

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice Habilitační a inaugurační spisy, sv. 732

ISSN 1213-418X

Ondřej Šikula

**TEPELNĚ AKTIVOVANÉ
STAVEBNÍ KONSTRUKCE**

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta stavební
Ústav technických zařízení budov
Ústav geotechniky

doc. Ing. Ondřej Šikula, Ph.D.

TEPELNĚ AKTIVOVANÉ STAVEBNÍ KONSTRUKCE

THERMALLY ACTIVATED BUILDING STRUCTURES

TEZE PŘEDNÁŠKY
K PROFESORSKÉMU JMENOVACÍMU ŘÍZENÍ
V OBORU
POZEMNÍ STAVBY



BRNO 2022

KLÍČOVÁ SLOVA

sálavé vytápění, sálavé chlazení, tepelná bariéra, tepelně aktivované základové konstrukce, nízkoteplotní vytápění, vysokoteplotní chlazení, volné chlazení, energetická efektivnost budov

KEYWORDS

radiant heating, radiant cooling, thermal barrier, thermally-activated foundation structures, low-temperature heating, high-temperature cooling, free cooling, energy performance of buildings

© Ondřej Šikula, 2022

ISBN 978-80-214-6086-7

ISSN 1213-418X

OBSAH

PŘEDSTAVENÍ AUTORA.....	4
1 ÚVOD	6
2 TEPELNĚ AKTIVOVANÉ KONSTRUKCE	6
2.1 Sálavé systémy vytápění a chlazení budov	6
2.2 Tepelná bariéra.....	9
2.3 Tepelně aktivované základové konstrukce	10
2.4 Počítačové modelování Tepelně aktivovaných konstrukcí	11
2.4.1 <i>Tepelně-technické působení</i>	11
2.4.2 <i>0D normativní model</i>	12
2.4.3 <i>1D model</i>	13
2.4.4 <i>2D a zjednodušený 3D model</i>	13
2.4.5 <i>3D model</i>	14
2.4.6 <i>Porovnání a zhodnocení metod</i>	15
3 KONCEPCE PROPOJENÍ SÁLAVÁCH SYSTÉMŮ S TEPELNĚ AKTIVOVANÝMI ZÁKLADY BUDOV	16
4 ZÁVĚR.....	18
5 POUŽITÉ ZKRATKY	19
6 POUŽITÁ LITERATURA.....	19
7 VYBRANÉ PUBLIKACE A APLIKOVANÉ VÝSLEDKY AUTORA	21
8 KONCEPCE TVŮRČÍ A PEDAGOGICKÉ ČINNOSTI.....	23
8.1 Tvůrčí činnost	23
8.2 Pedagogická činnost.....	24
9 ABSTRAKT.....	26
10 ABSTRACT	26

PŘEDSTAVENÍ AUTORA

Jméno a příjmení: Ondřej Šikula
Narozen: 22. 01. 1979 v Brně
Pracoviště: Ústav technických zařízení budov
Ústav geotechniky
Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně
Veveří 331/95, 60200 Brno
Telefon: + 420 541 147 923
Email: sikula.o@vutbr.cz



Vzdělání, pedagogické a vědecké hodnosti

- maturita 1997, SPŠ Stavební Kudelova Brno;
- Ing. 2002, VUT v Brně, Fakulta stavební, obor Stavební inženýrství;
- Ph.D. 2007, VUT v Brně, Fakulta stavební, obor Stavební inženýrství;
- doc. 2012, VUT v Brně, Fakulta stavební, obor Pozemní stavby.

Odborné zaměření

- Technika prostředí budov – vytápění, větrání, chlazení
- Počítačové modelování a simulace
- Energetická náročnost budov
- Obnovitelné zdroje energie

Zaměstnání, pracovní zařazení

- 2002 – 2003 Samostatný projektant. Domia art, s. r. o., Barvičova 4, 602 00 Brno;
- 2006 – dosud Pedagogicko-vědecký pracovník (asistent, odborný asistent, docent);
docent, VUT v Brně, Fakulta stavební, Ústav technických zařízení budov;
- 2011 – 2012 Juniorní výzkumný pracovník, VUT v Brně, Fakulta stavební, AdMaS;
- 2017 – 2020 Seniorní výzkumný pracovník, VUT v Brně, Fakulta stavební, AdMaS;
- 2020 – dosud Technik, vedení projektů, VUT v Brně, Fakulta stavební, ÚGTN.

Další odborná praxe

- 2003 – 2004 Projektant vzduchotechniky, vytápění a chlazení, Luftprojekt s.r.o. Brno;
- 2006 – dosud Aplikovaný výzkum v oblasti technických zařízení budov, Subtech s.r.o. Brno.

Studijní, vědecko-výzkumné a pedagogické stáže

- VUT v Brně, Fakulta strojní, Energetický ústav, Odbor termomechaniky a techniky prostředí, 2004 – 2007, školitel specialista doc. dr. Ing. Michal Jaroš.
- Austria. TU Vienna, Faculty of mechanical engineering, Institute for Energy Systems and Thermodynamics. Doktorská stáž: 2005-2006, školitel spec. A.o. Prof. Ing. Dr. Karl Ponweiser.
- Austria. University of Applied Sciences Burgenland. Stáže: 1x 2017, 1x 2018., spolupráce s Prof. (FH) DI(FH) Dr. Christian Heschl.
- Austria. TU Vienna. Department of Building Physics and Building Ecology. Týdenní stáže: 2x 2016, 1x 2017, 2x 2018, 2x 2019. spolupráce s Univ. Prof. DI Dr. Ardeshtir Mahdavi.
- Hungary. Budapest University of Technology nad Economics, Department of Building Services and Process Engineering. Stáže: 2019, 2021. Spolupráce s Assoc. Prof. Dr. Csoknyai Tamás PhD.
- Italy. Free University of Bozen-Bolzano, Faculty of Science and Technology. Stáže: 1x 2018, 1x 2019. spolupráce s Prof. Dr. MSc. Andrea Gasparella.


Zodpovědný řešitel projektů

- TAČR - Optimalizace energopilot pro využití energie země. TN01000056/06. 2019.
- MPO - Kvantifikace úspor energie při vytápění otopným tělesem Tomton R1 oproti stávajícím otopným tělesům. CZ.01.1.02/0.0/0.0/17_115/0011101. 2017-2018. operační programy EU.
- Znalecký posudek ZP 47/2020 - Posouzení vzduchotechniky určené pro tvorbu klimatu souboru pláten Slovanská epopej. Moravský Krumlov. HS1220N1012. 2020.
- Znalecký posudek ZP 102/2020 - Posouzení systému chlazení ledové plochy. Újezd u Brna. HS1220N1051. 2020.
- Smluvní výzkum - Větrání a odvlhčování vodojemů. SmVaK a.s. SR12957189L. 2019.
- Smluvní výzkum - Optimalizační simulace prototypu sušárny dřeva. MZLU. SR12957183L. 2019.
- Smluvní výzkum - Výzkum efektivnosti elektrických sálavých panelů. NAMI-Tech s.r.o. SR12857011L. 2018.
- Smluvní výzkum - Smluvní výzkum - Optimalizace mikroklimatu Janáčkova kulturního centra - část koncertní sál. Subtech s.r.o SR122057006. 2020/2021.
- 2x Specifický výzkum - FAST-S-16-3387, FAST-S-11-1.
- CEEPUS: CIII-SK-0405-12-2021, Renewable energy sources. kontaktní osoba.

Spolurešitel projektů

- MPO - IEA – ANNEX 50 – Prefabricated Systems for Low Energy Renovation of Residential Buildings. 2A-1TP1/119. 2007.
- GAČR - Klimaticky adaptivní prvky integrované ve vývoji energeticky a ekologicky efektivní obálky budovy. 20-00630S. 2020.
- TAČR - Získání a využití tepelné energie z odpadní vody v kombinaci s využitím vyčištěné vody. TJ02000190. 2019.
- GAČR - Compatibility of plastics and metals with latent heat storage media for integration in buildings. 19-20943S. 2019.
- MŠMT - Energy efficiency and indoor environment of nearly zero energy buildings. 8X17030. 2017.

Publikační činnost a její dopad

- 250+ publikací;
 - 32 publikací v databázi Web of Science;
 - 14 článků v časopise s Impakt faktorem – 6x D1_{AIS}, 10x Q1_{AIS}, 1x Q2_{AIS}, 3x Q3_{AIS}, 0x Q4_{AIS};
 - 131 citací jiným autorem dle Science Citation Index bez autocitací, h-index: 7 (k 20. 6. 2022);
- RESEARCHER ID: [J-4390-2012](#), SCOPUS ID: [55053563200](#);  [0000-0002-7661-0732](#).

Výsledky aplikovaného výzkumu

- původce a spolupůvodce 2 zahraničních patentů;
- původce a spolupůvodce 4 užitečných vzorů;
- autor a spoluautor 4 autorizovaných softwarů.

Pedagogická činnost

- Vedení obhájené disertační práce jako školitel – 3x VUT v Brně.
- Vedení obhájené disertační práce jako školitel specialista – 6x STU Bratislava, 2x TU Košice.
- Vedení obhájené diplomové práce - 32x, bakalářské práce - 25x.

Ocenění

- Úspěšný ohlašovatel vynálezu na VUT v Brně 2014.
- 2. místo v technologické kategorii TOP 10 VUT v Brně 2019.
- 4. místo „TOP 10 publikací v impaktovaných časopisech v roce 2020“, FAST VUT v Brně.

1 ÚVOD

V pedagogické a tvůrčí oblasti se autor dlouhodobě věnuje technice prostředí budov, zejména pak systémům vytápění, větrání a chlazení, jejichž cílem je utvářet požadované vnitřní prostředí budov při minimalizaci dopadu na životní prostředí. Krom metod experimentálních využívá a rozvíjí v těchto činnostech zejména metody počítačového modelování a simulací přenosu tepla a látky v budovách a soustavách technických zařízení budov.

Výzkum v oblasti techniky prostředí napomáhá hledání vhodných odpovědí na aktuální společenské výzvy, mezi které patří požadavek na trvale udržitelný rozvoj lidské společnosti. Trvale udržitelný rozvoj zahrnuje mimo jiné i ochranu ovzduší definovaný Pařížskou klimatickou dohodou a snižování energetická náročnost budov, která je součástí plánu Evropské komise – The European Green Deal. Vysoce aktuální je v současnosti také potřeba energetické bezpečnosti našeho regionu, která nás, krom jiného, motivuje jednak snižovat energetickou náročnost budov zvyšováním jejich energetické efektivity, ale také aplikovat v maximální míře místní obnovitelné zdroje.

Jedna z perspektivních cest pro dílčí řešení výše nastíněných společenských výzev spočívá ve využití tepelně aktivovaných stavebních konstrukcí budov jakožto systémů pro jejich nízkopotenciální vytápění a chlazení ve vazbě na tepelně aktivované základové stavební konstrukce umožňující využívání místní obnovitelné energie podzákladí budov.

