



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV POZEMNÍHO STAVITELSTVÍ

INSTITUTE OF BUILDING STRUCTURES

**HODNOCENÍ VLIVU TUBUSOVÝCH SVĚTLOVODŮ
NA DENNÍ OSVĚTLENÍ BUDOV**

EVALUATION OF LIGHT PIPE INFLUENCE ON DAYLIGHTING IN BUILDINGS

DISERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Jakub Král

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Jitka Mohelníková, Ph.D.

BRNO 2022

ABSTRAKT

Tematickým rámcem této dizertační práce je technologie osvětlení budov pomocí tubusových světlovodů. Pro posouzení těchto systémů bylo provedeno kontinuální měření denního osvětlení na srovnávací rovině pod dvěma různými tubusovými světlovody podobných rozměrů po dobu jednoho roku. Zároveň byla současně zaznamenávána data o exteriérových světelných podmínkách. Nezávisle na těchto měřeních byla provedena měření spektrální odraznosti vzorků vnitřního povrchu obou světlovodných tubusů. Dále byly provedeny světelné simulace v programu HOLIGILM a vyhodnocení účinnosti přímých tubusových světlovodů různých průměrů a délek. Na závěr bylo také provedeno zhodnocení úspory elektrické energie nahrazením umělého zdroje osvětlení tubusovým světlovodem. Výsledky měření i světelných simulací poskytly data pro hodnocení a navrhování přímých tubusových světlovodů v budovách.

Klíčová slova: denní osvětlení, tubusové světlovody, měření osvětlenosti, simulace denního osvětlení

ABSTRACT

The topic framework of this dissertation is the technology of lighting in buildings using tubular light pipes. For the assessment of these systems, a continuous measurement of daylight was performed on a comparison surface under two different tubular light pipes of similar dimensions for one year. At the same time, data of exterior lighting conditions were recorded. Independently of these measurements, spectral reflectance measurements of the inner surface samples of both light pipe tubes were performed. Furthermore, light simulations were performed in the HOLIGILM program, and the efficiency of direct tube light pipes of various diameters and lengths was evaluated. Finally, an evaluation of electricity consumption savings was also made by replacing the artificial lighting source with a light pipes. The results of measurements and light simulations provided data for the evaluation and designing of tubular light pipes in buildings.

Keywords: daylight, tubular light pipes, daylight measurement, daylight simulation

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KRÁL, Jakub. *Hodnocení vlivu tubusových světlovodů na denní osvětlení budov*. Brno, 2022. 96 s. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemního stavitelství. Vedoucí práce prof. Ing. Jitka Mohelníková, Ph.D.

Prohlášení o shodě listinné a elektronické formy závěrečné práce

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané dizertační práce s názvem *Hodnocení vlivu tubusových světlovodů na denní osvětlení budov* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 21. 2. 2022

.....
Ing. Jakub Král
autor práce

Prohlášení o původnosti závěrečné práce

Prohlašuji, že jsem dizertační práci s názvem *Hodnocení vlivu tubusových světlovodů na denní osvětlení budov* zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 21. 2. 2022

.....
Ing. Jakub Král
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Mé školitelce prof. Ing. Jitce Mohelníkové, Ph.D. z Fakulty stavební VUT za její pomoc, vstřícnost a čas, který mi během vypracování dizertační práce věnovala. Její odborné vedení, cenné rady a podnětné náměty byly neocenitelnou pomocí při zpracování této práce.

Projektu LO1408 AdMaS UP – Pokročilé stavební materiály, konstrukce a technologie, v rámci, kterého byla tato práce zpracovaná a publikovaná v zahraničním vědeckém časopisu a na odborných konferencích.

Doc. Ing. Jiřímu Plchovi, CSc. z České společnosti pro osvětlování za odborné konzultace týkající se světelných měření.

Prof. Ing. Karlu Sokanskému, CSc. a jeho pracovnímu kolektivu z VŠB TUO Ostrava, za odbornou pomoc při přípravě hardware a software pro ukládání dat z ročních měření osvětlenosti.

Doc. Ing. Stanislavu Darulovi, CSc. ze Slovenské akademie vied, za cenné rady a pomoc při vyhodnocování výsledků světelných měření.

Doc. Ing. Pavlu Rovnaníkovi, Ph.D. z Fakulty stavební VUT za pomoc při spektrálních měřeních na vzorcích tubusů světlovodů.

Dr. Luise Brotas z London Metropolitan University, UK za odborné konzultace a umožnění prezentování výsledků hodnocení světlovodů na zahraniční studentské konferenci.

Ing. Olze Rubinové, Ph.D. z Fakulty stavební VUT za zapůjčení kamery Rollei d30 flex pro spektrální měření v místě instalace světlovodů.

Společnosti Topwet s.r.o. za finanční podporu realizace měření osvětlenosti pod světlovody v reálných venkovních podmínkách.

V neposlední řadě mé skvělé rodině za podporu a trpělivost.

OBSAH

1	ÚVOD.....	4
1.1	Téma dizertační práce.....	4
1.2	Cíle dizertační práce.....	5
1.3	Struktura dizertační práce.....	5
2	SHRNUTÍ SOUČASNÉHO STAVU	7
2.1	Sluneční záření a jeho obecné vlastnosti.....	7
2.1.1	Fotometrické veličiny	8
2.2	Denní světlo.....	9
2.2.1	Denní osvětlení a jeho vliv na život	10
2.2.2	Denní světlo	10
2.2.3	Denní osvětlení v budovách.....	12
2.2.4	Potenciální úspory ve spotřebě energie na osvětlení	13
2.3	Tubusové světlovody.....	13
2.3.1	První historické zmínky a poznatky o vedení světla světlovody.....	14
2.3.2	Vývoj technologie tubusových světlovodů mezi lety 1980 až 2000	14
2.3.3	Nejnovější poznatky o výzkumu a vývoji tubusových světlovodů	18
2.4	Popis funkce a základních prvků tubusových světlovodů.....	21
2.4.1	Vedení světla tubusovými světlovody	24
2.5	Tubusové světlovody a normativní požadavky	26
3	ZVOLENÉ METODY PRÁCE	28
3.1	Experimentální část	28

3.1.1	Měření osvětlenosti.....	28
3.1.2	Měření spektrální odraznosti	38
3.1.3	Hodnocení spektrální propustnosti světlovdů.....	38
3.2	Počítačové simulace a hodnocení světelné účinnosti světlovodu.....	40
3.2.1	Stanovení účinnosti světlovodu	42
4	VÝSLEDKY	44
4.1	Výsledky měření osvětlenosti.....	44
4.2	Výsledky měření spektrální odraznosti	47
4.3	Vyhodnocení spektrální propustnosti světlovdů	49
4.4	Výsledky počítačových simulací	50
4.4.1	Porovnání dat z měření a simulací a analýza výsledků	50
4.4.2	HOLIGILM simulace pro podmínky jasné a zatažené oblohy	54
4.4.3	Vyhodnocení účinnosti světlovodu.....	54
4.4.4	Zhodnocení energetické účinnosti tubusového světlovodu	59
4.4.5	Diskuse vyhodnocených výsledků.....	62
5	ZÁVĚR.....	75
5.1	Shrnutí dosažených výsledků.....	75
5.2	Přínos dizertační práce.....	77
5.3	Doporučení a navazující cíle	78
6	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	79
	SEZNAM POUŽITÝCH TABULEK	90

SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ	91
SEZNAM POUŽITÝCH FYZIKÁLNÍCH VELIČIN A JEDNOTEK	95

1 ÚVOD

Slunce je nenahraditelný zdroj slunečního záření a denního světla, které je klíčovou psychologickou a fyziologickou potřebou lidského organismu. Lidská existence a veškeré biologické aktivity na Zemi jsou poháněny sluncem. Denní světlo bylo v lidských dějinách převládajícím a nenahraditelným zdrojem osvětlení. Až průmyslová revoluce přinesla vývoj umělých osvětlovacích zdrojů. Ovšem umělé osvětlení nedokáže nahradit sluneční světlo. Rozvoj měst a vývoj účinných elektrických světel přinesl v minulém století oddělení lidí od nejzdravějšího a nejlepšího zdroje osvětlení: přirozeného světla. Současné světové výzkumy poukazují na problémy spojené s nedostatečným osvětlením a prosluněním budov. Jedním z hlavních úkolů při návrhu vhodného prostředí budov je zajištění dostatečného denního osvětlení. Způsobů, jak toho dosáhnout je celá řada, a to, např. okny, střešními světlíky, prosvětlovacími pásy atp., nicméně tato dizertační práce pojednává výhradně o technologii tubusových světlovodů.

1.1 TÉMA DIZERTAČNÍ PRÁCE

Téma dizertační práce je zaměřeno na alternativní možnosti přenosu denního světla do vnitřních prostorů budov pomocí tubusových světlovodů. Ve stavební praxi se objevuje mnoho požadavků na přivedení denního světla do vnitřních prostor budov světlovody, ať už za účelem splnění normových hygienických standardů nebo jen za účelem zlepšení komfortu vnitřního prostředí. Výpočet množství přeneseného světla tubusovými světlovody z exteriéru do interiéru budov je poměrně složitý a jeho přesnost je výrazným způsobem závislá na informacích o optických vlastnostech materiálů poskytovaných výrobcem světlovodů. Výsledky teoretických výpočtů jsou pak zatíženy velkou odchylkou danou nepřesnostmi ve vstupních datech. Z těchto důvodů byla práce zaměřena na experimentální měření dvou různých typů tubusových světlovodů o srovnatelném vnitřním průměru tubusu za stejných vnějších i vnitřních okrajových podmínek, a tak zhodnotit vliv optických vlastností prvků světlovodů, především pak odraznosti tubusu světlovodu na jeho světelnou účinnost.

1.2 CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE

- Cíl 1: Vytvoření přehledu poznatků týkajících se denního osvětlení budov pomocí světlovodů. Popsání historického vývoje systémů vedení světla a současné možnosti a technologie tubusových světlovodů.
- Cíl 2: Vybudování konstrukce s osazením dvou sestav tubusových světlovodů za účelem světelných měření a jejich vzájemného porovnání. Příprava potřebného hardware a software pro záznam naměřených dat. Provedení kontinuálního měření denního osvětlení v rovině pod tubusovými světlovodami po dobu jednoho roku.
- Cíl 3: Provedení měření spektrální odraznosti materiálů použitých pro vnitřní povrch tubusových světlovodů. Stanovení hodnot světelné odraznosti tubusů využitelných jako vstupních hodnot pro světelná modelování tubusových světlovodů.
- Cíl 4: Vyhodnocení výsledků měření, provedení simulací v programu Holigilm a porovnání účinnosti přímých tubusových světlovodů v závislosti na jejich rozměrech a odraznosti vnitřních povrchů.
- Cíl 5: Vyhodnocení možné úspory elektrické energie v případě využití tubusových světlovodů místo zdrojů umělého osvětlení.
- Cíl 6: Zhodnocení možností využití tubusových světlovodů v budovách a doporučení pro jejich praktické využívání.

1.3 STRUKTURA DIZERTAČNÍ PRÁCE

V kapitole 2 této práce jsou shrnuty poznatky o denním světle, jeho významu pro lidský organismus. Dále je zde popsán historický vývoj v oblasti tubusového vedení denního světla do interiéru objektů až po současné vědecké poznatky v této oblasti.

Ve třetí kapitole je popsána metodika práce. Jsou zde detailně popsána všechna prováděná měření. Rovněž jsou zde popsány konstrukční detaily testovacích zařízení, použitý hardware a software.

Čtvrtá kapitola obsahuje vyhodnocení výsledků všech provedených měření. Dále je zde provedena simulace denního osvětlení světlovody a porovnání s výsledky měření.

V závěrečné páté kapitole je popsáno zhodnocení dosažených výsledků, jejich praktické využití a nastínění dalších možných cílů dalšího pokračování hodnocení tubusových světlovodů pro jejich využití v budovách.

2 SHRNUÍ SOUČASNÉHO STAVU

2.1 SLUNEČNÍ ZÁŘENÍ A JEHO OBECNÉ VLASTNOSTI

Elektromagnetické záření je součástí ucelené teorie elektromagnetického pole. Vlnové délky elektromagnetického záření se mohou pohybovat v širokém intervalu od řádu 10^{-13} m (u gama záření) a kratších až po tisíce metrů a delší. Z širokého spektra elektromagnetických vln se světlem nazývá pouze úzká oblast viditelného záření v intervalu 380 nm – 780 nm [1]. Fotometrické veličiny popisují zdroj světla pomocí celkové zářivé energie vysílané zdrojem.

Světlo je také chápáno jako zdroj světelných kvant – fotonů. Podle Planckovy a Einsteinovy kvantové teorie [2] je elektromagnetické záření vyzařováno a pohlcováno nespojitě v kvantech energie, tzv. fotonech. Energie fotonu E , lze vyjádřit jako

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (1)$$

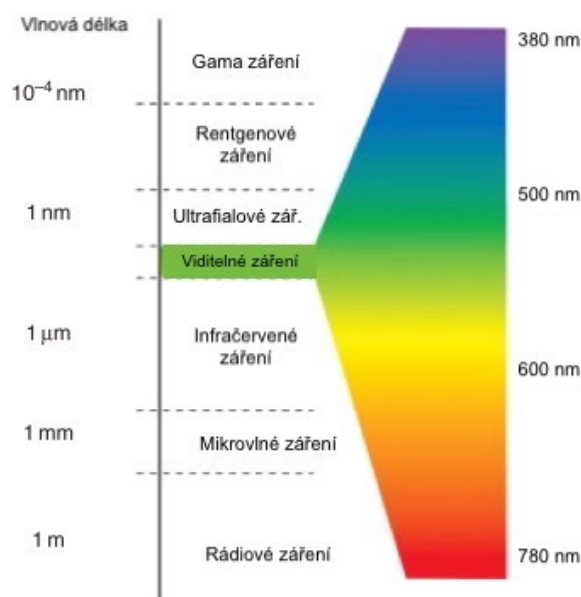
kde

h je Planckova konstanta, $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ J.s

c je rychlost světla, $c = 300\,000$ km/s

λ je vlnová délka záření

Z celkové zářivé energie se však pro zrakový vjem uplatňuje pouze část, a to část přenášená viditelným zářením – světlem. Podle spektrální citlivosti lidského oka je definováno barevné spektrum viditelného záření.



Obr. 2.1 Elektromagnetické spektrum [3]

Množství slunečního záření dopadajícího na samotný zemský povrch je ovlivněno interakcemi probíhajícími průchodem slunečních paprsků přes atmosféru. V závislosti na podmínkách oblohy a typu oblohy je množství slunečních paprsků odraženo anebo pohlceno v atmosférické vrstvě. Výsledné množství dopadajícího záření se skládá částečně z UV záření, viditelného světla a z krátkovlnného infračerveného záření (tzv. NIR – Near Infrared Radiation) [4]. Tok sluneční energie procházející plochou 1 m², kolmou na směr paprsků za 1 s mimo atmosféru Země, nazýváme solární (sluneční) konstantou. Konstanta zahrnuje celé spektrum slunečního záření. Přibližná hodnota solární konstanty je 1366,1 Wm⁻² [5].

2.1.1 Fotometrické veličiny

Při zkoumání možností přenosu světla v závislosti na různých okrajových se nelze obejít bez užití základních fotometrických veličin, jakými jsou světelný tok, svítivost, osvětlenost a jas [6].

Světelný tok Φ udává množství světla vyzářeného tělesem do prostoru. Jednotkou světelného toku je lumen [lm]. Jedinou veličinou patřící do základní soustavy SI je svítivost I. Svítivost vyjadřuje množství vyzářeného světelného toku světelným zdrojem do prostoru. Jednotkou svítivosti je kandela [cd]. Osvětlenost E je vyjádřena v luxech [lx] a udává míru

osvětlení určité plochy. Jas L [$\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$] nám udává stupeň vjemu světlosti tělesa nebo plochy lidským okem. Pro tuto práci byly také důležité hodnoty světelné odraznosti ρ [-] tubusů světlovodů a světelné propustnosti τ [-] transparentních částí světlovodů.

Tab. 2.1 Tabulka fotometrických veličin

Veličina	Označení	Jednotka
Světelný tok	Φ	lumen [lm]
Svítivost	I	kandela [cd]
Osvětlenost	E	lux [lx]
Jas	L	[$\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$]
Světelná propustnost	τ	[-]
Světelná odraznost	ρ	[-]

2.2 DENNÍ SVĚTLO

V minulosti byla činnost člověka vždy závislá na momentálním množství denního světla. Pro přivedení denního světla do interiéru se tradičně a v největší míře používají okna, ale také střešní okna a vikýře nebo světlíky. Moderní budovy mají dnes prosklené stěny nebo části střech. Přímé sluneční světlo procházející oknem je důležité pro proslunění místností, avšak v době intenzivního slunečního svitu může způsobit oslnění. Rozptýlené oblohové světlo je vhodnější pro rovnoměrné osvětlení místností, avšak zvláště u velkých místností mnohdy neposkytuje dostatek denního světla ve větších vzdálenostech u oken, zvláště v době zatažené oblohy.

2.2.1 Denní osvětlení a jeho vliv na život

Žijeme v době, kdy převážnou část našich životů trávíme uvnitř budov. Jedním ze způsobů, jak si udržet kontakt s venkovním prostředím je přivedení slunečního záření do budov. Jak je známo sluneční záření má nenahraditelný vliv na fungování všech živých organismů na Zemi. Výzkumy ukazují, že denní světlo má vliv na lidské zdraví. Světlo zachycené pomocí očí stimuluje nervová centra v mozku, určující rozložení každodenního rytmu a tělesné pohody. Sezónní afektivní porucha (Seasonal Affective Disorder – SAD) je dobře zdokumentovaná biochemická nerovnováha vyplývající z nízkých úrovní přirozeného světla v zimním období. Expozice úrovní osvětlení 10 000 luxů nebo více má vliv na snížení této nerovnováhy [7]. Je známo, že větší vystavení přirozenému světlu snižuje účinky této poruchy.

Nedostatek denního světla má tedy přímý vliv na fyzický i duševní stav člověka. V porovnání s umělým osvětlením má denní osvětlení mnoho výhod. Jednou z hlavních je přirozené světelné spektrum a dynamika změn osvětlenosti. Klasické zdroje umělého osvětlení jsou statické bez možnosti změn osvětlenosti. Moderní zdroje elektrického osvětlení již mají možnost dynamického stmívání v odezvě na venkovní světelné podmínky [8].

Využití denního světla v budovách je tedy velmi prospěšné pro pohodu prostředí. Zajištění světelné pohody v budovách je nezbytné pro vhodné podmínky především v obytných budovách, ve školách a zdravotnických zařízeních. Vhodné světelné podmínky jsou nezbytné pro zajištění zdraví a pracovní výkonnosti na pracovištích. V neposlední řadě vhodné denní osvětlení představuje způsob úspory elektrické energie na umělém osvětlení, což je také v souladu s požadavky na udržitelný rozvoj. Existuje celá řada inovativních způsobů přivádění slunečního světla do zastavěného prostředí jako například využití velkých zrcadel a heliostatů, odrazných tubusů a optických čoček apod. Tyto systémy se uplatňují v rámci výzkumných projektů nebo na architektonicky významných budovách. Širšímu využívání těchto systémů brání většinou vysoké pořizovací náklady a také specifické návrhové požadavky.

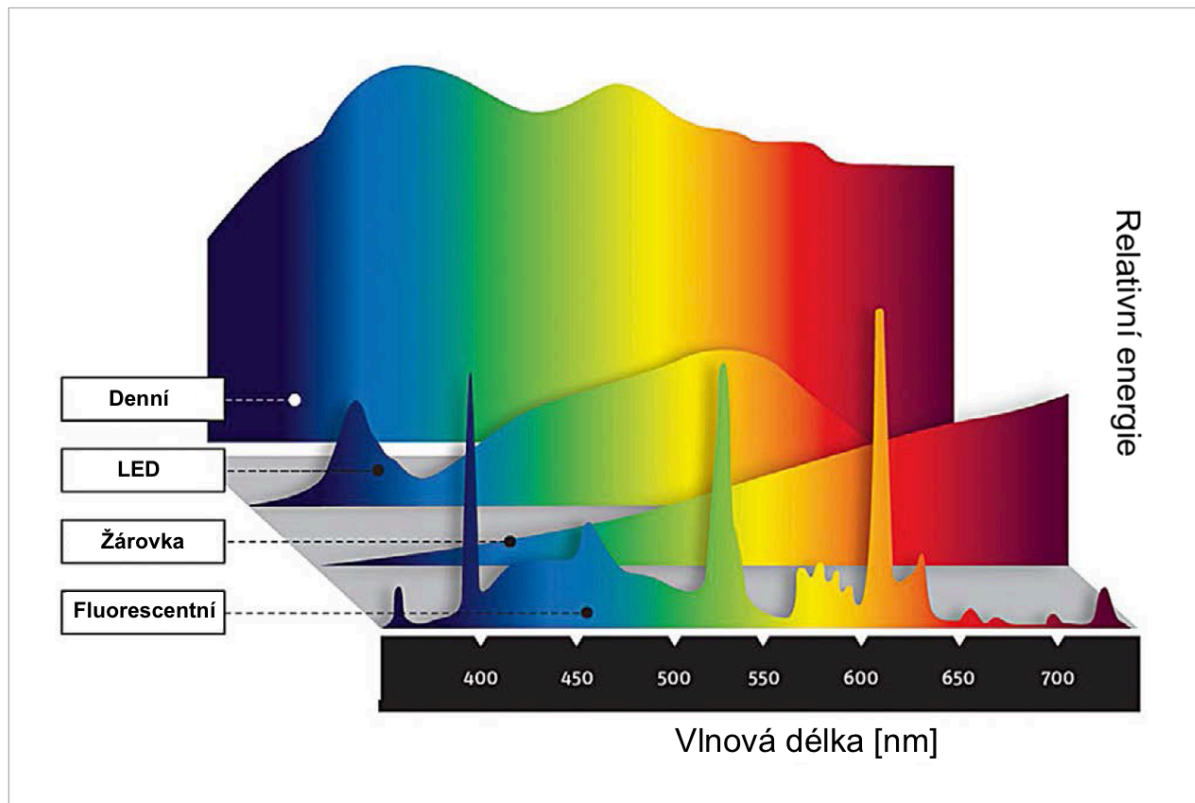
2.2.2 Denní světlo

Distribuce přirozeného světla napříč spektrem viditelného světla se neustále mění podle stavu oblohy a denní doby. Neustále dochází ke změnám v osvětlenosti, ale také ke změnám

barvené teploty (teploty chromatičnosti). Teplota chromatičnosti T_c je rovna teplotě černého zářiče, jehož záření má tutéž chromatičnost jako uvažované záření. Udává se v Kelvinech (K). [9].

Barevná teplota přirozeného světla se pohybuje od méně než 5 000 K pro slunce a střešní okno po více než 2 000 K pro modrou severozápadní oblohu [10]. Ačkoli umělé světelné zdroje mohou být vyrobeny tak, aby napodobovaly spektrální distribuci přirozeného světla se značnou přesností, variabilitu je mnohem obtížnější kopírovat a jejich výroba je nákladná, protože zdroje umělého světla mají tendenci mít velmi definovaný vrchol v krátkém rozsahu vlnových délek [11]. Například nízkotlaké sodíkové výbojky jsou jednobarevné a vykazují maximum kolem 600 nm. Přirozené světlo je nejlepší pro barevnou diskriminaci a je základem pro index podání barev R_a (v zahraniční literatuře označovaný jako Colour Rendering Index – CRI). Hodnota indexu podání barev R_a může být v rozmezí od 0 do 100. Ve světle teplotních zdrojů a v přírodním (denním) světle se barvy předmětů vnímají nejvěrněji, čemuž odpovídá $R_a = 100$. Naopak v monochromatickém žlutém světle nízkotlakých sodíkových výbojek se barvy nerozlišují vůbec, a tedy $R_a = 0$ [9].

Tam, kde je požadována přesná shoda barev, například kontroly barevného tisku, je nutná vysoká hodnota indexu podání barev, obvykle vyšší než 90. Je proto důležité, aby inovativní zařízení pro denní světlo negenerovaly barevné posuny, které nepříznivě ovlivňují spektrum přirozeného světla, protože to sníží index podání barev vyzařovaného světla.



Obr. 2.2 Typická světelná spektra pro denní osvětlení a umělé zdroje: žárovka, fluorescentní a LED [12]

2.2.3 Denní osvětlení v budovách

Denní osvětlení se skládá ze dvou složek. Jednou z nich je přímé sluneční záření, druhou je difuzní světlo z oblohy a světlo odražené od terénu a venkovních okolních překážek. K osvětlenosti v interiéru přispívá také jeho vnitřní vybavení a barevné řešení, geometrické uspořádání, to vše ovlivňuje vnitřní odraznou složku. Stejně jako nedostatek denního světla, může negativně ovlivnit vnitřní prostředí i přímé sluneční záření a s ním spojené nadměrné tepelné zisky i riziko oslňování.

Tradičním stavebním prvkem pro denní osvětlení interiéru jsou okna. Přestože v současné době jsou okna technicky na vysoké úrovni, nelze je použít ve všech případech, kdy požadujeme přivést denní světlo do místností. Například u velkých místností, místnosti uvnitř dispozice a vnitřních chodeb nejsou okna použitelným řešením. V některých případech může být řešením instalace střešních světlíků. Ovšem přímé sluneční záření procházející přes světlíky

je v případě jasné oblohy tak intenzivní, že znemožňuje vytvoření optimálních pracovišť z hlediska světelné pohody. Dalším řešením je vybudování atria v dispozici budovy. Největší nevýhodou je snížení užité plochy a zastínění samotným objektem.

