 2 - Blokové schéma fáze recyklace odpadů (převzato z <http://www.arasm.cz>)⁸

Zdroj odpadového materiálu však netvoří jen vlastní stavební průmysl, ale lze vhodně využít i odpadů z dalších průmyslových odvětví (např.: textilní průmysl, automobilový

⁷ 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.

⁸ 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.arasm.cz>>.

průmysl, obalový průmysl aj.). V neposlední řadě je vhodným zdrojem tříděný komunální odpad.

Snižováním spotřeby energie při výrobě moderních materiálů se dosáhne i značných ekonomických úspor. Při produkci z druhotných materiálů (Tab. 2) dochází k podstatnému snížení potřeby výrobní energie. Jedním z dnešních moderních materiálů jsou polymerické materiály, které zároveň patří mezi početnou skupinu odpadů. Velká hodnota úspory energie při užití plastových odpadů jako suroviny (94 %) je předurčuje jako vhodné kandidáty k ekonomicky šetrnější výrobě. Především termoplastické hmoty jsou dále vhodné k výrobě kompozitních materiálů nejen pro stavební účely.

Tab. 2 - Úspory energie při využívání druhotných surovin – MPO 2005, Statistické údaje k 31. 12. 2008 k Surovinové politice v oblasti nerostných surovin a jejich zdrojů schválené usnesením vlády ČR č. 1311 ze dne 13. 12. 1999, Ministerstvo průmyslu a obchodu ČR, Praha 2005⁹

Materiál	Spotřeba el. energie při výrobě [kWh/t]		Úspora
	z primárních surovin	z druhotných surovin	
Ocel	4270	1666	61%
Hliník	65000	2000	97%
Papír	5700	4200	26%
Sklo	5000	2860	43%
Plasty	11900	700	94%

Není však vždy samozřejmostí, že každý výrobek na bázi druhotných surovin je energeticky šetrným a po environmentální stránce nejvhodnějším pro aplikaci ve stavebních konstrukcích. K tomu, aby se tak opravdu stalo, je mnohdy nutné optimalizovat celý jeho životní cyklus.

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.

⁹ Ministerstvo obchodu a průmyslu ČR. *Statistické údaje k 31. 12. 2008 k Surovinové politice v oblasti nerostných surovin a jejich zdrojů schválené usnesením vlády ČR č. 1311 ze dne 13. 12. 1999*. 2008 [cit. 2011-21-11]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.mpo.cz/dokument6621.html>>.

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 materiál¹⁰ 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 navržené 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.

¹⁰ MATĚJKA, L.; PĚNČÍK, J.; VUT v Brně: *Tepelně izolační kompozitní plast*. 20388, užitný vzor. Praha (2009)

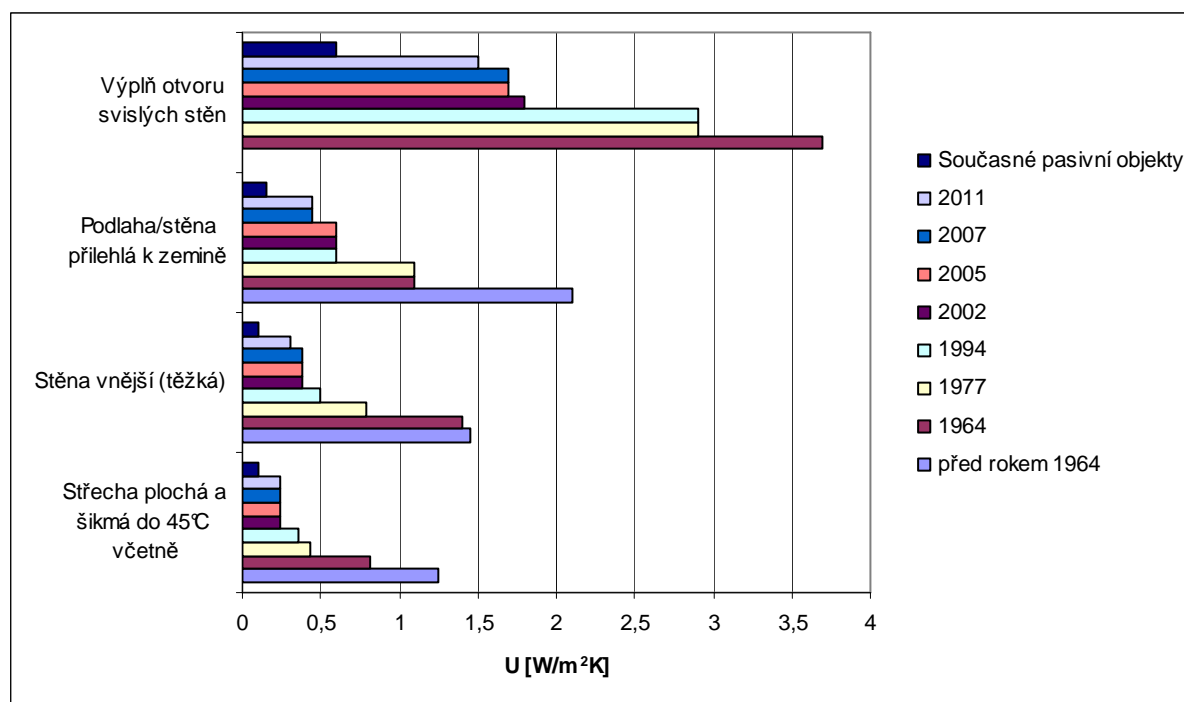
1 Přehled o současné problematice optimalizace návrhu konstrukčních detailů jednoplášťových plochých střech z tepelně technického hlediska

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

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 (Obr. 3). Nabízí se tak prostor k hledání mnohem sofistikovanějších konstrukčních řešení jednotlivých stavebních detailů a užití moderních termoizolačních materiálů.



Obr. 3 - Graf znázorňující vývoj hodnot součinitele prostupu tepla vybranými stavebními konstrukcemi podle požadavků postupně vydávaných a revidovaných ČSN v oblasti tepelné ochrany budov

V současnosti platná norma ČSN 73 0540 definuje termíny nízkoenergetický a pasivní dům následujícím způsobem:

- Energeticky úsporný dům – objekt, který má spotřebu energie na vytápění 50 – 70 kWh/m² za rok;
- Nízkoenergetický dům – objekt, který má spotřebu energie na vytápění v rozmezí 15 – 50 kWh/m² za rok;
- Energeticky pasivní dům – objekt, který má spotřebu energie na vytápění menší než 15 kWh/m² za rok.

Norma ČSN 73 0540 uvádí také termín nulový dům, který je v zahraniční literatuře definován jako objekt se spotřebou energie na vytápění do 5 kWh/m² za rok. Dále se v zahraniční literatuře objevuje termín plusový dům, který je charakterizován jako objekt se spotřebou energie na vytápění menší nebo rovnou 0 kWh/m² za rok.

V případě nízkoenergetických a pasivních objektů dominují návrhy konstrukcí plochých jednoplášťových střech, které umožňují svou tvarovou proporcí dosáhnout nízkoenergetické koncepce těchto 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.

1.2 Jednoplášťové ploché střechy

Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, jsou konstrukce plochých jednoplášťových střech nejvhodnější volbou pro nízkoenergetický či pasivní objekt. 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. Právě vysoká variabilita povrchových úprav činí z ploché střechy jednu z nejatraktivnějších konstrukcí pro architekty a investory.

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.

1.3 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 (konstrukce je tepelně nestejnorodá), nebo stavební konstrukce obsahuje alespoň jednu nestejnorodou vrstvu, změnou tloušťek vrstev stavební konstrukce; rozdílem mezi vnitřními a vnějšími plochami stavební konstrukce, např. výztužným žebrem.”¹¹

„Tepelná vazba je rozhraní mezi dvěma a více konstrukcemi, kde tepelný tok v konstrukcích je významně změněn jejich vzájemným působením. Je to zvláštní případ tepelného mostu, odlišný od ostatních svou nepřiraditelností k jedné či druhé konstrukci. V některých přejímaných normách EN/ISO se nazývá i tato tepelná nestejnorodost tepelným mostem přesto, že ze vzájemných souvislostí je zřejmé, že se jedná o tepelné vazby. Vliv tepelné vazby se nezahrnuje při výpočtu nebo měření tepelného odporu konstrukce R nebo součinitele prostupu tepla U jednotlivých konstrukcí, ale až při výpočtu měrné ztráty prostupem tepla H_T a průměrného součinitele prostupu tepla U_{em} apod. Obdobně jako u tepelných mostů se rozlišují lineární a bodové tepelné vazby.”¹²

„Tvorba detailů napojení, připojení, přechodů a průniků s cílem vyloučit nebo omezit vliv tepelných mostů má podstatně větší význam než v dřívějších dobách.”¹³ Lze tak předejít jejich pozdější lokalizaci až v době užívání stavby.

¹¹ 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>>.

¹² 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>>.

¹³ ČSN 73 0540-2 *Tepelná ochrana budov – Část 2: Požadavky*. Praha: Český normalizační institut 2011. 44 s.

Posuzování tepelných mostů a vazeb se provádí podle aktuálně platných technických norem ČSN 73 0540, 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.

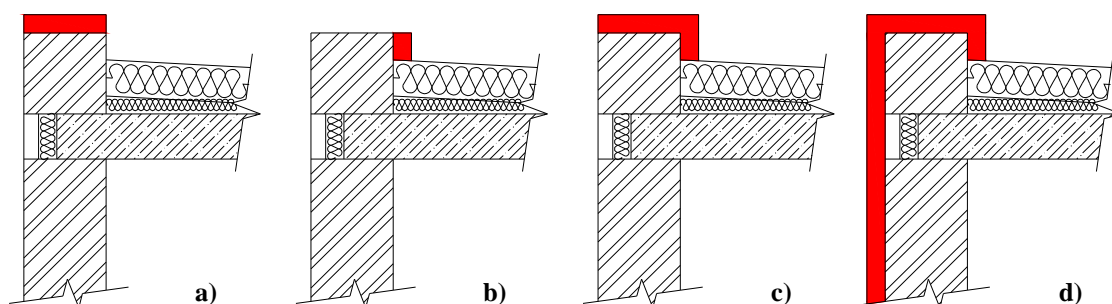
1.3.1 Konstrukční detaily atiky plochých jednoplášťových střech

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.“¹⁴ 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.

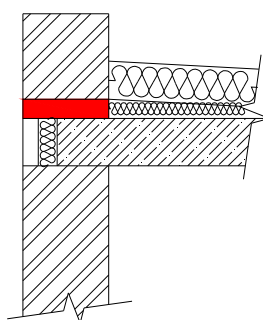
V současnosti je řešen tepelný most konstrukce zděné atiky plochých střech použitím tradičně dostupných tepelně izolačních materiálů (Obr. 4 - c, d). Těmito materiály jsou expandovaný polystyren (alternován minerální či skelnou vatou dle protipožárních požadavků), výjimečně extrudovaný polystyren a pěnové sklo. Pro kvalitní projekt zateplení střešní konstrukce je zcela zásadní správný výběr tepelné izolace, podle účelu střechy a typu konstrukce. Někdy je možné setkat se v praxi i s nedokonale provedenou tepelně izolační vrstvou (Obr. 4 - a, b).

¹⁴ ČSN 73 0540-2 *Tepelná ochrana budov – Část 2: Požadavky*. Praha: Český normalizační institut 2011. 44 s.



Obr. 4 - 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. 5 - Alternativní způsob řešení eliminace tepelného mostu s využitím pěnového skla

Při variantě použití pěnového skla jsou na trhu výrobky s nevelkou variabilitou rozměrových dimenzí. Takto omezená variabilita způsobuje častou nutnost prvky z tohoto materiálu opracovávat do požadovaných rozměrů. Nově vzniklé hrany je třeba ošetřit asfaltovým nátěrem, aby nedocházelo k pronikání vlhkosti do neuzavřených pórů. Vzhledem k tomu, že pěnové sklo je křehké, může dojít při jeho dodatečné úpravě a zabudování k poruše struktury a tím ke zhoršení fyzikálních (především tepelně technických) a mechanických vlastností (pevnost v tlaku). Vedle nesporných výhod (nízká tepelná vodivost, nenasákavost, vysoká únosnost) má ale též řadu zásadních nevýhod (křehkost, nutnost ošetření řezných hran, vysoká cena).

Zabudování tepelně izolačního materiálu do konstrukce podle Obr. 5 lze realizovat také použitím keramické dutinové tvarovky uvnitř vysypané expandovaným perlitem,

popřípadě sypkým pěnovým polystyrenem. Jedná se o obdobu přerušení tepelného mostu u základu nosných obvodových stěn.

Pro zmíněnou aplikaci je však jen malá variabilita materiálů a takto provedených konstrukcí není mnoho. 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.

Norma ČSN 73 1901 doporučuje u prostupujících a navazujících konstrukcí vytažení hydroizolační vrstvy do výšky minimálně 150 mm nad vnější povrch střešní plochy. Z tohoto požadavku lze odvodit neformálně předepsanou minimální výšku atikové konstrukce 150 mm.

1.3.2 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. 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.

1.3.3 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 dělící 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 73 0802 a ČSN 73 0804, jež se touto problematikou podrobně 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.

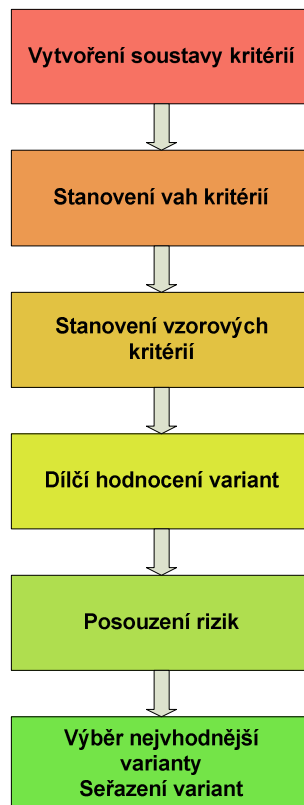
1.4 Tepelně technické modelování a analýza konstrukčních detailů staveb

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 (viz kap. 3.1.1), která je implementována téměř do všech výpočetních programů. Pomocí výpočtových modelů je simulováno reálné rozložení teplotního pole v konstrukcích. Takto lze získat základní fyzikální parametry, od nichž lze následně odvodit všechny tepelně technické veličiny. Tyto veličiny, které jsou při současných tepelně technických analýzách vyhodnocovány a následně komparovány, vychází z definic uvedených v platných technických normách.

1.5 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, multikriteriálního analytického hodnocení, je uveden na Obr. 6. Pro jeho aplikaci při optimalizaci konstrukčních detailů ve stavebnictví je nutné jej mírně modifikovat, detailněji charakterizovat a více konkretizovat.



Obr. 6 - Obecný postup vícekritériálního hodnocení variant¹⁵

Vybrané metody (viz kap. 3.3.2), které náleží vícekritériálnímu 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 multikritériálních metod prezentován.¹⁶ 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).

1.6 Komparace vlastností konstrukcí z tradičních materiálů a z druhotných surovin

Soudobé stavební materiály se vyznačují, ač se např. u tepelných izolací aplikují primárně za stejným účelem, různorodými technickými vlastnostmi, odlišnou cenou a environmentální zátěží. Z toho plynou i rozdílné možnosti jejich zabudování do stavebních konstrukcí s výrazným ovlivněním v přístupu k řešení konstrukčních detailů.

¹⁵ KORVINY, P. *Teoretické základy vícekritériálního rozhodování*. 2006 [cit. 2012-28-11]. Dostupné na World Wide Web: <http://korviny.cz/mca7/soubory/teorie_mca.pdf>.

¹⁶ PYTLÍK, P. *Vlastnosti a užití stavebních výrobků*. Brno: VUTIUM, 1998. 399 s. ISBN 80-214-1123-6.

Z takových rozdílných hodnot parametrů je nutné vycházet při vytváření soustavy kritérií, stanovení jejich důležitosti a při vlastní optimalizaci konstrukce. Nynější hodnotící nástroje zabývající se srovnáním výrobků na bázi přírodních obnovitelných a neobnovitelných, či primárních a druhotných surovin jsou zaměřeny na energetické nároky spočívající v jednotlivých etapách života výrobku. Nikde není příliš zohledněn obsah druhotných surovin ve stavebním prvku. I když energie vynaložená na recyklaci odpadů může být vyšší, než energie vynaložená na těžbu primárních surovin, přináší užití odpadových materiálů jako surovinové základny nesporné výhody v podobě menších objemů různých látek určených ke skládkování a nutné rekultivaci, příp. k jejich náročné likvidaci.

1.6.1 Kvalita a trvanlivost

Důležitým hlediskem při recyklaci je kvalita výstupních produktů v porovnání k tradičním materiálům z přírodních surovin a s tím související i jejich trvanlivost. Tyto vlastnosti ovlivňuje již systém separace a koncentrace odpadů. Jejich třídění a shromáždění by mělo technicky umožnit jejich kvalitní zpracování a jednotlivé složky odpadu by neměly záporně ovlivňovat vlastnosti výrobků. Cílem producentů je vyrobit plnohodnotný recyklovaný materiál k materiálu tradičnímu za předpokladu jeho menší ceny pořízení, snížení nákladů na jeho dopravu a snížení ceny technologické aplikace tohoto materiálu (celková cenová efektivita).

Ekonomické hledisko je tedy při rozhodování o procesu recyklace velice důležité. Celý proces by rozhodně neměl být neefektivní. Pro aplikaci výrobků je preferována větší délka jejich životnosti. Snaha výrobců recyklovaných materiálů je tak prodloužit jejich trvanlivost oproti tradičním výrobkům.

S budoucí recyklací zabudovaného výrobku je třeba počítat už při konstrukční a projektové přípravě, aby došlo k omezení překážek.

1.6.2 Fyzikální vlastnosti

Fyzikální vlastnosti recyklovaných materiálů jsou srovnatelné s tradičními materiály, případně dokonce tyto tradiční materiály mnohdy kvalitativně překonávají. Zároveň s těmito vlastnostmi se často dají pořídit za výhodnější cenu, eventuálně vychází manipulace s nimi a jejich aplikace cenově výhodněji.

Aby bylo úvodní tvrzení prokázáno, jsou v Tab. 3 pro porovnání uvedeny významné fyzikální vlastnosti vybrané skupiny tepelně izolačních materiálů na bázi druhotných surovin a materiálů tradičních. Z konkrétních hodnot uvedených v tabulce vyplývá, že důležité

parametry recyklovaných materiálů odpovídají svou kvalitou parametrům tradičních materiálů.

Tab. 3 - Významné fyzikální vlastnosti tepelně izolačních materiálů (hodnoty převzaty od výrobců)

Porovnání fyzikálních vlastností tepelně izolačních materiálů				
Recyklované materiály				
Název materiálu	Souč. tepelné vodivosti λ [W/mK]	Objemová hmotnost ρ [kg/m³]	Nasákavost c [%]	Faktor difúzního odporu μ [-]
Celulózová tepelná izolace	0,037 – suchý stav 0,039 – výpočtová hodnota	25 – 65 (dle potřeby)	12	1 – 1,5
Recyklovaný pěnový polystyren	0,040	30 – 50	3 – 5	50 – 60
Recyklovaná minerální vlna	0,039	80 – 120 (kolmá orient. vláken) 120 – 160 (podélná orient. vláken)	-	1
Pěnové sklo (granulát)	0,06 – 0,08 podle zhutnění	140 (volně sypané) 165 (zhutněné)	0 (uvnitř zrna) 10 (na povrchu zrna)	70000
Recyklovaná PUR pěna	0,024 – 0,100	40 – 600	2 – 5	30 – 100
Tradiční materiály				
Minerální vlna	0,035 – 0,050	80 – 120 (kolmá orient. vláken) 120 – 160 (podélná orient. vláken)	-	1 – 4
Pěnový polystyren EPS	0,040 – 0,042	30 – 50	3 – 5	40 – 70
Extrudovaný polystyren XPS	0,032 – 0,040	25 – 35	0,5	100 – 225
Pěnový polyuretan	0,040 – 0,043	min. 30	2 – 5	180
Dřevovláknitá izolační deska	0,038 – 0,060	120 – 260 (dle potřeby)	-	5

Následující tabulka srovnává některé podstatné vlastnosti deskových recyklovaných a tradičních materiálů pro opláštění. Jde především o parametry mechanických a statických vlastností, dále pak o součinitel tepelné vodivosti. I u tohoto typu materiálů při porovnání konkrétních hodnot platí již výše zmíněné tvrzení o shodných kvalitách.

Všechny nejen výše zmíněné materiálové charakteristiky mohou u produktů na bázi druhotných surovin kompenzovat případné negativní aspekty. Jejich kombinací lze připravit funkční a konkurenceschopný výrobek, který bude mít své technické přednosti před tradičními materiály.

Tab. 4 - Významné fyzikální vlastnosti deskových materiálů pro opláštění (hodnoty převzaty od výrobců)

Porovnání fyzikálních vlastností deskových materiálů pro opláštění				
Recyklované materiály				
Název materiálu	Souč. tepelné vodivosti λ [W/mK]	Objemová hmotnost ρ [kg/m ³]	Pevnost v ohybu [MPa]	Odpor proti vytažení vrutu [N/mm]
Sádrovláknitá deska	0,316	1150	5,8	-
Deska Tetra K	0,083	780 – 840	5,5 ± 0,75	62,2 ± 17
Tradiční materiály				
Sádrokartonová deska	0,210	712 – 800	5	-
Cementotřísková deska	0,350	1150 – 1450	9	85 ± 15

Ani tento výčet parametrů není konečný. Například většina sádrovláknitých desek je srovnatelných se sádrokartonovými impregnovanými deskami proti vlhkosti a dají se aplikovat i v exteriéru. Z těchto hodnot lze usuzovat, že materiály na bázi druhotných surovin nabízí srovnatelné vlastnosti s tradičními materiály. Přesto však existují odlišnosti, které je nutné uvážit při návrhu stavebních konstrukcí. Proto se práce zabývá nejen optimalizací konstrukčních detailů, ale zároveň i posouzením aplikace kompozitního materiálu¹⁷ na bázi druhotných surovin v porovnání s tradičními materiály.

Oblast zkoumání zmíněného kompozitního materiálu se zaměřuje na jeho konkrétní variantu, kdy jeho surovinové složky tvoří termoplastická hmota (matrice) a sférické prvky skla s obsahem uzavřené vzduchové dutiny (plnivo). Obě tyto složky jsou regranuláty vzniklými recyklačním procesem. Termoplastickou hmotu představuje polypropylen homopolymer (PP), který nabízí vynikající vlastnosti především v oblasti pevnosti v tlaku, tepelně izolačních vlastností a trvanlivosti. Z charakterizovaného materiálu bylo připraveno během vývoje větší množství vzorků a první zkušební prototypy.

¹⁷ MATĚJKA, L.; PĚNČÍK, J.; VUT v Brně: Tepelně izolační kompozitní plast. 20388, užitiný vzor. Praha (2009)

2 Cíle dizertační práce

Širším tématem dizertační práce je aplikace recyklovaných materiálů pro nízkoenergetickou a pasivní výstavbu – trvale udržitelný rozvoj. Především je práce zaměřena na optimalizaci konstrukčních detailů plochých jednoplášťových střech včetně možnosti návrhu detailů s tepelně izolačním blokem z kompozitního materiálu na bázi druhotných surovin.

Obsah této dizertační práce sestává z následujících hlavních a vedlejších cílů:

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;

Užitím počítačové aplikace na bázi metody konečných prvků budou získána teoretická data o průběhu teplot v dvojrozměrném teplotním poli a celková tepelná propustnost modelem konstrukčního detailu. Modelovány budou varianty konstrukčních detailů se současným opatřením pro potlačení vlivu tepelného mostu užitím tradičních materiálů a materiálů na bázi druhotných surovin;

- Tepelně technická analýza reálného měření na reálném objektu pro ověření platnosti výpočtového modelu;

Dalším z hlavních cílů dizertační práce je analýza reálného měření v konstrukčním detailu atiky plochých střech za účelem zjištění účinku eliminace tepelného mostu v této části konstrukce. Cílem je získání naměřených tepelně technických údajů vybraného modelu (varianty) pro vzájemné srovnání s teoretickými výpočty. Všechna získaná data tak budou vzájemně komparována a analyzována s výsledky modelové analýzy. Vyhodnocení je komentováno odpovídajícími závěry;

- 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 hodnocení tepelně izolačních materiálů navržených v konstrukčních detailech.

Vedlejší cíle:

- Doporučení pro praktické použití tepelně izolačního bloku;
Technologická doporučení pro další praktické využití tepelně izolačního bloku;
- Podpora trvale udržitelného rozvoje v oblasti stavebnictví;
Využití recyklovaného materiálu je podporou trvale udržitelného rozvoje v oblasti stavebnictví. Zvolené cíle vychází z potřeb trvale udržitelného rozvoje a stále se zpřísňujících nároků technických norem. Proto je vhodné řešit a optimalizovat jednotlivé konstrukční detaily stavebních objektů a využívat alternativních materiálů.

Souhrn cílů předložené doktorské práce by měl spočívat v nových přístupech při optimalizačních procesech v oblasti návrhu konstrukčních detailů s ověřením na konkrétních stavebních detailech plochých jednoplášťových střech s přihlédnutím k vyhodnocení konstrukčních variant s možností aplikace moderního právě vyvíjeného tepelně izolačního kompozitního materiálu.

3 Zvolené metody zpracování disertační práce

Výběr zvolených metod podléhá stanoveným cílům práce tak, aby bylo umožněno jejich dosažení. Jedná se o kombinaci výpočtových, analytických, experimentálních a optimalizačních metod v souvislosti s platnými normativními podklady.

3.1 Analýza tepelně technických modelů

Výstupy zvolených metod analýzy tepelně technických modelů by měly být informační základnou s daty pro parametry s největší důležitostí při optimalizačním procesu.

3.1.1 Metoda konečných prvků

Metoda konečných prvků (FEM - The Finite Element Method) 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. Metoda umožňuje testování a optimalizaci návrhu prvku před jeho vlastní výrobou. Využívají ji téměř všechny již poměrně rozšířené výpočtové aplikace. Definoval ji v roce 1943 americký matematik Richard Courant.¹⁸

Výpočetní metoda se skládá z několika základních fází, které po sobě následují v logických krocích¹⁹:

Preprocessing – V první přípravné fázi se zpracují údaje o geometrii a vlastnostech konstrukce. Zjednodušený fyzikálně matematický model se skládá z jednotlivých elementárních těles a uzlů. Tělesa mají definované relevantní materiálové vlastnosti.

Processing (analýza prvku) – V této fázi se nastaví okrajové podmínky výpočtu a numericky se řeší soustava algebraických rovnic, která vznikla převodem z rovnic diferenciálních. Počítány jsou hodnoty neznámých parametrů v uzlech. Dokončením analýzy prvku je aproximace teplot v prvcích i mimo uzly a je tak dovršen výpočet.

Postprocessing – Jedná se o výstupní vyhodnocovací fázi s grafickým znázorněním výsledků s výpisem důležitých dat zpracovaných ze zadaných hodnot.

¹⁸ BABUŠKA, I., STROUBOULIS, T. *The Finite Element Method and its Reliability*. UK, Oxford: Oxford University Press Inc., 2001. 736 s. ISBN 978-0198502760.

¹⁹ HUTTON, D. V. *Fundamentals of finite element analysis*. Boston: McGraw-Hill, 2004. ISBN 0-07-239536-2.

3.1.2 Modelování a simulace pomocí výpočetních programů

CAD software je využit pro vytvoření technickografických podkladů pro tepelně technické modelování jednotlivých konstrukčních variant. Základním podkladem pro vývoj návrhu tepelně izolačního prvku v plochých střeších jsou výkresy konstrukčních detailů provedené v CAD software, kde bude tento prvek navržen a optimalizován.

Rhinoceros 3D

Podle CAD výkresů se připraví sestavy trojrozměrných modelů stavebních konstrukcí v programu Rhinoceros 3D. Tento grafický software je založen na matematických definicích objektů – NURBS (Neuniformní racionální B-křivky ploch). Výstupem je exportovaný grafický soubor ACIS ve formátu ASCII (přípona SAT). Ten lze snadno importovat do prostředí výpočetního programu Ansys.²⁰

Ansys

Výpočetní program Ansys 12.1 obsahuje modelovací prostředí, nedosahuje však profesionálních kvalit programů pro 3D modelování. Proto importujeme modely vytvořené v programu Rhinoceros 3D.

Matematickým nástrojem pro určení výsledků je metoda konečných prvků, přičemž se postupuje podle jednotlivých fází (viz kapitola 3.1.1). Zvoleny jsou smíšené podmínky konvekce (Newtonův ochlazovací zákon), které stanovují hustotu tepelného toku kolmo na vnější povrch modelu²¹:

$$q = h(T - T_{ext}) \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (1)$$

kde h je koeficient přestupu tepla ve $\text{W/m}^2\text{K}$,

T je teplota vnějšího povrchu tělesa v $^\circ\text{C}$,

T_{ext} je teplota okolního prostředí v $^\circ\text{C}$,

q je hustota tepelného toku ve W/m^2 .

²⁰ MÜLLER, J. *Import 3D modelu v programu Ansys Workbench*. Juniorstav 2008 – Sborník anotací. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2008. 5 s. ISBN 978-80-86433-45-5.

²¹ FICKER, T. *Handbook of building thermal technology, acoustics and daylighting*. Brno: CERM, 2004. 266 s. ISBN 80-214-2670-5.

Tím je předepsán tepelný tok na plochu tělesa pomocí známého koeficientu přestupu tepla h a známé teploty okolního prostředí T_{ext} . Jedná se o okrajovou podmínku III. druhu (Fourierova).

Výstupem programu jsou teoretická data o průběhu teplot v dvojrozměrném teplotním poli a celková tepelná propustnost modelem konstrukčního detailu.

3.2 Teoretický výpočet technických veličin a normativní podklady

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

3.2.1 Definice a veličiny teplotního pole

Obecný vztah pro teplotní pole představuje rovnice (2) charakterizující teplotní pole jako nestacionární (časově proměnná termodynamická teplota T). Takovou nezjednodušenou formulaci lze aplikovat v případě komparace výpočtových hodnot s měřenými daty z reálného prostředí. Stacionárním teplotním polem se rozumí prostor, v jehož každém místě je definována zcela určitá konstantní termodynamická teplota T . To je vyhovující přístup pro komparaci rozložení teplotního pole ve stavebních konstrukcích. Stacionární teplotní pole lze též uvažovat vzhledem k tomu, že v reálném prostředí se většinou termodynamická teplota mění s časem velmi pomalu. Rovnice, která popisuje fyzikálně takový prostor, je upraveným prvním zákonem termodynamiky a nazývá se rovnice Fourierova:

$$\operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} - p \quad (2)$$

kde λ je měrná tepelná vodivost ve W/mK,
 T je teplota v K,
 ρ je hustota v kg/m³,
 c je měrná tepelná kapacita v J/kgK,
 t je čas v s,
 p je měrný dodávaný výkon případných zdrojů ve W/m³.

V případě stacionárního teplotního pole je první člen pravé strany v rovnici (2) nulový. V takto definovaném teplotním poli jsou vytvořeny všechny matematicko-fyzikální výpočetní modely.

3.2.2 Součinitel tepelné vodivosti

Jedná se o konstantu úměrnosti materiálu, která udává číselně množství tepla, které projde za jednotku doby krychlí o jednotkové hraně mezi dvěma protilehlými stěnami, mezi nimiž je teplotní rozdíl 1 °K, jsou-li ostatní stěny krychle dokonale tepelně izolovány.²²

λ součinitel tepelné vodivosti ve W/mK.

Ekvivalentní součinitel tepelné vodivosti vypovídá o schopnosti vrstvy dané tloušťky sestávající z různých materiálů popř. vzduchových vrstev vrstvených rovnoběžně s tepelným tokem šířit teplo. Ekvivalentní součinitel tepelné vodivosti udává tepelnou vodivost nehomogenní vrstvy stejné tloušťky, která se v ploše nebo v průřezu může sestávat z různých druhů materiálů. Hovoří se o nestejnorodé vrstvě s různými materiály ve vrstvě kolmé na tepelný tok (ve směru teplotního spádu).²³

λ_{ev} ekvivalentní součinitel tepelné vodivosti ve W/mK.

Lze jej vhodně využít pro zjednodušení výpočtových modelů, kde není nutná přílišná přesnost rozložení teplotního pole v oblasti nehomogenní vrstvy, která je nahrazena homogenní vrstvou s ekvivalentním součinitelem tepelné vodivosti λ_{ev} .

3.2.3 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.“²⁴ Přesnější výpočet lze tedy získat s uvažováním tepelných vazeb mezi stavebními konstrukcemi (jejich styk), jejichž vliv se zjišťuje řešením dvojrozměrných a

²² HORÁK, Z., KRUPKA, F. *Fyzika – Příručka pro vysoké školy technického směru, Svazek 1*. Praha: SNTL, 1976. 424 s. ISBN 04-011-76.