2 TEPELNĚ AKTIVOVANÉ KONSTRUKCE

Tepelně aktivované konstrukce (dále zkráceně TAK) jsou stavební konstrukce vybavené typicky kapalinovým okruhem, nebo elektrickým odporovým kabelem. Zdrojem tepla, či chladu tepelně pak tuto konstrukci aktivujeme – tedy zvyšuje, či snižujeme její teplotu za účelem sdílení tepla s jejím okolím.

TAK se nejčastěji aplikují ve formě velkoplošných sálavých systémů využívaných pro vytápění a chlazení budov, nebo tepelných bariér určených pro minimalizaci ztrát tepla, či chladu budovy, nebo konečně tepelně aktivovaných základových konstrukcí určených pro jímání tepla a chladu podzákladí budov. Další oblastí využití TAK v exteriéru je možné například pro odmrazování pozemních komunikací, či mostních konstrukcí v zimním období roku.

2.1 SÁLAVÉ SYSTÉMY VYTÁPĚNÍ A CHLAZENÍ BUDOV

Sálavé systémy slouží k nízkoteplotnímu vytápění a vysokoteplotnímu chlazení budov. Jejich tepelný výkon je realizován převážně tepelným sáláním povrchů, které mají obvykle větší plochu a lze je proto označit též jako velkoplošné sálavé systémy. Sálavé systémy lze rozčlenit podle různých hledisek. Podle účelu je lze rozdělit na otopné, chladicí a kombinované. Podle umístění v prostoru rozlišujeme systémy horizontální (podlahové, či stropní), vertikální (stěnové) a atypické (integrováné v jiných konstrukcích, či kombinace předchozích možností). Vzhledem k vazbě sálavých systémů ke stavební konstrukci rozlišujeme systémy zabudované, zavěšené, nebo předsazené. Konečně podle technologie provedení rozeznáváme způsob mokrý a suchý [26], [A10].

Tepelné sálení obvykle tvoří více než 50 % výměny tepla s okolním prostředím [34], [37], [A10]. Sálavé systémy mají několik vlastností, díky nimž mohou být vhodnější než jiné technologie vytápění a chlazení budov. Sálavé systémy jsou schopny vytvořit tepelný komfort prostředí při snížené energetické náročnosti [5]. Relativně malý teplotní rozdíl mezi teplotou interiéru a cirkulující otopnou, nebo chladicí kapalinou zlepšuje účinnost zdrojů energie a umožňuje využít alternativních zdrojů chladu, jako je energie slunce, průmyslové odpadní teplo, okolní vzduch, nebo stávající přírodní vodu ve vrtech, jezerech a řekách [6], [7]. Kromě toho mohou sálavé systémy snížit požadavky na špičkové tepelné výkony zdrojů tepla a chladu [8], [9]. Částečnou nevýhodou sálavých systémů je obvykle velká doba odezvy jejich výkonu na změnu teploty kapalinového

okruhu, která se může pohybovat i v řádu několika hodin, [10] a může tak vyžadovat pokročilé řídicí strategie pro udržení podmínek tepelného komfortu [7].

Několik studií, založených převážně na počítačových simulacích, uvádí lepší energetickou účinnost sálavých systémů ve srovnání s výhradně vzduchovými systémy v různých klimatických podmínkách, [2]. Počítačové simulace a experimenty také ukazují vyšší špičkový výkon chlazení ve srovnání se vzduchovými systémy [12], který může být až o 85 % vyšší u podlahového systému, než u vzduchového systému v zónách se slunečním zatížením [12]. Sálavé systémy také vytváří v budovách teplotně homogennější prostředí, včetně menších vertikálních změn teploty v místnosti a nízkého rizika průvanu [11], [13], [14]. Několik studií ukazuje, že v některých případech je výhodné kombinovat sálavé a vzduchové systémy, aby se dosáhlo příznivějšího výkonu, než pouze sálavým nebo vzduchovým systémem [15]. Vzduchový systém chlazení pak v tomto případě umožňuje i potřebný odvod vlhkostní zátěže a tím i lepší kontrolu rizika kondenzace vlhkosti na sálavém povrchu.

Dimenzování a využití sálavého otopného nebo chladicího systému se odvíjí od jeho umístění na podlaze, stěně nebo stropě. Tradičně býval výzkum v této oblasti zaměřen na podlahové a stropní systémy [16], přičemž podlaha byla historicky nejtypičtějším zkoumaným a používaným sálavým systémem [17], [18]. S přibývajícím výzkumem v této oblasti roste množství důkazů o tom, že sálavé stěnové systémy představují proveditelné řešení vytápění a chlazení, které lze v některých případech upřednostnit před systémy podlahovými a stropními. Pozorované výhody stěnových systémů jsou následující:

- Výrazně větší vhodnost pro rekonstrukci budov. Na rozdíl od podlahových a stropních systémů dodatečná instalace systému sálavých stěn nesnižuje světlou výšku podlaží. Nevyžaduje také podstatné změny ve stávajících konstrukcích. Ve velmi specifických případech lze dokonce sálavé systémy umístit na vnější stranu stěny, např. ve formě panelů [A5], [24], [25].

- Variabilita tepelné odezvy a akumulace. Podlahy obvykle obsahují roznášecí vrstvu, která zvyšuje tepelnou hmotu a prodlužuje tepelnou odezvu. Konstrukci stěn a stropů lze snadno variovat v rozmezí systémů TABS (termoaktivní stavební systémy) vykazující pomalou odezvu a vysokou akumulaci až po panely oddělené od tepelného jádra, které vykazují rychlou odezvu a nízkou akumulaci [A5], [A3], [26].

- Vyšší topný a chladicí výkon. Stěny mají vyšší chladicí výkon ($\sim 70 \text{ W/m}^2$) než podlahy ($\sim 40 \text{ W/m}^2$), i když nižší než chladicí stropy ($\sim 100 \text{ W/m}^2$). Jejich topný výkon ($\sim 160 \text{ W/m}^2$) je vyšší než u podlah ($\sim 100 \text{ W/m}^2$) a stropů ($\sim 50 \text{ W/m}^2$) [26].

- Snadná instalace a nižší náklady a to zejména u systémů, které lze instalovat, např. připevněním otopných desek na stěnu nebo zapuštěním trubek do vnitřní omítky. U podlah je stavební technologie obvykle složitější kvůli roznášecí vrstvě a proto, že podlahy musí snášet zátěž, jako jsou obyvatelé a nábytek. Stropy nejsou v přímém dosahu montéra, což ztěžuje instalaci. Tyto skutečnosti mohou vést k nižším pořizovacím nákladům na stěny než na podlahy a stropy [A5].

- Stěny mohou být potenciálně provozovány jako takzvané tepelné bariéry pro snížení zatížení vytápěním a chlazením. Toho je dosaženo řízením teploty vody na hodnotu, která nevede k vytápění nebo chlazení prostoru, ale pouze snižuje vstup tepla stěnou [A2], [27], [28], [29], [30], [31], [32].

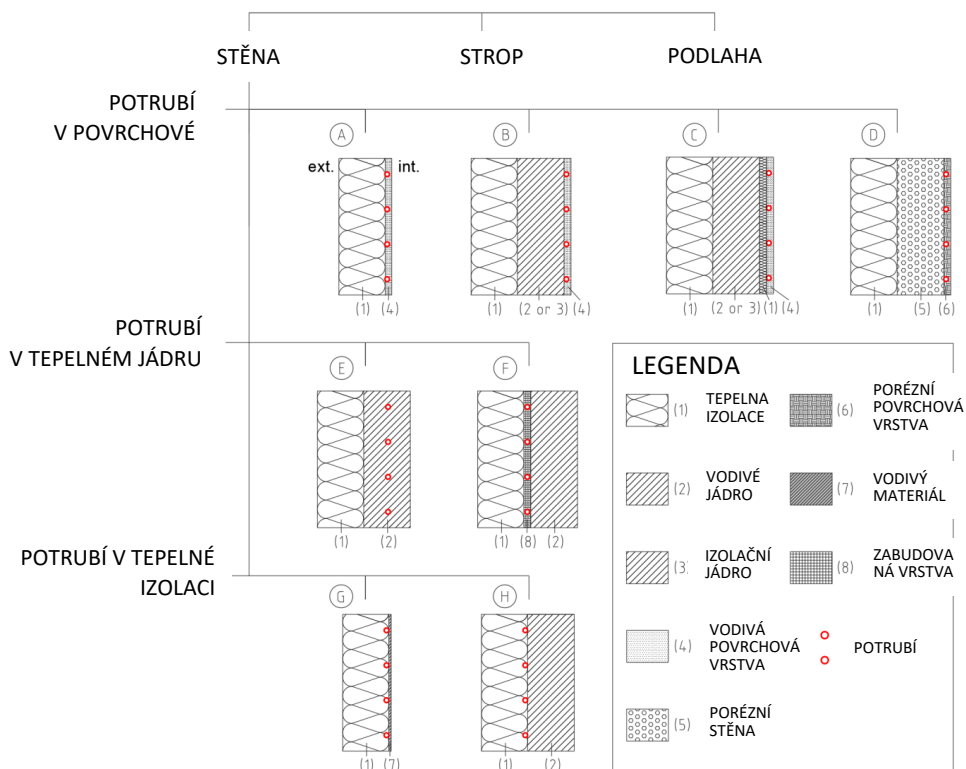
Pozorované nevýhody stěnových systémů jsou pak následující:

- Nižší úhlový faktor mezi osobou a sálavým povrchem než u podlah a stropů, což omezuje přenos tepla sáláním mezi povrchem stěny a osobou [3][33].

- Možné poškození potrubí v případě zásahu do stěny - týká se to systémů s trubkami na vnitřní straně stěny [A5].

- Nedostatečná instalační plocha zejména v případě, že jsou stěny zakryté např. nábytkem, či jinými překážkami, které by bránily přenosu tepla mezi stěnou a místností [36].

Sálavé systémy lze rozdělit na sálavé stropní panely, vestavěné povrchové systémy a termoaktivní stavební systémy (TABS) [26]. Kromě toho ISO 11855 [35] klasifikuje vestavěné systémy a TABS do sedmi typů A až G. Systémy vytápění a chlazení stěn lze rozdělit do tří kategorií podle umístění trubek do vnitřní či vnější povrchové vrstvy, tepelného jádra konstrukce, nebo tepelné izolace. Obecně platí, že otopné a chladicí systémy s trubkami v blízkosti vnitřního povrchu stěny jsou vhodné pro zajištění relativně rychlé tepelné odezvy. To je také případ systému G s trubkou připojenou k vodivé desce, přestože jsou trubky v tepelné izolaci. Systémy s trubkami zapuštěnými hlouběji do tepelného jádra jsou vhodné zejména pro akumulaci tepla. Systém H s trubkami v tepelné izolaci spojenými s vodivým tepelným jádrem má tendenci být méně účinný z hlediska přenosu tepla mezi trubkami a interiérem. Může však být vhodný při renovaci, kdy zásah na vnitřní povrch stěny není možný nebo žádoucí. Přehled stěnových systémů dává Obrázek 1.