2.2.4 Potenciální úspory ve spotřebě energie na osvětlení

V současné době je převážná část umělého osvětlení v budovách zajišťováno pomocí elektrické energie. V České republice se podíl elektrické energie spotřebované na umělé osvětlení pohybuje průměrně mezi 10 až 12 % z celkové spotřeby energie dodané spotřebitelům [13]. V zimním období může dosahovat ve špičkách až 20 % z celkové spotřeby.

V období od 1. 1. do 31. 12. 2020 bylo v České republice spotřebováno 71,4 TWh elektriny [14]. Při uvažování 10 % podílu tedy připadá na umělé osvětlení spotřeba 7,14 TWh. Technologie umožňující přivedení denního osvětlení budov je jedním ze způsobů, jak účinně snižovat spotřebu energie na osvětlování budov. Dostatečné denní osvětlení budov může nejen snížit spotřebu elektrické energie v budovách, ale také zlepšit kvalitu vnitřního prostředí.

2.3 TUBUSOVÉ SVĚTLOVODY

Mezi inovativní způsoby vedení denního světla lze zařadit tubusové světlovody. Světlo je přenášeno přes exteriérový sběrač (většinou kopuli) a tubus s vysoce odrazným povrchem (obvykle s minimální odrazností 95 %) do interiéru. Kombinací vhodného rozmístění oken a tubusových světlovodů lze dosáhnout vyváženého denního osvětlení v celé místnosti. Mezi hlavní výhody světlovodů patří přenášení především přímého, ale z části i difuzního světla a jeho rovnoměrné rozptýlení v interiéru. Dále díky vysoce odraznému povrchu lze světlo přenášet i přes výšku několika podlaží. S narůstající délkou však klesá účinnost světlovodu.

Tubusové světlovody jsou často využívány jako doplňkové osvětlovací prvky pro obytné místnosti. Velmi časté využití je i ve školských a zdravotnických zařízeních. V žádném případě ale nemohou světlovody nahradit okna. Většinou nacházejí uplatnění v chodbách a bezokenních místnostech uprostřed dispozic, nebo jako doplňkové zdroje v případě velkých místností a prostor vzdálených od oken.

2.3.1 První historické zmínky a poznatky o vedení světla světlovedy

První pokusy přenést světlo na delší vzdálenosti jsou datovány do starověkého Egypta [15]. Jako prvního předchůdce světlovedů můžeme označit šachtice s vnitřním povrchem ze zlatých plátů pro zlepšení odraznosti. Další významný posun nastal až v 19. století, kdy se nezávisle na sobě pokusili o potrubní vedení světla vědci z Ruska i USA. Jedním z prvních byl Čikolev, který se pokoušel o rozvod světla z centrální elektrické lampy. Své dílo realizoval v roce 1874, následně zdokumentoval a publikoval v roce 1880 [16]. Současně s Čikolevem řešili problém vedení světla vědci v USA. Neal a Lake získali patent v roce 1878, Wheeler v roce 1881. Dále se zabývali touto problematikou Molera a Cebrian [17], kteří publikovali své návrhy v roce 1879. Tubusový světloved se střešním parabolickým zrcadlem pro transport denního světla do suterénu si nechal patentovat Hanneborg z Norska v roce 1901 [18]. Koncept vedení světla tubusovým prvkem byl později znovuobjeven a patentován v roce 1975 (Aizenberg a Buchman) [19]. Patentované systémy umožňovaly propustnost slunečního záření a umělého světla pomocí šěrbinových světlovedů. V roce 1980 byla zahájena sériová výroba v SSSR a dochází k širšímu užití tubusových světlovedů v budovách [20].

2.3.2 Vývoj technologie tubusových světlovedů mezi lety 1980 až 2000

Pasivní solární světlovedy byly vyvinuty ve své současné podobě na konci 80. let minulého století a využívaly pokroky ve vývoji reflexních materiálů, které byly využity pro vnitřní povrch tubusů. Tvar průřezu se měnil, ale pozdější vývoj a komercializace se soustředily téměř výhradně na kruhový průřez.

Řada autorů přispěla svým výzkumem k rozšíření poznání v oblasti tubusových světlovedů určených k přenosu denního světla. V roce 1987 byla publikována práce popisující tubusové světlovedy trojúhelníkového průřezu a jejich účinnost pro transport světla byla hodnocena experimentálně (Zastrow a Wittwer, 1987) [21]. Pro trojúhelníkový světelný tubus o délce 0,12 m s délkou strany 0,01 m a vnitřní odrazností 0,95 byla vypočtena účinnost 0,296. To dobře odpovídalo experimentální hodnotě účinnosti 0,32. Práce také uvedla první rovnici popisující výkon světelného tubusu z hlediska klíčových parametrů ovlivňujících propustnost. Myšlenka pasivních solárních světelných tubusů však nebyla v té době obecně přijata, protože

zahrnovala pouze světelné tubusy, které byly použity při přenosu koncentrovaného slunečního světla (Littlefair, 1989) [22].

Obecně přijímaný předpoklad byl, že taková zařízení, jako světlovody, nejsou vhodná pro použití v podmínkách s převažujícím difuzním světlem, protože dostatečně dobře nefungují bez přímého osvětlení. Pasivní světlovodný tubus nebyl v té době široce známou technologií. Ačkoli pozdější práce také zahrnovaly informaci o pasivních světelných tubusech (Littlefair, 1996) [23] a o technologii denního osvětlení skrze duté kovové tubusy s leštěným vnitřním povrchem. Tato práce se zaměřila na diskusi o použití světlovodů pro transport koncentrovaného světla a krátce nastínila jejich použití jako pasivních solárních prvků. Nicméně dospělo se k závěru, že tubusový světlovod je životaschopná technologie pro denní osvětlení v budovách a je vhodná pro další výzkum a vylepšení pro praktické použití.

V polovině devadesátých začala technologie pasivních solárních světelných tubusů nalézat komerční využití. Snahou bylo zlepšit výkon světlovodů mnoha způsoby, včetně montáže laserem řezaných panelů (tzv. Laser Cut Panels – LCP) na nástřešní kolektor (Edmonds et al., 1995) [24]. Tato technologie byla navržena tak, aby přesměrovala světlo přicházející na kolektor a zmenšovala úhel dopadu světla od svislé osy světlovodného tubusu. To umožnilo snížit počet provedených odrazů světelných paprsků uvnitř tubusu. Edmonds et al. provedli matematické výpočty účinnosti zrcadlového světlovodného tubusu s ohledem na poměr jeho délky L k průměru D jeho kruhového průřezu (tzv. Aspect ratio). Došli k závěru, že standardní konstrukce by měla být omezena na poměry stran menší než šest. Rovněž byl proveden odhad účinnosti s vnitřní povrchovou odrazností 0,85, 0,90 a 0,95. Poté byl LCP namontován na standardní tubus a porovnán s referenčním tubusem bez LCP pod úhly slunce od 0 do 60° pomocí světelných boxů s luxmetry uvnitř. Dlouhodobé testy byly prováděny na testovacím místě v australském Sydney po dobu 5 měsíců. Bylo zjištěno, že při nízkém úhlu sluneční nadmořské výšky za jasného dne se systémem vybaveným LCP zvýšila osvětlenost až o 300 % a že nárůst výkonu světlovodu byl největší v zimních měsících, kdy je nižší výška slunce. Většina výsledků však byla zaznamenána pouze za jasných dní a v textu publikace nebyla provedena žádná diskuse o výkonu systému za oblačných podmínek. Efekt přesměrování světla pomocí LCP by byl při rozptýleném světle výrazně omezen nebo dokonce eliminován a případné ztráty světla v tubusu světlovodu by mohly vést k nižším úrovním

osvětlení. Tato úvaha má menší význam v Austrálii, kde je index jasnosti oblohy vyšší než ve střeoevropském klimatu, kde dominuje difúzní světlo.

Přibližně ve stejnou dobu byla publikována další práce o světlovodech (Swift a Smith, 1995) [25]. Znovu se zde zkoumaly parametry ovlivňující světelnou propustnost světlovodem, a to teoreticky a experimentálně. Autoři komentovali zejména vliv spektrální odraznosti na spektrální distribuci světla. Jejich výpočty byly pro jednoduchost založeny na jediné vlnové délce světla. Očekávalo se, že použití tenké vrstvy stříbra jako odrazného materiálu vnitřního povrchu tubusu povede k tzv. „červenému posunu“ (k delším vlnovým délkám) a hliníkový vnitřní povrch by měl mít za následek tzv. „modrý posun“ (ke kratším vlnovým délkám) vyzařovaného světla. Jelikož výše uvedený dokument od Edmondse [24] nebyl v době psaní publikován, Swift a Smith se domnívali, že jejich práce byla po Zastrowovi a Wittwerovi [21] jedinou teoretickou analýzou účinnosti světlovodu. Jako první výzkumníci také využili integrační kouli se zmenšeným modelem světelného tubusu. Zjistili, že účinnost světlovodu byla extrémně citlivá na změny hodnoty odraznosti, přičemž odchylka v odraznosti 0,001 způsobila významnou změnu účinnosti světlovodu. Rovněž vyhodnotili práci Zastrowa a Wittwera a dospěli k závěru, že model navržený v této práci byl platný pouze pro malé tzv. Aspect ratio, tedy pro malé délky světlovodů s tubusy větších průměrů, nízký úhel dopadu a vysokou odraznost.

Vědci z *University of Liverpool*, UK, publikovali ve stejném roce recenzi systémů dálkového elektrického osvětlení (Ayers a Carter, 1995) [26], které, i když byly původně určeny pro elektrické osvětlení, měly řadu aplikací pro systémy denního osvětlení. Autoři se odkázali také na dřívější práci Zastrowa a Wittwera [21], přestože u trojúhelníkových tubusů uvádějí hodnotu účinnosti 0,10, která se liší od hodnoty celkové účinnosti uvedené v práci (0,23). Ayers a Carter popsali systémy dálkového osvětlení z hlediska tří komponentů; světelný zdroj, transportní část a emitor. Ve své sekci o přepravě světla se Ayers a Carter zabývali dutými zrcadlovými světlovodnými tubusy pro elektrické světlo, založené na stejné technologii jako pasivní solární světlovodné tubusy. Poté byl zvolen průměr tubusu světlovodu 300 mm a pro jeho vnitřní povrch byla uvedena hodnota odraznosti 0,95, která jsou v současné době standardem u komerčních světlovodných tubusů. Autoři také popsali parametry ovlivňující účinnost takových zařízení jako jsou: povrchová odraznost, vstupní úhly dopadajícího světla a

proporce tubusu z hlediska poměru délky k ploše průřezu. To odpovídá odraznosti povrchu, úhlu slunečního zenitu a poměru stran ve světlovodech a je stejné jako parametry dříve stanovené Zastrowem a Wittwerem.

V srpnu téhož roku byla univerzitou *University of Calgary* předložena zpráva zabývající se výkonem světelným světlovodů (Love a Dratnal, 1995) [27]. Práce byla určena k určení parametrů ovlivňujících účinnost a byla založena na srovnání řady komerčně dostupných produktů světlovodů různých tvarů a velikostí. Byl také zkoumán vliv délky a přítomnost ohybů tubusů na účinnost. Zpráva nicméně představila parametrickou studii komerčních produktů a určila vliv délky na účinnost a také umožnila srovnání mezi dostupnými produkty. Rovněž se došlo k závěru, že účinnost přenosu difuzního světla byla nižší než přímé světlo.

V roce 1997 byla publikována první práce o světlovodech na základě výzkumu prováděného na *University of Nottingham, UK* (Shao et al., 1997) [28]. Na základě měření na zmenšeném modelu místnosti o rozměrech $0,7 \times 0,7 \times 0,5$ m byla měřena osvětlenost denním světlem a stanoven poměr vnějšího a vnitřního osvětlení během zimní sezóny pro světelný tubus o délce 1,2 m a průměru 0,33 m. Během měření se měnila také odraznost vnitřního povrchu modelu. V zmenšeném modelu dosáhla vnitřní osvětlenost přibližně 14 % vnější úrovně osvětlenosti. Došlo zde však k problémům se zpožděním záznamu mezi externími a interními hodnotami, které nebyly zaznamenány souběžně. Navzdory této nepřesnosti se zjistilo, že v listopadu ve Velké Británii poskytovalo difuzní světlo vyšší poměr mezi vnitřními a vnějšími naměřenými hodnotami než přímé světlo. Byl učiněn závěr, že úroveň světla 100 lux vypočítaná z naměřených hodnot by mohla přinést 30 % úsporu v požadavcích na elektrické osvětlení. Další práce byly publikovány stejnou výzkumnou skupinou v následujících letech (Shao a Callow, 2003 [29]; Elmualim et al., 1999 [30]; Oakley et al., 2000 [31]; Shao et al., 1998 [32]; Shao a Riffat, 2000 [33]; Smith, Oakley et al, 2002 [34]) a zahrnovaly další monitorování instalovaných světlovodů.

Práce z roku 1998 se zaměřila zejména na účinnost instalovaných systémů na řadě míst a zjistila vyšší úroveň osvětlení pro instalace s tubusy kratší délky nebo většího průměru (Shao et al., 1998) [32]. K měření osvětlenosti v mřížce pod instalovanými světlovody byl použit jediný luxmetr. Nebylo možné současně měřit vnější osvětlení. Stav oblohy byl proto během

testů popsán kvalitativně a kvantitativně pomocí jediného měření po každém interním testu. Po analýze světelných měření ze čtyř budov byl učiněn závěr, že existují přísná omezení počtu ohybů a celkové délky, která by měla být doporučena pro instalace tubusů. Bylo také uvedeno, že výhody světelných tubusů nespočívají jen v úspoře energie, ale představují možnosti transportu denního světla do budov a tím i zlepšenou vizuální kvalitu vnitřního prostředí.

Během stejného časového období publikovali další výzkumníci práce týkající se výkonu světelných tubusů. Práce z Kanady a USA byla publikována na konferenci v Ottawě v roce 1998. Například vědci z Queen's University, Kingston, popsali práci na monitorování standardního světlovodu o průměru 330 mm a délce 1,83 m (Harrison et al., 1998) [35].

Práce publikované v následujícím roce (Elmualim et al., 1999) [30] popsaly další možnosti přenosu přirozeného denního světla v kombinaci s přirozeným větráním. Bylo navrženo, aby infračervená část slunečního spektra mohla být použita k ohřevu množství vzduchu, který obklopuje světelný tubus, což napomáhá přirozenému větrání, zatímco viditelná část spektra byla použita pro přirozené osvětlení jako dříve. Byly provedeny experimenty na prototypu takového světlovodu za účelem posouzení proudění vzduchu pro větrání a denního osvětlení světlovodem.

2.3.3 Nejnovější poznatky o výzkumu a vývoji tubusových světlovodů

Práce publikované v roce 2000 (Oakley, Riffat a Shao) byly založeny na stejných experimentálních principech jako práce z roku 1998 a zahrnovaly monitorování nainstalovaných systémů ve městě Shepshed, Leicestershire, UK. Čtyři tubusové světlovodby byly instalovány v kancelářské budově a dva v rezidenčním objektu (Oakley et al., 2000) [31]. Externí a interní měření byla opět provedena, ale ne souběžně. Bylo zkoumáno vnitřní osvětlení a poměr vnitřní a vnější osvětlenosti. Hodnoty vnitřní osvětlenosti byly typicky vyšší než 300 lux pro měřené oblasti a dospělo se k závěru, že v těchto oblastech by po většinu roku měla být možná až 100 % úspora energie prostřednictvím světlovodů.

Ve stejném roce byly publikovány další práce o kombinaci denního osvětlení světlovodby se systémy přirozeného větrání a topení (Shao a Riffat, 2000) [33]. Tato práce se však výrazně lišila od předchozí práce výzkumné skupiny, protože zde světelná měření byla provedena

pomocí několika luxmetrů, včetně jednoho umístěného do exteriéru. Monitorování úrovní světla v komorách o rozměrech $1,3 \times 1,3 \times 1,3$ m bylo prováděno pomocí záznamníku dat. To umožnilo souběžné sledování vnějších a vnitřních úrovní osvětlenosti. Práce také zjistila, že světlovody byly účinnější při přenosu přímého než difuzního světla, což byl odlišný výsledek od předchozí práce. Následující rok byla na univerzitě obhájena práce, která obsahovala některé informace z výše uvedených prací (Yohannes, 2001) [36]. Práce zahrnovala posouzení výkonu světelných tubusů v klimatických podmínkách Anglie pomocí komory pro denní osvětlení, také laboratorního měření a počítačové simulace. Výsledky těchto měření byly použity k diskusi o integraci denního světla ze světlovodů s elektrickým světlem a souvisejících úsporách energie.

Zhang a Muneer (2000) [37] zpracovali první práci popisující matematický model výkonu světlovodu. Jejich teoretický model byl doplněn o koeficienty určené údaji z měření. Tato publikace byla založena na dizertační práci od Zhang [38]. Carter (2002) [39] vyhodnotil tubusové světlovody různých rozměrů a délek a dokončil model světlovodu. Měření a hodnocení celých světlovodů popsal Callow (2003) [40] v jeho dizertační práci. Jeho experimenty byly prováděny ve Velké Británii a Singapuru. Marwae a Carter (2006) [41] publikovali výsledky monitorování praktických instalací tubusových světlovodů. Experimentální a numerická analýza pro vyhodnocení výkonu denního světla získaného světlovody s pevnými kolektory byla provedena skupinou Chella et al. (2006) [42], Baroncini et al. (2006) [43], Zazzini et al. (2006) [44]. Na základě zkušeností získaných při práci Boccia et al. [45] vyvinuli dvě inovativní zařízení, která zlepšují účinnost tradičních světlovodů. Prvním z nich je „Double Light Pipe“ (DLP), druhým „Ventilated Double Light Pipe“ (VDLP). DLP je schopen přenášet denní světlo do dvou pater podzemní budovy. VDLP umožňuje dopravu denního světla do podzemních prostor budovy a zaručuje nezbytnou výměnu vzduchu přirozeným větráním.

Kocifaj et al. (2008) [46] vyvinuli počítačový program HOLIGILM pro predikci účinnosti přímých světlovodů. Kocifaj (2009) [47] a Kocifaj et al. [48] rozšířili metodu HOLIGILM o stropní difuzor s čirými a rozptylujícími prvky a tubusy s ohyby. Darula et al. (2010) [49] použili HOLIGILM ke studiu propustnosti denního světla pomocí tubusu s ohyby. Hodnocení funkce světlovodného systému a stanovení konstrukčních požadavků zveřejnila Mohelníková (2009) [50]. Podrobnou analytickou metodu pro hodnocení vnitřního osvětlení ze

světlovodů na základě stanovené svítivosti difuzoru popsali Mohelníková a Vajkay (2007) [51]. Kim J.T. a Kim G. (2010) [52] představili přehled dvou optických systémů denního osvětlení – světlovodů (kolektor s optickým zařízením) a slunečních zrcadel, které oba autoři vytvořili. Rovněž porovnali výkon komerčních světlovodů různých průměrů. Su et al. [53], publikovali srovnávací monitorování komerčních světlovodů různých velikostí a tvarů za podmínek reálné oblohy a navrhli matematický model. Verso et al. (2011) [54] charakterizovali fotometrické vlastnosti trubicových světlovodů z hlediska účinnosti propustnosti světla. Přístup k hodnocení byl založen na simulacích a měřeních v simulátoru.

Tsang et al. (2018) [55] představili komplexní studii účinnosti přímého světelného tubusu a distribuce osvětlení pod úrovní stropu pomocí nástroje HOLIGILM. Získané výsledky zdůrazňují význam zohlednění klimatických dat v navrhování a posuzování světlovodů. Na základě výsledků může být vytvořena databáze optických parametrů různých světlovodů za různých podmínek počasí, která charakterizuje optické vlastnosti různých světlovodů v různých klimatických pásmech. Petržala et al. (2018) [56] představili analytické řešení optické účinnosti přímých světlovodů, které je použitelné pro všechny poměry velikostí. Výsledky byly porovnány s výsledky získanými z výpočtů HOLIGILM.

Kadir et al. (2019) [57] představili a porovnali studii výkonu denního světla dvou systémů světlovodů vybavených laserem vyřezávaným panelem (LCP) umístěným na vstupu světlovodu. LCP byly instalovány s odlišným úhlem sklonu. Mayhoub (2019) [58] představil přehled výzkumů a vývoje základních slunečních systémů budov za posledních padesát let. Byl zde také zahrnut krátký popis technologií a komponent osmnácti plně vyvinutých nebo komercializovaných systémů. Základní sluneční systémy budov byly klasifikovány a porovnány podle jejich návrhových přístupů k vytvoření společných rysů úspěšných systémů. Kim C.H. a Kim K.S. (2019) [59] vyvinuli metodu pro predikci vnitřního osvětlení pomocí standardního modelu oblohy CIE.

Baglivo et al. (2019) [60] se zabývali ve své práci efektivním rozmístěním tubusových světlovodů v místnosti s ohledem na polohu oken a pracovních ploch. Sungsoontorn et al. (2019) [61] experimentálně zkoumali použití kombinovaného tubusu použitého pro ventilaci a zároveň přenos světla (Light-Vent Pipe). Rezk et al. (2019) [62] zkoumali ve své práci

teoretický a experimentální výkon kombinovaného zařízení v podobě tubusových světlovodů a solárního ohřevu vody.

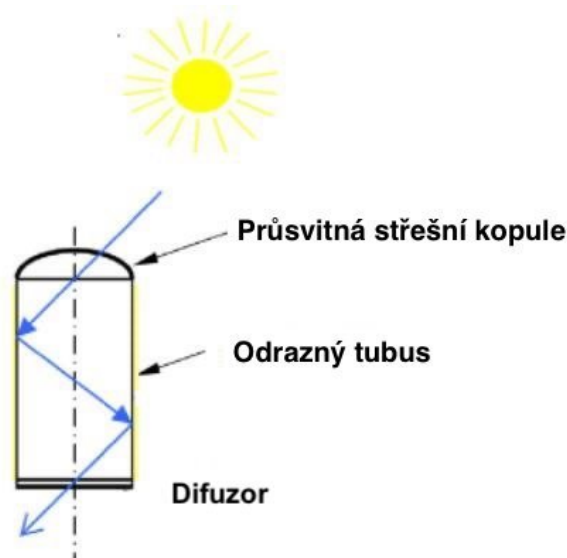
Obradovic a Matusiak (2020) [63] se zabývaly ve své práci použitím horizontálních tubusových světlovodů a odrazných panelů na delší vzdálenosti. Zkoumaly různé konfigurace včetně použití LCP na vstupu do tubusu. Heng et al. (2020) [64] představili možnosti přenosu světla dovnitř dispozice u výškových kancelářských budov pomocí horizontálních tubusových světlovodů. Byly posouzeny různé kombinace a tvary tubusů. Sibley a Pena-Garcia (2020) [65] představili srovnávací studii tubusových světlovodů s různou nadstřešní částí. Světelná měření byla prováděna ve 20minutových intervalech po dobu jednoho roku v koupelnách dvou nově postavených domů v Manchesteru ve Spojeném království. Lu et al. (2020) [66] se zabývali ve své práci multikriteriální metodikou hodnocení vhodnosti použití tubusových světlovodů v budovách.

Singh et al. (2021) [67] navrhli ve své práci možnosti optimalizace laserem řezaných panelů (LCP) za účelem zvýšení výstupního výkonu tubusového světlovodu. Experimentální výsledky byly porovnány se simulacemi. Mahawan a Thongtha (2021) [68] ve své práci zkoumali světelné veličiny při různých úhlech dopadu světelného paprsku na kopuli tubusového světlovodu. Úhel dopadu světla se měnil v rozsahu 0° až 80° v 5° intervalech. Bisht et al. (2021) [69] se ve své práci zabývali analýzou výkonu tubusového světlovodu v závislosti na různých tvarech světelného kolektoru. Obradovic a Matusiak (2021) [70] vyvinuly metodiku pro odhad účinnosti horizontálního tubusového světlovodu v závislosti na výšce a azimutu slunce. Sharma et al. (2021) [71] porovnávali ve své studii plochý kolektor s kopulovitým kolektorem. Srovnávali data ze dne letního slunovratu (21.června) a zimního slunovratu (21.prosince).

2.4 POPIS FUNKCE A ZÁKLADNÍCH PRVKŮ TUBUSOVÝCH SVĚTLOVODŮ

Světlovody jsou použitelné pro místnosti bez oken uvnitř dispozice. Dokážou přenášet světlo díky mnohonásobným odrazům na vnitřním odrazném povrchu. Převážná většina komerčně vyráběných tubusových světlovodů se skládá ze tří základních součástí. Těmito součástmi jsou sběrač denního osvětlení, tubus světlovodu a difuzor. Sběrač denního osvětlení má zpravidla tvar kopule a je umístěn na horním konci světlovodu v nadstřešní části. Naopak

na spodní části světlovodů je na interiérové straně umístěn difuzor. Jeho hlavní funkcí je rovnoměrná distribuce světla v interiéru. Světelná účinnost těchto systémů závisí na jejich rozměrech, především průměru a délce, dále na odraznosti vnitřního povrchu a propustnosti střešní kopule a interiérových difuzorů. Umístění světlovodné sestavy v budově a její způsob připojení hraje také klíčovou roli v přenosu denního světla.