²³ ČSN 73 0540-4 *Tepelná ochrana budov – Část 4: Výpočtové metody*. Praha: Český normalizační institut 2005. 60 s.

²⁴ ŠÁLA, Jiří, et al. *Tepelná ochrana budov*. Praha: Informační centrum ČKAIT, 2006. 292 s. ISBN 978-80-87093-30-6.

trojrozměrných teplotních polí. „Pro snazší práci se jednotlivé tepelné vazby stanovují samostatně, mohou se tedy i samostatně hodnotit.“²⁵

Podle normy ČSN EN ISO 14683 (730561) bude ze získané hodnoty celkové tepelné propustnosti konstrukčním detailem a známých hodnot součinitele prostupu tepla stěnové a střešní konstrukce vypočítána tepelně technická veličina lineární činitel prostupu tepla. Definici lineárního činitele prostupu tepla uvádí norma ČSN EN ISO 14683 (730561). Značí se ψ a jednotkou je W/mK. Pro popis lineární tepelné vazby existují tři hodnoty ψ (ψ_e vnější, ψ_i vnitřní a ψ_{oi} celkové vnitřní). Nejdůležitější je součinitel ψ_e , který je stanoven z vnějších rozměrů konstrukcí.

Pro konstrukční detaily, na které mají vliv výlučně dvě okrajové teploty, se lineární činitel prostupu tepla ψ určí z následujícího vztahu:

$$\psi = L - \sum U_j \cdot b_j \text{ [W/mK]} \quad (3)$$

kde L je vypočtená tepelná propustnost ve W/mK,
 U_j je součinitel prostupu tepla j -té konstrukce ve W/m²K,
 b_j je šířka j -té konstrukce v m.

Tato veličina bude využita jako ukazatel kvality snížení vlivu tepelného mostu. Součinitel prostupu tepla U je normou ČSN 73 0540 definován vztahem:

$$U = \frac{I}{R_T} \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (4)$$

kde R_T je odpor konstrukce při prostupu tepla (z prostředí do prostředí) v [m²K/W] a v normě ČSN 73 0540 je dále definován vztahem:

$$R_T = R_{si} + R + R_{se} \text{ [m}^2\text{K/W]} \quad (5)$$

kde R_{si} je odpor při přestupu tepla na vnitřní straně konstrukce v m²K/W,
 R je odpor konstrukce v m²K/W,
 R_{se} je odpor při přestupu tepla na vnější straně konstrukce m²K/W.

Norma ČSN 73 0540 dále definuje tyto tepelné odpory vztahy:

²⁵ ŠÁLA, Jiří, et al. *Tepelná ochrana budov*. Praha: Informační centrum ČKAIT, 2006. 292 s. ISBN 978-80-87093-30-6.

$$R_{si} = \frac{l}{h_i} \text{ [m}^2\text{K/W]} \quad (6)$$

$$R_{se} = \frac{l}{h_e} \text{ [m}^2\text{K/W]} \quad (7)$$

$$R = \frac{d}{\lambda} \text{ [m}^2\text{K/W]} \quad (8)$$

kde h_i je součinitel přestupu tepla na vnitřní straně konstrukce ve W/m²K,

h_e je součinitel přestupu tepla na vnější straně konstrukce ve W/m²K,

d je tloušťka vrstvy v konstrukci v m,

λ je součinitel tepelné vodivosti ve W/mK.

3.2.4 Teplotní faktor vnitřního povrchu

Ze známých hodnot vnitřní návrhové teploty, teploty exteriéru a získané hodnoty vnitřní povrchové teploty bude vypočítána dle normy ČSN 73 0540 veličina – teplotní faktor vnitřního povrchu.

Definici teplotního faktoru vnitřního povrchu f_{Rsi} uvádí norma ČSN 73 0540 takto:

$$f_{Rsi} = 1 - \frac{\theta_{ai} - \theta_{si}}{\theta_{ai} - \theta_e} \text{ [-]} \quad (9)$$

kde θ_{ai} je návrhová teplota vnitřního vzduchu v °C,

θ_{si} je vnitřní povrchová teplota konstrukce v °C,

θ_e je návrhová teplota venkovního vzduchu v °C.

Tento teplotní faktor musí splňovat podmínku $f_{Rsi} \geq f_{Rsi,N}$, kde $f_{Rsi,N}$ je požadovaná teplota nejnižšího teplotního faktoru vnitřního povrchu a platná definice je:

$$f_{Rsi,N} = f_{Rsi,cr} \text{ [-]} \quad (10)$$

kde $f_{Rsi,cr}$ je kritický teplotní faktor vnitřního povrchu.

Kritický teplotní faktor vnitřního povrchu je definován takto:

$$f_{Rsi,cr} = 1 - \frac{237,3 + 2,1 \cdot \theta_{ai}}{\theta_{ai} - \theta_e} \cdot \frac{l}{1,1 - 17,269 / \ln(\varphi_{i,r} / \varphi_{si,cr})} \text{ [-]} \quad (11)$$

kde $\varphi_{i,r}$ je relativní vlhkost vnitřního vzduchu v %,

$\varphi_{si,cr}$ je kritická vnitřní povrchová vlhkost v % (uvažuje se 80 %).

Relativní vlhkost vnitřního vzduchu definuje norma následujícím předpisem:

$$\varphi_{i,r} = \varphi_i + 100 \cdot \Delta\varphi_r \cdot (\theta_e + 5) + \Delta\varphi_i \quad [\%] \quad (12)$$

pro stavební konstrukce je však minimální přípustná hodnota dána vztahem:

$$\varphi_{i,r} = \varphi_i - 10 + \Delta\varphi_i \quad [\%] \quad (13)$$

kde φ_i je návrhová relativní vlhkost vnitřního vzduchu v zimním období v % (mimo vlhké a suché prostory se uvažuje $\varphi_i = 50$ %),
 $\Delta\varphi_r$ je změna relativní vlhkosti vnitřního vzduchu vlivem teploty venkovního vzduchu v K^{-1} (uvažuje se $\Delta\varphi_r = 0,01 K^{-1}$),
 $\Delta\varphi_i$ je bezpečnostní vlhkostní přírážka dle ČSN EN ISO 13788 v % (uvažuje se $\Delta\varphi_i = 5$ %),
 θ_e je návrhová teplota venkovního vzduchu v $^{\circ}C$.

Veličina teplotního faktoru bude stejně jako předchozí lineární činitel prostupu tepla využita jako další kritérium kvality eliminace tepelného mostu.

3.3 Multikriteriální analýza

Jako hlavní optimalizační procesy byly zvoleny vybrané metody multikriteriálních analýz. Vhodně byly adaptovány a hierarchicky sestaveny pro optimalizaci nejvýznamnějších konstrukčních detailů plochých jednoplášťových střech.

3.3.1 Obecný význam a základní pojmy

Model multikriteriální analýzy variant předpokládá konečnou množinu přípustných řešení (tzv. variant). 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. Přerozdělením takových variant na efektivní a neefektivní lze získat jejich výsledné uspořádání od nejefektivnější varianty až po neúčelná řešení.

- Kritéria kvantitativní:

Hodnoty variant podle takovýchto kritérií tvoří objektivně měřitelné údaje, proto se také tato kritéria nazývají objektivní;²⁶

- Kritéria kvalitativní:

Hodnoty variant podle těchto kritérií nelze objektivně změřit, velmi často jde o hodnoty subjektivně odhadnuté uživatelem (subjektivní kritéria). V těchto případech se používají různé bodovací stupnice nebo relativní hodnocení variant (jedna varianta je zvolena jako základ a uživatel odhaduje procentní vyjádření ostatních variant);²⁷

- Kritéria maximalizační/minimalizační:

Při rozhodování vycházíme z toho, že nejlepší varianty podle tohoto kritéria mají nejvyšší/nejnižší hodnoty;²⁸

- Kriteriaální matice:

Sloupce matice sestávají z kritérií f_k a řádky z jednotlivých hodnocených variant řešení a_p ;

$$\begin{array}{cccc}
 & f_1 & f_2 & \dots & f_k \\
 a_1 & \left[\begin{array}{cccc}
 y_{11}, & y_{12}, & \dots, & y_{1k} \\
 y_{21}, & y_{22}, & \dots, & y_{2k} \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 y_{p1}, & y_{p2}, & \dots, & y_{pk}
 \end{array} \right. & & & &
 \end{array} \quad (14)$$

- Ideální varianta:

Ideální varianta je hypotetická nebo reálná varianta, která dosahuje ve všech kritériích současně nejlepší možné hodnoty;²⁹

- Bazální varianta:

Bazální varianta je hypotetická nebo reálná varianta, jejíž ohodnocení je nejhorší podle všech kritérií;³⁰

²⁶ BROŽOVÁ, H., HOUŠKA, M., ŠUBRT, T. *Modely pro vícekritériální rozhodování*. Praha: CREDIT, 2003. 178 s. ISBN 80-213-1019-7.

²⁷ BROŽOVÁ, H., HOUŠKA, M., ŠUBRT, T. *Modely pro vícekritériální rozhodování*. Praha: CREDIT, 2003. 178 s. ISBN 80-213-1019-7.

²⁸ BROŽOVÁ, H., HOUŠKA, M., ŠUBRT, T. *Modely pro vícekritériální rozhodování*. Praha: CREDIT, 2003. 178 s. ISBN 80-213-1019-7.

²⁹ BROŽOVÁ, H., HOUŠKA, M., ŠUBRT, T. *Modely pro vícekritériální rozhodování*. Praha: CREDIT, 2003. 178 s. ISBN 80-213-1019-7.

- Dominance řešení:

Při předpokladu všech kritérií jako maximalizačních varianta a_i dominuje variantu a_j , jestliže platí $(y_{i1}, y_{i2}, \dots, y_{ik}) \geq (y_{j1}, y_{j2}, \dots, y_{jk})$ a existuje alespoň jedno kritérium f_l , že $y_{il} > y_{jl}$.³¹

S aplikací definovaných elementárních pojmů je umožněno uspořádání optimalizačního multikritériálního procesu s užitím rozličných vyhodnocovacích metod, které jsou popsány v následující kapitole 3.3.2.

3.3.2 Aplikované vyhodnocovací metody

Následující podkapitoly popisují výběr několika vyhodnocovacích metod, které je vhodné užít při rozhodovacích optimalizačních procesech. Výběr byl založen na různorodosti jejich algoritmů při hledání optimálních řešení.

3.3.2.1 Metoda váženého součtu (WSA)

„Metoda váženého součtu vychází z principu maximalizace užitku.“³² „Dosáhne-li varianta a_i podle kritéria j určité hodnoty y_{ij} , přináší tak uživateli užitek, který lze vyjádřit pomocí lineární funkce užitku.“³³ 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.

Postup vychází z vytvoření normalizované kritériální matice $R = (r_{ij})$. Výpočet prvků je proveden pomocí transformačního vztahu (15).

³⁰ BROŽOVÁ, H., HOUŠKA, M., ŠUBRT, T. *Modely pro vícekritériální rozhodování*. Praha: CREDIT, 2003. 178 s. ISBN 80-213-1019-7.

³¹ BROŽOVÁ, H., HOUŠKA, M., ŠUBRT, T. *Modely pro vícekritériální rozhodování*. Praha: CREDIT, 2003. 178 s. ISBN 80-213-1019-7.

³² FIALA, P., JABLONSKÝ, J., MAŇAS, M. *Vícekritériální rozhodování*. Praha: VŠE, 1997. ISBN 80-7079-743-7.

³³ BROŽOVÁ, H., HOUŠKA, M., ŠUBRT, T. *Modely pro vícekritériální rozhodování*. Praha: CREDIT, 2003. 178 s. ISBN 80-213-1019-7.

$$r_{ij} = \frac{Y_{ij} - D_j}{H_j - D_j} \quad (15)$$

kde D_j je minimální hodnota kritéria ve sloupci j ,
 H_j je maximální hodnota kritéria ve sloupci j .

Nyní již matice R reprezentuje matici hodnot užitku z i -té varianty podle j -tého kritéria. Všechny prvky tak nabývají kritériálních hodnot $r_{ij} \in \langle 0, 1 \rangle$.

Vztahu (15) lze užít jen v případě, pokud je kritérium považováno za maximalizační. Při operaci s minimalizačním kritériem je normalizace provedena následujícím vztahem:

$$r_{ij} = \frac{H_j - Y_{ij}}{H_j - D_j} \quad (16)$$

Pro snadnější orientaci ve výpočtech je možné všechna kritéria převést na maximalizační. Toho lze docílit vztahem (17).

$$y_{ij} = \max_{i=1, \dots, p} (y_{ij}) - y_{ij} \quad (17)$$

Tato transformace je však již obsažena výpočtovým vztahem (16).

Při užití součtového tvaru multikritériální funkce užitku lze poté užitek u varianty a_i vyjádřit matematickým vzorcem:

$$u(a_i) = \sum_{j=1}^k v_j \cdot r_{ij} \quad (18)$$

kde v_j je hodnota váhového kritéria ve sloupci j ,
 r_{ij} je hodnota prvku normalizované kritériální matice
v j -tém sloupci a i -tém řádku.

Optimální variantou je ta, která dosáhne maximální hodnoty užitku. Ostatní varianty je možné uspořádat podle této klesající hodnoty až po nejméně efektivní možnost řešení daného problému.

3.3.2.2 Metoda TOPSIS

V této metodě (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution), kterou definovali v roce 1981 autoři Hwang C. L. a Yoon K. a dále rozvíjeli, jsou varianty

posuzovány z hlediska jejich minimální vzdálenosti od ideální (horní) a bazální (dolní) varianty.

V prvním kroku je nutné provést transformaci minimalizačních kritérií na maximalizační.

$$y_{ij} = -y_{ij} \quad (19)$$

Dále se utvoří normalizovaná kritériální matice $R = (r_{ij})$. Pro výpočet normalizovaných hodnot je navržen matematický vzorec:

$$r_{ij} = \frac{y_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^p (y_{ij})^2}} \quad (20)$$

$$\text{kde } \begin{aligned} i &= 1, 2, \dots, p \\ j &= 1, 2, \dots, k. \end{aligned}$$

Tato transformace v matici R převede sloupce na vektory jednotkové délky. Dále se vypočte vážená kritériální matice W způsobem, že každý j -tý sloupec normalizované kritériální matice R násobíme odpovídajícím prvkem váhového vektoru v_j :

$$W = \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & \dots & w_{1k} \\ w_{21} & w_{22} & \dots & w_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ w_{p1} & w_{p2} & \dots & w_{pk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_1 \cdot r_{11} & v_2 \cdot r_{12} & \dots & v_k \cdot r_{1k} \\ v_1 \cdot r_{21} & v_2 \cdot r_{22} & \dots & v_k \cdot r_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ v_1 \cdot r_{p1} & v_2 \cdot r_{p2} & \dots & v_k \cdot r_{pk} \end{bmatrix} \quad (21)$$

Z hodnot ve vážené kritériální matici určíme matematickými vztahy (22) a (23) její ideální variantu $H = (H_1, H_2, \dots, H_k)$ a bazální variantu $D = (D_1, D_2, \dots, D_k)$.

$$H_j = \max_i (w_{ij}); \quad i = 1, 2, \dots, k \quad (22)$$

$$D_j = \min_i (w_{ij}); \quad j = 1, 2, \dots, k \quad (23)$$

Po určení extrémních hypotetických variant je proveden výpočet vzdáleností jednotlivých hodnocených variant od varianty ideální dle následujícího vztahu využívajícího Euklidovu metriku, kde oba vektory vstupující do výpočtu obsahují stejný počet prvků:

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^k (w_{ij} - H_j)^2}; \quad i = 1, 2, \dots, p \quad (24)$$

kde w_{ij} je prvek vážené kriteriální matice v j -tém sloupci a i -tém řádku,
 H_j je prvek matice ideální varianty ve sloupci j .

Obdobným způsobem jsou matematicky určeny vzdálenosti od bazální varianty užitím patřičně upraveného vztahu:

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^k (w_{ij} - D_j)^2}; \quad i = 1, 2, \dots, p \quad (25)$$

kde w_{ij} je prvek vážené kriteriální matice v j -tém sloupci a i -tém řádku,
 D_j je prvek matice bazální varianty ve sloupci j .

Následuje krok výpočtu relevantního ukazatele vzdáleností variant od bazální varianty (26).

$$c_i = \frac{d_i^+}{d_i^+ + d_i^-}; \quad i = 1, 2, \dots, p \quad (26)$$

Dále pro hodnoty c_i platí:

$$0 \leq c_i \leq 1$$

$$c_i = 0 \Leftrightarrow a_i \approx (D_1, D_2, \dots, D_k) \quad (27)$$

$$c_i = 1 \Leftrightarrow a_i \approx (H_1, H_2, \dots, H_k) \quad (28)$$

V závěru metody jsou varianty seřazeny podle klesajících hodnot ukazatele c_i . Takto lze dospět k celkovému uspořádání všech hodnocených variant, kde nejlepší varianta dosahuje největší hodnoty c_i .

3.3.2.3 Metoda shody a neshody (CDA)

Analýza shody a neshody (Concordance Discordance Analysis) 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.

Index shody $C_{a_1a_2}$ alternativy a_1 s alternativou a_2 je definován jako podíl součtu vah těch kritérií, pro která je hodnocení a_1 větší nebo rovno hodnocení a_2 , a součtu vah všech kritérií. Potom pro index shody platí:

$$C_{a_1a_2} = \frac{\sum v_j (e_{a_1j} \geq e_{a_2j})}{\sum v_j} \quad (29)$$

kde v_j je prvek váhového vektoru v ve sloupci j ,
 e_{a_1j} je prvek vážené kritériální matice varianty a_1 pro j -té kritérium,
 e_{a_2j} je prvek vážené kritériální matice varianty a_2 pro j -té kritérium.

„Index neshody $D_{a_1a_2}$ alternativy a_1 s alternativou a_2 je definován jako podíl, kde čítecitel je roven maximálnímu rozdílu vážených hodnocení, pro která je hodnocení a_1 menší než hodnocení a_2 , a jmenovatel je roven maximálnímu rozdílu vážených hodnocení všech alternativ pro kritérium vykazující maximální hodnotu výše definovaného čitatele.“³⁴ Index neshody lze matematicky formulovat takto:

$$D_{a_1a_2} = \frac{D_1}{D_2} = \frac{\max(v_j \cdot e_{a_2j} - v_j \cdot e_{a_1j})(e_{a_1j} < e_{a_2j})}{\max(v_m \cdot e_{im}) - \min(v_m \cdot e_{im})} \quad (30)$$

kde $m = j$ při $D_1 = \max$.

Souhrnný index shody C_{a_1} alternativy a_1 je vypočten jako součet všech indexů shody alternativy a_1 vzhledem ke všem ostatním variantám:

$$C_{a_1} = \sum_{j=1}^J C_{a_1j} \quad (31)$$

Souhrnný index neshody D_{a_1} alternativy a_1 je určen součtem všech indexů neshody alternativy a_1 vzhledem ke všem ostatním variantám:

$$D_{a_1} = \sum_{j=1}^J D_{a_1j} \quad (32)$$

Předposledním krokem je setřídění jednotlivých možností řešení problému podle největší (resp. nejmenší) hodnoty indexu shody a nejmenší (resp. největší) hodnoty indexu neshody.

³⁴ KORVINY, P. *Teoretické základy vícekritériálního rozhodování*. 2006 [cit. 2012-28-11]. Dostupné na World Wide Web: <http://korviny.cz/mca7/soubory/teorie_mca.pdf>.

Výsledné hodnocení jednotlivých alternativ CDA_i lze získat z následujícího vzorce:

$$CDA_i = I - C_i + D_i \quad (33)$$

kde I je celkový počet variant řešení,
 C_i je souhrnný index shody alternativy a_i ,
 D_i je souhrnný index neshody alternativy a_i .

V posledním kroku se všechny alternativy možných řešení seřadí podle rostoucí (resp. klesající) hodnoty CDA .

3.3.3 Matematické metody určování kvantitativních multiplikátorů

Výsledná optimalizace při vícekriteriálním rozhodování je ve velké míře závislá na rozhodnutí o důležitosti hodnotících kritérií. Aby byla všem parametrům přiřazena co nejvhodnější váha, nabízí se užití metod pro stanovení váhových vektorů.

3.3.3.1 Metoda pořadí

Nejdůležitější kritérium je ohodnoceno k body, kde k je zároveň hodnota počtu kritérií. Druhé nejdůležitější kritérium se ohodnotí $k - 1$ body. Takto se postupuje až k nejméně důležitému kritériu, kterému je přiřazen 1 bod.³⁵

„Je-li obecně i -té kritérium ohodnoceno b_i body (jedinou hodnotou nebo součtem hodnot při hodnocení více experty), vypočítá se jeho váha na základě vztahu:

$$v_i = \frac{b_i}{\sum_{i=1}^k b_i}; \quad i = 1, 2, \dots, k. \quad (34)$$

Tento vzorec normalizuje informace o preferenci kritérií, postup se proto nazývá normalizace vah kritérií.³⁶ Hodnotě součtu čísel b_i ve jmenovateli vzorce (35) odpovídá následující vztah.

³⁵ BROŽOVÁ, H., HOUŠKA, M., ŠUBRT, T. *Modely pro vícekriteriální rozhodování*. Praha: CREDIT, 2003. 178 s. ISBN 80-213-1019-7.

³⁶ BROŽOVÁ, H., HOUŠKA, M., ŠUBRT, T. *Modely pro vícekriteriální rozhodování*. Praha: CREDIT, 2003. 178 s. ISBN 80-213-1019-7.

$$\sum_{i=1}^k b_i = \frac{k(k+1)}{2} \quad (35)$$

Metody pořadí lze vhodně využít ke stanovení neoptimálnějšího řešení z výstupů několika různých metod multikriteriálních analýz, jejichž výsledná pořadí variant nejsou shodná.

3.3.3.2 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 dle (36).

$$N = \binom{k}{2} = \frac{k(k-1)}{2} \quad (36)$$

Uvedené porovnání se většinou provádí pomocí tzv. Fullerova trojúhelníku. U každé dvojice prvků, které představují hodnotící faktory, se zakroužkuje ten prvek, který se považuje za důležitější. Je-li označen počet zakroužkování i -tého prvku n_i , pak ohodnocení či váha tohoto prvku se vypočte podle následujícího vztahu.³⁷

$$v_i = \frac{n_i}{N}; \quad i = 1, 2, \dots, k. \quad (37)$$

Schéma Fullerova trojúhelníku znázorňuje Tab. 5. Přehledně jej lze užít při kombinování v párovém porovnání všech hodnotících faktorů. Tvoří ho dvojřádky. Horní část vyplňuje vždy jeden hodnotící faktor, který je ve své důležitosti porovnávána s ostatními faktory.

³⁷ BROŽOVÁ, H., HOUŠKA, M., ŠUBRT, T. *Modely pro vícekritériální rozhodování*. Praha: CREDIT, 2003. 178 s. ISBN 80-213-1019-7.

Tab. 5 - Schéma Fullerova trojúhelníku³⁸

1	1	1	...	1
2	3	4	...	k
	2	2	...	
	3	4	...	
			...	
			k - 2	k - 2
			k - 1	k
				k - 1
				k

Nevýhodou vyplývající z postupu v této metodě je rovnost nejméně důležitého kritéria nulové hodnotě. V takovém případě lze všechny hodnoty n_i zvětšit o hodnotu 1. Stejným způsobem se musí zvětšit i hodnota jmenovatele N .

3.3.3.3 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 .³⁹

Pro výsledný zápis porovnání jednotlivých kritérií slouží tzv. Saatyho matice $S = (s_{ij})$, kde jsou uvedena všechna kritéria a jejich podíly podle následujícího předpisu (38).

³⁸ BROŽOVÁ, H., HOUŠKA, M., ŠUBRT, T. *Modely pro vícekritériální rozhodování*. Praha: CREDIT, 2003. 178 s. ISBN 80-213-1019-7.

³⁹ BROŽOVÁ, H., HOUŠKA, M., ŠUBRT, T. *Modely pro vícekritériální rozhodování*. Praha: CREDIT, 2003. 178 s. ISBN 80-213-1019-7.

$$S = \begin{pmatrix} 1 & s_{12} & \dots & s_{1n} \\ 1/s_{12} & 1 & \dots & s_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/s_{1k} & 1/s_{12} & \dots & 1 \end{pmatrix} \quad (38)$$

„Jsou-li i -té a j -té kritérium rovnocenná, je $s_{ij} = 1$, preferuje-li slabě i -té kritérium před j -tým, je $s_{ij} = 3$, preferuje-li silně i -té kritérium před j -tým, je $s_{ij} = 5$, při velmi silné preferenci i -tého kritéria je $s_{ij} = 7$, při preferenci absolutní dokonce $s_{ij} = 9$. Je-li preferováno j -té kritérium před i -tým, zapíší se do Saatyho matice převrácené hodnoty ($s_{ij} = 1/3$ při slabé preferenci, $s_{ij} = 1/5$ při silné preferenci atd.).“⁴⁰

„Matice je čtvercového řádu $n \times n$, reciproční, tj. platí, že $s_{ij} = 1/s_{ji}$, a vyjadřuje vlastně odhad podílů vah i -tého a j -tého kritéria.“⁴¹ Z toho také plyne, že na diagonále Saatyho matice se nachází hodnoty 1, které vyjadřují porovnání každého kritéria se sebou samým.

„Prvky této matice nebývají většinou dokonale konzistentní, tzn. že neplatí $s_{hj} = s_{hi} \times s_{ij}$ pro všechna $h, i, j = 1, 2, \dots, n$.“⁴² Míru konzistence lze změřit výpočtem indexu konzistence I_S . Tento postup definoval Saaty takto:

$$I_S = \frac{l_{\max} - n}{n - 1} \quad (39)$$

kde l_{\max} je největší vlastní číslo matice stanovené pro Saatyho matici,
 n je počet hodnotících kritérií.

Pokud $I_S < 0,1$, je Saatyho matice považována za dostatečně konzistentní. Pro výpočet největšího vlastního čísla matice l_{\max} lze vhodně užít aplikace MATLAB se souborem funkcí *eig* a *diag*.

„Pokud je sestavena matice $V = (v_{ij})$, v níž prvky představují skutečné podíly vah $v_{ij} = v_i/v_j$, váhy v_j by se daly odhadnout z podmínky, že matice S by se měla co nejméně lišit od matice V . V obvyklém pojetí by to znamenalo minimalizovat součet čtverců odchylek

⁴⁰ BROŽOVÁ, H., HOUŠKA, M., ŠUBRT, T. *Modely pro vícekritériální rozhodování*. Praha: CREDIT, 2003. 178 s. ISBN 80-213-1019-7.

⁴¹ BROŽOVÁ, H., HOUŠKA, M., ŠUBRT, T. *Modely pro vícekritériální rozhodování*. Praha: CREDIT, 2003. 178 s. ISBN 80-213-1019-7.

⁴² BROŽOVÁ, H., HOUŠKA, M., ŠUBRT, T. *Modely pro vícekritériální rozhodování*. Praha: CREDIT, 2003. 178 s. ISBN 80-213-1019-7.

stejnolehlých prvků obou matic. Pro jejich výpočet by pak bylo nutno vyřešit optimalizační model

$$F = \sum_i \sum_j \left[s_{ij} - \frac{v_i}{v_j} \right]^2 \rightarrow \min \quad (40)$$

$$\text{za podmínky } \sum_{j=1}^n v_j = 1. \text{''}^{43}$$

„Jedná se však o model nekonvexního kvadratického programování, což způsobuje výpočetní potíže.“⁴⁴

Z tohoto důvodu, pro usnadnění výpočetního postupu, navrhl Saaty několik numerických metod. Nejužívanějším postupem je metoda normalizovaného geometrického průměru řádků Saatyho matice.

$$g_i = \sqrt[k]{\prod_{j=1}^k s_{ij}} ; \quad i, j = 1, 2, \dots, k. \quad (41)$$

kde s_{ij} jsou prvky Saatyho matice.

Samotnou normalizaci určených vah lze provést následujícím vztahem.

$$v_i = \frac{g_i}{\sum_{i=1}^k g_i} ; \quad i, j = 1, 2, \dots, k. \quad (42)$$

kde g_i je normalizovaný geometrický průměr řádků.

Dalším eventuálním postupem, který umožňuje pouze dostatečná konzistence Saatyho matice, je řešit soustavu rovnic (43) a (44).

$$S \cdot v = l_{\max} \cdot v \quad (43)$$

$$\sum_{i=1}^k v_i = \alpha \quad (44)$$

kde v je vlastní vektor matice S a přísluší největšímu vlastnímu číslu,
 l_{\max} je největší vlastní číslo matice stanovené pro Saatyho matici,
 α je váha i -tého kritéria.

⁴³ BROŽOVÁ, H., HOUŠKA, M., ŠUBRT, T. *Modely pro vícekritériální rozhodování*. Praha: CREDIT, 2003. 178 s. ISBN 80-213-1019-7.

⁴⁴ BROŽOVÁ, H., HOUŠKA, M., ŠUBRT, T. *Modely pro vícekritériální rozhodování*. Praha: CREDIT, 2003. 178 s. ISBN 80-213-1019-7.

Jeden z několika možných numerických postupů je založen na užití Wielandtovy věty⁴⁵ v následujícím vztahu:

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \frac{S^r \cdot e}{e^T \cdot S^r \cdot e} = c \cdot v \quad (45)$$

kde S je pozitivní reciproční matice o rozměru $m \times n$,
 v je vlastní vektor matice S a přísluší největšímu vlastnímu číslu,
 c je konstanta,
 e^T je vektorem, který má hodnotu $e^T = (1, 1, \dots, 1)$.

Vztah (45) vyjadřuje, že vektor, který je tvořen součtem prvků řádků r -té mocniny matice S a dělený součtem všech prvků z této matice, se blíží pro dostatečně velkou hodnotu r vlastnímu vektoru matice S , který přísluší největšímu vlastnímu číslu. Z tohoto zápisu vyplývá poměrně snadný postup iteračního výpočtu. V každém jednotlivém iteračním kroku se dosazuje do vztahu $(S^r \cdot e)/(e^T \cdot S^r \cdot e)$ pro $r = 1, 2, 4, 8, \dots$

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

3.3.4 Metoda analýzy datových obalů

Vzhledem k tomu, že předchozí uvedené metody multikriteriálního hodnocení provádí optimalizaci výběrem z variant řešení a věnují se jejich případnému seřazení podle optimálnosti (míry užitku apod.) a nepřináší tak ve větším množství variant přehledné informace k možné optimalizaci variant vyhodnocených jako neoptimální, bude využita metoda datových obalů (DEA - Data Envelopment Analysis), která umožňuje získat zpětnou vazbu o efektivnosti jednotlivých vstupů, příp. výstupů, z kterých původní kriteriální matice sestává. Lze tak ověřit koncept navrženého optimalizačního algoritmu v kapitole 4.3.1 odlišnou matematickou metodou.

Jedná se o další metodu z kategorie metod vícekriteriálního rozhodování, před jejíž aplikací je nutné kriteriální matici uspořádat podle následujícího předpisu v Tab. 6 a dle zvolených vstupů a výstupů pro jednotlivé hodnotící faktory, které již při výpočtech nejsou zatíženy váhovými vektory.

⁴⁵ SAATY, T. L. *The Analytic Hierarchy Process*. New York: McGraw Hill, 2008.

Tab. 6 - Obecný předpis pro vstupní kritériální matici

	Vstupy				Výstup
	$X_1 (f_2)$	$X_2 (f_3)$	$X_3 (f_4)$	$X_4 (f_5)$	$Y_1 (f_1)$
S_1	x_{11}	x_{21}	x_{31}	x_{41}	y_1
S_2	x_{12}	x_{22}	x_{32}	x_{42}	y_2
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
S_n	x_{1n}	x_{2n}	x_{3n}	x_{4n}	y_n

Výstupy jsou hodnoceny jako maximalizační kritéria a vstupy jako minimalizační. Proto se jako efektivní varianty hledají hodnocené jednotky, které při minimálních vstupech produkují maximální výstupy.

K analýze lze využít nejjednodušší typ výpočtového modelu - vstupově orientovaný CCR model. Tento model předpokládá přímou úměrnost mezi vstupy a výstupy. Vzhledem k malému množství variant je vhodnější, než složitější modely (např. BCC model), které uvažují nekonstantní vztahy mezi vstupy a výstupy a vyhodnocují více jednotek jako efektivních.