Obrázek 1. Klasifikace stěnových vodních systémů vytápění a chlazení [A1]

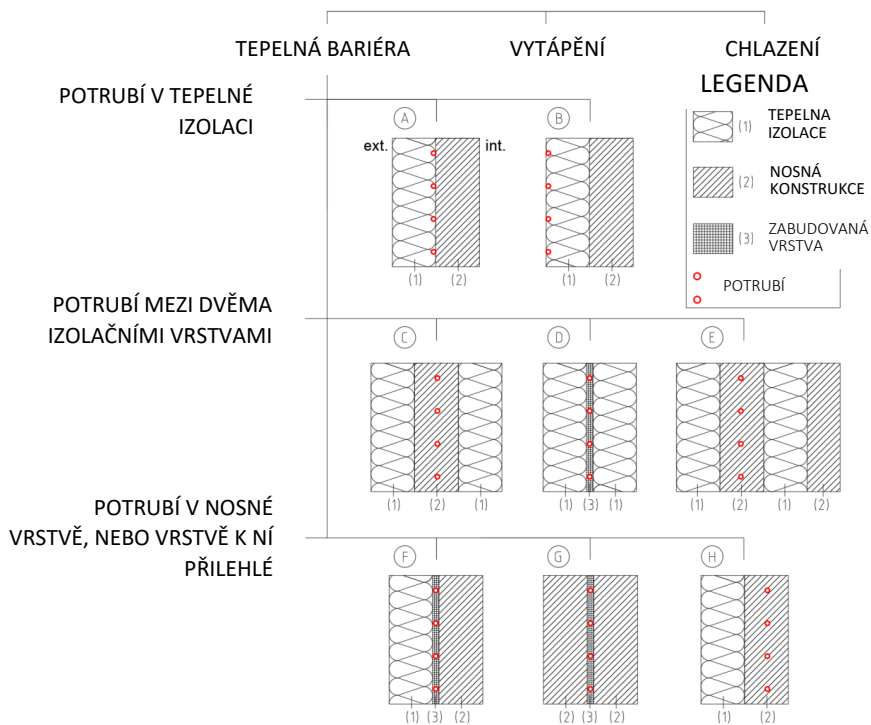
Porovnáním využitelnosti šesti sálavých podlahových, stěnových a stropních systémů vidíme, že nejlepší efektivitu vykazují sálavé systémy s trubkami připojenými ke stávající konstrukci z tepelně izolačního materiálu [A5]. Stěnové systémy s trubkami připojenými k izolačnímu jádru s trubkami v sádkartonu oddělenými od jádra vzduchovou mezerou vykazují dobré vlastnosti z hlediska provozních nákladů, tepelného výkonu, regulovatelnosti a použitelnosti při rekonstrukci budovy.

Celkově výzkumy potvrzují, že systémy sálavých stěn v kombinaci s nízopotenciálními zdroji energie mohou představovat nákladově efektivní a ekologická řešení vytápění, pokud jsou správně navrženy a aplikovány.

2.2 TEPELNÁ BARIÉRA

Teplná bariéra (TB) označuje technologii zahrnující potrubní systém umístěný v neprůsvitné konstrukci obvodového pláště budovy, ve kterém cirkuluje kapalina dodávaná obvykle z nízkopotenciálního obnovitelného zdroje energie [32], [38]. Teplota této kapaliny je blíže interiérové teplotě budovy než teplota exteriéru, čímž se omezují tepelné ztráty v otopném období a absorbují se vnější tepelné zisky v období chladicím. Tato technologie je též někdy označována jako aktivní tepelné izolace [32], energetická bariéra [38], nebo teplotní bariéra [38].

Neexistuje žádná normativně daná klasifikace TB a tak je lze rozdělit například s využitím zobecnění konfigurací jejich materiálových vrstev a umístění potrubí na tři systémy: (1) trubky v tepelné izolaci, (2) trubky mezi dvěma izolačními vrstvami a (3) trubky v nosné konstrukci, nebo vložené vrstvě spojené s nosnou konstrukcí. Konfigurace materiálových vrstev a umístění potrubí systémů A, D a E, které uvádí Obrázek 2, odpovídá konfiguraci vrstev a umístění potrubí patentovaných konstrukcí [38].



Obrázek 2. Klasifikace tepelných bariér [A1]

Primárním cílem TB je snížení tepelných ztrát v zimě a tepelných zisků v létě, ale za určitých okolností může stěnový systém fungovat i jako vytápění nebo chlazení. To bylo prokázáno ve studiích, které zvažovaly provoz stěnového systému ve více než jednom režimu, jako je TB a vytápění [27], TB a chlazení [29], nebo TB, vytápění a chlazení [28]. TB lze podpořit konvenčním systémem mechanické ventilace s rekuperací tepla pro udržení požadované úrovně tepelné pohody.

2.3 TEPELNĚ AKTIVOVANÉ ZÁKLADOVÉ KONSTRUKCE

Tepeelně aktivovanými základovými konstrukcemi jsou obecně míněny všechny základové konstrukce určené pro jímání energie okolní základové zeminy. Vybavením základových pilot potrubím s kapalinovým okruhem umožňuje za malých nákladů využívat výhodnou a časově poměrně stálou teplotu zeminy a v kombinaci s tepelným čerpadlem, nebo i bez něj, dosahovat vysokých topných a chladicích faktorů v porovnání s jinými zdroji energie. Energetickou výtěžnost a ekonomickou efektivnost pro dané základové podmínky je třeba navrhnout a posoudit individuálně ve vazbě na typ budovy a způsob jejího provozování [A11][A12][A13][A14][A15].

Návrh a řízení takového systému vyžaduje holistický přístup. Zásadní je postihnout dynamickou interakci mezi všemi komponentami – země, systém vytápění, chlazení a ventilace, budova, uživatelé, řízení a provozování, což vede k širokému rozsahu časových měřítek, které je třeba za pomoci simulací vzít v úvahu. Důležitý je návrh řídicího systému i monitorování a uvádění do provozu. Efektivní řízení musí plnit několik cílů: zajistit tepelný komfort při minimálních nákladech, a také dlouhodobě udržitelné využívání energie půdy. Řízení tak musí být ideálně prediktivní, aby bylo dobře schopné čelit vyvolaným výzvám. [46].

Energopilota (EP) - tepelně aktivovaná pilota - je vertikální základová konstrukce pod nosným sloupem skeletového nosného systému budovy, ve které je umístěn kapalinový výměník tepla, jímž dochází k předávání tepla mezi zeminou a teplotonosnou látkou. Hlavní výhodou EP, oproti tepelným vrtům, jsou podstatně nižší náklady na instalaci a mírně vyšší výkon na metr délky. Naopak hlavní nevýhodou je, v důsledku menších délek EP než tepelných vrtů, jejich menší celkový výkon.

Hlavní proměnné, které ovlivňují tepelný výkon EP:

- látkové vlastnosti zeminy, železobetonu, potrubí, teplotonosné látky;
- rozměry EP;
- vzdálenost mezi pilotami;
- konfigurace potrubí v EP;
- okrajové podmínky (teplota zeminy, venkovní klima).

Půdorysné rozmístění základových pilot vychází ze statických výpočtů a je tedy velmi časté, že u pilot dochází k tepelnému ovlivňování mezi sousedními pilotami. Při nevyrovnané energetické bilanci odebírání a ukládání tepla EP do země dochází k výraznému snížení výkonu (chladicího, nebo otopného) v dlouhodobém měřítku. Významně ovlivnit tepelný výkon EP může také tepelná ztráta podlahou na styku s podzákladím. Existuje několik základních konfigurací potrubí v EP:

- U-trubka;
- dvojitá U-trubka;
- multi U-trubka;
- W-trubka;
- nepřímý dvojitá trubka;
- spirála.

Výkon je závislý hlavně na ploše potrubí v pilotě, nejvyšší výkon je proto dosahován u potrubí vinutého do spirály. Obecně existuje několik způsobů modelování tepelných dějů probíhajících v EP - analytickými, numerickými, hybridními, či kybernetickými modely. Analytické modely obsahují řadu zjednodušení, díky nimž se výrazně snižuje jejich výpočetní náročnost [45]. Oproti tomu numerické modely dokáží poměrně lépe simulovat komplexnější geometrie a fyzikální procesy odehrávající se v pilotě a okolní zemině. Numerické modely jsou obecně výpočetně podstatně náročnější než modely analytické. Z hlediska výpočetní přesnosti a náročnosti se jako optimální jeví modely hybridní, či náhradní (kybernetické), které umožňují efektivní propojení s výpočetním modelem budovy, systémů technických zařízení budov (TZB) a způsobu jejího užívání.

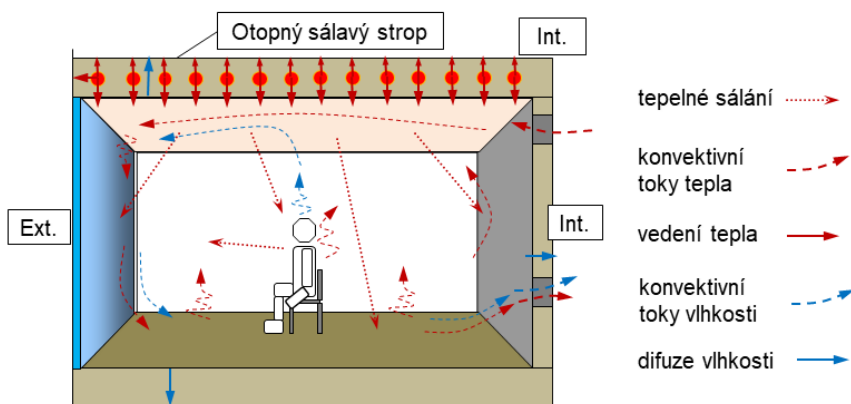
Výpočetní modely lze klasifikovat podle toho, zda využíváme analytické, numerické nebo hybridní přístupy. Modely vykazují jemné odlišnosti v závislosti na počtu modelovaných dimenzí (2D/3D), počtu modelovaných výměníků, uvažování/neuvažování heterogenních tepelných vlastností, způsobu reprezentace potrubí a základové konstrukce a způsob modelování cirkulující teplotně kapalniny. Obecně jsou 3D numerické modely výpočetně náročné a tak jsou běžně při návrhu zemního výměníku používány modely 2D, 1D analytické, nebo hybridní [47], [A13]. Koncepce propojení sálavých systémů s tepelně aktivovanými základovými konstrukcemi je uvedena v kapitole 3.

2.4 POČÍTAČOVÉ MODELOVÁNÍ TEPELNĚ AKTIVOVANÝCH KONSTRUKCÍ

Existuje široká škála počítačových modelů tepelně aktivovaných konstrukcí vycházející z jejich různorodosti a účelu využití. Následující popis je zaměřen jen na modely sálavých velkoplošných systémů vytápění a chlazení budov. Tyto je možné vytvářet na různém stupni podrobnosti a tedy i různé přesnosti a výpočetní náročnosti. Předpokladem pro analýzu tepelného chování je znalost toků tepla a látky v budově, které případně spolu s vhodným modelem tepelného komfortu umožní návrh, posouzení, optimalizaci a řízení TAK [A10].

2.4.1 Tepelně-technické působení

Při tvorbě tepelně-vlhkostního mikroklimatu sálavými systémy v kombinaci s nuceným větráním vystupují do popředí mechanismy sdílení tepla vedením, prouděním a sáláním spolu s vývinem a přenosem vlhkosti v řešeném prostoru [1] – jak to prezentuje Obrázek 3.