Obr. 2.3 Světlovod a jeho základní části [72]

Nástřešní kopule světlovodu

Sběrač denního osvětlení (kolektor) je vždy umístěn na exteriérové straně tubusového světlovodu. Kolektor je nejčastěji umístován na střechu budovy, jejíž vnitřní prostory chceme osvětlit. Ve výjimečných případech mohou být kolektory zabudovány i vertikálně pro horizontální a šikmé světlovody, avšak takto vestavěné tubusové světlovody mají pouze doplňkovou funkci v kombinaci s umělým osvětlením nebo slouží k emitaci umělého světla z konkrétního zdroje. S umístěním v exteriéru je spojena správná instalace zajišťující především hydroizolační těsnost a odolnost vůči klimatickým podmínkám. Obvykle má sběrač denního osvětlení tvar kopule a je vyroben z transparentního plastu (případně skla) odolného proti účinkům ultrafialového záření. Kopule ze skla i transparentních plastů mají vysokou světelnou propustnost (v závislosti na typu materiálu a tloušťce, dosahuje světelná propustnost až 95 %). Kopule jsou v základním provedení číré. Pro lepší usměrnění světelných paprsků jsou kopule

některých výrobců vybaveny úpravami, které usměrňují vstup slunečních paprsků. Případně se vkládají dovnitř kopule zrcadlové plochy orientované ke směru dopadajících slunečních paprsků. Někteří výrobci dodávají kopule vybavené samočisticím povrchem.

Nástřešní sběrače denního osvětlení bývají zabudovány do střešní konstrukce obvykle na jižní až jihozápadní stranu, kde je vystavena nejintenzivnějšímu slunečnímu záření po co největší část dne.

Světlovodný tubus

Tubus světlovodu je vyroben z hliníkové slitiny a má zpravidla kruhový průřez. Provedení vnitřního povrchu tubusu lze rozdělit do dvou základních kategorií. První kategorii tvoří vnitřní povrchy z vysoce odrazné folie laminované na tělo tubusu. Druhou možností je nanášení metalické odrazné vrstvy pomocí technologií nanášení tenkých vrstev [73].

Světlovaný tubus představuje hlavní část celého systému, v rámci, kterého dochází k samotnému přenosu denního nebo umělého světla do požadovaných vnitřních prostor prostřednictvím světelných odrazů.

Co se průměru světlovodných tubusů týče, nejčastěji se provádí v rozměrech 50-1000 mm, kdy světlovody velkých rozměrů nad 1 000 mm a tzv. světlovodné šachty se využívají především u aktivních systémů osvětlení (doplňených soustavami optických čoček, otočných zrcadel a heliostatů). Aktivní systémy využívají také trubice malých průměrů i systémy optických vláken.

U zabudování tubusových světlovodů v rámci rezidenčních instalací je obvyklý průměr v intervalu 200 až 400 mm. U kancelářských prostor a komerčních instalací se jedná obvykle o průměr 500 mm a větší. Tvarem jsou v drtivé většině případů volené kruhové průřezy světlovodů, ale existují i čtvercové či obdélníkové. Čtvercové a obdélníkové světlovody se však používají velice zřídka, jelikož jejich účinnost z důvodu velkých světelných ztrát způsobených nižší odrazností v rozích, je podstatně menší.

Difuzor

Difuzor je instalován na interiérové straně tubusového světlovodu v částech místností, kde je potřeba přivést denní světlo. Difuzor musí být vyroben z materiálů umožňujících prostup světla v závislosti na interiérových požadavcích. Nejčastější je provedení z průsvitných polykarbonátů umožňujících rovnoměrný rozptyl světla. V případě požadavku na co největší výkon lze instalovat průhledné kryty, případně čočkovité difuzory.

Podle systému zabudování v podhledu rozlišujeme světlovody na:

- ukončené krytem zabudovaným ve stropní konstrukci;
- se sníženým tubusem volným (zrcadlovým nebo transparentním);
- se sníženým tubusem zabudovaným do zavěšeného podhledu.

Stropní difuzor by měl být vytvořen z co nejodolnějšího materiálu, aby odolal stárnutí a opotřebení, jelikož právě na něm závisí kvalita rozptýlení příchozího světla v interiéru. Stropní difuzor se vyrábí v mnoha různých designových provedeních, jelikož se od něj očekává i určitá estetická úroveň odpovídající osvětlované místnosti.

Doplňkové prvky světlovodů

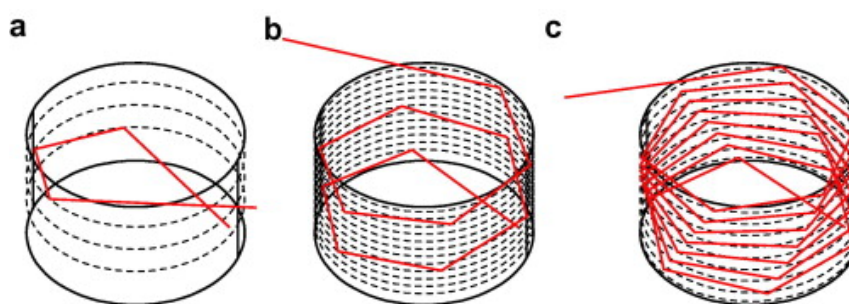
Tubusové světlovody a jejich základní komponenty lze doplnit o celou škálu doplňkových výrobků v závislosti na sortimentu daného výrobce. Mezi nejčastější typové doplňky patří nadstřešní lemy pro ukončení povlakové hydroizolace, různé typy tepelně izolačních panelů s izolačními skly. Dále pak prvky pro zvýšení komfortu v interiéru jako jsou stmívače a doplňkové integrované osvětlení.

2.4.1 Vedení světla tubusovými světlovody

Světlovodný tubus může být veden přímým směrem ze strany exteriéru do interiéru. V případě potřeby je možné na délce tubusu osadit kolena s regulovatelným úhlem. Tímto je možné kompenzovat sklon střechy, případně překážky v podobě vedení technologií apod.

Každý ohyb na trase světlovodu však znamená ztrátu v množství přeneseného světla. Průměry typizovaných světlovodných tubusů se obvykle pohybují v rozmezí 250–800 mm. Limitní celková délka se většinou v praxi určuje jako 20násobek hodnoty průměru [73]. Například pro světlovedy o průměru 530 mm je limitní délka zhruba 10 m. Průměr světlovodu společně s odrazností vnitřního povrchu jsou dva nejdůležitější faktory ovlivňující celkové množství světla přenesené světlovodnou soustavou do interiéru.

Světelné paprsky, které dopadají na kolektor jsou vedeny do samotného tubusu světlovodu. Vnitřní vrstva tubusu je tvořena materiálem, který je charakteristický vysokou odrazností, a tím je docíleno minimálních světelných ztrát. Světelné paprsky se v těle tubusu neustále odrážejí od reflexního povrchu, až dorazí na výstupní část difuzoru.



Obr. 2.4 Modelová trajektorie světelného paprsku [74]

Pro světlovodný tubus délky 2 m a průměr 0,52m. Uvažováno pro vstupní úhly světelného paprsku 30° (a), 60° (b) a 80° (c).

Ze stropního difuzoru je světlo rovnoměrně rozptýleno do vnitřního prostoru. Rozptýlené světlo je příjemné, neoslňuje ani nezkresluje barvy. Intenzitu záření je možné regulovat pomocí ručního nebo elektrického stmívače. Světlovod tak dokáže doplnit a někdy i nahradit zdroje elektrického osvětlení.

Z hlediska světelně technického představují světlovedy velký přínos především pro prostory, které nemohly být z rozličných důvodů dosud osvětlené denním světlem. Je nutné si však uvědomit, že s rostoucí délkou světlovodu a rostoucím počtem ohybů klesá účinnost světlovodu a dochází postupně ke značným světelným ztrátám [73].

2.5 TUBUSOVÉ SVĚTLOVODY A NORMATIVNÍ POŽADAVKY

Při stanovování konkrétních světelně – technických parametrů se v současné době vychází ze dvou základních kritérií, která mají za úkol charakterizovat úroveň osvětlení ve vnitřním prostoru budovy. První konkrétní parametr představuje tzv. *zrakový výkon*, který je definován jako množství podnětů zpracovaných zrakovým systémem za jednotku času [75]. Zrakový výkon je určen fyziologickými vlastnostmi samotného lidského zraku, a využívá se především v pracovních prostorech. Tento parametr se opírá především o charakteristiku lidského vidění, tedy v jakých vlnových délkách lidské oko nejlépe vidí, v jakém barevném spektru, a na jakou vzdálenost. Je to důležité pro vytváření vhodných světelných podmínek, které odpovídají vlastnostem lidského oka. Druhý parametr představuje tzv. *zraková pohoda*, která zahrnuje nejen technické požadavky z hlediska vizuálního vnímání, ale bere v potaz i psychické aspekty vlivu světla na lidské zdraví a pracovní výkonnost. Je tedy do velké míry ovlivněna subjektivními vlastnostmi a nároky uživatelů konkrétních prostor, proto je tento faktor zohledňován především v prostorech, které jsou určeny pro bydlení, zdravotní péči, ale také školní zařízení a stavby pro kulturní a sociální vyžití. Požadavky na světelnou pohodu budov mají zajistit, aby lidé v daném vnitřním prostoru nejen dobře viděli, ale aby se i vizuálně dobře cítili.

Cílem návrhových požadavků pro osvětlení je zajistit vytváření zrakové pohody uživatelů budov. Zraková pohoda představuje subjektivně příjemný a příznivý psychofyziologický stav, který je vyvolán vytvořením ideální optické situace vnějšího prostředí, který odpovídá konkrétním potřebám člověka při práci a při odpočinku, a umožňuje tak zraku optimálně plnit jeho funkci a poslání. Správné osvětlení, navržené podle zásad současné světelné techniky a respektující psychologické, fyziologické a biologické požadavky, ovlivňuje kvalitu práce, úroveň únavy i zdravotní stav celého lidského organismu. Cílem normových požadavků je alespoň po určitou část dne zajistit dostatečné množství denního světla pro pracovní činnosti, které uživatelé budov v těchto konkrétních interiérech vykonávají.

V roce 2019 byla do českých technických norem zavedena nová evropská norma ČSN EN 17037 Denní osvětlení budov [76]. Tato evropská norma, kterou jsou povinni začlenit do svých technických norem všechny státy Evropské unie, je platná pro všechny prostory, které

mohou být po delší dobu (více než 4 h denně, při návštěvě jednou denně) pravidelně užívány lidmi, s výjimkou případů, kdy je použití denního světla vyloučeno.

Tato nově zavedená norma definuje konkrétní parametry pro hodnocení denního osvětlení, a obsahuje principy pro výpočet a ověřování těchto parametrů. Norma obsahuje doporučení pro denní osvětlení v jednotlivých typech budov. Doporučené hodnoty osvětlenosti jsou poté klasifikovány do třech úrovní, a to minimální, střední a velká. Dle normy musí být zajištěny alespoň minimální hodnoty ve všech budovách. Norma ČSN EN 17036 uvádí tzv. cílovou osvětlenost pro hlavní města států EU.

Tubusové světlovody našly uplatnění jako doplňkové zdroje denního osvětlení v budovách. Pro jejich navrhování jsou vydána doporučení ve směrnici mezinárodní společnosti pro osvětlování CIE [77].

V nové evropské normě ČSN EN 17037 není uveden požadavek na osvětlenost světlovodů. Proto se v praxi se využití světlovodů pro budovy navrhuje pouze na předběžných posouzení anebo se tyto instalují na základě zkušeností z předchozích úspěšných realizací.

Z toho důvodu bylo v této dizertační práci provedeno hodnocení přímých tubusových světlovodů a posouzení vhodnosti jejich využití v budovách.

3 ZVOLENÉ METODY PRÁCE

Posouzení tubusových světlovodů bylo provedeno jak na základě světelných měření, tak pomocí počítačové simulace. V rámci experimentální části byla provedena dlouhodobá měření osvětlenosti. Dále byla provedena měření spektrální světelné odraznosti materiálů vnitřních povrchů světlovodů. Nakonec byly provedeny simulace denního osvětlení pomocí počítačového programu HOLIGILM pro vyhodnocení účinnosti přímých tubusových světlovodů různých průměrů a délek.

3.1 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

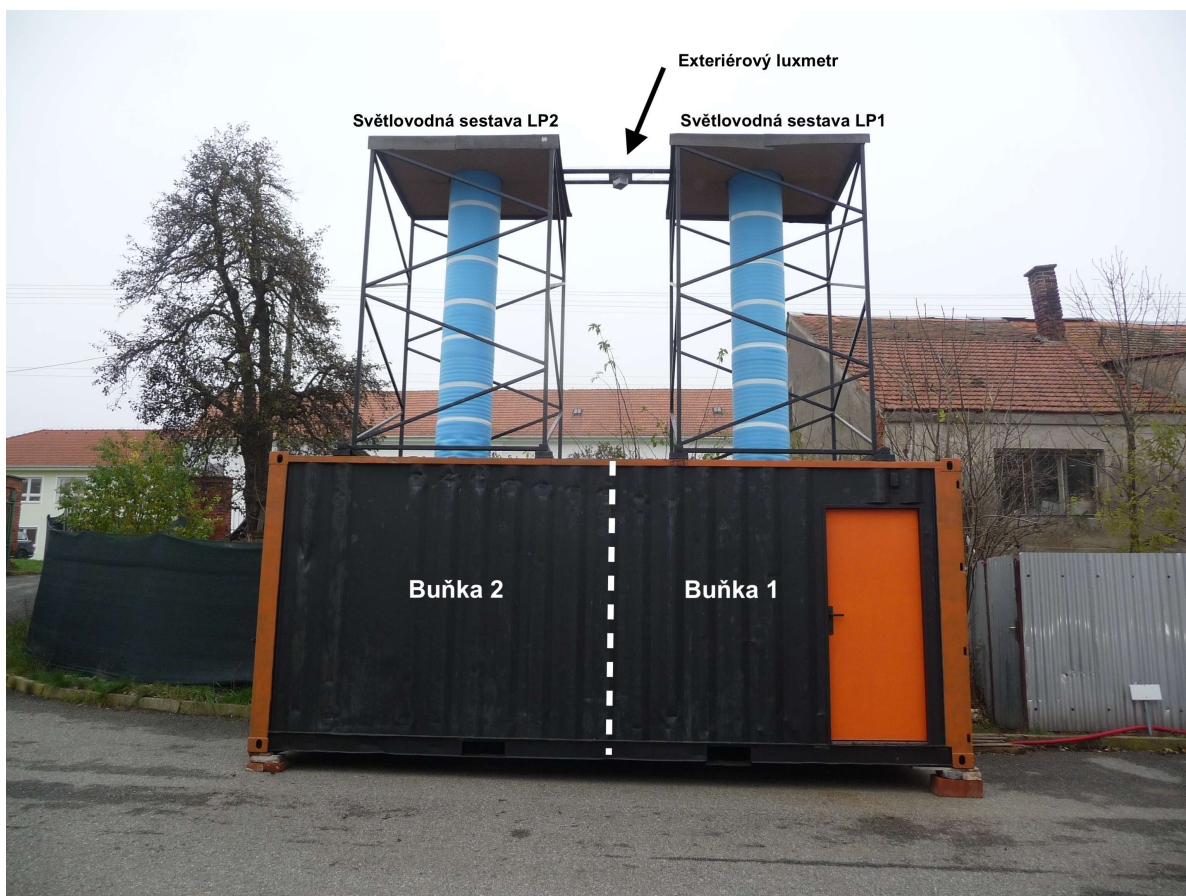
3.1.1 Měření osvětlenosti

Předmětem světelných měření byly dvě podobné soustavy tubusových světlovodů (dále jen LP, jako zkratka anglického názvu Light pipe). Měření probíhalo v mírných klimatických podmínkách v lokalitě Ostrovačice, okres Brno – venkov, Česká republika (zeměpisná šířka 49°12'39.08" severní šířky, zeměpisná délka 16°24'34.1" východní délky, nadmořská výška 330 m). Měření byla prováděna ve zkušebních buňkách po dobu jednoho roku, aby se vyhodnotila propustnost světla instalovaných tubusových světlovodů za různých vnějších podmínek. Naměřená data osvětlení byla zpracována a statisticky vyhodnocena.

Intenzity denního osvětlení na referenční rovině pod světlovody o délce 2,5 m a dvou průměrech 0,53 m a 0,55 m byly měřeny za reálných externích podmínek denního světla. Oba světlovody byly instalovány do ocelové nosné konstrukce a samostatně namontovány na kontejner, Obr. 3.1. Kontejner byl rozdělen na dvě identické buňky o rozměrech 2,3 m × 2,9 m a výšce 2,2 m. Každá buňka byla osvětlena jiným tubusovým světlovodem osazeným čirou akrylátovou kopulí v horní části a průsvitným difuzorem připevněným ke stropu testovacích buněk. Oba světlovody měly identické kopule a difuzory, ale tubusy měly na svých vnitřních površích různé reflexní povlaky.

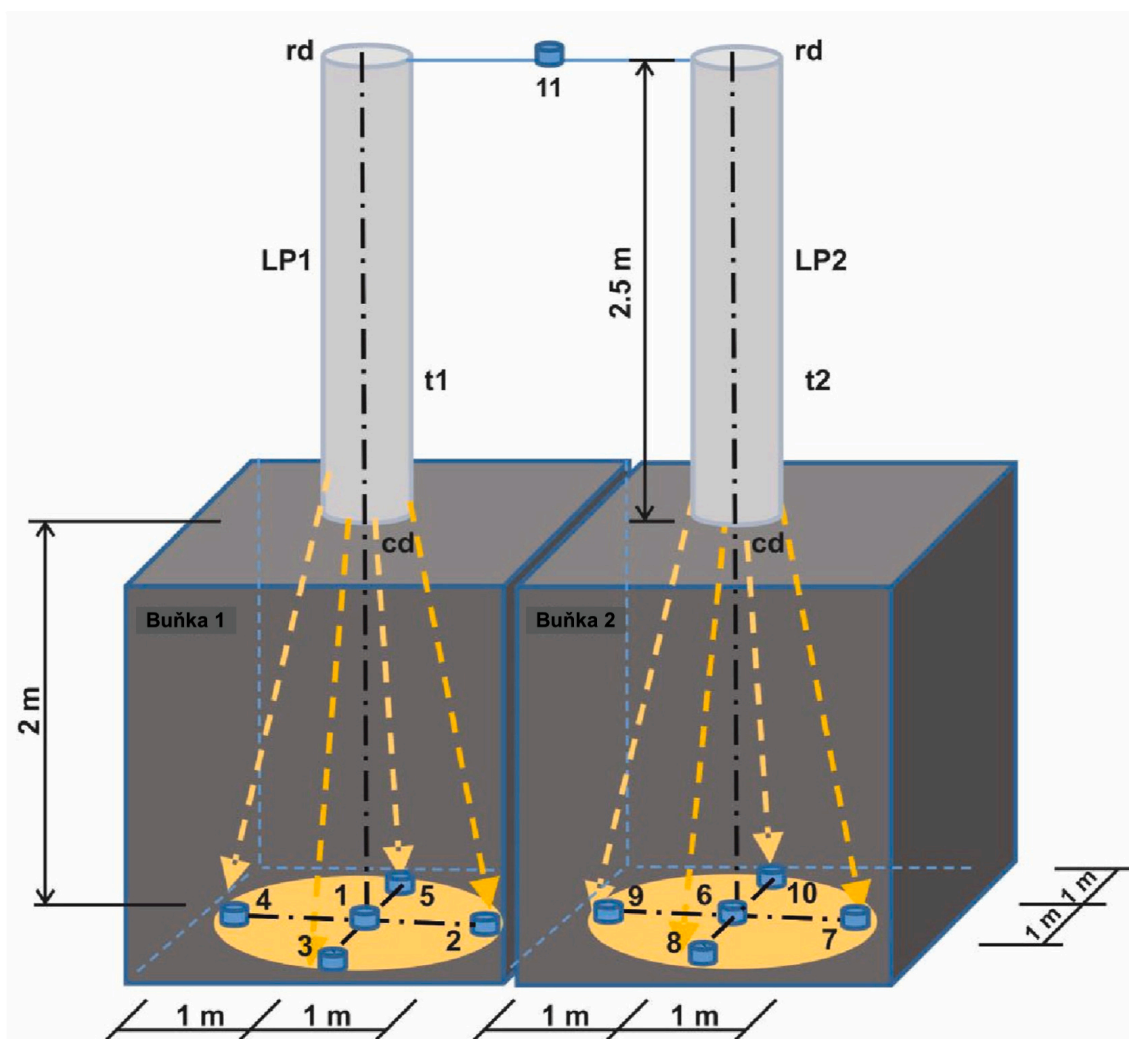


Obr. 3.1 Testovací kontejner s podpůrnou konstrukcí se světlovedy, Ostrovačice



Obr. 3.2 Testovací kontejner rozdělený na dvě buňky se světlovedy LP1 a LP2

Měření osvětlenosti byla prováděna pomocí sady luxmetrů umístěných v každé buňce a jednoho externího luxmetru. Pro měření osvětlenosti byly použity luxmetry CEM DT-86 (rozlišení 0,1 lx, přesnost $\pm 5\%$). Dvojice pěti sad luxmetrů byla upevněna na dřevěných profilech v horizontální poloze 2 m pod difuzory světlovodů. Každá sada se skládá z jednoho luxmetru umístěného ve svislé ose světlovodu a čtyř luxmetrů umístěných ve čtyřech pozicích ve vzdálenosti 1 m od osy, Obr. 3.3. Celkově jedenáct luxmetrů (2×5 interních a 1 externí) bylo propojeným elektrickým obvodem do sítě.



Obr. 3.3 Schéma instalace luxmetrů pod světlovodů

Zkratky: rd – střešní kopule, cd – stropní difuzor, t1 a t2 – tubusy soustav LP1 a LP2.

Světelná měření byla zaznamenávána za použití datové sběrnice. Doba záznamu osvětlení byla asi 20 ms. V případě tří srovnatelných hodnot byla zvolena a zaznamenána

datová číslice. Pokud výše uvedený postup nebyl úspěšný, postup se opakoval až čtyřikrát. Celkově lze dobu procesu prodloužit z 20 ms na 100 ms. Naměřená data byla dokončena pomocí třídícího softwaru v systému LabVIEW pro MS Windows. Byla sledována hladina denního osvětlení ze světlovodů o délce 2,5 m a průměru 0,53 m (buňka 1) a 0,55 m (buňka 2).

Jak je znázorněno na Obr. 3.3, LP1¹ představuje světlovod pro buňku 1 (průměr 0,53 m, délka 2,5 m) a LP2 je světlovod pro buňku 2 (průměr 0,55 m, délka 2,5 m). Čísla 1 až 5 jsou luxmetry umístěné v buňce 1 a čísla 6 až 10 jsou luxmetry v buňce 2, číslo 11 představuje čidlo externího luxmetru. Plastová průhledná kopule byla použita k zakrytí externího senzoru (ochrana přístroje před venkovní vlhkostí a deštěm). Sada 11 luxmetrů byla použita pro kontinuální sběr dat z ročního měření osvětlenosti. Data z externího luxmetru (senzor 11) byla upravena dle světelné propustnosti krytu ($\tau = 0,92$), uložena a shromážděna pro další výpočty.

Oba světlovody mají akrylátové kopule na horním konci a průhledný difuzor na stropu kontejneru z interiérové strany. Měření osvětlení bylo provedeno pomocí sady snímačů – pěti vnitřních luxmetrů v každé buňce (Obr. 3.3) a jednoho externího snímače, který je chráněn plastovým průhledným krytem.

Dvě pětičky luxmetrů byly upevněny na dřevěných profilech umístěných v poloze 20 cm nad úrovní podlahy zkušebních buněk. Každá měřicí sestava se skládá z luxmetrů umístěných v pozici svislé osy světlovodu (svislá vzdálenost mezi středním luxmetrem a stropním difuzorem je 2 m) a čtyřmi luxmetry umístěnými ve čtyřech polohách ve vzdálenosti 1 m od středové osy, Obr. 3.4.