Výpočtový model relativní technické efektivity Φ_H sestavený pro jednotku H (jednu z analyzovaných variant řešení) má tvar⁴⁶:

$$\Phi_H = \frac{\sum_{j=1}^n u_{jH} y_{jH}}{\sum_{i=1}^m v_{iH} x_{iH}} \rightarrow \circ \max \quad (46)$$

$$\text{za podmínky } \frac{\sum_{j=1}^n u_{jH} y_{jk}}{\sum_{i=1}^m v_{iH} x_{ik}} \leq 1, k = 1, 2, \dots, p, u_{jH} \geq 0, v_{iH} \geq 0$$

- kde u_{jH} jsou individuální váhy výstupů j jednotky H ,
 v_{iH} jsou individuální váhy vstupů i jednotky H ,
 y_{jH} jsou výstupní hodnoty jednotky H ,
 x_{iH} jsou vstupní hodnoty jednotky H ,
 x_{ik} je množství spotřebovaného vstupu k -tou jednotkou,

⁴⁶ COOPER, W., SEIFORD, L., ZHU, J. *Handbook on Data Envelopment Analysis*. USA: Springer US, 2011. 497 s. ISBN: 978-1-4419-6150-1.

y_{ik} je množství výstupu produkovaného k -tou jednotkou,
 p počet hodnocených jednotek.

Počet modelů je závislý na počtu jednotek p , tedy na počtu hodnocených variant. Řešení takové soustavy výpočtových modelů je provedeno pomocí optimalizační metody lineárního lomeného programování.

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. Význam matematického modelu superefektivnosti spočívá v tom, že při výpočetním stanovení míry superefektivnosti se váha původní efektivní jednotky položí rovna nule (prakticky dojde k vyřazení 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.⁴⁷

Počet výsledných efektivních jednotek je závislý na počtu vstupních parametrů. Při větším množství těchto parametrů metoda vytváří i větší množinu efektivních jednotek. Je tedy nutné mít připravenou adekvátně rozsáhlou databázi posuzovaných jednotek (variant).

Oba popsané modely metody analýzy datových obalů jsou implementovány v počítačové aplikaci Frontier Analyst 4, která bude při jejich řešení využita. Umožňuje snadno importovat datový soubor z aplikace MS Excel, připravený již z prováděných předchozích multikriteriálních analýz.

3.4 Experimentální měřící metody

Významnou součástí výzkumu jsou data získané aplikovanými experimenty. Slouží nejen k ověření nově získaných teoretických poznatků, ale také k rozšíření sestavy těchto poznatků pro jejich uplatnění při multikriteriálním optimalizačním procesu.

⁴⁷ JABLONSKÝ, J.; DLOUHÝ, M. *Modely hodnocení efektivnosti produkčních jednotek*. 1. vyd. Praha: Professional Publishing, 2004. 184 s. ISBN 80-86419-49-5.

3.4.1 Laboratorní stanovení nasákavosti kompozitního materiálu

Nasákavost je jednou z důležitých vlastností tepelně izolačních materiálů. Každý konstrukční detail má svá technická specifika a požadavky na přípustné hodnoty nasákavosti. Aplikace kompozitního materiálu není omezena pouze na stavební detaily plochých střech, ale lze jej úspěšně aplikovat i do detailů při spodní stavbě (přechod nosné stěny na základovou konstrukci, příp. tzv. jako konstrukce pod prahovou spojku⁴⁸). Tyto zmíněné stavební detaily kladou důraz na nízkou nasákavost materiálu. V případě konstrukčních detailů plochých jednoplašťových střech není nutné užití materiálů, které jsou nenasákavé, ale nízký stupeň nasákavosti je důležitým faktorem pro jejich užitnou tepelně izolační hodnotu, která je vlhkostí více či méně degradována.

3.4.1.1 Postup měření

Nasákavost a postupy (Metody 1-4) k jejímu určení u materiálů na bázi plastů definuje norma ČSN EN ISO 62 (64 0112) – Plasty – Stanovení nasákavosti ve vodě. Pro Metodu 1 (Stanovení množství vody absorbované po ponoření do vody o teplotě 23 °C) dle normy platí vztah:

$$c = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \cdot 100\% \quad (47)$$

kde m_1 je hmotnost vzorku po vysušení v mg,
 m_2 je hmotnost vzorku po ponoření v mg,
 c je nasákavost v %.

Normou je dále definován následující postup: Vysoušení všech zkušebních vzorků má být provedeno v sušárně na teplotu (50 ± 2) °C na dobu alespoň 24 hod a dále má být umožněno jejich vychladnutí na teplotu místnosti v exsikátoru před jejich vážením s přesností 0,1 mg (hmotnost m_1). Poté mají být vzorky uloženy do nádoby s destilovanou vodou o teplotě $23,0 \text{ °C} \pm 1,0 \text{ °C}$ nebo $\pm 2,0 \text{ °C}$ v závislosti na příslušné specifikaci. V případě absence specifikace by měla být tolerance $\pm 1,0 \text{ °C}$. Po ponoření na (24 ± 1) hod je nutné vyjmout

⁴⁸ SMOLKA, R.; MATĚJKA, L. *Izolační prvek pod prahovou spojku dveří*. 34. Vedecká konferencia katedier a ústavov konštrukcií pozemných stavieb. Žilina: Miroslav Gibala, KNM, 2010. s. 35-38. ISBN: 978-80-970171-6-3.

vzorky a očistit jejich povrch suchou textilií, příp. filtračním papírem. Znovu se zváží zkušební vzorky s přesností 0,1 mg do 1 min od jejich vyjmutí z vody (hmotnost m_2).⁴⁹

Vysoušení vzorků bude realizováno v elektrické peci za teploty $(50 \pm 2) ^\circ\text{C}$ v časovém úseku 24 h. Poté budou vzorky zváženy na analytické váze s přesností na 0,1 mg. Další vážení podle požadavků z normy bude uskutečněno po ponoření vzorku na 24 h do destilované vody. Každé měření se provede třikrát.

3.4.1.2 Výsledky měření

Dle normou stanovené a v kapitole 3.4.1.1 popsané metodiky byla změřena a vypočtena následující data (Tab. 7) na 23 připravených vzorcích kompozitního materiálu o stejných rozměrech válcového tvaru (průměr $d = 100$ mm, výška $v = 20$ mm).

Tab. 7 - Určení nasákavosti c [%] u vybraných vzorků kompozitního materiálu

Číslo vzorku	Hmotnost po vysušení m_1 [mg]	Hmotnost po ponoření m_2 [mg]	Vypočtená nasákavost c [%]
42	91,7484	93,0775	1,448635617
43	90,1335	92,3020	2,405875729
44	91,8290	99,4990	8,352481242
45	90,1048	91,0680	1,068977457
47	92,3380	96,4210	4,421798176
48	91,7385	92,9600	1,331502041
49	82,6275	84,0260	1,692535778
50	81,4703	83,1760	2,093646396
52	79,6594	81,1690	1,895068253
53	76,9141	77,5970	0,887873615
54	76,8158	78,6770	2,422939031
55	74,1821	76,0320	2,493728271
56	72,5145	76,2370	5,133456067
58	75,6072	80,2720	6,169782772
60	79,8533	81,5282	2,097471238
61	73,6531	79,3320	7,710333985
62	81,3331	86,3140	6,124074946
63	79,7656	83,3150	4,449787878
64	73,5930	77,7860	5,697552756
65	80,1242	82,1530	2,532068963
66	71,2925	75,5150	5,922782901
67	71,0821	75,1304	5,695245357
68	79,0003	84,7930	7,332503801

⁴⁹ ČSN EN ISO 62 (64 0112) *Plasty – Stanovení nasákavosti ve vodě*. Praha: Český normalizační institut 2008.

Grafické vyjádření rozptylu změřených hodnot s vyznačením barevných hladin pro maximum, minimum a průměr představuje graf na Obr. 7.



Obr. 7 - Graf s výsledky měřené nasákavosti c [%]

Jelikož výroba testovacích vzorků probíhá zatím jen v experimentálních podmínkách, není možné vždy stoprocentně zaručit uzavření povrchové struktury materiálu. Vzorek č. 53, který má uzavřenou povrchovou strukturu, dosáhl nasákavosti 0,89 % a vzorek č. 44 s porušenou povrchovou strukturou výrazněji nasákl až na hodnotu 8,35 %. Tyto vzorky a povrchové poškození jsou patrné z Obr. 8. V návaznosti na těchto výsledcích měření a pozorování byla vyvozena hypotéza, že nasákavost může být poškozením povrchu vzorku jistým způsobem ovlivňována.



Obr. 8 - Vzorek č. 53 (nahore) bez porušené povrchové struktury a vzorek č. 44 (dole) s porušenou strukturou povrchu

Takové povrchové poškození nejčastěji vzniká nedostatkem polymerního materiálu v lisovací formě, jenž je vytlačován při lisování odtokovými kanálky. Případně může vzniknout nedostatečným stlačením formy v lisu.

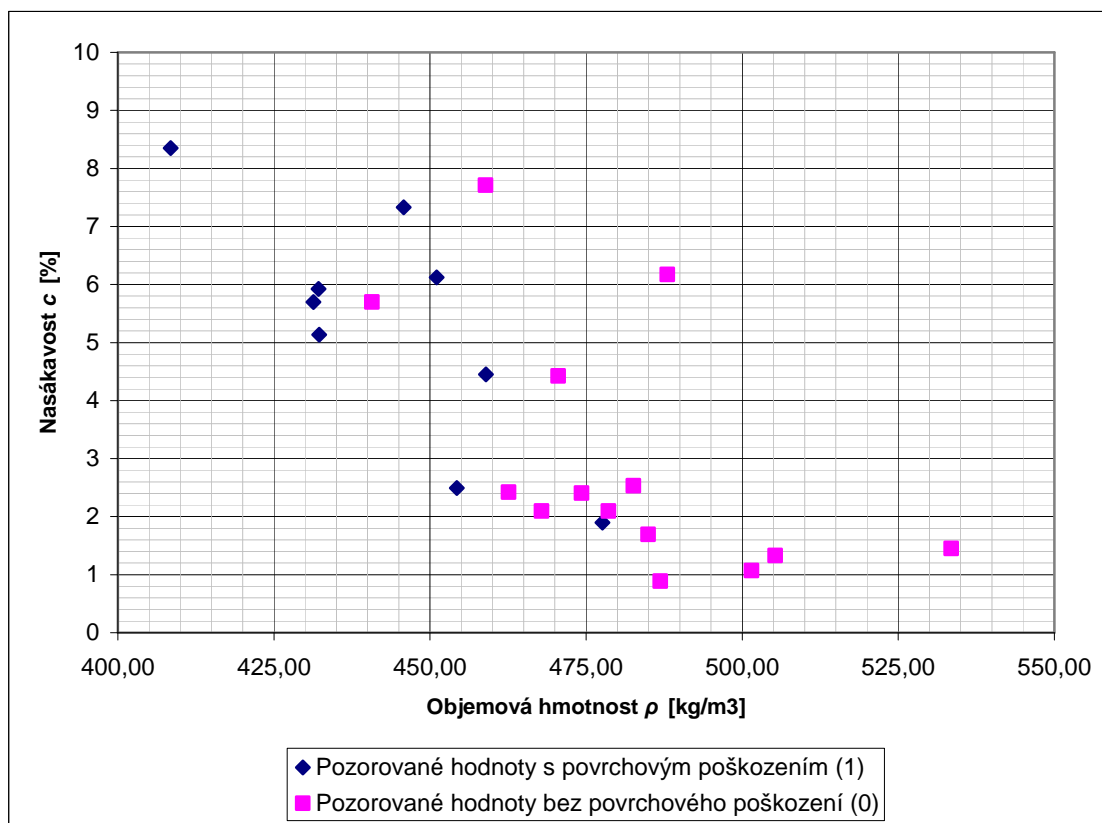
Pokud by povrchové poškození ovlivňovalo parametr nasákavosti, nebyly by změřené výsledky pro koncový produkt bez povrchového poškození validní. Jeden z předpokladů tedy byl, že dalšího zlepšení nasákavosti lze pravděpodobně docílit dokonale uzavřenou povrchovou strukturou výrobku. Proto bylo cílem ověřit vliv povrchového poškození vzorku na jeho změřenou nasákavost. K tomuto účelu byla zavedena binární proměnná Povrchové poškození nabývající hodnoty 0 (nepoškozeno) a 1 (poškozeno). Její stanovené hodnoty jsou uvedeny v Tab. 8.

Tab. 8 - Přehled měřených vzorků s parametrem objemové hmotnosti a zavedené binární proměnné Povrchového poškození

Číslo vzorku	Vypočtená nasákavost c [%]	Objemová hmotnost ρ [kg/m ³]	Povrchové poškození [0 – nepoškozeno, 1 – poškozeno]
42	1,448635617	533,48	0
43	2,405875729	474,29	0
44	8,352481242	408,47	1
45	1,068977457	501,50	0
47	4,421798176	470,53	0
48	1,331502041	505,31	0
49	1,692535778	484,95	0
50	2,093646396	478,58	0
52	1,895068253	477,63	1
53	0,887873615	486,89	0
54	2,422939031	462,57	0
55	2,493728271	454,28	1
56	5,133456067	432,26	1
58	6,169782772	488,04	0
60	2,097471238	467,86	0
61	7,710333985	458,89	0
62	6,124074946	451,07	1
63	4,449787878	458,94	1
64	5,697552756	431,34	1
65	2,532068963	482,58	0
66	5,922782901	432,15	1
67	5,695245357	440,68	0
68	7,332503801	445,77	1

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. Nevýznamnost povrchového poškození je také patrná z kategorizovaného bodového grafu (Obr. 9).⁵⁰

⁵⁰ 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.



Obr. 9 - Přehled pozorovaných hodnot s povrchovým poškozením a bez povrchového poškození

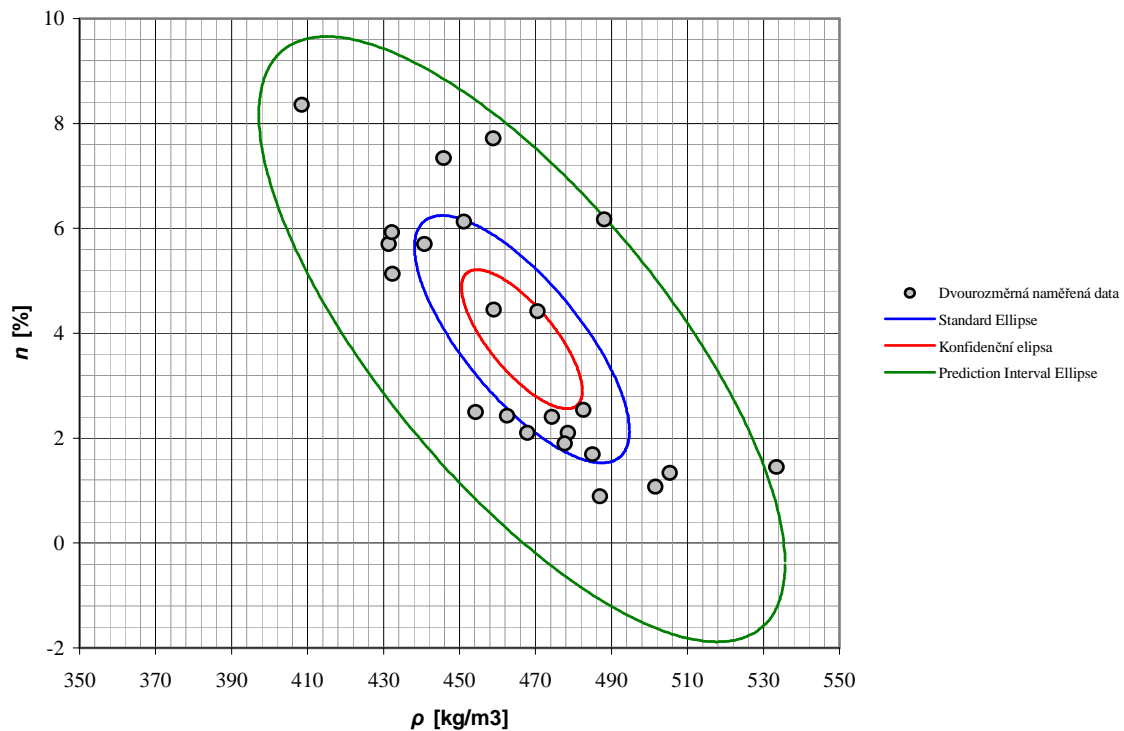
I přesto, že závislost mezi povrchovým poškozením vzorků a jejich naměřenou nasákavostí nebyla prokázána, jsou tyto povrchové defekty problematické z dalších příčin. Je nutné omezit zatékání do pórů prvků expandovaného skla, což by mohlo vést k postupné destrukci struktury kompozitního produktu při změnách teplot pod 0 °C. V případě, kdy by docházelo ke změně skupenství této vody z kapalného na pevné, vzniká v materiálu krystalický tlak z důvodu objemových změn absorbovaného množství vlhkosti (až o 9 % zvětšení objemu).⁵¹ Odladěním technologického postupu výroby vzorků a následně i výroby stavebních prvků z tohoto materiálu tak, aby nedocházelo k porušení povrchové struktury, lze postoupit k ještě lepším výsledkům v oblasti aplikace výrobku.

⁵¹ COBB, A., B. *Earth chemistry*. USA: New York, Chelsea House, 2009. 130 s. ISBN: 07-910-9677-7.

3.4.1.3 Ověření závislosti veličiny nasákavosti na materiálovém složení vzorků⁵²

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. Již z grafu na Obr. 10 je patrný vztah mezi objemovou hmotností a nasákavostí zkoumaného materiálu. Předpokládaná závislost a oblast predikčního intervalu je znázorněna pomocí elips (standardní, konfidenční a predikční).

Vlastní ověření míry souvislosti zmíněných veličin je provedeno metodou výpočtu Pearsonova korelačního koeficientu.



Obr. 10 - Předpokládaná závislost znázorněná pomocí konfidenční elipsy

⁵² 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.

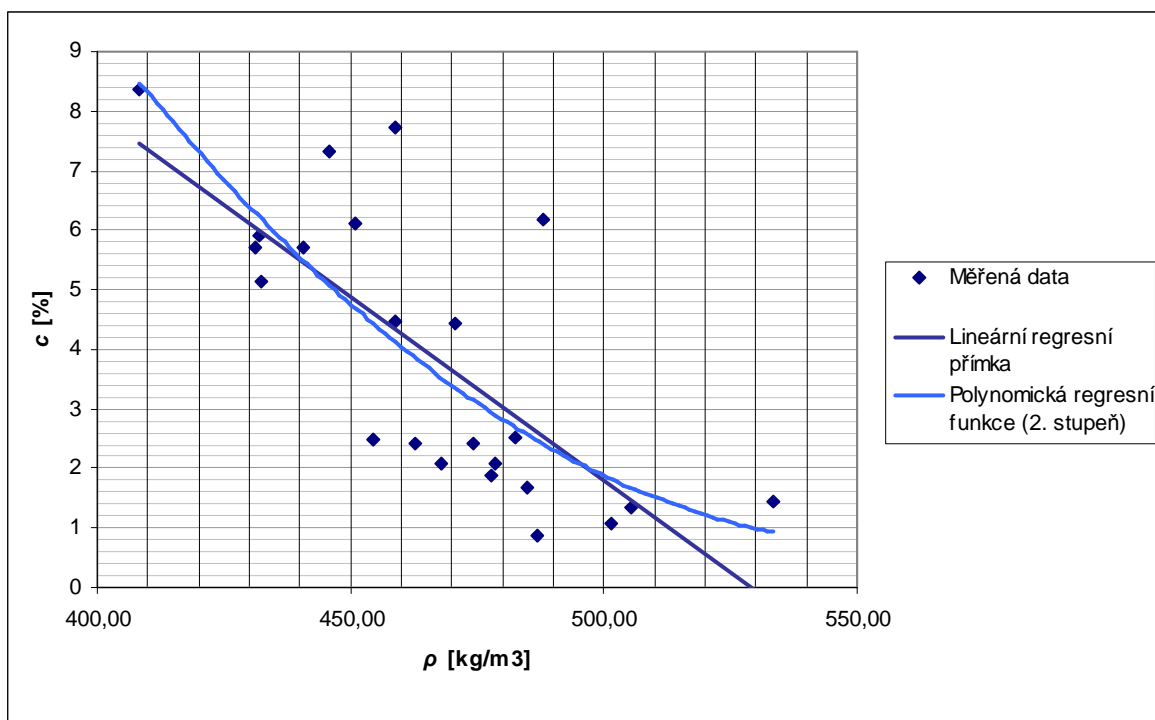
Hodnota Pearsonova korelačního koeficientu je -0,74 a lze ji ze statistického hlediska interpretovat jako silnou nepřímou souvislost mezi objemovou hmotností a nasákavostí zkoumaného materiálu.

Pro modelování závislosti nasákavosti na vybrané vysvětlující proměnné objemové hmotnosti byly sestaveny dva regresní modely. První modeluje závislost na objemové hmotnosti pomocí regresní přímky a druhý užitím regresního polynomu druhého stupně (Obr. 11). První model byl zvolen v rámci výpočetní jednoduchosti a přehlednosti. Druhý model byl vytvořen pro větší přesnost na základě teoretické hypotézy, že nasákavost nemůže být nikdy nulová a lze očekávat spíše parabolický průběh chování nasákavosti materiálu.

Po ověření předpokladů a provedení testů se však na zkoumaném intervalu hodnot objemové hmotnosti jako nejlepší model ukázal model s regresní přímkou (484848).

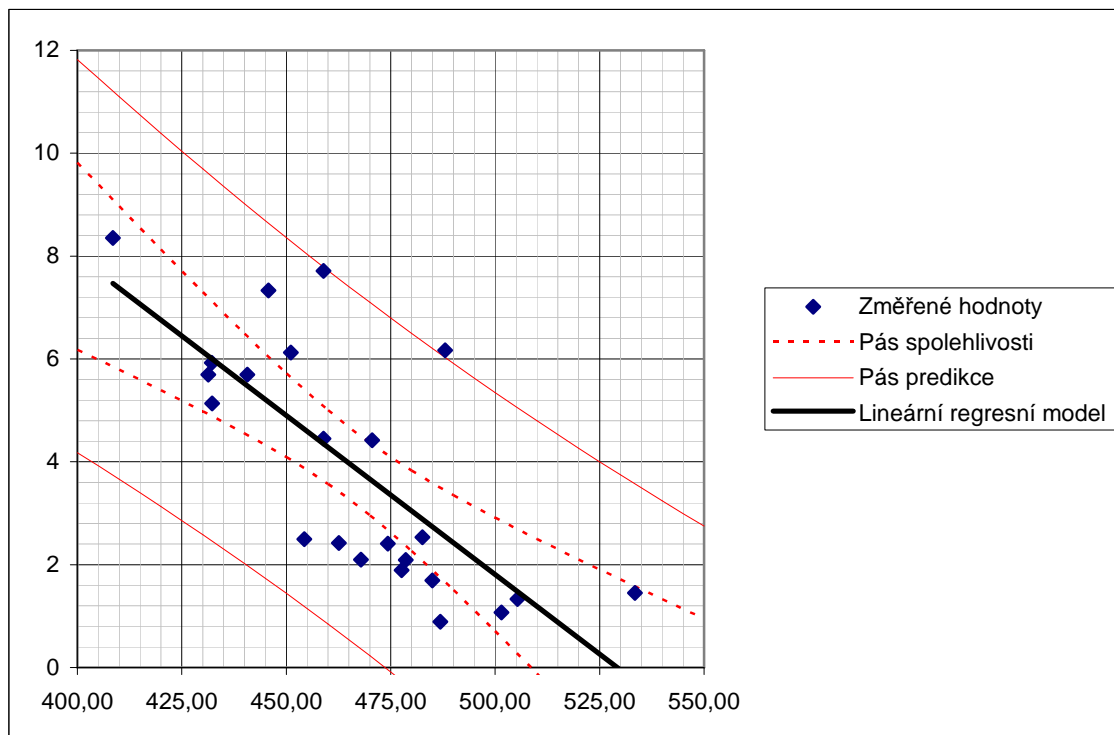
$$f(x) = y = 32,739 - 0,0619 \cdot x \quad (48)$$

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



Obr. 11 - Sestavení regresních modelů (lineární a polynomický 2. stupně)

Pro lineární regresní model byly sestaveny pásy spolehlivosti a predikce (Obr. 12).



Obr. 12 - 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. 11 a dosazením do rovnice (48) je zřejmé, že pro objemovou hmotnost větší, než $480,75 \text{ kg/m}^3$ je bodový odhad očekávané nasákavosti menší, než žádoucí 3% . 95%-ní intervalový odhad očekávané nasákavosti je vyjádřen přerušovanou křivkou. Tedy na 95 % se lze spolehnout, že pro objemovou hmotnost větší než 500 kg/m^3 bude i horní odhad pro očekávanou nasákavost pod 3% .

Zjištěné výsledky pro hodnotu nasákavosti byly zapracovány v kapitole 4.3.7 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 na nich prováděných. Pro vybraný referenční model konstrukce bude nalezen vhodný objekt a provedeno experimentální tepelně technické měření v reálném prostředí.

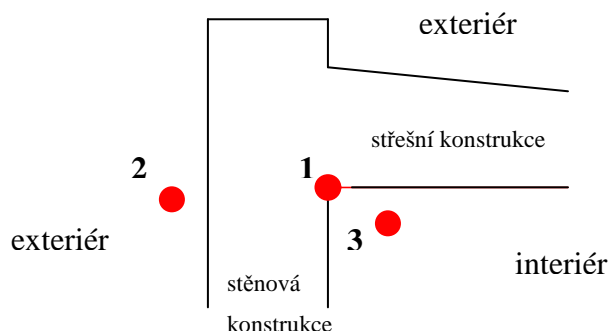
3.4.2.1 Popis měřicí aparatury

Měřicí ústředna ALMEMO 3290-8 V5 je univerzálním měřicím přístrojem s programovatelnými konektory pro měření fyzikálních veličin. Princip funkce spočívá v kombinaci mikroprocesorem řízeného indikačního aparátu o vysoké rozlišovací schopnosti s inteligentními ALMEMO konektory vybavenými pamětí. Tato paměť typu EEPROM slouží pro ukládání parametrů snímače. Konektory lze k přístroji připojit různá čidla. Přístroj získá parametry čidla z paměti konektoru a tak automaticky nastaví potřebné funkce. Všechna data jsou zobrazena na LCD displeji. Velikost paměti pro ukládání naměřených dat je 130 kB. Měřicí ústředna ALMEMO 3290-8 disponuje 9 univerzálními vstupy a 2 výstupy.

K měřicí ústředně budou připojeny termočlánky NiCr-Ni T683-2 (typ K) pro měření teploty, které jsou zařazeny podle normy DIN IEC 584-2 do první třídy s tolerancí $\pm 1,5^{\circ}\text{C}$ nebo $\pm 0,004 \cdot t$, kde t je naměřený teplotní údaj. Tato drátová teplotní čidla snímají teplotu pomocí principu termoelektrického jevu v rozmezí -40 až $+1000^{\circ}\text{C}$.

3.4.2.2 Průběh vlastního měření

Měření je nutné provádět v zimním období při poklesu vnější teploty pod 0°C . Hodnoty je nezbytné zaznamenávat kontinuálně v delších časových úsecích vzhledem k potřebě eliminovat nepřesnosti způsobené tepelně akumulací vlastnostmi stavebních materiálů a vzhledem k předpokládaným občasným výkyvům teplot v interiéru vlivem tepelných zdrojů. Teplotní čidla budou vhodně rozmístěna (schéma na Obr. 13) na měřeném objektu v místě, kde je předpokládána vnitřní extrémní povrchová teplota (ozn. 1) a dále pro měření vnější (ozn. 2) a vnitřní (ozn. 3) teploty prostředí.



Obr. 13 - Schéma rozmístění tepelně technických měřicích čidel na stavební konstrukci

Měřena bude také relativní vlhkost v interiéru, aby byly ověřeny běžné podmínky (srovnatelné s normovými hodnotami) vyskytující se v interiéru obytné místnosti. Získaná

experimentální data budou stažena do aplikace MS Excel. Výstupní údaje budou graficky přehledně zpracovány.

3.4.2.3 Analýza a komparace získaných výsledků

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

Výsledky práce jsou členěny podle postupného vypracování dílčích úkolů, které jsou stanoveny hlavními a vedlejšími cíly disertační práce. První část zahrnuje specifikaci návrhů konkrétních konstrukčních detailů a jejich způsob členění. Dále se práce zabývá tepelně technickou analýzou výpočetních modelů s částečnou komparací s naměřenými daty vybrané reálné konstrukce a posouzením na požadavky platných technických norem vztahujících se k této problematice. V další rozsáhlé kapitole je zpracována optimalizace návrhů konstrukčních detailů sestavením a užitím optimalizačního algoritmu na základě aplikace multikriteriálních hodnotících metod. Ve srovnání s tradičními konstrukčními detaily jsou protipólem především inovační řešení s užitím stavebních dílců z kompozitního materiálu na bázi druhotných surovin, jehož stanovením nasákavosti se zabývá závěrečná kapitola.

4.1 Přehled členění a značení konstrukčních detailů s charakteristikou

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, jež spočívají v tvarech návrhu konstrukcí a druhů užitých stavebních, především tepelně izolačních materiálů.

4.1.1 Konstrukční detail A - ukončení ploché jednoplášťové střechy atikou

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. Důsledkem je, že v prvním pojetí se konstrukce zvětšuje aplikací vrstvy tepelné izolace ve dvou osových směrech. Pro druhou koncepci platí zvětšování konstrukce jen v horizontálním osovém směru. Výška konstrukce při aplikaci tepelného izolantu ve vodorovné vrstvě je kompenzována snížením zdiva v atikové nadezdívce.

Tab. 9 - 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. 4b)	
A3.x	A3.1	Aplikace tepelné izolace pouze v horizontální rovině při ukončení atikové nadezdívky (Obr. 4a)	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. 4c)	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. 4d)	S vertikální změnou tvaru konstrukce
	A5.2		Bez vertikální změny tvaru konstrukce
A6.x	A6.1		S vertikální změnou tvaru konstrukce
	A6.2.x	c	Bez vertikální změny tvaru konstrukce
		e	
		p	
		f	
A6.2		Aplikace tepelné izolace v horizontální rovině pod atikovou nadezdívkou v úrovni tepelné izolace střešního pláště (Obr. 5) c - termoizolační blok z kompozitního materiálu e - dutinová tvarovka vyplněná expandovaným perlitem p - dutinová tvarovka vyplněná polystyrenem EPS f - deska pěnového skla	

Konstrukční detail s označením A6.2.c využívá fyzikálních vlastností termoizolačního bloku⁵³ 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.⁵⁴

4.1.2 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

⁵³ 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.

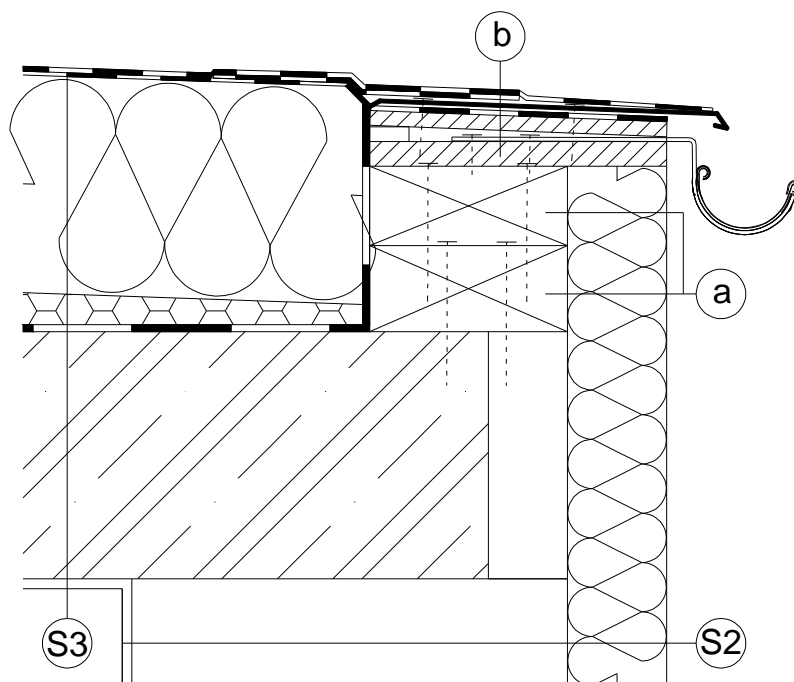
⁵⁴ MATĚJKA, L.; PĚNČÍK, J. *Design details of low-energy and passive houses using composites from waste raw materials*. David Publishing Company, 2011, roč. 5, č. 5, s. 440-453. ISSN: 1934-7359.

materiálovému řešení byly stanoveny 3 základní varianty s označením B1, B2 a B3. Jejich přehled je uveden v Tab. 10.