Obrázek 3. Tepelně-technické působení otopného sálavého stropu [A10]

Z experimentů je patrné, že tepelný výkon TA konstrukce se do místnosti přenáší konvekcí a tepelným sáláním. Konvekce je zde typicky volná (přirozená), která nastává v důsledku působení vztlačkových sil způsobených především nerovnoměrným ohřátím vnitřního vzduchu v místnosti. Dále zde také působí konvekce nucená, která je vyvolána nuceným přívodem a odvodem větracího vzduchu. Význam nucené a přirozené konvekce se mění především v závislosti na tom, jaké množství větracího vzduchu je přiváděno a jak je tento vzduch v prostoru distribuován. Vzhledem ke snaze přivádět pouze minimální množství vzduchu tak, aby bylo upravováno pouze toxické a vlhkostní mikroklima a přenechání tvorby tepelného komfortu na velkoplošných systémech, převládá ve většině případů konvekce přirozená. Zejména u vertikálních TA ploch jako jsou stěnové systémy, nebo také u velkých prosklených ploch v místnosti, dochází vlivem přirozené konvekce k významnému proudění vzduchu, které pak na další povrchy místnosti působí obdobně

jako konvekce nucená. Přirozené a nucené konvekční mechanismy jsou tímto propojené a je třeba je takto uvažovat a vhodně matematicko-fyzikálně modelovat. Existence těchto konvekčních proudů vzduchu může být lidmi pocíťovaná jako konvekční diskomfort – průvan [A10].

Většinu tepelného výkonu však předávají TA konstrukce do místnosti tepelným sáláním, které působí jak přímo na osoby v této místnosti, tak nepřímo. Nepřímé působení spočívá v osálení ostatních povrchů TA konstrukcí, čímž dojde k akumulaci tepla a následnému přenosu do místnosti konvekcí. Jelikož tepelný tok sáláním se šíří přímočaře, dochází k přímému přenosu tepla sáláním v drtivé většině jen s těmi konstrukcemi, které mají s povrchem TA konstrukce přímou viditelnost. V důsledku toho pak vznikají v geometricky složitějších místnostech radiační stíny, tedy oblasti s nižší (odcloněnou) sálavou složkou, ve kterých pak lidé mohou pocíťovat určitý tepelný diskomfort.

Při snaze o co nejdělejší popis výše uvedených jevů nabývají teoretické modely na rozsahu, složitosti a výpočetní náročnosti. Tyto úrovně modelů jsou typicky řešitelné metodou počítačového modelování dynamiky tekutin (CFD).

Obecně je nutné každý jev modelovat adekvátními modely, které musí postihnout nejdůležitější faktory a zanedbat, či potlačit ty nevýznamné, nebo méně významné. Z toho hlediska mají význam a jsou v některých případech dobře použitelné a dostatečně přesné jednodušší modely – dále označované jako 0D, 1D, 2D a 3Ds, které jsou založeny na zjednodušujících předpokladech a méně rozměrném sdílení tepla. Přijatá zjednodušení spočívají typicky na předpokladu rovnoměrné teploty interiéru, redukci kombinovaného přenosu tepla všemi mechanismy pouze na vedení tepla s jeho přestupem do interiéru a případně pak zanedbání tepelných toků ve směrech, ve kterých jsou méně významné.

Zvláštní skupinou jsou v tomto ohledu modely 0D (náhradní, kybernetické), které jsou založeny na matematických modelech, které nepoužívají fyzikální zákony – tedy počet fyzikálně podložených rovnic je roven nule. Do této kategorie patří například modely založené na metodách regresních, strojového učení, umělé inteligence a podobně. Následuje stručný přehled jednotlivých modelů, jejich porovnání a zhodnocení.

2.4.2 0D normativní model

V praxi se z tohoto ranku modelů využívá nejčastěji zjednodušený model dle normy EN 1264-2 [43]. Model je založen na regresních rovnicích, ve kterých jsou jednotlivé součinitele a exponenty definovány dalšími funkcemi či tabulkami, ve kterých je mezilehlé hodnoty nutné interpolovat kubickým splinem. Výpočet měrného výkonu q [$W \cdot m^{-2}$] je dán rovnicí (2-1).

$$q = K_H \cdot \Delta t_H^n \quad (2-1)$$

$$K_H = B \cdot a_B \cdot a_T^{m_T} \cdot a_U^{m_U} \cdot a_D^{m_D}$$

kde K_H – ekvivalentní součinitel prostupu tepla dle [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]

Δt_H – charakteristický logaritmický rozdíl teplot [K]

n – teplotní exponent nabývající hodnot 1,0 až 1,05 [-]

Tento výpočetní model je omezen jen na tři základní konstrukční typy sálavých konstrukcí a neumožňuje výpočet konstrukcí jiných, nebo tvarově, či z hlediska nesymetrie okrajových podmínek, atypických TAK [43]. Dále tento normový model není schopen postihnout nestacionární tepelné chování a neposkytuje též informaci o rozložení povrchových teplot na sálavém povrchu konstrukce, čímž neumožňuje posouzení rizika kondenzace vzdušné vlhkosti při jeho chladicí funkci.

2.4.3 1D model

Nejjednodušší z modelů vycházejících z fyzikálního zákona vedení tepla je model založený na teorii 1D vedení tepla v tyči/žeburu, upravenou pro praktické použití ve vytápěcí technice. V tomto modelu se roznášecí vrstva mezi potrubími považuje za tyč, ve které je (v případě vytápění) teplo vedeno nejprve horizontálně, a následně je tato tyč ochlazovaná prostupem tepla do vytápěného interiéru i ztrátovým tokem do prostoru na opačné straně této TAK [41], [42]. Řídící rovnici je v tomto případě rovnice (2-2).

$$\frac{d^2T}{dy^2} + mT = 0 \quad (2-2)$$

T	–	teplota [K]
y	–	směr souřadného systému
m	–	parametr tyče [m^{-1}]

Tento postup je velmi dobře využitelný pro návrh tenkých zavěšených sálavých panelů, méně pak v případech masivnějších stavebních konstrukcích. V tomto případě tento model dostatečně nerespektuje vícerozměrný charakter vedení tepla v konstrukci, což se projevuje v nadhodnocení/podhodnocení povrchové teploty při vytápění/chlazení. V tomto případě je tak systematicky nesprávně nadhodnocováno riziko kondenzace vzdušné vlhkosti v místě povrchu nad potrubím, což při praktickém návrhu vede k zbytečnému omezování teploty chladicí vody a tím i chladicího výkonu. Dalším omezením tohoto modelu při využití v praxi je neschopnost postihnout nestacionární tepelné chování a vliv tepelných vazeb na další stavební konstrukce vnější či vnitřní.

2.4.4 2D a zjednodušený 3D model

Tyto modely jsou založeny například na numerickém řešení 2D či 3D časově neustáleného vedení tepla s přestupem a vnitřním zdrojem – rovnice (2-3).

$$\frac{\partial T}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial T}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial T}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + S = \rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad (2-3)$$

kde T	-	teplota [K]
λ	-	součinitel tepelné vodivosti [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]
ρ	-	objemová hmotnost [$kg \cdot m^{-3}$]
τ	-	čas [s]
c	-	měrná tepelná kapacita [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]
S	-	vnitřní zdroj tepla $S = f(x, y, \tau)$ [$W \cdot m^{-3}$]
x, y, z	-	směr souřadného systému

2D model vychází z předpokladu střední teploty vody v potrubí, čímž umožňuje zjednodušit výpočet na charakteristický výsek. 3Ds (3D simplified) model navíc zjednodušeně modeluje přenos tepla při proudění teplotonosné látky v potrubí a umožňuje tak stanovit její teplotu po délce potrubí a tím i nerovnoměrnost povrchových teplot a tepelného výkonu po ploše TAK, včetně tepelné interakce s okolními konstrukcemi a prostředím v třetím směru souřadného systému.

Modely využívají typicky Robin-Newtonovy okrajové podmínky (2-4) a na případných rovinách symetrie řešeného charakteristického výřezu pak okrajové podmínky adiabatické (2-5).

$$-\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_w = \alpha \cdot (T_w - T_f) \quad (2-4)$$

$$-\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_w = 0 \quad (2-5)$$

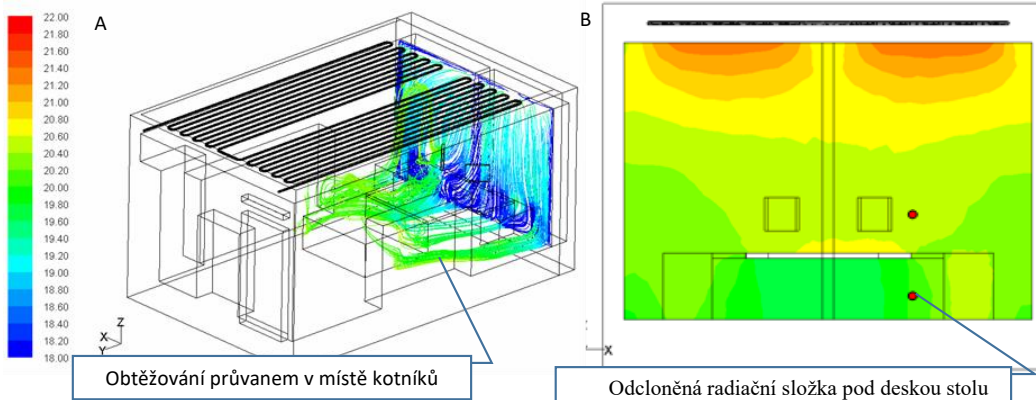
kde α	–	součinitel přestupu tepla	[W.m ⁻² .K ⁻¹]
n	–	značí směr normály daného povrchu	
w	–	index označující povrch tělesa	
f	–	index označující okolní tekutinu	

2.4.5 3D model

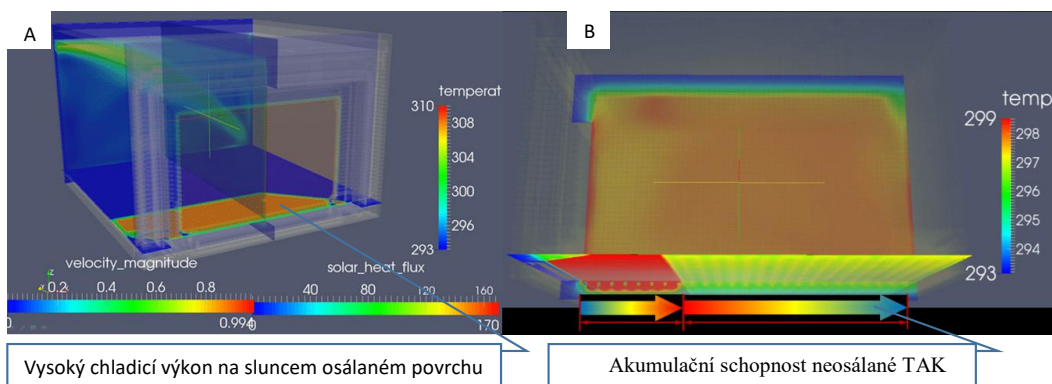
Hlavní přednost 3D modelů založených na CFD metodě tkví v jejich schopnosti komplexně a podrobně postihnout všechny toky tepla a látky v budově a vyčíslit tak potřebné fyzikální parametry k vyhodnocení energetické efektivity a kvality vnitřního prostředí z hlediska tepelného komfortu a kvality vnitřního vzduchu. Nutnost vzít při modelování v úvahu krom vlastní TAK i celou místnost se všemi konstrukcemi, systémy větrání, uživateli atp. vyplývá z výše provedené analýzy přenosu tepla a látky nastíněné v kapitole 2.4.1.