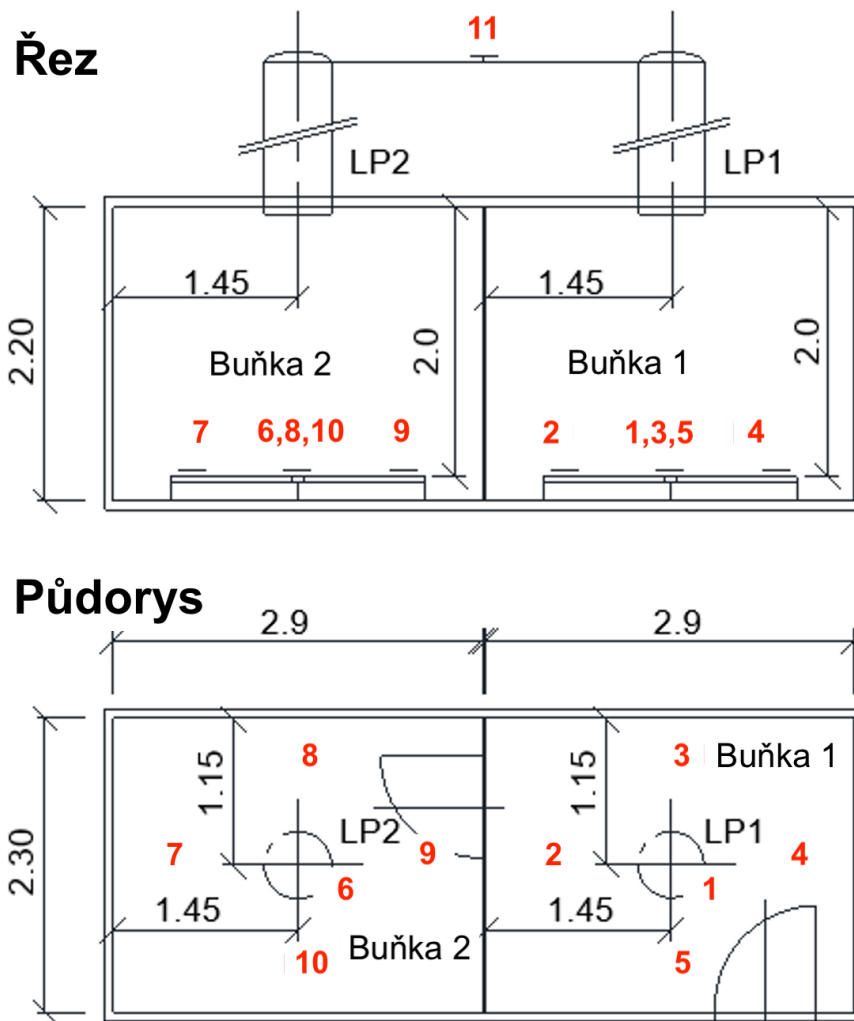
¹ Zkratka LP vznikla z anglického výrazu Light pipe



Obr. 3.4 Instalace měřicího zařízení – buňka 1 umístěná v části se vstupními dveřmi



Obr. 3.5 Instalace měřicího zařízení – buňka 1 a buňka 2 odděleny vnitřní příčkou s dveřmi



Obr. 3.6 Schéma rozmístění jednotlivých luxmetrů v buňkách

LP1 – Světlovod v buňce 1 (průměr 0,53m, délka 2,5 m), LP2 – Světlovod v buňce 2 (průměr 0,55m, délka 2,5 m), 11 – venkovní luxmetr snímající exteriérovou horizontální osvětlenost, 1–5 – vnitřní luxmetry v buňce 1, 6–10 – vnitřní luxmetry v buňce 2

Měřicí zařízení – popis hardware

Luxmetr DT-86 je jednoduchý ruční digitální luxmetr. Rozlišení na nejcitlivějším rozsahu je 0,1 lx, přepínání rozsahů se děje automaticky. Luxmetr neumožňuje naměřené hodnoty ukládat a není vybaven žádným výstupem pro další zpracování měřené hodnoty (analogovým ani digitálním). Za účelem sběru dat byl vyvinut elektronický odečítací obvod, který odečítá data z displeje luxmetru a na požádání je odesílá do nadřazeného systému, například počítače. Displej luxmetru je multiplexovaný 7 segmentový 4 místný LCD displej.

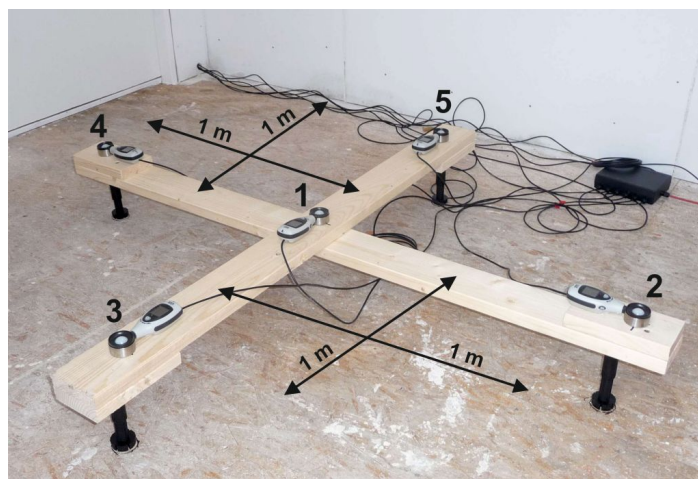
Kromě 4 číslic zobrazuje ještě desetinou tečku a pomocné znaky jako Lx (lux), Fc (foot candela), MAX, 10x, 100x a symbol baterie.



Obr. 3.7 Sada interiérových luxmetrů

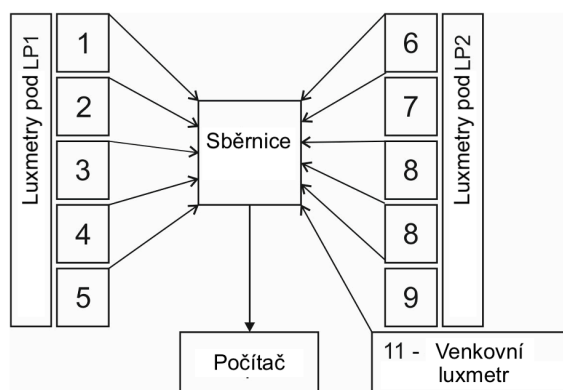


Obr. 3.8 Externí luxmetr s transparentním krytem



Obr. 3.9 Podstava pro měřicí zařízení, umístěná v buňce 1 pod světlovdem LP1

Ukládání hodnot z měření denní osvětlenosti bylo realizováno pomocí systému sběru dat. Elektronické zařízení shromažďovalo data z luxmetrů. Třídění měřených dat bylo provedeno díky sběrnici RS485 propojené s měřicí osvětlení a počítačem. Naměřená data byla odeslána ze sběrnice do počítače ke zpracování. Hvězdicová topologie byla použita pro připojení luxmetrů díky čtyřlinkovým kabelům, zatímco 12-ti linkový kabel byl použit pro napájení (z 9 V adaptéru) a dva pro datový přenos. K hvězdicové elektronické síti bylo připojeno celkem jedenáct měřičů osvětlení (2 x 5 interních a 1 externí). Obvod elektronického zařízení je vybaven jednočipovým mikrokontrolérem ATmega168 pro dekódování přenášeného signálu.



Obr. 3.10 Schéma zapojení luxmetrů ke sběrnici a k počítači



Obr. 3.11 Sběrnice pro zpracování naměřených dat

K přenosu dat je použita sběrnice RS485. Je to průmyslová sběrnice, která umožňuje propojení až 32 zařízení. K propojení je použito dvou vodičů (kroucená dvojlinka), které nemusí být stíněné. Sběrnice RS485 je standardizována specifikací TIA-485-A. Umožňuje spojení až na vzdálenost 1200 m při přenosové rychlosti 100 kb/s, nebo přenosovou rychlostí 35 Mb/s na vzdálenost 10 m. V praxi mnohdy dostačují značně nižší přenosové rychlosti.

Pro zamezení odrazu vln na konci vedení (impedanční přizpůsobení) mají být na koncích vedení připojeny zakončovací rezistory 120 Ohmů. V této konkrétní aplikaci je použita přenosová rychlost 4,8 kb/s, a délka kabeláže je řádově desítky metrů, nepřesahuje 100 m. Při 4,8 kb/s je délka vlny šířící se po kabelu cca 50 km a vlnové jevy na kabeláži jsou proto zcela zanedbatelné. Proto bylo zvoleno řešení, kde zakončovací rezistory 120 Ohmů byly vypuštěny a zapojení přístrojů je hvězdicové, nikoli liniové.

K propojení v tomto konkrétním případě slouží stíněný 4vodičový kabel, kde 2 vodiče slouží pro napájení (z adaptéru 9 V) a 2 vodiče k přenosu dat. Na hvězdicovou kabeláž je připojeno celkem 11 luxmetrů s elektronickými odečítacími obvody. Každý z nich má svou adresu (lze ji softwarově změnit), pomocí které ho řídicí počítač adresuje.

Měřicí zařízení - popis software

Pro účely zaznamenání dat z luxmetrů byl k tomuto účelu vyvinut speciální software. Tento software byl navržen pro operační systém Windows a je určen pro počítače PC, nebo kompatibilní notebooky. Software je vytvořen v systému LabVIEW. K připojení celé soustavy k počítači slouží převodník USB/RS485.

Měřicí program v počítači pracuje následovně:

- Odešle všem elektronickým odečítacím obvodům hromadný povel k zaznamenání momentální hodnoty na displeji luxmetru.
- Pak postupně jednotlivé luxmetry žádá o odeslání zaznamenané hodnoty. Toto postupné stahování dat ze všech luxmetrů trvá necelou jednu sekundu, díky tomu, že data byla předtím odečtena najednou, nedochází k chybě vlivem nesoučasnosti měření.

V případě, že z některého luxmetru měřicí program neobdrží korektní data do 0,4 s, (nebo je porušený paritní součet) považuje se to za chybu komunikace. K chybě komunikace opět dochází velmi zřídka, podobně jako k chybě měření při odečítání 5 sekund řádově 1x za den. Pokud při stahování dat z luxmetrů měřicí program zjistí, že na některém z luxmetrů došlo k chybě měření, nebo že došlo k chybě komunikace, požádá příslušný luxmetr o zaznamenání a odeslání hodnoty ještě jednou. Tím se dále omezí výpadky dat. V tomto případě sice již dochází k malé nesoučasnosti měření oproti ostatním luxmetrům, ale tato není velká (řádově sekundy) a dochází k tomu zřídka.

Výsledná naměřená data pak měřicí program ukládá do textového souboru, který může být pak zpracováván například v tabulkovém procesoru. Každých 5 minut pošle měřicí program všem luxmetrům příkaz k restartování (aby nedošlo k automatickému vypnutí), to trvá zhruba 5 sekund. Interval ukládání dat je možné v měřicím programu nastavit od 1 sekundy po 5 minut. Přitom při intervalech kratších než 5 sekund dochází při restartování luxmetrů k výpadkům měření, proto je vhodnější volit intervaly ukládání 5 sekund a delší. Měřicí program také zobrazuje hodnoty z luxmetrů na obrazovce. Při intervalu ukládání 2 sekundy a delším se

zobrazuje každé 2 sekundy. Ve výše uvedeném měření denního osvětlení byly výsledky zaznamenány v minutových intervalech od února 2015 do února 2016.

Příprava popsaného hardware a software pro ukládání dat z měření osvětlenosti byla provedena ve spolupráci s VŠB TUO na Fakultě elektrotechniky a informatiky pod vedením prof. Ing. Karla Sokanského, CSc.

3.1.2 Měření spektrální odraznosti

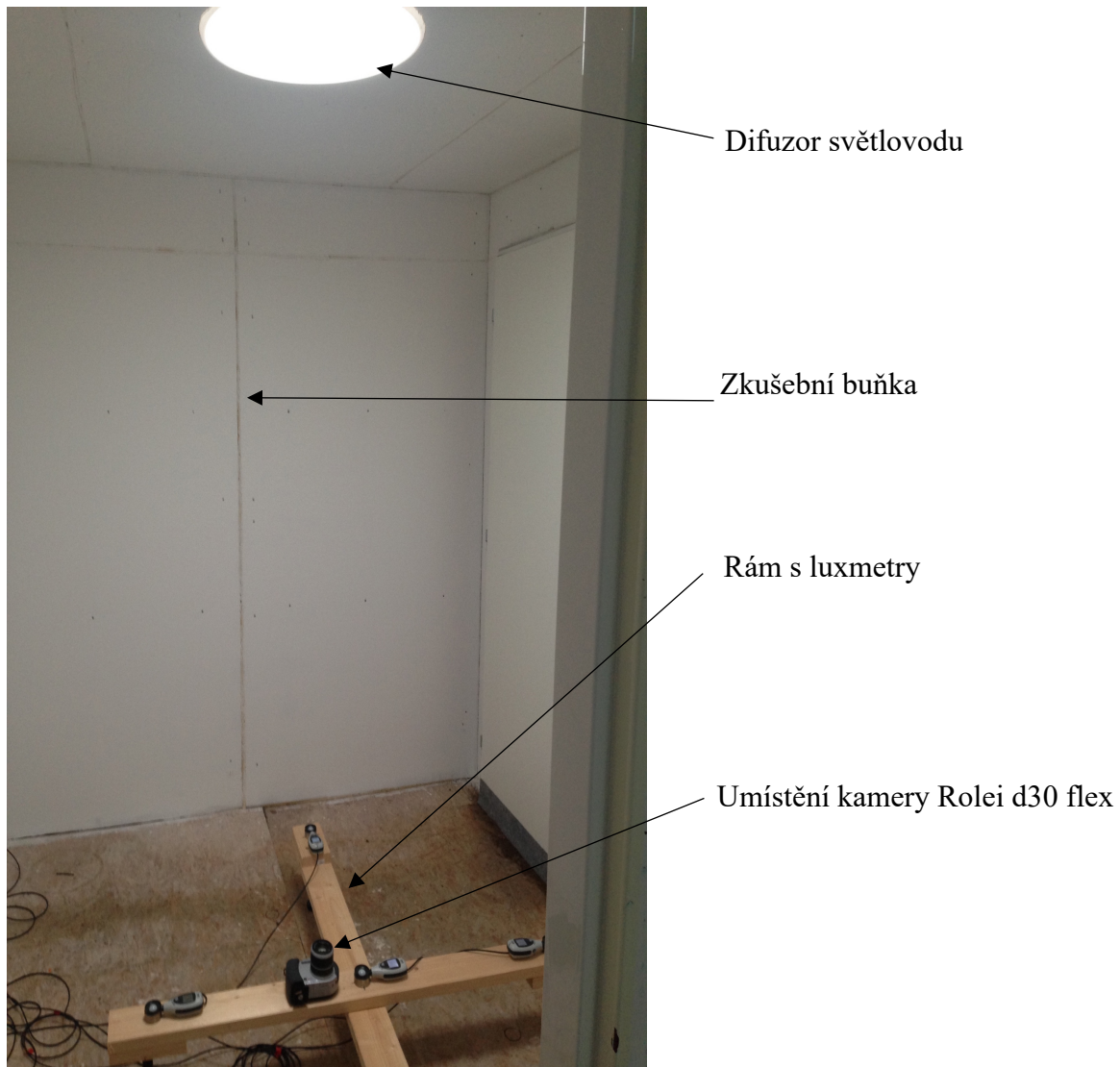
Účinnost světlovodů závisí především na odraznosti tubusů. Tubusy světlovodů mají vnitřní vysoce reflexní povrchové povlaky. Vnitřní povrchy tubusů LP1 a LP2 byly pokryty různými povrchovými úpravami. Tyto úpravy nebyly známé, proto byla provedena spektrální analýza za účelem zjištění vlivu odraznosti světla na tubusu na celkovou propustnost světla světlovodu. Měření spektrální odraznosti vnitřních povrchů vzorků kovových tubusů světlovodů LP1 a LP2 byla provedena za účelem zjištění spektrální odraznosti rozsahu viditelného světla (380–780 nm) a spektru slunečního záření (300–2500 nm). Pro spektrální měření byl použit spektrometr UV/VIS/NIR a spektrofotometr Lambda 1050 ve výzkumném centru AdMaS VUT v Brně. Spektrální měření provedl doc. Ing. Pavel Rovnaník, Ph.D. Dosažené výsledky odraznosti ve viditelném rozsahu byly použity jako vstupní data v simulacích denního osvětlení světlovedy.

3.1.3 Hodnocení spektrální propustnosti světlovodů

Bylo provedeno monitorování a vyhodnocení spektrální světelné propustnosti světlovedy LP1 a LP2 instalovaných v buňkách 1 a 2. Spektrální měření bylo provedeno dne 16. února 2016. K měření byla použita kamera Rollei d30 flex (objektiv Rollei D Apogon 2,8-4,0/10-30 mm) se snímačem 1,4 MP 2/3“ CCD. Kamera byla umístěna na dřevěný podkladní profil v blízkosti osy světlovedy LP1 a následně v blízkosti osy světlovedy LP2, Obr 3.12 a Obr 3.13.



Obr. 3.12 Fotografie kamery Rollei d30 flex umístěné vedle čidla luxmetru v ose pod světlovodem



Obr. 3.13 Pozice instalace kamery Rollei d30 flex pro spektrální měření propustnosti tubusovým světlovodem na referenční rovině pod difuzorem světlovodu

3.2 POČÍTAČOVÉ SIMULACE A HODNOCENÍ SVĚTELNÉ ÚČINNOSTI SVĚTLOVODU

Data z měření denního osvětlení byla porovnána se simulacemi denního osvětlení. Vyhodnocení účinnosti světlovodů bylo provedeno pomocí modelování denního osvětlení světlovedy různých rozměrů a odlišných odrazností vnitřních povrchů. Počítačové simulace byly provedeny pro podmínky jasné a zatažené oblohy, což poskytuje obecný přehled o chování světlovodů v průběhu roku.

Byla provedena případová studie pro vyhodnocení účinnosti přenosu denního světla u světlovodů LP1 a LP2 na základě naměřených dat a simulace denního osvětlení. Denní osvětlení pro světlovedy LP1 a LP2 bylo simulováno pomocí softwaru HOLIGILM [46]. Dosažené výstupy představují distribuci osvětlení na vodorovné referenční rovině 2 m pod světlovedy v obou testovacích buňkách.

Simulace byly zpracovány pro stejné podmínky, tj. stejnou geometrii a stejnou odraznost vnitřních povrchů, umístění senzorů na referenční rovině a podmínky venkovní osvětlenosti, jak byly zaznamenány během měření.

Pro srovnávací studii mezi výstupy simulace a měřeními pro podobné oblohové podmínky byla vybrána naměřená data ze dnů se zataženou a jasnou oblohou.

Pro prezentaci byly vybrány podmínky srovnatelné se zataženou oblohou, datum 11. února 2015 ve 12:00 a jasnou oblohou, datum 26. srpna 2015 ve 12:00. Pro simulaci byly zadány následující propustnosti světla τ [-] průhledných částí světlovedů: transparentní kopule $\tau = 0,92$ a difuzor $\tau = 0,75$ z důvodu použití stejné kopule a difuzoru u LP1 a LP2. Světelná odraznost ρ vnitřního povrchu světlovedů byla použita $\rho = 0,97$ pro instalaci LP1 a $\rho = 0,94$ pro LP2, jak vyplývá ze spektrálních měření (kapitola 4.2).

Byly také provedeny simulace denního světla HOLIGILM pro několik variant rozměrů přímých tubusových světlovedů a různých odraznosti, pro podmínky jasné a zatažené oblohy, podle [78]. Modely oblohy jsou vhodné pro použití v mírných klimatických podmínkách regionu střední Evropy. Na základě studia publikovaných vědeckých výzkumů bylo vyvozeno, že v našich klimatických podmínkách je v průběhu roku přibližně ze 40 % výskyt slunečných situací (model jasné oblohy) a 60 % situací bez slunce (zatažená obloha a zatažený model) [79]. Pro simulace byly vybrány CIE modely [78] - zatažená obloha CIE a jasná obloha CIE, aby bylo možné porovnat nejoptimističtější a nejpesimističtější modely denního osvětlení, které mohou v průběhu roku nastat.

Pro simulace denního osvětlení byly vybrány rozměry a konfigurace přímých tubusových světlovedů, které jsou běžně používané v budovách: délka tubusu od 1 m do 3 m, průměr mezi 0,3 m a 0,7 m. Hodnoty odraznosti tubusů byly zadávány od 0,90 do 0,98, zatímco

propustnost průhledných částí světlovodu zůstává nezměněna: průhledná kopule $\tau = 0,92$ a difuzor $\tau = 0,75$.

3.2.1 Stanovení účinnosti světlovodu

Účinnost tubusového světlovodu η [%] se stanoví jako poměr vstupního světelného toku Φ_e k výstupnímu světelnému toku Φ_i [80]:

$$\eta = 100 \frac{\Phi_i}{\Phi_e} \quad (2)$$

Světelný tok Φ_i [lm] vycházející ze světlovodu do interiéru lze vyjádřit vzorcem:

$$\Phi_i = I \times \omega \quad (3)$$

kde svítivost I v cd je:

$$I = E_i \times h^2 \quad (4)$$

kde

E_i [lx] je osvětlenost na referenční rovině v interiéru

h [m] je vzdálenost mezi stropním difuzorem a referenční rovinou

ω je prostorový úhel

$$\omega = 4\pi \sin^2\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (5)$$

$$\alpha = \arctan\left(\frac{r}{h}\right) \quad (6)$$

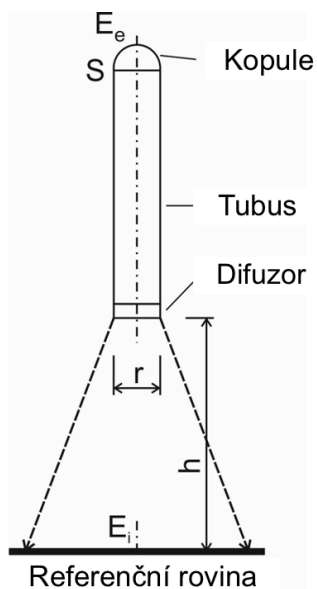
kde r [m] je poloměr tubusu světlovodu.

Potom světelný tok Φ_e [lm] světla vstupující do světlovodu z exteriéru v lm lze vyjádřit:

$$\Phi_e = E_e \times S \quad (7)$$

kde

E_e [lx] je osvětlenost na nezastíněné horizontální rovině v exteriéru (na vstupu do světlovodu),
 S [m²] je plocha průřezu střešní kopule, tj. vstupní plocha do světlovodu



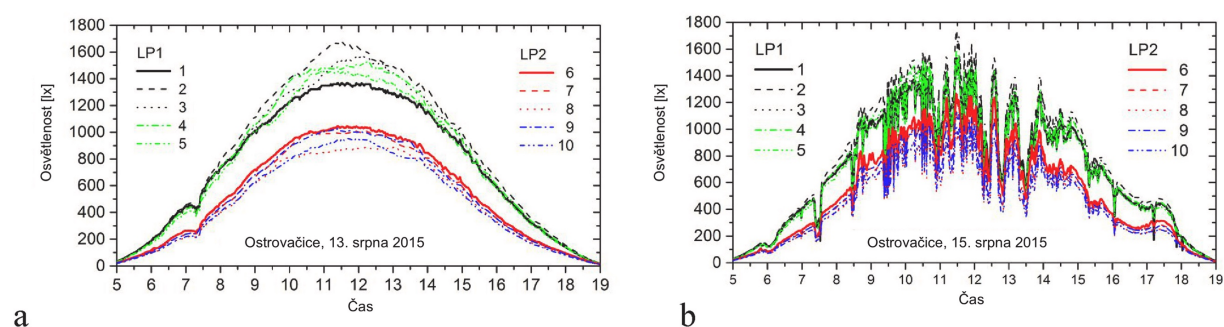
Obr. 3.14 Schéma tubusového světlovodu s parametry pro stanovení jeho účinnosti

4 VÝSLEDKY

4.1 VÝSLEDKY MĚŘENÍ OSVĚTLENOSTI

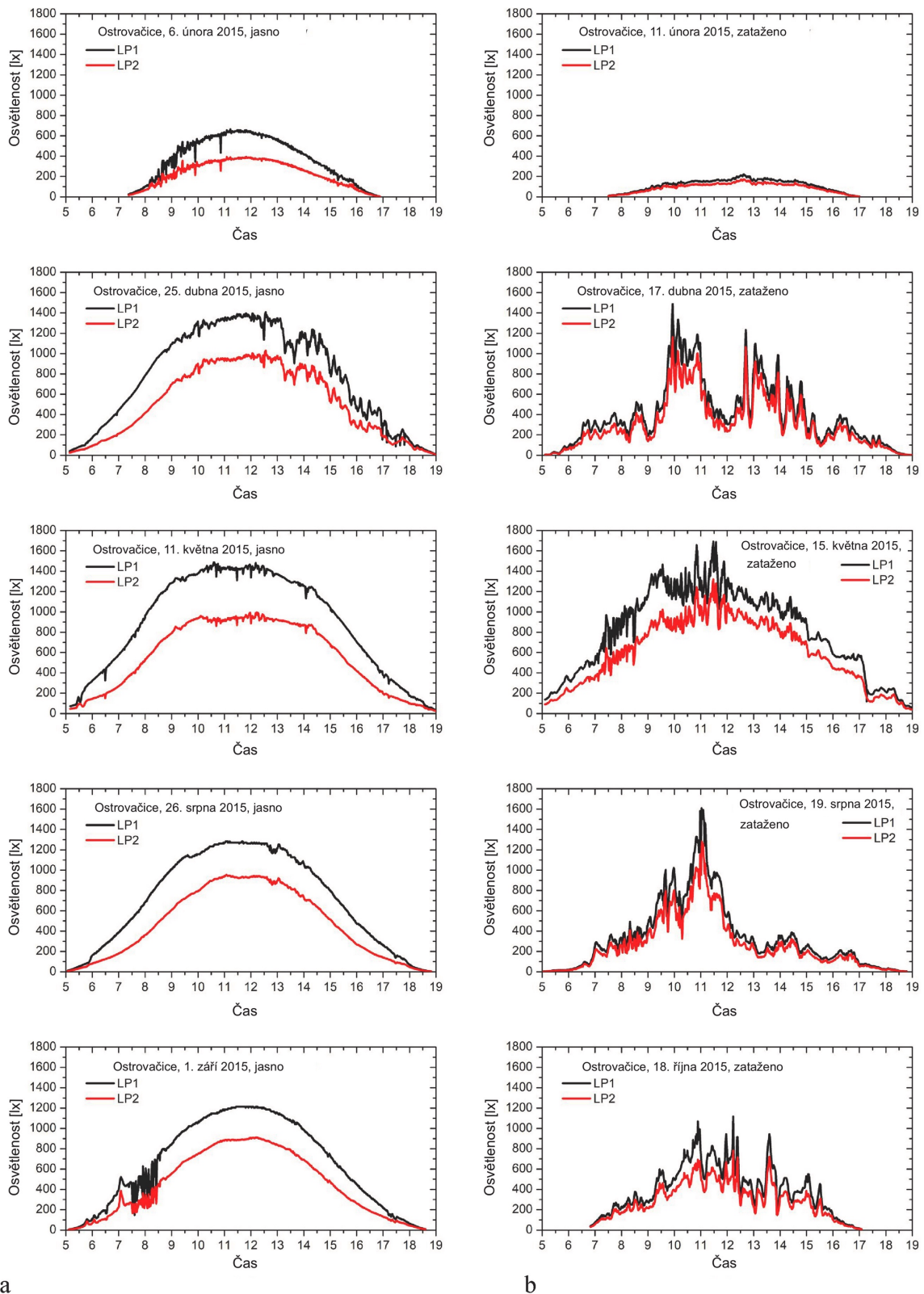
Roční kontinuální měření denní osvětlenosti poskytla data o osvětlenosti ve venkovním prostoru na horizontální rovině při vstupu denního světla do obou světlovodů a také výsledky pro porovnání osvětlenosti v buňkách pod světlovody LP1 a LP2. Senzory 1 až 5 byly instalovány v buňce 1 a senzory 6 až 10 v buňce 2. Během měření byly všechny světelné senzory synchronizovány s externím senzorem 11.