Tab. 10 - Přehled konstrukčních variant stavebního detailu B a jejich označení

Označení konstrukce	Popis konstrukce
B1	Aplikace dřevěných prvků pro přerušení tepelného mostu a kotvení klempířských konstrukcí
B2	Aplikace ocelového rámu vyplněného polystyrenem EPS pro přerušení tepelného mostu a kotvení klempířských konstrukcí
B3	Aplikace termoizolačních bloků z kompozitního materiálu pro přerušení tepelného mostu a kotvení klempířských konstrukcí

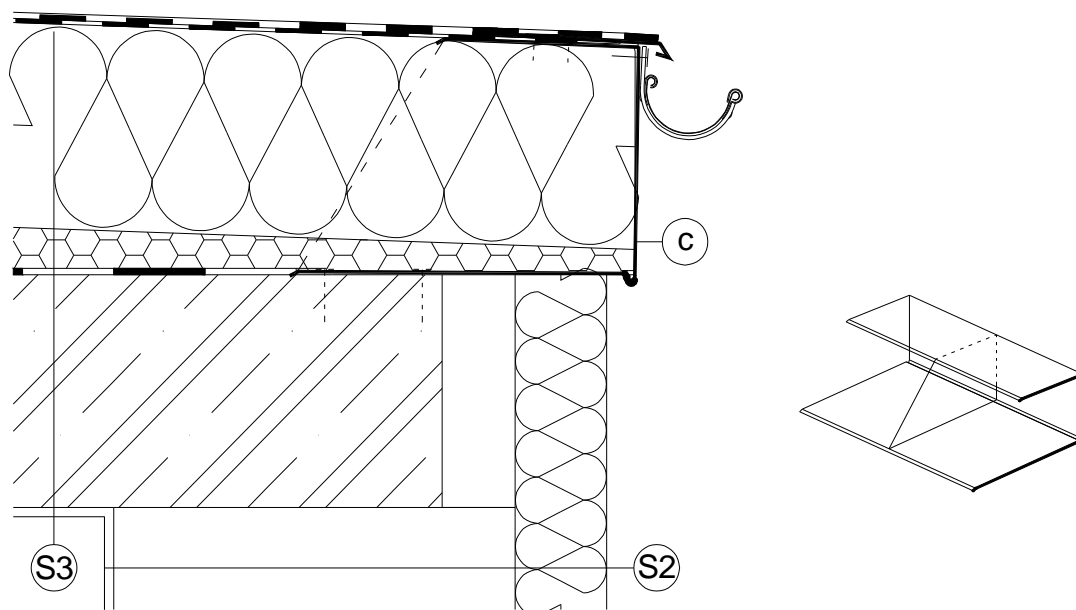
Varianta B1 (Obr. 14) je dnes již tradičním řešením tohoto konstrukčního detailu. Podklad pro kotvení klempířských prvků tvoří zpravidla 2 vrstvy fošen. Ty mají maximální délku 2 m, z důvodu zabránění jejich kroucení. Pokud je použita pojistná hydroizolace, tvar spodního povrchu fošny v první vrstvě je pak nutné upravit drážkami pro odvod vody z pojistné hydroizolace. V takovém případě jsou však dřevěné prvky namáhány vodou, což není z konstrukčního hlediska přípustné. V první vrstvě jsou fošny kotveny do podkladní konstrukce, v druhé se poté kotví k vrstvě první. Do druhé vrstvy se upevňují žlabové háky. Vykonzoloované fošny přes fasádní tepelnou izolaci jsou ještě opatřeny oplechováním, které je do nich kotveno. Samotné vykonzolování však není možné v příliš velkém rozsahu.



Obr. 14 - Schéma konstrukčního řešení B1 pomocí dřevěných prvků (a – trámy, b – OSB desky)

Podkladem pro kotvení klempířských prvků mohou být také dřevoštěpkové desky, příp. desky cementotřískové, které lze uložit na dřevěné fošny, či hranol. Někdy bývá podkladem v omezené tloušťce tepelně izolační prvek z tužšího polystyrenu XPS. Lepší provedení podkladu pro dřevěné desky umožňují tuhé bloky tepelné izolace z materiálu PIR (polyisokyanurátová pěna), jehož užití je však zpravidla ekonomicky příliš náročné a málo rozšířené.

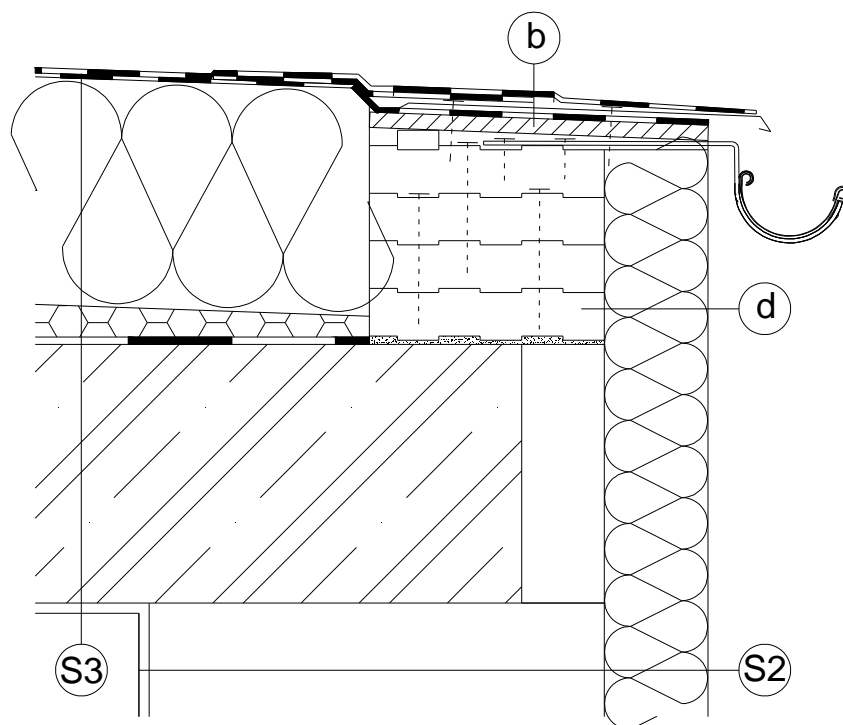
V konstrukční variantě B2 (Obr. 15) je využit pozinkovaný plech U-tvaru o min. tloušťce 1,25 mm. Jeho ztužení je zajištěno pravidelnými plechovými výztuhami. Do uvedeného klempířského výrobku je zasunut prvek tepelné izolace. V případě užití pojistné hydroizolace je klempířský výrobek ve spodním ohybu perforován. Žlabový hák se kotví přímo na čelo tohoto pozinkovaného plechu.



Obr. 15 - Schéma konstrukčního řešení B2 pomocí klempířského prvku U-tvaru a znázornění ohýbaného prvku s žebrovou výztuží (ozn. c)

Toto řešení není příliš vhodné vzhledem k údržbě, kdy je i pro samotný nátěr nutné demontovat část střešní konstrukce. Klempířský prvek o značné tloušťce s jeho výztužnými žebry působí jako tepelný most ve střešním plášti.

Následující řešení B3 (Obr. 16) 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.



Obr. 16 - Schéma konstrukčního řešení B3 užitím tepelně izolačních bloků z kompozitního materiálu (ozn. d)

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.

4.1.3 Konstrukční detail C - průnik železobetonové konstrukce střešním pláštěm

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.

Obě zmíněné varianty byly porovnány při stejné mocnosti tepelně izolační vrstvy $d = 100$ mm. Sloupová konstrukce má čtvercový průřez o rozměru strany $a = 200$ mm. Pro komplexní srovnání byla modelována také varianta C3 bez aplikace tepelně izolačního materiálu pro přerušení tepelného toku železobetonovou konstrukcí. Souhrnný přehled je uveden v Tab. 11.

Tab. 11 - Přehled konstrukčních variant stavebního detailu C a jejich označení

Označení konstrukce	Popis konstrukce
C1	Aplikace tepelné izolace na povrch konstrukce v exteriéru
C2	Aplikace tepelné izolace v místě průniku střešním pláštěm
C3	Bez tepelně izolačního opatření

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

Stěžejní problematikou práce bylo získat relevantní tepelně technická data sloužící jako vstupní informace multikriteriálního posuzování konstrukčních detailů.

4.2.1 Stanovení okrajových podmínek

Při hodnocení všech konstrukcí byly vstupní okrajové podmínky pro tepelně technickou analýzu stanoveny jednotně dle následujícího předpisu, který vyplývá ze shodných požadavků norem ČSN EN ISO 6946, ČSN EN ISO 13788 a ČSN 73 0540-3:

- $\theta_e = -15$ °C - návrhová exteriérová teplota;
- $\theta_{ai} = 20,6$ °C - návrhová interiérová teplota zahrnující přírážku $+0,6$ °C;
- Tepelné odpory při přestupu tepla mezi prostředím a povrchem stavební konstrukce:
 - $R_{se} = 0,04$ m²K/W (odpor při přestupu tepla do exteriéru);

- $R_{si} = 0,10 \text{ m}^2\text{K/W}$ (odpor při přestupu tepla z interiéru směrem nahoru);
- $R_{si} = 0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$ (odpor při přestupu tepla z interiéru vodorovným směrem);
- $R_{si} = 0,25 \text{ m}^2\text{K/W}$ (odpor při přestupu tepla z interiéru pouze pro výpočet vnitřní povrchové teploty θ_{si} a teplotního faktoru vnitřního povrchu f_{Rsi}).

Všechna uvedená data byla jak součástí vstupů pro výpočetní software Ansys, tak pro některé ruční dílčí výpočty, aby se všechna výstupní data dala snadno komparovat.

4.2.2 Stanovení vstupních parametrů

Charakteristiku vstupních parametrů užitých stavebních materiálů a konstrukčních prvků při sestavení výpočetních modelů obsahuje Tab. 12. Takto je kompletně utvořena databáze pro popis vlastností geometrických modelů konstrukcí.

Tab. 12 - Vstupní tepelně technické parametry užitých materiálů a konstrukčních prvků (údaje převzaty od výrobců a z dílčích výsledků probíhajícího výzkumu kompozitního materiálu)

Charakteristika materiálu/konstrukčního prvku	Součinitel tepelné vodivosti λ [W/mK]			Objemová hmotnost ρ [kg/m ³]	Měrná tepelná kapacita c [J/kgK]
	λ_x	λ_y	λ_z		
Cementové lepidlo na broušené cihly pro přesné zdění	0,210	0,210	0,210	1450,0	840
Keramické dutinové tvarovky tl. 440 mm	0,102	0,277	0,674	580,0	1000
Keramické dutinové tvarovky tl. 440 mm (dutiny vyplněné sypaným expandovaným perlitem)	0,077	0,149	0,159	-	-
Keramická věncovka	0,250	0,277	0,674	860,0	1000
Kompozitní materiál termoizolačního bloku	0,090	0,090	0,090	430,0	-
Pěnové sklo (Foamglas Perinsul)	0,050	0,050	0,050	165,0	-
Ocel (pozink/nerez)	58,000	58,000	58,000	8000,0	-
Polystyren EPS	0,039	0,039	0,039	13,5	1270
Železobeton	1,740	1,740	1,740	2500,0	1020

V Tab. 13 jsou dále uvedeny hodnoty součinitele prostupu tepla pro vertikální a horizontální stavební konstrukce užitá při tvorbě konstrukčních detailů. Sřešní skladba S4 navržená pro konstrukční detaily C1, C2 a C3 je pouze modifikací sřešní skladby S3 rozšířením do větší plochy (prodloužením spádu) pro přesný výpočtový model.

Tab. 13 - Přehled hodnot součinitele prostupu tepla U pro užití stavební konstrukce

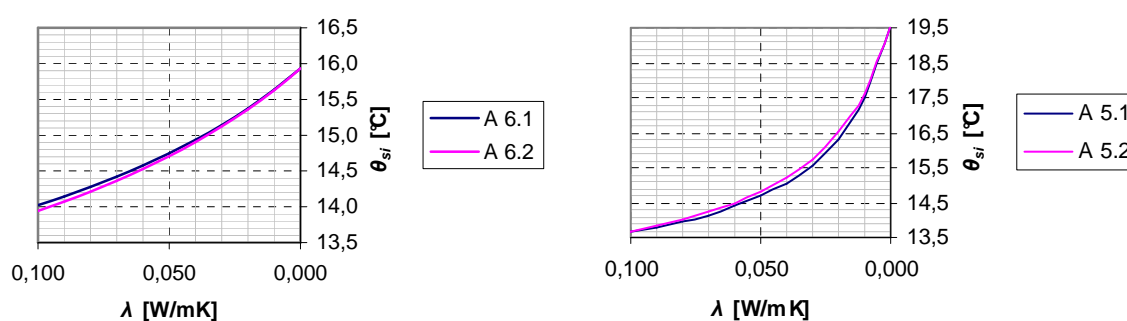
Typ stavební konstrukce (Označení)	Součinitel prostupu tepla U [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]		Náležitost ke konstrukčním detailům
	Označení	Hodnota	
Vnější stěna (S1)	U_W	0,22	A1, A2, A3.x, A4.x, A6.x
Vnější stěna s tepelnou izolací (S2)	U_{WI}	0,14	A5.x, B1, B2, B3
Střecha (S3)	U_R	0,13	A1, A2, A3.x, A4.x, A5.x, A6.x, Bx
Střecha (S4)	U_{Rm}	0,14	C1, C2, C3

Dimenze stavebních konstrukcí jsou navrženy tak, aby odpovídaly hodnotám pro nízkoenergetickou výstavbu udávanými technickou normou ČSN 730540-2 a výrobci materiálů pro tyto účely určených.

4.2.3 Konstrukční detail A - ukončení ploché jednoplášťové střechy atikou

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 λ [W/mK] 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.

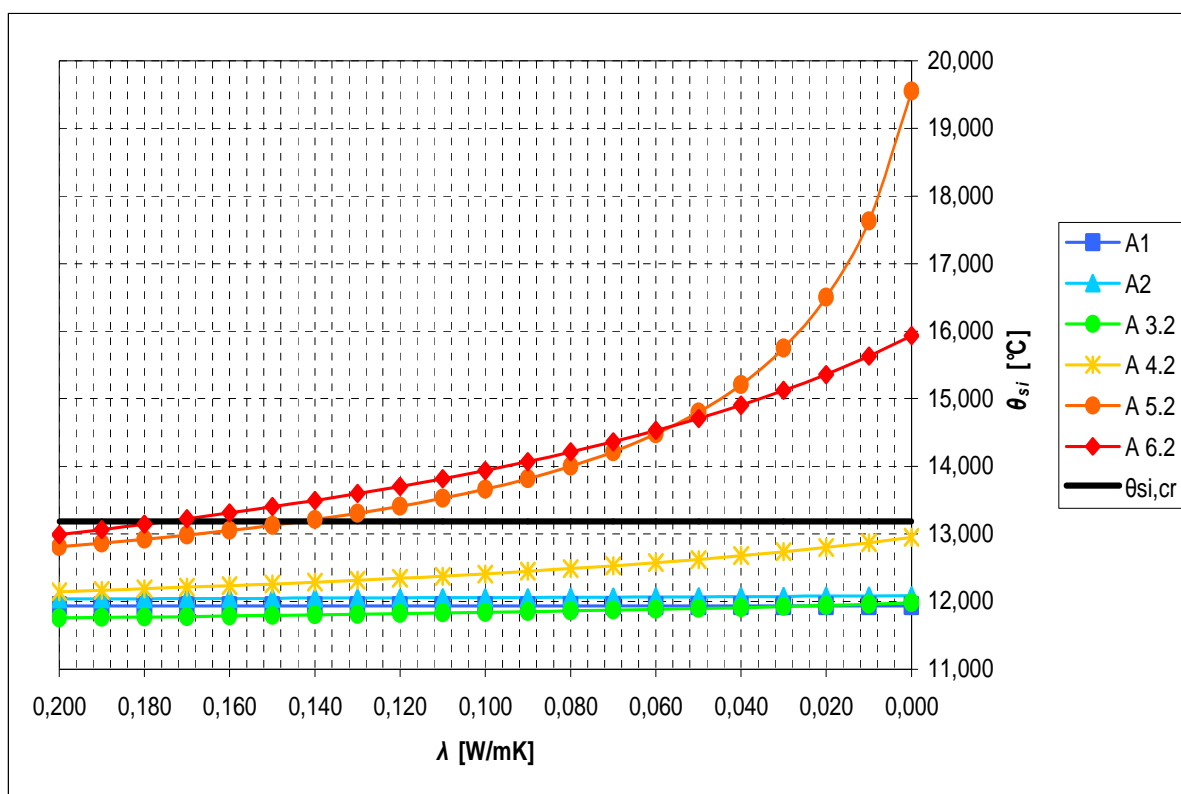


Obr. 17 - Vliv vertikální změny konstrukce přidáním tepelně izolačního materiálu ve variantách konstrukčních detailů A6.x a A5.x

Výpočty bylo prokázáno (Obr. 17), 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 λ . 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.

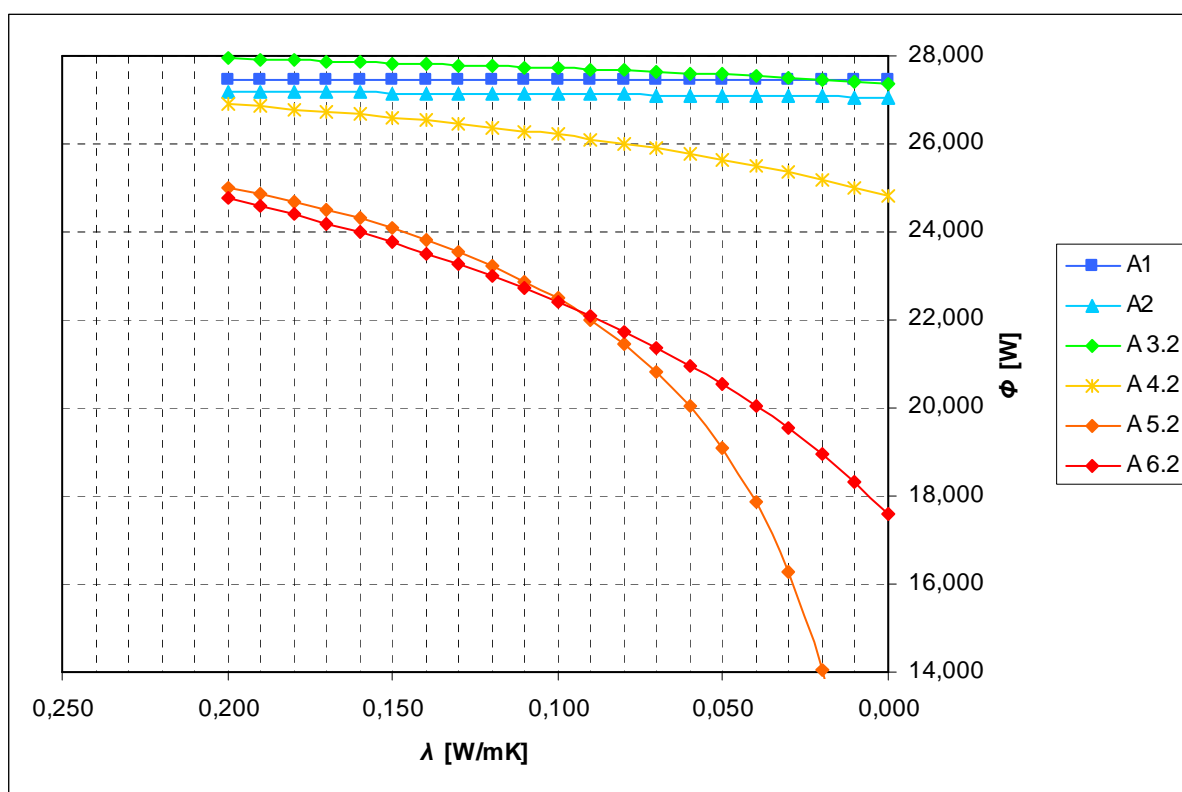
Parametrizace modelů spočívala v nastavení proměnné veličiny součinitele tepelné vodivosti λ [W/mK] tepelně izolačního materiálu s rozsahem probíhajícím v intervalu $\langle 0,00; 0,20 \rangle$. Dolní a horní meze intervalu tak spolehlivě zahrnují termoizolační vlastnosti všech materiálů, které se k výrobě tepelně izolačních produktů v praxi užívají. Takto jsou srovnávány výsledky průběhů tepelně technických veličin vybraných konstrukčních variant právě v závislosti na hodnotě parametrické proměnné, již zmíněné veličiny součinitele tepelné vodivosti. Tloušťka tepelně izolačního materiálu je konstantní a shodná pro všechny varianty ($d = 100$ mm).



Obr. 18 - Závislost minimální teploty vnitřního povrchu θ_{si} [°C] na součiniteli tepelné vodivosti λ [W/mK], uvedena také kritická hodnota minimální teploty vnitřního povrchu $\theta_{si,cr}$ (normový požadavek)

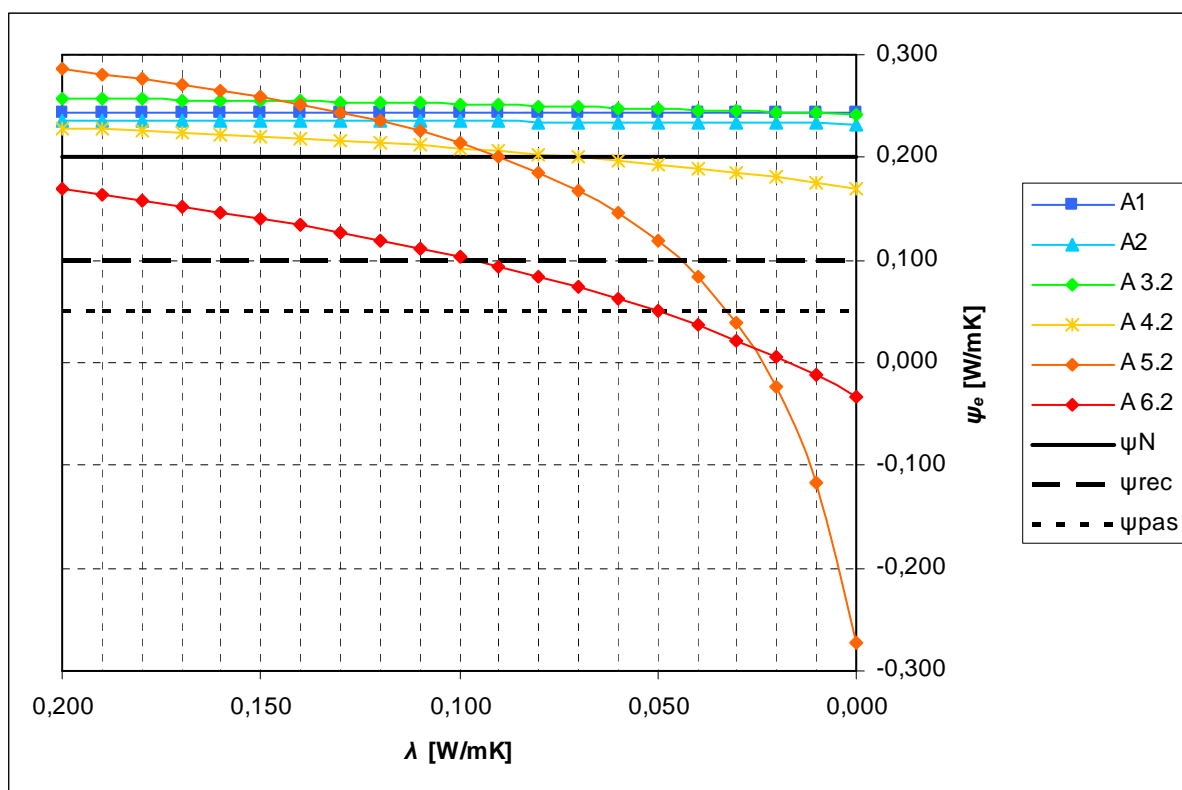
Na Obr. 18 je zřetelný nárůst minimální povrchové teploty v interiéru ve variantách A5.2 a A6.2.x. Průběhy obou křivek se protínají v intervalu součinitele tepelné vodivosti $\lambda \in \langle 0,05; 0,06 \rangle$ W/mK, což odpovídá jen okrajově rozsahu většiny běžně rozšířených termoizolačních materiálů, jako jsou polystyreny typu EPS a XPS, minerální vata, pěnové sklo aj ($\lambda \in \langle 0,035; 0,05 \rangle$ W/mK). Tyto nejtýpicetější hodnoty se nabízí efektivně využít návrhem konstrukční varianty A5.2, ale pouze s minimálním navýšením vnitřní povrchové teploty. Pro hodnoty součinitele tepelné vodivosti nad horní mez mimo uvedený interval dosahuje varianta A6.2.x lepších výsledků.

Podobný průběh křivek jako na Obr. 19 lze sledovat i v grafu na Obr. 19 pro hodnoty tepelných ztrát, které představuje veličina tepelného toku Φ [W].



Obr. 19 - Závislost velikosti tepelného toku Φ [W] konstrukcí na součiniteli tepelné vodivosti λ [W/mK]

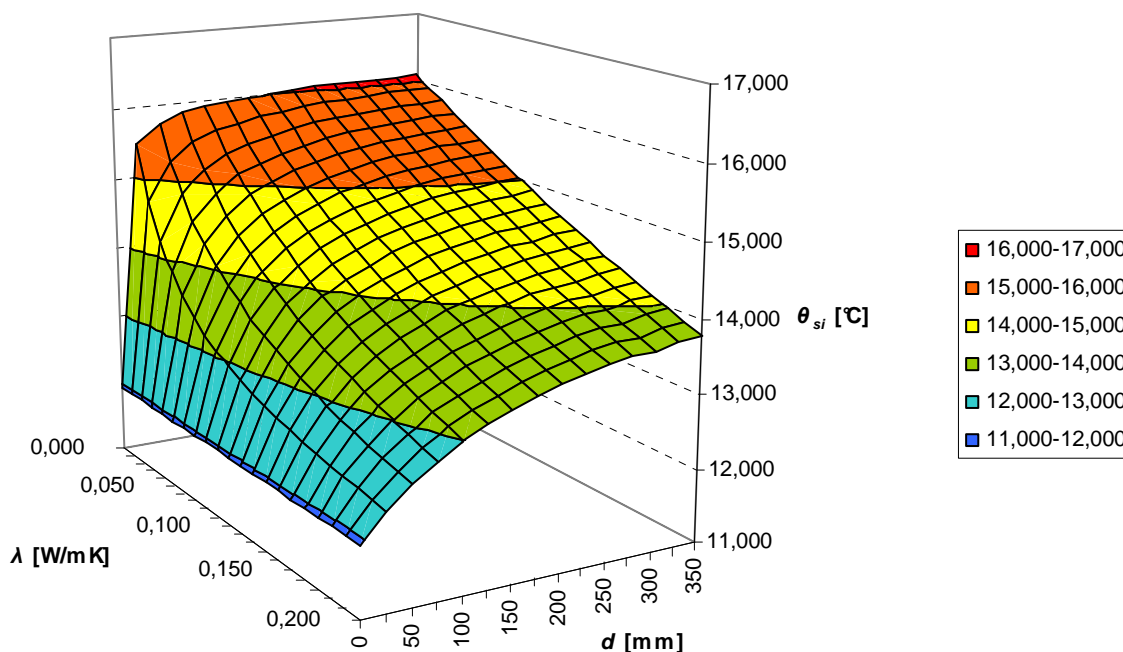
Pokud je však srovnáván na Obr. 20 průběh veličiny lineárního činitele prostupu tepla ψ_e [W/mK], lze dospět k závěru, že výsledky variant A5.2 a A6.2.x se protínají v intervalu $\lambda \in \langle 0,02; 0,03 \rangle$ W/mK. To je rozsah hodnot výrazně nižší, než v jakém se pohybují parametry tepelně izolačních materiálů a lze tedy potvrdit, že pro zajištění co nejnižší hodnoty této veličiny je optimálnější variantou řešení A6.2.x.



Obr. 20 - Závislost veličiny lineárního činitele prostupu tepla ψ_e [W/mK] na velikosti součinitele tepelné vodivosti λ [W/mK] aplikovaného tepelně izolačního materiálu a vybraného konstrukčního řešení, uvedeny také normové hodnoty (požadovaná ψ_N , doporučená ψ_{rec} , doporučená pro pasivní budovy ψ_{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.

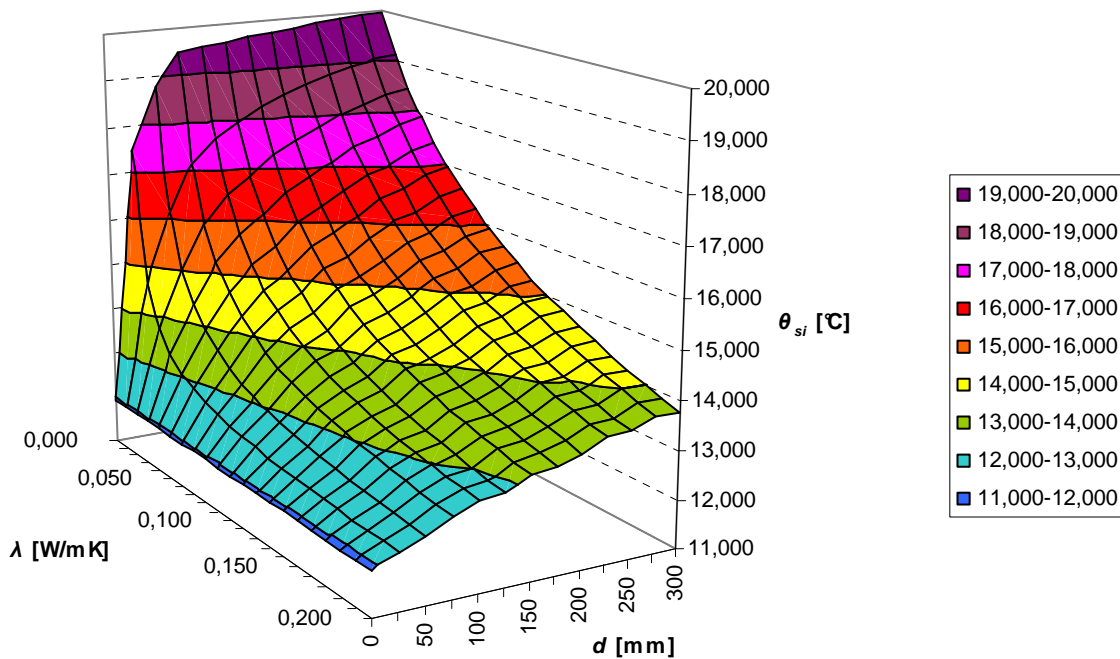
V souvislosti s vypořádanou vlastností zhoršení tepelně technických poměrů v některých konstrukčních detailech při vertikální změně tvaru konstrukce byl pro konstrukční detail A6.2.x při aplikaci proměnné tloušťky tepelného izolantu ve vztahu s jeho dalším proměnným parametrem součinitele tepelné vodivosti sestaven trojrozměrný (tzv. prostorový povrchový) graf (Obr. 21), 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 bez vlivu na vnější tvar, tedy konkrétně ve vzájemném poměru složky zděicého a tepelně izolačního materiálu.



Obr. 21 - 3D graf závislosti minimální vnitřní povrchové teploty θ_{si} [°C] na průběhu proměnných součinitele tepelné vodivosti λ [W/mK] a tloušťky d [mm] pro zkoumanou část tepelné izolace v konstrukci (varianta A6.2.x)

Stejným způsobem byl sestaven povrchový graf pro variantu A5.2, která představuje tradiční způsob provádění tepelné izolace (Obr. 22) kontaktním zateplovacím systémem. V porovnání s předchozím grafem má tvar mírně schodovitěho nárůstu vnitřní povrchové teploty s přibývajícím tloušťkou termoizolačního materiálu. Tento průběh je dán změnou tvaru konstrukce ve směru osy x s přibývajícím tloušťkou tepelně izolační vrstvy svislého obvodového pláště. Výrazněji se tato změna proporce projevuje pro materiály s malým tepelným odporem. Pro nízké hodnoty součinitele tepelné vodivosti je již průběh proložené křivky vypočtenými hodnotami hladký.