Matematicko-fyzikální popis v případě těchto modelů zahrnuje rovnice pro popis 3D přenosu časově neustáleného sdílení tepla vedením, prouděním, sáláním a přenos látky. Obecně neizotermní, turbulentní proudění definuje rovnice kontinuity, pohybové rovnice doplněné modelem turbulence. Tepelné sálání zahrnuje jak krátkovlnné sluneční, tak dlouhovlnné infračervené. Přenášenou látkou je nejčastěji míněna směs vzduchu s typicky neinteragující vodní parou, jejíž přenos je popsán doplňkovou konvektivně-difuzní rovnicí. Soustavy rovnic reprezentující jednotlivé jevy jsou řešeny numericky [A10]. Výsledky jsou pak teploty, střední radiační teploty, tepelné toky, rychlosti proudění, intenzita turbulence, vlhkostní koncentrace a stáří vzduchu. Tyto veličiny jsou vstupem pro vyčíslení energetické efektivity TAK při časově ustálených i neustálených dějích. Lze je také využít k predikci pocíťovaného tepelného komfortu osobami pobývajících v TAK spoluutvářeném prostředí – například dle ČSN EN ISO 7730 [44]. Tímto modelem lze vyhodnotit predikované střední hodnocení tepelného komfortu, predikované procento nespokojených osob s daným klimatem, riziko pocíťování průvanu, konvekční a radiační asymetrie, či nepříznivé povrchové teploty TAK při dotyku osob s ní. Dále je lze využít i pro vyhodnocení stáří vzduchu a potažmo tak kvality vnitřního vzduchu a efektivity větrání [11].

Níže jsou uvedeny ukázky vybraných jevů, které ovlivňují tepelný komfort v místnostech, jejichž tepelný stav spoluutváří TAK. Cílem je poukázat na rizika, která mohou vzniknout použitím TAK konstrukcí a případně možnosti zvýšení jejich chladicího výkonu.



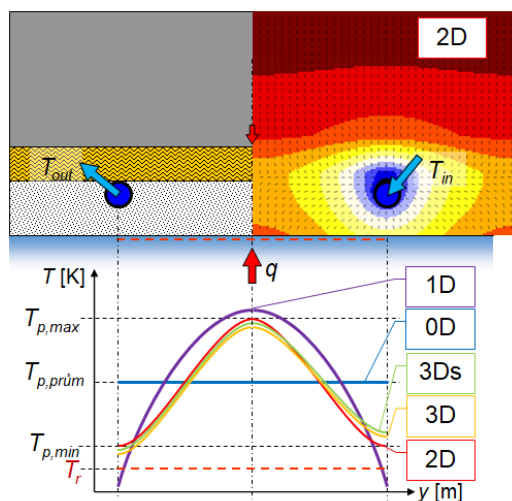
Obrázek 4. Místnost se stropním vytápěním a venkovní prosklenou stěnou v zimě – stacionární stav. A- Teplotně zbarvené trajektorie chladného padajícího vzduchu u okna. B- Sřřední radiční teploty ve svislém řezu [A10].



Obrázek 5. Místnost s podlahovým chlazením a venkovní prosklenou stěnou v létě – nestacionární stav. A-Teploty, tepelné toky a rychlosti. B- Teploty ve svislém řezu a na povrchu podlahy.

2.4.6 Porovnání a zhodnocení metod

Výše popsání modely lze zjednodušeně porovnat z hlediska přesnosti a uplatnitelnosti v praxi či při výzkumu. Verifikace a experimentální validace těchto modelů je uvedena v návazných publikacích [A2], [A9], [A10], [A11], [A14]. Základní přehled schopnosti jednotlivých modelů přesně predikovat povrchové teploty sálavých systémů ukazuje Obrázek 6.



Obrázek 6. Porovnání průběhů teplot na povrchu chladicího stropu pro různé modely.

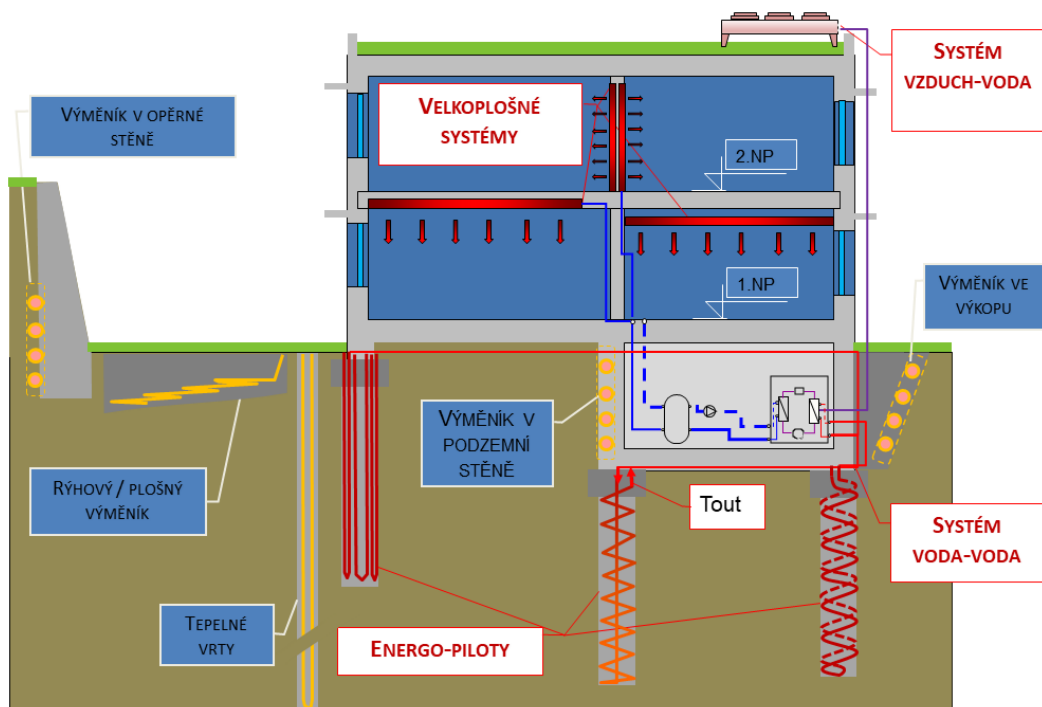
Výhody a nevýhody jednotlivých skupin modelů vyplývajících z množství a kvality informací, které poskytují, jakož i jejich výpočetní náročnosti a resultujících možností jejich uplatnění, ukazuje následující tabulka.

Tabulka 1 Vyhodnocení modelů

Model	Výhody	Nevýhody	Uplatnění
0D	rychlé	neúplné informace, (vhodné PC)	jednoduché případy vytápění
1D	znalost povrchových teplot	nepřesné povrchové teploty, vhodné PC	jednoduché případy vytápění
2D	teploty, boční toky, dynamika	nutné PC	chlazení, akumulační systémy
3Ds	všechny boční toky, výstupní teplota vody	výpočetně náročnější, nutné PC	chlazení, akumulační systémy, TAK
3D	<u>komplexní</u> metoda, umožňující vyhodnocení tepelného komfortu	extrémně náročné, nutné výkonné PC	speciální a vysoce významné případy, výzkum

3 KONCEPCE PROPOJENÍ SÁLAVÁCH SYSTÉMŮ S TEPELNĚ AKTIVOVANÝMI ZÁKLADY BUDOV

Jednou z perspektivních koncepcí pro snižování energetické náročnosti a zvyšování energetické soběstačnosti budov je využití nízkopotenciálních sálavých otopných, nebo chladicích systémů, kde jimi předávané teplo či chlad do místnosti je získáváno z podzákladí tepelně aktivovanými základovými konstrukcemi budovy, případně výměníkem z vnějšího vzduchu, či dalšími zdroji. Tato koncepce je založena nízkoteplotním vytápěním a vysokoteplotním chlazením budov využívající jako zdroje tepla a chladu tepelná čerpadla, nebo, v období vhodných teplot podzákladí, volného chlazení [46]. Tuto koncepci graficky představuje Obrázek 7.

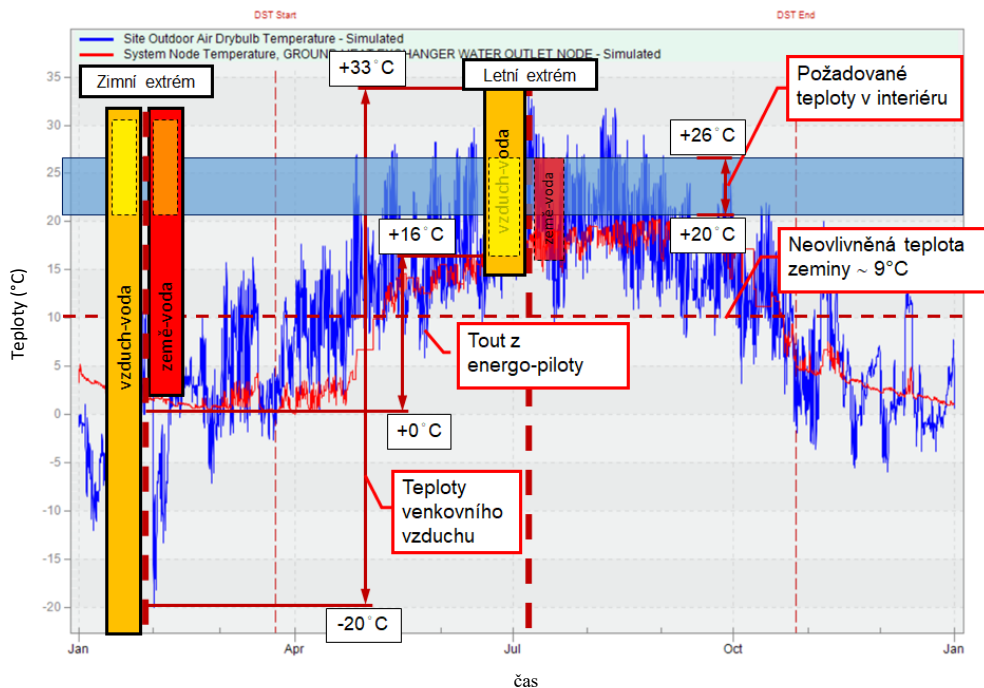


Obrázek 7. Koncepte nízkopotenciálního vytápění a chlazení budov s využívající energii podzákldí.