Příklady denních profilů osvětlenosti ze dne 13. srpna 2015 pro stav jasné oblohy a z 15. srpna 2015 dokumentující dynamické změny denní osvětlenosti jsou uvedeny v grafech na Obr. 4.1a a Obr. 4.1b. Oba grafy ukazují rozdíly v úrovních osvětlení mezi dvěma podobnými světlovody. Je zřejmé, že světlovod LP1 poskytuje vyšší úroveň osvětlení u všech senzorů ve srovnání se světlovodem LP2.



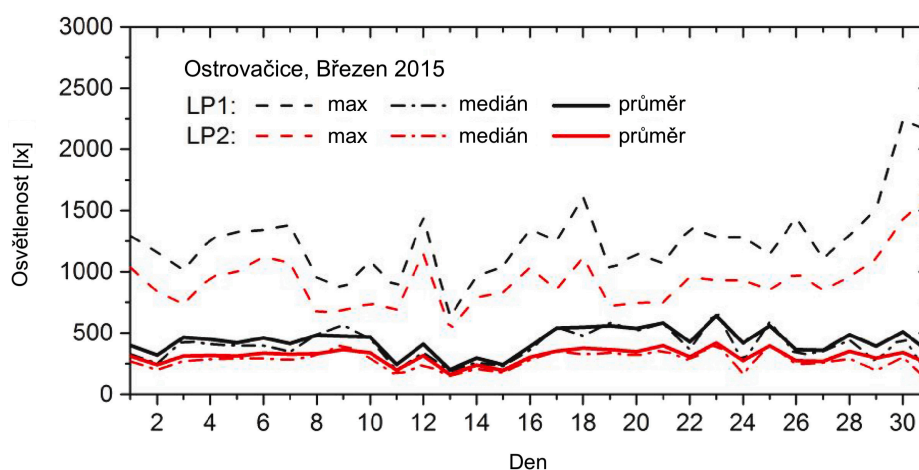
Obr. 4.1 Charakteristické denní profily osvětlenosti změřené luxmetry 1 až 10

a) jasná obloha b) polojasná obloha s dynamickými změnami osvětlenosti

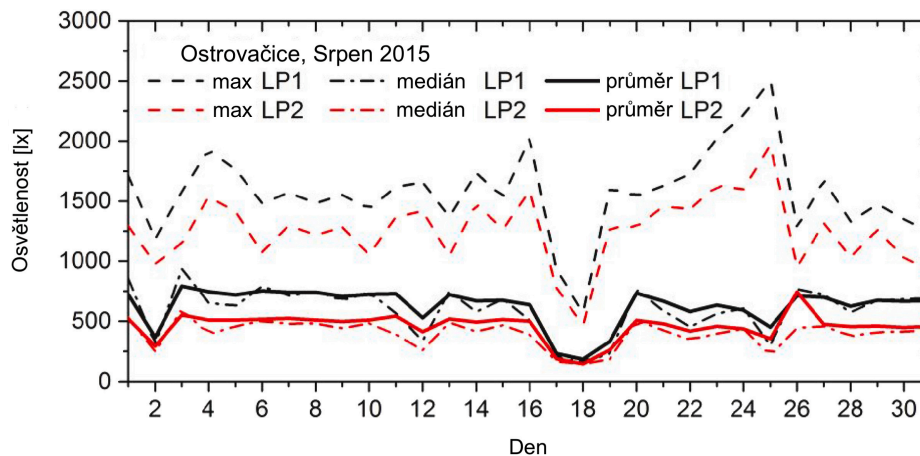


Obr. 4.2 Průběh denní osvětlenosti v buňce 1 s LP1 měřeno luxmetrem 1 a v buňce 2 s LP2 měřeno luxmetrem 6, období únor až říjen 2015. a) jasná obloha b) zatažená obloha

Rozdíly v osvětlenosti ve zkušebních buňkách v průběhu roku jsou patrné z příkladů charakteristických profilů denní osvětlenosti uvedených na Obr. 4.2. Grafy ukazují intenzitu denního světla měřenou na srovnávací referenční rovině (2 m pod difuzorem světlovodu) v osách světlovodů, tj. v poloze snímače 1 pro LP1 a snímače 6 pro LP2. Výsledky ilustrují typické podmínky denního osvětlení pro jasnou oblohu, polojasnou oblohu a zataženu oblohu s ohledem na sezónní podnebí ve střední Evropě. Podobně jako u denních profilů osvětlenosti na Obr. 4.1 jsou rozdíly mezi osvětlením v buňce 1 a buňce 2 také významné. Rozdíly jsou vyšší během letních dnů za podmínek jasné oblohy, ale u zatažených zimních dnů se snižují. V těchto případech je venkovní osvětlenost velmi nízká a světlovody přenášejí pouze rozptýlené světlo z hemisféry. Průměrná vnější horizontální osvětlenost pro zatažené a částečně zatažené dny byla zaznamenána až 28 klx. Podmínky jasné oblohy byly ovlivněny přímým slunečním zářením s vysokou úrovní globální horizontální osvětlenosti až 92 klx.



Obr. 4.3 Hodnoty denní osvětlenosti – maximální, medián, průměr, zaznamenané v březnu 2015, jako vzorek dat naměřených během přechodného ročního období



Obr. 4.4 Hodnoty denní osvětlenosti – maximální, medián, průměr, zaznamenané v srpnu 2015, jako vzorek dat během letního ročního období

Výsledky měření byly shrnuty pro přechodné (jarní a podzimní) období a letní sezónu na základě zpracování naměřených dat do měsíčních intervalů. Maximální, průměrné a medián denní osvětlenosti naměřené pod světlovody LP1 a LP2 jsou dokumentovány na Obr. 4.3 pro jarní měsíc březen a na Obr. 4.4 pro letní období v srpnu. Rozdíl v osvětlenosti prostřednictvím LP1 a LP2 je evidentní ve všech případech. Světlovod LP2 poskytuje nižší úroveň osvětlení ve srovnání s LP1, a to i přes svůj větší průměr. Pokud mají světlovody stejnou délku a stejný střešní kryt i difuzor, musí se lišit pouze v optických vlastnostech vnitřních povrchů jejich tubusů. Testované tubusy měly různou vnitřní povrchovou úpravu vykazující odlišnou světelnou odraznost. Z naměřených hodnot lze předpokládat, že LP1 umožní vyšší osvětlenost než LP2 prostřednictvím vyšší odraznosti světla na jeho vnitřním povrchu. Z tohoto důvodu byla analyzována spektrální odraznost vnitřních povrchů vzorků obou světlovodných tubusů.

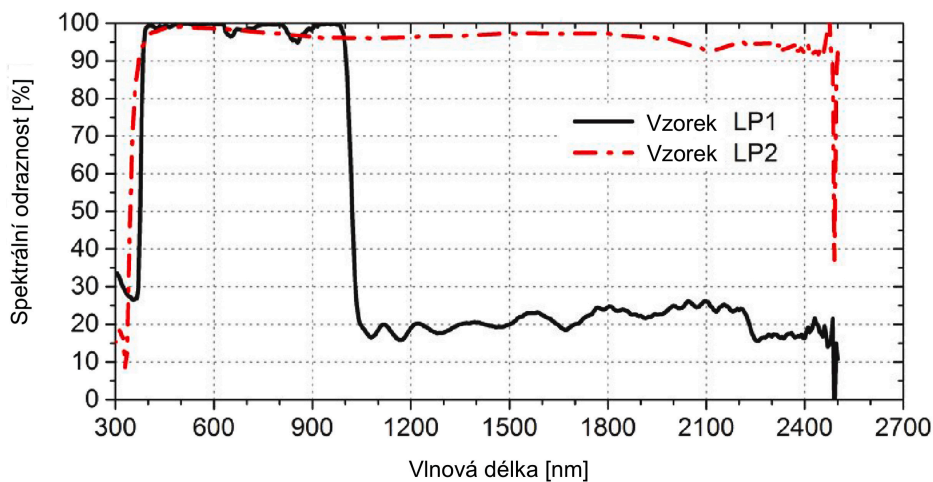
4.2 VÝSLEDKY MĚŘENÍ SPEKTRÁLNÍ ODRAZNOSTI

Spektrální měření v rozsahu optického záření byla prováděna v souladu s normovými doporučeními [81]. Výsledky spektrálních měření ukazují rozdíly mezi odraznostmi vnitřních povrchů světlovodných tubusů LP1 a LP2, jak se předpokládalo. Celková odraznost slunečního záření ve spektrálním rozsahu 300 nm - 2 500 nm je 77,7 % pro vzorek LP1 a 96,4 % pro vzorek LP2. Nižší odraznost tubusu LP1 je způsobena snížením dopadající energie v infračerveném spektrálním rozsahu mezi 1000 nm a 2500 nm. Toto zjištění je důležité pro navrhování světlovodů v budovách, protože světlovod LP1 se sníženým přenosem infračerveného záření

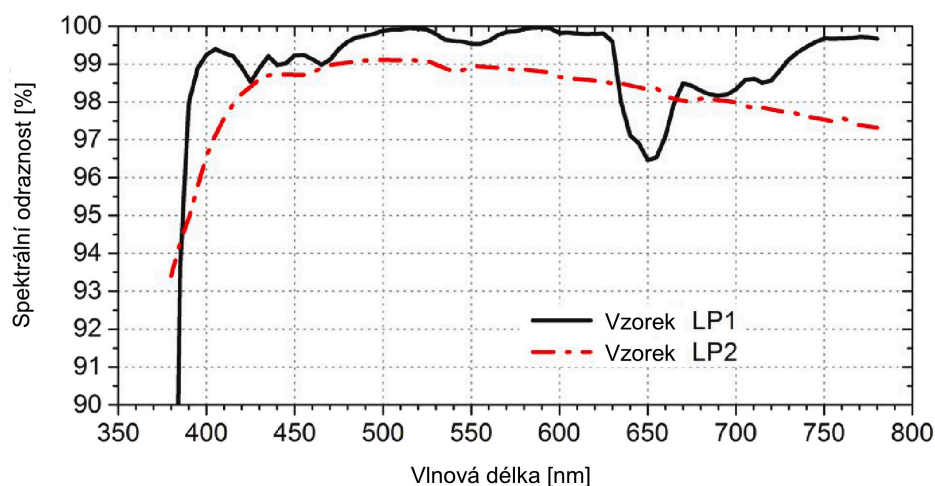
nebude během slunečných letních dnů zdrojem přehřátí v interiéru. Propustnost záření vzorku LP2 je ve zmíněném spektrálním rozsahu dostatečně vysoká, jak je dokumentováno na Obr. 4.5.

Na druhou stranu má vzorek LP1 vyšší odraznost světla ve viditelném spektru v spektrálním rozsahu mezi 380 a 780 nm (Obr 4.6). Hodnoty odraznosti [82] ve viditelném spektru jsou 99,81 % pro vzorek LP1 a 96,48 % pro LP2. Tyto hodnoty byly zjištěny ze spektrálních dat v laboratorních podmínkách s použitím vzorků s dokonale čistým povrchem.

Pro vyhodnocení účinnosti světlovdů ve skutečných stavebních podmínkách by měl být použit korekční faktor zohledňující nečistoty povrchu 0,97. Poté je korigovaná světelná odraznost tubusu LP1 $99,81 \times 0,97 = 96,82 \%$ a tubusu LP2 $96,48 \times 0,97 = 93,59 \%$. Zaokrouhlením těchto hodnot se stanovily činitele odrazu světla vnitřních povrchu tubusů světlovodu $\rho = 0,97$ pro LP1 a $\rho = 0,94$ pro LP2. Tito činitelé odrazu byly použity v simulacích denního osvětlení pomocí programu HOLIGILM.



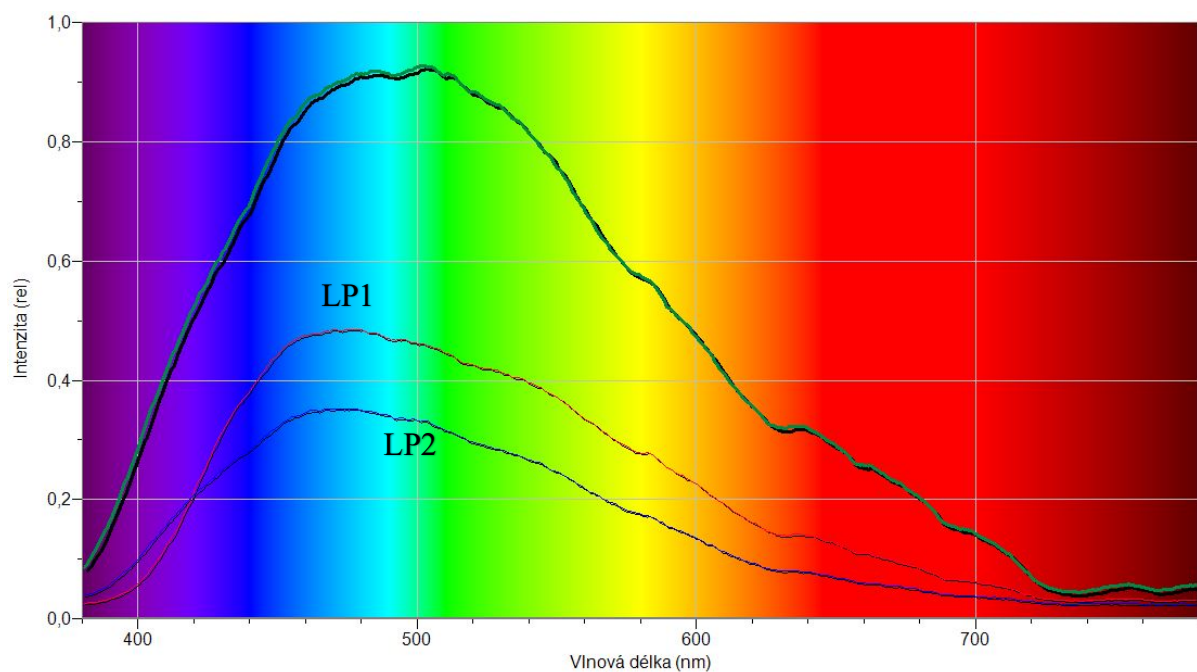
Obr. 4.5 Hodnoty spektrální odraznosti na vnitřním povrchu světlovdného tubusu v rozsahu vlnových délek 300–2500 nm.



Obr. 4.6 Hodnoty spektrální odraznosti na vnitřním povrchu tubusu ve viditelném spektru 380-780 nm.

4.3 VYHODNOCENÍ SPEKTRÁLNÍ PROPUSTNOSTI SVĚTLOVDŮ

Výsledky vyhodnocení spektrální propustnosti světla pomocí spektrometru instalovaného pod posuzovanými světlovdů jsou uvedeny pro oba typy světlovdů LP1 a LP2 na Obr. 4.7.

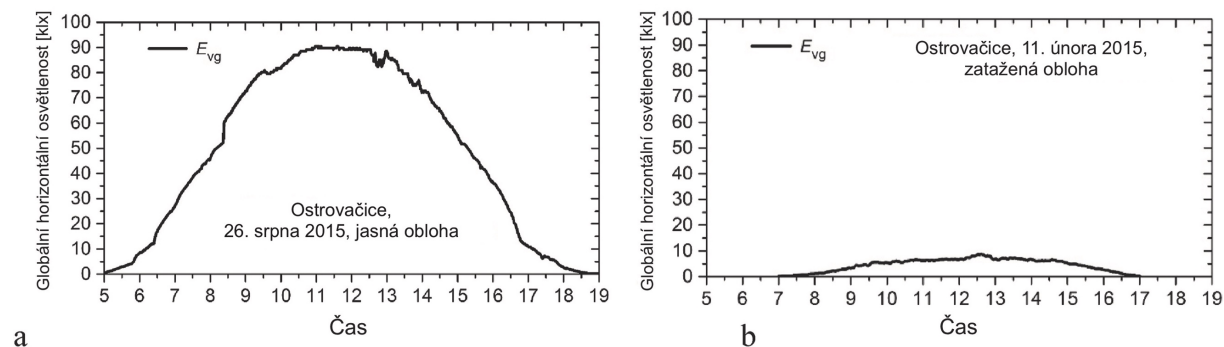


Obr. 4.7 Spektrální propustnost světlovodu LP1 a LP2 v porovnání se spektrem denního osvětlení

4.4 VÝSLEDKY POČÍTAČOVÝCH SIMULACÍ

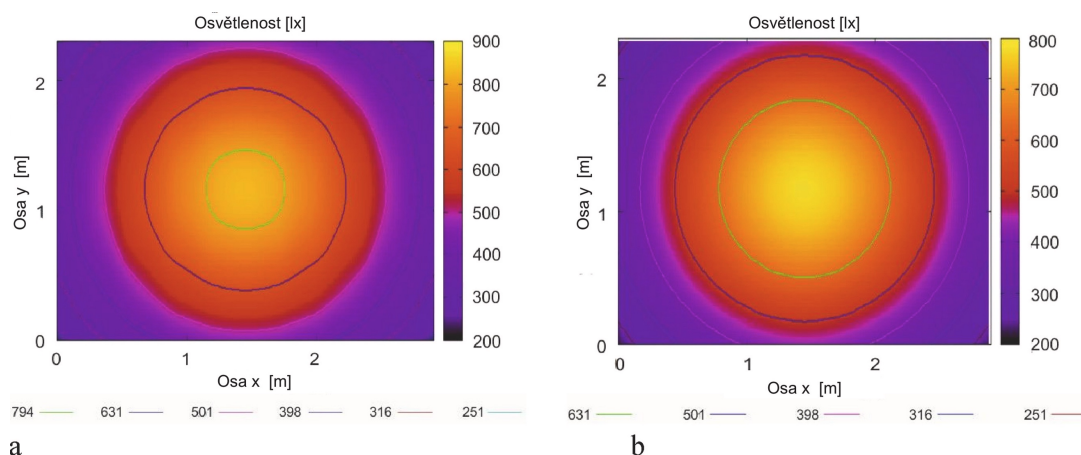
4.4.1 Porovnání dat z měření a simulací a analýza výsledků

Ve studii byly vybrány dva typické dny, letní a zimní, tj. 26. srpna 2015 představující podmínky jasného nebe a 11. února 2015 představující situace zatažené oblohy (Obr. 4.8).

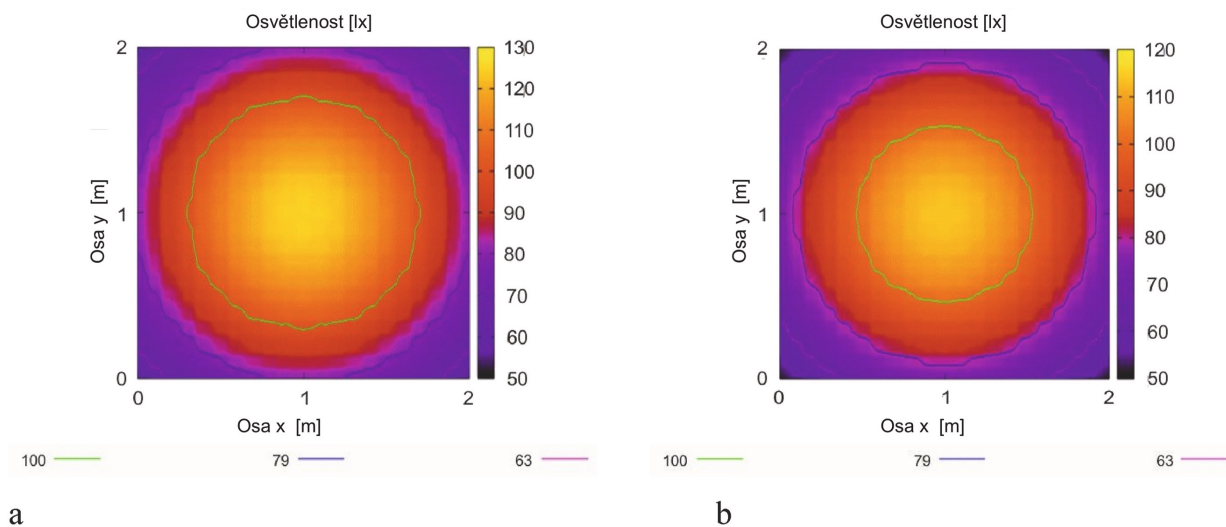


Obr. 4.8 Hodnoty globální horizontální osvětlenosti: a) jasná obloha, měřeno 26. srpna 2015 b) zatažená obloha, měřeno 11. února 2015

Naměřené hodnoty byly porovnány s výsledky počítačových simulací v programu HOLIGILM. Grafické rozložení izočar osvětlenosti na vodorovné referenční rovině jsou zobrazeny na Obr. 4.9 a Obr. 4.10, zatímco intenzity osvětlení naměřené ve 12:00 jsou dokumentovány v tabulce 4.1 a tabulce 4.2. Vyšší rozdíly mezi naměřenými a simulovanými daty jsou pozorovány za jasného dne. Naměřené hodnoty jsou nižší než simulovaná data ve všech případech za jasného dne (Tab. 4.1), zatímco opačná zjištění byla zaznamenána 11. února 2015 (Tab. 4.2), protože hodnoty ze simulací jsou v tomto případě nižší než hodnoty naměřené.



Obr. 4.9 HOLIGILM simulace osvětlenosti na referenční rovině, 26. srpna 2015 ve 12:00hod., jasná obloha a) Tubusový světlovod LP1 b) Tubusový světlovod LP2



Obr. 4.10 HOLIGILM simulace osvětlenosti na referenční rovině, 11. února 2015 ve 12:00 hod., zatažená obloha a) Tubusový světlovod LP1 b) Tubusový světlovod LP2

Tab. 4.1 Měřené a simulované hodnoty osvětlenosti na referenční rovině pod LP1 a LP2, Ostrovačice, dne 26. srpna 2015 ve 12:00 hod, jasná obloha

Tubusová soustava	Čidlo	Změřené Osvětlení [lx]	Simulované Osvětlení [lx]	MBD [lx]	RMSD [lx]
LP1	1	469	850	122.00	179.58
	2	455	501		
	3	415	501		
	4	483	501		
	5	422	501		
LP2	6	376	750	78.60	168.98
	7	334	316		
	8	281	316		
	9	341	316		
	10	289	316		

Tab. 4.2 Měřené a simulované hodnoty osvětlenosti na referenční rovině pod LP1 a LP2, Ostrovačice, dne 11. února 2015 ve 12:00 hod, zatažená obloha

Tubusová soustava	Čidlo	Změřené Osvětlení [lx]	Simulované Osvětlení [lx]	MBD [lx]	RMSD [lx]
LP1	1	158	126	-40.60	-41.21
	2	150	98		
	3	134	98		
	4	143	98		
	5	136	98		
LP2	6	125	108	-6.00	-17.20
	7	97	84		
	8	90	84		
	9	103	84		
	10	59	84		

Statistická analýza výsledků byla založena na základě stanovení směrodatné odchylky (tzv. Mean Bias Difference – MBD) a střední kvadratické odchylky (tzv. Root Mean Square Difference - RMSD).

Směrodatnou odchylku (MBD) lze vypočítat jako:

$$MBD = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (E_{s,i} - E_i) \quad (8)$$

a střední kvadratickou odchylku (RMSD) lze vypočítat jako:

$$RMSD = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (E_{s,i} - E_i)^2} \quad (9)$$

kde

E_s je simulovaná osvětlenost v lx,

E_i je naměřená osvětlenost v lx,

N je počet pozorování.