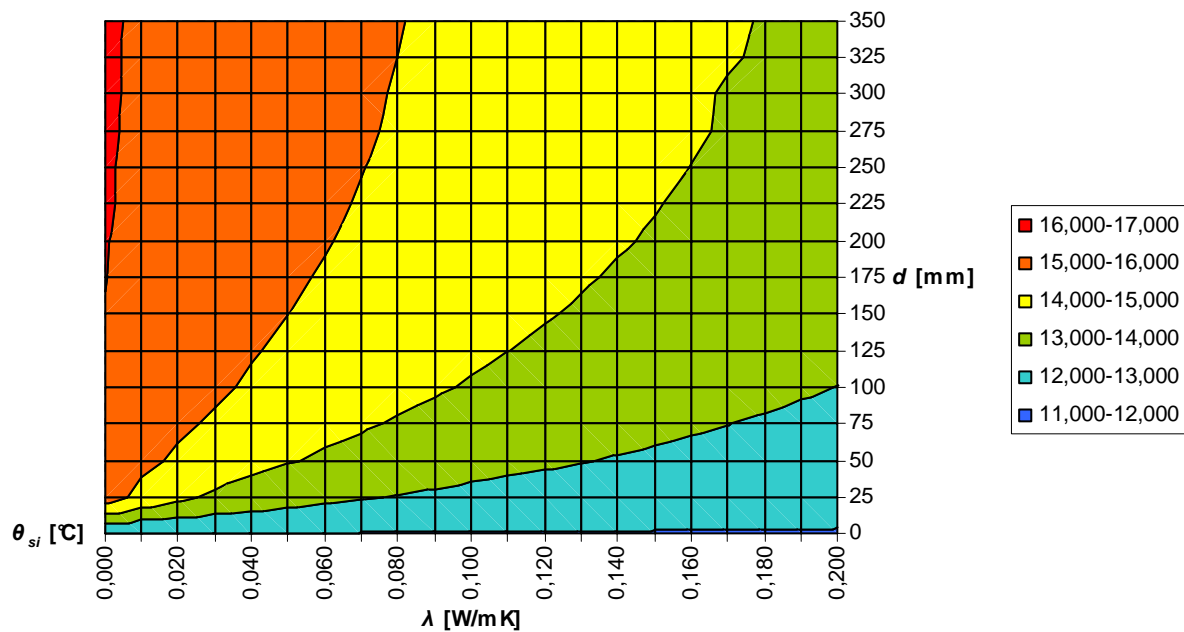
Samozřejmě z obou zobrazených grafů vyplývá, že navržením konstrukční varianty A5.2 lze dosáhnout při extrémně nízké hodnotě součinitele tepelné vodivosti a značného množství tepelně izolačního materiálu vyšších hodnot minimální vnitřní povrchové teploty.



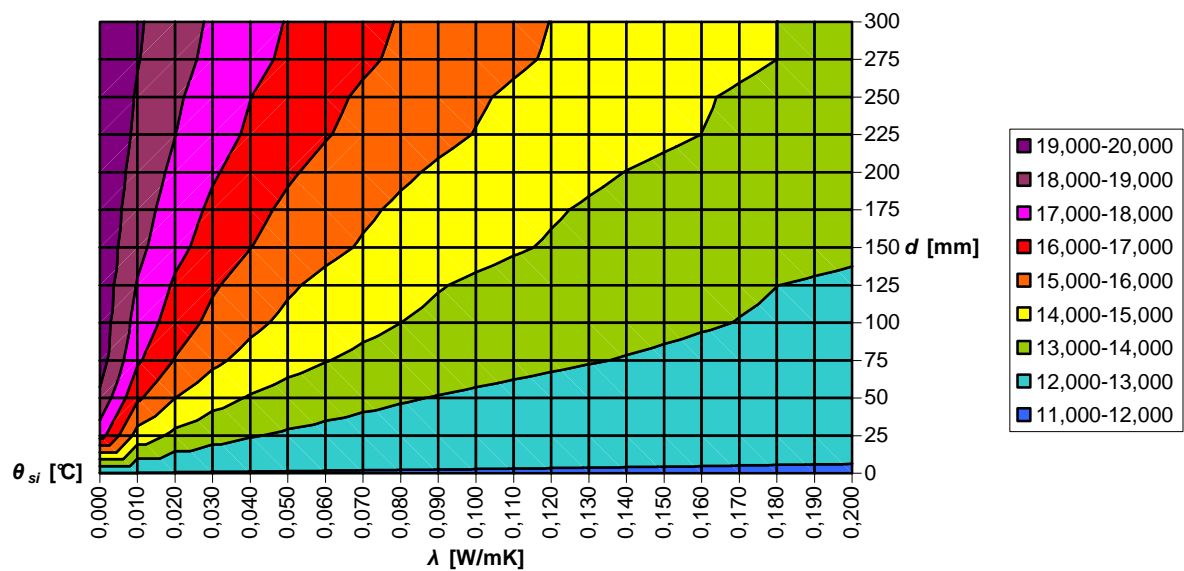
Obr. 22 - 3D graf závislosti minimální vnitřní povrchové teploty θ_{si} [°C] na průběhu proměnných součinitele tepelné vodivosti λ [W/mK] a tloušťky d [mm] pro zkoumanou část tepelné izolace v konstrukci (varianta A5.2)

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. 21) lze odečíst, že při tloušťce izolačního materiálu nad 200 mm nedochází již výrazně k nárůstu nejnižší vnitřní povrchové teploty θ_{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 θ_{si} [°C].

Přehledné srovnání poskytují i obrysové grafy (Obr. 23 a Obr. 24) sestavené kolmým průmětem uvedenými povrchovými grafy pro obě komparované varianty A6.2.x a A5.2.



Obr. 23 - Obrysový graf znázorňující teplotní hladiny na výpočtovém modelu konstrukce A6.2.x pro hodnotu vnitřní minimální povrchové teploty θ_{si} [°C]



Obr. 24 - Obrysový graf znázorňující teplotní hladiny na výpočtovém modelu konstrukce A5.2 pro hodnotu vnitřní minimální povrchové teploty θ_{si} [°C]

Pro modelování míry efektivity aplikace tepelně izolačního materiálu byla stanovena obecná forma regresní funkce popisující tvar, trend a průběh zkoumaného problému variant A5.2 a A6.2.x. Tento obecný regresní model vycházející z předchozích graficky zobrazených maticových dat, sestaven ve výpočetním programu MATLAB R12A, je popsán následujícím matematickým předpisem:

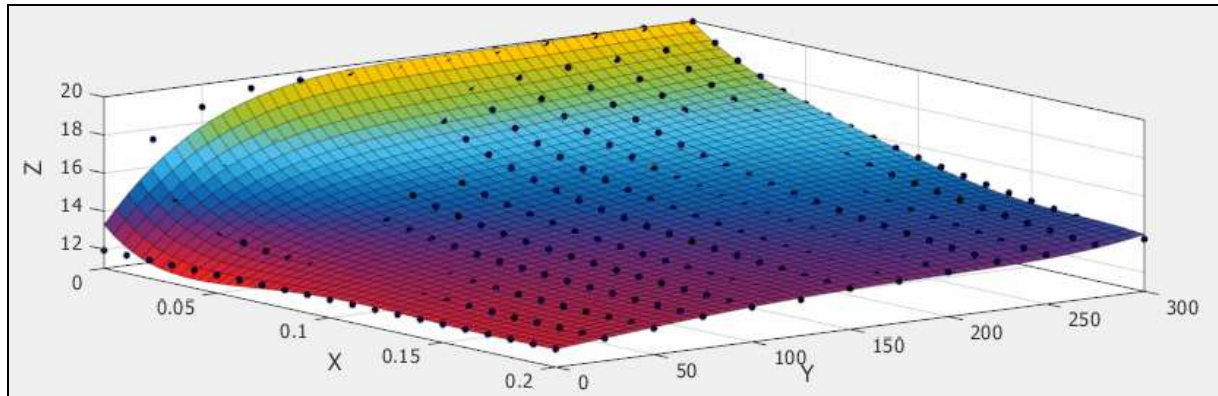
$$f(x, y) = p_{00} + p_{10} \cdot x + p_{01} \cdot y + \dots + p_{14} \cdot x \cdot y^4 + p_{05} \cdot y^5 \quad (49)$$

Z takto obecně připravené funkce lze dosazením za koeficienty p_{00} až p_{05} dle Tab. 14 získat popisné modely $f_1(x, y) = z$ a $f_2(x, y) = z$ již přímo pro zmiňované varianty. Uvedeny jsou také rozsahy hodnot těchto koeficientů pro 95% interval spolehlivosti.

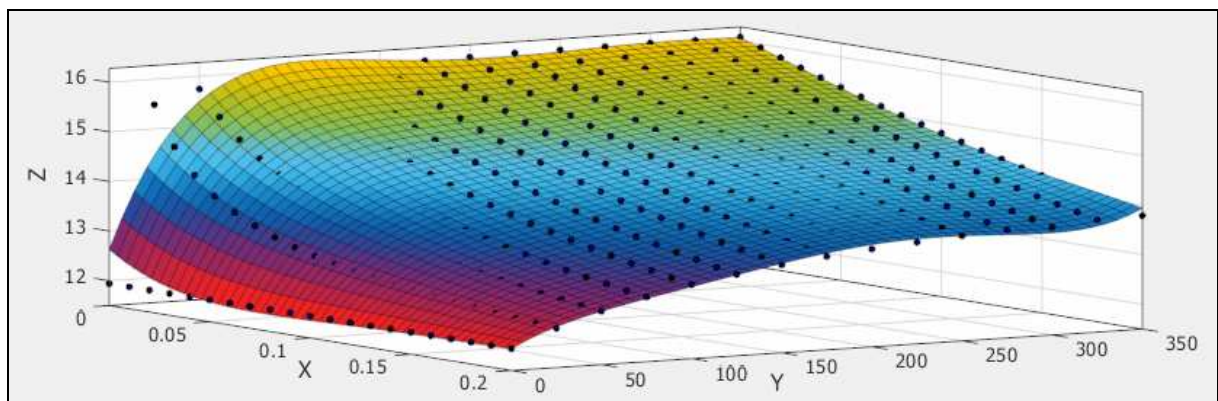
Tab. 14 - Hodnoty koeficientů popisných funkcí modelů A5.2 a A6.2.x

Koeficienty	Varianta funkčního modelu			
	A5.2 (f_1)		A6.2.x (f_2)	
	Hodnota koeficientu	95% interval spolehlivosti	Hodnota koeficientu	95% interval spolehlivosti
p_{00}	13,29	(13,05; 13,53)	12,63	(12,5; 12,77)
p_{10}	-118,7	(-134,3; -103,1)	-28,74	(-37,17; -20,31)
p_{01}	0,1319	(0,1222; 0,1416)	0,09389	(0,0893; 0,09848)
p_{20}	2631	(2229; 3033)	380,3	(164,4; 596,1)
p_{11}	-1,58	(-1,774; -1,387)	-0,4326	(-0,5233; -0,342)
p_{02}	-0,0009915	(-0,00116; -0,0008233)	-0,0009182	(-0,0009857; -0,0008508)
p_{30}	-2,396e+04	(-2,861e+04; -1,93e+04)	-2297	(-4790; 195)
p_{21}	4,357	(2,215; 6,498)	-0,6632	(-1,66; 0,334)
p_{12}	0,01195	(0,01055; 0,01334)	0,004734	(0,004174; 0,005294)
p_{03}	3,387e-06	(2,087e-06; 4,697e-06)	4,103e-06	(3,656e-06; 4,551e-06)
p_{40}	9,722e+04	(7,262e+04; 1,218e+05)	6627	(-6535; 1,979e+04)
p_{31}	15,29	(3,513; 27,06)	6,964	(1,502; 12,43)
p_{22}	-0,04419	(-0,05123; -0,03715)	-0,004898	(-0,007721; -0,002076)
p_{13}	-2,854e-05	(-3,36e-05; -2,348e-05)	-1,52e-05	(-1,694e-05; -1,346e-05)
p_{04}	-4,84e-09	(-9,473e-09; -2,074e-10)	-8,554e-09	(-9,906e-09; -7,202e-09)
p_{50}	-1,461e+05	(-1,944e+05; -9,781e+04)	-7448	(-3,328e+04; 1,839e+04)
p_{41}	-63,97	(-90,43; -37,51)	-10,66	(-22,92; 1,598)
p_{32}	0,04633	(0,02975; 0,06291)	-0,003768	(-0,0104; 0,002868)
p_{23}	5,52e-05	(4,43e-05; 6,61e-05)	1,122e-05	(7,47e-06; 1,498e-05)
p_{14}	2,292e-08	(1,537e-08; 3,046e-08)	1,581e-08	(1,358e-08; 1,803e-08)
p_{05}	-1,691e-12	(-4,373e-12; 7,755e-12)	6,756e-12	(5,239e-12; 8,272e-12)

Grafické znázornění těchto aproximačních modelů, reprezentovaných polynomicou funkcí pátého stupně o dvou neznámých, je na Obr. 25 a Obr. 26. Zobrazeny jsou zde i původní výsledky získané metodou konečných prvků z aplikace Ansys.



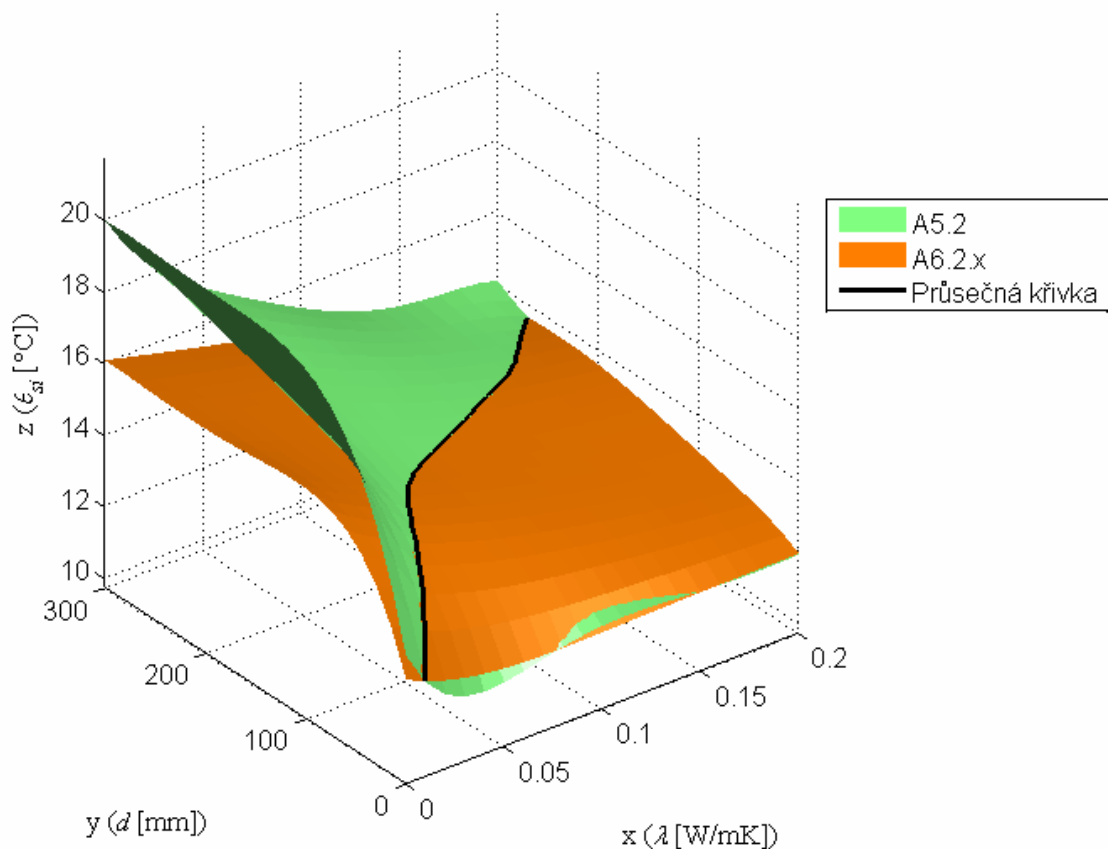
Obr. 25 - Plošný graf funkce f_1 pro regresní model popisující chování konstrukce atiky pro variantu A5.2



Obr. 26 - Plošný graf funkce f_2 regresního model popisující chování konstrukce atiky pro variantu A6.2.x

Vhodnost modelu A6.2.x popisují následující statistické veličiny. Koeficient determinace $R^2 = 0,99$ označuje, že tímto modelem se podařilo vysvětlit 99% všech pozorování. $RMSE = 0,1068$ (odmocnina ze střední kvadratické chyby). Stejně tak byly statistické veličiny vyčísleny i pro model A5.2: $R^2 = 0,99$, $RMSE = 0,1858$.

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 . Tedy body $[x, y, z]$, které představují shodnou výslednou vnitřní minimální povrchovou teplotu θ_{si} [°C] při aplikaci stejné tloušťky tepelně izolačního materiálu d [mm] se stejnými parametry jeho součinitele tepelné vodivosti λ [W/mK]. Grafické znázornění průsečíku je ilustrováno na Obr. 27 průsečnou křivkou, která vzniká protnutím dvou ploch, představujících funkce sestavené pro modely A5.2 a A6.2.x.



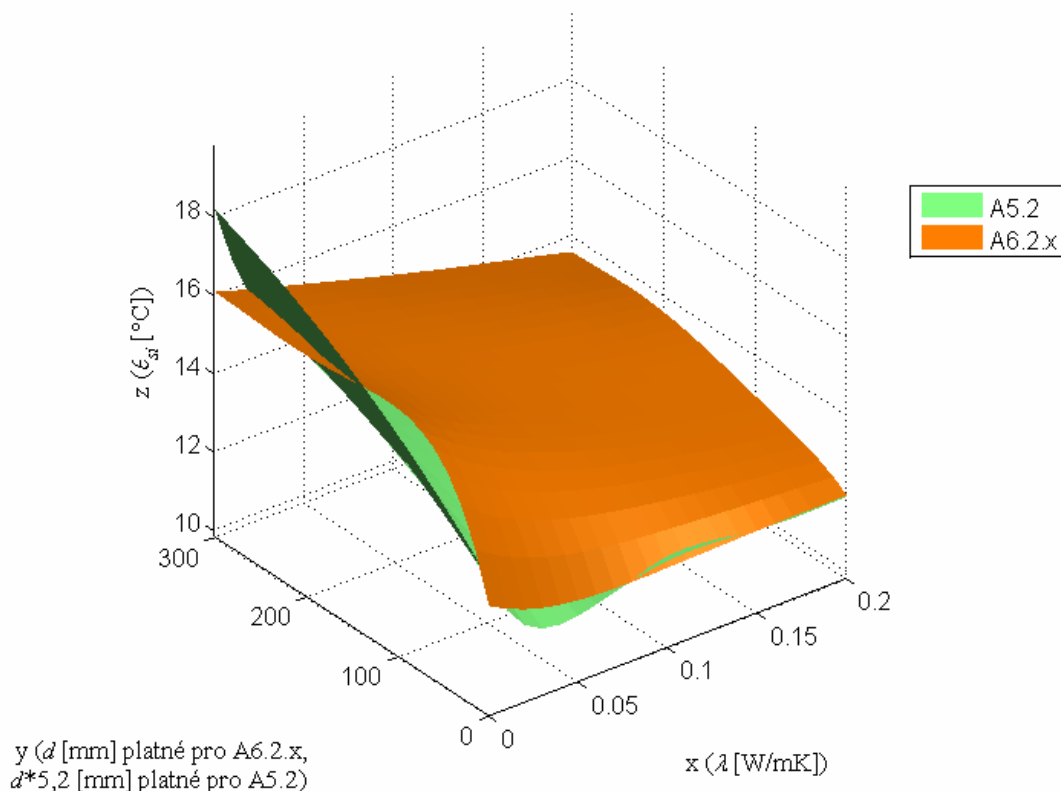
Obr. 27 - Průnik ploch funkcí pro modely A5.2 a A6.2.x

Druhý zjevný průnik funkcí ploch, kde je tloušťka tepelné izolace $d = 0$ mm (shoduje se s variantou bez aplikace materiálu tepelné izolace A1), tedy pro hodnoty $(x, y) = [0, \dots, 0,2; 0]$ nebyl uvažován vzhledem k bezvýznamnosti pro další analytická šetření.

Průsečná křivka vymezuje hranici mezi optimálním užitím variant konstrukčního řešení (A5.2 a A6.2.x) podle parametrů (tloušťka d [mm], součinitel tepelné vodivosti λ [W/mK]) 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 λ 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 (vlivem povětrnostních podmínek, většího rozsahu možných vad při realizaci a náročnější údržbě s nižší životností). 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 pětinasobek jeho množství, než je tomu ve variantě A6.2.x. Takové komplexnější zhodnocení variant nabízí optimalizace užitím multikriteriálního hodnocení, která navazuje kapitolou 4.3.

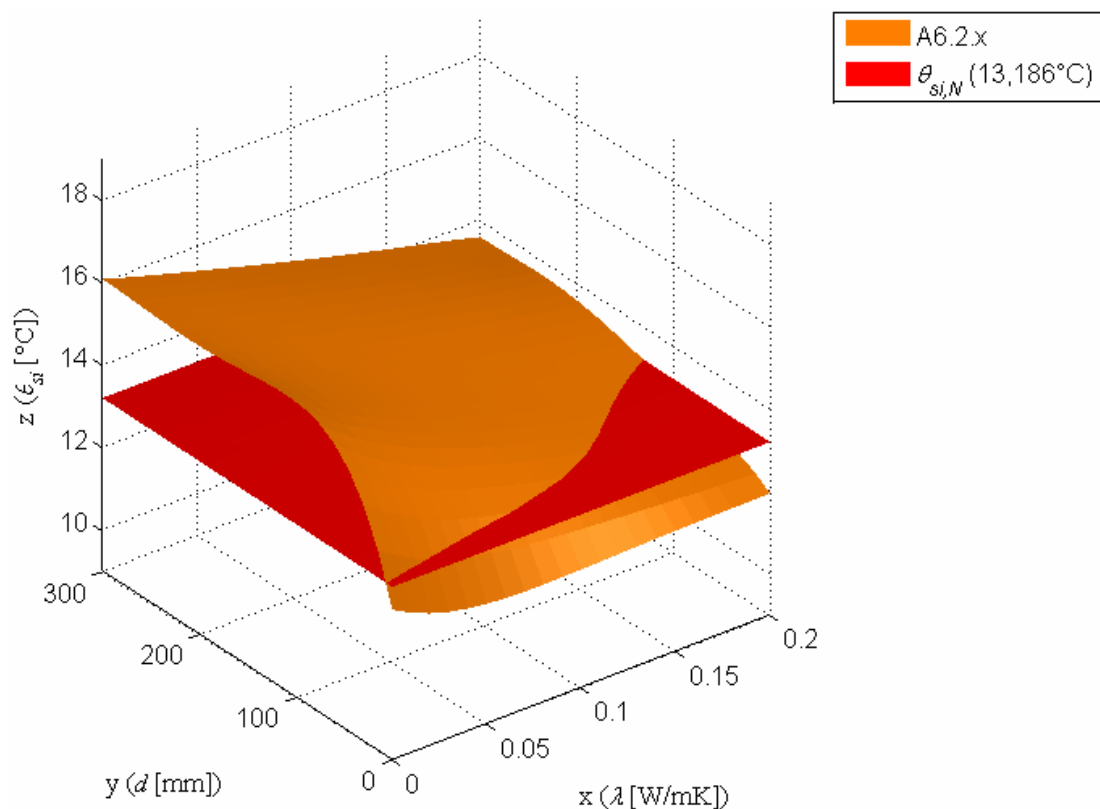
Další srovnávací posouzení v oblasti tepelné techniky se tedy nabízí ve formě transformace funkce popisující model A5.2 ve smyslu stejného objemového množství pro varianty A5.2 a A6.2.x (viz Obr. 28).



Obr. 28 - 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 λ pro běžně používané tepelně izolační materiály.

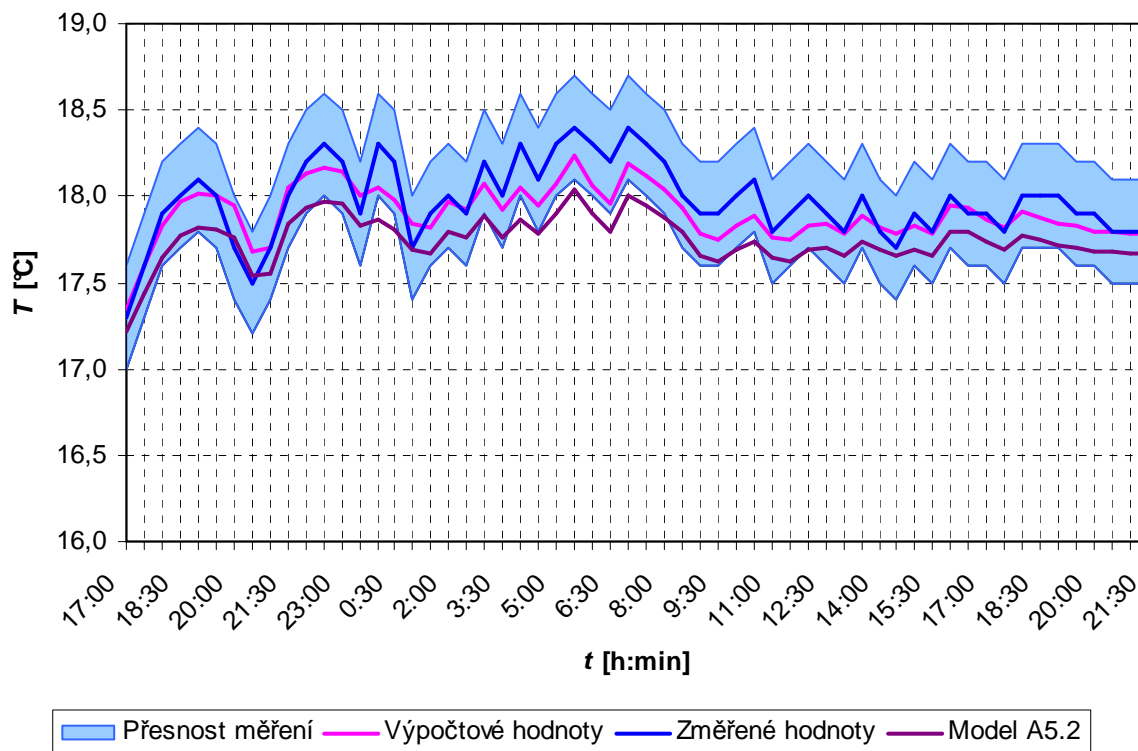
Ověření užitím vztahů (9, 11), zda a jakým způsobem je varianta A6.2.x schopna vyhovět normovým požadavkům na vnitřní minimální povrchovou teplotu $\theta_{si,N}$ (teplotní faktor vnitřního povrchu), uvádí Obr. 29.



Obr. 29 - Posouzení modelu A6.2.x na kritickou (minimální) vnitřní povrchovou teplotu $\theta_{si,N}$ [°C] (interval hodnot splňujících podmínky normy tvoří 81 % z celkového modelovaného intervalu)

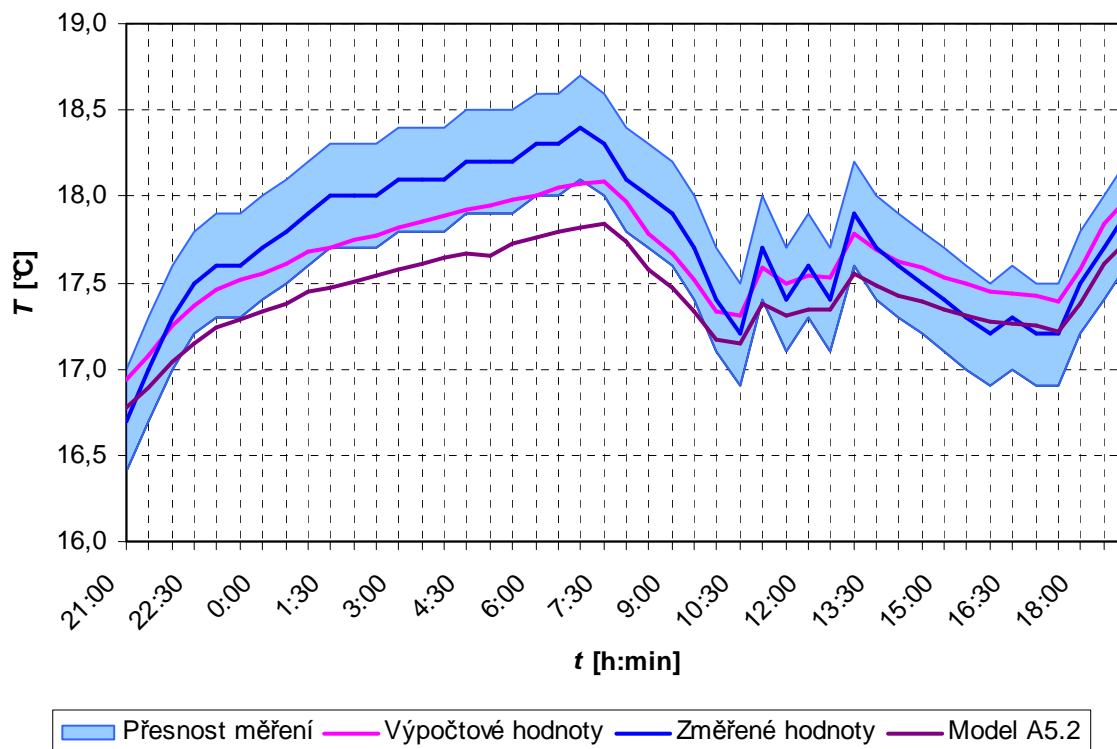
Výpočtový model konstrukce A6.2.x průkazně splňuje normový požadavek. Pokud by v této variantě byl jako tepelně izolační materiál aplikován termoizolační blok z kompozitního materiálu (konstrukční řešení A6.2.c), vyhovělo by jeho množství v tloušťce $d = 40$ mm.

Vzhledem k značně rozsáhlé skupině variant stavebních detailů, není možné všechny tyto experimentálně ověřit tepelně technickým měřením. Lze však využít dílčího měření jedné z variant konstrukce pro ověření funkčnosti teoretických výpočtových modelů a vhodnosti zvolené metodiky pro danou problematiku. Bylo provedeno několik měření dle metody popsané v kapitole 3.4 na objektu, jehož ukončení střešní konstrukce přibližně odpovídá variantě A5.2 (reálná konstrukce obsahovala pouze větší tloušťku tepelně izolační vrstvy). Výsledky měření byly dále komparovány s vypočtenými hodnotami teoretického modelu sestaveného přesně podle stavební konstrukce účastníci se experimentálního měření a také s datovými výstupy pro výpočetní model varianty A5.2 (Obr. 30, Obr. 31).



Obr. 30 - Měření č. 1 (14.12. 2012 - 15.12. 2012) konstrukce atiky přibližné konstrukční variantě A5.2

Aby bylo možné správně vyhodnotit srovnání matematického modelu a reálné konstrukce, bylo nezbytné doplnit výpočtový model o další parametry. Byly jimi materiálové charakteristiky (Tab. 12) objemová hmotnost ρ [kg/m^3] a měrná tepelná kapacita c [J/kgK], které umožnily zavést do výpočtu tepelnou akumulaci při neustáleném vedení tepla. Numerický model byl převeden ze stacionárního do nestacionárního teplotního pole a jako inicializační rozložení teplot v konstrukci vhodně posloužit výstup ze stacionárního výpočtu pro první komparovanou hodnotu ze změřené množiny dat. Další podmínkou bylo přesné určení odporu při přestupu tepla na vnitřní straně měřené konstrukce R_{si} , jehož normová hodnota ($0,25 \text{ m}^2\text{K/W}$) uvažovaná při výpočtech a posouzení konstrukčních detailů je navržena pro nejméně příznivé případy, tak aby vždy byla na straně bezpečného návrhu konstrukce. Z měření byla stanovena skutečná hodnota $R_{si} = 0,10 \sim 0,15 \text{ m}^2\text{K/W}$, která je nižší pravděpodobně z příčiny proudění vnitřního vzduchu od tepelného zdroje umístěného v interiéru, v blízkosti měřené části konstrukce. Tato je pak nadále aplikována ve výpočtovém modelu. Relativní vlhkost v interiéru se pohybovala v rozsahu $45 \sim 50 \%$. Tvary průběhu změřených a vypočtených vnitřních povrchových teplot se v rámci přesnosti měření téměř shodují. Také průběh hodnot výpočtového modelu A5.2 je shodný.



Obr. 31 - Měření č. 2 (25.1. 2013 - 26.1. 2013) konstrukce atiky přibližné konstrukční variantě A5.2

Ze znázornění velikosti teplotních toků Φ [W] v grafu (Obr. 19) je zřejmé, že také tepelné ztráty se pro každý typ konstrukčního detailu znatelně odlišují. Pro výpočet energie E_{vp} [kWh/a] potřebné pro vyrovnání těchto tepelných ztrát během období jednoho roku byl užit výpočetní vztah (50) z normy ČSN EN ISO 10211 v modifikaci vhodné pro případ konstrukčních detailů.

$$E_{vp} = \frac{[\Phi \cdot (\theta_{ais} - \theta_{aes})] \cdot T \cdot d}{\theta_{ai} - \theta_{ae}} \cdot 0,001 \text{ [kWh/a]} \quad (50)$$

- kde Φ je tepelný tok konstrukčním detailem ve W,
 θ_{ais} je střední teplota interiéru během topného období v °C,
 θ_{aes} je střední teplota exteriéru během topného období v °C,
 θ_{ai} je extrémní teplota v interiéru (užitá při výpočtu tepelného toku) v °C,
 θ_{ei} je extrémní teplota v exteriéru (užitá při výpočtu tepelného toku) v °C,
 T je délka intervalu vytápění během jednoho dne v hodinách,

d je délka topného období v dnech.