Teplotní poměry v průběhu roku ukazuje Obrázek 8. Z porovnání rozptylu teplot venkovního vzduchu v letním a zimním extrémním stavu je patrné, že teplotní podmínky v podzákldí budov jsou podstatně příznivější než venkovního vzduchu – teploty kapalinového okruhu na výstupu z energopilot jsou podstatně blíže požadovaným teplotám interiéru budovy. Využití energie podzákldí tak obecně umožňuje dosahovat při využití tepelného čerpadla podstatně výrazně vyšší topné faktory a získávat tak obecně teplo levněji. V letním období jsou pak teploty podzákldí po určitou dobu natolik nízké, že je možné se obejít bez tepelného čerpadla a využívat její teplotní úroveň na přímé chlazení budovy takzvaným volným chlazením. Studie [39] potvrzuje, že systémy sálavých stěn jsou vhodné pro kombinaci s nízkopotenciálními zdroji energie z podzákldí budov a kombinované systémy mohou představovat vysoce energetické řešení vytápění a chlazení.

Výhodou této koncepce jsou nižší provozní náklady a vyšší efektivnost získávání tepla a chladu ve srovnání se systémy využívající tepelných čerpadel vzduch - voda, nebo výrazně nižší pořizovací náklady ve srovnání se systémy země - voda využívající tepelné vrty. Experimenty [6], [40], prokazují efektivnost využití sálavých systémů s aktivací jádra stavební konstrukce pro posun špičkového zatížení a výhody kombinace se zemním výměníkem tepla a tepelným čerpadlem země-voda ve srovnání s tepelným čerpadlem vzduch - vzduch. Další měření [8] prokazují efektivitu kombinace tepelných čerpadel s fotovoltaickými panely pro výrazné snížení závislosti energetiky budovy z elektrické sítě a tedy maximalizaci využití místních zdrojů energie.

Správné uplatnění této koncepce však vyžaduje správný návrh, optimalizaci a řízení tepelně aktivovaných konstrukcí založené na pokročilých matematických metodách.



Obrázek 8. Příklad porovnání teplotních podmínek při získávání energie z venkovního vzduchu a podzákladí.

4 ZÁVĚR

Předložená práce spadá do oblasti techniky prostředí, zvyšování energetické efektivity a úspor energie při provozování budov, ve které autor dlouhodobě výzkumně a pedagogicky pracuje. Jedna z perspektivních cest pro dílčí řešení aktuálních environmentálních a energeticko-bezpečnostních výzev ČR spočívá v aktivním využívání místní obnovitelné energie dosažitelné v bezprostřední blízkosti budov.

Prezentované výzkumy ukazují, že sálavé systémy v kombinaci s nízkopotenciálními zdroji energie podzákladí budov mohou s případnými dalšími zdroji představovat nákladově efektivní a ekologická řešení vytápění a chlazení při zajištění požadovaného tepelného komfortu budov, pokud jsou správně navrženy, provedeny a provozovány.

V oblasti návrhu sálavých systémů tato práce na základě analýzy jejich tepelně-technického působení představuje výpočetní modely, které postihují jejich nejdůležitější vlastnosti, zanedbávají ty méně důležité a uvádí je seřazené vzestupně od nejjednodušších po nejkompaktnější – 0D, 1D, 2D, 3Ds a 3D. Je zde prezentována jak jejich podstata, vlastnosti, omezení a zhodnocení z hlediska přesnosti, výpočetní náročnosti, tak možnosti jejich uplatnění v praxi či při výzkumu.

Prezentované výsledky vlastního základního výzkumu v oblasti sálavých systémů a tepelně aktivovaných základových konstrukcí byly publikovány převážně ve vědeckých a odborných recenzovaných časopisech [A1] až [A15]. Tyto publikace též částečně obsahují verifikaci a experimentální validaci prezentovaných výpočetních modelů, což jsou klíčové pro jejich věrohodnost. Výsledky aplikovaného výzkumu v této oblasti se promítly do aplikovaných výsledků [A16] až [A19] a jsou zaváděny do praxe autory, nebo průmyslovými partnery spolupracujícími na tomto výzkumu v rámci projektu TAČR NCK CAMEB – Optimalizace energopilot pro využití energie země. TN0100056/06, jehož je autor zodpovědným řešitelem.

5 POUŽITÉ ZKRATKY

Zkratka	Popis
AIS	Article Influence Score
CFD	Computational Fluid Dynamics
CalA	Software Calculation Area
Epile	Software Energy-pile
RadiA	Software Radiation Area
SVOČ	Studentská vědecko-odborná činnost
TABS	Thermo Active Building Structures – tepelně aktivní stavební konstrukce
TAK	Tepelně aktivované konstrukce
TB	Tepelná bariéra
TZB	Technická zařízení budov
MoU	Memorandum of Understanding
PMV	Predicted Mean Vote – predikovaná střední volba
PPD	Predicted Percent of Dissatisfied – predikovaný procentuální podíl nespokojených
EP	Energopilota

6 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Zhang C, Pomianowski M, Heiselberg P, Yu T. A review of integrated radiant heating/cooling with ventilation systems. *Energy and Buildings* 2020;223:110094.
- [2] Sastry G, Rumsey P. VAV vs. radiant: side-by-side comparison. *ASHRAE Journal* 2014;56(5):16+.
- [3] Le Dréau J, Heiselberg P. Sensitivity analysis of the thermal performance of radiant and convective terminals for cooling buildings. *Energy and Buildings* 2014;82:482–91.
- [4] Mikeska T, Svendsen S. Dynamic behavior of radiant cooling system based on capillary tubes in walls made of high performance concrete. *Energy and Buildings* 2015;108:92–100.
- [5] Rhee K-N, Olesen BW, Kim KW. Ten questions about radiant heating and cooling systems. *Building and Environment* 2017;112:367–81.
- [6] Romani J, Pérez G, Gracia A de. Experimental evaluation of a cooling radiant wall coupled to a ground heat exchanger. *Energy and Buildings* 2016;129:484–90.
- [7] Hassan MA, Abdelaziz O. Best practices and recent advances in hydronic radiant cooling systems – Part II: Simulation, control, and integration. *Energy and Buildings* 2020;224:110263.
- [8] Romani J, Belusko M, Alemu A, Cabeza LF, Gracia A de, Bruno F. Control concepts of a radiant wall working as thermal energy storage for peak load shifting of a heat pump coupled to a PV array. *Renewable Energy* 2018;118:489–501.
- [9] Guerrero Delgado M, Sánchez Ramos J, Álvarez Domínguez S, Tenorio Ríos JA, Cabeza LF. Building thermal storage technology: Compensating renewable energy fluctuations. *Journal of Energy Storage* 2020;27:101147.
- [10] Ning B, Schiavon S, Bauman FS. A novel classification scheme for design and control of radiant system based on thermal response time. *Energy and Buildings* 2017;137:38–45.
- [11] Krajčík M, Simone A, Olesen BW. Air distribution and ventilation effectiveness in an occupied room heated by warm air. *Energy and Buildings* 2012;55:94–101.
- [12] Feng J, Schiavon S, Bauman F. Cooling load differences between radiant and air systems. *Energy and Buildings* 2013;65:310–21.
- [13] EN 15316–2. (heat. & cool., emiss.systems). *Energy performance of buildings – Method for calculation of system energy requirements and system efficiencies – Part 2: Space emission systems (heating and cooling), Module M3–5, M4–5.* 2017th ed.

- [14] Šikula O, Hirš J. Analysis of the behaviour of the cooling ceiling in an office room with a view of thermal comfort. In: 23rd IIR International Congress 2011, p. 3808–3816.
- [15] Atienza Márquez A, Cejudo López JM, Fernández Hernández F, Domínguez Muñoz F, Carrillo Andrés A. A comparison of heating terminal units: Fan-coil versus radiant floor, and the combination of both. *Energy and Buildings* 2017;138:621–9.
- [16] Rhee K-N, Kim KW. A 50 year review of basic and applied research in radiant heating and cooling systems for the built environment. *Building and Environment* 2015;91:166–90.
- [17] Bean R, Olesen BW, Kwang W, Kim KW. Part 1. History of Radiant Heating & Cooling Systems. *ASHRAE Journal* 2010:40–7.
- [18] Bean R, Olesen BW, Kwang W, Kim KW. Part 2. History of Radiant Heating & Cooling Systems. *ASHRAE Journal* 2010:50–7.
- [19] Bojić M, Cvetković D, Marjanović V, Blagojević M, Djordjević Z. Performances of low temperature radiant heating systems. *Energy and Buildings* 2013;61:233–8.
- [20] Oxizidis S, Papadopoulos AM. Performance of radiant cooling surfaces with respect to energy consumption and thermal comfort. *Energy and Buildings* 2013;57:199–209.
- [21] Karabay H, Arıcı M, Sandık M. A numerical investigation of fluid flow and heat transfer inside a room for floor heating and wall heating systems. *Energy and Buildings* 2013;67:471–8.
- [22] Myhren JA, Holmberg S. Flow patterns and thermal comfort in a room with panel, floor and wall heating. *Energy and Buildings* 2008;40(4):524–36.
- [23] Mustakallio P, Bolashikov Z, Kostov K, Melikov A, Kosonen R. Thermal environment in simulated offices with convective and radiant cooling systems under cooling (summer) mode of operation. *Building and Environment* 2016;100:82–91.
- [24] Košir M, Krainer A, Dovjak M, Perdan R, Kristl Ž. Alternative to the Conventional Heating and Cooling Systems in Public Buildings. *Journal of Mechanical Engineering* 2010;56(9):575-283.
- [25] Šimko M, Krajčik M, Šikula O. Radiant wall cooling with pipes arranged in insulation panels attached to facades of existing buildings. *E3S Web Conf.* 2019;111:3013.
- [26] Babiak J, Olesen BW, Petráš D. *Low Temperature Heating And High Temperature Cooling. Guidebook.* Brussel: Rehva; 2013.
- [27] Ibrahim M, Wurtz E, Anger J, Ibrahim O. Experimental and numerical study on a novel low temperature façade solar thermal collector to decrease the heating demands: A south-north pipe-embedded closed-water-loop system. *Solar Energy* 2017;147:22–36.
- [28] Niu F, Yu Y. Location and optimization analysis of capillary tube network embedded in active tuning building wall. *Energy* 2016;97:36–45.
- [29] Shen C, Li X. Dynamic thermal performance of pipe-embedded building envelope utilizing evaporative cooling water in the cooling season. *Applied Thermal Engineering* 2016;106:1103–13.
- [30] Zhu Q, Li A, Xie J, Li W, Xu X. Experimental validation of a semi-dynamic simplified model of active pipe-embedded building envelope. *International Journal of Thermal Sciences* 2016;108:70–80.
- [31] Krzaczek M, Florczuk J, Tejchman J. Improved energy management technique in pipe-embedded wall heating/cooling system in residential buildings. *Applied Energy* 2019;254:113711.
- [32] Kisilewicz T, Fedorczyk-Cisak M, Barkanyi T. Active thermal insulation as an element limiting heat loss through external walls. *Energy and Buildings* 2019;205:109541.
- [33] EN ISO 7726:2001. Ergonomics of the thermal environment - Instruments for measuring physical quantities (ISO 7726:1998); 2001.
- [34] Shinoda J, Kazanci OB, Tanabe S, Olesen BW. A review of the surface heat transfer coefficients of radiant heating and cooling systems. *Building and Environment* 2019;159:106156.