Směrodatná odchylka popisuje rozptyl hodnot z měření a hodnot z počítačových simulací. Správný výsledek modelu lze očekávat, když se jedná o kladné hodnoty směrodatné odchylky. Tato metoda zde byla zvolena jako prostředek pro analýzu výsledků pro podmínky různých obloh, tj. zatažené a jasné oblohy.

Nízká hodnota střední kvadratické odchylky poukazuje na vysokou koncentraci dat kolem průměru. Simulované a naměřené hodnoty jsou tedy podobného řádu. Hodnoty MBD a RMSD byly určeny pro dvě sady dat. Pro data osvětlenosti světlovodem LP1 a pro data osvětlenosti světlovodem LP2. Ukazuje se, že hodnota směrodatné odchylky je kladná pro světlovod LP1 a záporná pro světlovod LP2. Lepší shoda mezi simulacemi a měřeními byla zaznamenána pro podmínky zatažené oblohy, kdy jsou hodnoty MBD třikrát nižší (pro LP1) a 13,1krát (pro LP2) než pro podmínky jasné oblohy a hodnoty RMSD jsou 4,36krát nižší (pro LP1) a 9,82krát (pro LP2). Vyšší hodnoty RMSD = 179,58 (pro LP1) a RMSD = 168,98 (pro LP2) představují vyšší variabilitu osvětlení interiéru během jasného dne, než byla zjištěna během zataženého dne (pro LP1 je MBD = 41,21 lx a pro LP 2 je RMSD = 17,20 lx). Vypočtené hodnoty MBD a RMSD také potvrzují vyšší sezónní rozdíly mezi měřeními a výsledky

simulací, tj. v průměru za jasného dne je tento rozdíl $486,8 - 386,5 = 100,3$ lx a při zatažené obloze $119,5 - 96,2 = 23,3$ lx.

4.4.2 HOLIGILM simulace pro podmínky jasné a zatažené oblohy

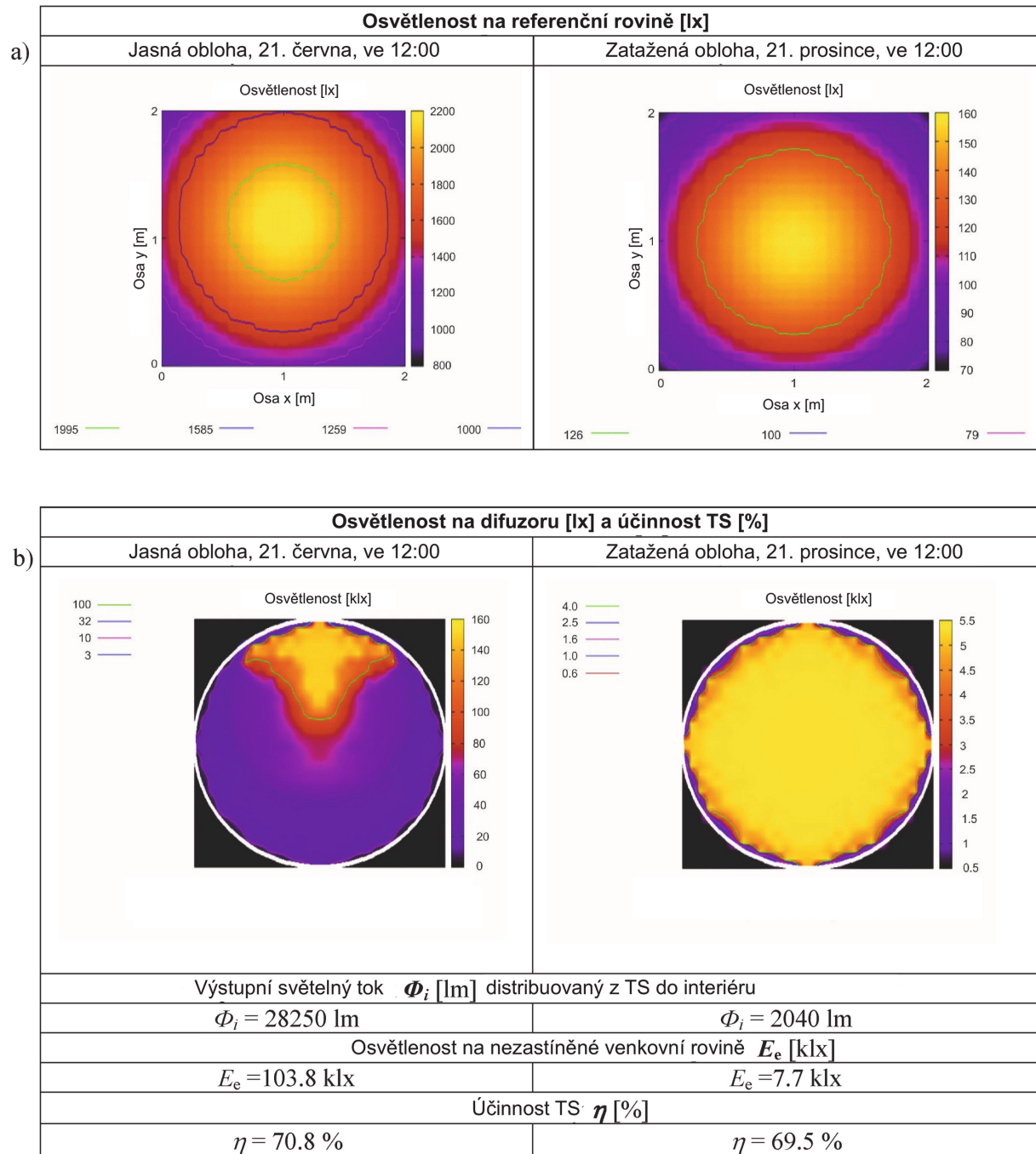
Velké sezónní rozdíly v hodnotách osvětlenosti jsou z uvedených údajů patrné. Existují vyšší hodnoty osvětlenosti a jejich fluktuace pro podmínky jasné oblohy ve srovnání s nízkou distribucí osvětlení pro difúzní osvětlení ve dnech zatažené oblohy. Obecně je procento výkyvů v hodnotách osvětlenosti asi 20 %.

Světlovody LP1 i LP2 mají difuzory, které rozptylují světlo do interiéru. Reálné difuzory však nedokážou dokonale rozptýlit denní světlo. To znamená, že paprsky denního světla jsou většinou soustředěny kolem reflexních tubusů. Tato skutečnost ovlivňuje rozložení osvětlení pod LP1, které je znázorněno na Obr. 4.11 b pro podmínky jasné oblohy. LP2 má zjevně nižší odraznost a z tohoto důvodu se světlo nižší intenzitou rozptyluje rovnoměrněji na difuzoru.

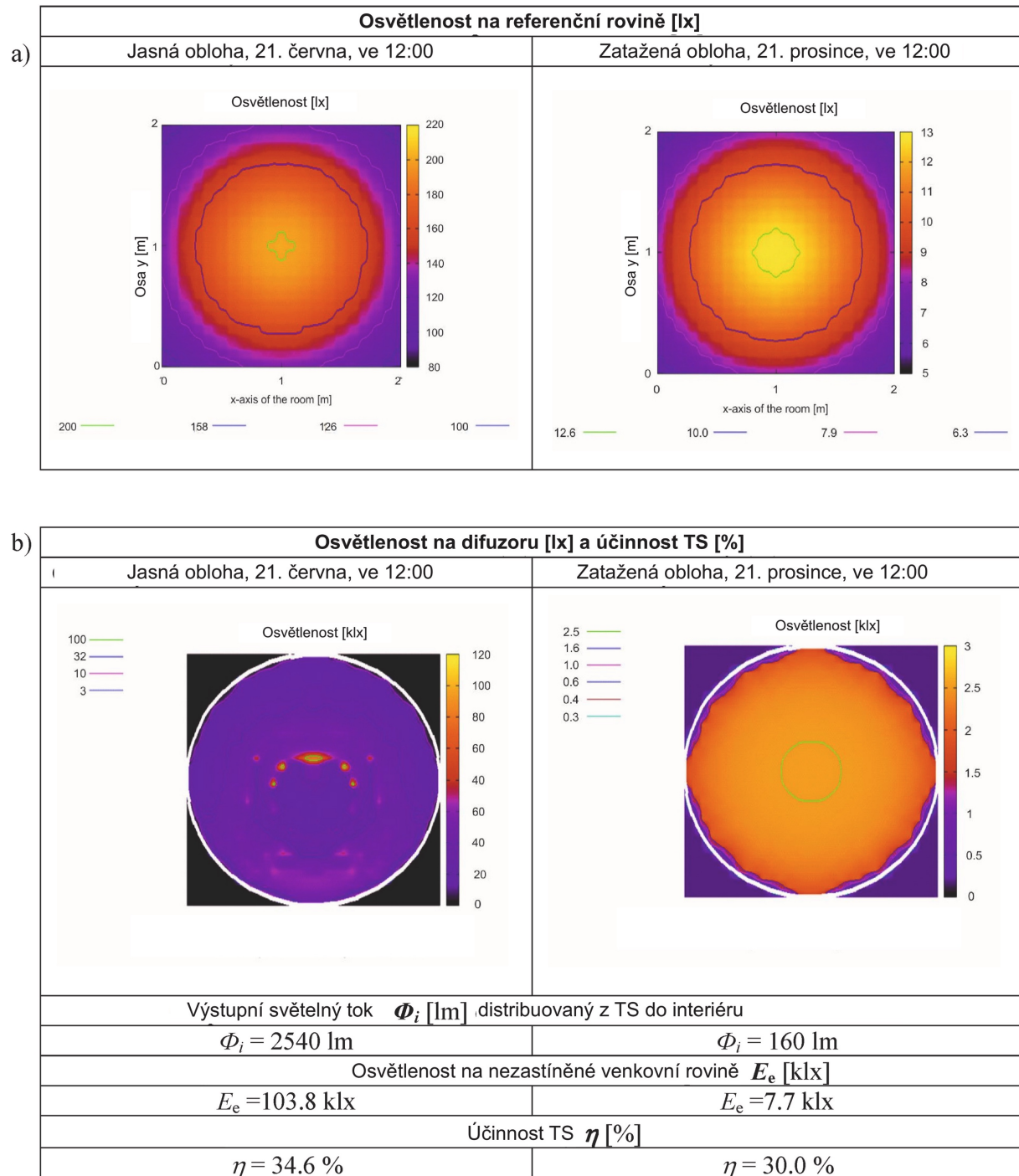
Na druhou stranu se simulace HOLIGILM provádějí pro ideální lambertovský difuzor, a proto simulované hodnoty vykazují symetričtější a rovnoměrnější rozdělení v referenční rovině, což je také uvedeno na obr. 4.11a, 4.12a. To vysvětluje, proč se rozdíly mezi naměřenými a simulovanými hodnotami více či méně odlišují v závislosti na geometrii světlovodu a oblohových podmínkách.

4.4.3 Vyhodnocení účinnosti světlovodu

Byly provedeny dva simulační scénáře osvětlenosti na referenční rovině $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ umístěné 2 m pod difuzorem tubusového světlovodu pro dvě charakteristické podmínky venkovního osvětlení s pravděpodobně nejvyšší a nejnižší polední intenzitou osvětlení v průběhu roku, tj. jasná obloha 21. června ve 12:00 a zatažená obloha 21. prosince ve 12:00. Na Obr. 4.11 jsou uvedeny výsledky pro tubusový světlovod o průměru $D = 0,7$ m a nejkratší délkou $L = 1$ m a na Obr. 4.12 pro tubusový světlovod s průměrem $D = 0,3$ m a nejdelší délkou $L = 3$ m. Pro zjištění limitů účinnosti tubusového světlovodu byla v prvním případě uvažována odraznost 0,98 a ve druhém případě odraznost tubusu 0,90.



Obr. 4.11 HOLIGILM simulace osvětleností pro světlovd o průměru $D = 0,7$ m, délku $L = 1$ m a odraznost tubusu $\rho = 0.98$; simulováno pro jasnou oblohu (21. června, 12:00) a zataženou oblohu (21. prosince, 12:00) a) Osvětlenost [lx] na referenční rovině 2 m pod světlovdem b) Osvětlenost [lx] na difuzoru světlovodu určené pro výstupní světelný tok Φ_i [lm], venkovní horizontální osvětlenost E_e [klx] a účinnost světlovodu η [%].

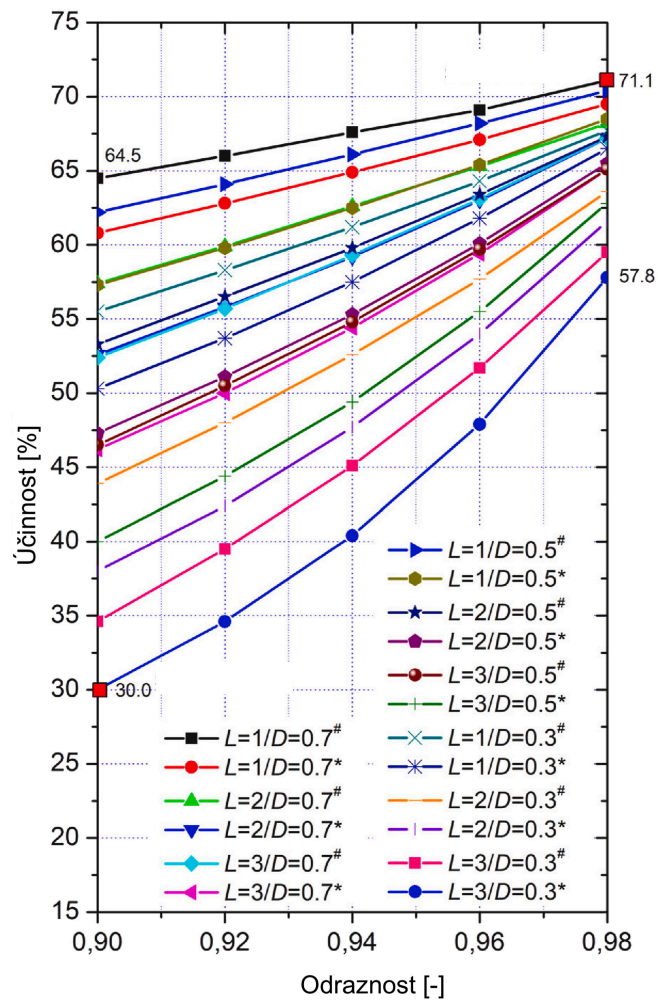


Obr. 4.12 HOLIGILM simulace osvětlenosti pro světlovd o průměru $D = 0.3$ m, délka $L = 3$ m a odraznost tubusu $\rho = 0.90$; simulováno pro jasnou oblohu (21. června, 12:00) a zataženou oblohu (21. prosince, 12:00) a) Osvětlenost [lx] na referenční rovině 2 m pod světlovdem b) Osvětlenost [lx] na difuzoru světlovodu určené pro výstupní světelný tok Φ_i [lm], venkovní horizontální osvětlenost E_e [klx] a účinnost světlovodu η [%].

Horní části Obr. 4.11 a 4.12, označené jako a), znázorňují osvětlení na referenční rovině (2 m pod instalací světlovodu), zatímco spodní části těchto obrázků označené b), představují distribuci denního světla těsně pod difuzorem (v místě, kde denní světlo opouští světlovod). V tomto případě je patrná kaustika zejména pro červnové simulace jasné oblohy (Obr. 4.11 b).

Zajímavé je, že účinnost světlovodu lze očekávat za podmínek jasné oblohy v rozmezí $\eta = 34 \% - 71 \%$, ale za podmínek zatažené oblohy je mírně nižší v rozmezí $\eta = 30 \% - 70 \%$. Tuto skutečnost lze vysvětlit rozdílným rozložením jasu oblohy na jasné a zatažené obloze. Je možné si všimnout, že účinnost světlovodu klesá s délkou tubusu a pro tubusy menších průměrů. Transport denního světla je významně snížen v důsledku počtu odrazů slunečních paprsků v dlouhých a úzkých tubusech. Snížení prostupu denního světla je zřejmé z výstupů simulace. Rozdíly v distribuci osvětlení na referenční rovině pod dlouhým světlovodem malého průměru ve srovnání s denním osvětlením pod krátkým světlovodem většího průměru jsou evidentní.

Získané výsledky experimentálních měření a teoretických výpočtů lze zobecnit, a proto byl navržen jednoduchý nástroj pro praktická hodnocení. Software HOLIGILM umožňuje vypočítat účinnost světlovodu v závislosti na průměru tubusu a jeho délce s ohledem na světelnou odraznost tubusu. Simulace denního osvětlení byly provedeny pro širší rozsah konfigurace světlovodu s následujícími rozměry: délka $L = 1 \text{ m}, 2 \text{ m}$ a 3 m , průměr $D = 0,3 \text{ m}, 0,5 \text{ m}$ a $0,7 \text{ m}$. Různé odraznosti světla $\rho = 0,9, 0,92, 0,94, 0,96$ a $0,98$ byly brány v úvahu pro všechny tubusy světlovodu. Propustnost světla průhledných částí byla použita následně, $\tau = 0,92$ pro střešní kopuli a $\tau = 0,75$ pro difuzor. Závislost účinnosti světlovodu na světelné odraznosti trubice a její geometrii je znázorněna na Obr. 4.13. Tento graf lze považovat za jednoduchý nástroj pro navrhování rozměrů přímých světlovodů. Nejvyšší účinnost světlovodu (Obr. 4.13) je uvedena v pravém horním rohu hodnotou $71,1 \%$ pro světlovod největšího průměru, zatímco nejnižší účinnost zobrazená v levé dolní části Obr. 4.13 hodnotou 30% , která platí pro nejdelší světlovod o nejmenším průměru a nejnižší odraznosti.

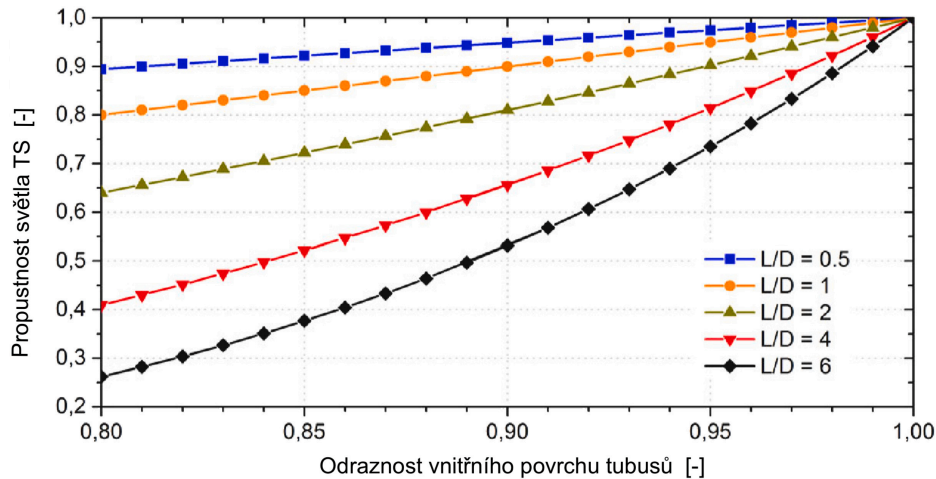


Obr. 4.13 Účinnost tubusového světlovodu v závislosti na odraznosti tubusu

L – délka tubusu světlovodu, D – průměr světlovodu v m, # - jasná obloha (21. června ve 12hod.), * - zatažená obloha (21.prosince ve 12hod.)

Vyhodnocení účinnosti η ukazují, že jsou srovnatelné s hodnotami světelné propustnosti světlovodu dle posouzení publikovaného v [21]. Dosažené výsledky ukazují, že odraz světla na vnitřním povrchu tubusu světlovodu hraje klíčovou roli pro účinnost světlovodu. Vliv odraznosti na celkovou propustnost světla světlovody různých průměrů D a délek L byl vypočítán podle metodiky CIE směrnice [77]. Výsledky tohoto vyhodnocení jsou uvedeny na obr 4.14 pro úhel dopadu světelného paprsku 45° . V tomto grafu je na ose x světelná odraznost tubusu a na ose y propustnost světla světlovodem. Z grafu je zřejmé, že nejnižší světelná propustnost je pro světlovod konfigurace $L/D = 6$, nejvyšší pro $L/D = 0,5$. Při návrhu a

hodnocení systémů tubusových světlovodů je třeba vzít v úvahu také propustnost světla průhledného krytu, jako je střešní kopule a difuzor.



Obr. 4.14 Závislost propustnosti světla světlovodem na odraznosti vnitřního povrchu tubusu světlovodu

L – délka tubusu v m, D – průměr světlovodu v m, vyhodnoceno pro dopadající světelné paprsky pod úhlem 45°

4.4.4 Zhodnocení energetické účinnosti tubusového světlovodu

Energetická účinnost všech současných produktů je klíčovým atributem pro jejich použití v každodenním životě. Řešení úspory energie světlovodů představuje aktuální úkol [83]. Požadavky na úspory energie a udržitelnost vedly také k vývoji moderních osvětlovacích systémů, jako je LED osvětlení. Byla provedena studie pro porovnání počtu umělých LED světelných zdrojů se světlovodem. Hodnocení se provedlo na základě stanovené účinnosti světlovodu. Tato účinnost je ovlivněna, mimo jiné, také podmínkami oblohy, jak je patrné z výsledků na Obr. 4.13 a 4.14.

Toto hodnocení bylo provedeno pro průměrnou exteriérovou horizontální osvětlenost 20 klx, která je charakteristická pro regiony střední Evropy s mírným podnebím a převládajícími podmínkami zamračené oblohy. Tato hodnota byla zadána jako horizontální exteriérová osvětlenost na vstupu do světlovodu je E_e [$\text{lx} = \text{lm} \cdot \text{m}^{-2}$]. Světelný tok vstupující do světlovodu lze vypočítat jako

$$\Phi_e [\text{lm}] = E_e \times S \quad (10)$$

kde S [m^2] je plocha průřezu tubusu světlovodu.

Světelný tok opouštějící světlovod a vstupující do interiéru lze vypočítat jako

$$\Phi_i [\text{lm}] = \eta \times \Phi_e \quad (11)$$

kde η [-] je účinnost světlovodu.

Z obrázku 4.15 je zřejmé, že světelný tok se pohybuje od 424 do 5385 lm a světlovod tedy může být ekvivalentním zdrojem osvětlení podobně jako zdroj umělého světla. Při použití umělého osvětlení lze počet svítidel odhadnout podle [84] následovně:

$$P = \Phi / e, \quad (12)$$

kde

P je elektrický příkon svítidla [W],

e je světelná účinnost zdroje (měrný světelný výkon) zdroje umělého osvětlení [lm/W].

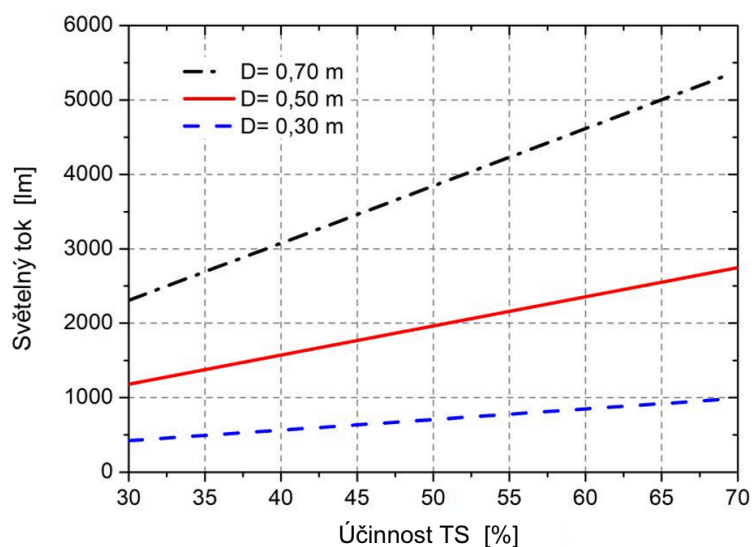
Existuje řada umělých světelných zdrojů, které lze použít pro analýzu energetických úspor světlovody. LED zdroje umělého světla jsou v praxi velmi využívány. Jako příklad bylo zvoleno LED svítidlo s měrným světelným výkonem $e = 117 \text{ lm/W}$ a příkonem $P = 13 \text{ W}$ (odpovídá 100 W žárovce). Studie zkoumá, zda světlovody daných rozměrů a účinností by mohly být v osvětlení prostoru adekvátní stanovenému počtu LED 13 W svítidel.