Z tabulky pro topná období obsažené v normě ČSN 383350 (změna a) 8/1991) byly do vztahu (50) dosazeny tyto hodnoty:

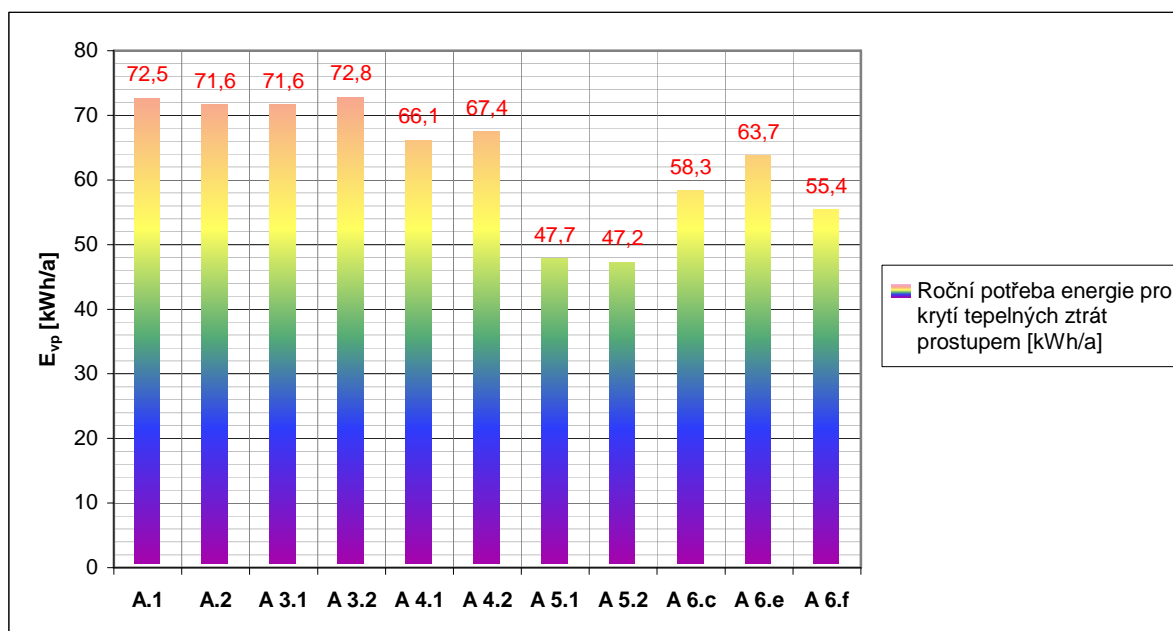
$T = 24$ h (nejčastější údaj udávaný při hodnocení budov),

$d = 242$ dnů (průměrná délka topného období v ČR a smluvní hodnota pro srovnání),

$\theta_{ais} = 20$ °C (obvykle volená hodnota),

$\theta_{aes} = 3,8$ °C (průměrná teplota během topného období v ČR a smluvní hodnota pro srovnání).

Výsledky výpočtu jsou číselně i graficky znázorněny v následujícím grafu (Obr. 32). Extrémních hodnot dosahují konstrukční detaily A3.2 a A5.2. Tepelně technické opatření ve variantě A3.2 zvyšuje tepelné ztráty stavebním detailem oproti variantě A1 bez tepelně technického opatření. Opět se zde neprojevuje téměř žádný vliv vertikální změny tvaru konstrukce.

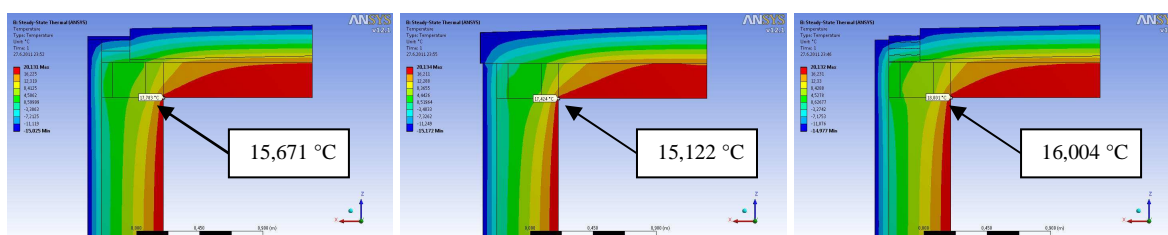


Obr. 32 - Komparace roční potřeby energie E_{vp} [kWh/a] pro vyrovnání tepelných ztrát prostupem tepla vybranými variantami konstrukčního detailu A (konstrukční detaily A6.c A6.e a A6.f patří do skupiny A6.2.x)

Skupina konstrukčních řešení A6.2.x se v grafu 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, již bude součástí.

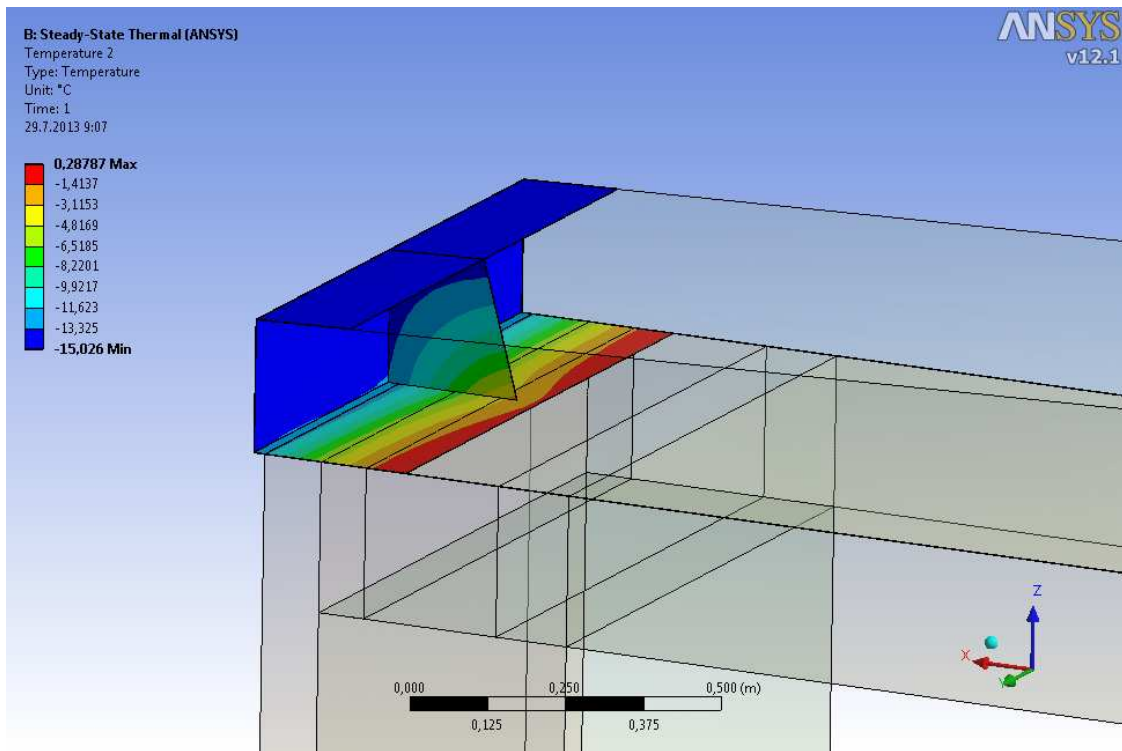
4.2.4 Konstrukční detail B - ukončení ploché jednoplášťové střechy okapem

Konstrukční detaily B1, B3 byly podrobeny tepelně technické analýze ve dvojdimenzionálním teplotním poli (Obr. 33). Stejný postup nelze uplatnit pro získání tepelně technických výsledků v případě varianty B2, který je pro přehled v Obr. 33 také uveden.



Obr. 33 - Analyzované modely stavebních detailů B1, B2 a B3 ve výpočetním programu Ansys 12.1

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 (Obr. 34). Vzhledem k rozměrové přesnosti modelovaných konstrukcí na 0,001 m, byla tloušťka ocelové konstrukce modelu zaokrouhlením redukována z reálné tloušťky 1,25 mm uvedené v kap. 4.1.2 na tloušťku 1 mm.



Obr. 34 - Ukázka výřezu ocelového rámu v 3D teplotním poli (varianta B2)

Výsledky relevantních fyzikálních veličin z provedené tepelně technické analýzy jsou zapsány v Tab. 15.

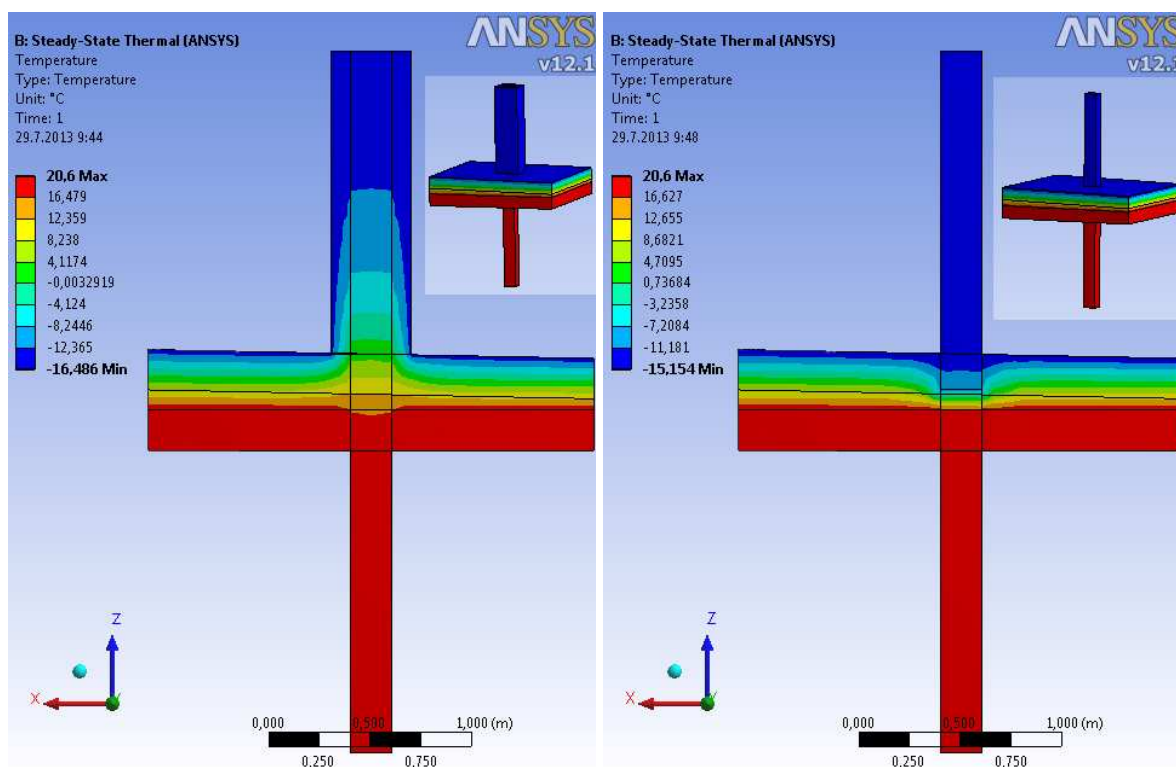
Tab. 15 - Výsledky tepelně technické analýzy stavebních detailů B1, B2 a B3

Označení konstrukce	θ_{si} [°C]	ψ_e [W/mK]	f_{Rsi} [-]	Φ [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 projevuje jako 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.

4.2.5 Konstrukční detail C - průnik železobetonové konstrukce střešním pláštěm

Celý soubor detailů C byl vzhledem ke svým tvarovým proporcím modelován v trojrozměrném teplotním poli. Na Obr. 35 je srovnání dvou navržených tepelně technických opatření (ozn. C1, C2).



Obr. 35 - Srovnání průběhu teplotního pole ve středovém vertikálním průřezu při odlišném přístupu k tepelně technickému opatření konstrukčního detailu C (varianty ozn. C1, C2)

Pro termoizolační blok zabudovaný v konstrukční variantě C2 byla stanovena ekvivalentní hodnota součinitele tepelné vodivosti vzhledem k průběhu armování sloupové konstrukce ($\lambda_{ev} = 0,6691 \text{ W/mK}$). Z výstupu analýzy byly získány výsledky tepelně technických veličin (Tab. 16).

Tab. 16 - Výsledky tepelně technické analýzy stavebních detailů C1, C2 a C3

Označení konstrukce	θ_{si} [°C]	χ [W/K]	f_{Rsi} [-]	Φ [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

Protože průnik štíhlé konstrukce sloupu střešním pláštěm lze označit za bodový tepelný most, byl namísto lineárního činitele prostupu tepla ψ_e [W/mK] stanoven bodový činitel prostupu tepla χ [W/K].

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 tlaku na úkor snížení tepelně izolační vlastnosti (zvýšení součinitele tepelné vodivosti λ).

4.3 Výběr optimálních variant multikriteriální analýzou

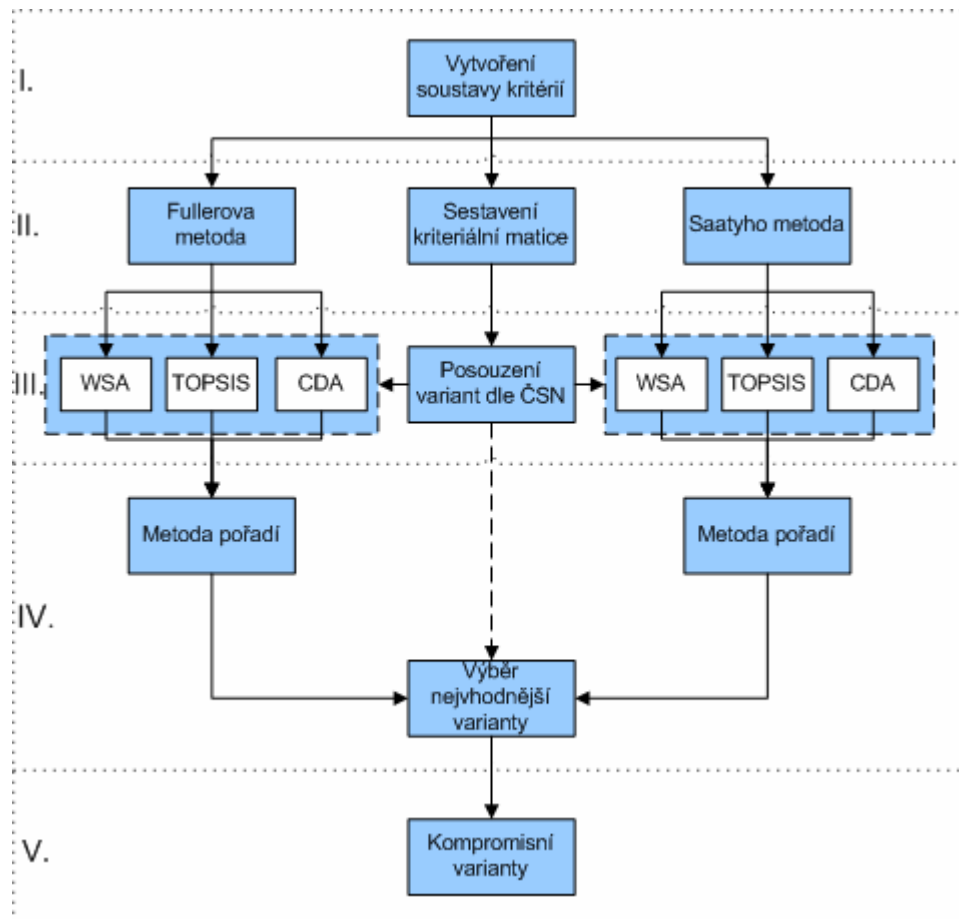
Závěry tepelně technických analýz a posouzení nejsou však jediným optimalizačním hlediskem. Zvolené konstrukční řešení se stanovenou tloušťkou a objemovým množstvím tepelně izolačních materiálů souvisí s celou řadou dalších faktorů, které mohou optimalizaci významně ovlivnit a podílet se tak na vlastní 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. 36) vycházející z obecného schématu aplikace multikriteriálních metod (Obr. 6). 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 metoda, Saatyho metoda), sestavení kritériální matice z navržených konstrukčních variant vyžadující získání kvantitativních, příp. kvalitativních dat;
- III. - dílčí hodnocení variant posouzením dle platných technických norem ČSN, pokud je toto požadováno a optimalizace metodami multikriteriální 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. 36 - Algoritmus procesu optimalizace aplikací multikritériálních hodnotících 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 vyřazeny. 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 splnily normové požadavky.

4.3.2 Sestavení hodnotících kritérií

Před započítím vlastního optimalizačního procesu bylo nutné stanovit hodnotící kritéria, která jsou ovlivněna návrhem konstrukčních detailů z tepelně technického hlediska a nejsou mezi sebou v přímé závislosti.

Bylo vybráno 6 relevantních hodnotících kritérií, která tvoří klíčové faktory pro multikriteriální optimalizační procesy. Sestavení datové základny pro vícekriteriální hodnocení spočívalo v kombinaci výpočetních metod, analýzy dokumentů a užitím počítačových aplikací, jejichž součástí jsou vlastní databázové systémy. Podrobnější postupy jsou popsány dále u každého kritéria.

Minimální povrchová teplota

Největší důraz multikriteriálního hodnocení je kladen na tepelně technické parametry stavebních detailů, proto se jimi 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 θ_{si} [°C], která byla zvolena jako hlavní ukazatel pro jednotlivé varianty, je převzata z výpočetních modelů tepelně technické analýzy konstrukčních detailů v kapitole 4.2. Pro analyzované konstrukční detaily jsou všechny vstupní hodnoty uvedeny v Tab. 17.

Tab. 17 - Přehled vstupních hodnot minimální povrchové teploty θ_{si} [°C] pro metody multikriteriálních analýz

Označení konstrukčního detailu A	A1	A2	A3.1	A3.2	A4.1	A4.2	A5.1	A5.2	A6.2.c	A6.2.e	A6.2.f
Minimální povrchová teplota θ_{si} [°C]	11,940	12,073	12,084	11,911	12,867	12,678	15,067	15,208	14,015	13,261	14,538
Označení konstrukčního detailu B, C	B1	B2	B3	C1	C2	C3					
Minimální povrchová teplota θ_{si} [°C]	15,671	15,122	16,004	18,683	18,407	17,924					

Hmotnost

Celková hmotnost m [kg] konstrukčních detailů je určena objemem V [m³] z návrhu stavebního detailu a objemovou hmotností ρ [kg/m³] užitých materiálů, dále součtem hmotností tvarovek udávaných výrobcí. Hodnoty hmotností (zaokrouhlené na jedno desetinné místo) pro jednotlivé konstrukční detaily jsou uvedeny v Tab. 18.

Tab. 18 - Přehled vstupních hodnot hmotnosti m [kg] pro metody multikriteriálních analýz

Označení konstrukčního detailu A	A1	A2	A3.1	A3.2	A4.1	A4.2	A5.1	A5.2	A6.2.c	A6.2.e	A6.2.f
Celková hmotnost m [kg]	1218,1	1220,1	1218,8	1189,8	1221,1	1191,7	1214,2	1185,4	1210,7	1222,9	1201,2
Označení konstrukčního detailu B, C	B1	B2	B3	C1	C2	C3					
Celková hmotnost m [kg]	1090,1	1075,3	1091,6	2483,5	2469,1	2475,6					

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 nejen návrh základových konstrukcí, ale i dalších nosných prvků objektů.

Cena

Faktor určuje ekonomickou hodnotu konstrukčního detailu. Cena v [Kč] je souborem nákladů na stavební práce (mzdy), materiály, stroje, výrobní režie, ostatní přímé náklady a zisk podle sborníku cen stavebních prací pro rok 2013 dle JKSO z databázi užití počítačové aplikace RTS Stavitel+ od firmy RTS, a. s. V ceně není započítána daň z přidané hodnoty (DPH) a doprava materiálů na staveniště, která je individuální pro každou stavbu. Tab. 19 je přehledem takto oceněných konstrukčních detailů. Je třeba dodat, že při krátkodobém stanovení ekonomického hodnotícího faktoru v praxi lze podřídit jeho sestavování momentálním tržním cenám a nejvýhodnějším nabídkám výrobců (resp. prodejců) dle vhodných lokalit.

Tab. 19 - Přehled ocenění konstrukčních detailů

Označení konstrukčního detailu A	A1	A2	A3.1	A3.2	A4.1	A4.2	A5.1	A5.2	A6.2.c	A6.2.e	A6.2.f
Cena [Kč]	5385	5484	5541	5374	5666	5475	6620	6379	5780	5423	7495
Označení konstrukčního detailu B, C	B1	B2	B3	C1	C2	C3					
Cena [Kč]	6567	6778	6797	13587	12914	12290					

Pracnost normová

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.

Tab. 20 - Přehled normové pracnosti jednotlivých konstrukčních detailů v [Nh]

Označení konstrukčního detailu A	A1	A2	A3.1	A3.2	A4.1	A4.2	A5.1	A5.2	A6.2.c	A6.2.e	A6.2.f
Pracnost [Nh]	4,42	4,45	4,55	4,39	4,60	4,42	6,16	5,88	4,44	4,55	4,44
Označení konstrukčního detailu B, C	B1	B2	B3	C1	C2	C3					
Pracnost [Nh]	5,71	6,28	5,89	10,30	8,66	7,77					

Do uvedených dat pro normovou pracnost (Tab. 20) nejsou započítány technologické přestávky a montáže pomocných konstrukcí (především lešenářské konstrukce). Nutnost jejich aplikace není určena pouze vlastním konstrukčním řešením stavebního detailu, ale také povětrnostními podmínkami a charakteristikou celého stavebního objektu, jehož je konstrukční detail součástí. Mohou mít tedy zanedbatelný vliv a jejich uvažování by tak mohlo vést k větším nepřesnostem.

Ekologická zátěž

Pro stanovení hodnot byl užit výpočetní program GaBi4. 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 - Dec. 07. Aby bylo možné

porovnat jednotlivé kategorie ve společném měřítku, je zavedena normalizace těchto dat na bezrozměrná čísla.

Tab. 21 - Přehled bezrozměrných hodnot popisujících ekologickou zátěž a environmentální dopady pro analizované konstrukční detaily

Označení konstrukčního detailu A	A1	A2	A3.1	A3.2	A4.1	A4.2	A5.1	A5.2	A6.2.c	A6.2.e	A6.2.f
Normalizovaná hodnota $\cdot 10^{-9}$ [-]	2,109	2,119	2,145	2,120	2,157	2,154	2,258	2,227	2,445	2,153	2,224
Označení konstrukčního detailu B, C	B1	B2	B3	C1	C2	C3					
Normalizovaná hodnota $\cdot 10^{-9}$ [-]	2,057	2,560	2,310	5,383	5,333	5,341					

Zkráceně bude v následujících kapitolách označován tento bezrozměrný hodnotící faktor zkratkou Eko [-]. Tento hodnotící faktor žádným způsobem nezohledňuje užití druhotných surovin při výrobě stavebních prvků navržených v konstrukčních detailech.

Aplikace druhotných surovin

Pro vyjádření množství aplikace druhotných surovin je do analýzy zaveden a definován koeficient hmotnostního podílu druhotných surovin C_{srm} [%]. Tato technická 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 (Tab. 22) byly převzaty od jednotlivých výrobců (technické listy produktů a přímé dotazy na výrobní procesy) a technické literatury.^{55 56 57}

⁵⁵ 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>.

⁵⁶ VOJTĚCH, D. *Kovové materiály*. Praha: VŠCHT, 2006. 185 s. ISBN 80-7080-600-1.

⁵⁷ European Aluminium Association. 2009 [cit. 2013-20-9] Dostupné na World Wide Web: <<http://www.alueurope.eu/>>

Tab. 22 - Výstupy stanovení koeficientu podílu druhotných surovin C_{srm} [%] pro analyzované konstrukční detaily

Označení konstrukčního detailu A	A1	A2	A3.1	A3.2	A4.1	A4.2	A5.1	A5.2	A6.2.c	A6.2.e	A6.2.f
C_{srm} [%]	2,198	2,194	2,197	2,250	2,192	2,247	2,205	2,259	3,774	2,189	2,628
Označení konstrukčního detailu B, C	B1	B2	B3	C1	C2	C3					
C_{srm} [%]	2,336	2,369	3,968	3,325	3,402	3,335					

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.

Všem výše popsaným hodnotícím kritériím bylo pro přehlednost přiřazeno značení f_1 až f_6 podle Tab. 23. Jejich pořadí nemá vliv na optimalizační procesy, není demonstrací důležitosti (váhy) faktorů a může být zcela náhodné. V tomto případě bylo pořadí zvoleno podle posloupnosti získávání vstupních dat. Hodnotící faktory f_1 a f_6 jsou kritéria maximalizační, ostatní faktory f_2, f_3, f_4 a f_5 jsou minimalizačními kritérii.

Tab. 23 - Označení hodnotících kritérií pro optimalizační proces

Název hodnotícího kritéria	Veličina	Jednotka	Označení v optimalizačním procesu
Minimální povrchová teplota	θ_{si}	[°C]	f_1
Hmotnost	m	[kg]	f_2
Cena	-	[Kč]	f_3
Pracnost normová	-	[Nh]	f_4
Ekologická zátěž (Eko)	-	[-]	f_5
Aplikace druhotných surovin	C_{srm}	[%]	f_6

Takto zvolené hodnotící faktory umožňují komplexní evaluaci jednotlivých konstrukčních detailů multikritériální analýzou. Z hlediska odborného (projekční práce) je zastoupena míra tepelně izolačního účinku (faktor f_1), hmotnost stavební konstrukce (faktor f_2) a složitost konstrukčního řešení v podobě jeho pracnosti při sestavení konstrukčního detailu (faktor f_4). Ekonomický aspekt (často výchozí stanovisko pro investory, resp. stavebníky) představuje cena konstrukčního řešení (faktor f_3). Moderní přístup představuje

implementované environmentální hledisko stanovující meze šetrnosti k životnímu prostředí, tedy environmentální dopady stavební konstrukce (faktor f_5) a množství užitých odpadových materiálů jako surovin pro recyklaci (faktor f_6).

4.3.3 Stanovení vektoru vah ν

Vektor vah byl nejprve stanoven metodou párového hodnocení ve dvou variantách. První varianta je určena pro analýzu s hodnotícími faktory f_1 až f_5 a druhá pro analýzu s faktory f_1 až f_6 . Pro vlastní přehledný proces hodnocení bylo užito schématu Fullerova trojúhelníku upraveného na potřebný počet hodnotících faktorů (Tab. 24).

Tab. 24 - Fullerův trojúhelník pro určení váhového vektoru ν_{1f} a ν_{2f} (významější kritéria jsou podtržena)

ν_{1f}				ν_{2f}				
<u>1</u>	<u>1</u>	<u>1</u>	<u>1</u>	<u>1</u>	<u>1</u>	<u>1</u>	<u>1</u>	<u>1</u>
2	3	4	5	2	3	4	5	6
<u>2</u>	<u>2</u>	<u>2</u>		<u>2</u>	<u>2</u>	<u>2</u>	<u>2</u>	
<u>3</u>	<u>4</u>	5		<u>3</u>	<u>4</u>	5	6	
<u>3</u>	<u>3</u>			<u>3</u>	<u>3</u>	<u>3</u>		
4	5			4	5	6		
<u>4</u>				<u>4</u>	<u>4</u>			
5				5	6			
				5				
				<u>6</u>				

Po provedení všech párových srovnání dle vztahu (36) je určen pomocí výpočtu (37) váhový vektor (Tab. 25). Dominantním je samozřejmě tepelně technické kritérium minimální povrchové teploty, jež je ústředním faktorem analýzy.

Tab. 25 - Získaný vektor vah ν_{1f} a ν_{2f}

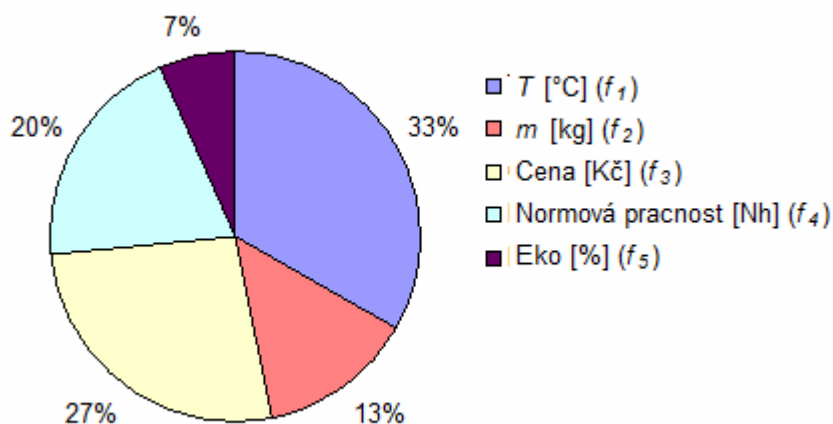
ν_{1f}			ν_{2f}		
f_i	n_i	ν_i	f_i	n_i	ν_i
1	4	0,4	1	5	0,333333
2	1	0,1	2	2	0,133333
3	3	0,3	3	4	0,266667
4	2	0,2	4	3	0,2
5	0	0	5	0	0
			6	1	0,066667

U hodnotícího faktoru f_5 se projevila nevýhoda tohoto algoritmu, když faktor nabyl nulové hodnoty. Aby následná analýza nepostrádala jeho informaci o kvalitě konstrukčních řešení, byla provedena transformace váhového vektoru podle popisu v závěru kapitoly 3.3.3.2 na vektor bez nulových hodnot hodnotících faktorů (Tab. 26).

Tab. 26 - Upravený váhový vektor v_{1f} a v_{2f}

v_{1f}			v_{2f}		
f_i	$n_i + 1$	v_i	f_i	$n_i + 1$	v_i
1	5	0,333333	1	6	0,285714
2	2	0,133333	2	3	0,142857
3	4	0,266667	3	5	0,238095
4	3	0,200000	4	4	0,190476
5	1	0,066667	5	1	0,047619
			6	2	0,095238

Pokud jsou všechny hodnoty nastaveny do požadovaného vyvážení, je možné přistoupit k vlastní multikriteriální analýze dat jednotlivých konstrukčních detailů. Přehledné rozložení prvků váhového vektoru mezi hodnotící faktory znázorňuje výsečový graf na Obr. 37.



Obr. 37 - Výsečový graf rozložení poměru váh hodnotících faktorů ve váhovém vektoru

Pro srovnání a určení přesnosti metod multikriteriální analýzy byl váhový vektor stanoven také postupem definovaným T. L. Saatyem. Ze souboru pěti hodnotících faktorů (f_1 až f_5) byla sestavena Saatyho matice (38) s ověřením její konzistence (39).

Tab. 27 - Saatyho matice s pěti hodnotícími faktory a ověřením její konzistence

Kritérium	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	Index konzistence I_s
f_1	1	5	2	4	7	0,01035 < 0,1
f_2	0,2	1	0,333333	0,5	2	
f_3	0,5	3	1	2	5	
f_4	0,25	2	0,5	1	3	
f_5	0,142857	0,5	0,2	0,333333	1	

Vzhledem k tomu, že je matice konzistentní dle výše uvedené podmínky, lze ji použít pro tvorbu váhového vektoru a následné metody vícekriteriálního hodnocení. Stejný postup byl proveden i pro multikriteriální analýzu se šesti faktory (Tab. 28).

Tab. 28 - Saatyho matice s šesti hodnotícími faktory a ověřením její konzistence

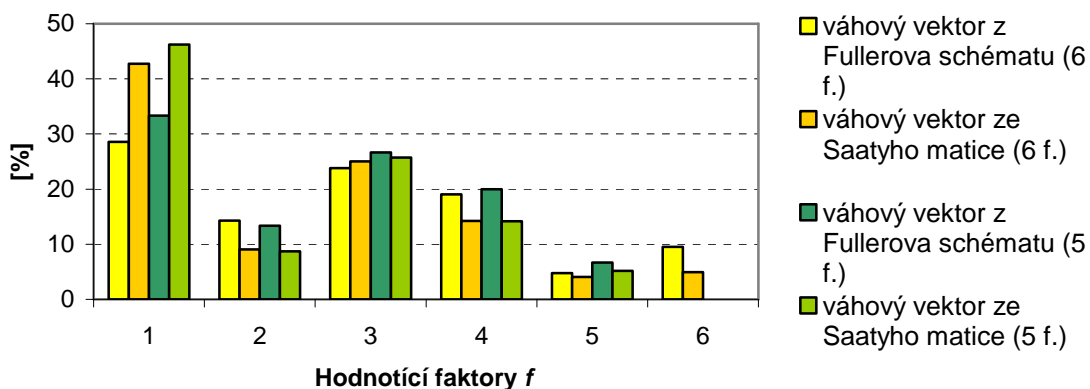
Kritérium	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	Index konzistence I_s
f_1	1	5	2	4	7	8	0,0309 < 0,1
f_2	0,2	1	0,333333	0,5	3	2	
f_3	0,5	3	1	2	5	6	
f_4	0,25	2	0,5	1	3	4	
f_5	0,142857	0,333333	0,2	0,333333	1	0,5	
f_6	0,125	0,5	0,166667	0,25	2	1	

Váhové vektory (Tab. 29) jsou odvozeny výpočtem (41, 42) z výše uvedených Saatyho matic.