- [35] ISO 11855-1:2012. Building environment design — Design, dimensioning, installation and control of embedded radiant heating and cooling systems — Part 1: Definition, symbols, and comfort criteria; 2012.
- [36] Vangtook P, Chirattananon S. An experimental investigation of application of radiant cooling in hot humid climate. *Energy and Buildings* 2006;38(4):273–85.
- [37] ASHRAE Handbook (ed.). Heating, Ventilating, and Air-Conditioning Systems and Equipment (I-P Edition): Chapter 6. Panel Heating and Cooling; 2012.
- [38] Krecké E. Building wall with fluid ducts as energy barriers: Patent(US8677706B2); 2014.
- [39] Bojić M, Cvetković D, Bojić L. Decreasing energy use and influence to environment by radiant panel heating using different energy sources. *Applied Energy* 2015;138:404–13.
- [40] Romani J, Pérez G, Gracia A de. Experimental evaluation of a heating radiant wall coupled to a ground source heat pump. *Renewable Energy* 2017;105:520–9.
- [41] Petráš, D., Koudelková D., Kabele, K.: Teplovodní a elektrické podlahové vytápění. Bratislava: Jaga group, 2004. - 216 s. ISBN 80-88905-97-4.
- [42] PETRÁŠ, Dušan, 2001. Nizkoteplotné vykurovanie a obnoviteľné zdroje energie. Bratislava: Jaga group. ISBN 80-88905-12-5.
- [43] ČSN EN 1264-2 Zabudované vodní veľk plošné otopné a chladicí soustavy. 2009.
- [44] ČSN EN ISO 7730 Ergonomie tepelného prostředí - Analytické stanovení a interpretace tepelného komfortu pomocí výpočtu ukazatelů PMV a PPD a kritéria místního tepelného komfortu. 2006.
- [45] LI, Min and Alvin C.K. LAI. Review of analytical models for heat transfer by vertical ground heat exchangers (GHĚs): A perspective of time and space scales. *Applied Energy*. 2015, 151, 178-191. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.04.070. ISSN 03062619.
- [46] REES, S.J., 2016. *Advances in Ground-Source Heat Pump Systems*. University of Leeds, Leeds, United Kingdom, s. -460, 1 s. Dostupné z: doi:10.1016/C2014-0-03840-3.
- [47] ZENG, H. Y., N. R. DIAO and Z. H. FANG. A finite line-source model for boreholes in geothermal heat exchangers. *Heat Transfer. Asian Research*. 2002, 31(7), 558-567. DOI: 10.1002/htj.10057. ISSN 1099-2871.

7 VYBRANÉ PUBLIKACE A APLIKOVANÉ VÝSLEDKY AUTORA

Níže je uveden seznam patnácti nejvýznamnějších publikací a čtyř aplikovaných výsledků z oblasti TAK a dalších tří vybraných výsledků autora.

- [A1] KRAJČÍK, Michal, Müslüm ARICI, Ondřej ŠIKULA a Martin ŠIMKO, 2021. Review of water-based wall systems: Heating, cooling, and thermal barriers: Heating, cooling, and thermal barriers. *Energy and Buildings*. 253, 111476. ISSN 0378-7788. (*DI_{AIS}*)
- [A2] ŠIMKO, M.; KRAJČÍK, M.; ŠIKULA, O.; ŠIMKO, P.; KALÚS, D. Insulation panels for active control of heat transfer in walls operated as space heating or as a thermal barrier: Numerical simulations and experiments. *Energy and Buildings*, 2018, roč. 158, č. Supplement C, s. 135-146. ISSN: 0378-7788. (*QI_{AIS}*)
- [A3] KRAJČÍK, M.; ŠIKULA, O. The possibilities and limitations of using radiant wall cooling in new and retrofitted existing buildings. *Applied Thermal Engineering*, 2020, č. 164, s. 1-15. ISSN: 1359-4311. (*DI_{AIS}*)
- [A4] KRAJČÍK, M.; ŠIKULA, O. Heat storage efficiency and effective thermal output: Indicators of thermal response and output of radiant heating and cooling systems. *Energy and Buildings*, 2020, roč. 229, č. 1, s. 1-14. ISSN: 0378-7788. (*DI_{AIS}*)
- [A5] ORAVEC, J.; ŠIKULA, O.; KRAJČÍK, M.; ARICI, M.; MOHAPL, M. A comparative study on the applicability of six radiant floor, wall, and ceiling heating systems based on thermal performance analysis. *Journal of Building Engineering*, 2021, roč. 36, č. 4, s. 1-11. ISSN: 2352-7102. (*QI_{AIS}*)

- [A6] KRAJČÍK, M., M. ŠIMKO, O. ŠIKULA, D. SZABÓ a D. PETRÁŠ, 2021. Thermal performance of a radiant wall heating and cooling system with pipes attached to thermally insulating bricks. *Energy and Buildings*. 246. (*DI_{AIS}*)
- [A7] JUNASOVÁ, Barbora, Michal KRAJČÍK, Ondřej ŠIKULA, Müslüm ARICI a Martin ŠIMKO, 2022. Adapting the construction of radiant heating and cooling systems for building retrofit. *Energy and Buildings*. 268, 112228. ISSN 0378-7788. (*DI_{AIS}*)
- [A8] KRAJČÍK, M., D. ŠTRBA, M. MASARYK, O. ŠIKULA a P. MLYNÁR, 2022. Enhancing the efficiency of a steam jet ejector chiller for chilled ceiling. *Applied Thermal Engineering*. ISSN 13594311. (*DI_{AIS}*)
- [A9] KRAJČÍK, M. PETRÁŠ, D. ŠIKULA, O.; ŠIMKO, M. Can radiant wall cooling be preferable solution for building retrofit?. *REHVA Journal*, 2020, roč. 4, č. 57, s. 59-65. ISSN: 1307-3729.
- [A10] ŠIKULA, Ondřej, 2011. Počítačové modelování tepelně aktivovaných konstrukcí. 1. Brno: VUTIUM, 1-39. ISBN 978-80-214-4308-2. ISSN 1213-4198. Dostupné také z: <http://hdl.handle.net/11012/61776>
- [A11] ŠIKULA, O.; SLÁVIK, R.; ELIÁŠ, J.; ORAVEC, J.; KAŠPAR, A. Vývoj softwaru pro modelování tepelného chování Energopilot. Vytápění, větrání, instalace, 2021, roč. 30, č. 4, s. 210-214. ISSN: 1210-1389.
- [A12] ŠIKULA, O.; NOVÁKOVÁ, I.; ČURPEK, J.; ČEKON, M.; ADAM, P. Simulace potenciálu využívání energie země energopilotami v softwaru DesignBuilder. Vytápění, větrání, instalace, 2021, roč. 30, č. 4, s. 190-193. ISSN: 1210-1389.
- [A13] ORAVEC, J.; ŠIKULA, O.; NOVÁKOVÁ, I. An Evaluation of the Mathematical Models of Energy Piles. *Slovak Journal of Civil Engineering*, 2020, roč. 28, č. 1, s. 44-48. ISSN: 1338-3973.
- [A14] ŠIKULA, O.; SLÁVIK, R.; ELIÁŠ, J.; ORAVEC, J.; KAŠPAR, A. Energy-Pile Model Verification. 51st International HVAC&R Congress and Exhibition Proceedings. Beograd: KGH, 2020. s. 153-157. ISBN: 978-86-85535-07-9.
- [A15] ŠIKULA, O.; ORAVEC, J.; NOVÁKOVÁ, I. Zhodnocení vybraných systémů vytápění a chlazení pracujících s klasickým a alternativním spádem otopné a chladicí vody. *Vykurovanie 2022 : zborník prednášok z 30. medzinárodnej vedecko-odbornej konferenci*. Bratislava: Slovenská spoločnosť pre techniku prostredia, 2022.
- [A16] ŠIKULA, O.; SLÁVIK, R.; ELIÁŠ, J.; ORAVEC, J.; PŘIBYL, O. Epile 1. (software).
- [A17] BOŠTÍK, J.; LEITER, A.; MIČA, L.; ŠIKULA, O.: ZFMEpilot 1.0; Funkční vzorek – ZFMEpilot 1.0. *Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Vevří 331/95, 602 00 Brno*. (funkční vzorek).
- [A18] ŠIKULA, Ondřej a Josef PLÁŠEK. 2010. Software Calculation Area (CaA) version 3.2.6 In: *ResearchGate [online]*, Dostupné z: doi:10.13140/RG.2.2.13097.19042 (software).
- [A19] ŠIKULA, Ondřej a Josef PLÁŠEK, 2015. Software CaA 4.0: version 4.0 Education. In: *ResearchGate [online]*. 2015, Dostupné z: doi:10.13140/RG.2.1.1501.7689 (software).
- [A20] SZOLONY, T.; ŠIKULA, O.; Tomton s.r.o., VUT v Brně: An air conditioning unit, in particular intended for hot water central heating. RU181090U1, 2018. (Patent).
- [A21] SZOLONY, T.; ŠIKULA, O.; Tomton s.r.o., VUT v Brně: Device for heating and cooling in particular for hot water central heating. RU181093U1, 2018. (Patent).
- [A22] PLÁŠEK, Josef; Ondřej ŠIKULA, 2015. Software RadiA 1.0. In: *ResearchGate [online]*. 2017, Dostupné z: DOI: 10.13140/RG.2.2.28740.63367 (software).

8 KONCEPCE TVŮRČÍ A PEDAGOGICKÉ ČINNOSTI

Koncepce je dále rozdělena zvlášť na tvůrčí činnost a činnost pedagogickou.

8.1 TVŮRČÍ ČINNOST

Tvůrčí činnost bude autor dále obecně rozvíjet v následujících čtyřech podoblastech – základní výzkum, aplikovaný výzkum, smluvní výzkum, znalecká činnost.

Primární je provádět základní výzkum za podpory domácích a mezinárodních projektů. Cílem je posun v poznání v dané zkoumané oblasti a výstupem jsou pak publikace v renomovaných vědeckých časopisech WoS se zaměřením na *DI_{AIS}*, *QI_{AIS}*. Hledání vhodných výzkumných témat „hot topics“ pro další výzkumy bude podpořeno pokračováním práce recenzentské (primárně pro časopisy *DI_{AIS}*, *QI_{AIS}*) a editorské, dále pak prací v odborných společnostech a návazným pořádáním konferencí (zejména společnosti IBPSA-CZ a STP).