Světlovody lze instalovat například pro osvětlení prostoru chodby. Je možné spočítat energetické úspory, pokud budou v této chodbě navrženy dva světlovody o průměru 0,5 m a účinnosti 50 %, které po část dne nahradí zdroje elektrického osvětlení. Chodba bude osvětlována mezi 8:00 a 18:00, tj. 10 hodin denně. LED 13 W svítidla budou použita jako referenční zdroj umělého světla. Potom lze vypočítat elektrickou energii E_n [kWh] pro umělé osvětlení 2 x LED 13 W potřebná 10 hodin denně se pro roční bilanci stanoví jako:

$$E_n = 2 \times 13 \text{ W} \times 10 \text{ hodin/den} \times 365 \text{ dní/rok} = 94,9 \text{ kWh za rok.}$$

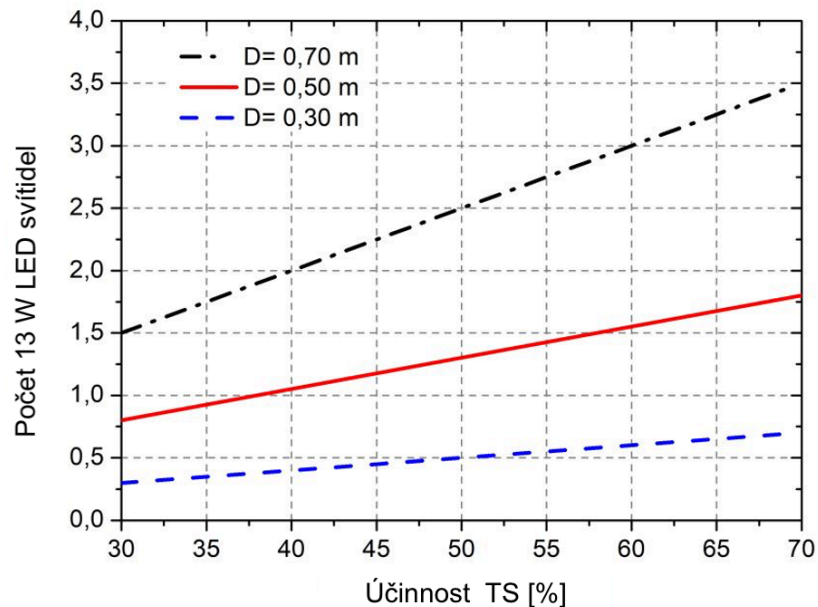
Výsledná úspora energie při nahrazení uvedených elektrických zdrojů světla světlovody může být 94,9 kWh za rok.

Na obrázku 4.15 je uveden graf závislosti světelné účinnosti tubusového světlovodu na světelném toku procházejícím světlovodem. Na následujícím obrázku 4.16 je graf zohledňující počet LED zdrojů, které jsou ekvivalentní tubusovým světlovodům o daném průměru a účinnosti.



Obr. 4.15 Světelný tok Φ vstupující do interiéru z tubusového světlovodu (TS),

D – průměr tubusu světlovodu.



Obr. 4.16 Počet LED 13 W svítidel ekvivalentních k osvětlení tubusovým světlovodem (TS),

D – průměr tubusu světlovodu.

4.4.5 Diskuse vyhodnocených výsledků

Hodnocení přímých tubusových světlovodů bylo založeno na měřeních a simulacích denního osvětlení. Dlouhodobá měření v této práci byla zaměřena na úroveň denního osvětlení dvou světlovodů ve zkušebních buňkách. Rozdíly v dosažené ve vnitřní horizontální osvětlenosti v buňce 1 a buňce 2 poskytují informace o rozdílných propustnostech světla od dvou srovnatelných typů tubusových světlovodů. Úroveň vnitřního osvětlení zaznamenané pro světlovody LP1 a LP2 se pohybují od přibližně 30 lx do 400 lx během zatažených dnů, od 40 lx do 1600 lx během polojasných dnů a od 50 lx do 1400 lx během jasných dnů.

Denní profily měřených osvětleností ukazují, že oba světlovody mají podobné rozložení osvětlenosti na referenční rovině ve zkušebních buňkách. I přes menší průměr (0,53 m) poskytuje světlovod LP1 vyšší úroveň osvětlení než světlovod LP2 o průměru 0,55 m. Bylo zjištěno, že rozdíly měřených osvětleností v buňce 1 a buňce 2 jsou způsobeny rozdílnými odraznostmi testovaných světlovodů. Lepšího denního osvětlení v buňce 1 je dosaženo vlivem vysoce reflexního vnitřního povrchu tubusu světlovodu LP1.

Z toho důvodu byla provedena spektrální měření pro stanovení světelné odraznosti vzorků posuzovaných světlovodů LP1 a LP2. Ve spektru slunečního záření (300 nm – 2 500 nm) je celková odraznost tubusu LP1 výrazně nižší v porovnání s LP2. Rozdíl je způsoben snížením dopadající energie v infračerveném spektrálním rozsahu. Díky tomu bude mít sestava LP1 nižší dopady na přehřátí interiéru během slunečných dní. Zjištěné hodnoty odraznosti ve viditelném spektru byly použity jako vstupní hodnoty pro simulaci denní osvětlenosti pod světlovody.

Bylo zjištěno, že světlovod LP2 má vnitřní odrazný povrch z tenké kovové vrstvy, světlovod LP1 má tenký nekovový vysoce odrazný povlak. Zajištění vyšší odraznosti zvyšuje jeho účinnost světlovodu, a tudíž umožňuje vyšší světelnou propustnost světlovodem do interiéru budovy. To bylo také potvrzeno výsledky počítačových modelování světlovodů pomocí softwaru HOLIGILM. Světelná účinnost posuzovaných přímých tubusových světlovodů se dle počítačových vyhodnocení pohybuje od 30 % do 64,5 % pro světelnou odraznost tubusů $\rho = 0,90$. Ale pro odraznost $\rho = 0,98$ se světelná účinnost zvyšuje v rozmezí od 57,8 % do 71,1 %.

Vyhodnocení naměřených a simulovaných výsledků ukazuje lepší korelaci pro zimní zataženou oblohu než pro letní slunečné dny.

Prezentovaná studie spektrální odraznosti vzorků tubusu světlovodu ukazuje, že vnitřní povrch světelného tubusu může být ve viditelném spektru vysoce odrazný, ale v oblasti infračerveného záření může mít optické záření sníženou odraznost, a tudíž snížený přenos slunečního záření. Toho lze využít v případě návrhu většího počtu světlovodů, které mohou představovat riziko přehřívání interiéru zvláště v letních měsících.

A naopak, pokud je analýza spektrální odraznosti povrchu na vnitřní straně tubusového světlovodu omezena pouze na viditelný spektrální rozsah, může to v praktických aplikacích vést k překvapivým výsledkům návrhu – celková propustnost slunečního záření se může od světelné propustnosti značně lišit.

Proto je důležité mít spolehlivé informace o spektrální odraznosti v oblasti širšího spektrálního rozsahu, a nejen ve viditelné oblasti. Tato data mohou přispět ke zpřesnění

počítačových modelování i poskytnout podklady pro vhodný návrh světlovodu v daných podmínkách.

Z výše uvedeného je zřejmé, že odraznost tubusu hraje klíčovou roli pro účinnost tubusového světlovodu. Na druhou stranu je z praxe známo, že některé komerční produkty světlovodů nejsou tak účinné, jak mají deklarováno. Je to především z důvodu nadhodnocení údajů o odraznosti světlovodem. To znamená, že odraznost světlovodů by měla být ověřována u světlovodů zabudovaných v budovách.

Ve fázích návrhu světlovodu v projektu nové budovy by měly být stanoveny odraznosti povrchů vybraných světlovodů na základě spektrálních světelných měření. Parametry produktů světlovodu by měly zahrnovat výsledky těchto světelných měření a také informace o stárnutí povrchových reflexních povlaků tubusů světlovodů a způsobech jejich čištění a údržby. Správné údaje o odraznosti světla umožňují realističtější predikci účinnosti těchto systémů.

Vhodně navržený a zrealizovaný systém tubusového světlovodu představuje potenciál pro zlepšení světelné pohody vnitřního prostředí a úspory energie, což je v souladu s požadavky na udržitelnost ve stavebnictví [85, 86].

Tubusové světlovody lze také kombinovat se svítidly pro umělé osvětlení, aby bylo dosaženo nepřetržitého integrovaného osvětlení budov a dostatečného osvětlení interiéru v situacích s nízkou úrovní denní osvětlenosti v exteriéru.

Na základě praktických zkušeností s realizací tubusových světlovodů při navrhování a realizace střešních konstrukcí je možné shrnout následující poznatky:

- Možné přínosy tubusových světlovodů:
 - osvětlení prostor uvnitř dispozice budov
 - umožňují prostup denního světla, čímž zajišťují dynamické změny v osvětlenosti vnitřního prostoru

- úspora elektrické energie na umělém osvětlení
- při použití povrchových úprav světlovodů a transparentních krytů zamezujících prostup infračerveného záření mohou přispívat k zajištění denního světla bez přehřívání interiéru
- instalace světlovodů v novostavbách i při rekonstrukcích většinou nevyžadují žádné významné stavební úpravy v budovách
- Nedostatky tubusových světlovodů:
 - nedostatečná osvětlenost v interiéru při nízké úrovni denního světla v exteriéru
 - oslňování během slunečných dní s jasnou oblohou
 - tepelné mosty ve střešní konstrukci
 - rizika spojená se špatnou instalací: kondenzace, případné zatékání akustické mosty,

Níže jsou uvedeny praktické příklady realizace tubusových světlovodů a vybraných detailů. Fotodokumentace byla pořízena v České republice v období 2014–2021.



Obr. 4.17 Instalace světlovodů průměru 350 mm na chodbě v rezidenčním objektu



Obr. 4.18 Instalace světlovdů průměru 530 mm, použití přechodového kusu do rastru sádrokartonového pohledu



Obr. 4.19 Instalace světlovodu do halového kancelářského vestavku



Obr. 4.20 Použití kolen a prodlužovacích kusů ke svedení tubusového světlovodu z jižně orientované střešní roviny do interiéru



Obr. 4.21 Použití kolen a prodlužovacích kusů ke svedení tubusového světlovodu do kancelářských prostor uvnitř dispozice



Obr. 4.22 Řada nadstřešní kopulí tubusových světlovodů instalovaných do skládané střešní krytiny

Instalace tubusových světlovodů mohou představovat i problémy v případě jejich nevhodného umístění nebo špatného zabudování ve střešní konstrukci, jak ukazují následující obrázky.



Obr. 4.23 Světlovod zabudovaný do falcované krytiny

Na Obr. 4.23 je ukázka dobře zabudovaného světlovodu do falcované střešní krytiny, ale na špatném místě. Část střešního hřebene a tmavou krytinou působí jako překážka a snižuje tak prostup denního světla do budovy.



Obr. 4.24 Nadstřešní část světlovodu na ploché střeše s povlakovou hydroizolací.

Na Obr. 4.24 je zobrazeno provedení příliš vysoké nadstřešní části světlovodu. V zimních měsících bude tato část vystavena nízkým teplotám a hrozí promrzání konstrukce světlovodu a následná kondenzace.



Obr. 4.25 Zatečení srážkové vody v místě světlovodu

Nedostatečné provedení hydroizolačního opracování chráničky světlovodu vedlo k zatečení srážkové vody do interiéru po vnější straně chráničky. Na Obr. 4.25 je rovněž zobrazena elektroinstalace pro osazení doplňkového LED osvětlení uvnitř světlovodu.



Obr. 4.26 Deformace světlovodného tubusu v místě ohybu

V důsledku absence systémových prvků (kolen) pro vytvoření ohybu světlovodného tubusu došlo k deformaci tubusu (Obr. 4.26). A tím i k místům, světlejších ztrát světlovodu. Deformace tubusu bez dodatečného zaizolování v místě napojení na střešní a stropní konstrukci může mít také za následek problémy s kondenzací páry v místě osazení světlovodu.

Z ukázek je patrné, že světlovody by měly být dostatečně zvažovány již ve stádiu návrhu projektu budovy nebo její rekonstrukce. Náhodné instalace ve stávajících střechách, nebo návrhy v nových objektech bez zohlednění všech souvislostí, představují vždy riziko výše uvedených problémů. Nicméně vhodná provedení světlovodů představuje nespornou výhodu vedení denního světla do vnitřních prostor v budovách.

5 ZÁVĚR

5.1 SHRNUÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ

V úvodu této práce byly v kapitole 1.2 stanoveny cíle. Ve vztahu k těmto vytčeným cílům je uvedeno následující shrnutí dosažených výsledků.

- *Cíl 1: Vytvoření přehledu současných poznatků týkajících se denního osvětlení budov pomocí světlovodů. Popsání historického vývoje systémů vedení světla a současné možnosti a technologie tubusových světlovodů.*

Splnění cíle 1: V teoretické části práce byla provedena rešerše dostupných zdrojů týkajících se denního osvětlení budov pomocí tubusových světlovodů. Poznatky byly seřazeny chronologicky od prvních zmínek o využívání světlovodů přes přehled dosavadních způsobů jejich vývoje, posuzování a navrhování až po současné nejnovější výsledky hodnocení tubusových světlovodů publikovaných v zahraničních vědeckých časopisech.

- *Cíl 2: Vybudování konstrukce s osazením dvou sestav tubusových světlovodů za účelem světelných měření a jejich vzájemného porovnání. Příprava potřebného hardware a software pro záznam dat. Provedení kontinuálního měření denního osvětlení v rovině pod tubusovými světlovody po dobu jednoho roku.*

Splnění cíle 2: V rámci přípravy světelných měření byla vybudována speciální stavební konstrukce. Jako základní prvek byl použit stavební kontejner, který byl uvnitř rozdělen na dvě buňky identických rozměrů. Na střechu kontejneru byla navržena a instalována ocelová konstrukce umožňující montáž dvou sestav tubusových světlovodů. Byly zvoleny tubusové světlovody identických rozměru s různými typy vnitřních povrchů. Tato stavební konstrukce byla následně osazena vhodně rozmístěnými luxmetry, připojenými k PC. Dále byl navržen jednoduchý software umožňující kontinuální sběr dat po dobu jednoho roku. Data byla zaznamenávána společně s údaji o klimatických podmínkách v dané dny. Výsledky ročních měření osvětlenosti poskytly soubor dat pro

hodnocení osvětlenosti tubusových světlovodů pro různé podmínky venkovní osvětlenosti.

- *Cíl 3: Provedení měření spektrální odraznosti materiálů použitých jako vnitřní povrch tubusových světlovodů. Provedení analýzy a vyhodnocení získaných výsledků.*

Splnění cíle 3: Měření spektrální odraznosti vnitřních povrchů vzorků obou tubusových světlovodů byla provedena za účelem zjištění spektrální odraznosti ve viditelném rozsahu a spektru slunečního záření. Z výsledků měření jsou zřejmé značné rozdíly v odraznosti povrchových úprav vybraných světlovodů. Tyto výsledky poukazují na vhodnost detailního posuzování světlovodů včetně vyhodnocení jejich optických vlastností, tedy odraznosti tubusů a propustnosti transparentních částí. Především u světlovodných tubusů bývají v podkladech dodavatelů světlovodů mnohdy značně nadhodnocené hodnoty (jako např. 99,7 %), které jsou u běžných světlovodů zabudovaných ve stavbách v podstatě nedosažitelné. Z toho důvodu bylo provedeno stanovení světelných odrazností skutečných světlovodů a posouzení jejich vlivu na světelnou účinnost.

Hodnoty světelné propustnosti tubusů světlovodů vyhodnocení ze spektrálních měření posloužily jako vstupní údaje pro počítačové simulace denní osvětlenosti světlovody.

- *Cíl 4: Vyhodnocení a porovnání účinnosti přímých tubusových světlovodů v závislosti na jejich rozměrech a odraznosti vnitřních povrchů.*

Splnění cíle 4: Pomocí programu HOLIGILM byly provedeny simulační scénáře pro různé délky a průměry světlovodů. Všechny simulace byly provedeny pro podmínky s pravděpodobně nejvyšší a nejnižší polední intenzitou osvětlení v průběhu roku. Rovněž byly simulace provedeny pro různé hodnoty světelné odraznosti tubusů.

Výsledky těchto vyhodnocení poskytly informace o světelné účinnosti přímých tubusových světlovodů různých délek a průměrů i odrazností. Vyhodnocení bylo provedeno pro podmínky jasné i zatažené oblohy. Výsledky tohoto souborného

vyhodnocení jsou shrnuty do grafu, který může sloužit jako praktická pomůcka při návrhu tubusových světlovodů v budovách.

- *Cíl 5: Vyhodnocení možné úspory elektrické energie vynaložené na umělé osvětlení v případě využití tubusových světlovodů.*

Splnění cíle 5: Bylo provedeno zhodnocení úspory elektrické energie pro případ náhrady LED osvětlení tubusovým světlovodem. Výsledky ukazují, že světlovedy mohou být v mnoha případech ekvivalentním zdrojem světla. Především použití tubusových světlovodů v místnostech uprostřed dispozice budov, které musí být celý den osvětlené, jako jsou např. chodby může využití světlovodů přinést úspory elektrické energie.

- *Cíl 6: Zhodnocení možností využití tubusových světlovodů v budovách a doporučení pro jejich praktické využívání.*

Splnění cíle 6: Zhodnocení možností využití tubusových světlovodů v budovách, včetně uvedení jejich možných přínosů i případných nedostatků bylo provedeno na základě vlastních odborných zkušeností v rámci profesního zaměření autora na navrhování a realizace střešních konstrukcí a jejich částí.

5.2 PŘÍNOS DIZERTAČNÍ PRÁCE

Výsledky srovnávacích světelných měření pro instalace dvou typů světlovodů jasně poukázaly na odlišnost dvou typů podobných světlovodů a na možnosti jejich využití v praxi. Metoda srovnávacího měření je tedy využitelná u praktických instalací tubusových světlovodů v budovách. Měřicí zařízení s 11 světelnými čidly a kontinuálním sběrem dat lze použít jako prototyp pro případný vývoj komerčního sériově vyráběného měřicího zařízení.

Spektrální měření odraznosti vnitřních povrchů světlovodů poskytly informace o tom, jak výrazně může být ovlivněna funkce a účinnost tubusového světlovodu prostřednictvím jeho vnitřní povrchové úpravy. Vyhodnocení spektrálních měření přineslo zpřesnění údajů o světelné odraznosti tubusu světlovodu využitelných pro praktické posuzování a světelné modelování.

Vyhodnocení modelování tubusových světlovodů pomocí počítačového programu HOLIGILM dávají informaci o účinnosti přímých tubusových světlovodech stanované ze souboru dat pro různé rozměry a odraznosti tubusů světlovodů. Tato vyhodnocení jsou využitelná jako pomůcka pro návrh a hodnocení světlovodů. Zhodnocení úspory elektrické energie prostřednictvím použití světlovodů je užitečné pro posouzení praktického využití světlovodů do obytných a komerčních budov.

Výsledky a závěry z této dizertační práce mohou být využitelné pro efektivnější navrhování světlovodů do obytných a komerčních budov.

V neposlední řadě je však možné využít přehled vývoje a posuzování tubusových světlovodů i dílčí výsledky této práce jako podklad pro zpracování dalších podobně zaměřených doktorských dizertačních prací.

5.3 DOPORUČENÍ A NAVAZUJÍCÍ CÍLE

Na výsledky a závěry uvedené v předchozích kapitolách této práce lze dále navázat. Konkrétní doporučení pro další navazující činnost jsou:

- Provedení měření na světlovodech o různých délkách a průměrech. Vyhodnocení výsledků. Ověření účinnosti světlovodů ve vztahu k výsledkům z provedených počítačových simulací v programu HOLIGILM.
- Zpracování metodické příručky pro navrhování a posuzování tubusových světlovodů na základě získaných výsledků v této dizertační práci v souladu s požadavky a doporučeními evropské normy ČSN EN 17037.

6 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] *Fyzikální podstata světla - Časopis Světlo - Odborné časopisy* [online]. [cit. 2022-02-04]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/casopis/tema/fyzikalni-podstata-svetla--16967>
- [2] EINSTEIN, A. Quantum theory of radiation. *Physikalische Zeitschrift*. 1917, 121–128.
- [3] KAMBEZIDIS, H. The Solar Resource. In: *Comprehensive Renewable Energy* [online]. Elsevier, 2012, p. 27–84. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-08-087872-0.00302-4
- [4] DUAN, Q., Y. FENG a J. WANG. Clustering of visible and infrared solar irradiance for solar architecture design and analysis. *Renewable Energy* [online]. 2021, **165**, 668–677. ISSN 09601481. Dostupné z: doi:10.1016/j.renene.2020.11.080
- [5] GUEYMARD, Ch. A. The sun's total and spectral irradiance for solar energy applications and solar radiation models. *Solar Energy* [online]. 2004, **76**(4), 423–453. ISSN 0038092X. Dostupné z: doi:10.1016/j.solener.2003.08.039
- [6] HABEL, J. Základy světelné techniky (3) - Časopis Světlo - Odborné časopisy [online]. no date [cit. 2022-01-07]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/casopis/tema/zaklady-svetelne-techniky-3--15576>
- [7] SANASSI, L. A. Seasonal affective disorder. *Journal of the American Academy of Physician Assistants* [online]. 2014, **27**(2), 18–22. ISSN 1547-1896. Dostupné z: doi:10.1097/01.JAA.0000442698.03223.f3
- [8] *Biodynamické veřejné osvětlení* [online]. [cit. 2022-01-07]. Dostupné z: https://www.ekosvetlo.cz/obce-a-mesta/bdo/?gclid=EAIaIQobChMI5vzL8Nu18QIVCLp3Ch21pwv1EAAYASAAEgKcHfD_BwE

- [9] HABEL, J. *Základy světelné techniky (5) - Časopis Světlo - Odborné časopisy* [online]. [cit. 2022-01-07]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/casopis/tema/zaklady-svetelne-techniky-5--15757>
- [10] BAKER, N., A. FANCHIOTTI a K. STEEMERS. *Daylighting in Architecture* [online]. Routledge, 1993. ISBN 9781134074228. Dostupné z: doi:10.4324/97811315067223
- [11] DABROWSKI, P., M. KUSAKA, I. A. SAMBORSKA a H. M. KALAJI. Measuring light spectrum as a main indicator of artificial sources quality. *Journal of Coastal Life Medicine* [online]. 2015, 3(5). ISSN 23095288. Dostupné z: doi:10.12980/JCLM.3.2015J5-25
- [12] *LED Light Spectrum Enhancement with Transparent Pigmented Glazes — LED professional - LED Lighting Technology, Application Magazine* [online]. [cit. 2022-01-07]. Dostupné z: <https://www.led-professional.com/resources-1/articles/led-light-spectrum-enhancement-with-transparent-pigmented-glazes-by-light-spectrum-glazes>
- [13] ERÚ - Zprávy o provozu elektrizační soustavy. *Roční zpráva o provozu elektrizační soustavy pro rok 2020* [online]. 2021 [cit. 2022-02-07]. Dostupné z: <https://www.eru.cz/zpravy-o-provozu-elektrizacni-soustavy#2020>
- [14] *Spotřeba paliv a energií v domácnostech | ČSÚ* [online]. [cit. 2022-01-07]. Dostupné z: <https://www.czso.cz/csu/czso/spotreba-paliv-a-energi-v-domacnostech>
- [15] DARULA, S., R. KITTLER, M. KOCIFAJ, J. PLCH, J. MOHELNÍKOVÁ a F. VAJKAY. *Osvětlování světlovody*. Praha: Grada Publishing, a.s., 2009. ISBN 978-80-247-2459-1.
- [16] ČIKOLEV, V. N. Kanalizacija električeskogo sveta . *Električestvo*. 1880, 168.
- [17] MOLERA, E. J. a J.C. CEBRIAN. Molera & Cebrian's system of electric lighting. *American Industries*. 1879.