Tab. 29 - Váhové vektory v_{I_s} a v_{2_s} odvozené ze Saatyho matic

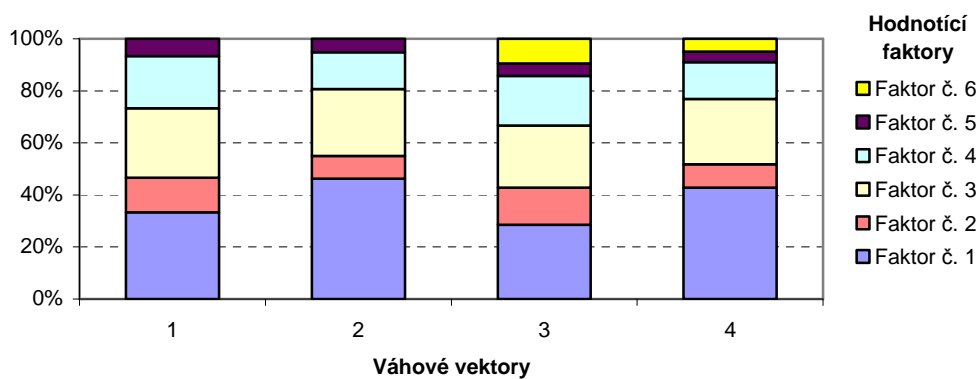
	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6
v_{I_s}	0,462420	0,087174	0,257527	0,141455	0,051423	-
v_{2_s}	0,427684	0,090418	0,250297	0,141993	0,040382	0,049226

Pro pět hodnotících faktorů je ve srovnání na Obr. 38 s váhovým vektorem určeným z Fullera schématu vektor váh 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 .



Obr. 38 - Sloupcový graf vektorů vah pro hodnotící faktory z Fullera schématu a Saatyho matice

Při porovnání váhových vektorů (Obr. 38) 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 .



Obr. 39 - Poměrné zastoupení hodnotících faktorů v sestavených váhových vektorech

Byly tak sestaveny celkem 4 váhové vektory (v_{1f} , v_{2f} , v_{1s} , v_{2s}), 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.

4.3.4 Konstrukční detail A - ukončení ploché jednoplášťové střechy atikou

Přípravou a enumerací dat se zabývaly předchozí kapitoly. Do analýzy vstupují pouze data relevantních konstrukčních variant.

V prvním kroku byla provedena analýza s pěti hodnotícími faktory (f_1 až f_5) k nalezení optimálního typu konstrukce s hypotetickým tepelně izolačním materiálem ($\lambda = 0,04$ W/mK), 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. 30 - Výstupy multikriteriálních analýz konstrukčního detailu A zkoumající pouze varianty konstrukčního řešení

Váhový vektor stanovený Fullerovým schématem				Váhový vektor stanovený ze Saatyho matice			
WSA	TOPSIS	CDA	Výsledné seřazení (metodou pořadí)	WSA	TOPSIS	CDA	Výsledné seřazení (metodou pořadí)
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. 30) 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.

Následující analýzy jsou již prováděny na rozličných konstrukčních detailech s reálným užitím tepelně izolačních materiálů, umožňujících svými technickými parametry určitý typ aplikace. Vzhledem k předchozímu zjištění vícekriteriálního hodnocení variant konstrukčního řešení a výsledkům v kapitole 4.2.3 byl z dalších multikriteriálních analýz užití odlišných tepelně izolačních materiálů ve vybraných konstrukčních řešeních vyjmut konstrukční detail A6.1 s vertikální změnou tvaru konstrukce. Současně je následující část

kapitoly ukázkou podrobného algoritmu výpočtu implementovaného do aplikace MS Excel s dílčími výstupy. Jedná se o pětifaktorovou analýzu s užitím váhového vektoru v_{lf} získaného Fullerovou metodou. Všechna vstupní data jsou přehledně sestavena do tabulky představující tzv. kritériální matici (Tab. 31) dle obecného předpisu (14).

Tab. 31 - Vstupní data upravená do kritériální matice

Ozn. KD	θ_{si} [°C]	m [kg]	Cena [Kč]	Pracnost [Nh]	Eko [-]
A1	11,940	1218,10315	5385	4,42	2,109E-09
A2	12,073	1220,07065	5484	4,45	2,119E-09
A3.1	12,084	1218,83875	5541	4,55	2,145E-09
A3.2	11,911	1189,76903	5374	4,39	2,120E-09
A4.1	12,867	1221,13225	5666	4,60	2,157E-09
A4.2	12,678	1191,73653	5475	4,42	2,154E-09
A5.1	15,067	1214,21727	6620	6,16	2,258E-09
A5.2	15,208	1185,39460	6379	5,88	2,227E-09
A6.2.c	14,015	1210,70403	5780	4,44	2,445E-09
A6.2.e	13,261	1222,92599	5423	4,55	2,153E-09
A6.2.f	14,538	1201,24774	7495	4,44	2,224E-09

Kritériální matice představuje základní přehled o kvalitě parametrů všech variant konstrukčních detailů. Jednotlivé faktory jsou následně přeznačeny dle Tab. 23 a všechna minimalizační kritéria (f_2, f_3, f_4 a f_5) užitím vztahu (17) převedena na maximalizační (Tab. 32). Poté jsou již všechna data připravena pro vstup do vybraných multikritériálních metod.

Tab. 32 - Převod minimalizačních kritérií na maximalizační

Ozn. KD	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5
A1	11,940	4,82284	2110	1,74	3,364E-10
A2	12,073	2,85534	2011	1,71	3,261E-10
A3.1	12,084	4,08724	1954	1,61	3,006E-10
A3.2	11,911	33,15696	2121	1,77	3,247E-10
A4.1	12,867	1,79374	1829	1,56	2,877E-10
A4.2	12,678	31,18946	2020	1,74	2,910E-10
A5.1	15,067	8,708725	875	0	1,866E-10
A5.2	15,208	37,53139	1116	0,28	2,186E-10
A6.2.c	14,015	12,22196	1715	1,72	0
A6.2.e	13,261	0	2072	1,61	2,922E-10
A6.2.f	14,538	21,67825	0	1,72	2,206E-10

Dále byly jednotlivě provedeny tři metody multikriteriální analýzy (metoda WSA, TOPSIS a CDA), na jejichž celkové vyhodnocení byla aplikována metoda pořadí. Podrobný postup jednotlivých výpočetních kroků popisují následující tři kapitoly.

4.3.4.1 Metoda WSA

Pro přehlednější analýzu je sestavena matice obsahující kombinaci ideálních H_j a bazálních D_j variant. Tato matice je využita pro výpočet normalizované matice (Tab. 34) užitím vztahu (15).

Tab. 33 - Sestavení ideální (H) a bazální (D) varianty

H	15,208	37,53139	2121	1,77	3,364E-10
D	11,911	0	0	0	0

Tab. 33 zároveň přehledně znázorňuje hypotetická řešení konstrukčních detailů zkombinovaná z analyzovaných variant pro ideální stav a také naopak pro ten nejméně přijatelný.

Tab. 34 - Normalizovaná matice

	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5
A1	0,008795875	0,12850150	0,9948138	0,983050847	1
A2	0,049135578	0,07607872	0,9481377	0,966101695	0,9692127
A3.1	0,052471944	0,10890191	0,9212636	0,909604520	0,8935359
A3.2	0	0,88344610	1	1	0,9650702
A4.1	0,289960570	0,04779306	0,8623291	0,881355932	0,8552200
A4.2	0,232635729	0,83102331	0,9523810	0,983050847	0,8649500
A5.1	0,957233849	0,23203844	0,4125413	0	0,5547124
A5.2	1	1	0,5261669	0,158192090	0,6496461
A6.2.c	0,638155899	0,32564635	0,8085809	0,971751412	0
A6.2.e	0,409463148	0	0,9768977	0,909604520	0,8684483
A6.2.f	0,796784956	0,57760317	0	0,971751412	0,6558034

Výsledky analýzy metodou WSA jsou uvedeny v Tab. 35. Jako neoptimálnější se projevuje varianta A4.2 (pořadí 1), naopak varianta A5.1 (pořadí 11) je tou nejméně přijatelnou.

Tab. 35 - Sestavení pořadí variant dle hodnot užitku u

WSA výstup	Varianta	Hodnota užitku u	Pořadí
	$u(A1)$	0,54862600	8
	$u(A2)$	0,53719358	9
	$u(A3.1)$	0,51917114	10
	$u(A3.2)$	0,64879750	4
	$u(A4.1)$	0,56626621	7
	$u(A4.2)$	0,69659011	1
	$u(A5.1)$	0,49700824	11
	$u(A5.2)$	0,68192600	2
	$u(A6.2.c)$	0,66610999	3
	$u(A6.2.e)$	0,63681122	5
	$u(A6.2.f)$	0,58067925	6

Jedná se však pouze jen o jeden pohled na optimalizaci dle maximální lineární funkce užitku.

4.3.4.2 Metoda TOPSIS

Výpočet vychází z Tab. 31, kterou je nutné nejprve upravit podle vztahu (19) tak, aby obsahovala již všechna kritéria převedená na maximalizační. Dle matematického vzorce (20) je matice R transformována na tvar vektorů jednotkové délky uvedený v Tab. 36.

Tab. 36 - Normalizovaná kritériální matice R

R	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5
A1	0,270774558	-0,303874124	-0,274715361	-0,278070147	-0,289794405
A2	0,273790723	-0,304364947	-0,279765838	-0,279957501	-0,291217941
A3.1	0,274040181	-0,304057631	-0,282673689	-0,286248681	-0,294717062
A3.2	0,270116898	-0,296805752	-0,274154196	-0,276182794	-0,291409477
A4.1	0,291797005	-0,304629779	-0,289050554	-0,289394271	-0,296488700
A4.2	0,287510875	-0,297296575	-0,279306704	-0,278070147	-0,296038805
A5.1	0,341688464	-0,302904732	-0,337718791	-0,387536676	-0,310383476
A5.2	0,344886053	-0,295714485	-0,325424194	-0,369921373	-0,305993963
A6.2.c	0,317831275	-0,302028303	-0,294866255	-0,279328383	-0,336032098
A6.2.e	0,300732111	-0,305077254	-0,276653928	-0,286248681	-0,295877052
A6.2.f	0,329691836	-0,299669289	-0,382356848	-0,279328383	-0,305709260

Takto sestavená matice je následně vynásobena prvky váhového vektoru dle vztahu (21). Výsledkem je vážená kritériální matice W (Tab. 37).

Tab. 37 - Vážená kritériální matice W

W	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5
A1	0,090258186	-0,040516550	-0,073257430	-0,055614029	-0,019319627
A2	0,091263574	-0,040581993	-0,074604223	-0,055991500	-0,019414529
A3.1	0,091346727	-0,040541017	-0,075379650	-0,057249736	-0,019647804
A3.2	0,090038966	-0,039574100	-0,073107786	-0,055236559	-0,019427298
A4.1	0,097265668	-0,040617304	-0,077080148	-0,057878854	-0,019765913
A4.2	0,095836958	-0,039639543	-0,074481788	-0,055614029	-0,019735920
A5.1	0,113896155	-0,040387298	-0,090058344	-0,077507335	-0,020692232
A5.2	0,114962018	-0,039428598	-0,086779785	-0,073984275	-0,020399598
A6.2.c	0,105943758	-0,040270440	-0,078631001	-0,055865677	-0,022402140
A6.2.e	0,100244037	-0,040676967	-0,073774381	-0,057249736	-0,019725137
A6.2.f	0,109897279	-0,039955905	-0,101961826	-0,055865677	-0,020380617

Ze sestavené matice W lze stanovit ideální a bazální variantu z kombinací parametrů jednotlivých variant řešení (Tab. 38).

Tab. 38 - Sestavení ideální (H) a bazální (D) varianty

H	0,114962018	-0,039428598	-0,073107786	-0,055236559	-0,019319627
D	0,090038966	-0,040676967	-0,101961826	-0,077507335	-0,022402140

Jedná se o shodnou kombinaci prvků z analyzovaných variant, jako tomu bylo u stanovení ideální a bazální varianty v metodě WSA (Tab. 33). Diferencí je pouze jejich numerický formát upravený předchozí transformací (20).

Následuje výpočet (24, 25) vzdáleností jednotlivých konstrukčních řešení dle jejich analyzovaných parametrů od ideálního (d_i^+) a bazálního (d_i^-) konstrukčního řešení. Tyto výsledky představuje Tab. 39.

Tab. 39 - Výpočet vzdáleností variant od bazální a ideální varianty

Varianta	d_i^+	d_i^-
A1	0,024731110	0,03623306
A2	0,023785811	0,03495431
A3.1	0,023837814	0,03356036
A3.2	0,024923709	0,03658701
A4.1	0,018372108	0,03261217
A4.2	0,019183745	0,03572494
A5.1	0,028057942	0,02671827
A5.2	0,023228576	0,02948955
A6.2.c	0,011065319	0,03557831
A6.2.e	0,014927794	0,03627964
A6.2.f	0,029325872	0,02945030

Závěrečný krok výpočtu relativního ukazatele vzdálenosti je proveden dle vztahu (26). V Tab. 40 jsou uvedeny výsledky analýzy metodou TOPSIS.

Tab. 40 - Stanovení pořadí variant podle relativního ukazatele vzdálenosti od bazální varianty

TOPSIS výstup	Varianta	c_i	Pořadí
	A1	0,594333709	7
	A2	0,595067071	5
	A3.1	0,584693828	8
	A3.2	0,594807045	6
	A4.1	0,639651502	4
	A4.2	0,650624554	3
	A5.1	0,487771419	11
	A5.2	0,559381588	9
	A6.2.c	0,762768931	1
	A6.2.e	0,708483839	2
	A6.2.f	0,501058530	10

Aplikací metody TOPSIS je vygenerováno pořadí jednotlivých konstrukčních variant stavebních detailů pro konstrukci atiky ploché jednoplášňové střechy dle vzdáleností hodnoty jednotlivých parametrů k parametrům ideálního (tzv. hypoteticky nejefektivnějšího) a bazálního (tzv. hypoteticky nejhoršího) řešení. Z filosofie přístupu této metody k analýze dat pramení i částečně neshodný výsledek pořadí jednotlivých variant ve srovnání s metodou analýzy WSA.

4.3.4.3 Metoda CDA

Algoritmus optimalizační metody spočívající v párovém porovnávání jednotlivých variant představuje další významné hledisko na danou problematiku. Postup vychází již z normalizované matice vytvořené při procesu optimalizace metodou WSA (Tab. 34). Do takto připravené matice jsou zavedeny váhy kritérií vynásobením jejich jednotlivých prvků příslušným členem z váhového vektoru a tím získána nová matice W (Tab. 41).

Tab. 41 - Zavedení váhy kritérií do matice

W	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5
A1	0,002931958	0,01713353	0,2590546	0,183157895	0,0666667
A2	0,016378526	0,01014383	0,2468999	0,180000000	0,064614178
A3.1	0,017490648	0,01452025	0,2461633	0,183157895	0,059569057
A3.2	0	0,11779281	0,2666667	0,200000000	0,064338016
A4.1	0,096653523	0,00637241	0,2309392	0,177894737	0,057014664
A4.2	0,077545243	0,11080311	0,2542664	0,196842105	0,057663334
A5.1	0,319077950	0,03093846	0,1074279	0	0,036980828
A5.2	0,333333333	0,133333333	0,1370166	0,029473684	0,043309738
A6.2.c	0,212718633	0,04341951	0,2105586	0,181052632	0
A6.2.e	0,136487716	0	0,2543892	0,169473684	0,057896554
A6.2.f	0,265594985	0,07701376	0	0,181052632	0,043720229

Z matice W je podle vztahu (29) vypočítán index shody C_{AB} (Tab. 42). Pro usnadnění jeho výpočtu byla v aplikaci Excel v programovacím jazyku Visual Basic 6.0 sestavena elementární funkce dle matematického algoritmu, která celý proces výpočtu usnadňuje.

Tab. 42 - Index shody C_{AB}

C_{AB}	A1	A2	A3.1	A3.2	A4.1	A4.2	A5.1	A5.2	A6.2.c	A6.2.e	A6.2.f
A1	1,000	0,667	0,667	0,400	0,667	0,533	0,533	0,533	0,533	0,667	0,533
A2	0,333	1,000	0,533	0,400	0,667	0,067	0,533	0,533	0,333	0,400	0,333
A3.1	0,333	0,467	1,000	0,333	0,667	0,067	0,533	0,533	0,333	0,400	0,333
A3.2	0,600	0,600	0,667	1,000	0,667	0,667	0,667	0,533	0,667	0,667	0,667
A4.1	0,333	0,333	0,333	0,333	1,000	0,333	0,533	0,533	0,333	0,133	0,333
A4.2	0,667	0,933	0,933	0,333	0,667	1,000	0,667	0,533	0,667	0,333	0,667
A5.1	0,467	0,467	0,467	0,333	0,467	0,333	1,000	0,000	0,400	0,467	0,600
A5.2	0,467	0,467	0,467	0,467	0,467	0,467	1,000	1,000	0,533	0,467	0,733
A6.2.c	0,467	0,667	0,667	0,333	0,667	0,333	0,600	0,467	1,000	0,667	0,467
A6.2.e	0,333	0,600	0,800	0,333	0,867	0,667	0,533	0,533	0,333	1,000	0,333
A6.2.f	0,467	0,667	0,667	0,333	0,667	0,333	0,400	0,267	0,733	0,667	1,000

Z matice indexů shody C_{AB} (Tab. 42) je určen vztahem (31) celkový index shody C_i (Tab. 43).

Tab. 43 - Celkový index shody

$\sum C_i$
6,733333
5,133333
5,000000
7,400000
4,533333
7,400000
5,000000
6,533333
6,333333
6,333333
6,200000

Poté je nutné určit index neshody D_{AB} , jehož výpočet je rozdělen na určení čitatele D_1 a posléze jmenovatele D_2 . Čítec D_1 je určen z části nad zlomkovou čarou vztahu (30) opět pomocí naprogramované funkce v jazyku Visual Basic, jejíž výstupem je matice v Tab. 44.

Tab. 44 - Čítec indexu neshody D_1

D_1	A1	A2	A3.1	A3.2	A4.1	A4.2	A5.1	A5.2	A6.2.c	A6.2.e	A6.2.f
A1	0,000	0,013	0,015	0,101	0,094	0,094	0,316	0,330	0,210	0,134	0,263
A2	0,012	0,000	0,004	0,108	0,080	0,101	0,303	0,317	0,196	0,120	0,249
A3.1	0,020	0,011	0,000	0,103	0,079	0,096	0,302	0,316	0,195	0,119	0,248
A3.2	0,003	0,016	0,017	0,000	0,097	0,078	0,319	0,333	0,213	0,136	0,266
A4.1	0,035	0,023	0,016	0,111	0,000	0,104	0,222	0,237	0,116	0,040	0,169
A4.2	0,011	0,007	0,002	0,013	0,019	0,000	0,242	0,256	0,135	0,059	0,188
A5.1	0,197	0,193	0,182	0,200	0,176	0,197	0,000	0,102	0,194	0,182	0,194
A5.2	0,165	0,162	0,150	0,168	0,145	0,165	0,000	0,000	0,163	0,150	0,163
A6.2.c	0,067	0,065	0,060	0,074	0,057	0,067	0,106	0,121	0,000	0,058	0,053
A6.2.e	0,017	0,011	0,015	0,118	0,006	0,111	0,183	0,197	0,076	0,000	0,129
A6.2.f	0,265	0,253	0,246	0,267	0,230	0,254	0,110	0,140	0,216	0,261	0,000

Jmenovatel D_2 je vypočítán podle matematického vzorce z jmenovatele ve vztahu (30). Hodnota jmenovatele je $D_2 = 0,333333$.

Podle vztahu (30) je pak z čitatele D_1 a jmenovatele D_2 vypočítán index neshody D_{AB} (Tab. 45).

Tab. 45 - Index neshody D

D	A1	A2	A3.1	A3.2	A4.1	A4.2	A5.1	A5.2	A6.2.c	A6.2.e	A6.2.f
A1	0,000	0,040	0,044	0,302	0,281	0,281	0,948	0,991	0,629	0,401	0,788
A2	0,037	0,000	0,013	0,323	0,241	0,302	0,908	0,951	0,589	0,360	0,748
A3.1	0,059	0,034	0,000	0,310	0,237	0,289	0,905	0,948	0,586	0,357	0,744
A3.2	0,009	0,049	0,052	0,000	0,290	0,233	0,957	1,000	0,638	0,409	0,797
A4.1	0,106	0,069	0,047	0,334	0,000	0,313	0,667	0,710	0,348	0,120	0,507
A4.2	0,034	0,021	0,006	0,038	0,057	0,000	0,725	0,767	0,406	0,177	0,564
A5.1	0,590	0,580	0,546	0,600	0,529	0,590	0,000	0,307	0,583	0,546	0,583
A5.2	0,495	0,485	0,451	0,505	0,434	0,495	0,000	0,000	0,488	0,451	0,488
A6.2.c	0,200	0,194	0,179	0,223	0,171	0,202	0,319	0,362	0,000	0,174	0,159
A6.2.e	0,051	0,034	0,044	0,353	0,019	0,332	0,548	0,591	0,229	0,000	0,387
A6.2.f	0,796	0,759	0,737	0,800	0,690	0,762	0,330	0,421	0,647	0,782	0,000

Následuje výpočet souhrnného indexu neshody podle vztahu (32). Výsledky jsou uvedeny v Tab. 46.

Tab. 46 - Celkový index neshody D_i

$\sum D_i$
4,705826
4,472180
4,468171
4,434638
3,221170
2,794395
5,452947
4,291525
2,182105
2,588087
6,722489

Celkové hodnocení variant CDA_i je určeno výpočtem (33) a podle jeho rostoucí hodnoty sestavno pořadí v Tab. 47. Jako optimální varianta je metodou předloženo konstrukční řešení A4.2 a nejméně efektivní variantou bylo stanoveno konstrukční řešení A6.2.f. Je zřejmé, že i tento metodický postup přináší mírně odlišné výsledky od předchozích dvou. Z toho lze usoudit na vhodně zvolenou soustavu optimalizačních metod neobsahující redundantní postupy a výsledky.

Tab. 47 - Výsledek metody CDA

CDA výstup	Varianty	CDA_i	Pořadí
	A1	8,972492173	6
	A2	10,33884657	8
	A3.1	10,46817147	9
	A3.2	8,034637549	4
	A4.1	9,687837161	7
	A4.2	6,394395233	1
	A5.1	11,45294734	10
	A5.2	8,75819209	5
	A6.2.c	6,84877182	2
	A6.2.e	7,254753435	3
	A6.2.f	11,52248939	11

Na závěr analýzy je nutné komplexně vyhodnotit výsledky jednotlivých analýz metodou pořadí bez uvažování váhového vektoru, který by upřednostňoval jakoukoliv z multikriteriálních metod. Tak jsou získány výstupní informace (Tab. 48) z vícekritériální analýzy pro konstrukční detaily z kategorie A.

Tab. 48 - Celkové hodnocení ze všech optimalizačních metod

Metoda pořadí (výstup)	Varianty	Hodnocení	Pořadí
	A1	21	7
	A2	22	8
	A3.1	27	9
	A3.2	14	4
	A4.1	18	6
	A4.2	5	1
	A5.1	32	11
	A5.2	16	5
	A6.2.c	6	2
	A6.2.e	10	3
	A6.2.f	27	9

Tyto výstupy jsou souhrnně představeny také v Tab. 49. Uvedeným způsobem byly realizovány všechny multikriteriální výpočty, jejichž výsledky jsou uvedené v této (pro konstrukční detail A) a v následujících (pro konstrukční detaily B a C) kapitolách.

4.3.4.4 Vyhodnocení provedených multikriteriálních analýz

Stejným způsobem, jako je uvedeno v úvodu kapitoly 4.3.4, byly seříděny výsledky multikriteriálních výpočtových metod a sestaveny přehledné tabulkové výstupy.

Tab. 49 - Výstupy multikriteriálních analýz s pěti hodnotícími faktory pro konstrukční detail A zkoumajících kombinace variant konstrukčního a materiálového řešení (ozn. **x** – varianta nevyhovuje požadavku technické normy ČSN 73 0540)

Váhový vektor stanovený Fullerovým schématem				Váhový vektor stanovený ze Saatyho matice			
WSA	TOPSIS	CDA	Výsledné seřazení (metodou pořadí)	WSA	TOPSIS	CDA	Výsledné seřazení (metodou pořadí)
A4.2	A6.2.c	A4.2	A4.2 x	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 x	A4.2	A5.1	A4.2	A4.2 x
A6.2.e	A2	A5.2	A5.2	A5.1	A4.2	A5.1	A5.1
A6.2.f	A3.2	A1	A4.1 x	A6.2.f	A4.1	A4.1	A4.1 x
A4.1	A1	A4.1	A1 x	A4.1	A6.2.f	A6.2.f	A6.2.f
A1	A3.1	A2	A2 x	A3.2	A2	A3.2	A3.2 x
A2	A5.2	A3.1	A3.1 x + A6.2.f	A1	A1	A1	A1 x
A3.1	A6.2.f	A5.1	-	A2	A3.2	A3.1	A2 x
A5.1	A5.1	A6.2.f	A5.1	A3.1	A3.1	A2	A3.1 x

Pokud je sledována efektivita aplikace kompozitního materiálu ve variantě 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 však nemusí vždy splňovat normové požadavky, jako je tomu 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. 50). 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 (ozn. A1) vnášejí v komplexním hodnocení jistá zhoršení konstrukčních parametrů.

Tab. 50 - Výstupy multikriteriálních analýz s šesti hodnotícími faktory pro konstrukční detail A zkoumajících kombinace variant konstrukčního a materiálového řešení (ozn. **x – varianta nevyhovuje požadavku technické normy ČSN 73 0540)**

Váhový vektor stanovený Fullerovým schématem				Váhový vektor stanovený ze Saatyho matice			
WSA	TOPSIS	CDA	Výsledné seřazení (metodou pořadí)	WSA	TOPSIS	CDA	Výsledné seřazení (metodou pořadí)
A6.2.c	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	A4.2	A4.2 x	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 x
A3.2	A4.1	A6.2.e	A3.2 x	A6.2.e	A5.1	A6.2.e	-
A6.2.e	A3.2	A5.2	A5.2 + A4.1 x	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 x	A3.2	A6.2.f	A4.1	A3.2 x + A4.1 x
A1	A3.1	A3.1	A6.2.f + A2 x	A4.1	A3.2	A6.2.f	-
A2	A6.2.f	A2	-	A1	A1	A1	A1 x
A3.1	A5.2	A6.2.f	A3.1 x	A2	A2	A3.1	A2 x
A5.1	A5.1	A5.1	A5.1	A3.1	A3.1	A2	A3.1 x

Výslednou kompromisní variantou se tak 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.

4.3.4.5 Výstupy metody datových obalů

Jak již bylo podrobněji popsáno v kapitole 3.3.4, 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 efektivnosti 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. 51 - Výsledky analýzy datových obalů pro zjištění míry efektivity konstrukčních řešení stavebního detailu A

Ozn. konstrukční varianty	Hodnocení [%]	Efektivita
A1	91,9	-
A2	92,1	-
A3.1	90,8	-
A3.2	91,8	-
A4.1	95,6	-
A4.2	96,4	-
A5.1	97,7	-
A5.2	100,0	+
A6.2.c	100,0	+
A6.2.e	100,0	+
A6.2.f	100,0	+

Ve vztahu k množství vstupů je shledáno metodou DEA více variant jako efektivních (Tab. 51). Při vyjádření efektivity jednotlivých konstrukčních variant lze dospět k závěru, který potvrzuje předešlé multikriteriální analytické výpočty. Do množiny efektivních konstrukčních detailů byla vybrána varianta A5.2 a skupina variant A6.2.x. K tomu, 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. 52).

Tab. 52 - Diferenciace efektivních variant podle přehledu z výstupu metody superefektivnosti

Ozn. konstrukční varianty	Hodnocení [%]	Pořadí podle efektivity
A5.2	110,2	1
A6.2.c	105,4	3
A6.2.e	101,4	4
A6.2.f	109,1	2

Z výstupů v Tab. 52 lze odvodit, že progresivní konstrukční detail A6.2.c (aplikace termoizolačního kompozitního materiálu) je sice efektivní při porovnání poměru vstupů a výstupu, ale mezi ostatními efektivními variantami má určité deficity. Tyto deficity lze na straně vstupních parametrů určit. Tab. 53 představuje pro variantu A6.2.c srovnání efektivity jednotlivých vstupních parametrů a doporučenou úpravu jejich hodnot tak, aby se tato jednotka stala tou nejefektivnější a tedy konkurence schopnou alternativou k nynějším stavebně technickým řešením.

Tab. 53 - Porovnání efektivity jednotlivých parametrů pro variantu konstrukčního detailu A6.2.c

A6.2.c			
Parametr	Stávající hodnota	Doporučená (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

Z uvedených dat je patrné, 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.

4.3.5 Konstrukční detail B - ukončení ploché jednoplášťové střechy okapem

Vzhledem k charakteristice tohoto stavebního detailu, kde při užití vybraného konstrukčního řešení je ovlivněna i následná volba tepelně izolačního materiálu, byla analýza 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. 54 a Tab. 55.

Tab. 54 - Výstupy multikriteriálních analýz s pěti hodnotícími faktory pro konstrukční detail B zkoumajících kombinace variant konstrukčního a materiálového řešení

Váhový vektor stanovený Fullerovým schématem				Váhový vektor stanovený ze Saatyho matice			
WSA	TOPSIS	CDA	Výsledné seřazení (metodou pořadí)	WSA	TOPSIS	CDA	Výsledné seřazení (metodou pořadí)
B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1
B3	B3	B3	B3	B3	B3	B3	B3
B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2

Jen malou odlišnost přináší hodnocení se šesti hodnotícími faktory (Tab. 55) v pořadí výsledků pro metodu TOPSIS, kde je preferováno konstrukční řešení B3.

Tab. 55 - Výstupy multikriteriálních analýz s šesti hodnotícími faktory pro konstrukční detail B zkoumajících kombinace variant konstrukčního a materiálového řešení

Váhový vektor stanovený Fullerovým schématem				Váhový vektor stanovený ze Saatyho matice			
WSA	TOPSIS	CDA	Výsledné seřazení (metodou pořadí)	WSA	TOPSIS	CDA	Výsledné seřazení (metodou pořadí)
B1	B3	B1	B1	B1	B3	B1	B1
B3	B1	B3	B3	B3	B1	B3	B3
B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2

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 stanoveno 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.

4.3.6 Konstrukční detail C - průnik nosné konstrukce střešním pláštěm

Pro konstrukční detail C je nejvýznamnější určení efektivity při realizaci eliminace tepelného mostu, kdy lze postupovat dvojím způsobem. Po provedení multikriteriálních analýz na dvou variantách s různými způsoby aplikace tepelně izolačního materiálu o rozdílné tepelné vodivosti byly sestaveny následující tabulkové výstupy.

První výpis (Tab. 56) obsahuje výsledky z multikriteriálního hodnocení užitím pěti hodnotících faktorů.

Tab. 56 - Výstupy multikriteriálních analýz s pěti hodnotícími faktory pro konstrukční detail C zkoumajících kombinace variant konstrukčního a materiálového řešení

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

Zřetelně se zde projevuje předpokládaná neefektivita 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.

Následující výpis výsledků v Tab. 57 je platný pro hodnocení šesti faktory. Zároveň je však také zcela identický s výsledky pětifaktorové analýzy.

Tab. 57 - Výstupy multikriteriálních analýz s šesti hodnotícími faktory pro konstrukční detail C zkoumajících kombinace variant konstrukčního a materiálového řešení

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

Závěrem lze konstatovat, že multikriteriální hodnocení tohoto konstrukčního detailu potvrdilo tvrzení ze závěru kapitoly 4.2.5 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.

4.3.7 Komparace užitých tepelně izolačních materiálů

Již v kapitole 1.6 byly znázorněny a srovnávány některé vlastnosti stavebních materiálů na bázi primárních a druhotných surovin. Pro komplexnost výsledků multikriteriálního hodnocení je nutné ještě na závěr analyzovat zvlášť užitá tepelně izolační materiály z uvedených variant konstrukčních detailů. Tímto způsobem lze získat výsledek pouze pro porovnání jejich materiálových vlastností a zjistit míru efektivity vyvíjeného kompozitního materiálu navrhovaného ve variantách A6.2.c, B3, C2 nezávisle na způsobu konstrukčního řešení, v kterém je tento materiál aplikován.