S podporou poznatků ze základního výzkumu bude sekundárně dále rozvíjen aplikovaný výzkum s využitím domácích a mezinárodních projektů a se spolufinancováním stávajícími, či novými průmyslovými partnery. Cílem jsou výstupy komercializovatelné na trhu, nebo uplatnitelné v oblasti veřejného zájmu. Vybranými, v praxi již uplatněnými, výstupy aplikovaného výzkumu jsou:

- Konvektor pro nízkoteplotní vytápění a vysokoteplotní chlazení budov využívající kompaktní mikrokanálový výměník tepla. Tento zaměstnanecský vynález je chráněn dvěma zahraničními patenty [A20], [A21] a třemi užitnými vzory. Vynález byl úspěšně komercializován odprodejem části majetkových práv VUT v Brně firmě Tomton s.r.o., která výrobky založené na tomto vynálezu uvádí na tuzemský trh i trhy zahraniční. Vynález byl oceněn cenou Úspěšný ohlašovatel VUT v Brně 2014. Firma Tomton s.r.o. s tímto vynálezem zvítězila v soutěži Inovační firma Moravskoslezského kraje 2017. Estetická stránka vynálezu byla oceněna 1. místem v designerské soutěži Red Dot Award 2017. Vznik vynálezu byl podpořen projektem MPO – Kvantifikace úspor energie při vytápění otopným tělesem Tomton R1 oproti stávajícím otopným tělesům. CZ.01.1.02/0.0/0.0/17_115/0011101. 2017-2018, jehož byl autor zodpovědným řešitelem.
- Software Calculation Area (CalA) pro simulaci sdruženého přenosu tepla a vlhkosti – [A18], [A19]. Software CalA verze je založen na numerickém řešení diferenciálních rovnic popisující časově neustálý sdružený difúzní transport dvou obecných veličin s proměnnými koeficienty a vnitřními zdroji metodou konečných objemů. Využití softwaru je typicky ve stavebnictví a to při výzkumu, nebo v technické praxi při řešení úloh a problémů sdruženého vedení tepla a vlhkosti ve 2D, 3D a 2D rotačně symetrické výpočetní doméně. Tento software umožňuje stacionární a dynamické simulace tepelně aktivovaných konstrukcí na úrovni modelů 2D a 3Ds specifikovaných v kapitole 2.4.4. Software lze také využít k simulaci dalších jevů, jako je transport vlhkosti ve stavebních materiálech, řešení potenciálního a izoentropického proudění, nebo plně vyvinutého rychlostního pole při laminárním proudění vazké tekutiny. Software je uplatněn v několika projekčních firmách a v nejnovější verzi CalA 4.0 vykazuje na portálu ResearchGate 2200+ stažení, čímž patří do Q1 dle parametru Research Interest (81. percentil) [A19].

Výsledky prvních dvou oblastí budou přenášeny terciárně do oblasti smluvního výzkumu a kvartérně do posudkové a soudně znalecké činnosti. Zkušenosti z terciární a kvartérní oblasti mohou být též inspirací při hledání perspektivních témat základního a aplikovaného výzkumu.

Vybrané, doposud v praxi uplatněné, výstupy smluvního výzkumu a znalecké činnosti jsou následující:

- Významné realizované inženýrské dílo – Zámek Moravský Krumlov, soudně znalecké posouzení a návrh tvorby vnitřního klimatu prostorů expozice a mikroklimatu souboru pláten Slovanská epopej Alfonse Muchy s využitím CFD simulací.
- Významné realizované inženýrské dílo – Národní divadlo v Praze, část Státní opera. Podíl na rekonstrukci vzduchotechniky Státní opery Praha optimalizací distribuce vzduchu v oblasti jeviště a hlediště počítačovými simulacemi proudění vzduchu – CFD simulacemi.
- Významné realizované inženýrské dílo – Janáčkovo kulturní centrum Brno, část koncertní sál. Podíl na optimalizaci vzduchotechniky, distribuce vzduchu a tepelného komfortu koncertního sálu CFD simulacemi.

V následujícím období bude autor rozvíjet tyto oblasti výzkumu:

- výzkum chladicích sálavých systémů se zaměřením na maximalizaci chladicího efektu při kombinovaném sálavém a konvektivním tepelném zatížení a jejich efektivního řízení;
- výzkum tepelně aktivovaných základových konstrukcí (typicky energopilot) se zaměřením na maximalizaci jejich energetické efektivity optimalizací vlnutí kapalínového okruhu a způsobu jejich řízení ve vazbě na budovu, systémy TZB a způsob užívání.

Ve všech výše uvedených výzkumných činnostech je plánováno:

- pokračovat ve vývoji zjednodušených hybridních modelů kombinující výhody numerických, analytických a kybernetických modelů;
- posílit dosavadní aplikaci pokročilých metod modelování za využití kybernetických modelů využívajících metod umělé inteligence, strojového učení (rozhodovací stromy, neuronové sítě, atp.), s cílem minimalizovat jejich výpočetní náročnost;
- posílit dosavadní aplikaci multikriteriálních optimalizací na bázi evolučních algoritmů umožňujících efektivně nalézt optimální řešení komplexních úloh a problémů;
- doplňovat výzkumný tým s důrazem nejen na zapojení talentovaných studentů všech úrovní – od bakalářské po postdoktorandskou, ale také na mezinárodní přesah – tedy s účastí kolegů ze zahraničí;
- důsledně aplikovat vědecké metody práce vycházející z kritického myšlení.

8.2 PEDAGOGICKÁ ČINNOST

V oblasti pedagogické autor vnímá na strategické úrovni výzvy spočívající v rostoucí nabídce jiných studijních oborů (i netechnických) a konkurenci jiných univerzit (i ze zahraničí). Východisko spatřuje v atraktivnější studia jednak posílením internacionalizace a pak také posílení participace studentů. Internacionalizace bude prohlubována jednak nabídkou stávajících možností zahraničních stáží pro studenty (Erasmus+ – Bolzano a Budapešť, CEEPUS síť CIII-SK-0405-12-2021, bilaterální smlouvy MoU s technickými univerzitami v Brescien a Oránu) a pak také pokračováním organizace přednášek zahraničních profesorů na VUT v Brně. Participací studentů je míněno pokračování a posilování jejich zapojení do všech čtyřech sfér tvůrčí činnosti – jak jsou uvedeny výše. Výstupy této participace studentů je žádoucí více uplatnit při vedení soutěžních prací studentské tvůrčí činnosti. Zapojení studentů a ideálně i úspěch v mezinárodních kolech se ukazuje jako silný motivační efekt pro studenty do další tvůrčí práce na univerzitě, nebo i případně v praxi.

- Autorem vedené studentské práce, které uspěly v mezinárodním kole studentská vědecko-odborné činnosti (SVOČ):

1. místo: 5x (Mishuk A. 2017, Král T. 2015, Vojkůvková P. 2013, Alexa M. 2010, Děckuláček Z. 2008)
2. místo: 3x (Kysilka M. 2017, Šíma J. 2008, Děckuláček Z. 2007)
3. místo: 1x (Vojkůvková P. 2012)

- Autorem vedené studentské práce, které uspěly na Sympoziu Integrovaného Navrhování Budov:

2. místo: 1x (Auer Z. 2015)
3. místo: 1x (Auer Z. 2016)

Na operativní úrovni vnímá autor v pedagogické činnosti velmi rychlý pokrok v simulačních metodách a následné rychlé zastarávání tištěných učebnic a skript. Řešení lze spatřovat v rozšíření materiálů stávajících E-learningových metod VUT, ale také v posílení napojení na zdroje důvěryhodných vědeckých a odborných komunit. Autor též vnímá stále rostoucí nabídku odborně a vědecky orientovaných výpočetních softwarů, jejichž obstarávání a licencování je nákladné a někdy i složité. Řešení vidí v pokračování vývoje vlastních odborně zaměřených softwarů, do kterých budou promítnuty výsledky vlastního výzkumu (zejména CalA [A18], [A19], RadiA [A22] a Epile [A16]) a posílení role open source softwarů ve výuce a výzkumu. Aktuálně je plánováno zavést do výuky software Energy+.

V oblasti internacionalizace autor bude, jako podporu výše popsaným čtyřem oblastem tvůrčí práce a práci pedagogické, rozvíjet stávající mezinárodní spolupráci konkrétně s univerzitami ve Vídni, Bolzánu, Budapešti, Bratislavě, Bresice a Oránu a případně pracovat na univerzitou výtčených cílech v oblasti Double-degree a Joint-degree.

9 ABSTRAKT

Předložená práce spadá do oblasti techniky prostředí budov, ve které autor dlouhodobě výzkumně a pedagogicky pracuje. V úvodní části je uvedeny společenské výzvy, které se bezprostředně tohoto oboru dotýkají, čímž je doložena jeho společenská aktuálnost a významnost.

Tato práce obsahuje stručný přehled části výzkumného zaměření autora zaměřené na tepelně aktivované stavební konstrukce. Hlavní část práce obsahuje definice, charakteristiky a hodnocení tepelně aktivovaných stavebních konstrukcí při jejich rozčlenění na sálavé systémy, tepelné bariéry a tepelně aktivované základové konstrukce. Návazně na to je analyzováno tepelně-technické působení sálavých systémů a jsou ukázány způsoby možného zjednodušení tak, aby se tato problematika dala zredukovat na jednodušší a výpočetně méně náročné výpočetní modely, které postihují jejich nejpodstatnější vlastnosti a pomíjí ty méně důležité. Následně jsou vzestupně od nejjednodušších po nejkompexnější prezentovány modely 0D, 1D, 2D, 3Ds a 3D, jejich podstata, vlastnosti a omezení. Následující zhodnocení pak dává přehled o jejich přesnosti, výpočetní náročnosti a možnostech uplatnění v praxi či při výzkumu.

Další kapitola definuje koncept propojující nízkopotenciálního vytápění a chlazení budov využívajícího sálavé systémy se získáváním tepla a chladu z okolního prostředí budovy – tedy z podzákladí tepelně aktivovanými základovými konstrukcemi budovy, nebo z venkovního vzduchu. Je zde ukázána efektivnost této koncepce využívající jako zdroje tepla a chladu tepelná čerpadla, nebo případně volného chlazení.

V závěrečných kapitolách jsou prezentovány vybrané publikace vztahující se k danému tématu a je předestřena koncepce další tvůrčí a pedagogické činnosti.

10 ABSTRACT

The presented work falls into the field of building environment technology, in which the author has been working in research and teaching for a long time. In the introductory part, social challenges that directly affect this field are presented, which proves its social relevance and importance.

This work contains a brief overview of the part of the author's research focus on thermally activated building structures. The main part of the thesis contains definitions, characteristics and evaluation of thermally activated building structures by their dividing into radiant systems, thermal barriers and thermally activated foundation structures. Subsequently, the thermal-technical action of radiant systems is analysed and possible simplification methods are shown so that this problem can be reduced to simpler and computationally less demanding computational models that affect their most essential properties and ignore the less important ones. Subsequently, 0D, 1D, 2D, 3Ds and 3D models, their nature, properties and limitations are presented in ascending order from the simplest to the most complex one. The following evaluation then gives an overview of their accuracy, computational complexity and the possibilities of application in practice or in research.

The next chapter defines the concept of connecting low-potential heating and cooling systems of buildings using radiant systems with the system of exploitation of heat and cold from the surrounding environment of the building - i.e. from the sub-soil by the thermally-activated foundation structures of the building, or from the outside air. The effectiveness of this concept using heat pumps as sources of heat and cold, or possibly free cooling, is implied there.

In the final chapters, selected publications related to the given topic are presented and the concept of further creative and pedagogical activities is outlined.