- [18] HANNEBORG, O. B. H. Apparatus for transmitting sunlight to basements or other stories [online]. United States patent 668.404. 1901. USA. [cit. 2022-02-09]. Dostupné z: <https://patents.google.com/patent/US668404A/en>
- [19] AIZENBERG, J.B., G. B. BUKHMAN a V. I. ANDREENKO. Interior lighting fixture [online]. United states patent 3.902.056. 1975. USA. [cit. 2022-02-09]. Dostupné z: <https://patents.google.com/patent/US3902056A/en>
- [20] *Historie vývoje a užití dutých světlovodů - 1. část - Časopis Světlo - Odborné časopisy* [online]. [cit. 2022-02-04]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/casopis/tema/historie-vyvoje-a-uziti-dutych-svetlovodu-1-cast--16956>
- [21] ZASTROW, A. a V. WITWER. Daylighting with Mirror Light Pipes and with Fluorescent Planar Concentrators. First Results from the Demonstration Project Stuttgart-Hohenheim. In: [online]. 1987, p. 227. Dostupné z: doi:10.1117/12.936710
- [22] LITTLEFAIR, P. J. Innovative daylighting systems. *BRE information paper*. 1989, (22).
- [23] LITTLEFAIR, P. J. *Designing with Innovative Daylighting*. BREPress, 1996. ISBN 1-86081-046-2.
- [24] EDMONDS, I.R., G.I. MOORE, G.B. SMITH a P.D. SWIFT. Daylighting enhancement with light pipes coupled to laser-cut light-deflecting panels. *Lighting Research and Technology* [online]. 1995, **27**(1), 27–35. ISSN 1477-1535. Dostupné z: doi:10.1177/14771535950270010101
- [25] SWIFT, P.D. a G.B. SMITH. Cylindrical mirror light pipes. *Solar Energy Materials and Solar Cells* [online]. 1995, **36**(2), 159–168. ISSN 09270248. Dostupné z: doi:10.1016/0927-0248(94)00172-3

- [26] AYERS, M.J. a D.J. CARTER. Remote source electric lighting systems: A review. *Lighting Research and Technology* [online]. 1995, **27**(1), 1–15. ISSN 1477-1535. Dostupné z: doi:10.1177/14771535950270010501
- [27] LOVE, J. A. a P. DRATNAL. *Photometric comparison of mirror light pipes, Unpublished report*. Calgary: University of Calgary, 1995.
- [28] SHAO, L., S.B. RIFFAT, W. HICKS a I. YOHANNES. A study of performance of light pipes under cloudy and sunny conditions in the UK. *Right Light*. 1997, **4**(1), 155–159.
- [29] SHAO, L. a J. M. CALLOW. Daylighting performance of optical rods. *Solar Energy* [online]. 2003, **75**(6), 439–445. ISSN 0038092X. Dostupné z: doi:10.1016/j.solener.2003.09.015
- [30] ELMUALIM, A.A., S. SMITH, S.B. RIFFAT a L. SHAO. Evaluation of dichroic material for enhancing light pipe/natural ventilation and daylighting in an integrated system. *Applied Energy* [online]. 1999, **62**(4), 253–266. ISSN 03062619. Dostupné z: doi:10.1016/S0306-2619(99)00014-8
- [31] OAKLEY, G., S.B. RIFFAT a L. SHAO. Daylight performance of lightpipes. *Solar Energy* [online]. 2000, **69**(2), 89–98. ISSN 0038092X. Dostupné z: doi:10.1016/S0038-092X(00)00049-9
- [32] SHAO, L., A.A. ELMUALIM a I. YOHANNES. Mirror lightpipes : Daylighting performance in real buildings. *Lighting Research and Technology* [online]. 1998, **30**(1), 37–44. ISSN 1477-1535. Dostupné z: doi:10.1177/096032719803000106
- [33] SHAO, L. a S.B. RIFFAT. Daylighting using light pipes and its integration with solar heating and natural ventilation. *Lighting Research and Technology* [online]. 2000, **32**(3), 133–139. ISSN 1477-1535. Dostupné z: doi:10.1177/096032710003200305

- [34] SMITH, S., G. OAKLEY, L. SHAO a S. B. RIFFAT. Triplesave - the investigation and monitoring of a combined natural daylighting and stack ventilation system. In: *CIBSE national conference*. 2002.
- [35] HARRISON, S. J., G. G. MCCURDY a R. COOKE. Preliminary evaluation of the daylight and thermal performance of cylindrical skylights. In: *Proceedings of International Daylight Conference, Ottawa, Canada*. 1998, p. 205–212.
- [36] YOHANNES, I. *Characterising the performance of light-pipes in the UK climate*. Nottingham, 2001. Diplomová práce. University of Nottingham.
- [37] ZHANG, X. a T. MUNEER. Mathematical model for the performance of light pipes. *Lighting Research and Technology* [online]. 2000, **32**(3), 141–146. ISSN 1477-1535. Dostupné z: doi:10.1177/096032710003200306
- [38] ZHANG, X. *Daylighting performance of tubular solar light pipes: measurement, modeling and validation*. Edinburg, 2002. Dizertační práce. Napier University.
- [39] CARTER, D. J. The measured and predicted performance of passive solar light pipe systems. *Lighting Research & Technology* [online]. 2002, **34**(1), 39–51. ISSN 1477-1535. Dostupné z: doi:10.1191/1365782802li029oa
- [40] CALLOW, J. M. *Daylighting Using Tubular Light Guide Systems*. Nottingham, 2003. Dizertační práce. University of Nottingham.
- [41] MARWAEE, M. a D. J. CARTER. A field study of tubular daylight guidance installations. *Lighting Research & Technology* [online]. 2006, **38**(3), 241–258. ISSN 1477-1535. Dostupné z: doi:10.1191/1365782806lrt170oa
- [42] CHELLA, F., P. ZAZZINI a G. CARTA. Compared numerical and reduced scale experimental analysis on light pipes performances. In: *5th International Conference on Sustainable Energy Technologies SET 2006*. 2006, p. 263–268.

- [43] BARONCINI, C., F. CHELLA a P. ZAZZINI. Experimental analysis of tubular light pipes performances: influence of the diffuser on inside distribution of light. In: *5th International Conference on Sustainable Energy Technologies SET 2006*. 2006, p. 219–224.
- [44] ZAZZINI, P., F. CHELLA a A. SCARDUZIO. Numerical and experimental analysis of light pipes' performances: comparison of the obtained results. In: *The 23rd Conference on Passive and Low Energy Architecture*. 2006, p. 219–224.
- [45] BOCCIA, O., F. CHELLA a P. ZAZZINI. Innovative Devices for Daylighting and Natural Ventilation in Architecture. *Solar Radiation* [online]. 2012 [cit. 2022-01-11]. Dostupné z: doi:10.5772/34823
- [46] KOCIFAJ, M., S. DARULA a R. KITTLER. HOLIGILM: Hollow light guide interior illumination method – An analytic calculation approach for cylindrical light-tubes. *Solar Energy* [online]. 2008, **82**(3), 247–259. ISSN 0038092X. Dostupné z: doi:10.1016/j.solener.2007.07.003
- [47] KOCIFAJ, M. Analytical solution for daylight transmission via hollow light pipes with a transparent glazing. *Solar Energy* [online]. 2009, **83**(2), 186–192. ISSN 0038092X. Dostupné z: doi:10.1016/j.solener.2008.07.012
- [48] KOCIFAJ, M., F. KUNDRACIK, S. DARULA a R. KITTLER. Theoretical solution for light transmission of a bended hollow light guide. *Solar Energy* [online]. 2010, **84**(8), 1422–1432. ISSN 0038092X. Dostupné z: doi:10.1016/j.solener.2010.05.002
- [49] DARULA, S., M. KOCIFAJ, R. KITTLER a F. KUNDRACIK. Illumination of interior spaces by bended hollow light guides: Application of the theoretical light propagation method. *Solar Energy* [online]. 2010, **84**(12), 2112–2119. ISSN 0038092X. Dostupné z: doi:10.1016/j.solener.2010.09.003

- [50] MOHELNIKOVA, J. Tubular light guide evaluation. *Building and Environment* [online]. 2009, **44**(10), 2193–2200. ISSN 03601323. Dostupné z: doi:10.1016/j.buildenv.2009.03.015
- [51] MOHELNIKOVA, J. a F. VAJKAY. Light guides as energy saving alternative for windowless interiors. *WSEAS Transactions on Environment and Development*. 2007, **3**(2), 45–49.
- [52] KIM, J. T. a G. KIM. Overview and new developments in optical daylighting systems for building a healthy indoor environment. *Building and Environment* [online]. 2010, **45**(2), 256–269. ISSN 03601323. Dostupné z: doi:10.1016/j.buildenv.2009.08.024
- [53] SU, Y., N. KHAN, S. B. RIFFAT a G. OAKLEY. Comparative monitoring and data regression of various sized commercial lightpipes. *Energy and Buildings* [online]. 2012, **50**, 308–314. ISSN 03787788. Dostupné z: doi:10.1016/j.enbuild.2012.03.053
- [54] LO VERSO, V. R.M., A. PELLEGRINO a V. SERRA. Light transmission efficiency of daylight guidance systems: An assessment approach based on simulations and measurements in a sun/sky simulator. *Solar Energy* [online]. 2011, **85**(11), 2789–2801. ISSN 0038092X. Dostupné z: doi:10.1016/j.solener.2011.08.017
- [55] TSANG, E.K.W., M. KOCIFAJ, D. H.W. LI, F. KUNDRACIK a J. MOHELNIKOVÁ. Straight light pipes' daylighting: A case study for different climatic zones. *Solar Energy* [online]. 2018, **170**, 56–63. ISSN 0038092X. Dostupné z: doi:10.1016/j.solener.2018.05.042
- [56] PETRŽALA, J., M. KOCIFAJ a L. KÓMAR. Accurate tool for express optical efficiency analysis of cylindrical light-tubes with arbitrary aspect ratios. *Solar Energy* [online]. 2018, **169**, 264–269. ISSN 0038092X. Dostupné z: doi:10.1016/j.solener.2018.04.053
- [57] KADIR, A., L. HAKIM ISMAIL, N. KASIM, I. ABD WAHAB, M. KAAMIN, N. NGADIMAN a M. SHAFIQ BIN MOHD ROSLI. Improving the Performance of Light Pipe System Using Laser Cut Panel. *Journal of Physics: Conference Series* [online].

- 2019, **1150**, 012064. ISSN 1742-6588. Dostupné z: doi:10.1088/1742-6596/1150/1/012064
- [58] MAYHOUB, M.S. Fifty years of building core sunlighting systems – Eight lessons learned. *Solar Energy* [online]. 2019, **184**, 440–453. ISSN 0038092X. Dostupné z: doi:10.1016/j.solener.2019.03.097
- [59] KIM, C. a K. KIM. Development of Sky Luminance and Daylight Illuminance Prediction Methods for Lighting Energy Saving in Office Buildings. *Energies* [online]. 2019, **12**(4), 592. ISSN 1996-1073. Dostupné z: doi:10.3390/en12040592
- [60] BAGLIVO, C., M. BONOMOLO a P.M. CONGEDO. Modeling of Light Pipes for the Optimal Disposition in Buildings. *Energies* [online]. 2019, **12**(22), 4323. ISSN 1996-1073. Dostupné z: doi:10.3390/en12224323
- [61] SUNGSOONTORN, S., D. NONTHIWORAWONG, P. RATTANADECHO a R. PROMMAS. Experimental Investigation of Attic Heat Gain Reduction and Indoor Illuminance Using a Light-Vent Pipe. *International Journal of Heat and Technology* [online]. 2019, **37**(4), 1171–1179. ISSN 03928764. Dostupné z: doi:10.18280/ijht.370427
- [62] REZK, H., M.R. GOMAA, M.M. MARMOUSH, N. SHEHATA a J. HENRY. Theoretical and experimental performance investigation of a newly combined TDD and SWH system. *Applied Thermal Engineering* [online]. 2019, **161**, 114156. ISSN 13594311. Dostupné z: doi:10.1016/j.applthermaleng.2019.114156
- [63] OBRADOVIC, B. a B. MATUSIAK. Daylight autonomy improvement in buildings at high latitudes using horizontal light pipes and light-deflecting panels. *Solar Energy* [online]. 2020, **208**, 493–514. ISSN 0038092X. Dostupné z: doi:10.1016/j.solener.2020.07.074

- [64] HENG, C.Y.S., Y. LIM a D.R. OSSEN. Horizontal light pipe transporter for deep plan high-rise office daylighting in tropical climate. *Building and Environment* [online]. 2020, **171**, 106645. ISSN 03601323. Dostupné z: doi:10.1016/j.buildenv.2020.106645
- [65] SIBLEY, M. a A. PEÑA-GARCÍA. Flat Glass or Crystal Dome Aperture? A Year-Long Comparative Analysis of the Performance of Light Pipes in Real Residential Settings and Climatic Conditions. *Sustainability* [online]. 2020, **12**(9), 3858. ISSN 2071-1050. Dostupné z: doi:10.3390/su12093858
- [66] LU, S., Z. YU a M. FAN. Multi-layered and multi-dimensional suitability evaluation of tubular daylight guidance systems. *Journal of Building Engineering* [online]. 2020, **32**, 101820. ISSN 23527102. Dostupné z: doi:10.1016/j.jobbe.2020.101820
- [67] SINGH, S., D.S. BISHT a H. GARG. A novel method for making laser cut panel based daylight collector coupled to a tubular light guide. *Solar Energy* [online]. 2021, **218**, 532–543. ISSN 0038092X. Dostupné z: doi:10.1016/j.solener.2021.02.015
- [68] MAHAWAN, J. a A. THONGTHA. Experimental Investigation of Illumination Performance of Hollow Light Pipe for Energy Consumption Reduction in Buildings. *Energies* [online]. 2021, **14**(2), 260. ISSN 1996-1073. Dostupné z: doi:10.3390/en14020260
- [69] BISHT, D.S., S. SINGH, K. SHARMA, Harry GARG a R.R. SHRAVANA KUMAR. Performance analysis of a passive tubular skylight using rectilinear parabolic-profile integrated with plane reflectors and wedge prism. *Solar Energy* [online]. 2021, **222**, 235–258. ISSN 0038092X. Dostupné z: doi:10.1016/j.solener.2021.05.015
- [70] OBRADOVIC, B. a B. MATUSIAK. A customised method for estimating light transmission efficiency of the horizontal light pipe via a temporal parameter with an example application using laser-cut panels as a collector. *MethodsX* [online]. 2021, **8**, 101339. ISSN 22150161. Dostupné z: doi:10.1016/j.mex.2021.101339

- [71] SHARMA, K., V. KUMAR, D.S. BISHT a H. GARG. Comparative study of acrylic flat plate and dome shaped collector for summer and winter solstice conditions. *Materials Today: Proceedings* [online]. 2021, **45**, 5489–5493. ISSN 22147853. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2021.02.200
- [72] MOHAPATRA, , M.R. KUMAR a S.K. MANDAL. Analysis of light tubes in interior daylighting system for building. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science* [online]. 2020, **17(2)**, 710. ISSN 2502-4760. Dostupné z: doi:10.11591/ijeecs.v17.i2.pp710-719
- [73] CARTER, D. LRT Digest 2 Tubular daylight guidance systems. *Lighting Research & Technology* [online]. 2014, **46(4)**, 369–387. ISSN 1477-1535. Dostupné z: doi:10.1177/1477153514526081
- [74] KOCIFAJ, M. Efficient tubular light guide with two-component glazing with Lambertian diffuser and clear glass. *Applied Energy* [online]. 2009, **86(7–8)**, 1031–1036. ISSN 03062619. Dostupné z: doi:10.1016/j.apenergy.2008.10.003
- [75] *Slovník | Světlo v praxi* [online]. [cit. 2022-01-11]. Dostupné z: <https://svetlovpraxi.cz/slovník/>
- [76] ČSN EN 17037. *Denní osvětlení budov*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2019.
- [77] CIE 173:2012, *Tubular Daylight Guidance Systems*, Commission Internationale de L'Eclairage, 2012.
- [78] ISO 15469:2004. *Spatial distribution of daylight — CIE standard general sky*, CIE International Commission on Illumination, 2004.
- [79] DARULA, S. a R. KITTLER. *Research of the Year – Round Availability for the Computer Evaluation of Sustainable Buildings*. 2005.

- [80] MOHELNIKOVA, J., S. DARULA, A. OMISHORE, P. MOHELNIK a D. MICEK. Light Guide Collector Prototype: Laboratory Testing. *International Journal of Sustainable Lighting* [online]. 2017, **19**(2), 124. ISSN 2586-1247. Dostupné z: doi:10.26607/ijsl.v19i2.81
- [81] ASTM G173-03(2012). *Standard Tables for Reference Solar Spectral Irradiances: Direct Normal and Hemispherical on 37° Tilted Surface*, ASTM International, 2012.
- [82] ISO 9050:2003. *Glass in building — Determination of light transmittance, solar direct transmittance, total solar energy transmittance, ultraviolet transmittance and related glazing factors*, Technical Committee : ISO/TC 160/SC 2, 2003.
- [83] SHARMA, L., S.F. ALI a D. RAKSHIT. Performance evaluation of a top lighting light-pipe in buildings and estimating energy saving potential. *Energy and Buildings* [online]. 2018, **179**, 57–72. ISSN 03787788. Dostupné z: doi:10.1016/j.enbuild.2018.09.022
- [84] MORGAN PATTISON, P., M. HANSEN a J.Y. TSAO. LED lighting efficacy: Status and directions. *Comptes Rendus Physique* [online]. 2018, **19**(3), 134–145. ISSN 16310705. Dostupné z: doi:10.1016/j.crhy.2017.10.013
- [85] DAY, A.R., P. OGUMKA, P.G. JONES a A. DUNSDON. The use of the planning system to encourage low carbon energy technologies in buildings. *Renewable Energy* [online]. 2009, **34**(9), 2016–2021. ISSN 09601481. Dostupné z: doi:10.1016/j.renene.2009.02.003
- [86] YAO, R. *Design and Management of Sustainable Built Environments* [online]. London: Springer London, 2013. ISBN 978-1-4471-4780-0. Dostupné z: doi:10.1007/978-1-4471-4781-7

SEZNAM POUŽITÝCH TABULEK

Tab. 2.1 Tabulka fotometrických veličin.....	9
Tab. 4.1 Měřené a simulované hodnoty osvětlenosti na referenční rovině pod LP1 a LP2, Ostrovačice, dne 26. srpna 2015 ve 12:00 hod, jasná obloha	52
Tab. 4.2 Měřené a simulované hodnoty osvětlenosti na referenční rovině pod LP1 a LP2, Ostrovačice, dne 11. února 2015 ve 12:00 hod, zatažená obloha	52

SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ

Obr. 2.1 Elektromagnetické spektrum [3].....	8
Obr. 2.2 Typická světelná spektra pro denní osvětlení a umělé zdroje: žárovka, fluorescentní a LED [12].....	12
Obr. 2.3 Světlovod a jeho základní části [72].....	22
Obr. 2.4 Modelová trajektorie světelného paprsku [74] Pro světlovodný tubus délky 2 m a průměr 0,52m. Uvažováno pro vstupní úhly světelného paprsku 30° (a), 60° (b) a 80° (c)....	25
Obr. 3.1 Testovací kontejner s podpůrnou konstrukcí se světlovody, Ostrovačice.....	29
Obr. 3.2 Testovací kontejner rozdělený na dvě buňky se světlovody LP1 a LP2	29
Obr. 3.3 Schéma instalace luxmetrů pod světlovody Zkratky: rd –střešní kopule, cd – stropní difuzor, t1 a t2 – tubusy soustav LP1 a LP2.	30
Obr. 3.4 Instalace měřícího zařízení – buňka 1 umístěná v části se vstupními dveřmi.....	32
Obr. 3.5 Instalace měřícího zařízení – buňka 1 a buňka 2 odděleny vnitřní příčkou s dveřmi 32	
Obr. 3.6 Schéma rozmístění jednotlivých luxmetrů v buňkách LP1 – Světlovod v buňce 1 (průměr 0,53m, délka 2,5 m), LP2 – Světlovod v buňce 2 (průměr 0,55m, délka 2,5 m), 11 – venkovní luxmetr snímající exteriérovou horizontální osvětlenost, 1–5 – vnitřní luxmetry v buňce 1, 6–10 – vnitřní luxmetry v buňce 2	33
Obr. 3.7 Sada interiérových luxmetrů.....	34
Obr. 3.8 Externí luxmetr s transparentním krytem	34
Obr. 3.9 Podstava pro měřící zařízení, umístěná v buňce 1 pod světlovodem LP1.....	35

Obr. 3.10 Schéma zapojení luxmetrů ke sběrnici a k počítači.....	35
Obr. 3.11 Sběrnice pro zpracování naměřených dat.....	36
Obr. 3.12 Fotografie kamery Rollei d30 flex umístěné vedle čidla luxmetru v ose pod světlovodem.....	39
Obr. 3.13 Pozice instalace kamery Rollei d30 flex pro spektrální měření propustnosti tubusovým světlovodem na referenční rovině pod difuzorem světlovodu.....	40
Obr. 3.14 Schéma tubusového světlovodu s parametry pro stanovení jeho účinnosti.....	43
Obr. 4.1 Charakteristické denní profily osvětlenosti změřené luxmetry 1 až 10 a) jasná obloha b) polojasná obloha s dynamickými změnami osvětlenosti.....	44
Obr. 4.2 Průběh denní osvětlenosti v buňce 1 s LP1 měřeno luxmetrem 1 a v buňce 2 s LP2 měřeno luxmetrem 6, období únor až říjen 2015. a) jasná obloha b) zatažená obloha.....	45
Obr. 4.3 Hodnoty denní osvětlenosti – maximální, medián, průměr, zaznamenané v březnu 2015, jako vzorek dat naměřených během přechodného ročního období.....	46
Obr. 4.4 Hodnoty denní osvětlenosti – maximální, medián, průměr, zaznamenané v srpnu 2015, jako vzorek dat během letního ročního období.....	47
Obr. 4.5 Hodnoty spektrální odraznosti na vnitřním povrchu světlovodného tubusu v rozsahu vlnových délek 300-2500 nm.....	48
Obr. 4.6 Hodnoty spektrální odraznosti na vnitřním povrchu tubusu ve viditelném spektru 380-780 nm.	49
Obr. 4.7 Spektrální propustnost světlovodu LP1 a LP2 v porovnání se spektrem denního osvětlení.....	49

Obr. 4.8 Hodnoty globální horizontální osvětlenosti: a) jasná obloha, měřeno 26. srpna 2015 b) zatažená obloha, měřeno 11. února 2015.....	50
Obr. 4.9 HOLIGILM simulace osvětlenosti na referenční rovině, 26. srpna 2015 ve 12:00hod., jasná obloha a) Tubusový světlovod LP1 b) Tubusový světlovod LP2.....	51
Obr. 4.10 HOLIGILM simulace osvětlenosti na referenční rovině, 11. února 2015 ve 12:00 hod., zatažená obloha a) Tubusový světlovod LP1 b) Tubusový světlovod LP2	51
Obr. 4.11 HOLIGILM simulace osvětlenosti pro světlovod o průměru $D = 0,7$ m, délku $L = 1$ m a odraznost tubusu $\rho = 0.98$; simulováno pro jasnou oblohu (21. června, 12:00) a zataženou oblohu (21. prosince, 12:00) a) Osvětlenost [lx] na referenční rovině 2 m pod světlovodem b) Osvětlenost [lx] na difuzoru světlovodu určené pro výstupní světelný tok Φ_i [lm], venkovní horizontální osvětlenost E_e [klx] a účinnost světlovodu η [%].	55
Obr. 4.12 HOLIGILM simulace osvětlenosti pro světlovod o průměru $D = 0.3$ m, délka $L = 3$ m a odraznost tubusu $\rho = 0.90$; simulováno pro jasnou oblohu (21. června, 12:00) a zataženou oblohu (21. prosince, 12:00) a) Osvětlenost [lx] na referenční rovině 2 m pod světlovodem b) Osvětlenost [lx] na difuzoru světlovodu určené pro výstupní světelný tok Φ_i [lm], venkovní horizontální osvětlenost E_e [klx] a účinnost světlovodu η [%]......	56
Obr. 4.13 Účinnost tubusového světlovodu v závislosti na odraznosti tubusu L – délka tubusu světlovodu, D – průměr světlovodu v m, # - jasná obloha (21. června ve 12hod.), * - zatažená obloha (21.prosince ve 12hod.).....	58
Obr. 4.14 Závislost propustnosti světla světlovodem na odraznosti vnitřního povrchu tubusu světlovodu L – délka tubusu v m, D – průměr světlovodu v m, vyhodnoceno pro dopadající světelné paprsky pod úhlem 45°	59
Obr. 4.15 Světelný tok Φ_i vstupující do interiéru z tubusového světlovodu (TS), D – průměr tubusu světlovodu.	61

Obr. 4.16 Počet LED 13 W svítidel ekvivalentních k osvětlení tubusovým světlovodem (TS), D – průměr tubusu světlovodu.....	62
Obr. 4.17 Instalace světlovodů průměru 350 mm na chodbě v rezidenčním objektu.....	66
Obr. 4.18 Instalace světlovodů průměru 530 mm, použití přechodového kusu do rastru sádrokartonového podhledu.....	67
Obr. 4.19 Instalace světlovodu do halového kancelářského vestavku.....	68
Obr. 4.20 Použití kolen a prodlužovacích kusů ke svedení tubusového světlovodu z jižně orientované střešní roviny do interiéru	68
Obr. 4.21 Použití kolen a prodlužovacích kusů ke svedení tubusového světlovodu do kancelářských prostor uvnitř dispozice.....	69
Obr. 4.22 Řada nadstřešní kopulí tubusových světlovodů instalovaných do skládané střešní krytiny.....	69
Obr. 4.23 Světlovod zabudovaný do falcované krytiny.....	70
Obr. 4.24 Nadstřešní část světlovodu na ploché střeše s povlakovou hydroizolací.	71
Obr. 4.25 Zatečení srážkové vody v místě světlovodu	72
Obr. 4.26 Deformace světlovodného tubusu v místě ohybu.....	73

SEZNAM POUŽITÝCH FYZIKÁLNÍCH VELIČIN A JEDNOTEK

φ	Světelný tok [lm]
I	Svítivost [cd]
E	Intenzita osvětlení [lx]
L	Jas [$\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$]
l	Délka tubusového světlovodu [m]
r	Poloměr tubusového světlovodu [m]
d	Průměr tubusového světlovodu [m]
S	Plocha průřezu střešní kopule [m^2]
h	Vzdálenost mezi stropním difuzorem a referenční rovinou [m]
ω	Prostorový úhel [sr]
Φ_e	Vstupní světelný tok [lm]
Φ_i	Světelný tok vystupující do interiéru [lm]
E_e	Intenzita osvětlení v exteriéru [lx]
E_i	Intenzita osvětlení na referenční rovině [lx]
V	Svislá vzdálenost mezi difuzorem a vztažnou rovinou [m]
η	Účinnost tubusového světlovodu [%]
P	Elektrický příkon svítidla [W]
e	Světelná účinnost zdroje umělého světla [lm/W]
E_n	Elektrická energie umělého osvětlení [kWh]
ρ	Světelná odraznost povrchu [-]
τ	Světelná propustnost [-]
TS	Tubusový světlovod
LP1	Sestava tubusového světlovodu č.1
LP2	Sestava tubusového světlovodu č.2
MBD	Střední odchylka
RMSD	Střední kvadratická odchylka
t1	Tubus světlovodu č.1
t2	Tubus světlovodu č.2

rd Střešní kopule
cd Stropní difuzor