Aby bylo srovnání materiálů co nejobjektivnější, musí být brány ty modifikace, které slouží k podobnému účelu aplikace, tedy především 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 (výpis v Tab. 58). 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. 58 - Vstupní data pro provedení multikriteriální analýzy vybraných tepelně izolačních materiálů

Ozn. varianty	Název materiálu	Součinitel tepelné vodivosti λ [W/mK] - f_{m1} -	Pevnost v tlaku σ [MPa] - f_{m2} -	Objem. hmotnost ρ [kg/m ³] - f_{m3} -	Nasákavost c [%] - f_{m4} -	Cena Kč/m ³ - f_{m5} -	Koeficient podílu druhotných surovin C_{srm} [%] - f_{m6} -
M1	Pěnové sklo Foamglas 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.⁵⁸ Byla uvažována průměrná hodnota.
*** Pro danou aplikaci byla stanovena maximální přípustná nasákavost materiálu $c = 3\%$, která, jak bylo zjištěno v kapitole 3.4.1.3 odpovídá hodnotám minimální objemové hmotnosti $\rho = 480 \text{ kg/m}^3$.

⁵⁸ MATĚJKA, L. *Progresivní konstrukční detaily obvodových plášťů s využitím druhotných surovin*. Brno: VUTIUM, 2013. 42 s. ISBN 978-80-214-4679-3.

Pro provedení analýzy bylo sestaveno šest hodnotících faktorů označených f_{m1} až f_{m6} , aby byly odlišeny od předchozích prováděných analýz. Stanovení váhového vektoru v_{3f} bylo provedeno pomocí Fullerova schématu (Tab. 5) s výstupem podle předpisu v Tab. 59. Hlavní důraz je kladen na pevnost v tlaku, součinitel tepelné vodivosti, dále pak ekonomickou hodnotu (cenu) a nasákavost. Méně podstatné parametry pro aplikaci v konstrukčních detailech plochých střech jsou pak parametry objemové hmotnosti a množství druhotných surovin užitých při výrobě izolačního materiálu (koeficient podílu druhotných surovin). Vlastní multikriteriální analýza je váhovým vektorem nastavena tak, aby byly zhodnoceny vlastnosti vyvíjeného kompozitního materiálu, které určují možnost takové aplikace, pro kterou je navrhován.

Tab. 59 - Váhový vektor v_{3f}

	f_{m1}	f_{m2}	f_{m3}	f_{m4}	f_{m5}	f_{m6}
v_{3f}	0,267	0,333	0,033	0,133	0,201	0,033

Výsledky provedených multikriteriálních hodnocení jsou uvedeny v Tab. 60. Nelze si pod nimi však představit jednoznačné určení, který tepelně izolační materiál je nejlepší pro své (zde srovnávané) 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. 60 - Výstupy multikriteriální analýzy materiálových variant

Multikriteriální hodnocení stávajících parametrů				Multikriteriální hodnocení po dosažení upravených parametrů varianty M3			
WSA	TOPSIS	CDA	Výsledné seřazení (metodou pořadí)	WSA	TOPSIS	CDA	Výsledné seřazení (metodou pořadí)
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 uvedených výsledků je patrné, že kompozitní materiál (varianta M3) má mezi ostatními stavebními hmotami stabilní pozici. Dále lze z tohoto přehledu výstupů multikriteriálního hodnocení definovat některé technické překážky pro užití kompozitního materiálu v praxi. Především se jedná o vyšší objemovou hmotnost, která následně nepříznivě ovlivňuje náročnost dopravy stavebních prvků a manipulace s nimi. I normová pracnost při provádění stavby může být tímto parametrem značně 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.

Také se v rámci této analýzy podařilo prakticky ověřit provedení optimalizačního procesu dle sestaveného algoritmu přímo pro hodnocení stavebních tepelně izolačních materiálů. Jedná se o jednu z alternativních možností jeho využití v oblasti stavebnictví.

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_{sym} [%] 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 rámců 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 neoptimálnějším řešením konstrukčního návrhu.

Optimalizačními metodami vícekritériálního 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. Aplikací 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.

Seznam použité literatury

- [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.arasm.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>.
- [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.
- [22] European Aluminium Association. 2009 [cit. 2013-20-9] Dostupné na World Wide Web: <<http://www.alueurope.eu/>>
- [23] EHRENSTEIN, G. *Polymerní kompozitní materiály*. 1. vyd, Praha: Scientia, spol. s. r. o., 2009. 352 s. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [24] FIALA, P., JABLONSKÝ, J., MAŇAS, M. *Vícekritériální rozhodování*. Praha: VŠE, 1997. ISBN 80-7079-743-7.
- [25] FICKER, T. *Handbook of building thermal technology, acoustics and daylighting*. Brno: CERM, 2004. 266 s. ISBN 80-214-2670-5.
- [26] 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>.
- [27] HÁJEK, P. *Sborník z konference – Pasivní domy*. 1. vyd. Brno: Centrum pasivního domu, 2005. Udržitelná výstavba budov – východiska a principy, s. 290.
- [28] HAVALDA, A. *Kompozitné materiály*. 2. vyd. Bratislava: Vydavateľstvo STU, 1994. 196 s. ISBN 9788022700009.
- [29] HELA, R. *Přehled vlastností pohltivých protihlukových stěn na českém trhu*. *Stavebnictví*, 2010, roč. 10, č. 5, s. 57-65.
- [30] HORÁK, Z., KRUPKA, F. *Fyzika – Příručka pro vysoké školy technického směru, Svazek 1*. Praha: SNTL, 1976. 424 s. ISBN 04-011-76.

- [31] HUTTON, D. V. *Fundamentals of finite element analysis*. Boston: McGraw-Hill, 2004. ISBN 0-07-239536-2.
- [32] chemicals-technology.com. *QChemII*. 2011 [cit. 2011]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.chemicals-technology.com/projects/qchemii/qchemii1.html>>.
- [33] JABLONSKÝ, J., DLOUHÝ, M. *Modely hodnocení efektivnosti produkčních jednotek*. 1. vyd. Praha: Professional Publishing, 2004. 184 s. ISBN 80-86419-49-5.
- [34] 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>>.
- [35] KORVINY, P. *Teoretické základy vícekriteriálního rozhodování*. 2006 [cit. 2012-28-11]. Dostupné na World Wide Web: <http://korviny.cz/mca7/soubory/teorie_mca.pdf>.
- [36] MATĚJKA, L. *Progresivní konstrukční detaily obvodových plášťů s využitím druhotných surovin*. Brno: VUTIUM, 2013. 42 s. ISBN 978-80-214-4679-3.
- [37] 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.
- [38] MATĚJKA, L.; PĚNČÍK, J.; VUT v Brně: *Tepelně izolační kompozitní plast*. 20388, užitečný vzor. Praha (2009).
- [39] 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.
- [40] Ministerstvo obchodu a průmyslu ČR. Statistické údaje k 31.12.2008 k Surovinové politice v oblasti nerostných surovin a jejich zdrojů schválené usnesením vlády ČR č. 1311 ze dne 13.12.1999. 2008 [cit. 2011-21-11]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.mpo.cz/dokument6621.html>>.
- [41] MÜLLER, J. *Import 3D modelu v programu Ansys Workbench*. Juniorstav 2008 – Sborník anotací. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2008. 5 s. ISBN 978-80-86433-45-5.
- [42] PĚNČÍK, J.; MATĚJKA, L. *Design and Analysis of Insulation Blocks for Masonry Structures*. Civil, Structural and Environmental Engineering Computing. Madeira, Portugalsko: 2009. s. 230. ISBN: 978-1-905088-30- 0.

- [43] PYTLÍK, P. *Vlastnosti a užití stavebních výrobků*. Brno: VUTIUM, 1998. 399 s. ISBN 80-214-1123-6.
- [44] REKTORYS, K. *Variační metody v inženýrských problémech a v problémech matematické fyziky*. 2. vyd. Praha: Academia, 1999. 602 s. ISBN 80-200-0714-8.
- [45] SAATY, T. L. *The Analytic Hierarchy Process*. New York: McGraw Hill, 2008.
- [46] SMOLKA, R.; MATĚJKA, L. *Izolační prvek pod prahovou spojku dveří*. 34. Vedecká konference kateder a ústavov konštrukcií pozemných stavieb. Žilina: Miroslav Gibala, KNM, 2010. s. 35-38. ISBN: 978-80-970171-6- 3.
- [47] ŠÁLA, Jiří, et al. *Tepelná ochrana budov*. Praha: Informační centrum ČKAIT, 2006. 292 s. ISBN 978-80-87093-30-6.
- [48] ŠKOPÁN, M. *Analýza produkce recyklátů ze stavebních a demoličních odpadů a jejich využívání v návaznosti na regionální surovinovou politiku*. Studie ARSM pro MPO, říjen 2006.
- [49] VOJTĚCH, D. *Kovové materiály*. Praha: VŠCHT, 2006. 185 s. ISBN 80-7080-600-1.
- [50] Vyhláška č. 381/2001 Sb, kterou se stanoví katalog odpadů.
- [51] Wikipedie. *Polypropylen*. 31. 10. 2011 [cit. 2011-22-10]. Dostupné na World Wide Web: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Polypropylen>>.
- [52] WILSON, A. *Your Green Home: A Guide to Planning a Healthy, Environmentally Friendly New Home (Mother Earth News Wiser Living Series)*. Canada: New Society Publishers, 2006. 237 s. ISBN 978-0865715554.

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 konference 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. špeciál, s. 30-32. ISSN: 1336- 7617.
- [25] MATĚJKA, L.; MATĚJKA, L. *Analýza využití recyklovaného materiálu HDPE v konstrukci paty zdiva - eliminace tepleného mostu*. Budovy a prostředí 2010. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2010. s. 234-239. ISBN: 978-80-214-4155- 2.

Seznam použitých zkratk, symbolů a veličin

A1-6	varianty konstrukčního detailu atiky (přesný popis dle Tab. 9)
ACIS	standard pro grafický formát počítačových souborů
ASCII	standardizované kódování pro výměnu informací
B1-3	varianty konstrukčního detailu ukončení ploché střechy okapem (přesný popis dle Tab. 10)
C1-3	varianty konstrukčního detailu průniku vertikální nosné konstrukce konstrukcí ploché jednoplášňové střechy (přesný popis dle Tab. 11)
CAD	projektování podporované výpočetní technikou (computer-aided design)
CDA	metoda shody a neshody (Concordance Discordance Analysis)
DEA	metoda datových obalů (Data Envelopment Analysis)
KD	konstrukční detail
M1-3	materiálové varianty (přesný popis dle Tab. 58)
SAT	formát souboru pro geometrii výpočetních modelů podporovaný ACIS
TOPSIS	vícekritériální metoda (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution)
WSA	metoda váženého součtu (Weighted Sum Approach)

a	alternativa řešení (varianta)
C_{ai}	souhrnný index shody alternativy a_i
C_{aiaj}	index shody alternativy a_i s alternativou a_j
c_i	relevantní ukazatel vzdáleností variant od bazální varianty
D	bazální varianta
D_{ai}	souhrnný index neshody alternativy a_i
D_{aiaj}	index neshody alternativy a_i s alternativou a_j
d_i^+	vzdálenosti hodnocených variant od ideální varianty
d_i^-	vzdálenosti hodnocených variant od bazální varianty
$f_1 - f_6$	hodnotící faktory konstrukčních variant (přesný popis dle Tab. 23)
$f_{m1} - f_{m6}$	hodnotící faktory materiálových variant (přesný popis dle Tab. 58)
g_i	normalizovaný geometrický průměr řádků Saatyho matice
H	ideální varianta
I_S	index konzistence Saatyho matice

l_{max}	největší vlastní číslo matice stanovené pro Saatyho matici
R	normalizovaná kriteriální matice
r_{ij}	prvek normalizované kriteriální matice
R^2	koeficient determinace
$RMSE$	odmocnina ze střední kvadratické chyby
S	Saatyho matice
s_{ij}	prvek Saatyho matice
v	váhový vektor
v_{1f}	váhový vektor stanovený Fullerovou metodou, užitý pro pětifaktorovou analýzu
v_{2f}	váhový vektor stanovený Fullerovou metodou, užitý pro šestifaktorovou analýzu
v_{1s}	váhový vektor stanovený Saatyho metodou, užitý pro pětifaktorovou analýzu
v_{2s}	váhový vektor stanovený Saatyho metodou, užitý pro šestifaktorovou analýzu
v_{3f}	váhový vektor stanovený Fullerovou metodou, užitý k šestifaktorové analýze materiálů
W	vážená kriteriální matice
w_{ij}	prvek vážené kriteriální matice

b [m]	šířka konstrukce
c [%]	nasákavost
c [J/kgK]	měrná tepelná kapacita (kapitola 3.2.1)
C_{srm} [%]	koeficient hmotnostního podílu druhotných surovin
d [m]	tloušťka vrstvy v konstrukci
E_{vp} [kWh/a]	energie potřebná pro vyrovnání tepelných ztrát během období jednoho roku
f_{Rsi} [-]	teplotní faktor vnitřního povrchu
$f_{Rsi,cr}$ [-]	kritický teplotní faktor vnitřního povrchu
$f_{Rsi,N}$ [-]	normou požadovaný nejnižší teplotní faktor vnitřního povrchu
h [W/m ² K]	koeficient přestupu tepla
h_e [W/m ² K]	součinitel přestupu tepla na vnější straně konstrukce
h_i [W/m ² K]	součinitel přestupu tepla na vnitřní straně konstrukce

H_T [W/K]	měrná ztráta prostupem tepla
L [W/mK]	tepelná propustnost
m [kg]	hmotnost
m_1 [kg]	hmotnost vzorku po vysušení
m_2 [kg]	hmotnost vzorku po ponoření
p [W/m ³]	měrný dodávaný výkon
q [W/m ²]	hustota tepelného toku
R [m ² K/W]	tepelný odpor konstrukce
R_{se} [m ² K/W]	odpor při přestupu tepla na vnější straně konstrukce
R_{si} [m ² K/W]	odpor při přestupu tepla na vnitřní straně konstrukce
R_T [m ² K/W]	odpor konstrukce při prostupu tepla (z prostředí do prostředí)
t [s]	čas
T [°C]	teplota vnějšího povrchu tělesa (kapitola 3.1.2)
T [°C]	termodynamická teplota (kapitola 3.2.1)
T_{ext} [°C]	teplota okolního prostředí
U [W/m ² K]	součinitel prostupu tepla
U_{em} [W/m ² K]	průměrný součinitel prostupu tepla
θ_{ai} [°C]	návrhová teplota vnitřního vzduchu
θ_{ais} [°C]	střední teplota interiéru během topného období
θ_{aes} [°C]	střední teplota exteriéru během topného období
θ_e [°C]	návrhová teplota venkovního vzduchu
θ_{si} [°C]	vnitřní povrchová teplota konstrukce
λ [W/mK]	součinitel tepelné vodivosti
λ_{ev} [W/mK]	ekvivalentní součinitel tepelné vodivosti
μ [-]	faktor difúzního odporu
ρ [kg/m ³]	objemová hmotnost
σ [MPa]	pevnost v tlaku
φ_i [%]	návrhová relativní vlhkost vnitřního vzduchu v zimním období
$\varphi_{i,r}$ [%]	relativní vlhkost vnitřního vzduchu
$\varphi_{si,cr}$ [%]	kritická vnitřní povrchová vlhkost
Φ [W]	tepelný tok
χ [W/K]	bodový činitel prostupu tepla
ψ [W/mK]	lineární činitel prostupu tepla

Seznam obrázků

Obr. 1 - Typické fáze životního cyklu materiálu nebo výrobku (Charles George Ramsey © 2005).....	6
Obr. 2 - Blokové schéma fáze recyklace odpadů (převzato z http://www.arasm.cz)	6
Obr. 3 - Graf znázorňující vývoj hodnot součinitele prostupu tepla vybranými stavebními konstrukcemi podle požadavků postupně vydávaných a revidovaných ČSN v oblasti tepelné ochrany budov	9
Obr. 4 - Nejčastější varianty řešení eliminace tepelného mostu konstrukce střešní atiky tepelnou izolací (a, b, c, d)	13
Obr. 5 - Alternativní způsob řešení eliminace tepelného mostu s využitím pěnového skla.....	13
Obr. 6 - Obecný postup vícekritériálního hodnocení variant	16
Obr. 7 - Graf s výsledky měřené nasákavosti c [%].....	45
Obr. 8 - Vzorek č. 53 (nahore) bez porušené povrchové struktury a vzorek č. 44 (dole) s porušenou strukturou povrchu.....	46
Obr. 9 - Přehled pozorovaných hodnot s povrchovým poškozením a bez povrchového poškození.....	48
Obr. 10 - Předpokládaná závislost znázorněná pomocí konfidenční elipsy.....	49
Obr. 11 - Sestavení regresních modelů (lineární a polynomický 2. stupně)	50
Obr. 12 - Lineární regresní model s intervaly pro pásy spolehlivosti a predikce.....	51
Obr. 13 - Schéma rozmístění tepelně technických měřících čidel na stavební konstrukci	52
Obr. 14 - Schéma konstrukčního řešení B1 pomocí dřevěných prvků (a – trámy, b – OSB desky)	56
Obr. 15 - Schéma konstrukčního řešení B2 pomocí klempířského prvku U-tvaru a znázornění ohýbaného prvku s žebrovou výztuží (ozn. c).....	57
Obr. 16 - Schéma konstrukčního řešení B3 užitím tepelně izolačních bloků z kompozitního materiálu (ozn. d)	58
Obr. 17 - Vliv vertikální změny konstrukce přidáním tepelně izolačního materiálu ve variantách konstrukčních detailů A6.x a A5.x	61
Obr. 18 - Závislost minimální teploty vnitřního povrchu θ_{si} [°C] na součiniteli tepelné vodivosti λ [W/mK], uvedena také kritická hodnota minimální teploty vnitřního povrchu $\theta_{si,cr}$ (normový požadavek)	62
Obr. 19 - Závislost velikosti tepelného toku Φ [W] konstrukcí na součiniteli tepelné vodivosti λ [W/mK].....	63

Obr. 20 - Závislost veličiny lineárního činitele prostupu tepla ψ_e [W/mK] na velikosti součinitele tepelné vodivosti λ [W/mK] aplikovaného tepelně izolačního materiálu a vybraného konstrukčního řešení, uvedeny také normové hodnoty (požadovaná ψ_N , doporučená ψ_{rec} , doporučená pro pasivní budovy ψ_{pas})	64
Obr. 21 - 3D graf závislosti minimální vnitřní povrchové teploty θ_{si} [°C] na průběhu proměnných součinitele tepelné vodivosti λ [W/mK] a tloušťky d [mm] pro zkoumanou část tepelné izolace v konstrukci (varianta A6.2.x).....	65
Obr. 22 - 3D graf závislosti minimální vnitřní povrchové teploty θ_{si} [°C] na průběhu proměnných součinitele tepelné vodivosti λ [W/mK] a tloušťky d [mm] pro zkoumanou část tepelné izolace v konstrukci (varianta A5.2).....	66
Obr. 23 - Obrysový graf znázorňující teplotní hladiny na výpočtovém modelu konstrukce A6.2.x pro hodnotu vnitřní minimální povrchové teploty θ_{si} [°C].....	67
Obr. 24 - Obrysový graf znázorňující teplotní hladiny na výpočtovém modelu konstrukce A5.2 pro hodnotu vnitřní minimální povrchové teploty θ_{si} [°C].....	67
Obr. 25 - Plošný graf funkce f_1 pro regresní model popisující chování konstrukce atiky pro variantu A5.2	69
Obr. 26 - Plošný graf funkce f_2 regresního model popisující chování konstrukce atiky pro variantu A6.2.x	69
Obr. 27 - Průnik ploch funkcí pro modely A5.2 a A6.2.x.....	70
Obr. 28 - 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	71
Obr. 29 - Posouzení modelu A6.2.x na kritickou (minimální) vnitřní povrchovou teplotu $\theta_{si, N}$ [°C] (interval hodnot splňujících podmínky normy tvoří 81 % z celkového modelovaného intervalu).....	72
Obr. 30 - Měření č. 1 (14.12. 2012 - 15.12. 2012) konstrukce atiky přibližné konstrukční variantě A5.2	73
Obr. 31 - Měření č. 2 (25.1. 2013 - 26.1. 2013) konstrukce atiky přibližné konstrukční variantě A5.2	74
Obr. 32 - Komparace roční potřeby energie E_{vp} [kWh/a] pro vyrovnání tepelných ztrát prostupem tepla vybranými variantami konstrukčního detailu A (konstrukční detaily A6.c A6.e a A6.f patří do skupiny A6.2.x)	75
Obr. 33 - Analyzované modely stavebních detailů B1, B2 a B3 ve výpočetním programu Ansys 12.1	76

Obr. 34 - Ukázka výřezu ocelového rámu v 3D teplotním poli (varianta B2).....	77
Obr. 35 - Srovnání průběhu teplotního pole ve středovém vertikálním průřezu při odlišném přístupu k tepelně technickému opatření konstrukčního detailu C (varianty ozn. C1, C2)	78
Obr. 36 - Algoritmus procesu optimalizace aplikací multikriteriálních hodnotících metod....	80
Obr. 37 - Výsečový graf rozložení poměru vah hodnotících faktorů ve váhovém vektoru.....	87
Obr. 38 - Sloupcový graf vektorů vah pro hodnotící faktory z Fullerova schématu a Saatyho matice	89
Obr. 39 - Poměrné zastoupení hodnotících faktorů v sestavených váhových vektorech	89

Seznam tabulek

Tab. 1 - Produkce odpadů v roce 2009 podle Českého statistického ústavu.....	5
Tab. 2 - Úspory energie při využívání druhotných surovin – MPO 2005, Statistické údaje k 31. 12. 2008 k Surovinové politice v oblasti nerostných surovin a jejich zdrojů schválené usnesením vlády ČR č. 1311 ze dne 13. 12. 1999, Ministerstvo průmyslu a obchodu ČR, Praha 2005.....	7
Tab. 3 - Významné fyzikální vlastnosti tepelně izolačních materiálů (hodnoty převzaty od výrobců)	18
Tab. 4 - Významné fyzikální vlastnosti deskových materiálů pro opláštění (hodnoty převzaty od výrobců)	19
Tab. 5 - Schéma Fullerova trojúhelníku.....	37
Tab. 6 - Obecný předpis pro vstupní kriteriální matici	41
Tab. 7 - Určení nasákavosti c [%] u vybraných vzorků kompozitního materiálu.....	44
Tab. 8 - Přehled měřených vzorků s parametrem objemové hmotnosti a zavedené binární proměnné Povrchového poškození.....	47
Tab. 9 - Přehled konstrukčních variant stavebního detailu A a jejich označení	55
Tab. 10 - Přehled konstrukčních variant stavebního detailu B a jejich označení.....	56
Tab. 11 - Přehled konstrukčních variant stavebního detailu C a jejich označení.....	59
Tab. 12 - Vstupní tepelně technické parametry užitých materiálů a konstrukčních prvků (údaje převzaty od výrobců a z dílčích výsledků probíhajícího výzkumu kompozitního materiálu)	60
Tab. 13 - Přehled hodnot součinitele prostupu tepla U pro užití stavební konstrukce	61
Tab. 14 - Hodnoty koeficientů popisných funkcí modelů A5.2 a A6.2.x	68
Tab. 15 - Výsledky tepelně technické analýzy stavebních detailů B1, B2 a B3	77
Tab. 16 - Výsledky tepelně technické analýzy stavebních detailů C1, C2 a C3	78
Tab. 17 - Přehled vstupních hodnot minimální povrchové teploty θ_{si} [°C] pro metody multikriteriálních analýz	81
Tab. 18 - Přehled vstupních hodnot hmotnosti m [kg] pro metody multikriteriálních analýz .	82
Tab. 19 - Přehled ocenění konstrukčních detailů	83
Tab. 20 - Přehled normové pracnosti jednotlivých konstrukčních detailů v [Nh]	83
Tab. 21 - Přehled bezrozměrných hodnot popisujících ekologickou zátěž a environmentální dopady pro analyzované konstrukční detaily	84

Tab. 22 - Výstupy stanovení koeficientu podílu druhotných surovin C_{srm} [%] pro analyzované konstrukční detaily	85
Tab. 23 - Označení hodnotících kritérií pro optimalizační proces	85
Tab. 24 - Fullerův trojúhelník pro určení váhového vektoru v_{1f} a v_{2f} (významější kritéria jsou podtržena).....	86
Tab. 25 - Získaný vektor váh v_{1f} a v_{2f}	86
Tab. 26 - Upravený váhový vektor v_{1f} a v_{2f}	87
Tab. 27 - Saatyho matice s pěti hodnotícími faktory a ověřením její konzistence	88
Tab. 28 - Saatyho matice s šesti hodnotícími faktory a ověřením její konzistence	88
Tab. 29 - Váhové vektory v_{1s} a v_{2s} odvozené ze Saatyho matic	88
Tab. 30 - Výstupy multikriteriálních analýz konstrukčního detailu A zkoumající pouze varianty konstrukčního řešení	90
Tab. 31 - Vstupní data upravená do kriteriální matice	91
Tab. 32 - Převod minimalizačních kritérií na maximalizační	91
Tab. 33 - Sestavení ideální (H) a bazální (D) varianty.....	92
Tab. 34 - Normalizovaná matice	92
Tab. 35 - Sestavení pořadí variant dle hodnot užitku u	93
Tab. 36 - Normalizovaná kriteriální matice R	93
Tab. 37 - Vážená kriteriální matice W	94
Tab. 38 - Sestavení ideální (H) a bazální (D) varianty.....	94
Tab. 39 - Výpočet vzdálenosti variant od bazální a ideální varianty	94
Tab. 40 - Stanovení pořadí variant podle relativního ukazatele vzdálenosti od bazální varianty	95
Tab. 41 - Zavedení váhy kritérií do matice	96
Tab. 42 - Index shody C_{AB}	96
Tab. 43 - Celkový index shody	97
Tab. 44 - Čítec indexu neshody D_I	97
Tab. 45 - Index neshody D	98
Tab. 46 - Celkový index neshody D_i	98
Tab. 47 - Výsledek metody CDA	99
Tab. 48 - Celkové hodnocení ze všech optimalizačních metod	99
Tab. 49 - Výstupy multikriteriálních analýz s pěti hodnotícími faktory pro konstrukční detail A zkoumajících kombinace variant konstrukčního a materiálového řešení.....	100

Tab. 50 - Výstupy multikriteriálních analýz s šesti hodnotícími faktory pro konstrukční detail A zkoumajících kombinace variant konstrukčního a materiálového řešení.....	101
Tab. 51 - Výsledky analýzy datových obalů pro zjištění míry efektivity konstrukčních řešení stavebního detailu A.....	102
Tab. 52 - Diferenciace efektivních variant podle přehledu z výstupu metody superefektivnosti	102
Tab. 53 - Porovnání efektivity jednotlivých parametrů pro variantu konstrukčního detailu A6.2.c.....	103
Tab. 54 - Výstupy multikriteriálních analýz s pěti hodnotícími faktory pro konstrukční detail B zkoumajících kombinace variant konstrukčního a materiálového řešení.....	103
Tab. 55 - Výstupy multikriteriálních analýz s šesti hodnotícími faktory pro konstrukční detail B zkoumajících kombinace variant konstrukčního a materiálového řešení.....	104
Tab. 56 - Výstupy multikriteriálních analýz s pěti hodnotícími faktory pro konstrukční detail C zkoumajících kombinace variant konstrukčního a materiálového řešení.....	105
Tab. 57 - Výstupy multikriteriálních analýz s šesti hodnotícími faktory pro konstrukční detail C zkoumajících kombinace variant konstrukčního a materiálového řešení.....	105
Tab. 58 - Vstupní data pro provedení multikriteriální analýzy vybraných tepelně izolačních materiálů.....	106
Tab. 59 - Váhový vektor v_{3f}	107
Tab. 60 - Výstupy multikriteriální analýzy materiálových variant.....	107

Resumé

Optimization of structural details is an important process with many input factors. The choice of suitable building materials as well as construction solution and consistent comparison with their alternatives is essential.

The theoretical basis of the examined issues was elaborated by the research within the properties of several variants of selected structural details for flat single-leaf roofs were identified and compared in connection with ceramic hollow masonry units for single-layer wall increasing the vertical heat flow (thermal bridges in y-axis). The dissertation presents the current status at the possibilities of engineering designs for structural details. From such data bases the most suitable structural details were chosen by the optimization process and at the same time the conclusions were determined by the analysis. This information is useful not only for practical use but also for other scientific research.

Based on the studied methodology of multi-criteria decision analysis methods the innovative optimization algorithm was designed for reducing the risk due to the implementation of sub-optimal designs. The proposed procedure is not an absolute guideline for designing the structural details, because the application of the optimization process has a number of risk factors that may negatively affect this process. If such established procedure became part of an integrated engineering process, it could positively influence the end result of realized designs. In practical use, this would reduce costs and increase competitiveness.

Because the thesis also focuses on the application of progressive construction element based on secondary raw materials (thermal insulating block of the composite material), the optimization was performed in two environmental levels. The first level used only the environmental impact in the production of building components and at the second level the coefficient for secondary raw material mass fraction C_{srm} [%] was defined and implemented as an innovative evaluation factor.

The most diverse structural detail was the construction of flat roof parapet, which offers several different designs and material solutions. In the first instance was finding the best design solution. It has been verified that the method of elimination of thermal bridges in the variant, which allows the use of thermal insulation blocks from the developed composite

material based on secondary raw materials, is one of these optimal solution. Subsequent optimization was related directly to applied various thermal insulation materials in these structural details, where it was shown again that the use of thermal insulation of the composite material can achieve the optimal structural design.

Another optimization analysis examined the structural detail of gutter at flat roof without overhang of the roof cladding. It has been demonstrated that the construction of steel frames in this case is not among the suitable (optimum) variants. Wooden elements can still be used in modern buildings, but always with respect to compliance with the applicable technical standards required thermal protection for structural detail. If the timber element ceased to be sufficient, it was theoretically verified that the design can be replaced by the application of thermal insulation composite blocks.

Intersection of the flat roof and vertical supporting structure was the last examined structural detail. In this structural detail it has been proved that the optimal solution is application of thermal insulating material at the level of thermal insulation of the roof deck under the vertical load-bearing wall or pole design. Insulating block of composite material was evaluated as optimal building block.

Features of the proposed structural details were also compared with the thermal requirements of applicable technical standards. For technical practice, these new findings are beneficial information, which should have the effect of restricting the growing trend of compact implementation of external insulation systems. The mentioned systems provide very often excellent thermal insulation of the building envelope, although they may not always be the most optimal solution to the design.

In another level thermal insulation materials that have the same way of their application (built into the places exposed to high pressure loads), were evaluated and compared by the optimization methods of multi-criteria evaluation. Therefore, the dissertation thesis redefines some of the obstacles heading necessary adjustments of technical parameters to optimal value in the development of thermal insulation composite blocks.

Practical application of collected information can be found in designing building constructions with selection of a suitable building structural design and material solutions. In

the low-energy and passive constructions structural details become more important for thermal engineering. It is not enough to meet the elementary requirements of applicable technical standards to prevent any disturbances that might arise by insufficient execution. When applied appropriately selected construction materials in relation to optimally designed structural detail, it could be also saved large amount of energy, which is tied with the entire construction process from the beginning design of the object to its use and eventual demolition.

One of the aims of dissertation was to determine and verify the effectiveness of applying the new thermal insulation material on the basis of secondary raw materials, which is in development. This material has also been studied in terms of physical and material properties of water absorption. The results of experimental laboratory tests showed its good properties for application in the proposed construction details. Mathematical model of the association between water absorption and density was built to use it in production process. It was beneficial to add the physical parameters to the data file specification of developed composite material.

For subsequent scientific research it would be useful to experimentally verify other important physical and mechanical parameters of the studied material, which have not been verified so far and to build the multivariate regression model, which would easily allow an efficient set of production inputs as required during its subsequent application. It is evident that some of the material parameters cause opposite effects on the final product properties. It is therefore essential to constantly seek optimal values of the input parameters in relation with the production output to completely fulfill all requirements. From the field of building materials engineering it is mainly a property of thermal conductivity (eg. at different temperatures), thermal expansion, strength, fire resistance, the possibility of surface treatments, etc.

Correct use of recycled construction elements through the product life cycle must be economically profitable. It is becoming more essential part of the market system and at the same time it is a large part of the essence of sustainable development. The number and variability of recycled products on the market is increasing. To maintain this upward trend, it is necessary to streamline the recycling process. It is also important to properly explain all the information in order to dispel doubts of the general public which stem from lack of information and misinformation in this area.